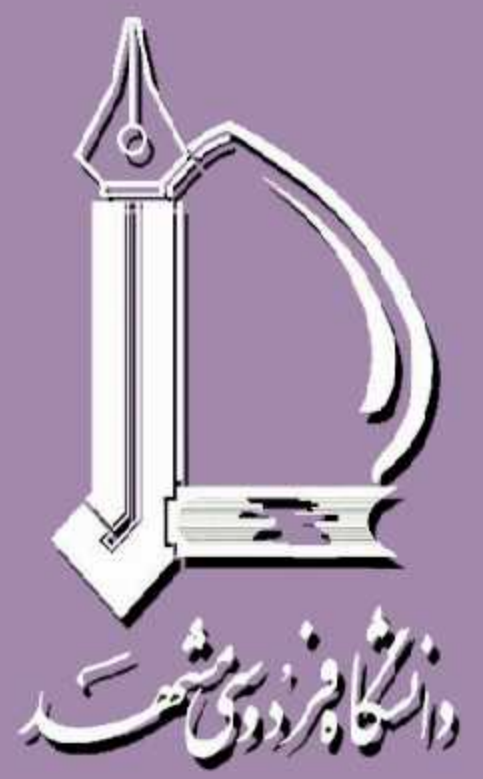




انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی - پژوهشی ماشین های کشاورزی



جلد ۷ شماره ۱

سال ۱۳۹۶

(شماره پیاپی: ۱۳)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

- ۱..... ساخت و ارزیابی دستگاه دانه کن انار ارتعاشی - بادی
سید مهدی نصیری، سحر صمصامی، محمد لغوی
- ۱۳..... طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه شبیه ساز جمع کننده تخت خورشیدی با استفاده از ضریب ترموهیدرولیکی
حامد رحمتی آیدنلو، علی محمد نیکبخت
- ۲۶..... آزمون و ارزیابی یک نوع خاک همزن دوار با تیغه های مثلثی لبه مضرسی
حسین غلامی، داود کلانتری، مجید رجبی و نندجالی
- ۳۷..... انتخاب بهترین ادوات خاک ورز به لحاظ مصرف بهینه انرژی با استفاده از روش تحلیل ساده وزنی شده
کوروش اندکایی زاده، محمد جواد شیخ داودی، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی
- ۴۸..... تحلیل عوامل مؤثر بر برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان
حامد عابدی، سعید فیروزی، محمدصادق اللهیاری
- ۶۱..... ارزیابی عوامل فنی سم پاش توربینی زراعی بر کیفیت پاشش و قطر قطرات با پردازش تصویر
فائزه بهزادی پور، محمود قاسمی نژاد رایینی، محمدامین آسودار، افشین مرزبان، سامان آبدانان مهدی زاده
- ۷۳..... کاربرد تبدیل هاف تعمیم یافته در تشخیص گیاه چغندر قند از علف هرز با استفاده از ماشین بینایی
عادل بخشی پور، عبدالعباس جعفری، یحیی امام، سید مهدی نصیری، سعادت کامگار، داریوش زارع
- ۸۶..... تحلیل فرکانس سیگنال های صوتی کمباین سمپو مدل ۳۰۶۵
فرزاد مهدیه بروجنی، علی ملکی
- شبیه سازی عددی فرآیندهای انتقال رطوبت و گرما در خشک کردن همرفتی هویج پیش تیمار شده
با امواج اولتراسوند و مایکروویو
۹۷.....
رضا رستمی باروجی، سیدصادق سیدلوهریس، جلال دهقان نیا
- ۱۱۴..... ارزیابی و مقایسه خشک کن خورشیدی همرفت طبیعی و اجباری برای خشک کردن سبزیجات در استان خوزستان
جعفر حبیبی اصل، لیلا بهبهانی، آذرخش عزیززی
- ۱۲۶..... اثر متغیرهای سامانه آکوستیک بر سیگنال های صدای دو رقم خرپزه
فرهاد خوشنام، سید رضاحسن بیگی بیدگلی، مسلم نامجو، مهدیه دوروزی
- ۱۴۰..... پیش بینی غیرمخرب سفتی سیب در طول دوره انبارداری بر پایه تصاویر نقطه ای دینامیکی
بهاره جمشیدی، آرمان عارفی، سعید مینایی
- بررسی اثر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر زمان فرآیند، انرژی مصرفی و کیفیت محصول در تولید
رب گوجه فرنگی به روش گرمایش اهمی
۱۵۲.....
مهدی ترکیان بلداجی، علی محمد برقی، بابک بهشتی، سید ابراهیم حسینی
- ۱۶۵..... بررسی ارتعاشات موتور تراکتور MF285 بر اثر ترکیبات مختلف سوخت بیودیزل به کمک روش های
آماری و ANFIS
علی سفرنگیان، لیلا ندرلو، حسین جوادی کیا، مصطفی مصطفایی، سید سعید محتسبی
- ۱۷۷..... تأثیر زمان پاشش بر آنالیز انرژی و اکسرژی یک موتور دیزل با سوخت بیودیزل
امین فرهادی، سجاد رستمی، برات قبادیان، شاهین بشارتی

نشریه ماشین های کشاورزی

با شماره پروانه ۸۹/۱۲۶۳۹ و درجه علمی - پژوهشی شماره ۳/۱۱/۳۷۸۱ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
۸۹/۶/۱۳
۸۹/۳/۱۷

نیمسال اول ۱۳۹۶

شماره ۱

جلد ۷

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد (دانشکده کشاورزی)

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیأت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
برقعی، علی محمد	استاد- عضو انجمن مهندسان مکانیک ایران
ثقفی، محمود	استاد- عضو انجمن مهندسان مکانیک ایران
خزائی، جواد	دانشیار- گروه ماشین های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس ابوریحان)
خوش تقاضا، محمدهادی	دانشیار- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه تربیت مدرس)
رفیعی، شاهین	استاد- گروه ماشین های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)
عباسپور فرد، محمدحسین	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
علیمردانی، رضا	استاد- گروه ماشین های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)
غضنفری مقدم، احمد	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شهید باهنر کرمان)
کدخدایان، مهران	استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)
لغوی، محمد	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شیراز)
مدرس رضوی، محمدرضا	استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

شمارگان: ۲۰ نسخه

قیمت ۵۰۰۰ ریال (دانشجویان ۲۵۰۰ ریال)

نشانی: مشهد- کد پستی ۹۱۷۷۵ صندوق پستی ۱۱۶۳

دانشکده کشاورزی- دبیرخانه نشریات علمی - نشریه ماشین های کشاورزی - نمابر: ۰۵۱۳۸۷۸۷۴۳۰

این نشریه در پایگاه های زیر نمایه شده است:

پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

پست الکترونیک: Jame@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت <http://jame.um.ac.ir> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۲ شماره در سال چاپ و منتشر می شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- ۱ ساخت و ارزیابی دستگاه دانه‌کن انار ارتعاشی - بادی
سید مهدی نصیری، سحر صمصامی، محمد لغوی
- ۱۳ طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه شبیه‌ساز جمع‌کننده تخت خورشیدی با استفاده از ضریب ترموهیدرولیکی
حامد رحمتی آبدنلو، علی محمد نیکبخت
- ۲۶ آزمون و ارزیابی یک نوع خاک‌همزن دوار با تیغه‌های مثلثی لبه مضرسی
حسین غلامی، داود کلاتری، مجید رجبی وندچالی
- ۳۷ انتخاب بهترین ادوات خاک‌ورز به لحاظ مصرف بهینه انرژی با استفاده از روش تحلیل ساده وزنی شده
کوروش اندکایی زاده، محمد جواد شیخ داودی، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی
- ۴۸ تحلیل عوامل مؤثر بر برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان
حامد عابدی، سعید فیروزی، محمدصادق اللهیاری
- ۶۱ ارزیابی عوامل فنی سم‌پاش توربینی زراعی بر کیفیت پاشش و قطر قطرات با پردازش تصویر
فانزه بهزادی‌پور، محمود قاسمی نژاد رایینی، محمدامین آسودار، افشین مرزبان، سامان آبدانان مهدی زاده
- ۷۳ کاربرد تبدیل هاف تعمیم یافته در تشخیص گیاه چغندر قند از علف هرز با استفاده از ماشین بینایی
عادل بخشی پور، عبدالعباس جعفری، یحیی امام، سید مهدی نصیری، سعادت کامگار، داریوش زارع
- ۸۶ تحلیل فرکانس سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو مدل ۳۰۶۵
فرزاد مهدیه بروجنی، علی ملکی
- ۹۷ شبیه‌سازی عددی فرآیندهای انتقال رطوبت و گرما در خشک‌کردن همرفتی هویج پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند و مایکروویو
رضا رستمی باروجی، سیدصادق سیدلوهریس، جلال دهقان‌نیا
- ۱۱۴ ارزیابی و مقایسه خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی و اجباری برای خشک کردن سبزیجات در استان خوزستان
جعفر حبیبی اصل، لیلا بهبهانی، آذرخش عزیز
- ۱۲۶ اثر متغیرهای سامانه آکوستیک بر سیگنال‌های صدای دو رقم خرپزه
فرهادخوشنام، سید رضاحسن بیگی بیدگلی، مسلم نامجو، مهدیه دوروزی
- ۱۴۰ پیش‌بینی غیرمخرب سفتی سبب در طول دوره انبارداری بر پایه تصاویر نقطه‌ای دبنامیکی
بهاره جمشیدی، آرمان عارفی، سعید مینایی
- ۱۵۲ بررسی اثر گرادبان ولتاژ و نوع الکتروود بر زمان فرآیند، انرژی مصرفی و کیفیت محصول در تولید رب گوجه‌فرنگی به روش گرمایش اهمی
مهدی ترکیان بلداجی، علی محمد برقی، بابک بهشتی، سید ابراهیم حسینی
- ۱۶۵ بررسی ارتعاشات موتور تراکتور MF285 بر اثر ترکیبات مختلف سوخت بیودیزل به کمک روش‌های آماری و ANFIS
علی سفرنگیان، لیلا ندرلو، حسین جوادی کیا، مصطفی مصطفایی، سید سعید محتسبی
- ۱۷۷ تأثیر زمان پاشش بر آنالیز انرژی و اکسرژی یک موتور دیزل با سوخت بیودیزل
امین فرهادی، سجاد رستمی، برات قبادیان، شاهین بشارتی

- ۱۹۲ تحلیل کمی و کیفی بیوگاز تولیدی از هضم کودگاوی، فاضلاب شهری و پسماند آشپزخانه
محمود محمودی اشکنکی، رحیم ابراهیمی، عبدالله قاسمی پیربلوطی
- ۲۰۴ ارزیابی مدل‌های ریاضی انتقال حرارت و رگرسیون چندگانه در پیش‌بینی متغیرهای داخلی گلخانه نیمه‌خورشیدی
مرتضی تاکی، یحیی عجب شیرچی، سید فرامرز رنجبر، عباس روحانی، منصور مطلوبی
- ۲۲۱ تحلیل عددی استفاده از آب‌گرم‌کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک-گرمایی در ایران
مسعود محمدی ساردوئی، حمید مرتضی پور، کاظم جعفری نعیمی
- ۲۳۴ بررسی و مدل‌سازی تغییرات بازده حجمی نقاله‌های مارپیچی در دوره‌ها و شیب‌های مختلف به کمک ANFIS و روش‌های آماری
اشکان زارعی، رحمان فرخی تیمورلو، لیلا ندرلو، سید محمد حسن کماریزاده اصل
- ۲۴۷ استفاده از آنالیز ابعادی جهت تعیین پارامترهای موثر دستگاه جداکننده میز ثقلی برای کمپنه نمودن ناخالصی موجود در توده
عدس
هادی باقری، منصور راسخ، محمد حسین کیانمهر
- ۲۶۰ بهینه‌سازی عملکرد رآکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی جهت تولید بیودیزل به کمک سطح پاسخ (مطالعه موردی: روغن
آفتابگردان)
حسین جوادی کیا، یوسف نصرتی، مصطفی مصطفایی، لیلا ندرلو، میثم طباطبایی
- ۲۷۰ شناسایی و اولویت‌بندی نیازمندی‌های مشتریان از تراکتور با روش QFD
دکتر هوشنگ تقی‌زاده، مصطفی ضیائی حاجی پیرلو، وحید خدرلی، بهزاد شمسی
- ۲۸۶ تجزیه و تحلیل سهم نهاده‌های مختلف و تعیین شاخص‌های انرژی در تولید مرغ گوشتی شهرستان مشهد
حسن صدرنیا، مهدی خجسته پور، حسن عاقل، عباس سعیدی رشک علیا
- ۳۰۰ مقایسه پیش‌بینی دمای خروجی جمع‌کننده خورشیدی تخت با نتایج تجربی: دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی
فاطمه نادی، سامان آبدانان مهدیزاده، اولدوز نورانی زنوز
- یادداشت پژوهشی**
- ۳۱۴ طراحی و ساخت یک مدل آزمایشگاهی موزع با ترتیب ریزش نردبانی (عرضی) قلمه برای استفاده در کارنده نیشکر
عباس اکبرنیا

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتر محسن آزادبخت
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	دکتر محمدحسین آق خانی
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	دکتر محمدعلی ابراهیمی نیک
دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان	دکتر محمد ابونجمی
پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای کرج	دکتر مرضیه احمدی روشن
دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی	دکتر پرویز احمدی مقدم
دانشگاه آزاد واحد بوئین زهرا، قزوین	دکتر محمدرضا اسدی اسدآباد
دانشگاه اراک	دکتر عبدالله ایمان مهر
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج	دکتر افشین ایوانی
گروه انرژی‌های نو پژوهشگاه نیرو	دکتر شهریار بزرگمهری
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تیران	دکتر محسن بیگی هرچگانی
دانشگاه آزاد چهارم	دکتر سیامک پیش بین
دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان	دکتر مرتضی تاکی
دانشگاه محقق اردبیلی	دکتر ابراهیم تقی نژاد
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	مهندس ایوب جعفری ملک آبادی
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج	دکتر بهاره جمشیدی
دانشگاه رازی کرمانشاه، دانشکده کشاورزی	دکتر حسین جوادی کیا
دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی	دکتر جلال خدائی
دانشگاه شهید چمران اهواز	دکتر محمداسماعیل خراسانی فردوانی
دانشگاه تربیت مدرس تهران	دکتر محمدهادی خوش تقاضا
دانشگاه رازی کرمانشاه، دانشکده کشاورزی	دکتر حکمت ربانی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار	مهندس مجید رجبی وندچالی
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتر محمدهاشم رحمتی
دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی	دکتر ولی رسولی شریبانی
دانشگاه شاهرود، دانشکده کشاورزی	دکتر عباس روحانی
دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان	دکتر مجید رهنما
دانشگاه شهید چمران اهواز	دکتر سید مجید سجادیه
مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی	دکتر محمدحسین سعیدی راد
دانشگاه محقق اردبیلی	دکتر غلامحسین شاهقلی
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج	دکتر احمد شریفی
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	دکتر محمد طبعی زاده
مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی	دکتر سعید ظریف نشاط
دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی	دکتر یوسف عباسپور گیلانده
دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی	دکتر یحیی عجب شیرجی
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	دکتر باقر عمادی
دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی	دکتر رحمان فرخی تیمورلو
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	دکتر عبدالعلی فرزاد
دانشگاه جیرفت	دکتر حمید قاسم خانی

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری	دکتر داود کلانتری
دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی	دکتر سید محمدحسن کماریزاده
دانشگاه شهید چمران اهواز	دکتر مصطفی کیانی ده کیانی
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی	مهندس کریم گرامی
دانشگاه کردستان	دکتر هیوا گل پیرا
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	دکتر محمودرضا گلزاریان
دانشگاه رازی کرمانشاه	دکتر علی نجات لرستانی
دانشگاه اراک	دکتر مجید لشگری
دانشگاه شهرکرد	دکتر امین لطفعلیان دهکردی
دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی	دکتر آرش محبی
دانشگاه شاهرود	دکتر اسماعیل محمودی
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی	دکتر سید محمدرضا مدرس رضوی
دانشگاه ارومیه	دکتر اسعد مدرس مطلق
دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی	دکتر مهدی مرادی حسن آباد
دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده کشاورزی	دکتر حمید مرتضی پور
دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان	دکتر افشین مرزبان
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج	دکتر محمدرضا مستوفی سرکاری
دانشگاه صنعتی اصفهان	دکتر امین اله معصومی
دانشگاه کردستان	دکتر کاوه ملازاده
دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی	دکتر علی ملکی
دانشگاه شاهرود	دکتر محمدهادی موحدنژاد
دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی	دکتر سید احمد میره ای
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی	مهندس محمدحسین نادیان
دانشگاه آزاد اسلامی واحد آزادشهر	دکتر فاطمه نادی
مرکز آموزش جهاد کشاورزی خراسان رضوی	مهندس مجتبی ناصری
دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی	دکتر سید مهدی نصیری
دانشگاه پیام نور پاوه	مهندس امین ویسمرادی
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری	دکتر سید جعفر هاشمی
دانشگاه آزاد واحد دزفول	دکتر سید حبیب الله هاشمی فرد دهکردی
دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی	دکتر عباس همت
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج	دکتر محمد یونسی الموتی

ساخت و ارزیابی دستگاه دانه‌کن انار ارتعاشی - بادی

سید مهدی نصیری^{*۱} - سحر صمصامی^۲ - محمد لغوی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

چکیده

ایران علی‌رغم کسب رتبه اول جهان در تولید انار، به علت عدم توسعه روش‌های مکانیزه برای فرآوری در ردیف دوم صادرات قرار دارد. از این رو پژوهش حاضر برای ساخت و ارزیابی یک دستگاه دانه‌کن ارتعاشی انار مجهز به سامانه جت هوا انجام گرفت. تأثیر عوامل اصلی دامنه و بسامد ارتعاش بر درصد جدایش و آسیب دانه‌ها مورد آزمون قرار گرفت. خارج کردن دانه‌های انار از پوسته آن در دو روش ترکیب ارتعاش - جت هوا و جت هوا به تنهایی برای سه حالت برش میوه توسط دستگاه ساخته شده، صورت پذیرفت. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع برش و بسامد ارتعاش تأثیر معنی‌داری بر درصد دانه‌های خارج شده در سطح احتمال پنج درصد داشتند. همچنین بسامد تأثیر معنی‌داری بر دانه‌های آسیب دیده حاصل از جدایش داشته است. بیشترین مقدار جدایش دانه‌ها در بسامد ۳۰ هرتز و دامنه ارتعاش ۴ میلی‌متر در برش میوه به صورت مورب به میزان ۸۷ درصد اتفاق افتاد. در این حالت مقدار آسیب وارده به دانه‌ها ۱۳/۹ درصد اندازه‌گیری شد. مقایسه دو روش جدا کردن دانه توسط ارتعاش - جت هوا و جت هوا به تنهایی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر درصد جدایش و درصد آسیب ناشی از جدایش را نشان داد. براساس نتایج حداکثر مقدار جدایش و آسیب در روش توام ارتعاش و جت هوا رخ داد، به نحوی که سامانه ترکیبی ۷/۱ درصد در جدایش دانه افزایش ایجاد نموده و در مقابل مقدار ۲/۲ درصد تلفات بیشتری در دانه ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، انار، جت هوا، دانه‌کن انار

مقدمه

فرآورده‌های تبدیلی انار به‌عنوان چاشنی نیز مصرف خوراکی دارند. از دانه انار می‌توان آب، رب، معجون، شربت، مربا، ژله، پکتین، نوشابه، انواع سس و چاشنی‌ها، ترشیجات، روغن، اسانس، انار دانه، لواشک و سرکه تهیه نمود (Anonymous, 2012). بنابراین دانه‌کردن انار یکی از مهم‌ترین و نخستین مراحل فرآوری آن می‌باشد.

اولین دستگاه دانه‌کن انار به کمک جت هوا در سال ۱۹۸۵ ارائه شد (Sarig, 1985). نتایج آزمایش‌ها نشان داد که الگوی حرکت نازل بر سطح میوه از جمله عوامل تأثیرگذار بر جدایش دانه‌های انار توسط فشار هوا است. در سال ۲۰۰۸، ماشین دانه‌کنی برای انار طراحی شد که از واحدهای تاج‌زن و بازکننده تشکیل شده بود (Schmilovitch, 2008). در این ماشین نازل‌ها با حرکت پاندولی تمام سطح انار را پوشش می‌دادند. گزارش شد که با فشار هوای ۷۰۰ کیلو پاسکال، ۹۵ درصد از دانه‌های انار با میزان آسیب پنج درصد از پوست میوه جدا شدند. اثر سه الگوی حرکتی یک نازل متصل به بازوی روباتیک شامل مارپیچی شکل، حرکت رفت و برگشتی ساده و نازل بدون حرکت بر درصد خروج دانه‌های انار مطالعه گردید (Khazaei et al., 2008). طبق نتایج گزارش شده استفاده از مسیر مارپیچی شکل برای نازل‌ها باعث خروج درصد بالایی از دانه‌ها شد. آن‌ها اعلام کردند با فشار هوای ۵۰۰ کیلو پاسکال، قطر نازل ۳/۵ میلی‌متر و ۴ بار عبور

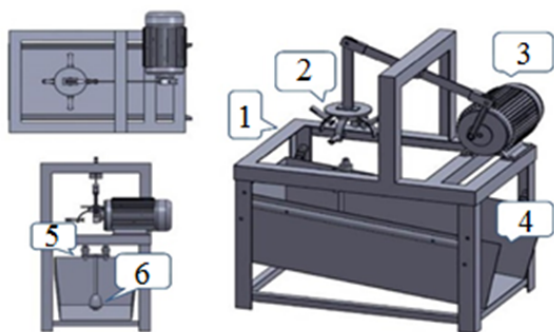
انار بومی مناطق شرق ایران تا کوه‌های هیمالیا در شمال هند بوده و یکی از اولین گیاهان اهلی شده است. ایران با داشتن ۶۰ هزار هکتار سطح زیر کشت و تولید ۸۰۰ هزار تن (معادل ۴۰ درصد تولید جهانی) مقام اول تولید انار در جهان را به خود اختصاص داده است (Anonymous, 2012) و پس از آن کشور هند قرار دارد. در ایران، شهرستان‌های ساوه، نیریز و فردوس به‌ترتیب بزرگ‌ترین تولیدکنندگان انار هستند. با این حال عدم توسعه روش‌های مکانیزه برای فرآوری آن امکان رقابت را برای صادرات ایجاد نموده و عمده صادرات به‌صورت میوه تازه می‌باشد. بنابراین ضرورت دارد، برای فرآوری مکانیزه و در نهایت ایجاد بازار برای تولید بیشتر آن و حفظ جایگاه نخست در صادرات نیز تلاش بیشتری اعمال شود.

انار یکی از محصولات است که می‌تواند به‌عنوان یک میوه تازه در حد میوه‌هایی چون مرکبات و سیب مصرف شود.

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استاد بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز
* - نویسنده مسئول:
(Email: nasiri@shirazu.ac.ir)

ساخت دستگاه جدا کننده دانه

دستگاه دانه‌کن از شاسی، مکانیزم نگهداری میوه (گیره کاسه‌ای) همراه با مکانیزم تولید ارتعاش، مکانیزم محرک نازل‌ها، مخزن جمع‌آوری دانه (با یک سطح شیب‌دار) و الکتروموتور ساخته شد (شکل ۱). شاسی دستگاه با طول ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع و عرض ۴۰ سانتی‌متر از نبشی پنج ساخته شد. عواملی چون زاویه سطح شیب‌دار، ارتفاع گیره کاسه‌ای و فاصله نازل‌ها از انار در تعیین ارتفاع شاسی دخالت داشتند. عرض شاسی به گونه‌ای انتخاب شد که عواملی چون فضای کافی برای چرخش نازل‌های هوا و گیره نیمه کروی (کاسه‌ای) و مکانیزم ارتعاشی وجود داشته باشد.



شکل ۱- طرح‌واره دستگاه ساخته شده

۱- شاسی، ۲- گیره کاسه‌ای، ۳- موتور الکتریکی، ۴- سطح شیب‌دار، ۵- نازل‌های باد و ۶- مکانیزم محرک نازل‌ها

Fig. 1. Schematic of test rig

1- Frame, 2- Fruit clamp, 3- Electric motor, 4- Inclined surface, 5- Air nozzles, 6- Nozzles drive mechanism

با توجه به اینکه توان کمی از موتور برای حرکت مکانیزم ارتعاش به علت وزن کم مکانیزم و میوه و دور بالا برای تولید فرکانس مورد نیاز بود، یک موتور الکتریکی سه فاز با توان ۷۴۶ وات ساخت شرکت NJM چین انتخاب شد. برای جلوگیری از تأثیر لرزش دستگاه به هنگام ارتعاش، چهار عدد ضربه‌گیر لاستیکی در زیر موتور نصب شد. از این‌روتر برق تک فاز به سه فاز (مدل N50-022 SF، ساخت شرکت Hyundai ژاپن) با توان مشابه موتور برای تغییر بسامد ارتعاش (دور موتور) استفاده شد. تولید هوای فشرده مورد نیاز توسط یک دستگاه کمپرسور پیستونی دو مرحله‌ای (Stinjoj 500L ساخت دانمارک) تأمین شد. جریان هوای فشرده خروجی از رگولاتور توسط دو شلنگ انعطاف‌پذیر به دو نازل با قطر خروجی ۳/۵ میلی‌متر منتقل شد. تعداد نازل مورد نیاز با پیش‌آزمون و قطر آن‌ها با توجه به پژوهش‌های پیشین به ترتیب برابر با ۲ و ۳/۵ میلی‌متر انتخاب شد (Donaldson

نازل (در مسیری مارپیچی شکل) می‌توان ۸۱ درصد از دانه‌های انار را جدا نمود. طراحی، ساخت و بهینه‌سازی یک دستگاه دانه‌کن انار با استفاده از جت آب اجرا و میزان درصد دانه‌های خارج شده برای نازل ۳/۵ میلی‌متری برابر ۶۱/۵ درصد گزارش شد (Mirian, 2009).

نمونه‌هایی از دانه‌کن‌های انار ساخته شده است که در اثر ضربه به میوه نیمه شده دانه‌ها را از پوسته خارج می‌سازد. یک نمونه از این دستگاه که از یک استوانه شیب‌دار گردان ساخته شده است. ضمن جدا کردن دانه تلفات زیادی نیز ایجاد می‌کند و بخشی از دانه را له می‌کند. نمونه‌ای که با حداقل تلفات جدا نماید، در بررسی منابع دیده نشده است. همچنین بررسی منابع علمی نیز کاربرد ارتعاش برای جداسازی دانه را نشان نداد. با این حال ارتعاش در حوزه کشاورزی کاربرد وسیعی دارد که می‌توان به تأثیر آن بر جدا کردن محصول از بوته یا درخت اشاره نمود. به‌طور کلی بسامد و دامنه ارتعاش از جمله عامل‌هایی بوده‌اند که در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Stafford and Diener, 1972; Loghavi and Mohseni, 2006; Loghavi and Rahimi, 2007; Kheireyeh *et al.*, 2008; Loghavi *et al.*, 2010; Loghavi *et al.*, 2011). بسته به نوع محصول به اثر قابل توجه بسامد یا دامنه ارتعاش بر جداسازی محصول اشاره داشته‌اند (Loghavi and Mohseni, 2006; Kheireyeh *et al.*, 2008).

علی‌رغم پژوهش‌های زیاد در خصوص کاربرد ارتعاش، مطالعات اندکی در خصوص استفاده از ارتعاش برای جدا کردن اجزای داخلی میوه در دسترس است. به همین منظور در پژوهش حاضر اثر توأم ارتعاش و جت هوا برای افزایش میزان جدا شدن دانه انار مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از میوه انار رقم رباب نیریز استفاده شد. انارهای سالم و بدون آسیب‌دیدگی فیزیکی از باغ میوه واقع در شهرستان نیریز خریداری و تا زمان اجرای آزمایش‌ها در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد در سردخانه بخش علوم و صنایع غذایی دانشگاه شیراز نگهداری شد. رطوبت پوسته، پیه و دانه‌ها به‌طور جداگانه با قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد با استفاده از آون معمولی محاسبه گردید (Rezaee *et al.*, 2013). بر این اساس محتوای رطوبت پوسته، پیه و دانه‌ها به ترتیب 31.7 ± 2.6 درصد، 42.8 ± 1.8 درصد و 61.5 ± 1.4 درصد (مبنای تر) به دست آمد. قطر نمونه‌های انتخاب شده با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت $0.01 \pm$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها برابر با 9.0 ± 0.5 میلی‌متر بود. میانگین اختلاف قطر میوه در راستای افقی و عمودی (وقتی تاج میوه در بالا قرار داشت) کمتر از ۱۰ میلی‌متر محاسبه شد. قطر میوه در راستای عمود بیشتر بود.

درجه به سمت چپ گردش داشتند. برای نگه‌داشتن انار نیمه شده در حین انجام عملیات دانه کردن یک عدد گیره کاسه‌ای طراحی شد، به نحوی که قادر بود انار نیمه شده را در زمان ارتعاش نگهداری نماید و سمت باز شده انار را در مسیر جریان خروجی نازل‌ها قرار دهد. این گیره قادر بود در طی مدت زمان نگهداری میوه نیمه شده دو نیرو بر میوه وارد کند. یکی نیروی نگه دارنده میوه که بر روی لبه برش خورده وارد می‌شد و دیگری نیروی فشاری بر روی پوست در نیمه قرار گرفته در کاسه بود که باعث باز شدن تدریجی پوسته شود تا هوای خروجی از نازل‌ها به دانه‌های زیرین نیز فشار وارد نموده و آن‌ها را از پوسته خارج سازد. بدین منظور ۴ عدد فنر کششی و ۴ عدد فنر فشاری در گیره میوه تعبیه گردید به نحوی که فنرهای کششی وظیفه نگهداری میوه و فنرهای فشاری وظیفه فشردن لایه‌های درونی انار نیمه شده به سمت نازل‌های هوا و در دسترس قرار دادن دانه‌ها را بر عهده داشتند (شکل ۲).



شکل ۲- گیره کاسه‌ای الف) طرح‌واره، ب) نمونه ساخته شده برای آزمایش

۱- اهرم‌های فشاری، ۲- بازوهای کششی

Fig. 2. Fruit clamp A) Schematic, B) Prototyp
1- Compression bars, 2- Tension clamps

تحت ارتعاش قرار گرفت و همزمان جت هوا توسط نازل‌های متحرک به صورت راست گرد و چپ گرد با فشار ثابت باد ۵۰۰ کیلوپاسکال به دانه‌ها اعمال شد.

قبل از اعمال جت هوا نمونه‌ها به مدت ۶۰ ثانیه تحت ارتعاش قرار گرفتند و سپس سیستم جت هوا فعال شد و پس از آن هر دو سامانه به مدت ۳۰ ثانیه همزمان فعال بودند. آزمایش‌ها بدون اعمال ارتعاش و تنها با جت هوا نیز انجام شد تا امکان مقایسه هر دو سامانه فراهم گردد.

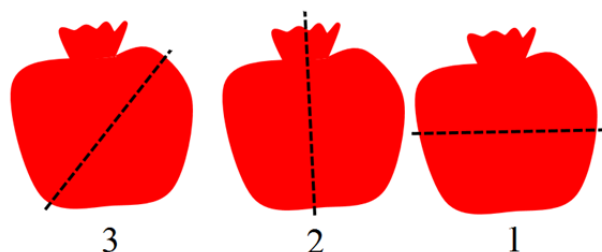
et al., 1971; Jambunathan *et al.*, 1992; Abdel-Fattah, 2007; Kantola, 1981; Khazaei *et al.*, 2008; Mirian, 2009; Shobeiri *et al.*, 2012). با انجام پیش‌آزمون‌ها فاصله نازل‌ها از گیره کاسه‌ای یک سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فشار هوا نیز با توجه به توصیه‌های پژوهش‌های پیشین ۵۰۰ کیلوپاسکال انتخاب شد (Khazaei *et al.*, 2008; Mirian, 2009).

با توجه به میانگین قطر انارهای رقم رباب و انجام پیش‌آزمون‌ها، فاصله دو نازل از یکدیگر برای پوشش تمام سطح انار ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. چرخش یکنواخت نازل‌ها با کمک یک موتور الکتریکی ۱۲ ولت DC صورت پذیرفت. برای تغذیه این موتور از یک منبع تغذیه ساخت شرکت NJM چین استفاده شد. برای جلوگیری از بهم پیچیدن شلنگ‌های دو نازل و همچنین پوشش کامل سطح انار، چرخش ۱۸۰ درجه‌ای نازل‌ها با طراحی یک مدار الکترونیکی (شامل سوئیچ تحریک شده با حرکت بادامک، میکروکنترلر، رله دو طرفه و مکانیزم محرک چپ گرد و راست گرد نازل‌ها) حاصل شد. با این مدار نازل‌ها از موقعیت اولیه خود ۱۸۰ درجه به سمت راست و سپس ۱۸۰

برای ایجاد دامنه‌های مختلف ارتعاش از مکانیزم محور خارج از مرکز قابل تنظیم استفاده شد. این محور به گونه‌ای ساخته شد که سطوح مورد نیاز دامنه ارتعاش قابل تنظیم باشد.

عملکرد دستگاه

ابتدا میوه به صورت دستی و به کمک تیغ تیز دو نیم شد. برای نیمه کردن میوه سه راستای افقی (قطری)، عمودی و مورب در نظر گرفته شد (شکل ۳). سپس نیمه میوه در گیره کاسه‌ای قرار داده شد و ثابت گردید. گیره کاسه‌ای حاوی میوه نصف شده به وسیله موتور



شکل ۳- الگوی برش میوه

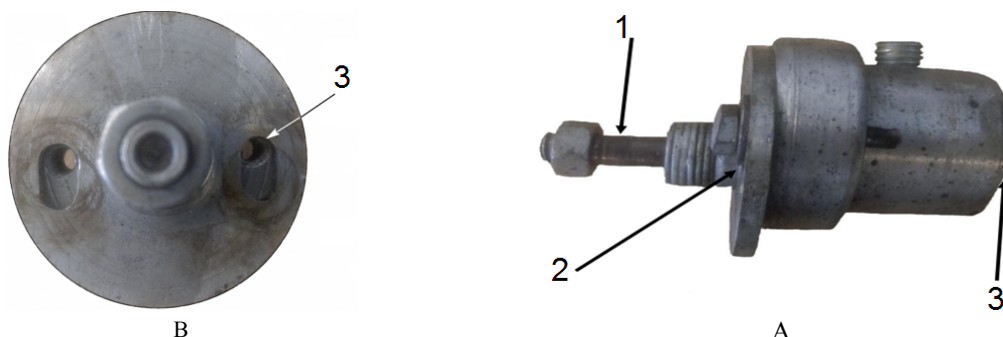
۱- افقی (قطری)، ۲- عمودی و ۳- مورب

Fig. 3. Fruit cutting pattern

1- Horizontal (Equatorial), 2- Vertical, and 3- Oblique

شد. با انجام پیش‌آزمون دو سطح ۲ و ۴ میلی‌متر برای آزمون استفاده شد (شکل ۴). در دامنه ۶ میلی‌متر میوه از گیره جدا می‌گردید.

بسامد ارتعاش به کمک اینورتر در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ هرتز تنظیم شد (Loghavi and Rahimi, 2007). سه سطح مختلف دامنه ارتعاش ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر نیز به کمک مکانیزم خارج از مرکز ایجاد



شکل ۴- مکانیزم لنگ برای تنظیم دامنه ارتعاش

A- نمای راست، B- نمای روبه‌رو

۱- محل اتصال مکانیزم ارتعاشی، ۲- محل اتصال محور موتور الکتریکی، ۳- شیار تنظیم دامنه ارتعاش

Fig. 4. Crank mechanism for adjustment of vibration amplitude

A- Right view, B- Front view

1- Vibrating mechanism pivot bar, 2- Electric motor coupling place, 3- Groove for vibration amplitude adjustment

اعمال فشار هوا دچار له شدگی بودند شمارش و تحت عنوان دانه‌های آسیب دیده محاسبه گردیدند. درصد آسیب ناشی از جدایش از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$LP = (LA \times 100) / AD \quad (2)$$

که LP درصد آسیب و LA تعداد دانه‌های آسیب دیده است. درصد دانه‌های آسیب دیده (نیمه شده) حاصل از برش میوه انار پس از انجام عمل برش نیز به صورت دستی جدا و شمرده شدند و با رابطه (۲) مقدار آسیب حاصل از برش محاسبه شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 21 در آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن صورت پذیرفت. این پژوهش

در آزمون‌های مختلف دانه‌های انار پس از جدا شدن از پوست توسط یک صفحه شیبدار که در طول شاسی و زیر واحد دانه‌کن قرار گرفته بود جمع‌آوری شدند. از میله‌های حائل برای تغییر زاویه شیب در دو سمت صفحه شیبدار برای تخلیه خودکار دانه‌ها استفاده شد. دانه‌های جدا شده به صورت دستی شمارش شدند. همچنین دانه‌های باقی‌مانده در پوسته نیز به کمک دست جدا و شمارش شدند. درصد جدایش (بازده جدایش) از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$DP = (AD \times 100) / TA \quad (1)$$

که DP درصد جدایش، AD تعداد دانه‌های جدا شده و TA تعداد کل دانه‌ها است. آن تعداد از دانه‌های جدا شده‌ای که در اثر

در برش افقی سطح برش عمود بر لایه‌های جداکننده (پیه) مجموعه دانه‌ها است و در برش مورب نیز با این لایه‌ها زاویه می‌سازد، در نتیجه دانه‌ها با ارتعاش از محل استقرار خود جدا و تقریباً بدون مانع از پوسته خارج شدند. این در حالی است که در جهت برش عمودی لایه‌های محافظ از جدا شدن و خروج دانه‌ها جلوگیری نمودند. با افزایش بسامد اثر آزاد شدن دانه‌ها در پیه افزایش یافته و در نهایت تأثیر هوا بر جداسازی نیز افزایش یافته است. نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان داد افزایش بسامد در سطح ثابت دامنه تأثیر بیشتری نسبت به افزایش دامنه نوسان در سطح ثابت بسامد بر درصد ریزش میوه داشته است (Golpira, 1998; Loghavi and Rahimi, 2007). در حالی که نتایج متفاوت نیز گزارش شده است (Kheireyeh et al., 2008). تأثیر فرکانس طبیعی مواد بیولوژیک مختلف این تفاوت را می‌تواند توجیه نماید (Stafford and Diener, 1972). در پژوهش حاضر تغییر در مقدار جدایش دانه‌ها در دامنه ثابت ۳/۶ درصد و در فرکانس ثابت ۲/۲ درصد محاسبه شد.

شامل ۱۸ تیمار در چهار تکرار بود. زمان انجام آزمایش‌ها به صورت ثابت ۹۰ ثانیه برای تأثیر همزمان جت و ارتعاش بود که ۶۰ ثانیه نخست آن در آزمایش برای بررسی تأثیر ارتعاش در نظر گرفته شد. آزمون جت هوا به تنهایی نیز در مدت ۹۰ ثانیه صورت پذیرفت. مقایسه درصد جدایش در دو روش دانه کردن انار به وسیله جت به همراه ارتعاش و جت هوا به تنهایی با آزمون t انجام گردید.

نتایج و بحث

دانه‌های جدا شده

تجزیه واریانس اثر عامل اصلی نوع برش و بسامد ارتعاش بر درصد جدایش را در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار نشان داد (جدول ۱). در مقایسه میانگین‌ها بیشترین درصد جدایش برای برش مورب و بسامد ۳۰ هرتز با اختلاف معنی دار از سایر تیمارها مشاهده شد (شکل‌های ۵ و ۶). مقدار جدایش در دامنه ارتعاش چهار میلی‌متر حدود ۸۰/۵ درصد و در دامنه دو میلی متر حدود ۷۹/۸ درصد به دست آمد. با این حال از لحاظ آماری اختلاف معنی داری بین این دو مقدار وجود نداشت.

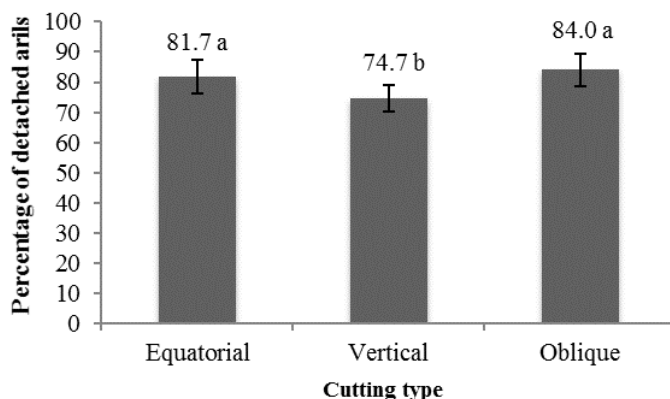
جدول ۱- تجزیه واریانس درصد دانه‌های جدا شده متأثر از تغییر بسامد و دامنه ارتعاش و نوع برش میوه

Table 1- ANOVA results for percentage of detached arils affected by vibration amplitude and frequency, and fruit cutting type

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
Source of variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean of square	
بسامد	191.4	2	95.7	3.5*
Frequency				
دامنه	10	1	10	0.4 ^{ns}
Amplitude				
نوع برش	1123.2	2	561.6	20.5*
Cutting type				
بسامد× دامنه	64.6	2	32.3	1.2 ^{ns}
Fre.×Amp.				
بسامد× برش	23	4	5.7	0.2 ^{ns}
Fre.×Cut.				
دامنه× برش	12.2	2	6.1	0.2 ^{ns}
Amp.×Cut.				
بسامد× دامنه× برش	114.3	4	28.6	1.0 ^{ns}
Amp.×Fre.×Cut.				
خطا	1482.2	54		
Error				
کل	3020.7	71		
Total				

* و ns به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و عدم معنی‌داری است.

* and ns show significant difference at 5% level of probability, and non significant, respectively

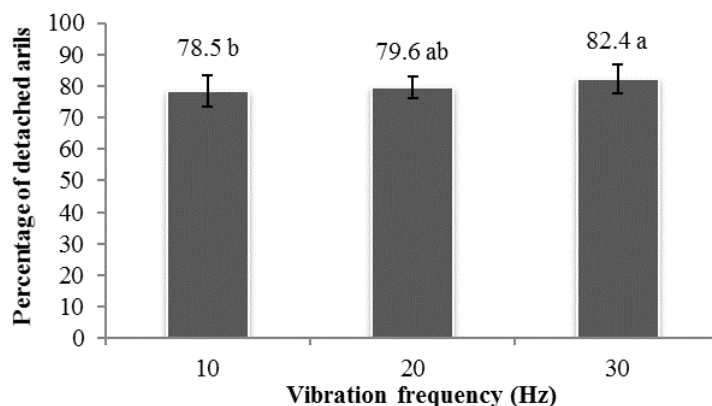


شکل ۵- تأثیر نوع برش بر دانه‌های جدا شده

حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است

Fig. 5. The effect of cutting pattern on detached arils

Different small letters show significant difference between means at 5 percent level of significance



شکل ۶- تأثیر بسامد ارتعاش بر دانه‌های جدا شده

حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است

Fig. 6. The effect of vibration frequency on detached arils

Different small letters show significant difference between means at 5 percent level of significance

در میانگین تلفات به علت افزایش مساحت سطح برش خورده توسط تیغه بود. اما تجزیه واریانس یک طرفه اختلاف معنی‌داری را بین مقادیر درصد تلفات دانه‌ها در سطح احتمال ۵ درصد برای روش‌های مختلف برش میوه به علت همپوشانی در پراکندگی مقادیر اطراف میانگین، نشان نداد.

تجزیه واریانس درصد دانه‌های آسیب دیده در اثر اعمال تیمارهای آزمایش نشان داد، تنها عامل اصلی بسامد ارتعاش بر درصد دانه‌های آسیب دیده اثر معنی‌داری داشته است (جدول ۲). مطابق شکل ۷ کمترین میزان آسیب در بسامد ارتعاش ۳۰ هرتز مشاهده شد و با اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بیشترین مقدار در بسامد ۱۰ هرتز رخ داد.

در مطالعه درصد دانه‌های جدا شده، هیچ‌کدام از اثرات متقابل معنی‌دار نبود و نشان داد که افزایش توأم عوامل اصلی دامنه و فرکانس ارتعاش اثر هم راستا بر افزایش دانه‌های جدا شده داشته است (جدول ۱). براین اساس بیشترین مقدار جدایش دانه‌ها در دامنه ۴ میلی‌متر، بسامد ۳۰ هرتز و در برش مورب برابر ۸۷ درصد به دست آمد. این مقدار حدود ۷/۵ درصد از مقدار گزارش شده در پژوهش خزایی و همکاران بیشتر بوده است (Khazaei et al., 2008).

دانه‌های آسیب دیده

همانطور که قبلاً بیان شد در اثر نیمه کردن میوه‌ها صدمه به دانه‌ها وارد شد. مقدار تلفات برای برش‌های افقی، عمودی و مورب به ترتیب ۱۴/۹ درصد، ۱۵/۷ درصد و ۱۸ درصد به دست آمد. این اختلاف

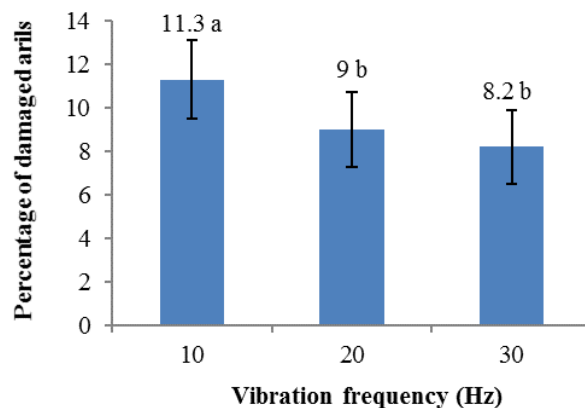
جدول ۲- تجزیه واریانس درصد دانه‌های آسیب دیده متاثر از تغییر بسامد و دامنه ارتعاش و نوع برش میوه

Table 2- ANOVA results for percentage of damaged arils affected by vibration amplitude and frequency, and fruit cutting type

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of square	میانگین مربعات Mean of square	F
بسامد Frequency	213.6	2	106.8	5.2*
دامنه Amplitude	38.9	1	38.9	1.9 ^{ns}
نوع برش Cutting type	52.7	2	26.4	1.3 ^{ns}
بسامد× دامنه Fre.×Amp.	91.8	2	45.9	2.2 ^{ns}
بسامد× برش Fre.×Cut.	232.2	4	58.0	2.8*
دامنه× برش Amp.×Cut.	99.6	2	49.8	2.4 ^{ns}
بسامد× دامنه× برش Amp.×Fre.×Cut.	56.7	4	14.2	0.7 ^{ns}
خطا Error	1114.8	54		
کل Total	1900.3	71		

* و ns به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و عدم معنی‌داری است.

* and ns show significant difference at 5% level of probability, and non significant, respectively



شکل ۷- تأثیر بسامد ارتعاش بر دانه‌های آسیب دیده

حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است

Fig. 7. The effect of vibration frequency on damaged arils

Different small letters show significant difference between means at 5 percent level of significance

آزاد شدن راحت‌تر دانه‌ها درصد آسیب متفاوتی ایجاد کرد، گرچه این مقادیر تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر نداشتند. درصد آسیب دانه‌ها به ترتیب ۸/۲، ۸/۶ و ۱۰/۲ درصد برای برش افقی (قطری)، مورب و عمودی به دست آمد.

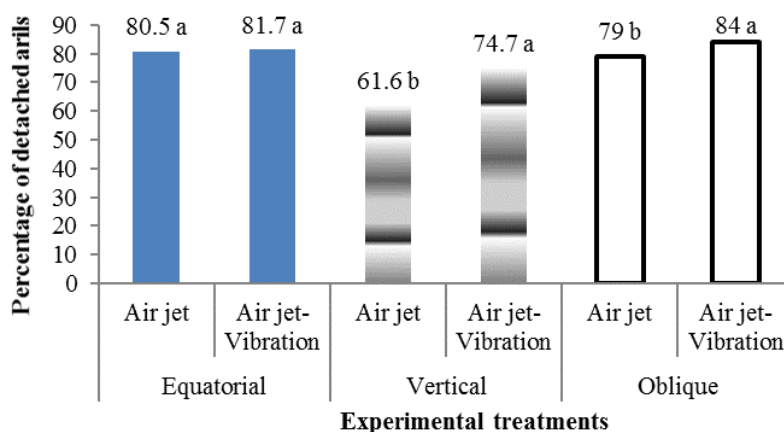
میانگین درصد آسیب به دانه‌ها در دامنه ۲ و ۴ میلی‌متر به ترتیب ۹/۷ درصد و ۸/۲ درصد محاسبه شد. مقایسه بین این دو میانگین نیز نشان داد دامنه ارتعاش اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر درصد دانه‌های آسیب دیده نداشته است. نوع برش نیز با ایجاد شرایط

شده است (Khazaei *et al.*, 2008). در این پژوهش در دو حالت (۱) نازل با قطر ۳ میلی‌متر، فشار هوای ۸۰۰ کیلوپاسکال و ۴ بار عبور نازل و (۲) نازل با قطر ۳/۵ میلی‌متر، فشار هوای ۷۰۰ کیلوپاسکال و ۴ بار عبور نازل، مقدار دانه‌های آسیب دیده را به ترتیب ۲۲ و ۱۳ درصد گزارش نمودند. در تیمار حداکثر جدایش دانه (دامنه ارتعاش ۴ میلی‌متر، فرکانس ۳۰ هرتز و برش مورب) مقدار آسیب به دانه‌ها ۱۳/۹ درصد به دست آمد. بخشی از این تفاوت می‌تواند حاصل زاویه وزش باد، قطر و تعداد نازل باشد (Mirian and Khazaei, 2010; Shobeiri *et al.*, 2012).

مقایسه عملکرد دستگاه بدون ارتعاش و توأم با ارتعاش

روند جدایش دانه در سامانه جت هوا به تنهایی نیز مشابه قبل بود، به طوری که کمترین مقدار جدایش معنی‌دار در برش عمودی مشاهده شد. نتایج بررسی و مقایسه درصد جدایش در دو روش دانه کردن انار به وسیله جت به همراه ارتعاش و جت هوا به تنهایی برای هر نوع برش به صورت مجزا در شکل ۸ با آزمون t آمده است.

از آنجا که برش افقی عمود بر راستای پیه‌های انار بوده که دانه‌ها را احاطه نموده است، مناسب‌ترین شرایط را برای آزاد کردن دانه‌ها ایجاد نموده است. این موضوع در برش مورب کمتر رخ داده است و بنابراین درصد آسیب در برش مورب افزایش یافته است. در برش عمودی به علت وجود پیه جدا شدن دانه‌ها با مشکل مواجه شده و در نتیجه با طولانی‌تر شدن مدت زمان جدایش تأثیر فشار باد نازل‌ها بر دانه‌ها افزایش یافته است، گرچه این تفاوت به علت انحراف معیار داده‌های آسیب دیده که ناشی از ترتیب متفاوت دسته‌بندی دانه‌ها در هر میوه بوده از لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. با این حال این مقادیر بیش از مقادیر گزارش شده در پژوهش‌های پیشین بوده است (Schmilovitch, 2008; Miraian, 2009)، که علت آن را شاید بتوان رقم متفاوت انار یا موقعیت قرارگیری و فاصله نازل از میوه دانست. گزارش شده است که دستگاه جداکننده دانه انار با فشار ۷۰۰ کیلوپاسکال با درصد جدایش ۹۵ درصد آسیب ۵ درصدی (Schmilovitch, 2008) و با سه نازل با ۱۰۰ درصد جدایش آسیب ۱/۲ درصدی به دانه‌ها وارد نموده است (Mirian, 2009). با این حال تلفات بیشتر نیز در جداسازی دانه انار به کمک فشار سیال گزارش



شکل ۸- درصد جدایش دانه‌ها در دو روش جت هوا و ارتعاش-جت هوا برای تیمارهای مختلف نوع برش

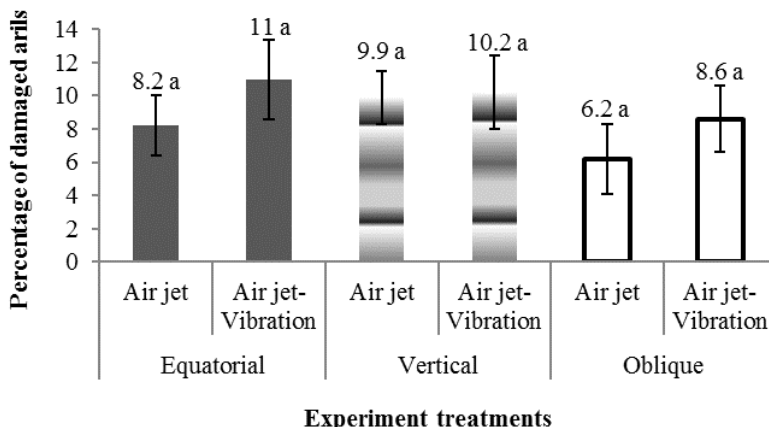
حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است

Fig. 8. Percentage of arils detachment in air jet and air jet-vibration methods for various cutting types
Different small letters show significant difference between means at 5 percent level of significance

هوا و جت هوا- ارتعاش نشان داد که در حالت جت هوا به تنهایی آسیب وارده با اختلاف اندک و غیر معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) از حالت ترکیبی کمتر بوده است (شکل ۹). جت هوا در مجموع با میانگین کل ۸/۱ درصد آسیب در مقابل ۹/۹ درصد آسیب در حالت ترکیب، عمده‌ترین منبع آسیب به دانه‌ها بوده است و ارتعاش به‌طور میانگین تنها با اختلاف حدود ۲/۲ درصد آسیب را افزایش داده است. بخشی از این آسیب به‌نظر می‌رسد در اثر ضربه‌های حاصل از

درصد جدایش دانه در دو روش ذکر شده در برش عمودی و مورب در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند. با توجه به اینکه در برش افقی سطح برش عمود بر پیه‌ها می‌باشد تأثیر جت هوا به تنهایی در برش افقی اندکی بیشتر از برش مورب است. به‌طور میانگین سامانه ترکیبی ۷/۱ درصد نسبت به سامانه جت هوا به تنهایی جدایش بیشتری ایجاد نموده است (شکل ۸). مقایسه میانگین آسیب‌های حاصل از جدایش در دو حالت جت

ارتعاش به دانه‌های محصور شده در پیه‌ها باشد.



شکل ۹- درصد آسیب ناشی از جدایش دانه‌های انار در دو روش جت هوا و ارتعاش-جت هوا برای تیمارهای مختلف نوع برش حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است

Fig. 9. Percentage of damaged arils caused by different cutting patterns in both air jet and air jet-vibration systems for various cutting types

Different small letters show significant difference between means at 5 percent level of significance

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد در هر دو سامانه جت هوا و ارتعاش-جت هوا (ترکیبی) نحوه برش میوه بر درصد جدایش و تلفات دانه ناشی از جدایش اثر معنی‌داری داشته است. بیشترین درصد جدایش در برش مورب و بسامد ۳۰ هرتز و دامنه فرکانس ۴ میلی‌متر به میزان ۸۷ درصد محاسبه شد. نتایج نشان داد سامانه ترکیبی نسبت به سامانه جت هوا به تنهایی، جدایش دانه را به میزان ۷/۱ درصد افزایش داد و در مقابل ۲/۲ درصد تلفات بیشتر در دانه ایجاد کرده است. با توجه به روند به‌دست آمده در سامانه ترکیبی پیش‌بینی می‌شود با تغییر در مکانیزم گیره میوه شرایط برای افزایش مقدار جدا شدن همزمان با کاهش تلفات دانه در آزمون‌های با فرکانس و دامنه ارتعاش دیگر فراهم گردد.

در این صورت فشار حاصل از جت هوا بر دانه‌های ضربه خورده اثر بیشتری را نسبت به حالت بدون ارتعاش داشته است. علت دوم را نیز شاید بتوان ضربه حاصل از ریزش دانه‌ها بر روی سطح فلزی صفحه جمع‌کننده دانست. با این حال این دلایل نیاز به بررسی مجدد همراه با اندازه‌گیری سرعت جدایش یا مدت زمان جدایش دارد. جنس و پوشش صفحه نگهدارنده نیز می‌تواند در قوت این استدلال یا رد آن مورد بررسی مجدد قرار گیرد. نتایج پژوهش‌های پیشین با جت هوا و آب مقداری کمتر از ۸ درصد را برای تلفات گزارش کرده است. این تفاوت احتمالاً به زاویه وزش جت هوا و فاصله آن بر می‌گردد.

References

- Anonymous. 2012. Iran pomegranate. <http://www.anar-Iran.ir/fa/Interduce/Details.aspx>.
- Golpiri, H. 1998. Design, development and evaluation of trunk vibrator for study on the effect of vibration amplitude and frequency on fruit detaching. M.Sc. Thesis on Mechanics of Agricultural Machinery. Shiraz University. (In Farsi).
- Khazaei, J., N. Ekrami-Rad, M. Safa, and S. Z. Nosrati. 2008. Effect of air-jet impingement parameters on the extraction of pomegranate arils. Journal of Biosystems Engineering 100: 214-226.
- Kheireyeh, M., M. M. Maharlooei, and S. Kamgar. 2008. Design, development and evaluation of a tractor mounted tree branches vibrator equipped with floating arms for apple harvesting. 5th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad. (In Farsi).
- Loghavi, M., and Sh. Mohseni. 2006. The effects of shaking frequency and amplitude on detachment of lime fruit. Iran Agricultural Research 24-25: 27-38.

6. Loghavi, M., F. Khorsandi, and S. Kamgar. 2010. The effects of shaking frequency and amplitude on detachment of Estahban dried fig (*Ficus carica* cv. Sabz), XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering. Quebec. Canada.
7. Loghavi, M., F. Khorsandi, and S. Souri. 2011. The effects of shaking frequency and amplitude on vibratory harvesting of almond (*Prunus dulcis* l. cv. 7Shahrood). Annual International Meeting, Kentucky, USA.
8. Loghavi, M., and H. Rahimi. 2007. Effects of shaking amplitude and frequency on nut and cluster detachment of two varieties of pistachio. *Journal of Science and Technology in Agriculture and Natural Resources* 11 (40): 109-123.
9. Mirian, M. R. 2009. Design and construction of a laboratory machine for extracting pomegranate seeds. Unpublished M.Sc. Thesis on Mechanics of Agricultural Machinery. Tehran University, Abourayhan Pardis. (In Farsi).
10. Mirian, M. R., and J. Khazaei. 2010. Enhancement of extraction efficiency of citrus juice and sacs by twin oblique air jet moves in 3D space. XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR). Quebec, Canada.
11. Rezaee, K., M. Niakousari, and D. Zare. 2013. Evaluation adsorption isotherm and isosteric heat of freeze-dried pomegranate seed powder and fitting the data with mathematical models. *Journal of Food Science and Technology* 10 (41): 69-79.
12. Sarig, Y. 1985. Apparatus for separating pomegranate seeds, United State Patent Office. Patent No. 4530278. USA.
13. Schmilovitch, Z. 2008. Apparatus and method for extracting pomegranate seeds from pomegranates, United State Patent Office. Patent No. 7968136 B2. USA.
14. Shobeiri, S. M. S., S. Kamgar, and Y. Hemmat. 2012. Qualitative improvement in grape berries detachment unit by compressed air technique. 7th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Shiraz University. Shiraz. (In Farsi).
15. Stafford, J. R., and R. G. Diener. 1972. Design criteria for minimizing pre detachment fruit damage during mechanical shaking. *Transactions of the ASAE* 16: 840-843.

Development and evaluation of a vibratory-pneumatic pomegranate arils extractor

S. M. Nassiri^{1*} - S. Samsami² - M. Loghavi³

Received: 29-06-2015

Accepted: 06-02-2016

Introduction

Iran is a frontier of pomegranate fruit production in the world (with almost 40 % of the world's production). However due to traditional processing operations is not ranked as the largest pomegranate exporter. Saveh, Neyriz and Ferdows are the top pomegranate producing cities in Iran. Pomegranate is consumed as a fresh fruit as well as processed product as food additive, paste, syrup, jelly, pectin, jam, beverage, essence, vinegar and concentrate. Aril extraction is the first and essential postharvest operation for pomegranate processing. Arils are mostly extracted manually even in large scales for fresh and processed consumption. This labor intensive operation is rational when aril quality is an important index for consumer. But whenever pomegranate juice is desired, the aril quality has no priority for consumer, and therefore arils can be extracted with less care. Sarig (1985) was the first inventor of a pomegranate aril extractor who employed air jet force to extract the arils. Later, other researchers employed the same method as well as water jet to extract fruit juice and sac. In the present study, fabrication and evaluation of vibratory aril extractor augmented with air system was conducted.

Materials and Methods

The study was conducted using Rabab cultivar samples which were manually harvested from an orchard in Neyriz town, Fars province. Samples were kept in refrigerator at 5 °C till experimental trials. Initial moisture content of fruit skin, arils and internal fleshes were measured by gravimetric method as 31.7±2.6 %, 61.5±1.8 % and 42.8±1.4 %, respectively and for a whole fruit was measured 45.3±11.5 % (w.b.). For conducting laboratory tests, an aril extraction unit was designed and fabricated. It comprised a steel main frame, a 746 W electric motor, drive mechanism (eccentric and shaft), sample retentive unit, air jet unit, aril tank, and an air compressor-tank assembly. Sample retentive unit was designed in such a manner to hold a halved fruit. This unit was made from four elements, a hemisphere bowl, four pressure (spring) arms to apply force on skin of the sample, and four tension (spring) arms for fixing the sample in the bowl by applying pressure on the edges of the halved sample. Such configuration helped sample to open more and more while extracting the arils to expose trapped aril for easier extraction. Sample retentive assembly was vibrated by the electric motor and drive mechanism. Electric motor was equipped with an electric convertor to create different levels of vibration frequency. Also, the drive mechanism was designed in such a manner to create different levels of vibration amplitudes. According to the previous studies, 2 nozzles with 3.5 mm diameter were selected for air jet unit. Nozzles were spaced at 8 cm apart according to the measured mean diameter of samples. Outlet air jet from nozzles covered the cross sectional area of the halved fruit. Nozzles assembly was rotated 180 degrees clockwise and counterclockwise with an electronically controlled stepper motor. Pressurized air (from air tank) was transferred to nozzles assembly by flexible pipes. Air pressure was controlled at 500 kPa level by air regulator. To conduct experimental trials, samples halved at three different cutting directions (horizontal (equatorial), vertical and oblique) by a sharp cutter and halved samples were used for tests. Halved sample was fixed in bowl and then the unit was excited by the electric motor. The assembly was vibrated for 60 seconds before blowing the air jet for extra 30 seconds. Tests for air jet alone were conducted for 90 seconds and percentage of detached and damaged arils were calculated. Damaged aril during cutting process was subtracted from total damaged arils for each trial. Collected data were analyzed according to factorial experiments based on completely randomized design, and means were compared by Duncan post-hoc test. Data of combined and air jet alone systems were analyzed by two independent sample t tests.

1, 2 and 3- Associate Professor, Former M.Sc. Student and Professor respectively, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University

(* - Corresponding Author Email: nasiri@shirazu.ac.ir)

Results and Discussion

ANOVA results revealed that cutting type, frequency and amplitude, significantly influenced the percentage of aril extraction at 5 % level of significance. The highest amount of extraction was obtained at 30 Hz frequency and 4 mm amplitude for diagonal cutting by 87 %. At this condition, 13.9 % of arils were damaged by air jet pressure. A significant difference in percentage of extracted and damaged arils was observed between vibratory-air and air systems at 5 % level of significance. The highest amount of aril extraction as well as damage was observed for vibratory-air system with the means of 80.1 % and 9.9 %, respectively.

Conclusions

Maximum percentages of extraction and aril damage were achieved by applying the combined system with as compared to air jet system alone, so that combined system increased aril extraction by 7.1 % with 2.2 % extra damages.

Keywords: Air jet, Aril extractor, Pomegranate, Vibration

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه شبیه‌ساز جمع‌کننده تخت خورشیدی با استفاده از ضریب ترموهیدرولیکی

حامد رحمتی آیدنلو^۱ - علی محمد نیکبخت^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

چکیده

استفاده از ناهمواری در سطح زیرین صفحه‌ی جاذب حرارت خورشید از جمله شیوه‌های افزایش بازده ترموهیدرولیکی جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی می‌باشد. سامانه‌ای با عنوان سامانه‌ی شبیه‌ساز جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی، با مهیا ساختن شرایط تابشی خورشید، امکان بررسی و آزمایش هر نوع جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی را جهت به‌دست آوردن مقدار عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و در نهایت ضریب ترموهیدرولیکی ممکن ساخته است. در این آزمایش، سامانه‌ی شبیه‌سازی جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی برحسب توان مورد نیاز مکنده‌ی گریز از مرکز، المنت‌های حرارتی و تجهیزات مورد نیاز جهت اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر، طراحی و ساخته شد. ناهمواری مورب منقطع بر اساس تحقیقات پیشین، به‌عنوان ناهمواری بهینه، انتخاب و در مجرای متشکل از سه سطح صاف که کناره‌های صفحه‌ی جاذب حرارت صاف و ناهمواری‌دار را تشکیل داده بودند، مورد آزمایش قرار گرفت. ضریب تبیین برای مقایسه‌ی عدد ناسلت حاصل از آزمایش صفحه‌ی جاذب حرارت صاف و رابطه‌ی تجربی دیتوس-بولتر برابر با ۰/۶۹ و برای مقایسه‌ی ضریب اصطکاک حاصل از آزمایش و رابطه‌ی بلاسیوس برابر با ۰/۶۸ به‌دست آمد. تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی، برای ناهمواری مورد نظر نسبت به تغییرات عدد رینولدز بررسی گردیده و با تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار گرفت. افزایش ضریب اصطکاک نسبت به افزایش عدد استنتون ارجحیت داشته و در نتیجه ضریب ترموهیدرولیکی به‌دست آمده برای ناهمواری آزمایش شده در مجرای مورد نظر، با افزایش عدد رینولدز روند کاهشی داشت. بالاترین مقدار ضریب ترموهیدرولیکی برای عدد رینولدز ۳۱۴۹، برابر با ۱/۰۸ حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: ضریب اصطکاک، ضریب ترموهیدرولیکی، عدد ناسلت، ناهمواری

مقدمه

شکستن لایه‌ی مرزی^۵ ایجاد شده ما بین سیال هوای عبوری از مجرای جمع‌کننده و صفحه‌ی جاذب حرارت، روش به مراتب مؤثری نسبت به حالت‌های دیگر می‌باشد (Varun et al., 2007). جهت بررسی هریک از این روش‌ها، از سامانه‌ی شبیه‌سازی استفاده می‌گردد که شرایط تابشی خورشید را مهیا ساخته و امکان محاسبه‌ی پارامترهای حرارتی و ترمودینامیکی مورد نظر را که در طراحی یک جمع‌کننده‌ی خورشیدی صفحه تخت حائز اهمیت می‌باشد، فراهم می‌سازد.

رابطه‌ی دیتوس-بولتر^۶

رابطه‌ی دیتوس-بولتر، یک رابطه‌ی تجربی، به منظور پیش‌بینی عدد ناسلت^۷ به‌دست آمده برای صفحه‌ی جاذب حرارت صاف

با توجه به افزایش رو به رشد استفاده از انرژی‌های جایگزین در عرصه‌های مختلف صنعتی و کشاورزی، استفاده از جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی هوا مینا به منظور تأمین انرژی سامانه‌های گرمایشی و همچنین خشک کردن محصولات کشاورزی توسط خشک‌کن‌های خورشیدی، مورد توجه قرار گرفته است. چین‌دار کردن صفحه‌ی جاذب حرارت و استفاده از ناهمواری^۳ در سطح زیرین صفحه‌ی جاذب حرارت خورشید از جمله شیوه‌های افزایش ضریب ترموهیدرولیکی^۴ برای این نوع جمع‌کننده‌ها می‌باشد. استفاده از ناهمواری، به دلیل

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(*)- نویسنده مسئول: (Email: alinikbakht87@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jam.v7i1.47395

3- Roughness

4- Thermohydraulic performance

5- Viscous wall layer

6- Dittus-Bolter

7- Nusselt number

ناهمواری‌ها، علاوه بر افزایش عدد ناسلت که موجب افزایش دمای خروجی می‌گردند، به دلیل ایجاد جریان متلاطم، موجب افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک شده که این امر افزایش توان مصرفی مکنده را به دنبال خواهد داشت (Hans *et al.*, 2009). لذا جهت ایجاد تعادل ما بین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک تولیدی، پارامتر بدون بعد ضریب ترموهیدرولیکی معرفی می‌گردد. ضریب ترموهیدرولیکی به صورت رابطه‌ی (۵) بیان می‌شود (Aharwal *et al.*, 2008).

$$\eta = \frac{\overline{St}_r / \overline{St}_s}{\sqrt[3]{f_r / f_s}} \quad (5)$$

در رابطه‌ی (۵)، \overline{St}_r ، \overline{St}_s ، f_r ، f_s به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پارامترهای بدون بعد ضریب اصطکاک برای صفحه‌ی جاذب حرارت دارای ناهمواری و صاف و متوسط عدد استنتون برای صفحه‌ی جاذب حرارت ناهمواری دار و صاف می‌باشند. در آزمایش به عمل آمده، مقدار عدد استنتون برای سطوح صاف و دارای ناهمواری با استفاده از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌گردد (Aharwal *et al.*, 2008).

$$St = \frac{Nu_L}{Re \cdot Pr} \quad (6)$$

با استفاده از سامانه‌ای، روش ناهمواری برای جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مورد نظر، در شار حرارتی یکنواخت 1000 W m^{-2} که توسط المنت‌های حرارتی تأمین می‌گردید، در بازه‌ی عدد رینولدز ۳۰۰۰ الی ۱۸۰۰۰ مورد بررسی گرفت. در این سامانه، فلز آلومینیوم با ضخامت ۶ mm برای صفحه‌ی جاذب حرارت دارای ناهمواری مورب منقطع^۶ و صاف استفاده گردید. طول قسمت ورودی^۷، منطقه‌ی مورد آزمایش^۸ و قسمت خروجی^۹ بر اساس استاندارد^{۱۰} ASHRAE 93-1977 به ترتیب برابر با ۸۰۰ mm، ۱۲۰۰ mm و ۶۰۰ mm در نظر گرفته شد (ASHRAE; Standard Aharwal *et al.*, 2008). تأثیر استفاده از ناهمواری گوس مانند^{۱۱}، بر اساس ضریب ترموهیدرولیکی، با استفاده از سامانه‌ای که سیال هوا توسط مکنده‌ی گریز از مرکز، از داخل مجرای آن عبور می‌کرد و تحت شار حرارتی یکنواخت 1000 W m^{-2} قرار داشت، در بازه‌ی عدد رینولدز ۲۰۰۰ الی ۱۷۰۰۰ بررسی گردید.

می‌باشد. این رابطه، به منظور اطمینان از درستی اعداد ناسلت به دست آمده از آزمایشات انجام گرفته بر روی صفحه‌ی جاذب حرارت صاف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. عدد ناسلت حاصل از رابطه‌ی دیتوس-بولتر برای سطح صاف و عدد ناسلت محاسبه شده در آزمایش برای سطوح دارای ناهمواری و صاف، به ترتیب، با استفاده از روابط (۱) و (۲) تعریف می‌گردند (Aharwal *et al.*, 2008).

$$\overline{Nu}_L = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (1)$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_L \cdot D_h}{k} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۱)، \overline{Nu}_L ، Re و Pr به ترتیب بیان‌گر پارامترهای بدون بعد متوسط عدد ناسلت، عدد پراتل و عدد رینولدز^۱ برای سیال عبوری از مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش می‌باشند که با توجه به شرایط آزمایش انجام گرفته، براساس سرعت و مشخصات فیزیکی سیال تعیین می‌شوند. در رابطه‌ی (۲)، h ($\text{W m}^{-2} \text{ K}$)، k ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) و D_h (m) به ترتیب بیان‌گر متوسط ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال هوای عبوری از مجرا^۲، رسانندگی گرمایی سیال هوای عبوری از مجرا^۳ و قطر هیدرولیکی مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش^۴ می‌باشد.

رابطه‌ی بلاسیوس

رابطه‌ی بلاسیوس، یک رابطه‌ی تجربی به منظور پیش‌بینی ضریب اصطکاک، برای صفحه‌ی جاذب حرارت صاف می‌باشد. این رابطه، به منظور اطمینان از درستی مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده، از آزمایشات انجام گرفته بر روی صفحه‌ی جاذب حرارت صاف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب اصطکاک به دست آمده از رابطه‌ی بلاسیوس^۵ و ضریب اصطکاک محاسبه شده در آزمایش برای سطح دارای ناهمواری و صاف، به ترتیب با استفاده از روابط (۳) و (۴) تعریف می‌گردند (Aharwal *et al.*, 2008).

$$f = 0.085 \cdot Re^{-0.25} \quad (3)$$

$$f = \frac{2 \times \Delta P \cdot D_h}{4 \times \rho \cdot L \cdot V^2} \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)، P (Pa)، D_h (m)، L (m)، V (kg m^{-3}) و V (m s^{-1}) به ترتیب بیان‌گر افت فشار مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش، قطر هیدرولیکی مجرا، طول مجرا، چگالی سیال در مجرای جمع‌کننده و سرعت سیال هوای عبوری از مجرای جمع‌کننده برای آزمایش انجام گرفته می‌باشد.

ضریب ترموهیدرولیکی

6- Inclined broken rib

7- Entry section

8- Test section

9- Exit section

10- American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers

11- Arc shaped

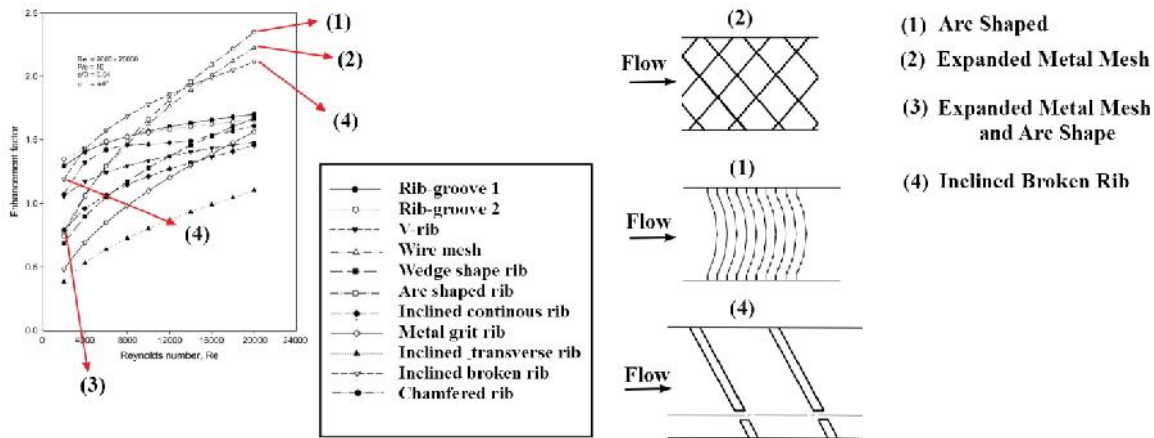
1- Reynolds number

2- Heat transfer coefficient

3- Thermal conductivity of fluid

4- Hydraulic diameter

5- Blasius number



شکل ۱- تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی برای محدوده‌ی عدد رینولدز ۲۰۰۰-۲۰۰۰۰ در ناهمواری‌های متفاوت (Hans *et al.*, 2009)
Fig.1. Comparison of thermohydraulic performance for various roughnesses (Hans *et al.*, 2009)

شده، e ، d ، W ، g ، P و D_h به ترتیب، ارتفاع ناهمواری (که در این جا، ارتفاع رخنه نیز می‌باشد)، عرض مجرای جمع‌کننده مورد آزمایش، عرض رخنه، گام ناهمواری و قطر هیدرولیکی مجرای جمع‌کننده بوده، که بر حسب واحد متر بیان می‌گردند (شکل ۲). مجرای مورد نظر در اکثر آزمایش‌های انجام گرفته، فقط متشکل از یک صفحه‌ی جاذب حرارت صاف و دارای ناهمواری بوده که تحت تأثیر شار حرارتی تعیین شده در جهت مشخص شده قرار گرفته و کناره‌های صفحه‌ی جاذب مورد نظر، فاقد سطوح فلزی می‌باشند که برای مجرای جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی واقعی نیز، بر همین منوال می‌باشد (Aharwal *et al.*, 2008; Aharwal *et al.*, 2009; Saini *et al.*, 2008b; Sethi *et al.*, 2012). با این وجود، در آزمایش انجام گرفته توسط هان، مجرای مورد نظر متشکل از چهار سطح فلزی بوده که شار حرارتی بر هر دو سطح ناهمواری دار مورد بررسی، اعمال می‌گردد (Han, 1984). در آزمایش پیش‌رو، هدف طراحی و ساخت سامانه‌ای جهت شبیه‌سازی جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی و سهولت در اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز و انتخاب نوع بهینه‌ی ناهمواری از منظر ضریب ترموهیدرولیکی، تعریف گردید. مهم‌ترین ویژگی این تحقیق در قیاس با تحقیقات پیشین، در نظر گرفتن سطوح صاف، در کناره‌های صفحات جاذب حرارت دارای ناهمواری بهینه و صاف بوده، به گونه‌ای که شار حرارتی مورد نظر، فقط بر صفحه‌ی جاذب حرارت (ناهمواری دار و صاف) که سطح فوقانی مجرای مستطیلی شکل را تشکیل می‌دهند، اعمال گردد. اقتصادی و کم هزینه بودن شبیه‌سازی جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی در شرایط گوناگون، اولین مزیت نتایج گزارش شده در این پژوهش می‌باشد. علاوه بر این، تأثیر صفحات صاف کناره‌های مجرا در افزایش عدد ناسلت و کاهش ضریب اصطکاک برای صفحه‌ی صاف جاذب حرارت و در نهایت تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی برای

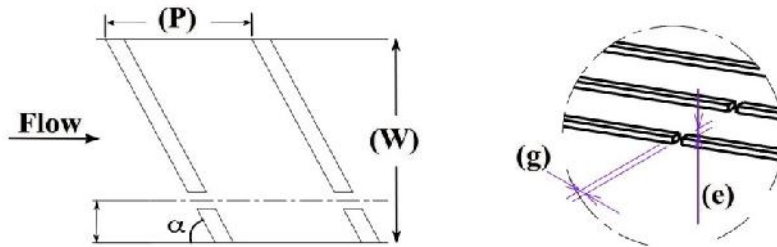
طول قسمت‌های ورودی، منطقه‌ی مورد آزمایش و خروجی، بر اساس استاندارد ASHRAE 93-1977 به ترتیب ۹۰۰ mm، ۵۰۰ mm و ۱۱۰۰ mm برآورد گردید (Saini *et al.*, 2008b). ناهمواری‌هایی با حالت عمود بر مسیر جریان^۱، بر روی دو سطح از مجرای با سطح مقطع مربع شکل، نصب گردیده و در بازه‌ی عدد رینولدز ۷۰۰۰ الی ۹۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. در این آزمایش که با هدف استفاده از ناهمواری‌ها، جهت خنک‌کاری در توربین‌های گازی انجام گرفته بود، دو سطح ناهمواری دار تحت تأثیر مستقیم شار حرارتی قرار گرفته و دو سطح صاف مجرا، به صورت عایق‌بندی، در نظر گرفته شدند (Han, 1984). تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی برای ناهمواری‌های متفاوت نسبت به عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که بالاترین مقادیر ضریب ترموهیدرولیکی مربوط به سه نوع ناهمواری گوس مانند، مورب منقطع و مش سیم فلزی گسترش یافته^۲ می‌باشد (Hans *et al.*, 2009) (شکل ۱). در تحقیق انجام گرفته توسط وارون و همکاران، با بررسی انواع پارامترهای هندسی مهم در اکثر ناهمواری‌ها، بهینه‌ترین مقدار برای نسبت عرض به ارتفاع مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش، برابر ۱۲ بیان گردید (Varun *et al.*, 2007).

در آزمایش انجام گرفته توسط آهاروال و همکاران، بالاترین مقدار ضریب ترموهیدرولیکی برای ناهمواری مورب منقطع، تحت شرایطی که مقادیر ارتفاع نسبی ناهمواری (e/D_h)، گام نسبی ناهمواری (P/e)، موقعیت نسبی رخنه (d/W)، عرض نسبی رخنه (g/e) و زاویه برخورد ناهمواری با جریان سیال () به ترتیب ۰/۳۷۷، ۱۰، ۰/۲۵، ۱ و ۶۰ درجه در نظر گرفته شده بودند، به دست آمد (Aharwal *et al.*, 2008). شایان ذکر است که در پارامترهای هندسی بدون بعد ذکر

1- Transverse roughness
 2- Expanded metal mesh

عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به‌دست آمده برای مجرایی با چهار سطح صاف، به‌ترتیب با روابط دیتوس- بولتر و بلاسیوس مورد مقایسه قرار گرفت.

صفحه‌ی جاذب ناهمواری‌دار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، بر اساس تحقیقات پیشین، مقدار بهینه‌ی ۱۲ برای نسبت عرض به ارتفاع مجرای صفحه‌ی جاذب حرارت دارای ناهمواری بهینه و صاف در نظر گرفته شد (Varun et al., 2007). همچنین، مقادیر

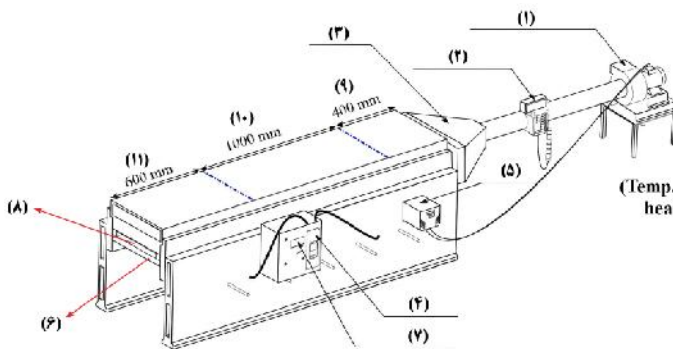


شکل ۲- ابعاد هندسی مورد بررسی در ناهمواری ضلع شکسته شیب‌دار
Fig.2. Investigated dimensions in Inclined Broken Rib Roughness

خورشیدی، طراحی اولیه‌ی این سامانه توسط نرم افزار Catia V5R21 انجام گرفت (شکل ۳).

مواد و روش‌ها

به منظور ساخت سامانه شبیه‌ساز جمع‌کننده‌ی صفحه تخت



- (1) مکنده‌ی گریز از مرکز (Centrifugal fan)
- (2) سرعت‌سنج (Velocity meter)
- (3) آرام‌کننده (Plenum)
- (4) فشارسنج (Differential pressure)
- (5) اینورتر (Inverter)
- (6) عایق یاغی (Below insulation)
- (7) نمایش‌دهنده‌ی دما و کنترل‌کننده‌ی شار حرارتی (Temp. demonstrator and heat flux cotroller)
- (8) مجرای کانکتور مورد آزمایش (Duct of tested collector)
- (9) قسمت خروجی (Exit section)
- (10) منطقه‌ی مورد آزمایش (Test section)
- (11) قسمت ورودی (Entrance section)

شکل ۳- مدل طراحی شده برای سامانه شبیه‌ساز جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی در نرم‌افزار Catia V5R21
Fig.3. Solar flat collector simulator designed by Catia V5R21

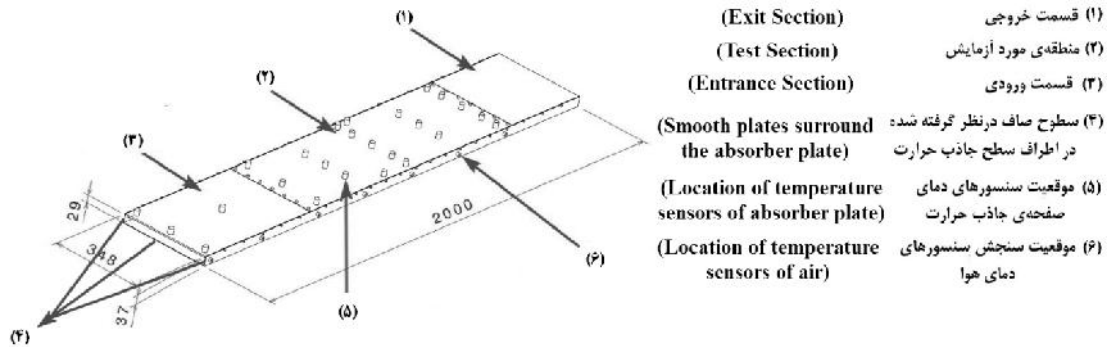
مجموع طول کل مجرای جمع‌کننده برابر با ۲۰۰۰ mm به‌دست آمد (ASHRAE Standard 93-2010). عرض و ارتفاع مجرا به‌ترتیب برابر با ۳۴۸ mm و ۲۹ mm، در راستای اعمال نسبت عرض به ارتفاع مجرای برابر ۱۲ در نظر گرفته شد (شکل ۴).

قسمت منطقه‌ی مورد آزمایش در دو حالت صفحه‌ی جاذب حرارت صاف، جهت ارزیابی سامانه با استفاده از روابط بلاسیوس و دیتوس- بولتر و برای شرایط دارای ناهمواری، جهت به‌دست آوردن ضریب ترموهیدرولیکی تهیه گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحقیق انجام گرفته توسط هانز و همکاران، ناهمواری مورب منقطع به دلیل تغییرات کم در بازه‌ی عدد رینولدز مورد بررسی و همچنین به دلیل بودن ضریب ترموهیدرولیکی در مقادیر پایین عدد رینولدز (شکل ۱)، به‌عنوان ناهمواری مورد نظر با مقادیر پارامترهای هندسی

مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش

مجرای جمع‌کننده‌ی مورد نظر که شامل سه بخش قسمت ورودی، منطقه‌ی مورد آزمایش (تست) و خروجی می‌باشد، بر اساس مدل طراحی شده در نرم‌افزار Catia V5R21 توسط عملیات ماشین‌کاری CNC^۱، از جنس فلز آلومینیوم با ضخامت ۶ mm ساخته شد (Aharwal et al., 2008) (شکل ۴). سطوح صاف کناره‌های صفحه‌ی جاذب حرارت ناهمواری‌دار و صاف، با ضخامت ۲ mm در نظر گرفته شد. بر اساس استاندارد ASHRAE 93-2010، طول قسمت ورودی، منطقه‌ی مورد آزمایش و خروجی به‌ترتیب برابر با ۴۰۰ mm، ۶۰۰ mm و ۱۰۰۰ mm انتخاب و ساخته شد که در

1- Computer numerical control



شکل ۴- نقشه‌ی سه بعدی طراحی شده برای مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش در نرم‌افزار Catia V5R21
 Fig.4. Sketched scheme for 3dimensional designed of tested duct by Catia V5R21

المنت‌های حرارتی

به منظور تأمین حرارت لازم، جهت شبیه‌سازی شرایط تابشی خورشید، از دو المنت، با توان مصرفی کل برابر با ۱۵۰۰ W استفاده گردید. میزان شار حرارتی تولیدی توسط این المنت‌ها، در محدوده‌ی 800 W m^{-2} الی 1400 W m^{-2} در نظر گرفته شد.

آرام کننده

با توجه به عدم توسعه یافتگی هیدرولیکی و دمایی جریان خروجی از منطقه‌ی مورد آزمایش، به هنگام ارزیابی صفحه‌ی جاذب حرارت ناهمواری دار و صاف، امکان اندازه‌گیری صحیح دبی جرمی (یا حجمی) سیال عبوری از لوله‌ی منتهی به مکنده، وجود نداشت. لذا صفحه‌ی صاف قسمت خروجی و آرام کننده، جهت توسعه یافتگی جریان خروجی از منطقه‌ی مورد آزمایش نصب گردید. آرام کننده‌ی استفاده شده مطابق شکل ۳، از جنس چوب^۱ MDF با ضخامت ۳ mm جهت عایق‌بندی، طراحی و ساخته شد.

لوله‌ی منتهی به مکنده

لوله‌ی منتهی به مکنده‌ی گریز از مرکز، دارای طول و قطر به ترتیب ۱ m و ۱۰/۱۶ cm بوده که از جنس فلز آهن انتخاب شد (شکل ۳).

مکنده‌ی گریز از مرکز

یکی از اصول اولیه در انتخاب مکنده‌ها، توجه به میزان دبی حجمی تولیدی آن‌ها، بر اساس میزان افت فشار موجود در سیستم

جدول ۱- پارامترهای هندسی تهیه شده از تحقیقات پیشین برای ناهمواری مورد نظر

Table 1. Considered values of geometric parameters extracted from previous researches

پارامترهای هندسی Geometric parameters	مقادیر در نظر گرفته شده Considered values
ارتفاع نسبی ناهمواری* Relative roughness height	0.0377
گام هندسی ناهمواری** Relative roughness pitch	10
زاویه‌ی برخورد ناهمواری با جریان سیال Angle of attack	60°
موقعیت نسبی رخنه*** Relative gap position	0.25
عرض نسبی رخنه**** Relative gap width	1
ارتفاع ناهمواری Roughness height	2 mm

* نسبت ارتفاع ناهمواری به قطر هیدرولیکی مجرای جمع‌کننده‌ی مورد آزمایش

* Roughness height to the hydraulic diameter

** نسبت گام ناهمواری به ارتفاع ناهمواری

** Pitch if roughness to height of roughness

*** فاصله‌ی قرارگیری رخنه نسبت به یکی از دیواره‌های مجرا نسبت به عرض مجرا

*** Distance of gap to the width of duct

**** ارتفاع رخنه به عرض رخنه

**** Height of gap to width of gap

$$\Delta P_{\text{plenum}} = C_2 \cdot \left(\frac{V_{\text{out-plenum}}}{1.29} \right)^2 \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۷) C_2 و $V_{\text{out-plenum}}$ (m s⁻¹) به ترتیب بیان‌گر سرعت سیال هوای خروجی از آرام‌کننده، ضریب اعمال شده به رابطه بر اساس نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی سیال و افت فشار تولیدی توسط آرام‌کننده می‌باشد. حداکثر سرعت سیال هوای خروجی پیش‌بینی شده در مجرای جمع‌کننده (که سرعت سیال هوای ورودی به آرام‌کننده می‌باشد)، برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، با توجه به این که سطح مقطع مجرای جمع‌کننده برابر با ۰/۰۱ m² می‌باشد، برابر ۶/۴۳ ms⁻¹ به دست آمد. مقدار ضریب C_2 بر اساس نسبت سطح خروجی به ورودی سیال برابر با ۰/۰۳ در نظر گرفته شد (Brooker *et al.*, 1992). در نتیجه سرعت سیال هوای خروجی از آرام‌کننده، با در نظر گرفتن حجم کنترل در شرایط پایا و سیال غیرقابل تراکم، از رابطه‌ی (۸) محاسبه گردید.

$$A_{\text{in-plenum}} \cdot V_{\text{in-plenum}} = A_{\text{out-plenum}} \cdot V_{\text{out-plenum}} \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)، $A_{\text{in-plenum}}$ (m²)، $V_{\text{in-plenum}}$ (m s⁻¹) و $A_{\text{out-plenum}}$ (m²) به ترتیب بیان‌گر مساحت سطح مقطع به هنگام ورود سیال هوا به آرام‌کننده، سرعت سیال هوای ورودی به آرام‌کننده و مساحت سطح مقطع به هنگام خروج سیال هوا از آرام‌کننده می‌باشد.

افت فشار موجود در صفحه‌ی روزنه^۳

با توجه به این که برای اندازه‌گیری دبی جرمی از صفحه‌ی روزنه نیز استفاده می‌گردد، لذا افت فشار تولید شده توسط صفحه‌ی روزنه جهت تعیین توان مصرفی مکنده‌ی گریز از مرکز در محاسبات اعمال گردید. به منظور محاسبه‌ی افت فشار تولید شده در صفحه‌ی روزنه، مشابه روابط (۷) و (۸)، روابط (۹) و (۱۰) تعریف گردید.

$$\Delta P_{\text{Orifice}} = C_2 \cdot \left(\frac{V_{\text{out-Orifice}}}{1.29} \right)^2 \quad (9)$$

$$A_{\text{in-Orifice}} \cdot V_{\text{in-Orifice}} = A_{\text{out-Orifice}} \cdot V_{\text{out-Orifice}} \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، P_{Orifice} (pa)، $A_{\text{in-orifice}}$ (m²)، $V_{\text{in-orifice}}$ (m s⁻¹) و $A_{\text{out-orifice}}$ (m²) به ترتیب بیان‌گر افت فشار تولیدی توسط صفحه‌ی روزنه، مساحت سطح مقطع به هنگام ورود سیال هوا به صفحه‌ی روزنه، سرعت سیال هوای ورودی به صفحه‌ی روزنه، مساحت سطح مقطع به هنگام خروج سیال هوا از صفحه‌ی روزنه، سرعت سیال هوای خروجی از صفحه‌ی روزنه و ضریب اعمال شده به رابطه بر اساس نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی سیال بوده که برابر با ۰/۰۳ در نظر گرفته شد (Brooker *et al.*, 1992). همچنین، قطر حفره‌ی ایجاد شده در صفحه‌ی روزنه

مورد نظر می‌باشد. لذا مکنده‌ی گریز از مرکز بر اساس مقدار دبی حجمی مورد نیاز و افت فشار موجود در سیستم، انتخاب گردید. در همین راستا، با توجه به در نظر گرفتن عدد رینولدز در بازه‌ی ۲۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰ برای مجرای جمع‌کننده‌ی مورد بررسی، دبی حجمی مورد نیاز در محدوده‌ی ۰/۰۷۹ m³ s⁻¹ الی ۰/۰۶۴۳ m³ s⁻¹ برآورد گردید (Aharwal *et al.*, 2008; Jaurker *et al.*, 2006; Saini *et al.*, 2008a; Saini *et al.*, 2008b; Sethi *et al.*, 2012).

افت فشار موجود در سیستم

افت فشار موجود در سیستم، یکی از پارامترهای مهم در انتخاب مکنده‌ی مورد نظر می‌باشد. به گونه‌ای که با افزایش افت فشار، توان مصرفی مکنده برای تأمین دبی حجمی مورد نظر، افزایش می‌یابد. عوامل افزایش افت فشار در سیستم‌های فرآوری پس از برداشت و مرتبط با محصولات کشاورزی را می‌توان در دو حالت طبقه‌بندی کرد. حالت اول مرتبط با محصول بوده که شامل نوع محصول، رطوبت محصول، درجه‌ی کیفیت محصول، ارتفاع محصول و نحوه‌ی چینش و پر کردن محصول مورد نظر در سیستم می‌باشد. حالت دوم مرتبط با ادوات و اتصالات موجود در سیستم بوده که در ارتباط با زانویی‌ها، مجرا و آرام‌کننده‌ی به کار رفته در سیستم می‌باشد (Brooker *et al.*, 1992). با توجه به این که در سیستم مورد آزمایش، محصول وجود نداشت، لذا افت فشار موجود در سیستم که فقط ناشی از وجود مجرا و تغییر سطح مقطع در مسیر عبوری سیال هوا از سیستم می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت.

افت فشار ایجاد شده در مجرای جمع‌کننده

افت فشار با توجه به توسعه یافته^۱ و یا عدم توسعه یافته بودن سیال در مجرای جمع‌کننده، نسبت به طول مجرا، دبی جرمی (و یا حجمی) سیال، ضریب اصطکاک و چگالی سیال متغیر می‌باشد. با توجه به این که پارامترهای ضریب اصطکاک و چگالی سیال قبل از ساخت سامانه در اختیار نیست، لذا افت فشار بر واحد متر موجود در مجرای جمع‌کننده برای حالت صفحه‌ی جاذب حرارت صاف، با استفاده از استاندارد ASHRAE، بر اساس سرعت و دبی حجمی پیش‌بینی شده، محاسبه گردیده و در نتیجه، افت فشار موجود در مجرا (P_{duct}) برای صفحه‌ی جاذب صاف به دست آمد (Brooker *et al.*, 1992).

افت فشار موجود در آرام‌کننده

مقدار افت فشار موجود در آرام‌کننده‌ی نصب شده در سیستم، با استفاده از رابطه‌ی (۷) محاسبه شد (Brooker *et al.*, 1992).

2- Cross section area of the duct; 0.029(Height)×0.348 (Width) = 0.01m²

3- Orifice plate

1- Fully developed

اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

ساخت سامانه‌ی شبیه‌ساز جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی

افت فشار بر واحد متر موجود در مجرای جمع‌کننده برای حالت صفحه‌ی جاذب حرارت صاف برابر با 10 Pa m^{-1} به‌دست آمد. با توجه به این‌که طول مجرای جمع‌کننده برابر با 2 m در نظر گرفته شده بود، میزان افت فشار در مجرای جمع‌کننده (P_{duct})، 20 Pa محاسبه شد. آرام‌کننده با استفاده از لوله‌ای با سطح مقطع دایره‌ای به قطر $1.6/10 \text{ cm}$ به فن مکنده منتهی می‌گردد، لذا با استفاده از رابطه‌ی (۸)، حداکثر سرعت خروجی از آرام‌کننده برابر با $8/0.05 \text{ m s}^{-1}$ محاسبه گردید. در نتیجه، مقدار افت فشار ایجاد شده توسط آرام‌کننده (P_{plenum})، با به‌دست آمدن سرعت خروجی سیال هوا از آن، با جایگذاری در رابطه‌ی (۷) برابر $1/16 \text{ Pa}$ به‌دست آمد. حداکثر سرعت هوای خروجی از صفحه‌ی روزنه بر اساس حداکثر سرعت سیال هوای خروجی از آرام‌کننده، با استفاده از رابطه‌ی (۱۰)، برابر 36 m s^{-1} محاسبه گردید. در نتیجه افت فشار تولید شده توسط صفحه‌ی روزنه (P_{orifice})، با استفاده از رابطه‌ی (۹) برابر با 243 Pa و افت فشار کل، با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) برابر با $246/16 \text{ Pa}$ به‌دست آمد. با مشخص شدن افت فشار کل، مقدار توان اسمی مکنده‌ی گریز از مرکز، به‌ترتیب با استفاده از روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) برابر با 1.05 W به‌دست آمد. در راستای تامین توان و دبی حجمی مورد نیاز برای آزمایش، مکنده‌ی گریز از مرکز lenze ساخت آلمان با توان اسمی 370 W و دبی حجمی $0.1416 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (۳۰۰ cfm) انتخاب و بر روی سامانه نصب گردید. در نهایت با توجه به طراحی‌های انجام گرفته و با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری ذکر شده، سیستم مورد نظر مطابق شکل ۵ با عنوان سامانه‌ی شبیه‌ساز جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی ساخته شد.

عدد رینولدز به‌دست آمده در آزمایشات، برای فرکانس‌های 5 Hz ، 10 Hz ، 15 Hz ، 20 Hz ، 25 Hz و 30 Hz ، به‌طور متوسط در بازه‌ی برابر با 3149 الی 19247 قرار گرفت.

تغییرات عدد ناسلت به‌دست آمده از آزمایش برای صفحه‌ی جاذب حرارت صاف و مقایسه‌ی آن با رابطه‌ی

دیتوس-بولتر

مقادیر عدد ناسلت در شار حرارتی 1000 W m^{-2} و فرکانس‌های 10 Hz الی 30 Hz ، برای سطح صاف محاسبه شده و با مقادیر به‌دست آمده، از رابطه‌ی دیتوس-بولتر مورد مقایسه گرفت (شکل ۶).

برابر $4/8 \text{ cm}$ در نظر گرفته شد (Aharwal et al., 2009). در نهایت افت فشار کل موجود در سامانه (P_{total}) با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) محاسبه شد (Rahnama et al., 2010).

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{Duct}} + \Delta P_{\text{plenum}} + \Delta P_{\text{orifice}} \quad (11)$$

با توجه به وقوع افت فشارهای پیش‌بینی نشده در سامانه و همچنین استفاده از صفحه‌ی جاذب حرارت دارای ناهمواری که به دلیل داشتن ناهمواری، دارای افت فشار به مراتب بیش‌تری نسبت به صفحه‌ی جاذب حرارت صاف در مجرای جمع‌کننده می‌باشد، مقدار افت فشار نهایی (P_U)، مطابق رابطه‌ی (۱۲) با احتساب ضریب اطمینان 50% در نظر گرفته شد.

$$\Delta P_U = \Delta P_{\text{total}} / 0.5 \quad (12)$$

با در اختیار داشتن حداکثر مقدار دبی حجمی برای عدد رینولدز 20000 و مقدار افت فشار نهایی، توان مصرفی (P_e) مکنده به منظور غلبه بر افت فشار نهایی، مطابق رابطه‌ی (۱۳) محاسبه گردید (Rahnama et al., 2010).

$$P_e = \Delta P_U \cdot Q \quad (13)$$

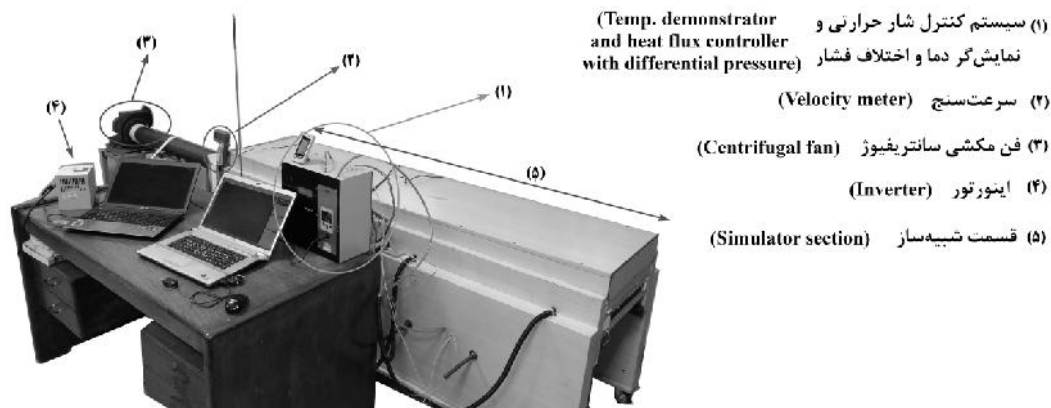
در رابطه‌ی (۱۳)، Q بیان‌گر دبی حجمی عبوری از سامانه می‌باشد. با توجه به اینکه بازده الکتریکی (η_e) مکنده‌ی گریز از مرکز در حدود 65% تا 85% و بازده مکانیکی (η_m) در حدود 50% می‌باشد، توان اسمی (P_o) مکنده مطابق رابطه‌ی (۱۴) محاسبه شد (Rahnama et al., 2010).

$$P_o = \frac{P_e}{\eta_e \cdot \eta_m} \quad (14)$$

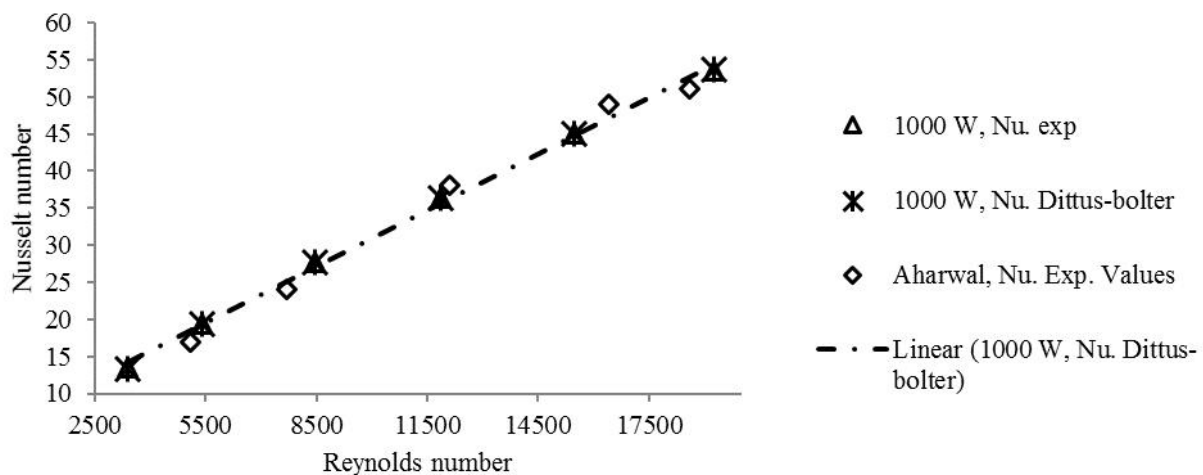
در رابطه‌ی (۱۴)، P_o بیان‌گر توان اسمی مکنده می‌باشد.

تجهیزات اندازه‌گیری و کنترل

به منظور کنترل دور مکنده، از اینورتور SV040iG5A-4 مارک LG-Korea استفاده شد. اینورتور ذکر شده با اعمال شش مقدار فرکانس مشخص 5 Hz ، 10 Hz ، 15 Hz ، 20 Hz ، 25 Hz و 30 Hz بر روی مکنده‌ی گریز از مرکز، جهت ایجاد جریان هوای اجباری مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری دمای صفحه‌ی جاذب حرارت، در قسمت‌های ورودی و منطقه‌ی مورد آزمایش و همچنین برای اندازه‌گیری دمای سیال هوای عبوری از منطقه‌ی مورد آزمایش، سنسورهای دمای LM35 مورد استفاده قرار گرفت. فشارسنج Cpe-310s مارک Kimo با محدوده‌ی اندازه‌گیری 100 Pa الی 100 Pa و رزولوشن 0.1 Pa جهت اندازه‌گیری اختلاف فشار در منطقه‌ی مورد آزمایش نصب گردید. همچنین، دبی جرمی سیال با استفاده از سرعت‌سنج TSI مدل 8355 (Velocity-Meter-8355) با محدوده‌ی عملکرد 0 m s^{-1} الی 50 m s^{-1} و رزولوشن 0.01 m s^{-1} که در قسمت میانی لوله‌ی منتهی به مکنده نصب گردیده بود،



شکل ۵- شبیه‌ساز جمع‌کننده‌های تخت خورشیدی
Fig.5. Flat plate collector simulator



شکل ۶- مقایسه تغییرات عدد ناسلت آزمایشی و محاسبه شده توسط رابطه‌ی دیتوس-بولتر، برای صفحه‌ی جاذب حرارت صاف، نسبت به عدد رینولدز در شار حرارتی 1000 W m^{-2}

Fig.6. Comparison of experimental and predicted values from Dittus-Boelter equation of Nusselt number vs. Reynolds number at constant 1000 W m^{-2} heat flux

آزمایش ساینی و همکاران برابر با $0/63$ می‌باشد (Aharwal *et al.*, 2008; Saini *et al.*, 2008b). نتایج حاصل بیان‌گر تطابق قابل قبول عدد ناسلت حاصل از این آزمایش با رابطه‌ی دیتوس-بولتر نسبت به تحقیقات انجام گرفته‌ی پیشین می‌باشد.

تغییرات ضریب اصطکاک به‌دست آمده از آزمایش برای صفحه‌ی جاذب حرارت صاف و مقایسه‌ی آن با رابطه‌ی بلاسیوس

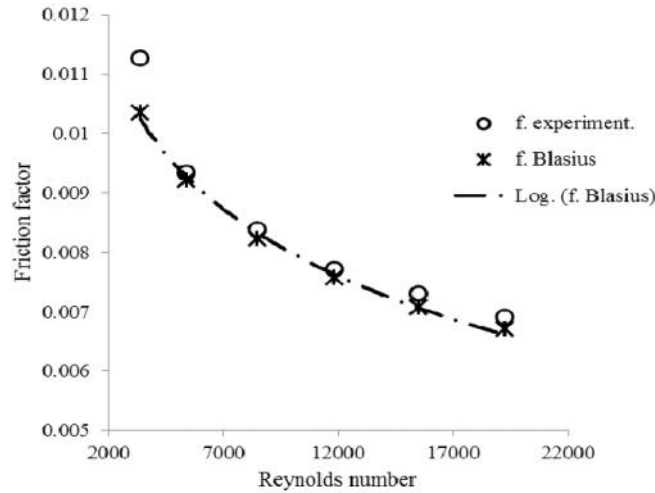
شکل ۷ بیان‌گر مقایسه‌ی انجام گرفته مابین ضریب اصطکاک به‌دست آمده از آزمایش، در شار حرارتی و فرکانس‌های مشخص شده

بر اساس شکل ۶، تغییرات عدد ناسلت به‌دست آمده از آزمایش انجام گرفته با مقادیر محاسبه شده توسط رابطه‌ی دیتوس-بولتر نسبت به عدد رینولدز، به‌صورت خطی و مستقیم می‌باشد (Aharwal *et al.*, 2008; Saini *et al.*, 2008b; Sethi *et al.*, 2012). مقدار $RMSE^1$ و ضریب تبیین به‌دست آمده برای مقایسه‌ی عدد ناسلت حاصل از آزمایش با رابطه‌ی تجربی دیتوس-بولتر به‌ترتیب برابر $0/0566$ و $0/69$ حاصل گردید. این در حالی است که مقدار ضریب تبیین حاصل از آزمایش آهاروال و همکاران برای مقایسه‌ی عدد ناسلت سطح صاف و رابطه‌ی دیتوس-بولتر، برابر با $0/63$ و برای

1- Root mean square error

(Sethi et al., 2012)

برای سطح صاف و مقدار ضریب اصطکاک به‌دست آمده توسط رابطه‌ی تجربی بلاسیوس می‌باشد (SainiAharwal et al., 2008) ;



شکل ۷- مقایسه‌ی تغییرات ضریب اصطکاک به‌دست آمده از آزمایش و محاسبه شده توسط رابطه‌ی بلاسیوس، برای صفحه‌ی جاذب حرارت صاف نسبت به تغییرات عدد رینولدز در شار حرارتی 1000 W m^{-2}

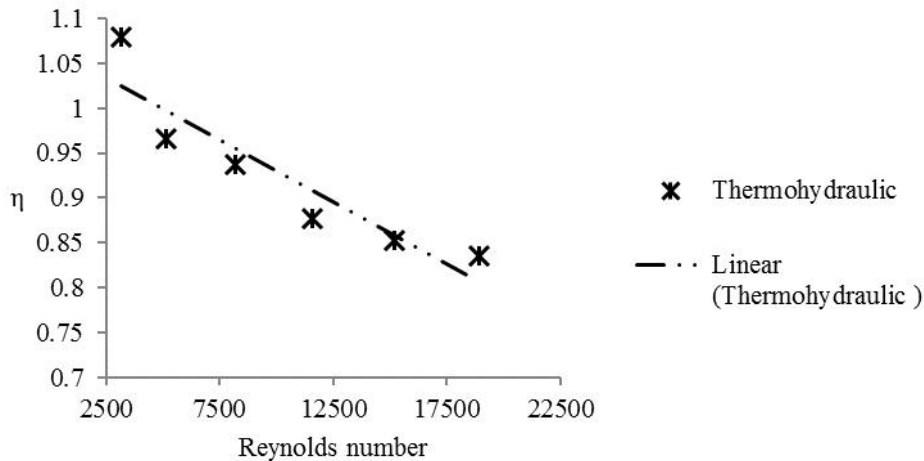
Fig.7. Comparison of experimental and predicted values from Blasius equation of friction factor vs. Reynolds number at constant 1000 W m^{-2} heat flux

برای آزمایش آهاروال و همکاران برابر با 0.62 بوده است (Aharwal et al., 2008).

نتایج حاصله نشان از این دارد که ضریب اصطکاک به‌دست آمده از آزمایش و ضریب اصطکاک محاسبه شده با استفاده از رابطه‌ی بلاسیوس، با افزایش عدد رینولدز به‌صورت نمایی رو به کاهش می‌باشد. مقدار RMSE و ضریب تبیین برای مقایسه‌ی ضریب اصطکاک به‌دست آمده از آزمایش و رابطه‌ی بلاسیوس به‌ترتیب برابر 0.0004 و 0.68 بوده که نشان‌گر تطابق قابل قبول ضریب اصطکاک حاصل از آزمایش و رابطه‌ی بلاسیوس، نسبت به بررسی‌های انجام گرفته‌ی پیشین می‌باشد. به‌طوری‌که مقدار ضریب تبیین به‌دست آمده

تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی

شکل ۸، بیان‌گر تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی نسبت به عدد رینولدز، برای شار حرارتی تعیین شده در صفحه‌ی جاذب حرارت دارای ناهمواری بهینه می‌باشد.



شکل ۸- ضریب ترموهیدرولیکی به‌دست آمده برای صفحه‌ی جاذب حرارت دارای ناهمواری نسبت به عدد رینولدز در شار حرارتی 1000 W m^{-2}

Fig.8. Obtained thermohydraulic coefficient for roughened absorber plate vs. Reynolds numbers at constant 1000 W m^{-2} heat flux

نتیجه‌گیری

سامانه‌ی شبیه‌ساز جمع‌کننده‌ی صفحه تخت خورشیدی، بر اساس استاندارد ASHRAE، با محاسبه‌ی افت فشار و دبی مورد نیاز برای مکندگی گریز از مرکز، جهت بررسی مجرای جمع‌کننده‌ی دارای ناهمواری بهینه، طراحی و ساخته شد. مقدار بازه‌ی عدد رینولدز مورد بررسی، در محدوده‌ی ۳۱۴۹ تا ۱۹۲۴۷ قرار گرفت. ضریب اصطکاک و متوسط عدد ناسلت منطقه‌ی مورد آزمایش صفحه‌ی جاذب حرارت صاف، به ترتیب با روابط تجربی بلاسیوس و دیتوس-بولتر نسبت به تغییرات عدد رینولدز مورد مقایسه قرار گرفت که تطابق قابل قبولی مشاهده گردید. مقدار ضریب تبیین برای مقایسه‌ی عدد ناسلت حاصل از آزمایش سطح صاف با رابطه‌ی دیتوس-بولتر و برای ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمایش با رابطه‌ی تجربی بلاسیوس به ترتیب برابر با ۰/۶۹ و ۰/۶۴ به دست آمد. تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی بر اساس ناهمواری بهینه‌ی ارائه شده و مجرای مورد نظر، نسبت به عدد رینولدز روند کاهشی داشته که می‌توان ناشی از ارجحیت تأثیر سطوح صاف اطراف مجرا بر ضریب اصطکاک، نسبت به عدد استنتون دانست. با مقایسه‌ی ضریب ترموهیدرولیکی به دست آمده در بازه‌ی عدد رینولدز آزمایش شده نسبت به تحقیقات سابق، می‌توان بیان داشت که استفاده از سطوح کناری صاف در مجرای که از یک جهت تحت تأثیر شار حرارتی قرار می‌گیرد، موجب کاهش بازه ترموهیدرولیکی با افزایش عدد رینولدز می‌گردد.

مطابق شکل ۸، ضریب ترموهیدرولیکی با افزایش عدد رینولدز روند نزولی داشته است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان داشت که افزایش ضریب اصطکاک نسبت به افزایش عدد استنتون، با افزایش عدد رینولدز برای مجرای مورد آزمایش ارجحیت داشته است. دلیل کاهش ضریب ترموهیدرولیکی را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که سطوح صاف در کناره‌های مجرا، تحت تأثیر مستقیم شار حرارتی نبوده و در نتیجه نقش چندانی در افزایش عدد استنتون، برای مجرای دارای ناهمواری ایفا نمی‌کنند. این درحالی است که به دلیل وجود سطوح صاف و انتقال حرارت به روش رسانش، هرچند در مقیاس بسیار پایین، سیال عبوری از کنار این دیواره‌ها دارای دمای نسبتاً بالاتری نسبت به حالت عایق شده‌ی این سطوح می‌باشد. در همین راستا، افزایش دمای سیال هوای عبوری از کنار دیواره‌ها، موجب کاهش ویسکوزیته‌ی سیال و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک در کنار این سطوح می‌گردد. لذا بر این اساس، استفاده از سطوح صاف در کناره‌های مجرا، تأثیر معکوسی بر ضریب ترموهیدرولیکی در برابر افزایش عدد رینولدز داشته و ضریب ترموهیدرولیکی برای مجرای که فاقد این سطوح باشد، دارای مقادیر بیش‌تری خواهد بود. در آزمایش انجام گرفته توسط هان، مقدار بازه ترموهیدرولیکی نیز با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد که از این منظر دارای تغییرات ضریب ترموهیدرولیکی مشابهی با آزمایش انجام گرفته در این تحقیق می‌باشد (Han, 1984).

References

- Aharwal, K. R., B. K. Gandhi, and J. S. Saini. 2008. Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater. *Renewable Energy* 33: 585-596.
- Aharwal, K. R., B. K. Gandhi, and J. S. Saini. 2009. Heat transfer and friction characteristics of solar air heater ducts having integral inclined discrete ribs on absorber plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 5970-5977.
- ASHRAE Standard 93-1977. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors (ANSI approved).
- ASHRAE Standard 93-2010. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors (ANSI approved). Pages 42.
- Brooker, B., D. Bakker-Arkema, F. W. Hall, and W. Carl. 1992. Airflow for Drying. Pages 125-185. *Drying and Storage Of Grains and Oilseeds*, Springer US.
- Han, J. C. 1984. Heat Transfer and Friction in Channels With Two Opposite Rib-Roughened Walls. *Journal of Heat Transfer* 106: 774-781.
- Hans, V. S., R. P. Saini, and J. S. Saini. 2009. Performance of artificially roughened solar air heaters-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1854-1869.

8. Jaurker, A., J. Saini, and B. Gandhi. 2006. Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness. *Solar Energy* 80: 895-907.
9. Rahnama, M., M. khoshtaghaza, K. A. Sani, and B. Ghobadian. 2010. Design, Construction and Evaluation of Solar Dryer with Desiccant Wheel for Preservation of Quality Properties of Estameran Date Palm. Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. (In Farsi).
10. Saini, R. P., and J. Verma. 2008a. Heat transfer and friction factor correlations for a duct having dimple-shape artificial roughness for solar air heaters. *Energy* 33: 1277-1287.
11. Saini, S. K., and R. P. Saini. 2008b. Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having arc-shaped wire as artificial roughness. *Solar Energy* 82: 1118-1130.
12. Sethi, M., R. Varun, and N. S. Thakur. 2012. Correlations for solar air heater duct with dimpled shape roughness elements on absorber plate. *Solar Energy* 86: 2852-2861.
13. Varun, R., P. Saini, and S. K. Singal. 2007. A review on roughness geometry used in solar air heaters. *Solar Energy* 81: 1340-1350.

Design, construction and evaluation of solar flat-plate collector simulator based on the thermohydraulic coefficient

H. Rahmati Aidinlou¹- A. M. Nikbakht^{2*}

Received: 08-06-2015

Accepted: 06-02-2016

Introduction

Increasing the area of absorber plate between the flowed air through the duct can be accomplished by corrugating the absorber plate or by using the artificial roughness underside of the absorber plate as the commercial methods for enhancing the thermohydraulic performance of the flat plate solar air heaters. Evaluation of this requires the construction of separated solar air heater which is costly and time consuming. The constructed solar flat-plate collector simulator can be a sufficient solution for obtaining the heat transfer and thermodynamic parameters for evaluating the absorber plate. The inclined broken roughness was chosen as the optimum roughness which is surrounded by three aluminum smooth walls.

Materials and Methods

The duct for both smooth and roughened plate have been constructed based on the ASHRAE 93-2010 standard. In order to achieve a fully thermal and hydraulic developed flow, the plenum is constructed. The centrifugal fan is considered by applying the required air volume at the pressure drop obtained by the duct, plenum and the orifice meter. The TSI velocity-meter 8355 is used to measure the velocity of air crossing through the pipe connected to the centrifugal fan. The micro manometer Kimo CPE310-s with the resolution of 0.1 Pa is used to measure the pressure drop across the test section of the smooth and roughened duct. The LM35 sensors are used to measure the absorber plate and air temperature through the test section. Obtained parameters are used to calculate the Nusselt number and friction factor across the test section for smooth and roughened absorber plate. The Nusselt number and friction factor parameters which is obtained for smooth absorber plate based on experimental set-up, is compared with Dittus-Bolter and Blasius equations, respectively, for validating the simulator. By calculating the Nusselt number and friction factor, Stanton number is obtained based on the equation (6), and thermohydraulic coefficient is calculated by the equation (5) for the desired roughness.

Results and Discussion

Pressure drop for smooth duct is obtained to be 20 Pa. Maximum velocity crossed through the plenum is calculated by the equation (8). Thereafter, pressure drop for plenum by considering the maximum velocity in equation (7), is obtained to be 1.16 Pa. The same procedure for maximum velocity which is crossed through the orifice meter is obtained by the equation (10) and then the pressure drop for orifice meter is calculated equal to 243 Pa by considering the velocity in equation (9). Total pressure is given by the equation (11) to be 246.16 Pa. The required power for centrifugal fan is obtained equal to 105 W from equations (12), (13) and (14), respectively. Both aforementioned Nusselt number variations with Reynolds number were monotonously increased by increasing the Reynolds number. The gained RMSE and coefficient of determination between the Nusselt numbers are 0.0566 and 0.6944, respectively. The obtained RMSE and coefficient of determination between the friction factors are 0.0004 and 0.6814, respectively. The low value of the RSME and high value of the R^2 analysis for both Nusselt number and friction factor shows that there is a good agreement between the experimental data and empirical correlations. Fig. 8 demonstrates that the thermohydraulic coefficient is decreasing as the Reynolds number increased. The effect of friction factor related to the Stanton number is shown up more effective by increasing the Reynolds number. It should be noted that the same procedure is conducted for Han's experiment where the thermohydraulic performance is decreased as the Reynolds number increased. The maximum magnitude of the thermohydraulic performance was achieved at minimum 3149 Reynolds number.

1- M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University

(*- Corresponding Author Email: a.nikbakht@urmia.ac.ir)

Conclusions

The flat-plate solar collector simulator was designed based on the ASHRAE 93-2010 standard which consists of the centrifugal fan, chosen based on the required air volume by considering the pressure drop in the duct, plenum and orifice meter. The experiment was conducted between 3149 to 19247 Reynolds numbers. The good agreement between the comparison of the Nusselt number and friction factor obtained by the experiment for smooth duct was achieved by the Dittus-Bolter and Blasius equations, respectively, to validate the simulator. The obtained thermohydraulic coefficient for optimized roughness surrounded by three smooth walls was lower than the former investigated roughnesses at each Reynolds number.

Keywords: Friction factor, Roughness, Stanton number, Thermohydraulic performance

آزمون و ارزیابی یک نوع خاک‌همزن دوار با تیغه‌های مثلثی لبه مضرسی

حسین غلامی^۱ - داود کلاتری^{۲*} - مجید رجبی وندچالی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۱

چکیده

اخیراً استفاده از روتوتیلرها در باغات و مزارع کوچک به‌ویژه در مناطق شمالی کشور گسترش پیدا کرده است که به دلیل استفاده از تیغه‌های L شکل دارای مشکلات فراوانی هستند. از این رو در کار تحقیقاتی حاضر به طراحی، ساخت و آزمون یک خاک‌همزن با تیغه‌های مثلثی لبه مضرسی مناسب برای باغ‌ها و مزارع کوچک پرداخته شد. آزمایش در یکی از باغ‌های مرکبات شهرستان ساری به‌صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. رطوبت خاک بر مبنای وزن خشک به‌عنوان عامل اصلی در دو سطح بالا و پایین (۲۱/۹-۳۰/۳ و ۲۱/۹ درصد) و سرعت دورانی محور تیغه‌ها به‌عنوان عامل فرعی در سه سطح (۱۷۰-۱۴۰، ۲۰۰-۱۷۰ و ۲۳۰-۲۰۰ دور بر دقیقه) انتخاب گردید. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک، درصد خرد شدن خاک، مصرف ویژه سوخت و بازده ماشین بودند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اثر رطوبت خاک و سرعت دورانی تیغه‌ها بر قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها، درصد خرد شدن خاک، مصرف ویژه سوخت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برای دستیابی به دانه‌بندی ریز، سرعت دورانی ۲۳۰-۲۰۰ دور بر دقیقه و رطوبت خاک ۳۰/۳-۲۱/۹ درصد و برای به‌دست آوردن دانه‌بندی درشت خاک، سرعت دورانی ۱۷۰-۱۴۰ دور بر دقیقه و رطوبت خاک ۲۱/۹-۱۳/۵ درصد توصیه می‌گردد. با کاهش سرعت دورانی از دور زیاد به دور متوسط، به مقدار ۱۶/۷۱ لیتر بر هکتار در مصرف سوخت صرفه‌جویی گردید.

واژه‌های کلیدی: تیغه مضرسی، روتوتیلر، قطر خاک‌دانه‌ها، مصرف ویژه سوخت

مقدمه

داد که تغییرات خواص خاک به دلیل خاک‌ورزی، با چندین عامل در ارتباط است که عبارتند از: نوع خاک، نوع وسیله خاک‌ورزی، عمق خاک‌ورزی، شرایط خاک نظیر محتوای رطوبت در زمان خاک‌ورزی و شرایط اقلیمی (Chang and Lindwall, 1990). امروزه استفاده از خاک‌همزن به دلیل ساختار ساده و کارایی بالا در عملیات خاک‌ورزی افزایش یافته است. با بهره‌گیری از خاک‌همزن می‌توان عملیات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه را در یک مرحله انجام داد (Topakci et al., 2008). اما استفاده از خاک‌همزن‌های کوچک باغی، به دلیل سهولت کاربرد و کارایی بالاتر نسبت به خاک‌همزن‌های پشت تراکتوری، در باغات و شالیزارها به‌صورت روزافزونی مورد استقبال قرار گرفته است. در عملیات سبزی‌کاری و صیفی‌کاری، آماده‌سازی خاک شرایط متفاوتی نسبت به دیگر محصولات زراعی می‌طلبد. عمق آماده‌سازی بستر بذر برای این محصولات معمولاً ۵-۲ cm است و دانه‌بندی ریز خاک مورد نیاز می‌باشد. در این شرایط می‌توان خاک را با خاک‌همزن‌های کوچک آماده کرد (Tabatabae Koloor and Kiani, 2006). بررسی‌های مختلفی بر روی کارکرد خاک‌همزن‌ها در راستای استفاده بهینه و مطلوب از این دستگاه جهت کاهش مصرف توان و بهبود فرآیند خاک‌ورزی صورت گرفته است (Shir Esmailie

مطالعات در مورد فرآیند خاک‌ورزی شامل بررسی میزان کارآمدی ادوات، توصیف رفتار خاک، عوامل مؤثر بر کارکرد بهینه ادوات خاک‌ورزی، تأثیر خاک‌ورزی بر میزان تولید محصول، نوع ترکیب ادوات مورد استفاده در سیستم‌های خاک‌ورزی هم‌چنان دارای اهمیت می‌باشد (Elahifard et al., 2008). عملیات خاک‌ورزی مناسب، موجب بهبود ساختمان خاک، افزایش خلل و فرج، توزیع بهتر خاک‌دانه‌ها و در نهایت اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک می‌شود (Akef and Bagheri, 1999). خواص فیزیکی خاک عامل تعیین‌کننده اصلی رشد گیاهچه تا زمان سر برآوردن از خاک و جوانه‌زنی می‌باشد (Malhi et al., 2006). یک بررسی منابع نشان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مکانیک بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(* نویسنده مسئول: Email: dkalantari2000@yahoo.com)

۳- مربی گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار، مازندران
DOI: 10.22067/jam.v7i1.49810

شدید دستگاه در حین کار، پیچیدن و گیر کردن علف‌های هرز و بقایای گیاهی به دور تیغه‌ها و محور دوار، ایجاد لایه سخت^۳ در کف شیار شخم و وزن نسبتاً زیاد می‌باشد که ناراضی‌تای کاربران را به دنبال دارد. همچنین با توجه به عدم تولید در داخل، این دستگاه‌ها از کشورهای مختلف به‌ویژه چین وارد می‌شوند. از سوی دیگر، به دلیل عدم ارائه خدمات پس از فروش و افزایش تقاضا باید شرایط لازم برای تولید داخلی دستگاه‌های جایگزین این ماشین‌ها را فراهم نمود. از این رو در طرح حاضر تلاش بر این بود که کارکرد یک نوع تیغه‌ی جدید با لبه‌ی مضرسی، در سرعت‌های دورانی مختلف و رطوبت‌های متفاوت زمین از طریق بررسی و تحلیل برخی خواص فیزیکی مهم خاک و نیز تحلیل برخی پارامترهای عملکردی ماشین مورد آزمون قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

الف) طراحی دستگاه و مشخصات آن

برای طراحی خاک‌همزن ابتدا قدرت مورد نیاز به ازای واحد عرض کار مشخص گردید و سپس بر مبنای عرض کار مورد نظر، موتور مناسب انتخاب شد (Tabatabae Kolor and Kiani, 2011). براساس استاندارد، به ازای هر ۴۰ سانتی‌متر عرض کار خاک‌همزن با در نظر گرفتن ۴ تیغه روی هر فلنج (شکل ۱ b)، ۲/۲ کیلووات توان مورد نیاز است (RNAM, 1983). این مسئله براساس رابطه (۱) نیز تخمین زده شد (Kalantari, 2013).

$$p = (80 + 3.5 u^2)bhv + bu \quad (1)$$

در رابطه (۱)، p قدرت مورد نیاز برحسب کیلووات، b و h به ترتیب عرض و عمق کار برحسب متر، v سرعت پیشروی خاک‌همزن برحسب متر بر ثانیه و u سرعت خطی محور تیغه‌ها برحسب متر بر ثانیه می‌باشد.

بر این اساس، برای خاک‌همزنی به عرض کار ۶۰ سانتی‌متر، عمق ۷ سانتی‌متر، سرعت پیشروی ۰/۳ متر بر ثانیه و سرعت خطی محور دوار ۲/۸ متر بر ثانیه، قدرت مورد نیاز موتور ۳ کیلووات معادل ۴ اسب بخار به‌دست آمد. از این رو با توجه به موتورهای موجود در بازار، از یک موتور تک سیلندر بنزینی مدل 160F ساخت شرکت Kato چین با قدرت ۵/۵ اسب بخار و حداکثر دور موتور ۳۶۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد.

سرعت دورانی محور دوار از ۱۴۰ تا ۳۰۰ دور بر دقیقه متغیر است (Shafiei, 1995). با توجه به اینکه حداکثر دور خروجی موتور ۳۶۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد، لذا با توجه به دور موتور در یک مرحله توسط تسمه و پولی به ۱۱۰۷ دور بر دقیقه و مجدداً در دو مرحله دیگر توسط

(and Heidari Soltanabadi, 2009). با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از خاک‌همزن دوار نسبت به دیسک برای عملیات تهیه بستر بذر مناسب‌تر تشخیص داده شده و عملکرد محصول در هکتار بیشتری به‌دست آمده است. در تحقیق دیگری که بر روی یک خاک‌همزن باغی انجام شد، تأثیر عوامل کاری تیغه‌ها در سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف بر روی برخی خواص فیزیکی خاک بررسی گردید. نتایج نشان داد که بهترین ترکیب فاکتورهای سرعت پیشروی و سرعت دورانی تیغه‌ها برای درصد خرد شدن خاک کمتر از ۴ cm، به ترتیب 0.2 m s^{-1} و 110 rpm ؛ بین ۴ الی ۸ cm برابر 0.3 m s^{-1} و 50 rpm و بزرگتر از ۸ cm، 0.4 m s^{-1} و 50 rpm (Tabatabae Kolor and Kiani, 2011). در همین راستا تأثیر خاک‌همزن مجهز به تیغه‌های C شکل دنداندار بر روی برخی خواص فیزیکی خاک توسط کوچک زاده و حقیقی (۲۰۱۱) بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقادیر شاخص مخروطی و چگالی ظاهری خاک با تیغه‌های مضرسی در سرعت دورانی و سرعت پیشروی پایین‌تر بهتر از تیغه‌های ساده در سرعت بالاتر است (Kouchakzadeh and Haghghi, 2011).

راه‌های مختلفی برای نشان دادن وضعیت پایداری خاک‌دانه‌ها وجود دارد که از جمله تعیین قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها است. محققان عموماً قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها را مهم‌ترین معیار کمی جهت بیان درجه خرد شدن خاک می‌شناسند (Loghavi and Behnam, 1998). نتایج تحقیقات نشان داده است که افزایش قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها و چگالی ظاهری^۲ خاک باعث تأخیر در زمان جوانه‌زنی و کاهش میزان جوانه‌زنی بذر می‌شود (Sadeghi and Bahrani, 2001).

در مناطق شمالی کشور به‌ویژه در استان‌های مازندران و گیلان، سطح زیر کشت محصولاتمانند سبزی، صیفی، توت‌فرنگی و غیره کوچک است، لذا استفاده از خاک‌همزن‌های متداول خاک‌ورزی با کشت تراکتوری مناسب نمی‌باشد. بسیاری از عملیات جانبی دیگر نیز وجود دارد که توسط خاک‌همزن‌های مرسوم به دلیل ابعاد نسبتاً بزرگ و قدرت مانورپذیری پایین‌تر قابل اجرا نیست. از جمله می‌توان به آماده‌سازی، نرم کردن و به‌هم‌زدن خاک فضای بین و زیر درختان باغات، آماده‌سازی خاک برای چمن‌کاری، گل‌کاری، فضای سبز، باغچه‌ها و غیره اشاره کرد.

خاک‌همزن‌های باغی با توجه به وسعت کارایی آن‌ها، در دو سه سال اخیر با استقبال فراوانی از سوی کشاورزان شمال کشور مواجه شده است. با این وجود اکثر خاک‌همزن‌های موجود به دلیل استفاده از تیغه‌های مرسوم (L شکل) دارای مشکلات مختلفی از جمله: ارتعاش

1- Soil particle mean weight diameter

2- Bulk density

3- Plow pan

محور خاک‌همزن استفاده گردید تا حین کار با تنظیم عمق نفوذ این تیغه در داخل خاک از طریق فشار دست کاربر بر روی دسته‌ی دستگاه به سمت پایین، کنترل بهتر بر روی حرکت دستگاه صورت پذیرد (شکل ۲).

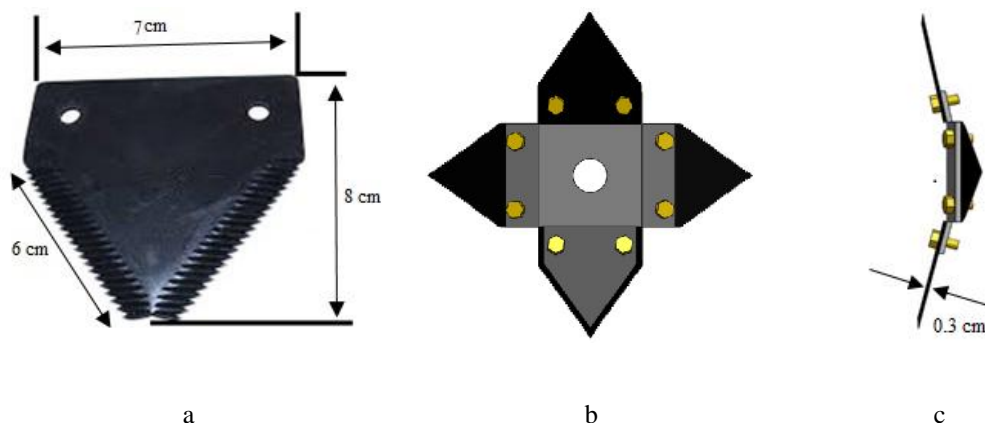
دو عدد چرخ به قطر ۲۵ cm و پهنای ۵ cm در پشت خاک‌همزن با قابلیت تنظیم موقعیت برای سهولت حمل و نقل دستگاه تعبیه شد (شکل ۲).

طول و عرض کل دستگاه با احتساب منضعات آن به ترتیب ۱۲۵ و ۷۰ cm و وزن کل آن ۵۰ کیلوگرم بود (شکل ۲).

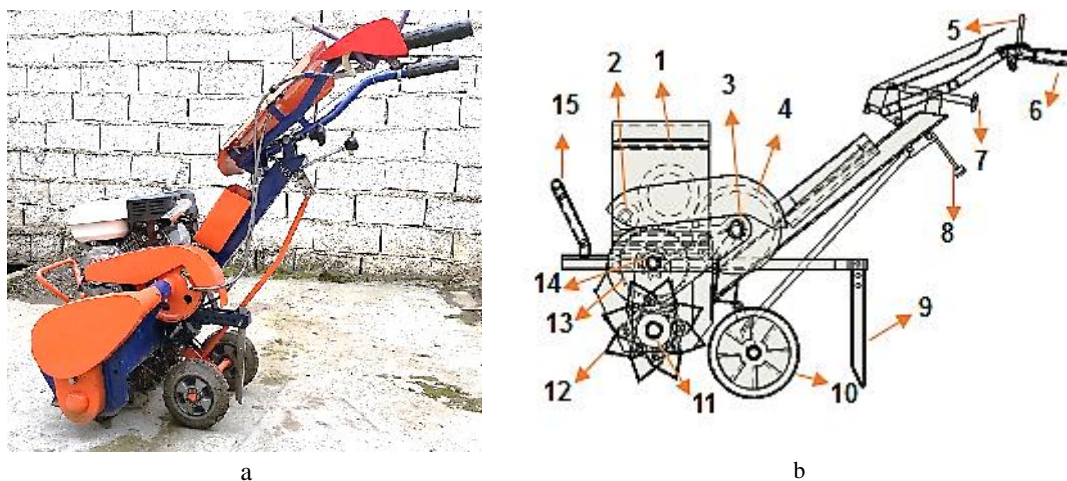
زنجیر و چرخ زنجیر به ترتیب به ۳۱۱ دور بر دقیقه و در نهایت به ۲۳۰ دور بر دقیقه کاهش یافت.

تیغه‌های مثلی لبه مضرسی (شکل ۱a) به تعداد ۴۰ عدد با هم‌پوشانی کامل به صورت چهارتایی و با آرایش مارپیچی بر روی فلنج‌های مخصوص که بر روی محور میله‌ایی به قطر ۲/۵ cm و به طول ۶۵ cm جوش داده شده بود، نصب گردید. فلنج‌ها با فاصله ۶ cm از هم بر روی محور قرار گرفتند. فاصله‌ی مرکز محور دوار تا نوک هر تیغه برابر ۱۲ cm بود.

برای کنترل سرعت پیشروی و کمک به بهتر خرد شدن خاک توسط تیغه‌های دوار از یک تیغه کاردی مانند و قابل تنظیم در پشت



شکل ۱- (a) تیغه مضرسی مورد استفاده در خاک‌همزن، (b) نحوه نصب تیغه‌ها بر روی یک فلنج و (c) نمای جانبی فلنج
Fig.1. Ridged blade used in rotary tiller (a), Installation of the blades on a single flange (b), Flange side view (c)



شکل ۲- (a) خاک‌همزن ساخته شده و (b) طرح‌واره خاک‌همزن و اجزای آن: (۱) موتور، (۲ و ۴) پولی کوچک و بزرگ، (۳، ۱۱، ۱۳، ۱۴) چرخ زنجیر و زنجیر (سیستم انتقال قدرت)، (۵) دسته کلاچ، (۶) دسته هدایت و کنترل، (۷) اهرم تنظیم دسته، (۸) اهرم تنظیم موقعیت چرخ، (۹) تیغه کاردی شکل، (۱۰) چرخ‌ها، (۱۲) تیغه‌ها و (۱۵) محافظ موتور

Fig.2. (a) Fabricated rotary tiller and (b) Schematic of the rotary tiller and its components; (1) Engine, (2&4) Small and big pulley, (3, 11, 13 and 14) Sprocket and chain (power transmission system), (5) Clutch handle, (6) Guidance and control handle, (7) Adjustment lever handle, (8) Adjustment lever of wheel position, (9) Knife blade, (10) Wheels, (12) Blades and (15) Guard of engine

(ب) آزمون مزرعه‌ای

ابتدا در چندین مرحله دستگاه برای آزمایش اولیه به مزرعه منتقل گردید تا علاوه بر بررسی کارکرد و بهبود عملکرد دستگاه در مزرعه، مهارت کافی در کار با دستگاه به دست آید. آزمون مزرعه‌ای خاک همزن در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ در یک باغ مرکبات واقع در روستای مبارکلا از توابع شهرستان ساری، استان

مازندران انجام گرفت (شکل ۳). قبل از انجام آزمایش‌ها، برخی خصوصیات مزرعه‌ی آزمایشی از جمله بافت خاک، چگالی ظاهری خاک و میانگین ارتفاع علف‌های هرز به دست آمد (جدول ۱). آزمون به صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در کرت‌های $5 \times 10 \text{ m}^2$ و نمونه‌برداری در سه تکرار مطابق استاندارد (۱۹۸۳، RNAM) انجام گرفت.

جدول ۱- برخی خصوصیات مزرعه‌ی آزمایشی

Table 1- Some of the properties of the experimental field

نوع زمین Type of land	میانگین ارتفاع علف یا کلس (mm) Average height of weed or crop residue	چگالی ظاهری خاک (g cm^{-3}) Soil bulk density	بافت خاک Soil texture		
			شن Sand	سیلت Silt	رس Clay
باغ Orchards	108	1.37	53%	41%	6%



a



b

شکل ۳- مزرعه آزمایشی: (a) قبل از انجام آزمایش (b) حین انجام آزمایش

Fig.3. Experimental field; (a) Before experiment, (b) During experiment

که در رابطه (۲)، mc رطوبت خاک بر مبنای خاک خشک برحسب درصد، m_1 وزن خاک تر برحسب گرم و m_2 وزن خاک خشک برحسب گرم می باشد.

نمونه‌برداری از کرت‌ها برای تعیین قطر متوسط وزنی خاکدانه، چند روز پس از انجام عملیات خاک‌همزنی انجام گرفت تا خاک‌دانه‌های ایجاد شده در معرض هوا و تابش خورشید، خشک و نسبتاً سخت شده در حین عبور از الک‌ها کمتر دچار شکستگی و کاهش اندازه شوند (Sedghi and Abbaspurgilandeh, 2014). در هر کرت آزمایشی، سه نقطه به‌طور تصادفی انتخاب و توسط قاب چوبی 20×20 سانتی‌متر و در عمق $7 \text{ cm} - 10$ نمونه‌برداری شد و مقدار میانگین این مقادیر به‌عنوان نماینده قطر متوسط وزنی خاکدانه در هر کرت معرفی گردید. برای تعیین قطر خاکدانه‌ها از یک سری ۶ تایی الک استاندارد با قطرهای ۸، $4/75$ ، $2/36$ ، ۲، ۱، $0/5$ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۴، b). الک‌ها به‌صورت عمودی از بزرگ‌ترین قطر به

کرت‌های اصلی به سه کرت فرعی به ابعاد $(10 \times 1/5 \text{ m}^2)$ تقسیم شد. رطوبت خاک به‌عنوان عامل اصلی در دو سطح شامل رطوبت بالا و رطوبت پایین به ترتیب $3/30 - 21/9$ درصد و $21/9 - 13/5$ درصد بر مبنای وزن خشک و سرعت دورانی محور تیغه‌ها به‌عنوان عامل فرعی در سه سطح شامل سرعت کم ($170 - 140 \text{ rpm}$)، سرعت متوسط ($200 - 170 \text{ rpm}$) و سرعت زیاد ($230 - 200 \text{ rpm}$) در نظر گرفته شد. پارامترهای اندازه‌گیری شامل درجه خردشدگی خاک (قطر متوسط وزنی خاک‌دانه)، درصد خردشدگی خاک، میزان سست‌شدگی خاک (با معیار چگالی ظاهری)، مصرف ویژه سوخت و بازده ماشین بود.

از رابطه (۲) درصد رطوبت خاک براساس وزن خاک خشک محاسبه گردید (Gouran Oreymi and Keyhani, 2010).

$$mc = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

برای اندازه‌گیری بازده ماشین، در هر کرت دستگاه یک رفت و برگشت انجام می‌داد. زمان این رفت و برگشت، زمان کل و زمانی که دستگاه در حال خاک‌ورزی بود، زمان مفید در نظر گرفته شد. بازده ماشین از تقسیم زمان مفید به زمان کل محاسبه گردید (Shir Esmailie and Heidari Soltanabadi, 2009; Rajabi Vandechali et al., 2015).

تجزیه و تحلیل داده‌ها به دو روش (۱) توصیفی و رسم جداول فراوانی و (۲) استنباطی پارامتریک یعنی روش تجزیه واریانس (Anova) و مقایسه مقادیر میانگین و برهم کنش پارامترها از طریق نرم افزار SPSS16 انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن^۲ در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد (Arvidsson and Bolenius, 2006; Rajabi Vandechali et al., 2015).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر عوامل آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بازده ماشین تحت تأثیر هیچ یک از عوامل آزمایش قرار نگرفت. اثر رطوبت خاک بر روی چگالی ظاهری در سطح احتمال ۵ درصد و بر دیگر پارامترها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر سرعت دورانی تیغه‌ها بر قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها، مصرف ویژه سوخت و درصد خرد شدن خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بر دیگر پارامترها اثر معنی‌داری نداشت. اثر برهم کنش عوامل آزمایش بر هیچ یک از پارامترهای اندازه‌گیری معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه مقادیر میانگین پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر رطوبت خاک در جدول ۳ نشان داده شده است.

با افزایش سرعت دورانی محور تیغه‌ها، قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها در هر دو سطح رطوبتی کاهش یافت (شکل ۵a). در واقع، با افزایش سرعت دورانی، تعداد برخورد های تیغه با خاک در واحد زمان افزایش یافت. در نتیجه با توجه به ثابت بودن سرعت پیشروی دستگاه در تمامی آزمایش‌ها، خاک‌دانه‌های کوچک‌تری بر جای ماند. درصد خرد شدن خاک با افزایش سرعت دورانی تیغه‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۶). علت این امر احتمالاً به این دلیل بود که در سرعت‌های دورانی بالاتر، انرژی بیشتری به لقمه‌های خاک منتقل شده که در نتیجه منجر به خردشدگی بیشتر خاک گردید. در تحقیقی مشابه، تفاوت معنی‌داری در رابطه با تأثیر سرعت دورانی تیغه‌ها بر روی درصد خرد شدن خاک گزارش گردید (Tabatabaei and Kiani, 2011).

کوچک‌ترین قطر روی هم قرار گرفتند. برای الک کردن نمونه‌ها از دستگاه شیکر^۱ استفاده گردید و هر نمونه به مدت ۳۰ ثانیه تکان داده شد. سپس خاک باقی‌مانده بر روی هر الک به‌وسیله ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد (شکل ۴a).

قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید (Shir Esmailie and Heidari Soltanabadi, 2009; Rajabi Vandechali et al., 2015).

$$MWD = \sum_{i=1}^n \frac{W_i \times D_i}{w_t} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، MWD : قطر متوسط وزنی خاک‌دانه برحسب میلی‌متر، W_i : وزن خاک روی هر الک بر حسب گرم، W_t : وزن کل خاک خرد شده در هر نمونه مورد آزمایش بر حسب گرم و D_i : قطر متوسط خاک‌دانه‌ها روی هر الک برحسب میلی‌متر (که برای الک دوم به بعد برابر با متوسط قطر الک مورد نظر و قطر الک بالایی آن) بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

درصد خردشدگی خاک با استفاده از رابطه (۴) به‌دست آمد (Lee et al., 2003).

$$R_{sb} (\%) = \frac{(w_{ts} - w_{os})}{w_{ts}} \times 100 \quad (4)$$

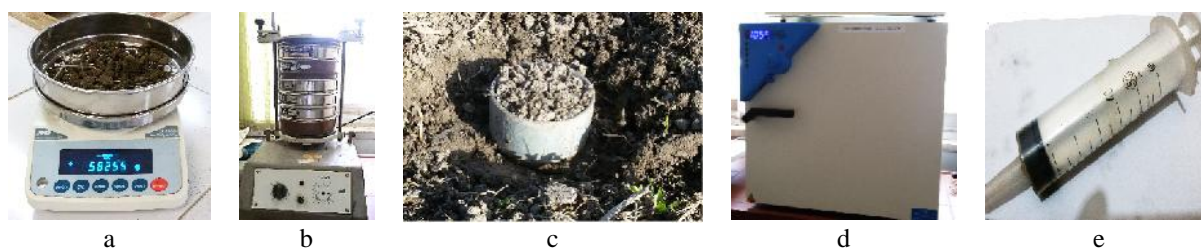
که در رابطه (۴)، R_{sb} : درصد خرد شدن خاک، w_{ts} : وزن کل نمونه خاک برحسب گرم و w_{os} : وزن دانه‌های خاک با قطر بیش از ۳۰mm می‌باشد.

جرم مخصوص ظاهری خاک با نمونه‌گیری در سه تکرار توسط استوانه‌های مخصوص به قطر ۸ cm و ارتفاع ۷ cm (شکل ۴c) تا عمق خاک‌ورزی در هر کرت، تعیین گردید. جرم مخصوص ظاهری، پس از خشک کردن نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون (شکل ۴d)، از تقسیم جرم خاک خشک بر حجم کل نمونه بر حسب $g \text{ cm}^{-3}$ به‌دست آمد (Rajabi Vandechali et al., 2015).

برای تعیین مقدار سوخت مصرف شده از روش باک پر استفاده شد (Habibi Asl and Gilani, 2014). در این روش قبل از شروع عملیات، باک موتور تا سطح مشخصی پر گردید. بلافاصله بعد از پایان هر کرت موتور خاموش شده و پس از تراز طولی و عرضی خاک‌همزن، توسط یک سرنگ مدرج با حجم ۶۰CC (شکل ۴e) مجدداً سطح سوخت درون باک به سطح اولیه می‌رسید. مصرف ویژه سوخت از رابطه (۵) به‌دست آمد (Hemmat and Asadi, 1995).

$$S.F.C = \frac{10L}{A} \quad (5)$$

که در رابطه (۵)، $S.F.C$: مصرف ویژه سوخت برحسب لیتر بر هکتار، L : میزان مصرف سوخت در هر کرت برحسب میلی‌لیتر و A : مساحت خاک‌ورزی شده در هر کرت برحسب متر مربع می‌باشد.



شکل ۴- (a) ترازوی دیجیتال، (b) شیکر و الک‌ها، (c) استوانه نمونه‌برداری، (d) آون، (e) سرنگ مدرج

Fig.4. (a) Digital scale, (b) Shaker and sieves, (c) Sampling cylinder, (d) Oven, (e) Scaled syringe

زیادی در برابر برش نشان می‌دهند، اما با افزایش رطوبت، مولکول‌های آب خاصیت همدوسی را کاهش داده و خاصیت تردی و از هم‌پاشی را در خاک افزایش می‌دهند (Rajabi Vandechali *et al.*, 2015).

کمترین مقدار قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها و بیشترین مقدار درصد خرد شدن خاک در رطوبت بالا حاصل شد (جدول ۳، شکل ۵ a و شکل ۶). در واقع در رطوبت‌های پایین، ذرات خاک در اثر بالا بودن نیروهای همدوسی به هم چسبیده و منسجم بوده، مقاومت

جدول ۲- تجزیه‌ی واریانس پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر عوامل آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها

Table 2- ANOVA results of the measured parameters affected by the experimental factors and their interaction

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square				
		قطر متوسط وزنی خاکدانه Soil particle mean weight diameter (M.W.D)	چگالی ظاهری Bulk density (B.D)	مصرف ویژه سوخت Specific fuel consumption (S.F.C)	بازده ماشین Machine efficiency	درصد خرد شدن خاک Soil crumbling percent (R _{cb})
سرعت دورانی تیغه‌ها (A) (rpm) Blade Rotational speed (A)	2	18.43 ^{**}	0.005 ^{ns}	672.971 ^{**}	3.496 ^{ns}	259.619 ^{**}
رطوبت خاک (B) Soil moisture (B)	1	51.248 [*]	0.035 [*]	3122.764 ^{**}	75.710 ^{ns}	601.504 ^{**}
(A×B) خطا Error	2	0.134 ^{ns}	0.005 ^{ns}	52.713 ^{ns}	31.791 ^{ns}	3.365 ^{ns}
	12	2.097	0.004	78.672	19.677	15.070

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیر معنی‌دار

*, ** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns: non-significant

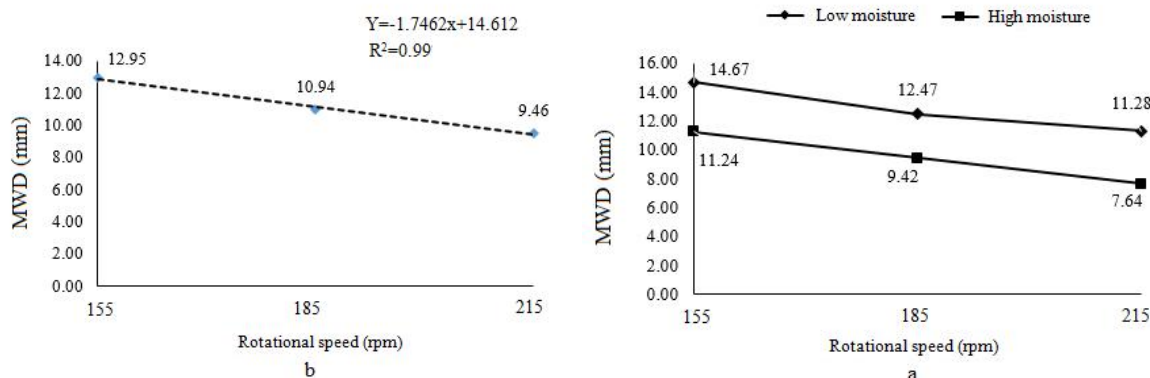
با افزایش سرعت دورانی محور تیغه‌ها، مصرف ویژه سوخت خاک همزن ابتدا با شیبی ملایم و سپس با شیبی تند افزایش یافت (شکل ۷ a). مصرف سوخت خاک همزن، در رطوبت بالا بیشترین مقدار بود (جدول ۳). در سرعت دورانی زیاد و هم‌چنین در رطوبت بالا (۳/۳۰-۲۱/۹ درصد بر مبنای وزن خشک)، با توجه به افزایش درصد خرد شدن خاک (شکل ۶)، انرژی بیشتری صرف خرد شدن خاک شد که به احتمال زیاد این امر منجر به افزایش مصرف ویژه سوخت گردید.

کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک در رطوبت پایین به دست آمد (جدول ۳). علت این امر ممکن است به این دلیل باشد که با کاهش رطوبت خاک، قطر خاک‌دانه‌ها افزایش و تورفتگی ذرات خاک کاهش یافت از این رو، جرم واحد حجم خاک کاهش یافت. در تحقیقی مشابه، برای چگالی ظاهری خاک تفاوتی معنی‌دار و مشابه این امر نسبت به سطوح رطوبت خاک گزارش گردید (Rajabi Vandechali *et al.*, 2015)

جدول ۳- مقایسه‌ی مقادیر میانگین پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر رطوبت خاک
Table 3- Mean comparison of the measured parameter affected by Soil moisture

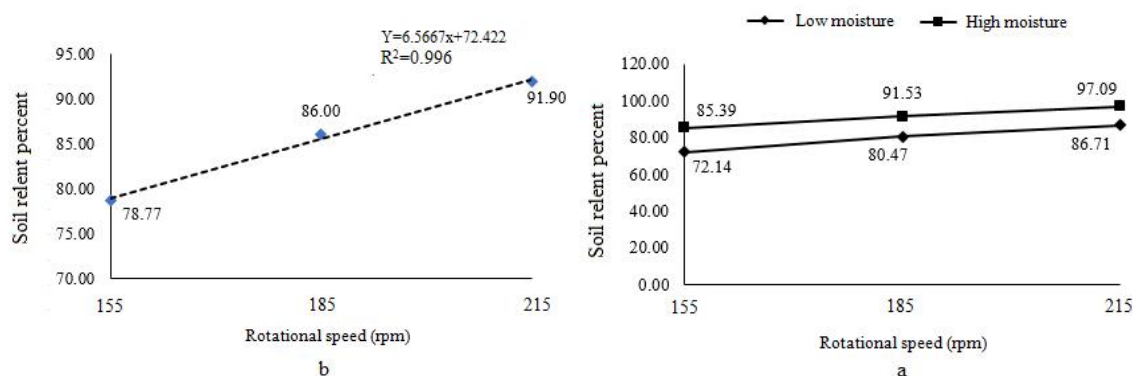
رطوبت خاک Soil moisture	پارامتر اندازه‌گیری Measured parameter				
	قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها Soil particle mean weight diameter (mm) (M.W.D)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³) (B.D)	مصرف ویژه سوخت Specific fuel consumption (lit h ⁻¹) (S.F.C)	بازده ماشین Machine efficiency (%)	درصد خردشدن خاک Soil crumbling percent (R _{sb})
رطوبت پایین Low moisture	12.80 ^a	1.03 ^b	61.12 ^b	92.58 ^a	79.77 ^b
رطوبت بالا High moisture	9.43 ^b	1.12 ^a	87.47 ^a	96.68 ^a	91.34 ^a

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم معنی‌دار بودن تفاوت بین داده‌های آن ستون است
 Same letters in each column indicates no significant differences between the data of that column

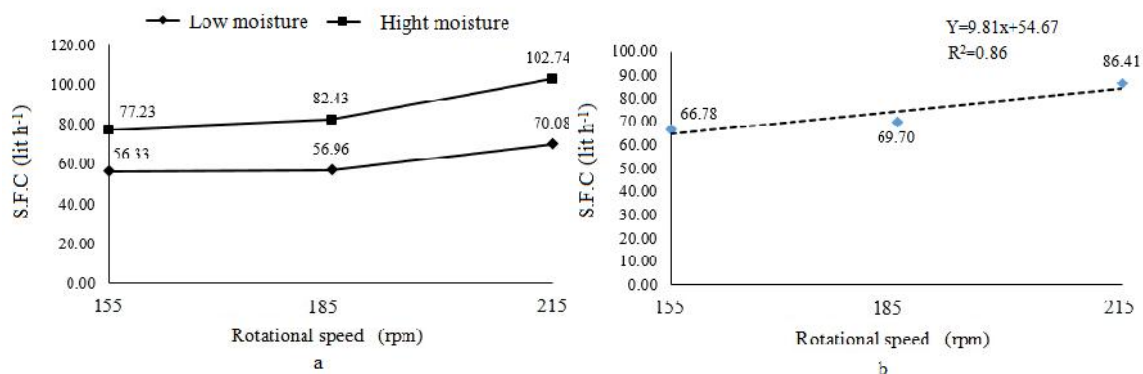


شکل ۵- (a) تأثیر سرعت دورانی بر قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها در دو سطح رطوبتی، (b) رابطه رگرسیونی سرعت دورانی و قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها

Fig.5. (a) Effect of rotational speed on soil particle mean weight diameter at two levels of moisture (b) Regression equation of rotational speed and soil particle mean weight diameter



شکل ۶- (a) تأثیر سرعت دورانی بر درصد خردشدن خاک در دو سطح رطوبتی، (b) رابطه رگرسیونی سرعت دورانی و درصد خردشدن خاک
Fig.6. Effect of rotational speed on;(a) Soil relent percent in Two levels of moisture, (b) Regression equation of rotational speed and soil relent percent



شکل ۷- (a) تأثیر سرعت دورانی بر مصرف ویژه سوخت در دو سطح رطوبتی (b) رابطه رگرسیونی سرعت دورانی و مصرف ویژه سوخت
Fig.7. Effect of rotational speed on; (a) specific fuel consumption (S.F.C) in two levels of moisture (b) Regression equation of rotational speed and specific fuel consumption

دور زیاد به دور متوسط، به مقدار ۱۶/۷۱ لیتر بر هکتار در مصرف سوخت صرفه جویی می‌شود (شکل ۷ b) که در مقیاس وسیع و سطح خاک‌ورزی زیاد، اهمیت بیشتری خواهد داشت. به‌طور کلی کم‌تر بودن سرعت دورانی محور نتایج مثبتی چون کاهش قدرت مورد نیاز، حفظ ساختار خاک و کاهش فرسایش تیغه را نیز به همراه دارد (Shafiei, 1995).

نتیجه گیری

تأثیر رطوبت خاک و سرعت دورانی تیغه‌ها بر قطر متوسط وزنی خاک‌دانه‌ها، درصد خرد شدن خاک و مصرف ویژه سوخت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برای دستیابی به دانه‌بندی ریز خاک ترکیب سرعت دورانی (۲۳۰-۲۰۰ rpm) و رطوبت خاک (۳/۳-۳۰/۳) ۲۱/۹ درصد) و برای به‌دست آوردن دانه‌بندی درشت خاک ترکیب سرعت دورانی (۱۷۰-۱۴۰ rpm) و رطوبت خاک (۲۱/۹-۱۳/۵) درصد) مناسب‌تر می‌باشد. استفاده از سرعت دورانی زیاد به دلیل افزایش مصرف سوخت و به تبع آن مسائل آلودگی و زیست محیطی، چندان توصیه نمی‌گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان از جناب آقای علی یوسف‌زاده، ریاست محترم شرکت تولید ادوات و ماشین‌آلات کشاورزی جویبار درو، به خاطر در اختیار نهادن اطلاعات تجربی و همکاری در ساخت خاک‌همزن و نیز از جناب مهندس حسام‌الدین محمدی به خاطر کمک در انجام آزمایش‌ها بی‌نهایت سپاسگزارند.

سرعت دورانی محور تیغه‌ها و رطوبت خاک تأثیر معنی‌داری بر بازده ماشین نداشت و مقادیر بازده در سرعت‌های دورانی مختلف و رطوبت‌های متفاوت زمین، تقریباً مشابه و در محدوده ۹۲ تا ۹۷ درصد بود که مقداری مطلوب است (جدول ۲ و ۳). علت این امر به این دلیل بود که تلفات زمانی شامل زمان‌های لازم برای دور زدن‌ها و غیره در تیمارهای مختلف آزمایش، نزدیک به هم بود. از طرفی، با توجه به ثابت بودن سرعت پیشروی دستگاه در تمامی کرت‌ها، زمان مفید نیز برای تمام آزمایش‌ها یکسان بود.

برای انتخاب ترکیب مناسب سرعت دورانی تیغه‌ها و رطوبت خاک، با توجه به این که اثر برهم‌کنش عوامل آزمایش بر هیچ‌یک از پارامترهای اندازه‌گیری معنی‌دار نبود، لذا از روی تأثیر هر عامل به تنهایی بر روی پارامترهای اندازه‌گیری، ترکیب مناسب برای انواع مختلف گیاهان تعیین گردید. بیش‌ترین درصد خردشدگی در رطوبت بالا (در محدوده مورد آزمون) و نیز در سرعت زیاد به‌دست آمد (جدول ۳ و شکل ۶). از طرفی، بیش‌ترین چگالی ظاهری خاک نیز در رطوبت بالا حاصل شد (جدول ۳). از این رو، برای دستیابی به دانه‌بندی ریز خاک (مناسب برای کشت بذرها، ریز مثل سبزیجات و چمن) سرعت دورانی زیاد (۲۳۰-۲۰۰ rpm) و رطوبت خاک بالا (۳/۳-۲۱/۹ درصد) مناسب می‌باشد. بر مبنای همین دو معیار (چگالی ظاهری و درصد خرد شدن خاک)، برای به‌دست آوردن دانه‌بندی درشت خاک (متداول در باغ‌ها و زیر درختان) سرعت دورانی کم (۱۷۰-۱۴۰ rpm) و رطوبت خاک پایین (۲۱/۹-۱۳/۵ درصد) مناسب‌تر است.

استفاده از سرعت دورانی زیاد به دلیل افزایش مصرف سوخت و مسائل آلودگی و زیست محیطی و از طرفی سخت‌تر بودن کنترل و هدایت دستگاه در این سرعت، به جز در مواقعی که دانه‌بندی بسیار ریز خاک مورد نیاز باشد، توصیه نمی‌گردد. با کاهش سرعت دورانی از

References

1. Akef, M., and I. Bagheri. 1999. Soil management and effects of agricultural machines on soil physical properties. Guilan University Press, Rasht, Guilan. (In Farsi).
2. Arvidsson, J., and E. Bolenius. 2006. Effects of soil water content during primary tillage – laser measurements of soil surface changes. *Soil and Tillage Research* 90: 222-229.
3. Chang, C., and C. W. Lindwall. 1990. Comparison of the effect of long term tillage and crop rotation on physical properties of a soil. *Canadian Agriculture Engineering* 32: 53-55.
4. Elahifard, A., M. Hojjati, and N. Alavi. 2008. Modeling the soil cutting process in rotary tillers using finite element method. The 5th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Iran Association of Agricultural Engineering and Mechanisation, Mashhad, Iran. (In Farsi).
5. Gouran Oreyimi, M., and A. R. Keyhani. 2010. Effects of tractor velocity and soil moisture content on drive wheel slippage of tractor. The 6th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. College of Agriculture and Natural Resources of University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi).
6. Habibi Asl, J., and A. A. Gilani. 2014. Effect of Tillage method and rice cultivation on machine parameters, yield and yield components of wheat and residue management for Rice-Wheat rotation in Khuzestan. *Journal of Agricultural Engineering Research* 15: 45-62. (In Farsi).
7. Hemmat, A., and A. Asadi Khashoei. 1995. Fuel requirements and machine capacity for tillage and planting operations on a clay loam soil in Isfahan. *Iran Agricultural Research* 14 (2): 175-201.
8. Kalantari, D. 2013. A mathematical model for estimation of rotary tiller power requirement. *World of Sciences Journal* 1: 86-93.
9. Kouchakzadeh, A., and K. Haghighi, 2011. The effect of rototiller equipped with serrated blades on some soil properties. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* 2 (6): 209-215.
10. Lee, K. S., S. H. Park, W. Y. Park, and C. S. Lee. 2003. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in dryland direct rice seeder. *Soil and Tillage Research journal* 71: 25-32.
11. Loghavi, M., and S. Behnam. 1998. Effects of soil moisture and tillage depth on disk plow performance of a clay loam soil. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 2(4): 105-117. (In Farsi).
12. Malhi, S. S., R. Lemke, Z. H. Wang, S. Baldev, and S. Chhabra. 2006. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research* 90: 171-183.
13. Rajabi Vandechali, M., A. Hemmat, and A. Ghanbari Malidareh. Field performance of the disk harrow, power harrow and rotary tiller at different soil moisture contents on a clay loam soil in Mazandaran 2015. *Journal of Agricultural Machinery* 5 (1): 63-72. (In Farsi).
14. Regional Network for Agricultural Machinery. 1983. RNAM test codes and procedures for farm machinery. Los Banos, Philippines. 297p
15. Sadeghi, H., and M. J. Bahrani. 2001. Effect of plant density and nitrogen rate on yield and yield components of corn. *Iranian Journal of Crop Science* 3 (2): 1-11. (In Farsi).
16. Sedghi, R., and Y. Abbaspur-gilandeh. 2014. Factors affecting soil fragmentation during tillage practice and determining the optimal range of the parameters using a fuzzy logic approach. *Scientific Journal of Agriculture* 37: 35-47. (In Farsi).
17. Shafiei, S. A. 1995. Tillage machines. University Publication Center. Tehran.
18. Shir Esmailie, Gh. H., and M. Heidari Soltanabad. 2009. Effect of tillage systems and seeding rates on machinery parameters and grain yield in rapeseed (*Brassicinapus* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences* 11 (3): 223-236. (In Farsi).
19. Tabatabae Kolor, R., and Gh. Kiani. 2006. Tillage for sustainable cropping (Translation). Faraghi Publications. Gorgan, Iran.
20. Tabatabae Kolor, R., and Gh. Kiani. 2011. Investigation of the rototiller blades operational factors on the orchards and paddy fields tillage. *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 1 (1): 34-40. (In Farsi).
21. Topakci M., H. K. Celik, and D. Yilmaz. 2008. Stress analysis on transmission gears of a rotary tiller using finite element method. *Akendiz Ünivresitesi Ziraat Fakultesi Dergisi* 21(2): 155-160.

Testing and evaluation of a rototiller with new ridged blades

H. Gholami¹- D. Kalantari^{2*}- M. Rajabi Vandechali³

Received: 12-09-2015

Accepted: 11-01-2016

Introduction

Recently, employment of rotary tillers has been expanded in gardens and small farms, especially in the northern of Iran. However using the L-shaped blades in the conventional rotary tillers have some problems such as severe vibration problems, weeds sticking around the blades, forming the plow pan and lower performance due to the less powers of such small rototillers. Therefore in order to overcome the above mentioned problems, a rototiller with new ridged blades was designed, fabricated and tested in this research.

Materials and Methods

Experiments were carried out in one of the citrus orchards in Mazandaran, Sari. The experimental design was split plots based on randomized complete block design with three replications. The soil moisture as main plot varied in two levels of 13.5-21.9 and 21.9-30.3 percent based on dry weight and the rotational speed of blades as subplots varied in three levels of 140-170, 170-200 and 200-230 rpm. The measured parameters consist of soil particle mean weight diameter, soil bulk density, soil crumbling percentage, specific fuel consumption and machine efficiency. The diameter of soil particles was measured using a set of standard sieves with diameter ranging from 0.5 to 8 mm. Then a laboratory shaker was used to sift the samples. Each sample was shaken in 30 sec. The fuel consumption during the experiments was determined by the filled fuel tank method. Analysis of variance (ANOVA) and mean comparisons and interaction between the parameters were performed using the SPSS 16 software.

Results and Discussion

The results indicated that the soil particle mean weight diameter reduced by increasing blades rotational speed in both examined soil moisture contents. Results indicated that the soil crumbling percent increases with increasing the rotational speed. The main reason for this effect could be due to the more energy transferring to the soil at higher rotational speeds, which result in further crumbling of the soil slices. Regarding the results obtained in this study, the specific fuel consumption increased at first in a light slope, then in a steep rise with increasing the blades rotational speed. The reason can be the higher crumbling percent of the soil at higher rotational speeds and higher soil moisture contents (at the range of 21.9-30.3%), providing the more specific energy consumptions. The specific fuel consumption was the maximum at higher soil moisture content of 30 %. The results indicated that the blades rotational speed and soil moisture content had no significant effect on the field efficiency of the examined rototiller. The field efficiency varied in the range of 92 to 97% in all of the experiments, i.e., rotational speed between 140 to 230 rpm and moisture content ranging from 13.5 to 30.3%. The reason for that was due to the roughly similar turning times, minor adjustments, changing operators and some other parameters influencing the field efficiency. Reduction of the rotational speed of the rototiller from high-to-moderate speeds leads to decrease the fuel consumption to 17 liter ha⁻¹, which could be significant in wide scale of soil tillage operations. As a general result, reduction of the rotational speed had some considerable advantages such as reducing power requirements, reducing blade wearing and maintaining soil structure.

Conclusions

Influence of soil moisture and rotational speed of blades on the soil particle mean weight diameter, soil crumbling percentage and specific fuel consumption were significant ($P < 0.01$) for fabricated rototiller with new ridged blades. Statistical analysis indicated that the soil crumbling percentage and specific fuel consumptions

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

2- Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

3- Instructor, Department of Mechanic, Islamic Azad University of Jouybar, Jouybar, Mazandaran, Iran

(*- Corresponding Author Email: dkalantari2000@yahoo.com)

increased linearly with increasing the rotational speed of blades. The determination coefficients of the crumbling percentage and specific fuel consumption as a function of rotational speed were 0.996 and 0.860, respectively. Meanwhile, clod mean weight diameter decreased linearly by increasing the rotational speed with a determination coefficient of 0.990. For achieving fine soil aggregates, combining high rotational speed and higher soil moisture (20 to 30%) is suggested, while to obtain a coarse soil gradation, low rotational speed and low soil moisture are more suitable compositions. The use of high rotational speed is not recommended due to increasing fuel consumption and consequently the soil erosion and environmental issues.

Keywords: Ridged blade, Rototiller, Soil particle diameter, Specific fuel consumption

انتخاب بهترین ادوات خاک‌ورز به لحاظ مصرف بهینه انرژی با استفاده از روش تحلیل ساده وزنی شده

کوروش اندکایی زاده^۱ - محمد جواد شیخ داودی^{۲*} - محمد اسماعیل خراسانی فردوانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲

چکیده

عملیات خاک‌ورزی از جمله عملیات‌هایی است که در کشاورزی با مصرف زیاد انرژی همراه است. از این رو بهینه کردن میزان مصرف انرژی در عملیات خاک‌ورزی بسیار با اهمیت است. در این تحقیق با استفاده از روش مدیریتی ساده وزنی شده دستگاه مناسب با توجه به معیارهای مختلف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده، بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه نوع ادوات خاک‌ورز (گاواهن برگرداندار، گاواهن بشقابی و هرس بشقابی) در ۴ سرعت پیشروی مختلف (۳، ۴، ۵، ۶ کیلومتر بر ساعت) و عمق‌های مختلف که محدوده عمقی با توجه به نوع ادوات انتخاب شد و این آزمایش در خاک رسی لومی با میزان رطوبت ۱۸/۹ درصد (بر پایه خشک) انجام شد. پارامترهای کشش ویژه (کیلونیوتون بر متر)، مصرف سوخت (لیتر بر ساعت)، درصد لغزش، توان مالبندی (کیلوات)، بازده کششی و بازده کلی انرژی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در سرعت‌های کم و عمق‌های زیاد گاواهن برگرداندار مصرف بهینه انرژی دارد و در عمق‌های زیاد و سرعت زیاد هرس بشقابی میزان مصرف بهینه انرژی را داشت. گاواهن بشقابی از نظر مصرف بهینه انرژی نسبت به دو ادوات دیگر به‌عنوان گزینه مطلوب انتخاب شد، زیرا در روش تحلیل ساده وزنی شده دارایی ضریب ترکیبی بیشتر در اکثر شرایط کاری (عمق‌شخم و سرعت پیشروی مختلف) است.

واژه‌های کلیدی: ادوات خاک‌ورزی، انرژی، سیستم، ساده وزنی شده

مقدمه

شده از سیستم‌های مورد بررسی بیان می‌کند، کدام سیستم (در کشاورزی منظور از سیستم نوع تراکتور، نوع ادوات، روش‌های خاک‌ورزی، کاشت و برداشت و غیره می‌باشد) عملکرد بهتری داشته است.

مهم‌ترین عامل مصرف انرژی در تراکتور مصرف سوخت است زیرا سوخت به‌عنوان منبع انرژی برای انجام کار و کمک به پیشروی تراکتور همراه با ادوات، مورد نیاز می‌باشد (Smith et al., 1993). نیروی کشش ویژه^۵ یکی از مهم‌ترین نیروهایی است که برای اندازه‌گیری انرژی لازم ادوات خاک‌ورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mehni and Maleki, 2013). که بیان می‌کند به ازای یک متر عرض کار دستگاه ادوات خاک‌ورز چند کیلونیوتون از نیروی مالبند را به‌طور بهینه مصرف می‌کند. از حاصل ضرب نیروی کششی در سرعت پیشروی، عاملی به‌عنوان توان مالبندی^۶ به‌دست می‌آید. توان مالبندی (توان کششی) در کشاورزی مکانیزه، متداول‌ترین روش

بخش عمده مصرف انرژی در کشاورزی مکانیزه مربوط به عملیات خاک‌ورزی می‌باشد (Hashemi and Minaei, 1995). بیش از ۵۰ درصد انرژی مصرفی در کشاورزی صرف خاک‌ورزی می‌شود (Al-Suhaibani et al., 2010). به‌همین دلیل استفاده بهینه از انرژی در بخش کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق ارائه روش مدیریتی ساده وزنی شده^۴ برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشاورزی است که با توجه به معیارهای اندازه‌گیری

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی مکانیزاسیون، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز
(Email: Javad1950@gmail.com) نویسنده مسئول:

۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز

DOI: 10.22067/jam.v7i1.48464

4-Simple additive weights

5- Specific draught

6- Power drawbar

توسط خیرلا و همکاران برای سه دستگاه گاواهن برگرداندار، گاواهن بشقابی و هرس بشقابی با استفاده از روش ساده وزنی شده تحلیل صورت گرفته است. روش ساده وزنی شده یک روش مدیریتی است که قدرت تصمیم‌سازی^۴ را برای یک مدیر فراهم می‌کند (Heragu, 1997). اساس روش ساده وزین شده به این صورت است که مجموع وزن عملکرد پارامترها که هر کدام دارای ویژگی‌های مختلفی هستند به دست آورده می‌شود (MacCrimmon, 1968; Chen and Hwang, 1992). روش ساده وزین شده شامل دو گام اساسی که عبارتند از: (۱) بدون بعد کردن همه پارامترها برای مقایسه کردن، (۲) جمع کردن ارزش‌های همه پارامترها (Hwang and Yoon, 1981; Kabassi and Virvou, 2004).

مواد و روش‌ها

در این تحقیق سه ادوات گاواهن برگرداندار، گاواهن بشقابی و هرس بشقابی به‌عنوان سه سیستم به‌ترتیب با نام‌های A، B و C نام‌گذاری شدند و در سرعت‌های پیشروی ۳، ۴، ۵، ۶ کیلومتر بر ساعت و در عمق‌های مختلف برای هر دستگاه با توجه به نوع کار آن‌ها انتخاب شد (هرس بشقابی چون جزء ادوات خاک ورز ثانویه می‌باشد که میزان عمق کاری آن از ادوات خاک‌ورز اولیه (گاواهن برگرداندار و گاواهن بشقابی) کمتر است). در این تحقیق پارامتر مصرف سوخت با یک جریان سنج الکتریکی^۵، سرعت پیشروی به‌وسیله رادار دوپلر^۶، لغزش چرخ به‌وسیله یک پروکسی^۷ سنسور (سنسور الکترو مغناطیسی)، نیروی کششی به‌وسیله یک دینامومتر اتصال سه نقطه، اندازه‌گیری شدند. عمق شخم بوسیله سیستم (Depth-Knob control) ثابت نگاه داشته شد (Kheiralla et al., 2004). برای مقایسه مناسب بین ادوات خاک‌ورزی عمق‌ها به‌صورت عمق کم (گاواهن برگرداندار ۱۲/۴ سانتیمتر، گاواهن بشقابی ۱۲/۳ سانتیمتر و هرس بشقابی ۱۲/۴ سانتیمتر)، عمق متوسط (گاواهن برگرداندار ۱۸ سانتیمتر، گاواهن بشقابی ۱۷/۴ سانتیمتر و هرس بشقابی ۱۵/۲ سانتیمتر) و عمق زیاد (گاواهن برگرداندار ۲۳/۵ سانتیمتر، گاواهن بشقابی ۲۳/۴ سانتیمتر و هرس بشقابی ۱۷/۲ سانتیمتر) به‌صورت جداول (۱)، (۲) و (۳) طبقه‌بندی شد. در جدول ۴ با توجه به معیارهای اندازه‌گیری شده، سیستم‌های A، B و C جداسازی شدند. که به همین ترتیب برای عمق‌های متوسط و زیاد تفکیک‌های لازم صورت گرفت. پارامترها به‌صورت C₁، C₂، C₃، C₄، C₅ و C₆ تقسیم‌بندی شدند

استفاده از توان موتور تراکتور است (Lotfi et al., 2007). توان کششی تراکتور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و مهمترین عامل در ارزیابی و تعیین عملکرد تراکتور محسوب می‌شود. تحقیقات نشان داده است، حدود ۲۰ تا ۵۵ درصد از توان مالبندی در دسترس تراکتور توسط ادوات کشنده خاک‌ورز تلف می‌شود (Hamzeh nezhad et al., 2013). لغزش یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر راندمان کششی ادوات کشنده است و نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان توان قابل حصول از تراکتور را بر عهده دارد (Moradi and mardani, 2008). لغزش باعث اتلاف سرعت چرخ محرک می‌شود و چون میزان توان مالبندی وابستگی زیادی به سرعت پیشروی دارد، از این رو وجود لغزش در چرخ محرک باعث می‌شود که تراکتور از توان مالبندی به خوبی استفاده نکند، میزان لغزش مناسب برای اکثر کارهای کشاورزی طبق استانداردهای ASABE بین ۱۵-۱۰ درصد تعیین شده است. بازده کششی یکی از پارامترهای مهم در مصرف انرژی تراکتور است که نشان می‌دهد چه مقدار از توان اکسل^۱ به توان مالبندی تبدیل شده است که از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$TE = \frac{P_{db}}{P_{axle}} \quad (1)$$

که در آن، P_{db} توان مالبندی بر حسب کیلووات، P_{axle} توان اکسل بر حسب کیلووات.

بازده کلی انرژی^۲ شامل تطبیق بار روی تراکتور و ادوات متصل به آن، و عملکرد موتور در هنگام کار است که ارزش استفاده از کشش ادوات را نشان می‌دهد و بر حسب درصد بیان می‌شود که از رابطه (۲) به‌دست می‌آید (Kheiralla et al., 2004).

$$OEE = \frac{P_{db}}{HV \times FC \times C_e} \quad (2)$$

که در آن، HV ارزش حرارتی سوخت بر حسب (MJ Lit⁻¹)، FC مصرف سوخت بر حسب (Lit ha⁻¹)، C_e ظرفیت مزرعه ای بر حسب (ha h⁻¹) و P_{db} توان مالبندی بر حسب (MJ h⁻¹).

خیرلا و همکاران (۲۰۰۴) پژوهشی را با عنوان مدل‌سازی قدرت و انرژی مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی در خاک لوم رسی شنی سردانگ^۳ در مالزی انجام دادند. در این پژوهش تأثیر سرعت پیشروی و عمق شخم بر روی کشش و قدرت مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی مورد بررسی قرار گرفت. ادوات خاک‌ورزی شامل گاواهن برگرداندار، هرس بشقابی، گاواهن بشقابی و روتیواتور بودند و براساس عامل‌های سرعت پیشروی و عمق شخم (برای روتیواتور بجای عمق شخم سرعت روتور در نظر گرفته شد) با استفاده از مدل‌های رگرسیونی فرمول‌بندی شدند. در این تحقیق از پارامترهای اندازه‌گیری شده

- 4- Decision making
- 5- Micro-ovall
- 6- Doppler radar
- 7- Proxy

- 1- Power axle
- 2- Overall efficiency energy (OEE)
- 3- Serdang

واحدهای متفاوتی هستند. به همین دلیل برای مقایسه مناسب عمل بدون بعد کردن پارامترها انجام می‌شود. طبق رابطه (۳) ماتریس P_{ij} را تشکیل داده شد (Shakouri *et al.*, 2014). در این پژوهش فاکتورهای مصرف سوخت و لغزش به ترتیب C_2 ، C_3 به‌عنوان عامل‌های منفی در نظر گرفته شدند که از رابطه (۴) به‌دست می‌آیند.

و پس از تشکیل ماتریس هر درایه آن F_{ij} نامیده شد. این ماتریس به‌صورت 3×6 است که ردیف‌ها نشان‌دهنده سیستم‌ها است که مقدار آن ۳ (سیستم‌های A، B و C) است و ستون‌ها نشان‌دهنده پارامترها می‌باشد که تعداد آنها ۶ است.

گام اول: برای مقایسه، تمام پارامترها را به کل تقسیم می‌کنیم تا بدون بعد شوند (به این دلیل که پارامترهای مورد اندازه‌گیری دارای

جدول ۱- میزان پارامترهای مورد مطالعه برای کار در عمق‌های کم

Table 1- The calculated amount of studied parameters for working in low depth

ادوات (سیستم) Implements (System)	سرعت پیشروی Forward) (Speed (km h ⁻¹)	کشش ویژه Specific) (Draught (kN m ⁻¹)	مصرف سوخت fuel) (Consumption (Lit ha ⁻¹)	لغزش (Slip) (%)	توان مالبندی Power) (Drawbar (kW)	بازده کششی Traction) (Efficiency (%)	بازده بهره وری انرژی Overall) Efficiency (Energy (%)
گاواهن برگرداندار Moldboard) (Plow	3	6.2	17.6	5	5.1	50	8
	4	7.4	15	6	8	61	13
	5	8.1	14.8	6	11	58	14
	6	9.4	14.3	7	15.3	67	17
گاواهن بشقابی (Disk Plow)	3	5.9	16.4	5	5.3	52	9
	4	7.5	15.6	8	9	61	13
	5	8.1	14.4	7	12.1	61	15
	6	10.1	12.6	8	18.2	75	20
هرس بشقابی (Disk Harrow)	3	2.6	8.1	17	6.7	48	9
	4	3.2	7.3	19	10.5	53	11
	5	3.5	6.6	20	14.2	55	14
	6	3.7	5.7	22	17.6	56	16

جدول ۲- میزان پارامترهای مورد مطالعه برای کار در عمق‌های متوسط

Table 2. The calculated amount of studied parameters for working in middle depth

ادوات (سیستم) Implements (System)	سرعت پیشروی Forward) (Speed (km h ⁻¹)	کشش ویژه Specific) (Draught (kN m ⁻¹)	مصرف سوخت fuel) (Consumption (Lit ha ⁻¹)	لغزش (Slip) (%)	توان مالبندی Power) (Drawbar (kW)	بازده کششی Traction) (Efficiency (%)	بازده بهره وری انرژی Overall) Efficiency (Energy (%)
گاواهن برگرداندار Moldboard) (plow	3	8	24.6	9	6.5	54	9
	4	9	21.2	10	9.8	61	11
	5	11.2	19.6	12	15.3	61	15
	6	12.7	19.1	15	20.7	64	17
گاواهن بشقابی (Disk plow)	3	7.1	20.6	8	6.4	55	10
	4	8.9	17.6	9	10.7	54	13
	5	9.8	15.2	9	14.7	68	17
	6	11.6	14.6	12	20.9	70	20
هرس بشقابی (Disk harrow)	3	3.1	8.8	18	7.5	54	10
	4	3.4	7.5	19	11.1	53	12
	5	4	6.7	21	16.4	57	16
	6	4.1	6.4	20	19.8	62	16

جدول ۳- میزان پارامترهای مورد مطالعه برای کاردر عمق‌های زیاد

Table 3- The calculated amount of studied parameters for working in high depth

ادوات (سیستم) Implements (System)	سرعت پیشروی Forward) (Speed (km h ⁻¹)	کشش ویژه Specific) (Draught (Kn m ⁻¹)	مصرف سوخت Fuel) (Consumption (Lit ha ⁻¹)	لغزش (Slip) (%)	توان مالبندی Power) (Drawbar (kW)	بازده کششی Traction) (Efficiency (%)	بازده بهره وری انرژی Overall) Efficiency (Energy (%)
گاواهن برگرداندار (Moldboard plow)	3	9.5	23.1	10	7.8	55	13
	4	10.4	23.4	12	11.6	58	12
	5	12.9	21.7	15	17.5	56	14
	6	14.9	20.4	19	24.4	65	18
گاواهن بشقابی (Disk plow)	3	8.4	22.7	10	7.6	57	10
	4	9.5	19.4	11	11.4	63	13
	5	11.1	18	14	16.7	64	16
	6	13.8	18.2	17	24.8	66	19
هرس بشقابی (Disk harrow)	3	3.4	9.2	19	8.4	55	10
	4	3.8	8.1	21	12.3	60	12
	5	4.3	7.6	20	17.6	63	15
	6	4.5	6.6	22	21.7	67	17

جدول ۴- تشکیل ماتریس F_{ij} با توجه به معیارهای مورد اندازه‌گیری در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت در عمق‌های کم

Table 4. Formation of the r_{ij} matrix according to the criteria for measuring at the speed of 3 km h⁻¹ in low depth

سیستم‌ها (Systems)	کشش ویژه Specific) (Draught (KN m ⁻¹)	مصرف سوخت fuel) (Consumption (Lit ha ⁻¹)	لغزش (Slip) (%)	توان مالبندی Power) (Drawbar (kW)	بازده کششی Traction) (Efficiency (%)	بازده بهره‌وری انرژی Overall) Efficiency (Energy (%)
A	6.2	17.6	5	5.1	50	8
B	5.9	16.4	5	5.3	52	9
C	2.6	8.1	17	6.7	48	9
مجموع (Total)	14.7	42.1	27	17.1	150	26

میزان F_{ij} نماد آرایه‌های ماتریس است که i تعداد پارامترها و j تعداد سیستم‌ها است.

برابر ۳ است (مقدار سیستم‌ها).

رابطه (۷) درجه انحراف از اطلاعات را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که چقدر معیارها برای تصمیم‌گیری در مورد سیستم‌ها مؤثر هستند و رابطه (۸) وزن یا ارزش هر معیار را محاسبه می‌کند (Shakouri et al., 2014).

$$D_j = 1 - E_j \quad (7)$$

$$W_j = \frac{D_j}{\sum D_j} \quad (8)$$

همه موارد بالا برای عمق‌های کم در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت محاسبه و در جدول ۵ و ۶ نشان داده شده است و بقیه موارد برای عمق‌های متوسط و زیاد در سرعت‌های مختلف به صورت مشابه براساس روابط (۳) تا (۸) محاسبه می‌شوند.

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum r_{ij}} \quad (3)$$

$$P_{ij} = 1 - \frac{r_{ij}}{\sum r_{ij}} \quad (4)$$

اعداد به‌دست آمده از تشکیل ماتریس P_{ij} را طبق رابطه (۵) به‌دست آورده شد و مجموع اعداد را در رابطه (۶) قرار داده شد.

$$P_{ij} \times \ln(P_{ij}) \quad (5)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \cdot \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln(P_{ij}) \quad (6)$$

رابطه (۶) میزان عدم قطعیت اطلاعات را به‌وسیله بدون بعد کردن داده‌ها در ماتریس P_{ij} نشان می‌دهد و همچنین ظرفیت مورد نیاز عدم قطعیت همه اطلاعات را نشان می‌دهد (Balocco and Verdesca., 2007). m تعداد سطر ماتریس است که در این پژوهش

جدول ۵- تشکیل ماتریس P_{ij} با توجه به معیارهای مورد اندازه‌گیری در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت در عمق‌های کم

Table 5- Formation of the P_{ij} matrix according to the criteria for measuring at the speed of 3 km h⁻¹ in low depth

P_{ij}	کشش ویژه (Specific Draught) C1(kN.m ⁻¹)	مصرف سوخت (Fuel Consumption) Lit.ha ⁻¹) C2	لغزش (Slip) (%) C3	توان مالبندی (Power Drawbar) (kW) C4	بازده کششی (Traction) (Efficiency (%) C5	بازده بهره‌وری انرژی (Overall Efficiency) (Energy (%) C6
A	0.421	0.581	0.814	0.298	0.33	0.307
B	0.4013	0.61	0.814	0.309	0.34	0.346
C	0.176	0.807	0.37	0.391	0.32	0.346

جدول ۶- محاسبه W_j با توجه به معیارهای مورد اندازه‌گیری در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت در عمق‌های کم

Table 6- Calculation of W_j according to the criteria for measuring at the speed of 3 km h⁻¹ in low depth

$P_{ij} * L_n$ (P_{ij})	کشش ویژه (Specific) (Draught C1(kN.m ⁻¹)	مصرف سوخت (Fuel) (Consumption Lit ha ⁻¹) C2	لغزش (Slip) (%) C3	توان مالبندی (Power) (Drawbar (kW) C4	بازده کششی (Traction) (Efficiency (%) C5	بازده بهره‌وری انرژی (Overall Efficiency) (Energy (%) C6
A	-0.364	-0.315	-0.16	-0.36	-0.366	-0.362
B	-0.366	-0.301	-0.16	-0.363	-0.367	-0.367
C	-0.306	-0.172	-0.367	-0.367	-0.364	-0.367
total	-1.036	-0.788	-0.701	-1.091	-1.098	-1.097
E_j	0.943	0.718	0.638	0.993	0.99	0.998
D_j	0.056	0.281	0.361	0.006	0.0004	0.0013
W_j	0.079	0.398	0.51	0.009	0.0006	0.0019

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij(max)}} \quad (9)$$

$$n_{ij} = 1 - \frac{r_{ij}}{r_{ij(max)}} \quad (10)$$

ماتریس n_{ij} طبق رابطه (۹) تشکیل داده شد و داده‌ها به‌عنوان حالت بهینه از داده‌ها نرمال‌سازی شد. رابطه (۱۰) برای معیارهای منفی به‌کار می‌رود. در جدول ۷ ماتریس n_{ij} برای عمق کم در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت با توجه به معیارهای محاسبه شده نشان داده شده است.

جدول ۷- تشکیل ماتریس n_{ij} با توجه به معیارهای مورد اندازه‌گیری در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت در عمق‌های کم

Table7- Formation of the n_{ij} matrix according to the criteria for measuring at the speed of 3 km h⁻¹ in low depth

N_{ij}	کشش ویژه (Specific) (Draught C1(kN m ⁻¹)	مصرف سوخت (Fuel) (Consumption Lit ha ⁻¹) C2	لغزش (Slip) (%) C3	توان مالبندی (Power) (Drawbar (kW) C4	بازده کششی (Traction) (Efficiency (%) C5	بازده بهره‌وری انرژی (Overall Efficiency) (Energy (%) C6
A	1	0	0.705	0.761	0.961	0.88
B	0.951	0.068	0.7062	0.791	1	1
C	0.419	0.539	0	1	0.923	1

با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده براساس وزن محاسبه شده (W_j) و نرمال‌سازی داده‌ها (n_{ij}) بهترین حالت را برای مصرف بهینه انرژی دارد و طبق رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید و تمام ضرایب ترکیبی

گام دوم: به‌دست آوردن یک ضریب ترکیبی برای سیستم‌های مورد بررسی است (به‌صورت A^* ، B^* و C^* نشان داده می‌شود) که بتوان برای این سیستم‌ها تصمیم‌سازی صورت بگیرد که کدام سیستم

$$A^* = \frac{\sum(n_{ij} \times W_j)}{\sum W_j}$$

(۱۱)

برای حالات کاری مختلف عمق شخم و سرعت پیشروی در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸ - میزان ضرایب ترکیبی محاسبه شده برای سیستم‌های A، B و C

Table 8- The combination coefficients calculated for systems A, B and C

سرعت پیشروی (Forward Speed) (km h ⁻¹)	عمق پایین (Low Depth)				عمق متوسط (Medium Depth)				عمق بالا (High Depth)			
	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4	5	6
A*	0.449	0.443	0.437	0.433	0.326	0.322	0.302	0.239	0.328	0.297	0.231	0.201
B*	0.473	0.377	0.424	0.469	0.413	0.42	0.452	0.397	0.321	0.386	0.313	0.276
C*	0.26	0.271	0.271	0.295	0.328	0.334	0.337	0.347	0.314	0.337	0.342	0.352

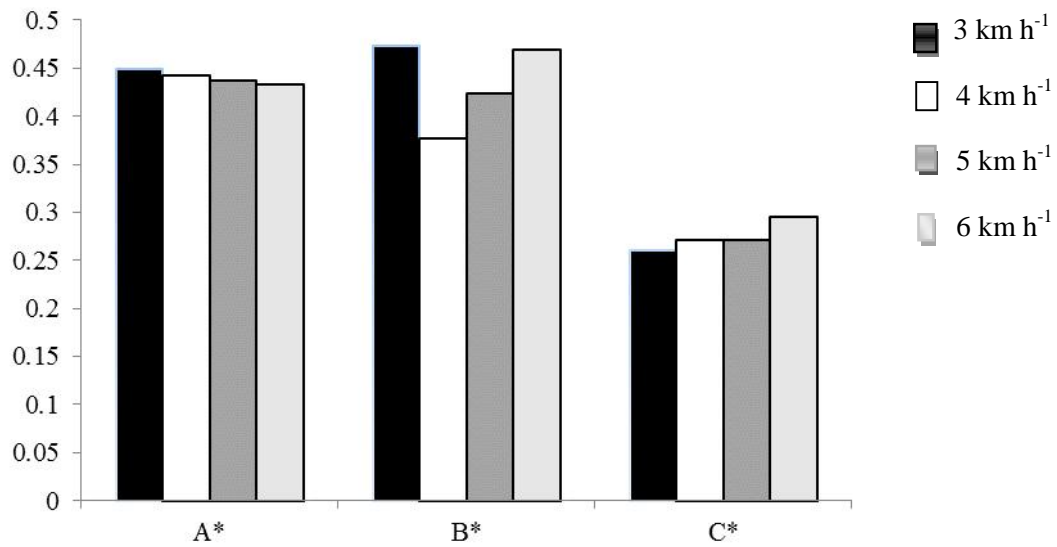
نتایج و بحث

نشان داد که کشش ویژه، توان مالبندی و مصرف سوخت ارتباط معنی‌داری با ادوات و سرعت پیشروی داشتند. کمترین نیروی کششی و توان مالبندی برای گاوآهن برگرداندار به دست آمد. کمترین کشش ویژه و مصرف سوخت برای دستگاه ترکیبی مشاهده شد. بیشترین مصرف سوخت، نیروی کششی و توان مالبندی برای گاوآهن بشقابی مشاهده شد (Celik *et al.*, 2007). سرانو و همکاران (۲۰۰۷) به مطالعه بر روی انرژی مورد نیاز یک هرس بشقابی پرداختند. کششی که برای هرس بشقابی تخمین زده شد علاوه بر اینکه به جرم دستگاه و نوع خاک بستگی داشت به سرعت پیشروی، عمق کار و شرایط خاک هم وابسته بود. در این پژوهش معادلات رگرسیونی از کشش دستگاه براساس جرم دستگاه (بین ۱۰۰۰ تا ۳۵۰۰ کیلوگرم)، عرض دستگاه (بین ۲ تا ۴ متر) و سرعت پیشروی (بین ۶ تا ۸ کیلومتر بر ساعت) به دست آمد. نتایج نشان داد که در سرعت ۸ کیلومتر بر ساعت میزان نیروی کشش در حد مناسبی قرار دارد (Serrano *et al.*, 2007). مقاله مورد بررسی با روش SAW نشان داد که در سرعت‌های بالا و عمق زیاد هرس بشقابی از لحاظ مصرف بهینه انرژی در حد مطلوب است.

نتیجه‌گیری

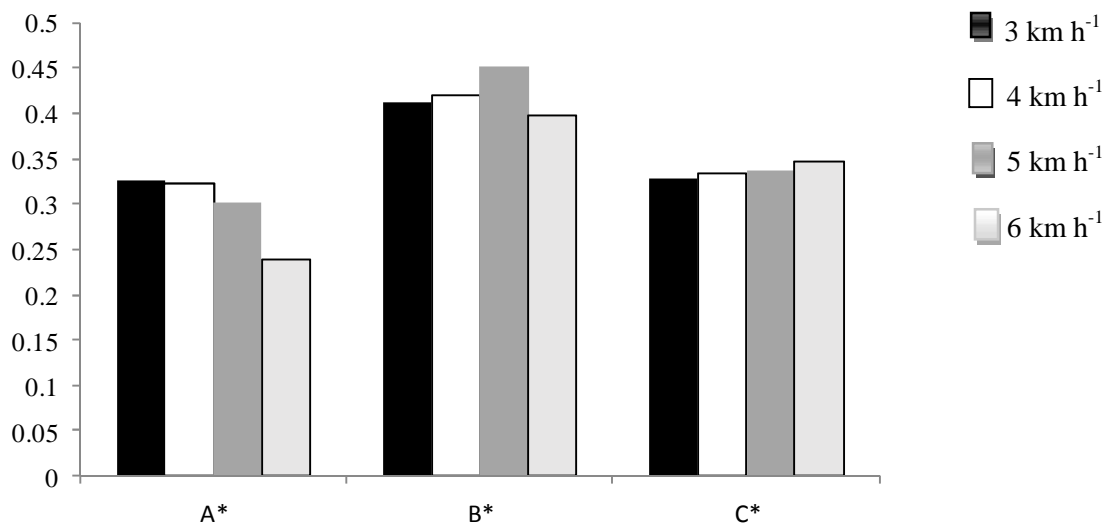
نتایج نشان داد که در کل گاوآهن بشقابی از نظر مصرف انرژی در وضعیت بهینه و شرایط مطلوب‌تری قرار داشت. برای عمق‌های بالای کاری استفاده از هرس بشقابی توصیه می‌شود، چرا که دارای وضعیت بهتری از نظر مصرف بهینه انرژی نسبت به سایر ادوات است. در عمق‌های کم استفاده از هارو دیسکی بهینه نیست، چون دارای لغزش و بازده کششی کمتری نسبت به سایر ادوات است. استفاده از گاوآهن برگرداندار در عمق‌های کم و در سرعت‌های متوسط ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت، دارای مصرف بهینه انرژی بود.

نتایج حاصل از جدول ۸ نشان می‌دهد هر سیستم که میزان ضریب ترکیبی بالاتری دارد از نظر مصرف انرژی عملکرد بهینه‌تری دارد که در قالب شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. ضریب ترکیبی روشی است که تمام سیستم‌ها را با توجه به معیارهای آنها ارزش‌گذاری می‌کند که معیارها با توجه به هدفی که در پژوهش داریم، به صورت معیارهای مثبت و منفی طبقه‌بندی می‌شوند و در تمام مسائل آن سیستمی که ضریب ترکیبی بالاتری داشت کارایی بهینه‌تری دارد. خیرالا و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از روش‌های آماری نشان دادند که هرس بشقابی بازده مصرف انرژی بهتری (از لحاظ مصرف سوخت و انرژی ویژه) نسبت به سایر ادوات خاکورزی شامل گاوآهن بشقابی و برگرداندار دارد. روش ساده وزین شده بهینه بودن انرژی مصرفی را در شرایط مختلف به طور جزئی بیان می‌کند و حل‌کننده مشکلات در بخش‌های کاری مختلف است (Chou *et al.*, 2008). به کمک روش SAW می‌توان با ترکیب پارامترهای مختلف در شرایط مختلف، عملکرد سیستم‌ها را مورد ارزیابی قرار داد (Wang, 2015). همانطور که در این پژوهش با پارامترهای سرعت پیشروی و عمق‌های مختلف که بیانگر شرایط مختلف برای ادوات خاک‌ورزی هستند، عملکرد سیستم‌های A، B و C (به ترتیب ادوات گاوآهن برگرداندار، گاوآهن بشقابی و هرس بشقابی) مورد بررسی قرار گرفت. کلیک و همکاران (۲۰۰۷) بر روی مقایسه انرژی سه دستگاه، گاوآهن برگرداندار، گاوآهن بشقابی و گاوآهن ترکیبی (برگردان + بشقاب) مطالعه کردند. این پژوهش در یک مزرعه کلسی گندم انجام و کشش و انرژی ویژه هر سه دستگاه با سه خیش مورد بررسی قرار گرفت و کشش، سرعت پیشروی و مصرف سوخت اندازه‌گیری شدند. عمق کار ثابت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و سرعت پیشروی در سه سطح ۴/۵، ۵/۴ و ۶/۳ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد. نتایج



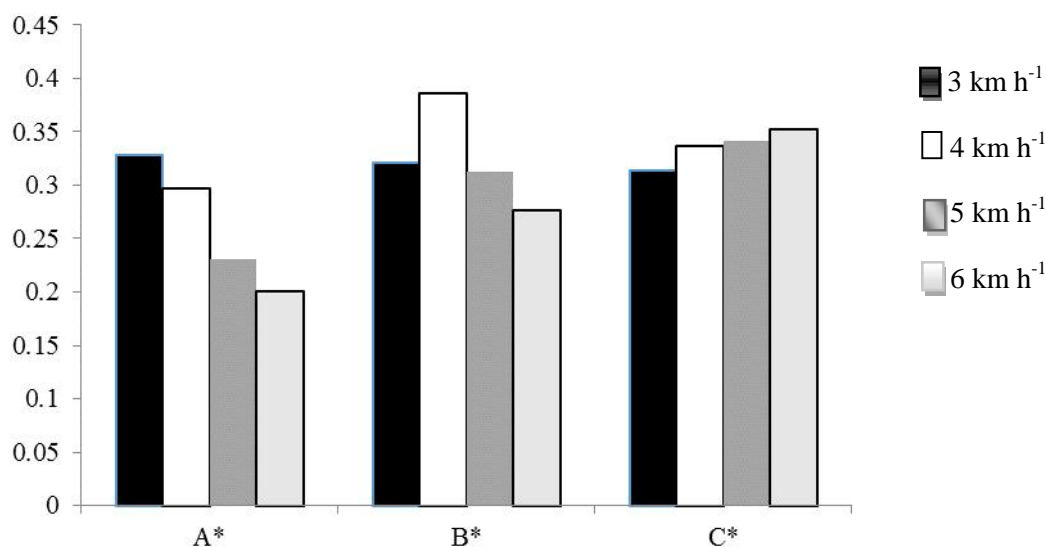
شکل ۱- مقایسه ضرایب ترکیبی سیستم‌های A، B، C در عمق‌های کم و سرعت‌های پیشروی مختلف

Fig. 1. Comparison of the system combination coefficients of A, B and C at low depth and various forward speeds



شکل ۲- مقایسه ضرایب ترکیبی سیستم‌های A، B و C در عمق‌های متوسط و سرعت‌های پیشروی مختلف

Fig. 2. Comparison of system combination coefficients of A, B and C at the middle depth and various forward speeds



شکل ۳- مقایسه ضرایب ترکیبی سیستم‌های A، B، C در عمق‌های بالا و سرعت‌های پیشروی مختلف

Fig. 3. Comparison of system combination coefficients of A, B and C at the high depth and various forward speeds

References

- Al-Suhaibani, S. A., and A. E. Ghaly. 2010. Effect of Plowing Depth of Tillage and Forward Speed on the Performance of a Medium Size Chisel Plow Operating in a Sandy Soil. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 5 (3): 247-255.
- Balocco, C., and D. Verdesca. 2007. Shannon entropy for energy technologies ex-ante evaluation. *International Journal of Environmental Technology and Management*: 7(1/2): 197-217.
- Chen, S. J., and C. L. Hwang. 1992. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, New York.
- Chou, Sh. Y., Y. H. Chang, and Ch. Y. Shen. 2008. A fuzzy simple additive weighting system under group decision-making for facility location selection with objective/subjective attributes. *European Journal of Operational Research* 189: 132-145.
- Celik, A., M. Gokalp Boydas, and N. Turgut. 2007. Comparison of the Energy Requirements of an Experimental Plow, a Moldboard Plow and a Disk Plow. *The Philippine Agricultural Scientist* 90 (2): 173-178.
- Hashemi, A., and S. Minaei. 1995. Design and construction of rotary tillage dish. Ministry of Science, Research and Technology University of Tarbiat Modares. Tehran. (In Farsi).
- Hamzeh nezhad, A., S. Shokohi, A. Askari Asli ardeh, and Y. Abbaspor gillandeh. 2013. Check draught needed to moldboard plow the double-sided revolving Tiller. First National Conference on e-agriculture and sustainable natural resources. Institute of Higher Education mehr Arvand. Abadan. (In Farsi).
- Heragu, S. 1997. *Facilities Design*. PWS Publishing, Boston. Massachusetts.
- Hwang, C. L. and K. Yoon. 1981. *Multiple Attribute Decision Making – Method and Applications, A State-of-the-Art Survey*. Springer-Verlag, New York.
- Kabassi, K., and M. Virvou. 2004. Personalised adult e-training on computer use based on multiple attribute decision making. *Interacting with Computers* 16: 115-132.
- Kheiralla, A. F., A. Yahya, M. Zohadie, and W. Ishak. 2004. Modeling of power and energy requirements for tillage implements operating in serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil & Tillage Research* 78: 21-34.
- Lotfi, D., A. Hemat, and M. R. Seraf. 2007. Construction and plant test dynamometer and tachometer fifth wheel tractor. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. Tehran. (In Farsi).
- Mehni, A., and M. R. Maleki. 2013. A review of the various methods for measuring the tensile force required tillage. First National Conference on e-agriculture and sustainable natural resources. Institute of Higher

- Education mehr Arvand. Abadan. (In Farsi).
14. Moradi, M. and A. mardani. 2008. Design, simulation and manufacturing electronic slip for 2WD tractors. Fifth National Congress of Agricultural Engineering and Mechanization. Tehran (In Farsi).
 15. MacCrimmon, K.R. 1968. Decision making among multiple attribute alternatives: A survey and consolidated approach. RAND Memorandum, RM-4823-ARPA.
 16. Smith, L.A. 1993. Energy requirements for selected crop production implements. Soil and Research, 25, 281-299.
 17. Shakouri, H., M. Nabaee, and S. Aliakbarisani. 2014. A quantitative discussion on the assessment of power supply technologies: DEA (data envelopment analysis) and SAW (simple additive weighting) as complementary methods for the "Grammar". Energy (64): 640-647.
 18. Serrano, M. J., O. J. Peca, M. Da silva, A. Pinheiro, and M. Carvalho. 2007. Tractor energy requirements in disc harrow systems. Elsevier. Biosystems Engineering 286-296.
 19. Wang, Y. J. 2015. A fuzzy multi-criteria decision-making model based on simple additive weighting method and relative preference relation. Applied Soft Computing 30: 412-420.

The selection of best tillage implements in terms of energy use efficiency using simple additive weighting methodology

K. Andekaeizadeh¹- M. J. Sheykh Davodi^{2*} - M. E. Khorasani Fardavani³

Received: 15-07-2015

Accepted: 04-10-2015

Introduction

Main part of energy consumption in agricultural mechanization is tillage operations therefore optimization of energy consumption in tillage operation is very important. A management method for system to optimize in agriculture is Simple Additive Weighting (SAW) methodology that this method can operate according to criteria of the systems. This method states that, which system has better performance? (for example the system for agricultural tractors, type of implements, methods of tillage, planting and harvesting, and etc). Fuel consumption is the most important factor in terms of energy consumption in tractor because the fuel energy contributes to help tractor to work. Specific draught is important force that measured for investigation of energy consumption of tillage implements, it can show the amount of drawbar force that optimized (for work width 1 meter implements tillage) by using this method. The multiplication of the drawbar force in forward speed factor resulted drawbar power. The most common method is using of tractors drawbar power in mechanized agriculture. Important factor for assessment and determination performance of tractor is drawbar power. Several studies have been showed that about 20 to 55% of available drawbar power was wasting by implements tillage. Another important parameters that affect on traction efficiency pull's machine is slip. A simple additive weighting two-step procedure involving basic weighted as follows: (1) scale the values of all attributes to make them comparable; (2) sum up the values of the all attributes for each alternative.

Materials and Methods

In this study, three implements tillage were studied including moldboard plow, disk plow and disk harrow and they called A, B and C, respectively. Three different forward speeds of 3, 4, 5, 6 Km/h for each implements were selected according to the type of work at various depths. In this study fuel consumption factor was measured by means of micro-oval flow meter, forward speed was measured by a Doppler radar, Slip was measured by Proxy Sensor, and drawbar force was measured by a three point auto hitch dynamometer. Depth tillage was maintained by depth-knob control system. tillage implements for comparison proper class was rated tables (1), (2) and (3) that includes low depth (12.4 cm moldboard plow, disk plow 12.3 cm and 12.4 cm disk harrow), middle depth (18 cm moldboard plow, disk plow 17.4 cm and 15.2 cm disk harrow) and the high depth (23.5 cm moldboard plow, disk plow 23.4 cm and 17.2 cm disk harrow).

Results and Discussion

The results of Table 5 shows a higher combined ratio of the amount of energy that is optimum performance in the form of (1), (2) and (3). Also Combined ratio is a way that the whole system will be valued according to their criteria that objective criteria according to the study, we classified as positive and negative criteria and all its problems the system had a higher combined ratio than the rest of the system is the optimal system performance. Kheiralla *et al*, (2004) in their research used statistical methods and indicated that energy efficiency disk harrow, disk plow and moldboard plow was better than the other devices but Simple Additive Weight way of energy efficiency in different conditions partially expressed.

Conclusions

The results showed that disk plow in different depth tillage and forward speed, has higher energy efficiency.

1- M.Sc. Student in Agriculture Mechanization, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

3- Assistant Professor Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: Javad1950@gmail.com)

Disk harrow compared with other tillage implements recommended for the high depth. Disc harrow is not optimal in the low depth because it compared to other implements has lower slip and tractive efficiency. Moldboard plow is optimum use energy in depth and average speeds (4 and 5 km h⁻¹).

Keywords: Energy, Implements tillage, Systems, SAW

تحلیل عوامل مؤثر بر برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

حامد عابدی^۱ - سعید فیروزی^{۲*} - محمدصادق اللهیاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲

چکیده

برداشت، مهمترین مرحله تولید محصول زیتون است. هزینه برداشت دستی زیتون حدوداً دو سوم از هزینه‌های کل تولید این محصول را تشکیل می‌دهد، بنابراین تحقیق در مورد کلیه ابعاد مکانیزاسیون برداشت زیتون از اهمیت خاصی برخوردار است. از این رو، به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان، تحقیقی به روش دلفی در سه مرحله انجام گرفت. افراد گروه تخصصی این تحقیق، شامل ۲۲ نفر از کارشناسان مرتبط با مکانیزاسیون زیتون در استان گیلان بودند که با مشورت اساتید دانشگاهی در این استان، شناسایی و انتخاب شدند. نتایج نشان داد که عوامل "اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری" با کسب ۹۸/۱۵ درصد از توافق نهایی و "حمایت ویژه از تحقیقات ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت زیتون" با کسب ۹۶/۲۳ درصد از توافق کارشناسان، به ترتیب به‌عنوان مهمترین عوامل پیش‌برنده توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون در استان گیلان بودند. همچنین نتایج بررسی بازدارنده‌ها بیانگر آن بود که "شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون‌کاری" با کسب ۹۵/۶۲ درصد از توافق نهایی کارشناسان و "فقدان یا نقص برنامه‌ریزی جهت توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون" با کسب ۹۲/۸۷ درصد از توافق کارشناسان مکانیزاسیون زیتون نیز مهمترین عوامل بازدارنده را تشکیل می‌دادند. بنابراین، توجه به نوسازی و اصلاح باغ‌های قدیمی و الزام در رعایت اصول درختکاری سازگار با برداشت مکانیکی زیتون و همچنین حمایت ویژه و هدفمند از تحقیقات کاربردی در زمینه بهینه‌سازی فناوری‌های خارجی و ساخت تجهیزات برداشت متناسب با شرایط بومی باغ‌های زیتون استان گیلان، امری ضروری است.

واژه‌های کلیدی: دلفی، عوامل بازدارنده، عوامل پیش‌برنده، مکانیزاسیون کشاورزی

مقدمه

زیتون از درختان سودمند منطقه خاورمیانه و حاشیه مدیترانه است که میوه و روغن خوراکی آن، از ارزش غذایی بالایی برخوردار است. کشت و تولید زیتون در بخش‌هایی از ایران، به دلیل آب و هوای مطلوب، به‌طور وسیع رایج است (Tabatabaei, 1995). برداشت زیتون از مهمترین مراحل تولید آن است. انتخاب زمان و روش برداشت زیتون تأثیر قابل توجهی بر کمیت و کیفیت روغن زیتون استحصالی، میزان بارآوری سال بعد و منفعت اقتصادی تولید آن دارد (Ferguson et al., 2010; Famiani et al., 2004). هم‌اکنون، برداشت زیتون در ایران تقریباً به شکل سنتی یا دستی انجام می‌گیرد که این امر مستلزم دسترسی به نیروی کارگر فصلی است. برداشت دستی زیتون به دلیل دستمزد بالای نیروی کار و مشکل دسترسی به

موقع به کارگر فصلی، مسائل جدی را برای تولیدکنندگان زیتون ایجاد کرده‌است (Kermani and Pileforoush, 2011). پرهزینه‌ترین بخش تولید محصول زیتون در باغ، هزینه برداشت دستی آن است. هزینه برداشت دستی حدوداً ۶۵ درصد از درآمد ناخالص تولید زیتون در کالیفرنای آمریکا و بسیاری از کشورهای گزارش شده‌است (Hester, 2006; Ferguson, 2006). بنابراین، برداشت مکانیزه زیتون، در بسیاری از کشورهای تولیدکننده این محصول مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، انواع مختلفی از ماشین‌های برداشت دستی و تراکتوری یا خودگردان به کار گرفته شده‌اند (Ferguson et al., 2010).

تدوین برنامه‌های جزو و کلان مکانیزاسیون کشاورزی در هر منطقه، مستلزم شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر توسعه مکانیزاسیون کشاورزی در آن منطقه است. در این راستا، محققان در نقاط مختلف جهان با توجه به شرایط خاص هر منطقه، به مطالعه و شناسایی عوامل پیش‌برنده و بازدارنده توسعه مکانیزاسیون کشت محصولات مختلف پرداخته‌اند. بدیهی است که به دلیل وجود تفاوت‌های فرهنگی، جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی نمی‌توان مدل واحدی را برای توسعه مکانیزاسیون کشاورزی تدوین و ارائه نمود (Shahbazi, 1989). به‌علاوه، نوع و شرایط محصول و مراحل از کشت که

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مدیریت کشاورزی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۲- دانشیار گروه زراعت، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: firoozi@iaurasht.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مدیریت کشاورزی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
DOI: 10.22067/jam.v7i1.48003

پذیرش فناوری‌های نوین در ماشین‌های کشاورزی ویژه کشت گندم معرفی شدند (Baldaji and Aghapour Sabbaghi, 2015). در مطالعه مسائل مکانیزاسیون کشاورزی در نیجریه، کاربرد فناوری اطلاعات در مدیریت کشاورزی، از راهکارهای دستیابی به کشاورزی پایدار در نیجریه معرفی شد (Asoegwu and Asoegwu, 2007).

همچنین، مرور منابع نشان داد که تحقیقاتی در زمینه شناسایی عوامل فنی مؤثر بر امکان به‌کارگیری یا راندمان ماشین‌های برداشت زیتون انجام گرفته‌است. شکل تاج^۲ درخت زیتون، طول و عرض درخت و تراکم شاخه‌های درختان زیتون از عوامل مؤثر بر کیفیت برداشت مکانیکی زیتون هستند (Tombesi et al., 2002). همچنین، رقم زیتون نیز از عوامل مؤثر بر کیفیت برداشت مکانیکی میوه زیتون (راندمان برداشت^۳ و راندمان جمع‌آوری میوه^۴) می‌باشد. ویسکو و همکاران ارقام زیتون لسینو^۵، فرانتویو^۶، پندلینو^۷ و دریتا^۸ را به‌عنوان بهترین تا بدترین ارقام زیتون برای برداشت زیتون با لرزاننده تنه^۹ درخت مرتب کردند (Visco et al., 2004). تراکم درختان در باغ زیتون و نوع ماده سست‌کننده میوه^{۱۰} زیتون نیز از عوامل فنی مؤثر بر کیفیت برداشت مکانیکی زیتون شناخته شدند (Fergosun et al., 2010).

بررسی وضعیت کنونی برداشت زیتون در استان گیلان نشان می‌دهد که علی‌رغم ورود بسیار محدود برخی انواع ماشین‌های برداشت زیتون به این منطقه و نیاز مبرم باغداران به برداشت مکانیزه زیتون، انجام این فرآیند هزینه‌بر، هنوز به شکل دستی انجام می‌گیرد. لذا این تحقیق با هدف شناسایی عوامل پیش‌برنده و بازدارنده توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون در استان گیلان به‌عنوان قطب تولید زیتون و روغن زیتون در کشور انجام گرفت. بدیهی است نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان منطقه‌ای و ملی همراستا با طرح‌های گسترش اراضی زیرکشت زیتون در کشور، مورد بهره‌برداری قرار گیرد تا بدین ترتیب به پایداری تولید این محصول استراتژیک در استان گیلان کمک گردد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در استان گیلان و با بهره‌گیری از تکنیک دلفی انجام گرفت. روش دلفی عموماً با هدف کشف ایده‌های نوآورانه و

مکانیزاسیون آن مدنظر است، از عوامل اثرگذار در نتایج تحقیقات در این زمینه هستند. در این راستا، برخی محققین به مطالعه عوامل مؤثر بر توسعه مکانیزاسیون کشاورزی و گرایش کشاورزان به خرید یا به‌کارگیری ماشین‌های کشاورزی در ایران و جهان پرداخته‌اند و راهکارهایی جهت بهبود وضع موجود در هر منطقه ارائه کردند. نتایج تحقیقی نشان داد که ارتقاء میزان دسترسی به اعتبارات بانکی مطلوب ویژه مکانیزاسیون کشاورزی، بزرگتر کردن قطعات زراعی از طریق یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی، ایجاد انگیزه مالکیت در کشاورزان از طریق بازنگری در طول مدت واگذاری زمین‌های زراعی استان قدس رضوی از عوامل مؤثر بر افزایش سرمایه‌گذاری کشاورزان در زمینه خرید ماشین‌های کشاورزی بودند (Ghorbani, 2008). شهرکی و همکاران ضمن نامطلوب توصیف کردن شاخص‌های مکانیزاسیون کشاورزی در استان سیستان و بلوچستان ایران، یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی، تدارک فناوری‌های مناسب با شرایط منطقه، تدارک برنامه‌های آموزشی ترویجی و حمایت از شرکت‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی را از راهکاری مفید در جهت ارتقاء کمی و کیفی فعالیت‌های مکانیزه کشاورزی در این استان معرفی کردند (Shahraki et al., 2012).

او و همکاران بیان کردند که مکانیزاسیون کشاورزی به‌عنوان یک مهندسی سیستم، نه تنها به توسعه ماشین‌های کشاورزی بلکه به همکاری و هماهنگی بسیاری از عوامل دیگر وابسته است (Ou et al., 2002). زهتاب و همکاران در تحقیق خود، سه عامل "تخصیص اعتبارات ویژه توسعه مکانیزاسیون"، "تشکیل کلاس‌های آموزشی جهت ارتقاء دانش فنی کشاورزان بآدام‌زمینی‌کار" و "سازماندهی طرح‌ها و پروژه‌های مکانیزاسیون نمونه پایلوت" را به‌عنوان مهمترین عوامل پیش‌برنده توسعه مکانیزاسیون کشت بادام زمینی در استان گیلان معرفی کردند (Zehatab Naebi et al., 2015). در بررسی وضعیت مکانیزاسیون و بهره‌وری کشاورزی در جنوب شرقی نیجریه، فقدان شرایط مطلوب به منظور تجمیع اراضی کشاورزی، فقدان زیرساخت‌های مناسب مکانیزاسیون و عدم سرمایه‌گذاری در بخش مکانیزاسیون کشاورزی از مهمترین موانع شناخته شدند (Olaoye and Rotimi, 2010). رسولی و همکاران در تحقیق خود با استفاده از روش دلفی^۱، "کوچک‌بودن و پراکندگی مزارع آفتابگردان" را به‌عنوان مهمترین موانع بر سر راه توسعه مکانیزاسیون کشت آفتابگردان در ایران شناسایی کردند (Rasouli et al., 2010). در مطالعه‌ای که به منظور شناسایی دلایل عدم پذیرش ماشین‌های کشاورزی جدید در منطقه اندیکای خوزستان انجام شد، اهتمام در واگذاری مالکیت اراضی کشاورزی، یکپارچه‌سازی مزارع، تدارک کلاس‌های آموزشی و افزایش سطح زیر کشت محصولات آبی به‌عنوان پیشنهاداتی در جهت

- 2- Canopy
- 3- Efficiency of harvesting
- 4- Efficiency of collection
- 5- Leccino
- 6- Frantoio
- 7- Pendolino
- 8- Dritta
- 9- Trunk shaker
- 10- Fruit loosening agent

- 1- Delphi technique

زیاد=۴ و خیلی‌زیاد=۵) در قالب پرسشنامه مرحله دوم طراحی و مجدداً در اختیار پاسخگویان قرار داده شد. بدین ترتیب، کلیه نظرات به رویت تمامی افراد منتخب رسید و میزان موافقت افراد در مورد هر گویه پرسیده شد. پس از گردآوری پرسشنامه‌های مرحله دوم، نتایج این مرحله به کمک نرم‌افزار SPSS₂₁ بر اساس میزان اهمیت و امتیاز وزن نرمال شده، اولویت‌بندی شدند. میزان اهمیت هر گویه از تقسیم جمع نظرات کارشناسان (با لحاظ ضرایب معادل پاسخ-ها) بر تعداد گویه‌ها محاسبه گردید. امتیاز وزن نرمال شده برای هر گویه نیز از تقسیم میزان اهمیت آن گویه بر جمع کل میزان اهمیت تمامی گویه‌ها تعیین شد. با توجه به آنکه پس از اجرای مرحله دوم تحقیق دلفی، ضریب هماهنگی دلیو کندال^۲ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود ($W_k=0/32$)، در نتیجه اجماع و اتفاق نظر بین پاسخگویان وجود نداشت و به منظور دستیابی به اجماع بین پاسخگویان، مرحله سوم تحقیق دلفی اجرا گردید (Heiko, 2012). ضریب هماهنگی دلیو کندال مقیاسی برای تعیین درجه هماهنگی و موافقت میان چندین دسته رتبه مربوط به شماری از افراد است. در حقیقت با کاربرد این مقیاس می‌توان همبستگی رتبه‌ای میان چند مجموعه رتبه را یافت. چنین مقیاسی به‌ویژه در بررسی‌های مربوط به «روایی میان داوران» سودمند است. این مقیاس بین ۰ و ۱ متغیر است. اگر ضریب کندال صفر باشد یعنی نبود توافق کامل و اگر یک باشد یعنی وجود توافق کامل (Rezadoust, 2011). بنابراین، ده اولویت برتر از عوامل بازدارنده و ده اولویت برتر از عوامل پیش‌برنده که دارای بالاترین میانگین بودند در قالب پرسشنامه مرحله سوم تحقیق دلفی، مجدداً مورد پرسش قرار گرفتند. با توجه به کاهش تعداد گویه‌ها، امکان مقایسه همزمان کلیه آیت‌ها و اعلام نظر نسبی در موافقت با هر گویه با دقت بالاتر فراهم گردید. براساس یک توافق نهایی، کلیه عوامل با درصد توافق بالای ۹۰ درصد به‌عنوان مهمترین عوامل انتخاب و معرفی شدند (Zehtab Naebi et al., 2015).

نتایج و بحث

عوامل پیش‌برنده

بر اساس فراوانی پاسخ‌ها به اولین سوال باز در مرحله اول تحقیق دلفی، ۱۹ نظر کارشناسی به‌عنوان عوامل پیش‌برنده مکانیزاسیون توسعه برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان شناسایی شدند (جدول ۱). نتایج بیانگر آن بود که "کاهش هزینه کارگری و افزایش درآمد باغداران" و "ارائه تسهیلات و اعتبارات مالی مناسب جهت فراگیر شدن برداشت مکانیکی زیتون" به‌ترتیب با ۵۳/۸۵ و ۳۸/۴۶

قابل اطمینان و یا تهیه اطلاعاتی مطلوب به منظور اتخاذ تصمیمات مهم، به کار گرفته می‌شود. این تکنیک، فرآیندی ساختاریافته به منظور جمع‌آوری و طبقه‌بندی دانش گروهی از کارشناسان و خبرگان است که از طریق توزیع پرسشنامه‌هایی در بین این افراد و بازخورد مکرر و کنترل‌شده پاسخ‌های مراحل مختلف و تحلیل کلیه نظرات دریافتی شکل می‌گیرد (Ziglio, 1996). تکنیک دلفی ابزار ارتباطی سودمندی بین گروهی از خبرگان است که فرموله‌کردن آراء اعضاء گروه را تسهیل می‌کند (Helmer, 1997). این تکنیک با این هدف طراحی شده‌است که بتواند مباحثات میان خبرگان یک موضوع تخصصی را امکان‌پذیر کند، به‌طوری‌که از تأثیر رفتارهای متقابل اجتماعی که معمولاً در مباحثات گروهی اتفاق می‌افتد و مانعی در برابر شکل‌یافتن عقاید و نظرات است، جلوگیری نماید (Wissema, 1982). برخلاف سایر روش‌ها، اعتبار نتایج تحقیقات دلفی، نه به تعداد افراد پاسخگو، بلکه به اعتبار و خبرگی افراد شرکت‌کننده در تحقیق وابسته است (Ludwig, 1997; Hsu and Sandford, 2007). اندازه جامعه آماری در مطالعات دلفی زیر ۵۰ نفر است (Witkin and Altschuld, 1995). اغلب تحقیقات دلفی با شرکت ۱۵ تا ۲۰ نفر کارشناس خبره انجام گرفته است (Ludwig, 1997). بنابراین، با توجه به محدودیت تعداد کارشناسان مرتبط با مکانیزاسیون زیتون در استان گیلان، با نظر اساتید دانشگاه‌های استان، تعداد ۲۲ نفر کارشناس خبره و متخصص از ادارات جهاد کشاورزی منطقه رودبار گیلان به‌عنوان شرکت‌کننده در تحقیق دلفی انتخاب شدند و پس از اعلام جزئیات و اهداف پژوهش، نظر موافق کارشناسان منتخب جهت همکاری در مراحل سه‌گانه تحقیق جلب گردید. در اولین مرحله از مراحل سه‌گانه این پژوهش، دو سوال باز به شکل زیر مطرح گردید و از شرکت‌کنندگان خواسته شد که به شکل موردی، به این سوالات پاسخ دهند:

الف- مهمترین عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی میوه زیتون در استان گیلان کدامند؟

ب- مهمترین عوامل بازدارنده برداشت مکانیکی میوه زیتون در استان گیلان کدامند؟

پرسشنامه‌ها به صورت حضوری به افراد شرکت‌کننده تحویل داده شد و پس از زمان مقرر، جمع‌آوری گردیدند. سپس نتایج، جمع‌بندی و خلاصه‌نویسی شدند. بر اساس تحلیل محتوای پاسخ‌های ارائه شده در مرحله اول، ۱۹ عامل به‌عنوان عوامل پیش‌برنده و ۱۷ عامل به‌عنوان عوامل بازدارنده شناسایی و ثبت شدند. در این مرحله با استفاده از روش تحلیل چندپاسخی، تجزیه و تحلیل داده‌ها انجام شد. در مرحله دوم تحقیق دلفی، کلیه گویه‌های استخراج شده در مرحله اول به شکل طیف لیکرت پنج‌سطحی^۱ (خیلی کم=۱، کم=۲، تاحدودی=۳،

2- Kendall's W coefficient

1- Five-level likert scale

درصد در رتبه‌های اول و دوم قرار گرفتند. همچنین، "اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درخت کاری" و "استفاده بهینه از نیروی کار" نیز با درصد مورد ۳۴/۶۲، به‌طور مشترک در ردیف سوم عوامل

جدول ۱- نتایج مرحله اول مطالعه دلفی: عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

Table 1- Results of Delphi study round one: Driving factors of mechanical harvesting of olives in Guilan province

گویه‌ها Items	فراوانی Freq.	درصد موردها % of Cases
کاهش هزینه کارگری و افزایش درآمد باغداران Reducing the labor cost and increasing the income of farmers	14	53.85
ارائه تسهیلات و اعتبارات مالی مناسب جهت فراگیر شدن توسعه مکانیزه Providing financial credits for the development of mechanical harvesting	10	38.46
اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری Modification of olive groves and applying the technical fundamentals to the orchards	9	34.62
استفاده بهینه از نیروی کار Efficient use of labor force	9	34.62
بهبود کمی و کیفی محصول در تولید مکانیزه نسبت به روش سنتی Improvement of the quality and quantity of product in mechanized harvesting	7	26.92
برداشت بهداشتی محصول با آسیب کمتر نسبت به روش سنتی Healthy harvesting the product with less damage compared to the manual method	7	26.92
آموزش علمی و بالابردن دانش فنی باغداران Scientific and technical training to enhance the knowledge of farmers	5	19.23
تجمع باغ‌های کوچک Aggregation of small gardens	4	15.38
توسعه شرکت‌های خدمات مکانیزه در منطقه و حمایت از آن‌ها Development of the mechanization service companies in the region and supporting them	4	15.38
فعالیت مستمر متولیان دولتی حامی تولید زیتون در بازارهای داخلی و خارجی Continuous activities of pro-government authorities in domestic and foreign olive markets	4	15.38
افزایش بهره‌وری تولید و در نتیجه ارتقاء درآمد باغداران زیتون Increasing the productivity and then increasing the income of olive growers	3	11.54
مبارزه اصولی و پیشرفته با آفات و بیماری‌ها Basic and advanced combating pests and diseases	3	11.54
حمایت ویژه از تحقیقات ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت زیتون Special support for researches to construct and optimize the olive harvesting machinery	3	11.54
شناسایی باغداران برتر و ترغیب آنها به استفاده از روش‌های مکانیزه Identifying the top olive growers and promoting them to use the mechanized methods	3	11.54
ارائه سیاست‌های تشویقی و حمایتی به منظور حرکت باغداران به سمت برداشت مکانیزه زیتون Providing supportive and incentive policies to move towards olive mechanized harvesting	2	7.69
ارائه خدمات ویژه به فارغ‌التحصیلان بخش کشاورزی و حمایت مالی از آن‌ها Providing special services to agricultural graduates and financial support of them	2	7.69
بازدیدهای علمی از باغ‌های مکانیزه داخلی و خارجی Visiting the internal and external mechanized olive groves	1	3.85
توسعه سیستم‌های آبیاری مدرن در باغ‌های زیتون The development of modern irrigation systems in the olive groves	1	3.85
توسعه کارخانه‌های روغن‌کشی Development of oil extraction plants	1	3.85
جمع Summation	92	354

جدول ۲- نتایج مرحله دوم مطالعه دلفی: عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

Table 2- Results of Delphi study round two: Driving factors of mechanical harvesting of olives in Guilan province

گویه‌ها Items	وزن نرمال شده Normal weight	اولویت Priority
اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری Modification of olive groves and applying the technical fundamentals to the orchards	5.92	1
آموزش علمی و بالابردن دانش فنی باغداران Scientific and technical training to enhance the knowledge of farmers	5.72	2
افزایش بهره‌وری تولید و در نتیجه ارتقاء درآمد باغداران زیتون Increasing the productivity and then increasing the income of olive growers	5.67	3
حمایت ویژه از تحقیقات ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت زیتون Special support for researches to construct and optimize the olive harvesting machinery	5.52	4
ارائه تسهیلات و اعتبارات مالی مناسب جهت فراگیر شدن توسعه مکانیزه Providing financial credits for the development of mechanical harvesting	5.52	4
توسعه شرکت‌های خدمات مکانیزه در منطقه و حمایت از آن‌ها Development the mechanization service companies in the region and supporting them	5.47	5
بازدیدهای علمی از باغ‌های مکانیزه داخلی و خارجی Visiting the internal and external mechanized olive groves	5.47	5
بهبود کمی و کیفی محصول در تولید مکانیزه نسبت به روش سنتی Improvement of the quality and quantity of product in mechanized harvesting	5.37	6
ارائه سیاست‌های تشویقی و حمایتی به منظور حرکت باغداران به سمت برداشت مکانیزه زیتون Providing supportive and incentive policies to move towards olive mechanized harvesting	5.37	6
شناسایی باغداران برتر و ترغیب آنها به استفاده از روش‌های مکانیزه Identifying the top olive growers and promoting them to use the mechanized methods	5.32	7
توسعه سیستم‌های آبیاری مدرن در باغ‌های زیتون The development of modern irrigation systems in the olive groves	5.27	8
تجمع باغ‌های کوچک Aggregation of small gardens	5.27	8
ارائه خدمات ویژه به فارغ التحصیلان بخش کشاورزی و حمایت مالی از آن‌ها Providing special services to agricultural graduates and financial support of them	5.22	9
کاهش هزینه کارگری و افزایش درآمد باغداران Reducing the labor cost and increasing the income of farmers	5.16	10
استفاده بهینه از نیروی کار Efficient use of labor force	5.11	11
فعالیت مستمر متولیان دولتی حامی تولید زیتون در بازارهای داخلی و خارجی Continuous activities of pro-government authorities in domestic and foreign olive markets	4.96	12
مبارزه اصولی و پیشرفته با آفات و بیماری‌ها Basic and advanced combating pests and diseases	4.76	13
برداشت بهداشتی محصول با آسیب کمتر نسبت به روش سنتی Healthy harvesting the product with less damage compared to the manual method	4.66	14
توسعه کارخانه‌های روغن‌کشی Development of oil extraction plants	4.25	15

جدول ۲، میزان موافقت کارشناسان مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان با نظرات مختلف را نشان می‌دهد. جابه‌جایی اولویت‌ها در مرحله دوم تحقیق دلفی، از ویژگی‌های این تکنیک مطالعه است که مرحله به مرحله، همفکری ناخواسته، موجب همگرایی نظرات کارشناسان مخاطب می‌گردد. براساس نتایج نشان داده شده در جدول ۲، "اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری"، "آموزش علمی و بالابردن دانش فنی باغداران زیتون" و "افزایش بهره‌وری تولید زیتون و در نتیجه ارتقاء درآمد باغداران" به ترتیب با کسب وزن‌های نرمال شده ۵/۹۲، ۵/۷۲ و ۵/۶۷ در جایگاه‌های اول تا سوم عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان در مرحله دوم تحقیق دلفی قرار گرفتند.

بهره‌وری تولید زیتون و در نتیجه ارتقاء درآمد باغداران" به ترتیب با کسب وزن‌های نرمال شده ۵/۹۲، ۵/۷۲ و ۵/۶۷ در جایگاه‌های اول تا سوم عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان در مرحله دوم تحقیق دلفی قرار گرفتند.

جدول ۳- نتایج مرحله سوم مطالعه دلفی: عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

Table 3- Results of Delphi study round three: Driving factors of mechanical harvesting of olives in Guilan province

گویه‌ها Items	سطح توافق (%) Assent (%)	اولویت Priority
اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری Modification of olive groves and applying the technical fundamentals to the orchards	98.15	1
حمایت ویژه از تحقیقات ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت زیتون Special support for researches to construct and optimize the olive harvesting machinery	96.23	2
آموزش علمی و بالابردن دانش فنی باغداران Scientific and technical training to enhance the knowledge of farmers	93.62	3
ارائه تسهیلات و اعتبارات مالی مناسب جهت فراگیر شدن توسعه مکانیزه Providing financial credits for the development of mechanical harvesting	90.84	4
توسعه شرکت‌های خدمات مکانیزه در منطقه و حمایت از آن‌ها Development the mechanization service companies in the region and supporting them	86.69	5
افزایش بهره‌وری تولید و در نتیجه ارتقاء درآمد باغداران زیتون Increasing the productivity and then increasing the income of olive growers	84.81	6
ارائه سیاست‌های تشویقی و حمایتی به منظور حرکت باغداران به سمت برداشت مکانیزه زیتون Providing supportive and incentive policies to move towards olive mechanized harvesting	81.08	7
بازدیدهای علمی کشاورزان از باغ‌های مکانیزه داخلی و خارجی Visiting the internal and external mechanized olive groves for olive growers	77.12	8
شناسایی باغداران برتر و ترغیب آنها به استفاده از روش‌های مکانیزه Identifying the top olive growers and promoting them to use the mechanized methods	76.23	9
بهبود کمی و کیفی محصول در تولید مکانیزه نسبت به روش سنتی Improvement of the quality and quantity of product in mechanized harvesting	73.27	10

براساس نتایج مرحله سوم تحقیق دلفی (جدول ۳)، "حمایت ویژه از تحقیقات ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت زیتون" با کسب ۹۶/۲۳ درصد از توافق نهایی کارشناسان شرکت‌کننده در تحقیق، در جایگاه دوم عوامل پیش‌برنده مکانیزاسیون برداشت زیتون در استان گیلان قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اغلب موارد، راندمان برداشت زیتون به‌خصوص در مورد ارقام مانزانیا^۱، زرد و روغنی محلی بیش از ۸۰ درصد نبوده است (Yousefi, 2013; Yousefi *et al.*, 2014; Kermani and Pileh foroush, 2011). با توجه به اهمیت آفت مگس زیتون، ضروری است که کل محصول از درختان برداشت شود. در غیر این صورت، آفت مگس زیتون تا سال بعد باقی خواهد ماند. از سوی دیگر، به دلیل پراکندگی میوه‌های باقیمانده، هزینه برداشت دستی مانده محصول افزایش می‌یابد. از این رو، ضروری است در کنار توجه به اصلاح باغ‌های زیتون، بهینه‌سازی ماشین‌آلات خارجی و حتی ساخت ماشین‌آلات داخلی منطبق با شرایط بومی، مورد توجه ویژه محققان و صنعتگران قرار گیرد. در این میان، حمایت مالی دولت از این تحقیقات، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

"آموزش علمی و بالابردن دانش فنی باغداران زیتون در زمینه ماشین‌های ویژه برداشت زیتون" نیز با کسب ۹۳/۶۲ درصد از توافق

براساس نتایج مرحله سوم تحقیق دلفی (جدول ۳)، "اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری" با کسب ۹۸/۱۵ درصد از توافق نهایی کارشناسان شرکت‌کننده در تحقیق، در اولویت اول عوامل پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان قرار گرفت. در ایتالیا نیز قرارگیری نامنظم و ابعاد بزرگ درختان زیتون در اغلب باغ‌های این کشور، از مهمترین موانع برداشت مکانیکی زیتون معرفی شدند (Paschino and Mura, Antognozzi *et al.*, 1990). کاتانیا و همکاران نیز فاصله کاشت منظم ۶m × ۷m با محیط تاج درخت حدود ۱۰m را به‌عنوان پارامترهای ساختاری مناسب در برداشت مکانیکی زیتون شناسایی کردند. به‌علاوه، قابلیت مانورپذیری لرزاننده‌های تنه درخت در باغ‌های قدیمی، بسیار محدود و در برخی مناطق غیرممکن است (Catania *et al.*, 2008). هرس اصولی درختان زیتون، ساده‌ترین عملیات اصلاحی در جهت اجرای مکانیزاسیون برداشت زیتون به شمار می‌رود که حداقل، امکان بکارگیری لرزاننده‌های دستی را فراهم می‌کند. اغلب باغداران منطقه رودبار به تصور نادرست تأثیر سطح سبز درختان در بارآوری زیتون و به دلیل هزینه بالای اجرای هرس درختان زیتون، از انجام این عمل خودداری می‌کنند. همچنین، رقم زیتون از پارامترهای مهم در عملکرد ماشین‌های برداشت زیتون محسوب می‌شود (Visco *et al.*, 2004). بنابراین، در احداث باغ‌های جدید یا نوسازی باغ‌های قدیمی، این پارامتر نیز باید مدنظر قرار گیرد.

1- Harvest efficiency
2- Manzanilla

که دانش فنی باغداران زیتون در قالب برنامه‌ای مدون ارتقاء یابد. ارائه تسهیلات و اعتبارات مالی مناسب جهت فراگیر شدن مکانیزاسیون برداشت زیتون با کسب ۹۰/۸۴ درصد از توافق شرکت‌کنندگان در جایگاه چهارم اولویت‌های پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون در گیلان قرار گرفت. کلارک و همکاران نیز حمایت مالی دولت را از عوامل مهم در توسعه مکانیزاسیون در جمهوری اسلواکی دانستند (Clarke *et al.*, 1993). همچنین، تخصیص

کارشناسان زیتون، در اولویت سوم پیش‌برنده‌های مکانیزاسیون برداشت زیتون در استان گیلان قرار گرفت. ماهیت اجرایی اولویت اول مرحله سوم پیش‌برنده‌های مکانیزاسیون برداشت زیتون در استان گیلان یعنی عامل "اصلاح باغ‌های زیتون و رعایت اصول فنی درختکاری"، مستلزم اطلاع باغداران زیتون از اصول اصلاح درختان زیتون و مزایای آن و همچنین اطلاعات فنی از کلیه ابعاد و موارد ضروری برداشت مکانیزه این محصول است. از این رو، ضروری است

جدول ۴- نتایج مرحله اول مطالعه دلفی: عوامل بازدارنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

Table 4- Results of Delphi study round one: Barriers of mechanical harvesting of olives in Guilan province

گویه‌ها Items	فراوانی Freq.	درصد موردها % of Cases
شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون کاری The slope of most olive growing plots	22	100
وجود نظام خرده مالکی و کوچک‌بودن اغلب باغ‌های زیتون Yeoman system existence and the small size of most olive groves	19	86.36
اجاره‌ای بودن برخی باغ‌های زیتون Rental status of some olive orchards	17	77.27
تعداد کم صنعتگران منطقه‌ای و سطح پایین دانش فنی آن‌ها Limited number of regional craftsmen and low level of their technical knowledge	14	63.64
عدم پذیرش فناوری‌های جدید برداشت از جانب باغداران زیتون Non-acceptance of new technologies by olive growers	12	54.55
فقدان یا نقص برنامه‌ریزی جهت توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون Lack or shortcoming of planning for the development of the olive harvest mechanization	10	45.45
عدم وجود تشکل‌ها و تعاونی‌های حمایت‌کننده Lack of supporting organizations and cooperatives	9	40.91
وارداتی بودن ماشین‌آلات ویژه زیتون و در نتیجه قیمت بالای آن‌ها Imported olive harvesting machinery and then their high price	4	18.18
کمبود ماشین‌آلات ویژه زیتون در منطقه Shortage of special equipments for olive harvesting in the region	3	13.64
بالابودن هزینه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات ویژه زیتون High cost of the maintenance of olive special machinery	2	9.09
عدم وجود تعمیرگاه‌های مناسب و تخصصی ویژه ماشین‌آلات زیتون Lack of appropriate and specialized repair shop for olive machinery	2	9.09
عدم توجه به نظرات کارشناسان و محققان Lack of attention to the comments of experts and researchers	1	4.55
محدود بودن کارشناسان خبره و متخصص مکانیزاسیون زیتون در منطقه The limited number of experts specializing in olive mechanization	1	4.55
کمبود برنامه‌های آموزشی- ترویجی مناسب برای باغداران Shortage of educational and promotional programs for olive growers	1	4.55
اهمیت استراتژیک کمتر کشت زیتون نسبت به برنج در استان گیلان Less strategic importance of olive production compared to rice in Guilan province	1	4.55
نبود تکنیک‌های فرآوری مناسب زیتون به منظور افزایش ارزش افزوده محصول برای باغداران Lack of proper processing techniques to enhance value-added product for growers of olives	1	4.55
عدم اطمینان از عملکرد صحیح ماشین‌آلات ویژه برداشت زیتون Uncertainty in proper functioning of special equipment for harvesting olives	1	4.55
جمع Summation	120	545.48

دلفی بازدارنده‌های برداشت مکانیزه زیتون در استان گیلان نیز ۱۷ نظر کارشناسی، به‌عنوان عوامل بازدارنده شناسایی شدند (جدول ۴). نتایج بیانگر آن بودند که "شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون‌کاری در منطقه رودبار گیلان"، "وجود نظام خرده‌مالکی و کوچک‌بودن قطعات زیتون‌کاری" و "اجاره‌ای بودن برخی باغ‌های زیتون" به ترتیب با درصد موردهای ۱۰۰، ۸۶/۳۶ و ۷۷/۲۷ درصد، بیشترین فراوانی پاسخ‌ها را در بین جواب‌های افراد منتخب داشتند.

اعتبارات سازمانی به‌عنوان ابزاری سودمند در جهت ارتقاء سطح مکانیزاسیون کشاورزی در منطقه بودردوان هندوستان معرفی گردید (Ghosh, 2010). این عامل در مطالعه زهتاب و همکاران به‌عنوان اولویت اول پیش‌برنده‌های مکانیزاسیون کشت بادام زمینی در استان گیلان شناخته شد (Zehtab et al., 2015).

عوامل بازدارنده

براساس فراوانی پاسخ‌ها به اولین سوال باز در مرحله اول تحقیق

جدول ۵- نتایج مرحله دوم مطالعه دلفی: عوامل بازدارنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

Table 5- Results of Delphi study round two: Barriers of mechanical harvesting of olives in Guilan province

گویه‌ها Items	وزن نرمال شده Normal weight	اولویت Priority
شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون‌کاری The slope of most olive growing plots	7.33	1
وجود نظام خرده مالکی و کوچک‌بودن اغلب باغ‌های زیتون Yeoman system existence and the small size of most olive groves	6.98	2
اهمیت استراتژیک کمتر کشت زیتون نسبت به برنج در استان گیلان Less strategic importance of olive production compared to rice in Guilan province	6.98	2
فقدان یا نقص برنامه‌ریزی جهت توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون Lack or shortcoming of planning for the development of the olive harvest mechanization	6.77	3
تعداد کم صنعتگران منطقه‌ای و سطح پایین دانش فنی آن‌ها Limited number of regional craftsmen and low level of their technical knowledge	6.63	4
اجاره‌ای بودن برخی باغ‌های زیتون Rental status of some olive orchards	6.35	5
عدم وجود تشکل‌ها و تعاونی‌های حمایت‌کننده Lack of supporting organizations and cooperatives	5.92	6
وارداتی بودن ماشین‌آلات ویژه زیتون و در نتیجه قیمت بالای آن‌ها Imported olive harvesting machinery and then their high price	5.85	7
کمبود ماشین‌آلات ویژه زیتون در منطقه Shortage of special equipments for olive harvesting in the region	5.78	8
عدم اطمینان از عملکرد صحیح ماشین‌آلات ویژه برداشت زیتون Uncertainty in proper functioning of special equipment for harvesting olives	5.78	8
بالابودن هزینه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات ویژه زیتون High cost of the maintenance of olive special machinery	5.78	8
عدم توجه به نظرات کارشناسان و محققان Lack of attention to the comments of experts and researchers	5.43	9
محدود بودن کارشناسان خبره و متخصص مکانیزاسیون زیتون در منطقه The limited number of experts specializing in olive mechanization	5.22	10
کمبود برنامه‌های آموزشی- ترویجی مناسب برای باغداران Shortage of educational and promotional programs for olive growers	5.11	11
عدم پذیرش فناوری‌های جدید برداشت از جانب باغداران زیتون Non-acceptance of new technologies by olive growers	5.01	12
نبود تکنیک‌های فرآوری مناسب زیتون به منظور افزایش ارزش افزوده محصول برای باغداران Lack of proper processing techniques to enhance value-added product for growers of olives	4.87	13
عدم وجود تعمیرگاه‌های مناسب و تخصصی ویژه ماشین‌آلات زیتون Lack of appropriate and specialized repair shop for olive machinery	4.16	14

به کارگیری لرزاننده‌های تراکتوری و خودگردان زیتون را در این منطقه، با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین، باید تحقیق در خصوص کلیه ابعاد فنی ماشین‌های برداشت دستی از جمله لرزاننده‌های دستی در اولویت قرار گیرد. یکی از مشکلات این نوع ماشین‌های برداشت، وزن قابل توجه آن‌ها و در نتیجه خسته‌کننده بودن برداشت محصول با آن‌ها است. از این رو، تحقیق در جهت کاهش وزن این گروه ماشین‌ها نیز باید مورد توجه محققین قرار گیرد.

"فقدان یا نقص برنامه‌ریزی جهت توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون" با کسب ۹۲/۸۷ درصد از توافق کارشناسان شرکت‌کننده در رتبه دوم بازدارنده‌های برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان قرار گرفت. در تحقیق زهتاب و همکاران نیز نبود نگاه ملی و منطقه‌ای به توسعه مکانیزاسیون کشت بادام زمینی در استان گیلان نیز با کسب ۹۰/۳۸ درصد از توافق کارشناسان شرکت‌کننده، از مسائل مهم توسعه مکانیزاسیون تولید بادام زمینی در منطقه گیلان بود (Zehtab et al., 2015). باید توجه داشت که اغلب اقدامات پیش‌برنده برداشت مکانیکی زیتون، مستلزم تخصیص اعتبارات ویژه و تدوین برنامه‌های کلان است، بنابراین حمایت عملیاتی سازمان‌های متولی دولتی به‌عنوان پشتوانه توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نتایج جدول ۴ برای اجرای مرحله دوم تحقیق دلفی مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۵، سطح موافقت کارشناسان مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان با نظرات مختلف کلیه کارشناسان در مرحله دوم تحقیق بازدارنده‌ها را نشان می‌دهد. براساس یافته‌های این بخش از تحقیق، "شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون کاری"، با امتیاز وزن نرمال شده ۷/۳۳ در جایگاه اول عوامل بازدارنده قرار گرفت. این عامل در مرحله اول تحقیق دلفی نیز با فراوانی ۲۲ در رتبه اول عوامل بازدارنده قرار گرفته بود. "وجود نظام خرده‌مالکی و کوچک بودن اغلب قطعات زیتون کاری" و "اهمیت استراتژیک کمتر کشت زیتون نسبت به برنج در استان گیلان" که در مرحله اول تحقیق دلفی به ترتیب با درصد موردهای ۱۰۰ و ۴/۵۵ درصد در رتبه‌های دوم و پانزدهم قرار داشتند، در مرحله دوم تحقیق، با امتیاز وزن نرمال شده ۶/۹۸، به‌طور مشترک در جایگاه دوم عوامل بازدارنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان قرار گرفتند.

براساس نتایج مرحله سوم تحقیق دلفی بازدارنده‌ها (جدول ۶)، "شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون کاری" با کسب ۹۵/۶۲ درصد از توافق نهایی کارشناسان شرکت‌کننده، در اولویت اول عوامل بازدارنده قرار گرفت. این عامل در باغ‌های زیتون ایتالیا نیز به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل محدودکننده کاربرد ماشین‌های برداشت زیتون معرفی شد (Paschino and Mura, 1997; Antognozzi et al., 1990). شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون کاری در منطقه گیلان،

جدول ۶ - نتایج مرحله سوم مطالعه دلفی: عوامل بازدارنده برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان

Table 6- Results of Delphi study round three: Barriers of mechanical harvesting of olives in Guilan province

گوبه‌ها Items	سطح توافق (%) Assent (%)	اولویت Priority
شیب‌دار بودن اغلب قطعات زیتون کاری The slope of most olive growing plots	95.62	1
فقدان یا نقص برنامه‌ریزی جهت توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون Lack or shortcoming of planning for the development of the olive harvest mechanization	92.87	2
اهمیت استراتژیک کمتر کشت زیتون نسبت به برنج در استان گیلان Less strategic importance of olive production compared to rice in Guilan province	90.38	3
عدم وجود تشکل‌ها و تعاونی‌های حمایت‌کننده Lack of supporting organizations and cooperatives	87.35	4
وجود نظام خرده‌مالکی و کوچک بودن اغلب باغ‌های زیتون Yeoman system existence and the small size of most olive groves	85.77	5
کمبود ماشین‌آلات ویژه زیتون در منطقه Shortage of special equipments for olive harvesting in the region	82.41	6
عدم اطمینان از عملکرد صحیح ماشین‌های ویژه برداشت زیتون Uncertainty in proper functioning of olive harvest machinery	79.59	7
تعداد کم صنعتگران منطقه‌ای و سطح پایین دانش فنی آن‌ها Limited number of regional craftsmen and low level of their technical knowledge	76.22	8
اجاره‌ای بودن برخی باغ‌های زیتون Rental status of some olive orchards	74.33	9
وارداتی بودن ماشین‌آلات ویژه زیتون و در نتیجه قیمت بالای آن‌ها Imported olive harvesting machinery and then their high price	71.19	10

رعایت اصول فنی درختکاری" و "حمایت ویژه از تحقیقات ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت زیتون" مهمترین عوامل پیش‌برنده یا محرک را تشکیل می‌دهند. بنابراین، به‌منظور توسعه مکانیزاسیون برداشت زیتون و در نتیجه توسعه پایدار تولید این محصول ارزشمند در استان گیلان، ضروری است وزارت جهاد کشاورزی ضمن تدوین راهبردهای عملیاتی در جهت حمایت از باغداران زیتون در اصلاح باغ‌های خود، از تحقیقات بهینه‌سازی ماشین‌های برداشت خارجی و طراحی و ساخت ماشین‌آلات برداشت زیتون متناسب با شرایط بومی حمایت کند.

سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت برای حمایت از این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند، از حسن توجه و دقت نظر کارشناسان مکانیزاسیون استان گیلان تشکر نمایند.

"اهمیت استراتژیک کمتر تولید زیتون نسبت به برنج در استان گیلان" نیز با کسب ۹۰/۳۸ درصد از توافق کارشناسان مخاطب در رتبه سوم بازدارنده‌های برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان قرار گرفت. استان گیلان با توجه به سه عامل فراوانی آب، خاک مستعد و تنوع آب و هوایی، حدوداً ۴۰۰۰۰۰ هکتار زمین کشاورزی دارد که ۲۳۰۰۰۰ هکتار آن یعنی ۶۰ درصد از کل اراضی زراعی آن به کشت برنج اختصاص دارد (Mohammadi Torkashvand *et al.*, 2014). اهمیت استراتژیک برنج در این استان، ناخواسته عمده توجه سازمان‌های متولی کشاورزی را به سمت این محصول استراتژیک معطوف کرده است. از این رو، ضروری است در کنار برنامه‌های توسعه مکانیزاسیون برنج در استان گیلان، با توجه به نقش زیتون به‌عنوان منبع درآمد بیش از ۶۰۰۰ باغ‌دار زیتون کوچک و بزرگ در این استان، توجه ویژه‌ای به مسائل مرتبط با تولید این محصول مبذول گردد.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که عوامل متعددی در برداشت مکانیکی زیتون در استان گیلان تأثیر گذارند که "اصلاح باغ‌های زیتون و

References

1. Antognozzi, E., A. Cartechini, A. Tombesi, and A. Paliotti. 1990. La trasmissione della vibrazione e l'efficienza di raccolta in olivi della cv. Moraiolo. *Genio Rurale*, 5.
2. Asoegwu, S. N., and A. O. Asoegwu. 2007. An Overview of Agricultural Mechanization and Its Environmental Management in Nigeria. *Agricultural Engineering International: the CIGR E-Journal*. Invited Overview 6 (9), pp. 22. Retrieved September 18, 2014.
3. Baladji, U., and M. Aghapour Sabbaghi. 2015. Investigating the reasons for non-acceptance of new machines by wheat growers in Andica County. *Journal of Scientific Research and Development* 2 (1): 62-66.
4. Catania, P., S. Piraino, M. Salvia, and M. Vallone. 2008. Influence of tree's structure on the efficiency of the mechanical harvest of olives. *International Conference of Innovation Technology to Empower Safety, Health and Welfare in Agriculture and Agro-food Systems*, September 15-17, 2008 Ragusa – Italy.
5. Clarke, L. J., T. A. Morrison, J. Juricek, and B. Studenik. 1993. The Slovak Republic: Agricultural mechanization strategy, a review. Retrieved January 21, 2007.
6. Ghosh, B. K. 2010. Determinants of farm mechanization in modern agriculture: A case study of Burdwan districts of west Bengal. *International Journal of Agricultural Research* 5 (12): 1107-1115.
7. Famiani, F., D. Farinelli, and P. Proietti. 2004. Raccolta delle olive. *Atti Aggiornamenti sulle Tecniche Colturali in Olivicoltura*, Accademia Nazionale dell'Olio e dell'Olivo, Spoleto (PG), Italy: 123-162.
8. Ferguson, L. 2006. Trends in olive fruit handling previous to its industrial transformation. *Grasas Y Aceites* 57 (1): 9-15.
9. Ferguson, L., U. A. Rosa, S. Castro-Garcia, S. M. Lee, J. X. Guinard, J. Burns, W.H. Krueger, N.V. O'Connell, and K. Glozer. 2010. Mechanical harvesting of California table and oil olives. *Advances in Horticultural Science* 24 (1): 53-63.
10. Ghorbani, M. 2008. Factors affecting investment in agricultural machinery to farmers in Khorasan Razavi, application of the Heckman two-stage method. 5th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Mashhad, Iran, September 2008, pp, 9. (In Farsi).

11. Heiko, A. 2012. Consensus measurement in Delphi studies: review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change* 79 (8): 1525-1536.
12. Helmer, O. 1977. Problems in futures research: Delphi and causal cross-impact analysis, *Futures*, February 1977, pp, 17-31.
13. Hester, A. 2006. Olive growers “wrap up” and begin plans for 2006. *Olive Growers Council Newsletter* February 2006:1.
14. Hsu, C., and B. A. Sandford. 2007. The Delphi Technique: Making Sense of Consensus Practical assessment. *Research & Evaluation* 12 (10): 1-8.
15. Kermani, A. M., and M. Pilehforoush. 2011. Evaluating the performance of olive harvesting machinery for oil cultivars. *First Conference on Mechanization and Modern Technologies in Agriculture*, February 2011, Khuzestan, Ahvaz, pp, 17. (In Farsi).
16. Ludwig, B. 1997. Predicting the future: Have you considered using the Delphi methodology? *Journal of Extension* 35 (5): 1-4. Retrieved November 6, 2005 from <http://www.joe.org/joe/1997october/tt2.html>
17. Mohammadi Torkashvand, A., M. S. Allahyari, and Z. Daghighi Masuleh. 2014. Identifying indicators of environmentally sustainable agriculture in paddy fields of Guilan province. *International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD)* 4 (1): 73-79.
18. Olaoye, J. O., and A.O. Rotimi. 2010. Measurement of Agricultural Mechanization Index and Analysis of Agricultural Productivity of some Farm Settlements in South West, Nigeria. *Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal* 12 (1): 125-134. Retrieved from <http://www.cigrjournal.org>.
19. Ou, Y., D. Yang, P. Yu, Y. Wang, B. Li, and Y. Zhang. 2002. Experience and Analysis on Sugarcane Mechanization at a state farm in China. 2002 ASAE Annual International Meeting/ CIGR 15th World Congress Sponsored by ASAE CIGR, Hyatt Regency Chicago, Illinois, USA July 28-31.
20. Paschino, F., and R. Mura. 1997. Razionalizzazione della struttura della pianta di olivo per il miglioramento della resa di raccolta con scuotitrici da tronco. *Atti del Convegno AIIA, Ancona*.
21. Rezadoust, H. 2011. Factors affecting the failure of the tea industry in Guilan province. MSc thesis, Islamic Azad University, Abhar Branch, College of Agriculture, Department of Agricultural management, Abhar, Iran, p, 88. (In Farsi).
22. Shahbazi, I. 1989. *Agriculture Advancement: The Requirements of Change and Renewal of Agriculture*. [Translation.] Publication of Agriculture Dissemination Organization, Tehran, Iran. pp: 22-35. (In Farsi).
23. Shahraki, J., A. Shahrakizad, M. Yaghoubi, and M. Esfandiari. 2012. A Survey on the Level of Mechanization Development in Sistan and Baluchestan, Iran. *Journal of Applied Sciences Research* 8 (4): 2267-2271.
24. Tabatabaei, M. 1995. *Olives and its oil*. 4th Edition, published by the Fund of Development Studies of olive cultivation, pp, 286. (In Farsi).
25. Tombesi, A., M. Boco, M. Pili, and D. Farinelli. 2002. Influence of canopy density on efficiency of trunk shaker olive mechanical harvesting. *Acta Horticulturae* 586: 291-294.
26. Visco, T., M. Molfese, M. Cipolletti, R. Corradetti, and A. Tombesi. 2004 - Influence of training system, variety, and fruit ripening on efficiency of mechanical harvesting of young olive trees in Abruzzo, Italy. - Fifth International Symposium on Olive Growing, Izmir, Turkey, September 27-October 2 Abstract, CM 28.
27. Wissema, J. 1982. Trends in technology forecasting. *R&D Management* 12 (1): 27-36.
28. Witkin, B. R., and J. W. Altschuld. 1995. *Planning and conducting needs assessment: A practical guide*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc.
29. Yousefi, Z. 2013. Assessment of different table olive harvesting methods. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences* 3 (12): 1016-1020.
30. Yousefi, Z., F. Nayyeri, and M. Mohammad-Salehi. 2014. Harvesting two canned olive cultivars with tractor branch shaker. 8th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Mashhad, Iran, January 2014, pp: 3542-3550. (In Farsi).
31. Zehtab Naebi, R., S. Firouzi, and M. R. Ebrahimzadeh. 2015. Promoters and deterrents of developing mechanization of peanut cultivation in north of Iran. *International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD)* 5 (1): 1-8.
32. Ziglio, E. 1996. The Delphi method and its contribution to decision-making. In M. Adler & E. Ziglio (Eds.), *Gazing into the oracle: The Delphi and its application to social policy and public health*. London, England: Jessica Kingsley.

Analysis of factors affecting the mechanical olive harvesting in Guilan province

H. Abedi¹ - S. Firouzi^{2*} - M. S. Allahyari³

Received: 04-07-2015

Accepted: 04-10-2015

Introduction

Olive is one of the most valuable worldwide trees that produces useful products having high nutritional values. It is widely grown in many parts of world. The cost of olives hand picking is estimated to be about two-thirds of the total gross return of olive production. Therefore, various types of olive harvesting machineries were developed in the world.

Guilan Province of Iran is one of the leading regions for olives production in Iran. At the present time, almost all olives produced in Guilan province of Iran are manually harvested. Review of the reports showed that no research was performed to study the factors affecting the development of mechanized olive picking in Guilan Province, Iran. Due to the complexity of using the olive harvest machineries, identifying the factors affecting of their application is essential. Therefore, a Delphi study were conducted to identify and analysis the drivers and barriers for mechanized olive harvest in Guilan province, Iran.

Materials and Methods

This research was conducted using the Delphi technique in Guilan Province, Northern Iran. Delphi technique is a structured process to gather and classify the knowledge of a group of experts. Through consultation with professors and researchers in related institutions, 22 experts from the subsidiary offices of agricultural organization of Guilan Province were selected for the study. In the first round of the study, the participants were asked to answer to two open questions about the driving factors and barriers of mechanical olive harvest in Guilan Province. Nineteen items were found as driving factors and seventeen as barriers for developing the mechanical olive harvesting in Guilan Province. In the second phase of the study, the respondents were asked to answer to the all items written in the form of a five-level Likert scale, and finally, experts of panel were asked to answer to the top 10 items of driving factors and barriers in percent form. The results were analyzed using SPSS computer software and arranged in various tables.

Results and Discussion

Based on the findings of last phase of the Delphi study, 'modification of olive groves and applying the technical fundamentals to the orchards', agreed upon by 98.15% of the participants, was identified as the first driving priority to mechanize the olive harvest in Guilan Province. In this regard, pruning olive trees is the first modification practice which should be applied to the old olive groves of the region. Olive cultivar is the other parameter affecting on the performance of olive harvest machinery. Therefore, this parameter also must be considered in construction of new groves or renovate the old olive gardens.

'Special support for related researches to construct and optimize the olive harvesting machinery' was also as the second driving factor to develop mechanized olive harvesting in Guilan Province. In this regard, design and fabricate the new machinery based on the local conditions is a matter of great importance.

The findings of last phase of the Delphi study also indicated that 'the slope of most olive growing plots', agreed upon by 95.62% of the respondents was identified as the first barrier for mechanical olive harvesting in Guilan Province. Thus, research on all the technical aspects of hand-held harvesting machines, including hand-held shakers should take priority.

Lack or shortcoming of planning for the development of the olive harvest mechanization was also as the second barrier to develop mechanized olive harvesting in Guilan Province. Therefore, codifying a regional macro-plan to develop mechanized olive harvesting in Guilan Province must be considered among the important

1- Former M.Sc. student of Department of Agricultural Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

2- Associate Professor, Department of Agronomy, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

3- Associate Professor, Department of Agricultural Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

(* - Corresponding Author Email: firoozi@iaurasht.ac.ir)

programs of Guilan's Agricultural Organization, Iran.

Conclusions

The results of this study showed that many factors affect the mechanical harvesting of olives in Guilan province which modification of olive groves, special support for related researches to construct and optimize the olive harvesting machinery are among the most important driving factors. Therefore, to develop the mechanical olive harvester, developing the applied strategies to support the olive growers, modification of foreign machinery, and design and fabricate of new olives harvest machinery are essential in Guilan province, Iran.

Keywords: Agricultural mechanization, Barriers, Delphi, Drivers, Olives

ارزیابی عوامل فنی سم‌پاش توربینی زراعی بر کیفیت پاشش و قطر قطرات با پردازش تصویر

فائزه بهزادی پور^۱ - محمود قاسمی نژاد رایینی^{۲*} - محمدامین آسودار^۳ - افشین مرزبان^۴ - سامان آبدانان مهدی زاده^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲

چکیده

امروزه، اهمیت کیفیت سم‌پاشی در سم‌پاش‌ها و بهره‌مندی بیشتر از دستگاه سم‌پاش و سم مصرفی مهمترین مسئله پیش‌روی کاربران و سازندگان سم‌پاش‌ها است. بنابراین آزمایشی با سم‌پاش توربینی زراعی (توربولاینر) مدل توربینا اس.ای. ۸۰۰ به صورت آزمایش فاکتوریل با سه فاکتور در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل فشار سم‌پاشی با سه سطح ۱۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰ کیلوپاسکال، دور پروانه با دو سطح ۱۹۹۸ و ۲۴۳۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی با دو سطح ۹ و ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت بودند. آنالیز تصاویر با نرم‌افزارهای ImageJ و MATLAB R2015a انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش فشار، قطر حجمی ۵۰ درصد، قطر میانه عددی و شاخص کیفیت پاشش دارای روندی کاهشی بودند و افزایش دور پروانه و سرعت پیشروی موجب کاهش قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی شد. در ترکیب تیمارها، افزایش فشار و دور پروانه، باعث کاهش ۷۲، ۶۹ و ۴۶ درصد به ترتیب در قطر حجمی ۵۰ درصد، قطر میانه عددی و شاخص کیفیت پاشش شد. با توجه به اهمیت شاخص کیفیت پاشش در این آزمایش، بیشترین میزان این شاخص (۲/۹۱) در حالتی رخ داد که دستگاه با فشار ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، دور پروانه ۲۴۳۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۹ کیلومتر بر ساعت تنظیم شده بود.

واژه‌های کلیدی: بادبردگی، پردازش تصویر، سم‌پاش توربولاینر، قطر حجمی، یکنواختی پاشش

مقدمه

پژوهش‌ها و اقداماتی با توجه به عوامل مؤثر بر آن صورت گرفته است. مقدار مایع سم پاشیده شده با تغییر سرعت پیشروی هنگام سم‌پاشی تغییر می‌کند. بر این اساس پژوهش‌ها نشان دادند که سرعت پیشروی بر یکنواختی پاشش (قطر میانه حجمی / قطر میانه عددی) در سم‌پاش توربولاینر در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده و مناسب‌ترین میزان یکنواختی پاشش (۹/۳۹۴) مربوط به بیشترین سرعت پیشروی یعنی ۸/۱۲ کیلومتر در ساعت و کمترین میزان (۱۶/۳۴) مربوط به سرعت پیشروی ۵/۲ کیلومتر در ساعت بود (Naseri et al. 2007).

نتایج به دست آمده از پژوهش‌ها حاکی از آن است که فشار سم‌پاشی در سم‌پاش توربولاینر^۶ از نظر آماری بر میزان یکنواختی پاشش اثر معنی‌داری نداشته است، هرچند که باز هم کمترین فشار (۱۵ بار)، بیشترین یکنواختی پاشش (و بیشترین قطر حجمی ۵۰ و ۹۰ درصد) را به میزان ۱۰/۷۴ به همراه داشته است (Naseri et al. 2007) اما در پژوهشی دیگر با بررسی یکنواختی پاشش در سه سطح فشار ۳، ۴ و ۵ بار، به مقادیری برای یکنواختی پاشش با میانگین به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۸۳۸ و ۰/۸۴۷ دست یافتند که نشان دادند با افزایش فشار، ذرات سم پاشیده شده (قطر قطرات) یکنواخت‌تر

امروزه توجه به مسائل ایمنی و زیست محیطی در تمام بخش‌های کشاورزی، صنعتی و خدماتی کشورهای مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. در بخش کشاورزی با وجود تلاش‌های فراوان برای یافتن روش‌های جایگزین، سالانه میلیون‌ها لیتر ماده سمی برای کنترل آفات و علف‌های هرز مزارع مصرف می‌شود. پدیده بادبردگی، یکی از چالش برانگیزترین مساله فراروی کاربران در سم‌پاشی و سازندگان سم‌پاش‌ها می‌باشد که برای کاهش و کنترل این پدیده،

- ۱- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
- ۲- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
(* نویسنده مسئول: Email: ghasemi.n.m@ramin.ac.ir)
- ۳- استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
- ۴- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
- ۵- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان

به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت پاشش ذرات سم، تحقیقی در دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، در شمال شرقی اهواز در سال زراعی ۱۳۹۳ انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل با سه فاکتور و سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی بود. عامل اول فشار سم‌پاشی با سه سطح (۱۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰ کیلوپاسکال)، عامل دوم سرعت پروانه با دو سطح (۱۹۹۸ و ۲۴۳۰ دور در دقیقه) و عامل سوم سرعت پیشروی با دو سطح (۹ و ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت) اعمال شدند. جهت اجرای طرح از سم‌پاش توربینی زراعی (توربولاینر) ساخت ایتالیا که به تراکتور جان‌دیر ۳۱۴۰ متصل شد، استفاده گردید. این طرح مطابق با تقویم زراعی سم‌پاشی محصول کلزا، در شرایط مزرعه و در هوای آرام با ثبت سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای هوا اجرا شد. سرعت باد بین ۲/۵-۰ کیلومتر بر ساعت و دمای هوا بین ۱۸/۸ تا ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد با بادسنج و دماسنج ترموانیومومتر^۳ TAM 618 ساخت ژاپن و رطوبت نسبی هوا بین ۲۹/۷ تا ۳۲/۵ درصد با دستگاه رطوبت‌سنج ای‌پرسیژن^۴ مدل هار. هیگرومتر^۵ ثبت گردید.

پس از کالیبره کردن و تعیین میزان دبی خروجی سم‌پاش بر حسب لیتر بر هکتار در چندین مرحله و با دقت زیاد، با انجام آزمایش، شاخص کیفیت پاشش و قطر میانه حجمی ۵۰ درصد قطرات با استفاده از پردازش‌های تصویری، محاسبه و اندازه‌گیری شدند.

کارت‌های حساس به آب

از کارت‌های حساس به آب که آغشته به محلول برموفنل^۶ آبی بوده و به محض برخورد قطرات حاوی آب با سطح کاغذ، لکه‌هایی آبی رنگ در نتیجه یونیزه شدن رنگ اصلی به سطح کاغذ پدیدار می‌شود، استفاده شد (Nasari et al., 2007; Daneshjoo et al., 2009). کارت‌ها در هر تکرار تا شعاع پاشش دستگاه یعنی ۲۰ متر به تعداد ۱۱ عدد با فواصل ۲ متر قرار گرفتند. پس از اتمام هر بار سم‌پاشی، از این کارت‌ها توسط دوربین (مدل SX-170 Canon)، عکس‌برداری شد.

مطابق با استانداردها، تراکتور در فاصله ۲/۵ متری از اولین جعبه حاوی کارت که علامت‌گذاری شده بود، به صورت عمود بر ردیف جعبه‌ها و پاشش در جهت باد، حرکت کرد (Gil et al., 2013).

اندازه قطرات و شاخص کیفیت پاشش

برای ثبت و اندازه‌گیری تعداد و اندازه قطرات پاشیده شده، از

می‌شوند (Peyman et al. 2011). در تحقیقی، با بررسی تأثیر فشار بر مقادیر قطر میانه حجمی ۵۰ درصد برای نازل‌های هوا القایی (EZ11003) در فشار ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب مقادیر ۵۲۸، ۴۸۳ و ۴۲۴/۵ درصد به دست آمد، بدین معنی که مقادیر قطر میانه حجمی با افزایش فشار، کاهش می‌یابد (Czaczyk et al. 2012).

با افزایش فشار سم‌پاشی از ۱۵۰ تا ۴۵۰ کیلوپاسکال، کاهش اندازه قطرات را در نازل‌های بادبزی یکنواخت (XR11002) تقریباً از ۲۴۲ به ۱۷ میکرومتر و در نازل‌های توربو (TT11002) تقریباً از ۴۰۰ به ۲۳۰ میکرومتر به دست آوردند، که این میزان کاهش برای نازل‌های ونتوری^۱ (AI11005) با کاهش فشار از ۲۸۰ به ۸۰۰ کیلوپاسکال کاهش در اندازه قطرات را تقریباً از ۶۶۶ به ۳۸۳ میکرومتر نتیجه گرفتند (Dorr et al. 2013). مطابق نتایج پژوهشی با افزایش فشار از ۳ به ۴ بار، اندازه قطرات و قطر میانه حجمی به طور معنی‌داری کاهش یافت، ولی با افزایش فشار از ۲ به ۳ بار، اندازه قطرات و قطر میانه حجمی افزایش یافت بدین صورت که قطر میانه حجمی DV0.1، DV0.5 و DV0.9 برای فشار ۲ بار به ترتیب برابر ۱۳۱/۲، ۲۶۵/۴ و ۳۹۹/۳ میکرومتر، برای فشار ۳ بار برابر ۱۴۴/۱، ۲۷۳/۶ و ۴۲۱/۹ میکرومتر و برای فشار ۴ بار برابر ۱۱۷/۵، ۲۴۶/۵ و ۴۲۶ میکرومتر بود (Nuyttens et al., 2009).

محققان با بررسی اثر سرعت پروانه بر میزان پوشش سم روی گیاهان و اندازه قطرات، نتیجه گرفتند که با کاهش سرعت فن از ۲۰۷۶ دور در دقیقه به ۱۵۵۷ دور در دقیقه، قطر میانه حجمی قطرات از ۳۶۰ میکرومتر به ۴۶۰ میکرومتر افزایش می‌یابد، و نیز میزان پوشش سم در دورترین نقطه بادبردگی که در فاصله ۲۴/۴ متری بود، از ۱۰/۱ درصد به ۰/۰۴ درصد کاهش یافت (Landers and Farooq 2004).

تعداد سم‌پاش‌های توربینی زراعی در کشور به ۲۳۰۳ می‌رسد و با توجه به اینکه کاربرد این سم‌پاش‌ها در مزارع در حال افزایش است، لذا این پژوهش در رابطه با بررسی شاخص کیفیتی و قطر قطرات جهت بهبود کیفیت کار در این نوع سم‌پاش‌ها انجام شد. به‌منظور تعیین شاخص کیفیت پاشش، تعداد و اندازه قطرات در زمان سم‌پاشی، از رنگ تارترازین^۲ زرد رنگ با کد ای ۱۰۲ که در مخزن سم‌پاش به صورت محلول با آب ریخته شد استفاده گردید. این رنگ، نوعی رنگ خوراکی است که به میزان ۵-۶ گرم بر لیتر در آب حل گردید (Balsari et al., 2007; Balsari et al., 2014; Gil et al., 2012; Gil et al., 2013 and Gil et al., 2015).

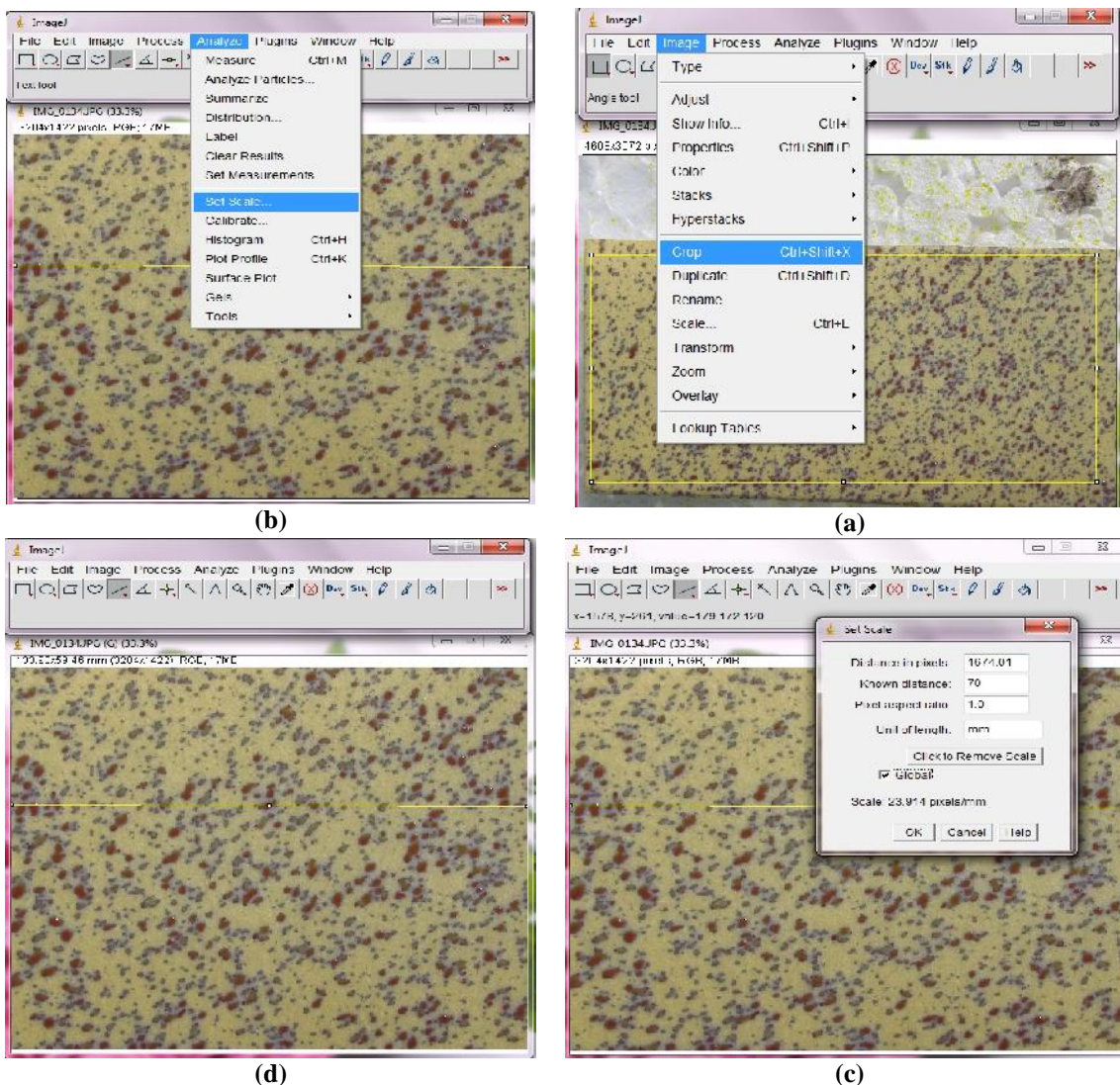
مواد و روش‌ها

- 3- Thermo anemometer
- 4- A precision
- 5- Haar hygrometer
- 6- Bromophenol

- 1- Venturi
- 2- Tartrazine

گرفت و قسمت مورد نظر از کارت، برش داده شد. در مرحله دوم (c) و (b) جهت مقیاس‌بندی تصویر برش زده شده و محاسبه طول تصویر بر حسب میلی‌متر، از قسمت آنالیز و تنظیمات مقیاس، طول کارت و واحد مقیاس‌بندی ثبت گردید، سپس در تصویر (شکل d) طول قسمت برش داده شده بر حسب میلی‌متر نشان داده شد.

کارت‌های حساس به آب استفاده شد (Douzals *et al.*, 2010; Gil *et al.*, 2013; Wolf *et al.*, 1993). پس از اجرای هر تکرار سریعاً از هر کارت عکس‌برداری شد، سپس قسمتی از کارت‌ها با نرم افزار ImageJ (Purhadjy and Mazaheri tehrani, 2013) برش زده شد. مراحل برش تصاویر در این نرم افزار در شکل ۱ به ترتیب نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱، ابتدا تصویر کارت در نرم افزار قرار

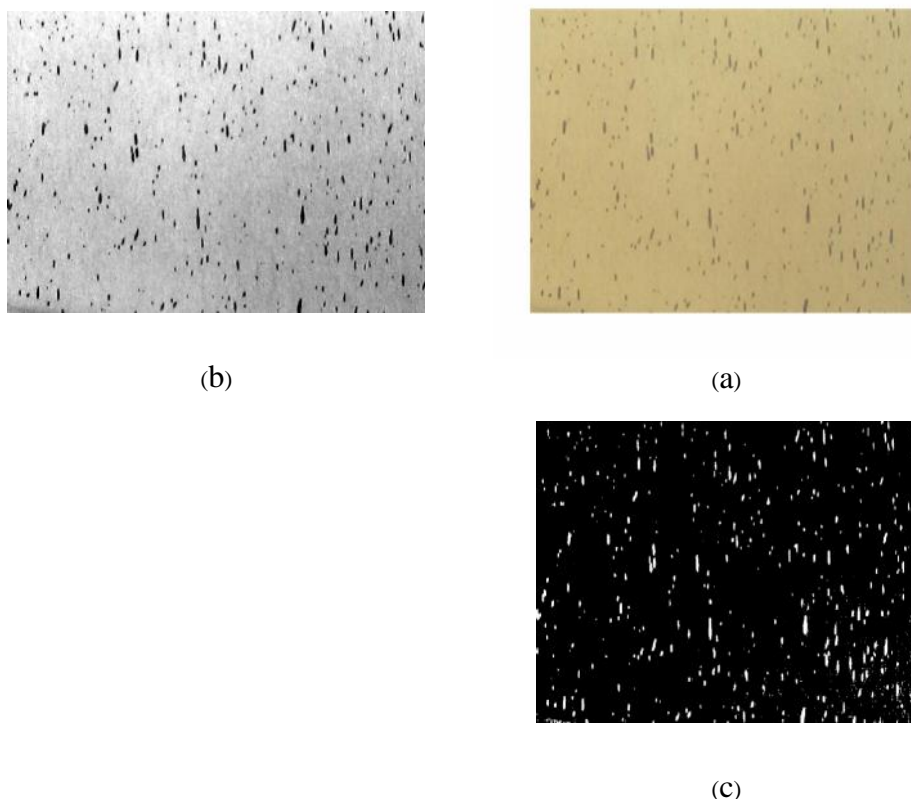


شکل ۱- مراحل کار با نرم افزار ImageJ (a) برش تصویر کارت حساس به آب (b) انتخاب طول تصویر جهت مقیاس‌بندی (c) تعیین مقیاس و واحد بر حسب میلی‌متر (d) نمایش طول تصویر بر حسب میلی‌متر متناسب با مقیاس ثبت شده

Fig.1. Process in Image J software (a) Cutting the water sensitive paper (b) Selecting the image for scaling (c) Determining the scale in mm (d) Displaying the picture (in mm) according to the scale

رنگی به خاکستری تبدیل یافتند و هیستوگرام تصاویر گسترش یافت (شکل b2). در مرحله بعد، تصاویر با روش Otsu (Otsu, 1979) به تصاویر باینری تبدیل (شکل c2) و ذرات درون هر تصویر برچسب زده و پارامترهای مورد نظر از درون آن‌ها استخراج گردیدند.

تصاویر برش داده شده با نرم افزار (2015a) MATLAB در دو مرحله جهت تعیین پارامترهای مورد نیاز، بررسی گردید (شکل ۲). ابتدا تصویر برش داده شده در نرم افزار (2015a) MATLAB قرار گرفت (شکل a)، سپس به منظور تعیین ابعاد قطرات، تصاویر از حالت



شکل ۲- مراحل کار با نرم افزار MATLAB 2015a (a) تصویر کارت حساس به آب برش داده شده (b) تبدیل تصویر رنگی به خاکستری و گسترش هیستوگرام (c) تصویر باینری شده با روش Otsu

Fig.2. Process in MATLAB software (a) cutted water sensitive paper (b) Converting the color image to gray and histogram expansion (c) Binary image using Otsu

نتایج تجزیه واریانس مربوط به بررسی فاکتورهای فشار سم‌پاشی، سرعت پیشروی و دور پروانه بر قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی و شاخص کیفیت پاشش در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج مربوط به مقایسه میانگین اثر فشار سم‌پاشی بر قطر میانه حجمی ۵۰ درصد، قطر میانه عددی و شاخص کیفیت پاشش در شکل ۳ نشان داده شده است.

با کاهش فشار سم‌پاشی از ۳۵۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، قطر میانه حجمی ۵۰٪ از ۰/۲۴ به ۰/۵۵ میلی‌متر و قطر میانه عددی از ۰/۱۱ به ۰/۲۷ میلی‌متر افزایش یافت. کاهش فشار سم‌پاشی باعث افزایش قطر و نیز افزایش حجم قطرات گردید که متناسب با افزایش حجم، افزایش قطر حجمی و قطر میانه عددی نتیجه شد. اگرچه افزایش فشار سم‌پاشی منجر به کاهش هر دو شاخص قطر میانه حجمی و عددی قطرات گردید، اما طبق رابطه شاخص کیفیت پاشش با این دو فاکتور، در مجموع اثر کاهش قطر میانه حجمی نیز بیشتر بوده که کاهش شاخص کیفیت پاشش را نتیجه داد. بنابراین با

نتایج به دست آمده از برنامه (2015a) MATLAB با نرم افزار آماری SAS 9.2 آنالیز و نتایج در اکسل^۱ ثبت و فرمول‌بندی شدند. هرچه شاخص کیفیت پاشش به عدد یک نزدیکتر باشد، کیفیت پاشش بهتر است، به عبارت دیگر در بهترین شرایط، قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی برابر است که البته رسیدن به آن در عمل غیر ممکن خواهد بود. پس از پردازش تصویرها توسط نرم‌افزار MATLAB، شاخص کیفیت پاشش با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Safari et al., 2009):

$$(۱) \quad \text{شاخص کیفیت پاشش} = \text{VMD/NMD}$$

VMD: قطر میانه حجمی (میلی‌متر)
NMD: قطر میانه عددی (میلی‌متر)

نتایج و بحث

آوردند (افزایش فشار باعث کاهش قطر میانه حجمی قطرات می‌شود)، هم‌خوانی دارد.

نتایج مقایسه میانگین اثر دور پروانه بر قطر میانه حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی قطرات در شکل ۴ نشان داده است.

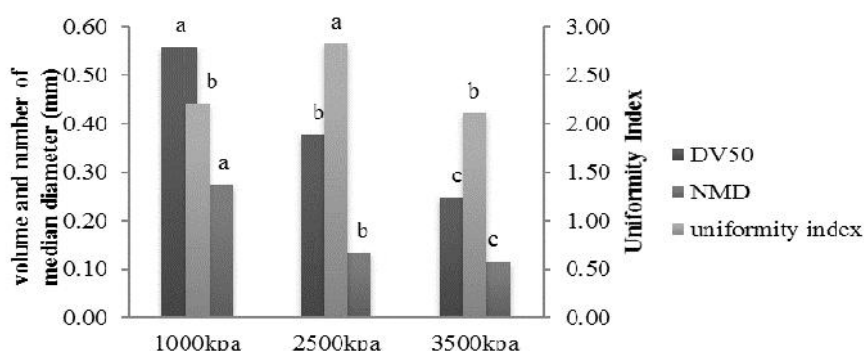
افزایش فشار سم‌پاشی، قطر قطرات و در نتیجه شاخص کیفیتی پاشش کاهش یافت. شکل ۳ نشان داد که با افزایش فشار از ۲۵۰۰ به ۳۵۰۰ کیلوپاسکال، شاخص کیفیت پاشش ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از پژوهش‌های Czaczyk *et al.* (2012); Peyman *et al.* (2011); Nuyttens *et al.* (2009) که رابطه معکوسی بین فشار سم‌پاشی و قطر قطرات به‌دست

جدول ۱ - تجزیه واریانس اثر سرعت پیشروی، فشار سم‌پاشی و دور پروانه بر شاخص کیفیت پاشش، قطر میانه حجمی و عددی

Table 1- Analysis of variance of the effect of forward speed, spray pressure and fan speed on spray quality index, volume median diameter (VMD) and number median diameter (NMD)

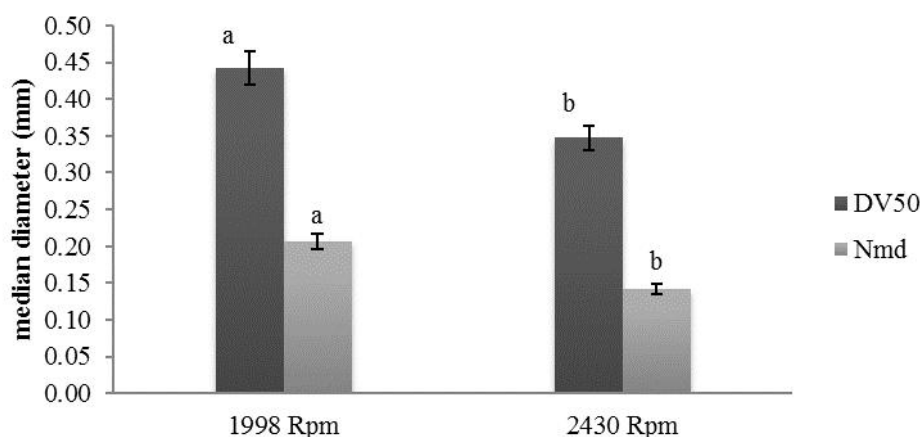
منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی (df)	شاخص کیفیت پاشش Spray quality spray	میانگین مربعات	
			قطر میانه حجمی ۵۰٪ (DV50) Volume median diameter (mm)	قطر میانه عددی (NMD) Number median diameter (mm)
فشار (P) Pressure	2	1.87**	0.292**	0.091**
سرعت پروانه (F) Fan speed	1	0.021 ^{n.s}	0.081**	0.037**
سرعت پیشروی (V) Forward speed	1	0.033 ^{n.s}	0.027**	0.006**
اثر متقابل (P×F) Interaction	2	3.44**	0.012*	0.027**
اثر متقابل (P×V) Interaction	2	0.45*	0.003 ^{n.s}	0.003**
اثر متقابل (F×V) Interaction	1	0.16 ^{n.s}	0.004 ^{n.s}	0.00005 ^{n.s}
اثر متقابل (P×F×V) Interaction	2	0.35 ^{n.s}	0.002 ^{n.s}	0.001*
خطا error	24	0.12	0.003	0.00004
ضریب تغییرات % CV%	-	15	14.6	3.9

*, **, n.s به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵٪، ۱٪ و غیر معنی‌دار
*, **, and n.s means significant at 5%, 1% and not significant



شکل ۳ - مقایسه میانگین اثر فشار سم‌پاشی بر قطر میانه حجمی ۵۰٪، قطر میانه عددی و شاخص کیفیت پاشش

Fig. 3. Mean comparison of the effect of the pressure on the volume median diameter (50%), number median diameter and spray quality index



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر دور پروانه بر قطر میانه حجمی ۵۰٪ و قطر میانه عددی

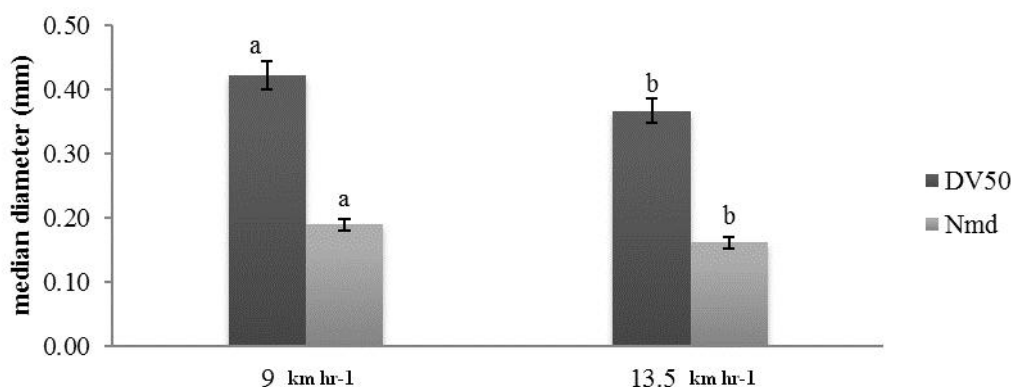
Fig. 4. Mean comparison of the effect of fan speed on the volume median diameter (50%) and number median diameter

مطابق با نتایج ارائه شده در این پژوهش با کاهش دور پروانه از ۲۰۷۶ دور در دقیقه به ۱۵۵۷ دور در دقیقه، قطر میانه حجمی قطرات از ۳۶۰ میکرومتر به ۴۶۰ میکرومتر افزایش می‌یابد، که با تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.

نتایج مقایسه میانگین اثر سرعت پیشروی بر قطر میانه حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی قطرات در شکل ۵ نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۴، با افزایش دور پروانه از ۱۹۹۸ به ۲۴۳۰ دور در دقیقه، قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی به ترتیب ۲۲ و ۳۰ درصد کاهش یافتند. با افزایش دور پروانه، هوای خروجی برای پودرسازی قطرات محلول افزایش یافت؛ بنابراین قطرات با قطر و نهایتاً حجم کوچکتر تولید شده که باعث کاهش قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی گردید.

در پژوهشی (Landers and Farooq 2004) به بررسی اثر دور پروانه بر میزان پوشش سم روی گیاهان و اندازه قطرات پرداختند.



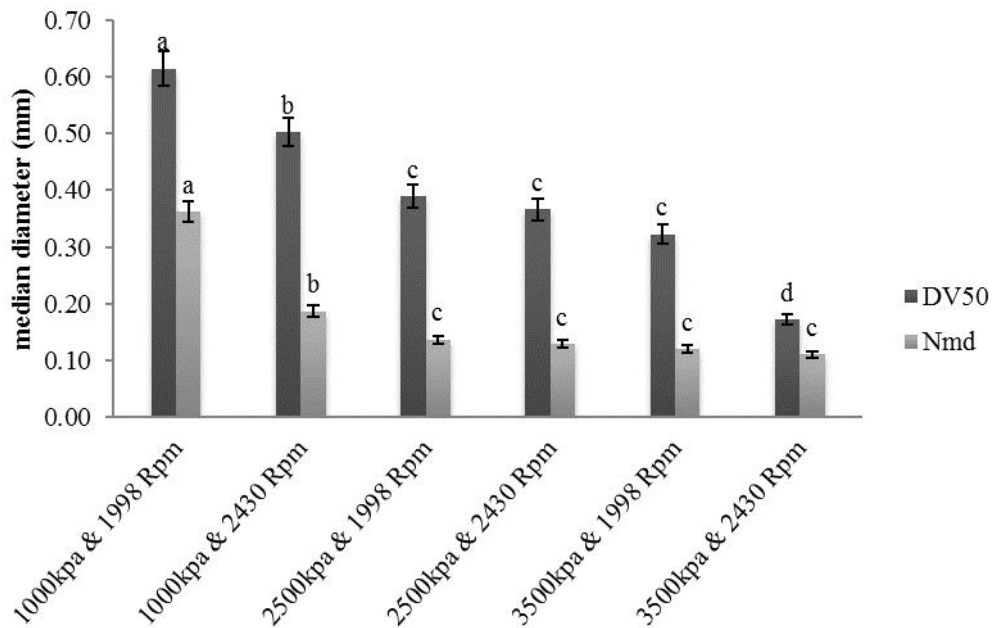
شکل ۵- مقایسه میانگین اثر سرعت پیشروی بر قطر میانه حجمی ۵۰٪ و قطر میانه عددی

Fig. 5. Mean comparison of the effect of forward speed on the volume median diameter (50%) and number median diameter

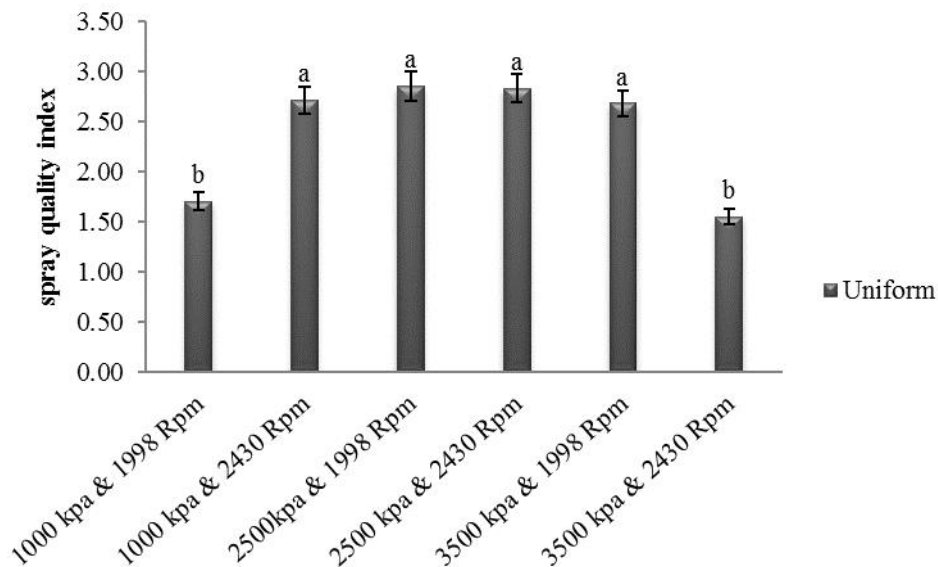
(2007) اثر افزایش سرعت پیشروی را در سم‌پاش توربولاینر بررسی کردند. مطابق با پژوهش صورت گرفته با افزایش سرعت در ۳ سطح ۲/۴۳، ۵/۲۰ و ۸/۱۲ کیلومتر بر ساعت، قطر میانه حجمی ۵۰ درصد قطرات به ترتیب ۴/۰۵، ۱/۷۵ و ۰/۹۸ میلی‌متر و قطر میانه عددی قطرات به ترتیب ۱/۲۶، ۰/۲۲ و ۰/۱ میلی‌متر نیز کاهش می‌یابد، که با

مطابق با شکل ۵، با افزایش سرعت پیشروی از ۹ به ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت، قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی قطرات به ترتیب ۱۴ و ۱۱ درصد کاهش یافت. متناسب با افزایش سرعت پیشروی، فشار هوا بر روی نازل‌ها بیشتر شد که باعث ریزتر شدن اندازه، قطر و حجم قطرات گردید. در پژوهشی Naseri et al.

نتایج حاضر هم‌خوانی دارد. بررسی نتایج مقایسات میانگین اثرات متقابل فشار سم‌پاشی و دور پروانه بر قطر میانه حجمی ۵۰٪ و قطر میانه عددی قطرات در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل فشار و دور پروانه بر قطر میانه حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی
Fig. 6. Mean comparison of the interaction of the pressure and fan speed on the volume median diameter (50%) and number median diameter



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل فشار و دور پروانه بر شاخص یکنواختی پاشش
Fig. 7. Mean comparison of the interaction of pressure and fan speed on the spray uniformity index

یافت. با افزایش فشار و دور پروانه، قطرات تحت تأثیر فشار و هوای بیشتری قرار گرفتند و قطرشان کوچکتر شد که با کاهش قطر، روند

نتایج نشان داد (شکل ۶) که با افزایش فشار سم‌پاشی و افزایش دور پروانه، قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی قطرات کاهش

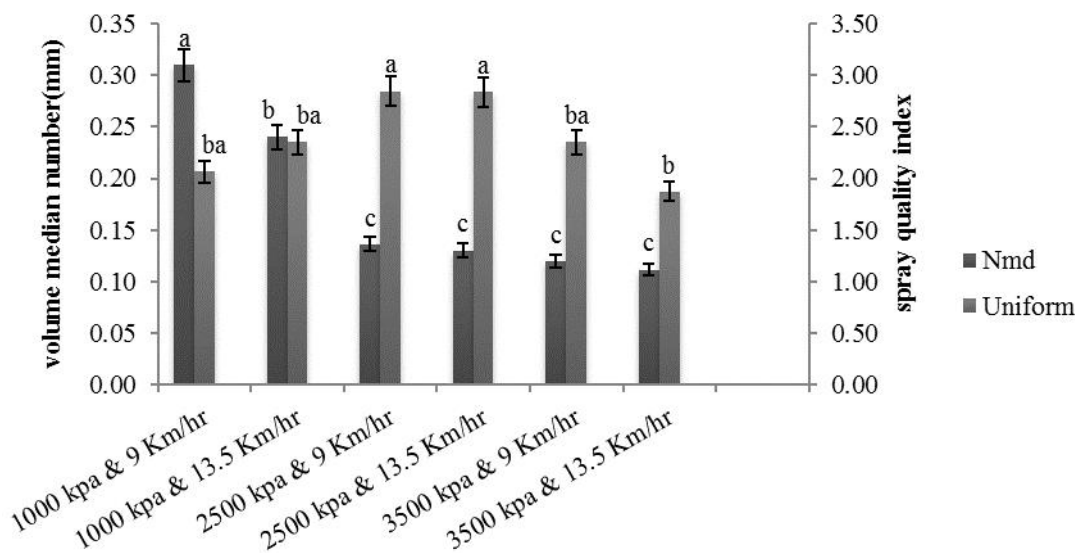
در فشار ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب مقادیر ۵۲۸، ۴۸۳ و ۴۲۴/۵ درصد به دست آوردند بدین معنی که مقادیر قطر میانه حجمی با افزایش فشار، کاهش می‌یابد. Peyman *et al.* (2011) بیشترین قطر میانه حجمی در فشار ۳ بار به مقدار ۵۴۶/۲۶۷ میکرون و کمترین آن در فشار ۵ بار به میزان ۳۹۲/۵۲۰ میکرون ثبت کردند که مشخص است در فشارهای بالاتر، اندازه قطرات ریزتر و در فشارهای پایین‌تر، ذراتی با اندازه بزرگ‌تر تولید می‌شوند. در پژوهشی دیگر از Nuytens *et al.* (2009)، گزارش گردید با افزایش فشار از ۳ به ۴ بار، اندازه قطرات و قطر میانه حجمی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد، بدین صورت که قطر میانه حجمی $D_{V0.1}$ ، $D_{V0.5}$ و $D_{V0.9}$ برای فشار ۳ بار برابر با ۱۴۴/۱، ۲۷۳/۶ و ۴۲۱/۹ میکرومتر و برای فشار ۴ بار برابر ۱۱۷/۵، ۲۴۶/۵ و ۴۲۶ میکرومتر بود. نتایج Landers and Farooq (2004)، در بررسی اثر دور پروانه بر میزان پوشش سم روی گیاهان و سایز قطرات، با کاهش دور پروانه از ۲۰۷۶ دور در دقیقه به ۱۵۵۷ دور در دقیقه، قطر میانه حجمی قطرات از ۳۶۰ میکرومتر به ۴۶۰ میکرومتر افزایش یافت؛ بنابراین با نتایج حاضر هم‌خوانی دارد.

مقایسات میانگین اثرات متقابل فشار سمپاشی و سرعت پیشروی در شکل ۸ نشان داده شده است.

کاهش در قطر حجمی و عددی مشاهده گردید. تیمار با فشار ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و دور پروانه ۱۹۹۸ دور در دقیقه با میانگین قطر حجمی ۵۰ درصد ۰/۶۱ و قطر میانه عددی ۰/۳۶ میلی‌متر و تیمار با فشار ۳۵ بار و دور پروانه ۲۴۳۰ دور در دقیقه با قطر حجمی ۵۰ درصد ۰/۱۷ و قطر میانه عددی ۰/۱۱ میلی‌متر، به ترتیب تیمارهای دارای بیشترین و کمترین قطر میانه حجمی و عددی بودند.

در شکل ۷ اثر متقابل فشار و دور پروانه بر شاخص کیفیت پاشش نشان داده است. انتظار می‌رود با توجه به روند افزایشی در قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی متناسب با کاهش در فشار سمپاشی (۳۵۰۰ به ۲۴۳۰ کیلوپاسکال) و کاهش دور پروانه (۲۴۳۰ به ۱۹۹۸ دور در دقیقه)، در مجموع میزان شاخص کیفیت پاشش افزایش یابد که این نتیجه در تیمارهای با فشار سمپاشی ۳۵۰۰ و ۲۵۰۰ کیلوپاسکال رخ داد. کاهش فشار و دور پروانه باعث کاهش فشار و هوای لازم برای ریزکردن قطرات شد بنابراین قطرات درشت‌تر و با قطر و حجم بزرگتری ایجاد گردید. تیمار با فشار ۲۵۰۰ کیلوپاسکال و دور پروانه ۱۹۹۸ دور در دقیقه با میانگین ۲/۸۵ و تیمار با فشار ۳۵۰۰ کیلوپاسکال و دور پروانه ۲۴۳۰ دور در دقیقه با ۱/۵۴ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین شاخص کیفیتی پاشش بودند.

با افزایش فشار و دور پروانه، قطر و حجم قطرات کاهش یافت. در پژوهشی Czaczyk *et al.* (2012) با بررسی تأثیر فشار بر مقادیر قطر میانه حجمی ۵۰ درصد برای نازل‌های هوا القایی (EZ11003)



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل فشار و سرعت پیشروی بر قطر میانه عددی و شاخص یکنواختی پاشش

Fig.8. Mean comparison of the interaction of pressure and forward speed on the number median diameter and spray quality index

در نتیجه کاهش قطر حجمی و میانه عددی گردید. تیمار با فشار ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و سرعت ۹ کیلومتر بر ساعت با ۰/۳ میلی‌متر قطر

با توجه به شکل ۸ با افزایش فشار و سرعت پیشروی، فشار هوا بر روی نازل‌ها بیشتر شد که باعث ریزتر شدن اندازه و قطر قطرات و

نتیجه گیری

مطابق با نتایج، با افزایش فشار سم‌پاشی و دور پروانه، قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی قطرات به ترتیب حدود ۷۲٪ و ۶۹٪ کاهش یافتند؛ همچنین کاهش قطر قطرات، باعث کاهش ۴۶٪ در شاخص کیفیتی پاشش شد. از سویی دیگر با افزایش فشار سم‌پاشی و سرعت پیشروی و به دنبال آن کاهش در قطر قطرات، ۶۳٪ کاهش در قطر میانه عددی به دست آمد. با کوچک شدن قطر قطرات، در شاخص کیفیت پاشش نیز حدود ۲۵٪ کاهش مشاهده گردید. بنابراین، ارتباط متقابل بین نتایج کلی این تحقیق را چنین می‌توان بیان نمود که با افزایش فشار سم‌پاشی، دور پروانه و سرعت پیشروی، اندازه قطر قطرات روندی کاهشی را طی کردند که کاهش قطر حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی را در پی داشت؛ متناسب با کاهش قطر و حجم قطرات، شاخص کیفیتی پاشش نیز روندی کاهشی داشت. در فشار ۳۵۰۰ کیلوپاسکال، دور پروانه ۲۴۳۰ و سرعت پیشروی ۹ کیلومتر بر ساعت، شاخص کیفیت پاشش در بهترین حالت (نزدیک به عدد ۱) با ۱/۰۳ نتیجه شد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان که بخشی از هزینه این تحقیق را تأمین نمودند تشکر می‌گردد.

میانه عددی و تیمار با فشار ۳۵۰۰ کیلوپاسکال و سرعت ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت با ۰/۱ میلی‌متر قطر میانه عددی به ترتیب تیمارهای با بیشترین و کمترین قطر میانه عددی بودند.

مطابق با شکل ۸ انتظار می‌رود با توجه به روند افزایشی قطر میانه حجمی ۵۰ درصد و قطر میانه عددی متناسب با کاهش در فشار سم‌پاشی از ۳۵ به ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و کاهش در سرعت پیشروی از ۱۳/۵ به ۹ کیلومتر بر ساعت، در مجموع شاخص کیفیت پاشش روندی افزایشی بین تیمارها داشته باشد که چنین روندی در تیمارهای با فشار ۳۵۰۰ و ۲۵۰۰ کیلوپاسکال مشاهده گردید. با افزایش فشار سم‌پاشی از ۲۵۰۰ به ۳۵۰۰ کیلوپاسکال و افزایش سرعت پیشروی از ۹ به ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت شاخص کیفیت پاشش به عدد ۱ که بهترین حالت برای کیفیت پاشش است، نزدیک تر شد. بنابراین تیمار با فشار ۳۵۰۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت با میانگین ۱/۸ و تیمار با فشار ۲۵۰۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۹ کیلومتر بر ساعت با میانگین ۲/۸۴ به ترتیب تیمارهای دارای بیشترین و کمترین شاخص کیفیت پاشش بودند.

با افزایش فشار و سرعت پیشروی، قطر و حجم قطرات کاهش یافت که با نتایج پژوهش‌های (Dorr et al. و Naseri et al. (2007) در یک راستا می‌باشد.

کاهش فشار و سرعت پیشروی موجب افزایش شاخص کیفیت پاشش گردید که با نتایج پژوهش‌های (Naseri et al. (2007 هم‌خوانی دارد.

References

- Balsari, P., E. Gil, P. Marucco, M. Gallart, C. Bozzer, C. Llop, and M. Tamagnone. 2014. Study and development of a test methodology to assess potential drift generated by air- assisted sprayers. DiSAFA Crop protection Technology (Italy) and Politechnic University of Catalonia – DEAB (Spain): 9.
- Balsari, P., P. Marucco, and M. Tamagnone. 2007. A test bench for the classification of boom sprayers according to drift risk. *Crop protection*. 26: 1482-1489.
- Czaczyk, Z., G. Kruger, and A. Hewitt. 2012. Droplet size classification of air induction flat fan nozzles. *Journal of plant protection research* 52 (4): 415-420.
- Daneshjoo, M. A., M. H. Abbaspour-Fard, M. H. Aghkhani, and M. Ariyan. 2009. Software design and evaluation of appropriate Mass Density Measurement and droplet size in Sprayer. *Journal of Plant Protection (Agricultural Science and Technology)*. University of Mashhad. 22 (2): 171- 181. (In Farsi).
- Dorr, G. J., A. J. Hewitt, S. W. Adkins, J. Hanan, H. Zhang, and B. Noller. 2013. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. *Crop production* 53: 109-117.
- Douzals, J. P., C. Sinfort, and E. Cotteux. 2010. Spraying quality assessment of a mist blower used on banana crops. *International conference on agricultural engineering- Agricultural Engineering*: 1-11.
- Gil, E., P. Balsari, M. Gallart, J. Liorens, P. Marucco, P. G. Andersen, X. Fabregas, and J. Liop. 2015. Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom sprayer using a test bench. *Crop protection* 56: 58-68.
- Gil, E., M. Gallart, J. Llorens, and J. Llop. 2012. Determination of Drift Potential Value (DPV) for different flat fan nozzles using a horizontal drift test bench. *Department of agro food engineering and biotechnology* 8: 6.

9. Gil, E., J. Llorens, J. Llop, X. Fabregas, and M. Gallart. 2013. Use of a terrestrial lidar sensor for drift detection in vineyard spraying. *Sensors*. 13: 516- 534.
10. Landers, A. and M. Farooq. 2004. *Reducing Drift and Improving Deposition in Orchards*. Cornell University, NYSAES, Geneva, NY 14456, USA: 380- 384.
11. Naseri, M., M. H. Abbaspour-Fard, H. Chaji, and A. Heidarzade. 2007. Effect of nozzle orifice diameter, pressure pump and forward speed tractor on the uniformity spraying in Turbo liner sprayer. The fifth national congress of agricultural machinery and mechanization of Ferdowsi university of Mashhad: 9. (In Farsi).
12. Nuyttens, D., P. De Schampheleire Verboven, E. Brusselman, and D. Dekeyser. 2009. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. *American society of agricultural and biological engineers (ASABE)*. 52 (5): 1471-1480.
13. Otsu, N. 1979. A threshold selection method from grey level histograms. *Ieee transactions on systems, man and cybernetics*. 9 (1): 62-66.
14. Peyman, L., Sh. A. Abdollahpour, B. Rana Bonab, M. Moghadam, and A. Mahmoudi. 2011. Evaluation of factors affecting on the uniform droplet size using standard cv. *First National Congress of Science and New Technologies (the of Plant Protection) at Zanjan University*: 4. (In Farsi).
15. Purhaji, F., and M. Mazaheri Tehrani. 2013. Study of image processing with the ImageJ software at the formulation sesame cream with soybean flour. *Twenty-first National Congress of Food Science and Technology, University of Shiraz*: 4. (In Farsi).
16. Safari, M., F. Amirshaghghi, N. Loveymi, and H. Chagi. 2009. Assessment of common sprayer used in wheat fields. *Karaj Agricultural Engineering Research Institute Publications* 10 (4): 1-12. (In Farsi).
17. Wolf, T. E., R. Graver, K. Wallace, S. R. Shewchuk, and J. Maybank. 1993. Effect of protective shields on drift and deposition characteristics of field sprayers. *Canadian journal of plant science* 73: 1261-1993.

Study of the operational parameters of crops turbine sprayer (turbo liner) on spray quality and diameter of droplets, using image processing

F. Behzadi Pour¹- M. Ghasemi Nejad Raeni^{2*}- M. A. Asoodar³- A. Marzban⁴- S. Abdanan Mehdizadeh⁵

Received: 07-07-2015

Accepted: 13-12-2015

Introduction

Today, attention to safety and environmental issues in all sectors in agriculture, industry and services is very important. Chemical poisons play an important role in rapid progress of agricultural products. Every year about 25 to 35 percent of the world's crops are affected by insects, weeds and plant pathogens disappear and this figure would be raised to 80% if no control was applied. Drift problem and its devastating effects are the most important issue which related to users and sprayers manufacturers. Spray drift reduction and improvements in the efficiency of pesticide application processes are global goals. Where ever spraying is applied, drift will be produced and it must be controlled by controlled of the droplet size. The application of these sprayers is the high in the farms (the number of 2303 in Iran). So, this research was carried out to improve the quality of work in these sprayers by studying the droplets diameter and the spray quality index.

Materials and Methods

The research was conducted at the University of Khouzestan Ramin Agriculture and Natural Resources. Tests were done with 20 m of water sensitive papers at a distance of 2 meters from each other. To evaluate the technical items affecting on drift, an experiment was conducted using a turbo liner sprayer (TURBINA S.A. 800) and the John Deer (JD) 3140 tractor. A completely randomized factorial design was applied. By using 3 replications and the factors were spraying pressure applying three levels (10, 25 and 35 bar), the fan speed with two levels (1998 and 2430 rpm) and forward speed with two levels (9 and 13.5 km hr⁻¹). The sprayer started the application, spraying a solution of water and tracer (yellow Tartrazine E 102), 15m before the water sensitive papers and then moved over the water sensitive papers. The spraying was continued 15 m after the end of the sampling area. After spraying, sensitive papers were photographed and then volume diameter of 50% (DV₅₀) and median numerical diameter (NMD) and spraying quality indicator were calculated. A Spectrophotometry device at the wavelength of 427 nm, Image J and sas 9.2 software were used for measurement. This research was carried out in accordance with the calendar crop canola spraying in field conditions and the weather was calm that the wind speed was 0- 2.5 km hr⁻¹, relative humidity was 29.7% - 32.5% and air temperature was 18.8°C – 20.7°C.

Results and Discussion

According to the results sprayer pressure, fan speed and forward speed were shown significantly different (P 0.01) on the volume diameter of 50% (DV₅₀) and median numerical diameter (NMD). The effect of spraying pressure on distributing quality indicator was shown significant (P 0.01), but the fan and forward speed did not

1- M.Sc. Mechanization, Engineering, Student of Khuzestan, Ramin Agriculture and Natural Resources University, Khuzestan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Khuzestan, Ramin Agriculture and Natural Resources University, Khuzestan, Iran

3- Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Khuzestan, Ramin Agriculture and Natural Resources University, Khuzestan, Iran

4- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Khuzestan, Ramin Agriculture and Natural Resources University, Khuzestan, Iran

5- Assistant Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Khuzestan, Ramin Agriculture and Natural Resources University, Khuzestan, Iran

(*- Corresponding Author Email: ghasemi.n.m@ramin.ac.ir)

shown any significant effect. Mean comparison of the interaction of pressure and forward speed on the spray quality index and the number median diameter were shown significant ($P = 0.01$), but they did not shown any significant effect on the volume diameter of 50% (DV_{50}). With increasing spraying pressure and fan speed, the droplet size, volume diameter of 50% (DV_{50}) at 72% and numerical median diameter (NMD) at 69% and distributing quality indicator at 46% were decreased that were corresponded with the result of Czaczyk *et al.* (2012), Peyman *et al.* (2011), Nuyttens *et al.* (2009) and Landers and Farooq (2004). With increasing spraying pressure and forward speed, the droplet size, numerical median diameter (NMD) at 63% and distributing quality indicator at 35% were decreased that these resulted were corresponded with the results of Naseri *et al.* (2007) and Dorr *et al.* (2013).

Conclusions

With increasing spraying pressure, fan and forward speed, the droplet size, volume diameter of 50% (DV_{50}) and numerical median diameter (NMD) were decreased. Therefore, spraying quality indicator was decreased. The maximum pressure (35 bars), maximum fan speed (2430 rpm) and maximum forward speed (13.5 km hr^{-1}) were able to produce the minimum spraying quality indicator (10.3). At the minimum pressure (10 bars), maximum fan speed (2430 rpm) and minimum forward speed (9 km hr^{-1}), the maximum spraying quality indicator (2.91) was resulted.

Keywords: Drift, Image processing, Turbo linear sprayer, Volume diameter, Spray uniformity

کاربرد تبدیل هاف تعمیم‌یافته در تشخیص گیاه چغندر قند از علف هرز با استفاده از ماشین بینایی

عادل بخشی پور زیارتگاهی^۱ - عبدالعباس جعفری^{۲*} - یحیی امام^۳ - سید مهدی نصیری^۲ - سعادت کامگار^۴ - داریوش زارع^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۱

چکیده

از بین بردن علف‌های هرز توسط یک دستگاه خودکار نیازمند یک سامانه ماشین بینایی است که قادر به تشخیص گیاه اصلی از علف هرز باشد. بدین منظور می‌بایست ابتدا ویژگی‌های متمایز بین گیاه اصلی و علف‌های هرز مشخص شوند. در این تحقیق با مطالعه عکس‌های متعدد چغندر قند وجود یک ویژگی مختص برگ چغندر قند و قابل تمایز با علف‌های هرز مرسوم مشخص گردید. این ویژگی یک انحنای S شکل در ابتدای برگ و در نزدیکی دم‌برگ بود که تنها در برگ‌های چغندر قند قابل مشاهده بوده و در سایر علف‌های هرز مرسوم وجود نداشت. برای بیان این ویژگی از تبدیل تعمیم‌یافته هاف استفاده شد تا به کمک آن مکان هندسی اشکال غیر هندسی تعریف شود. بررسی نتایج حاصل از انجام این روش بر روی تصاویر جمع‌آوری شده از شرایط واقعی مزرعه نشان داد که دقت کلی الگوریتم ۹۱/۶۵٪ می‌باشد. ۹۲٪ از بوته‌های چغندر قند موجود در تصاویر آزمون به درستی و ۸۷٪ از علف‌های هرز به اشتباه به عنوان چغندر قند تشخیص داده شدند. با توجه به این که این روش تنها از یک ویژگی شکلی استفاده می‌نماید، می‌توان انتظار داشت که با افزودن سایر ویژگی‌های بافتی و رنگی به قدرت تشخیص درست بالایی دست یافت.

واژه‌های کلیدی: پردازش شکلی، چغندر قند، علف هرز، ماشین بینایی مرئی، هاف تعمیم‌یافته

مقدمه

چغندر قند نشان می‌دهد که رقابت علف‌های هرز بر درصد قند و ناخالصی‌های آن تأثیر قابل توجهی ندارد. اما باعث کاهش شدید عملکرد ریشه می‌شود (Shahbazi and Abdollahian-Noghabi, 2000). مقدار این کاهش بستگی به توانایی رقابت، تراکم علف هرز و طول فصل رقابت دارد (Jahradakbar et al., 2004). کنترل علف‌های هرز در مراحل اولیه رشد محصول برای استفاده مؤثر از مواد مغذی خاک توسط گیاه بسیار مهم است. از طرفی کنترل علف‌های هرز در ابتدای فصل رشد چغندر قند مؤثرترین روش جهت کاهش تعداد علف‌های هرز است و پس از آن چغندر قند با افزایش سطح سایه انداز برگ (کانوپی) می‌تواند علف‌های هرزی را که با تأخیر جوانه می‌زنند، کنترل نماید (Morishita and Wille, 2001).

برای کنترل علف هرز در طول فصل رشد چغندر قند از روش‌های شیمیایی، مکانیکی و وجین دستی استفاده می‌شود. دقت روش وجین دستی از لحاظ حذف علف‌های هرز بسیار بالا است ولی با توجه به زمان بر و طاقت فرسا بودن عملیات و بالا بودن هزینه‌های کارگری دارای محدودیت می‌باشد. علاوه بر هزینه‌ی بالای آن، به دلیل تردد کارگران در مزرعه به محصول چغندر قند نیز صدمه وارد شده و موجب کاهش کیفیت آن می‌شود که آن نیز باید در محاسبه‌ی هزینه‌ها مد نظر قرار گیرد (Jafari, 2005).

چغندر قند (*Beta vulgaris*) گیاهی دوساله است که قند را در ریشه‌های زیرزمینی متورم خود ذخیره می‌کند. این گیاه در طول اولین سال رشد تولید قند می‌کند و در سال دوم گلدهی و تولید بذر می‌کند و عموماً به صورت گیاه یکساله کشت می‌شود (Cooke and Scott, 1995; Kolivand, 1993). امروزه سطح وسیعی از مزارع دنیا به کشت چغندر قند اختصاص دارد. در ایران نیز چغندر قند یکی از محصولات مهم زراعی به‌شمار می‌رود که جایگاه ویژه‌ای در تغذیه افراد جامعه دارد و به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید شکر، از دیرباز مورد توجه بوده است.

به‌طور کلی علف هرز گیاهی است که به‌طور ناخواسته در مزرعه روئیده باشد (Hakimi and Gohari, 1993). مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر رقابت علف‌های هرز بر عملکرد کمی و کیفی

۱- دکترای مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: ajafari@shirazu.ac.ir)

۳- استاد بخش زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۴- استادیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تبدیل هاف^۲ روشی برای استخراج ویژگی‌ها در آنالیز تصاویر، بینایی رایانه‌ای و پردازش تصویر دیجیتال است (Shapiro *et al.*, 2001). تبدیل هاف را می‌توان برای تشخیص خط و یا هر شکل دیگری در یک تصویر که قابلیت فرموله شدن یا پارامتری شدن داشته باشد (مانند دایره، بیضی و غیره) استفاده نمود (Sonka *et al.*, 1993). در این موارد، با داشتن دانش از شکل و هدف، برای پیدا کردن محل و جهت‌گیری یک شیء خاص در تصویر اقدام می‌شود. از تبدیل هاف معمولی برای تشخیص ردیف کشت در مزرعه با دقت مناسب استفاده شده است (Leemans and Destain, 2006; Gee *et al.*, 2008). تبدیل هاف تعمیم‌یافته^۳ یک نسخه اصلاح شده از تبدیل هاف است که توسط بالارد در سال ۱۹۸۱ معرفی شده است (Ballard, 1981). این روش نه تنها برای اشکال تحلیلی تعریف شده بلکه برای تشخیص اشکال دلخواه غیر تحلیلی (شکل‌هایی که توسط یک رابطه تحلیلی قابل تعریف نباشد) نیز کاربرد دارد. در این روش، از اصل تطبیق الگو استفاده می‌شود، یعنی با استخراج ویژگی‌های یک شیء و مقایسه آن با یک سری الگوها، شکل مورد نظر تشخیص داده می‌شود.

تاکنون از تبدیل هاف تعمیم‌یافته به منظور تشخیص و جداسازی گیاه اصلی از علف هرز در مزرعه استفاده نشده است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق بررسی امکان تشخیص گیاه اصلی چغندرقد از چند علف هرز مرسوم در مزارع چغندرقد با استفاده از تبدیل هاف تعمیم‌یافته می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه تصاویر

تصاویر مورد نیاز این تحقیق از مزارع مختلف کشت چغندرقد در اطراف شهرستان مرودشت در استان فارس تهیه شدند. تهیه تصاویر همزمان با دوره بحرانی و جبین علف هرز مزارع چغندرقد انجام گرفت. دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز یک دوره زمانی محدود در طول فصل رشد گیاه زراعی است که اگر با علف‌های هرز مبارزه شود، عملکرد گیاه زراعی دچار تغییر نخواهد شد و نیازی به عملیات اضافی برای مبارزه با علف‌های هرز پس از این دوره یا قبل از آن نخواهد بود (شکل ۱). به عبارت ساده‌تر، دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز می‌گوید مبارزه با علف‌های هرز موجود در مزرعه در چه زمانی باید شروع شود و چند روز ادامه یابد (Ghadiri, 1996). دوره بحرانی و جبین علف هرز در مزارع چغندرقد استان فارس در محدوده چهار تا هشت برگی می‌باشد، بنابراین عکس‌برداری در ابتدای دوره بحرانی کنترل علف هرز یعنی در دوره چهاربرگی گیاه چغندرقد انجام گرفت.

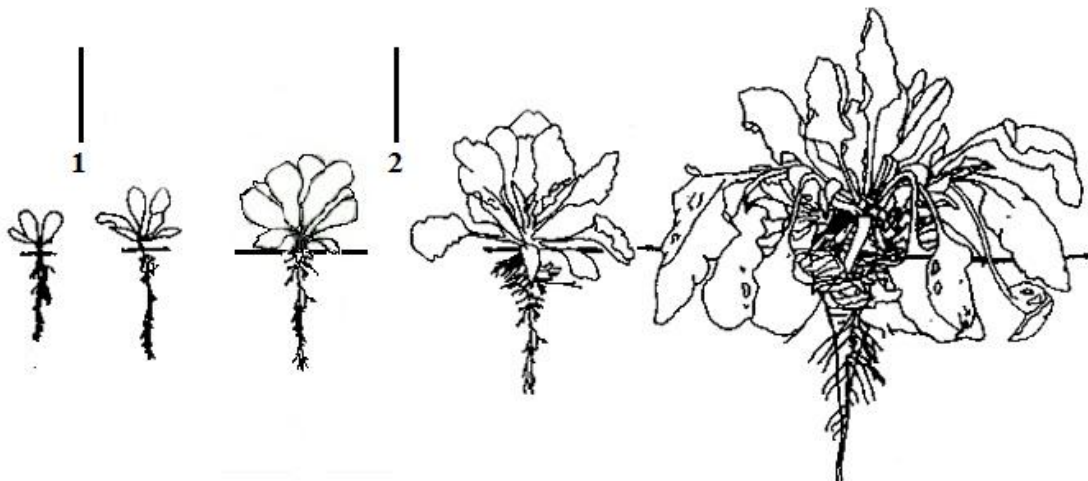
استفاده از علف‌کش‌ها علی‌رغم داشتن نتایج خوب و کاهش زمان کاری، سبب بروز مشکلاتی نظیر آلودگی محیط زیست، مقاوم شدن گونه علف هرز به سموم مورد استفاده، کاهش کیفیت محصول در اثر نفوذ مواد شیمیایی به داخل محصول می‌شود (Gillott, 2001). از سوی دیگر امروزه مشتریان محصولاتی با کیفیت طبیعی و بدون وجود مواد شیمیایی در پرورش و نگهداری آن‌ها را خواستار هستند (Blasco *et al.*, 2002). وجین کردن با کولتیواتور علاوه بر کنترل علف‌های هرز موجب تهویه‌ی خاک، انجام عمل خاک‌دهی پای بوته، مخلوط شدن کود سرک با خاک و بهبود رشد چغندرقد می‌گردد (Cussans, 1986). اما از مشکلات عمده در کنترل مکانیکی علف هرز احتمال مدفون شدن بوته اصلی در حین عمل وجین و آسیب فیزیکی به گیاه اصلی می‌باشد. یکی دیگر از معایب کاربرد کولتیواتور، عدم کنترل علف‌های هرز روی ردیف می‌باشد (Kaya and Buzluk, 2006).

کاربرد موضعی و انتخابی علف‌کش‌ها در مراحل اولیه دوره رشد به منظور انجام مدیریت خاص مکانی محصول بسیار مهم است که هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و هم سازگار با محیط زیست است. این امر نیازمند اطلاعات مربوط به توزیع علف هرز در مزرعه می‌باشد. با توجه به افزایش سرعت پردازش کامپیوتر، پردازش تصویر^۱ و سامانه‌های طبقه‌بندی در زمینه‌های مختلف اهمیت روز افزونی پیدا کرده و هم‌اکنون تبدیل به یکی از ابزارهای کاربردی در بسیاری از فرآیندها شده‌اند. در اواخر دهه ۷۰ میلادی، از فناوری ماشین بینایی در تحقیقات کشاورزی استفاده شد و به تدریج افزایش یافت (Moshashai *et al.*, 2008). کاربردهای سامانه‌های ماشین بینایی و روش‌های پردازش تصویر، در زمینه تشخیص علف‌هرز در مزرعه سال‌ها مورد توجه محققان بوده است (Hemming and Rath, 2001; Kavdir, 2004; Sogaard, 2005; Tellaiche *et al.*, 2012; Ahmed *et al.*, 2008; Arribas *et al.*, 2011). در پژوهشی، از روش‌های پردازش تصویر به منظور شناسایی علف‌های هرز پهن برگ در غلات تحت شرایط واقعی مزرعه استفاده شد (Perez *et al.*, 2000). در این تحقیق ابتدا با استفاده از پردازش رنگی تصاویر، خاک (و یا پس زمینه) از گیاهان (زراعی و علف‌های هرز) جدا شدند و سپس با استفاده از خصوصیات شکلی، جداسازی گیاه اصلی از علف هرز انجام شد. در نهایت الگوریتم ارائه شده موفق به جداسازی علف هرز از گیاه اصلی با دقت ۸۵٪ شد. در پژوهش دیگر، طبقه‌بندی گیاه اصلی چغندرقد از علف‌های هرز با استفاده از سه مؤلفه‌ی رنگی اصلی (قرمز، سبز و آبی) استخراج شده از تصاویر و به کارگیری روش طبقه‌بندی آنالیز تشخیصی انجام شد (Jafari *et al.*, 2006).

2- Hough transform

3- Generalized hough transform

1- Image processing



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از دوره بحرانی کنترل علف هرز برای گیاه چغندر قند؛ ۱: ابتدای دوره چهاربرگی، ۲: انتهای دوره هشت برگی
Fig.1. Schematic of the weed control critical period of a sugar beet plant; 1: Beginning of 4-leaf stage, 2: End of 8-leaf stage

سپس تصاویر مؤلفه‌های سبز و قرمز از تصاویر پیش‌پردازش شده استخراج شدند.

با اعمال حد آستانه مناسب بر روی تصویر تفاضل مؤلفه قرمز از مؤلفه سبز، تصویر باینری شامل گیاه به رنگ سفید و خاک به رنگ سیاه تشکیل شد. سپس با عملیات شکلی شامل اعمال متوالی عملگرهای انقباض^۴ و اتساع^۵، گیاهانی که اندازه آن‌ها بسیار کوچک بودند، از تصویر حذف شدند و تصویر سیاه و سفید حاصل برای اعمال الگوریتم هاف تعمیم‌یافته مورد استفاده قرار گرفت.

تبدیل هاف تعمیم‌یافته

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برگ‌های چغندر قند در دوره چهاربرگی تفاوت چندانی از لحاظ ظاهری با هم دیگر نداشتند و از سوی دیگر تفاوت آشکاری بین شکل برگ چغندر قند با انواع علف‌های هرز معمول این گیاه در مزرعه مشاهده شد. در این پژوهش با بررسی اولیه تعداد زیادی از برگ‌های چغندر قند و علف‌های هرز سعی در یافتن ویژگی شکلی بود که بتواند تفاوت بارزی بین آن‌ها ایجاد کند. علاوه بر این، این ویژگی می‌بایست یک ویژگی پایدار باشد. به عبارت دیگر، در گیاهان با اندازه‌های مختلف نیز همچنان وجود داشته باشد و همچنین تابع تغییرات محیطی یا سن رشد نباشد.

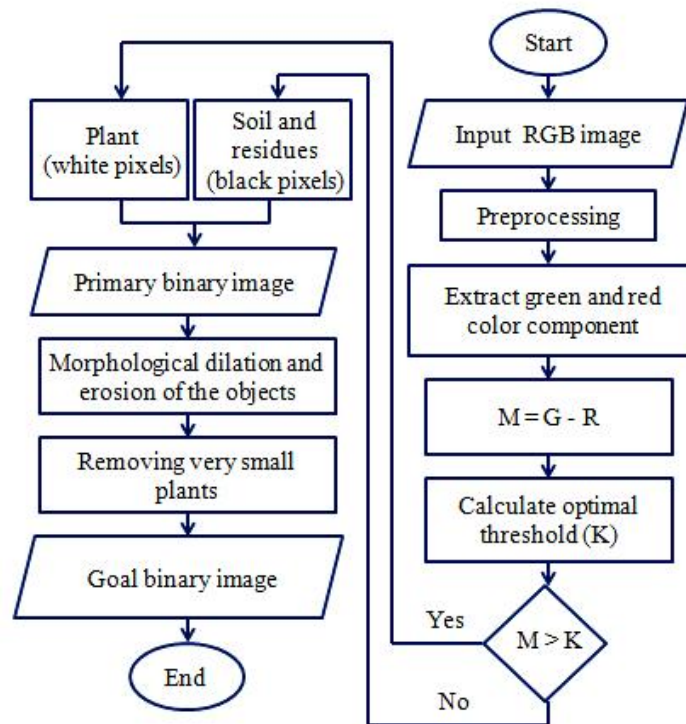
به‌منظور از بین بردن سایه‌اندازی برگ‌ها بر روی یکدیگر و کاهش تأثیر شدت نورهای مختلف خورشید، از یک سایه‌بان در بالای گیاهان استفاده شد تا تنها از تابش مستقیم نور خورشید جلوگیری شود. به‌منظور تهیه تصاویر رنگی از یک دوربین دیجیتال CCD مدل Canon IXUS 960IS ساخت کشور ژاپن و با وضوح ۱۲ مگاپیکسل استفاده شد. ارتفاع دوربین از سطح زمین توسط یک پایه چوبی به اندازه حدوداً ۵۰ سانتی‌متری تنظیم شد. دوربین به‌صورت کاملاً عمودی و به سمت پایین بر روی پایه قرار داده شد و تصاویر با ابعاد ۱۶۰۰×۱۲۰۰ پیکسل از روی ردیف‌های کشت تهیه شدند. دوربین توسط کابل مخصوص به رایانه متصل و توسط آن کنترل گردید. عکس‌برداری و تمامی تنظیمات لازم توسط نرم افزار ZoomBrowser EX 6.5.1 انجام و تصاویر تهیه شده در رایانه ذخیره شدند. در کل ۵۵ تصویر تهیه شد که تعداد ۲۷ تصویر به‌منظور ایجاد الگوریتم و ۳۷ تصویر دیگر به منظور ارزیابی الگوریتم مورد استفاده قرار گرفتند.

بخش‌بندی تصویر

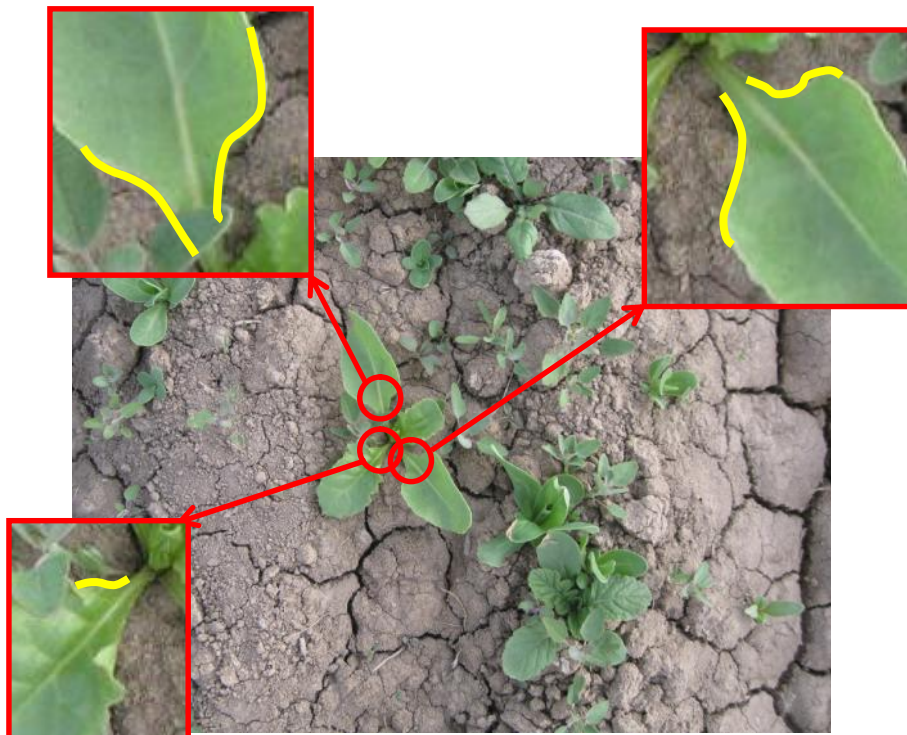
تصاویر تهیه شده از سطح مزارع به‌منظور انجام عملیات پردازش تصویر و ایجاد الگوریتم، در جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب^۱ (Mathworks, R2013a) مورد بررسی قرار گرفتند. فلوچارت مراحل مختلف بخش‌بندی تصویر در شکل ۲ نشان داده شده است. تصاویر فراخوانی شده در نرم‌افزار متلب در ابتدا پیش‌پردازش شدند. برای از بین بردن نوفه‌های موضعی^۲ در تصاویر از فیلتر میانه^۳ استفاده شد.

3- Median filter
 4- Erosion
 5- Dilation

1- MATLAB
 2- Local noises



شکل ۲- فلوچارت خلاصه مراحل الگوریتم بخش‌بندی تصویر
Fig.2. Summarized flowchart of image segmentation steps



شکل ۳- الگوی S شکل در برگ‌های گیاه چغندر
Fig. 3. S-type template in sugar beet leaves

متفاوت روی لبه شیء که زاویه α_1 را ایجاد می‌کنند، نشان داده شده است. ممکن است خطوط مماس بر تعداد نقاط زیادی روی لبه شیء با محور افقی یک مقدار زاویه را ایجاد کنند (در شکل ۴ مشخص است که دو خط مماس در دو نقطه متفاوت از لبه شیء، با افق زاویه α_1 را ایجاد نموده‌اند) و از طرفی مقادیر مختلف زاویه نیز به دست آید. بر اساس شکل ۴، برای نقطه (x_1, y_1) و مقدار α_1 ، روابط (۱) و (۲) را خواهیم داشت:

$$x_c = x_1 + r_1 \cos(\alpha_1) \quad (1)$$

$$y_c = y_1 + r_1 \sin(\alpha_1) \quad (2)$$

از سوی دیگر، برای هر مقدار مشخص (به عنوان مثال α_1) ممکن است به ازای های مختلف، مقادیر مختلفی از x و y در نتیجه α_1 های مختلفی وجود داشته باشد. بنابراین، مطابق با روابط (۳) و (۴)، برای زامین مقدار خواهیم داشت:

$$x_c = x_j + r_j \cos(\alpha_j) \quad (3)$$

$$y_c = y_j + r_j \sin(\alpha_j) \quad (4)$$

همین طور به ازای مقادیر مختلف از α_j ، مقادیر متفاوتی از x و y وجود دارد:

$$\varphi_i \rightarrow \begin{cases} x_c = x_j + r_j \cos(\alpha_j) \\ y_c = y_j + r_j \sin(\alpha_j) \end{cases} \quad (5)$$

بنابراین می‌توان جدولی به صورت جدول ۱ تشکیل داد که بیانگر الگوی کلی شکل خواهد بود.

جدول ۱- نمونه R-Table ایجاد شده در تبدیل هاف تعمیم یافته

Table 1- Typical R-Table composed in Generalized Hough Transform

i	i	R _i
1	1	$(r_1^1, \alpha_1^1), (r_2^1, \alpha_2^1), \dots$
2	2	$(r_1^2, \alpha_1^2), (r_2^2, \alpha_2^2), \dots$
3	3	$(r_1^3, \alpha_1^3), (r_2^3, \alpha_2^3), \dots$
...

بخش دوم - الگوریتم تشخیصی

دو نکته اساسی در تعمیم الگوریتم تبدیل هاف، استفاده از اطلاعات مربوط به اندازه و جهت است. این اطلاعات علاوه بر سریع تر کردن الگوریتم، تا حد زیادی باعث بهبود دقت آن نیز می‌شوند. برای مثال، اگر اطلاعات مربوط به اندازه و جهت در آشکارساز دایره استفاده نشود، هر نقطه از محیط دایره می‌تواند عضوی از تعداد بی‌شمار دایره در اندازه‌ها و جهت‌های مختلف باشد که تنها یکی از آن‌ها دایره مورد نظر است. در این مرحله تبدیل هاف تعمیم یافته به جستجوی شیء مورد نظر در یک تصویر دیگر می‌پردازد که مراحل آن در ادامه شرح داده می‌شود.

وجود یک منحنی S شکل (عموماً به صورت کشیده) در ابتدای محل پهن شدگی برگ‌های گیاه چغندر قند، ویژگی استخراج شده در این مطالعه بود که تنها مختص برگ‌های چغندر قند بوده و در سایر علف‌های هرز مورد مطالعه در این پژوهش مشاهده نشد (شکل ۳). بنابراین از این ویژگی و نیز از توانایی‌های تبدیل هاف تعمیم یافته در تشخیص منحنی‌ها، به منظور تشخیص و جداسازی گیاه چغندر قند در تصاویر استفاده شد.

بنابراین، برای پیاده‌سازی تبدیل هاف در تصاویر تهیه شده از سطح زمین، ابتدا یک نمونه ۵۰ عضوی از انواع شکل‌های منحنی S شکل واقع در برگ چغندر قند تهیه شد که به عنوان الگوهای شکلی مورد نظر در تبدیل هاف تعمیم یافته استفاده شدند. همانطوری که در شکل ۳ نیز مشخص است. بسیاری از نمونه‌های S شکل شباهت بسیار زیادی به همدیگر داشتند. از آنجا که تصاویر باینری حاصل از الگوریتم بخش‌بندی تصاویر ممکن است شامل تعداد بیش از یک عدد گیاه اصلی و نیز تعدادی علف هرز باشد، بنابراین اشیاء موجود در تصاویر شماره‌گذاری شدند و تصویر هر کدام از اشیاء به صورت جداگانه تحت تبدیل هاف تعمیم یافته قرار گرفت تا مشخص شود که شیء مورد نظر برگ چغندر یا علف هرز است. الگوریتم پیاده‌سازی تبدیل هاف تعمیم یافته به طور کلی دارای دو بخش اصلی می‌باشد که شامل تعریف شکل و مرحله تشخیص می‌باشند.

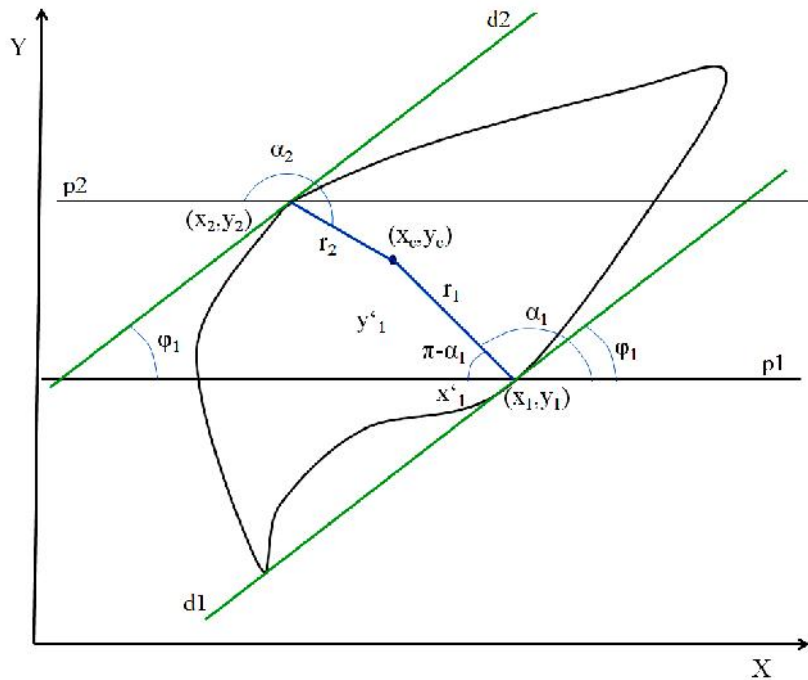
بخش اول- ایجاد الگو از شیء

به طور کلی، ایجاد الگوی شیء دارای چهار مرحله زیر می‌باشد:

- ۱) لبه‌یابی از تصویر الگو (تصویری که اشیاء شبیه به آن را در عکس‌های اصلی جستجو می‌کنیم)،
- ۲) انتخاب یک نقطه دلخواه در تصویر به عنوان نقطه مرجع (مرکز سطح الگو)،
- ۳) رسم یک بردار از نقطه مرجع به یک نقطه از لبه جسم،
- ۴) محاسبه زاویه خط مماس بر هر نقطه روی مرز جسم با محور افقی،

۵) ذخیره نقطه مرجع به صورت تابعی از جدول R-Table.

پس از یافتن نقاط مرزی تصویر الگوی شیء مورد نظر، این تصویر با استفاده از فاکتورهای تعریف می‌شود. در واقع، در ابتدا با استفاده از فاکتورهایی که در زیر آورده می‌شود، یک مدل از شیء ایجاد شد. به این صورت که به ازای هر مقدار از φ (زاویه خط مماس بر هر نقطه از لبه شیء با خط افق)، فاصله نقطه مورد نظر بر روی لبه شیء از نقطه مرجع (در این تحقیق مرکز سطح شکل به عنوان نقطه مرجع انتخاب شد) دلخواه محاسبه شده و در جدولی که اصطلاحاً R-Table نامیده می‌شود، ذخیره گردید (شکل ۴). در شکل ۴ دو نقطه



شکل ۴- روش ایجاد الگو؛ d1 و d2: به ترتیب خطوط مماس بر مرز شیء در نقاط (x1,y1) و (x2,y2)؛ p1 و p2: خطوط موازی محور افقی و به ترتیب گذرنده از نقاط (x1, y1) و (x2, y2)

Fig. 4. Pattern construction method; d1 and d2: tangents to the edge of the object at (x1, y1) and (x2, y2) respectively, p1,p2: parallel lines too horisintal axis pasing (x1, y1) and (x2, y2) respectively

در مرحله اول، فضای هاف تعمیم‌یافته کوانتیزه^۱ می‌شود: و همچنین همه مقادیر تغییر جهت‌گیری الگو ($\theta = \theta_{min} \text{ to } \theta_{max}$)، مختصات نقطه مبنا براساس روابط ۹ و ۱۰ محاسبه شدند.

$$x_c = x - (x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta)).s \quad (9)$$

$$y_c = y + (y' \sin(\theta) + x' \cos(\theta)).s \quad (10)$$

ب) محاسبات مشابه در سلول بعدی $P[x_c][y_c][s][\theta]$ انجام شد.

مکان‌های احتمالی قرار گرفتن کانتور شیء الگو در تصویر مورد آنالیز با تعیین مقدار بیشینه از فضای پارامتری $P[x_c][y_c][s][\theta]$ به‌دست می‌آید. در صورتی‌که برای نقطه مورد نظر، مقدار $P[x_c \dots x_c][y_c \dots y_c][s][\theta]$ بزرگ‌تر از مقدار تعریف شده T باشد، در این صورت کانتور در مکان (x_c, y_c) قرار داشته، به اندازه چرخیده و ضرب در مقیاس s می‌شود.

در نهایت طرز کار الگوریتم ارائه شده در این تحقیق به این صورت بود که اگر قسمتی از هرکدام از اشیاء موجود در تصویر (شکل باینری یک گیاه) با الگوهای S شکل تعریف شده در تبدیل هاف تعمیم‌یافته همخوانی داشت، آن شیء به‌عنوان چغندر و در غیر این صورت به‌عنوان علف هرز شناخته می‌شد. همانطور که قبلاً گفته شد،

در رابطه (۶)، s میزان تغییر در مقیاس شکل الگو و میزان تغییر در جهت قرارگیری شکل الگو می‌باشند. کوانتیزه کردن^۲ در واقع تقسیم‌بندی فضای هاف به سلول‌های کوچک‌تر است. این کار به این دلیل انجام می‌شود که محاسبه تمام متغیرهای بالا بسیار زمان‌بر است. بنابراین کل فضای هاف به سلول‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود و عملیات بعدی به جای این‌که بر روی تک تک متغیرهای فضا انجام شود، بر روی سلول‌ها انجام می‌پذیرد.

$$P[x_{cmin} \dots x_{cmax}][y_{cmin} \dots y_{cmax}] \dots [s_{min} \dots s_{max}][\theta_{min} \dots \theta_{max}] \quad (6)$$

برای هر نقطه روی لبه شیء موجود در تصویر مورد بررسی: الف) با توجه به مقدار ، تمامی (r,) ها در R-Table که مربوط به این زاویه هستند، استخراج شده و نقاط مرجع احتمالی از روابط زیر محاسبه شدند:

$$x' = r \sin(\alpha) \quad (7)$$

$$y' = -r \cos(\alpha) \quad (8)$$

در نتیجه، با توجه به روابط (۷) و (۸)، برای همه مقادیر مقیاس

- 1- Quantize
- 2- Quantization

آن‌ها استخراج شده بود برابر با $96/21\%$ و دقت الگوریتم در تصاویری که الگو از آن‌ها استخراج نشده بود، برابر با $91/65\%$ به دست آمد. این در حالی است که در تحقیقات پیشین انجام شده، دقت تشخیص گیاه چغندر قند از علف‌های هرز با استفاده از خصوصیات رنگی برابر با $85/1\%$ گزارش شده است (Jafari et al., 2006). همچنین دقت تشخیص چغندر قند از علف‌های هرز بر اساس خصوصیات شکل برگ و زاویه نوک برگ، در حدود $87/2\%$ گزارش شده است (Terawaki et al. 2002).

نکته حائز اهمیت در مورد نتایج الگوریتم ارائه شده در این پژوهش این است که در برخی از تصاویر تداخل بین گیاه چغندر قند و علف‌های هرز بسیار زیاد بود، به طوری که امکان جداسازی دو گیاه با استفاده از عملیات شکلی وجود نداشت. این امر باعث شد تا در مواردی که گیاه چغندر قند و علف‌های هرز تداخل زیادی داشتند موجب بروز دو مشکل گردد. مشکل اول اینکه در برخی موارد تداخل زیاد باعث عدم توانایی الگوریتم در تشخیص الگو در شیء می‌شد. بنابراین گیاه به اشتباه به عنوان علف هرز تشخیص داده می‌شد. مشکل دوم این بود که در صورت تشخیص گیاه اصلی در حالت تداخل زیاد، علف هرز متصل به آن نیز به عنوان گیاه چغندر قند تشخیص داده می‌شد. این دو مشکل باعث کاهش میزان دقت الگوریتم هاف تعمیم یافته شدند. البته از آنجا که در دوره چهار برگی گیاه میزان تداخل گیاهان زیاد نیست و مقادیر کم تداخل قابل رفع شدن است، می‌توان نتایج الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته را برای تشخیص گیاه چغندر قند در دوره چهار برگی قابل قبول دانست. در دوره‌های بعدی رشد گیاه که میزان تداخل زیاد می‌شود، استفاده از الگوی بررسی شده در این پژوهش توصیه نمی‌شود و در صورت استفاده از الگوریتم هاف تعمیم یافته بایستی الگوهای دیگری تحقیق شوند.

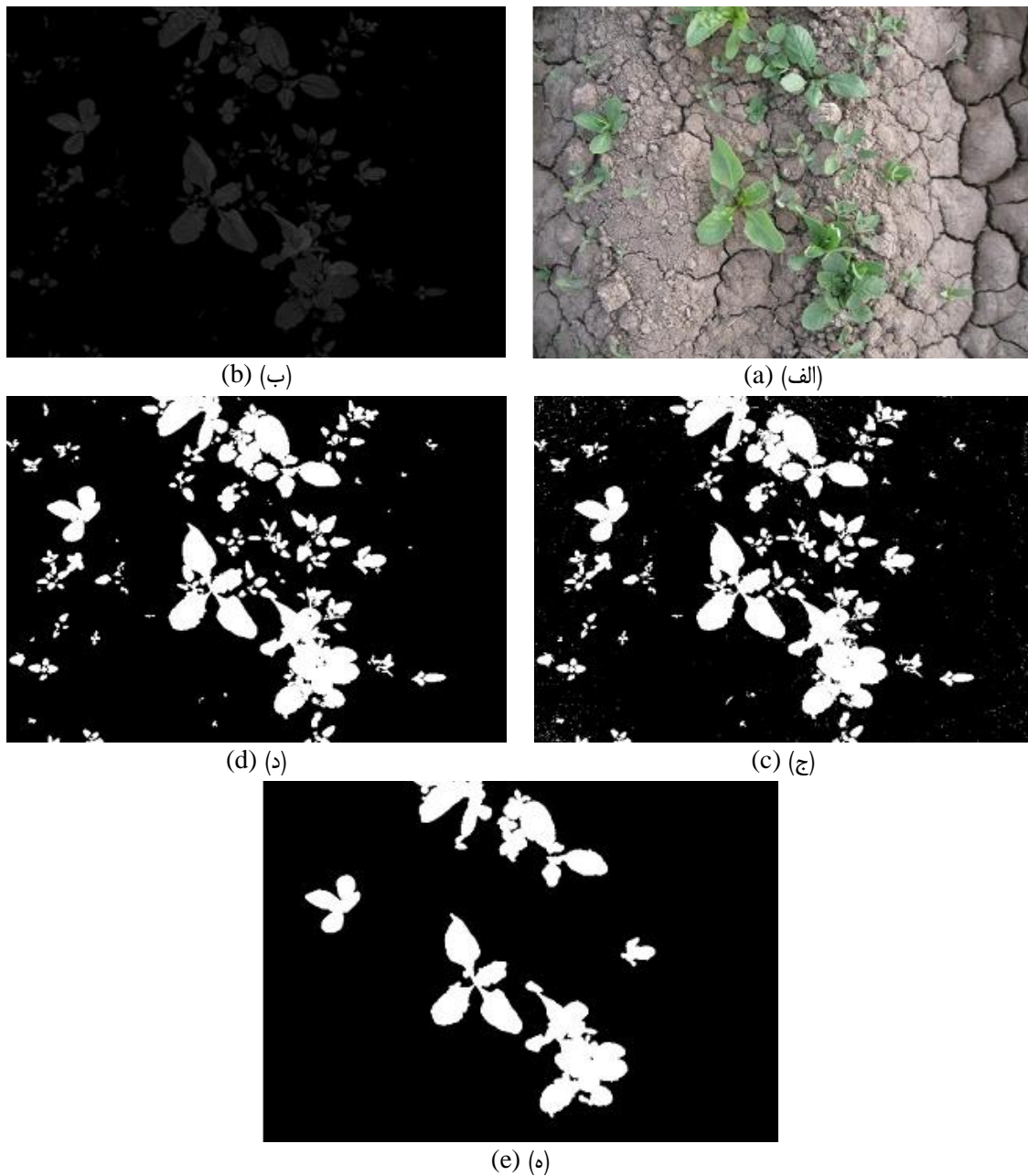
در تبدیل هاف تعمیم یافته برای یک الگوی S شکل خاص، مسأله تطابق برای مقیاس‌ها و زوایای چرخش مختلف الگو با شیء موجود در تصویر مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور بررسی دقت الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته، گیاهان چغندر قند در تصاویر اصلی تهیه شده از زمین مشخص شدند و با گیاهان تشخیص داده شده توسط الگوریتم هاف مقایسه شدند.

نتایج و بحث

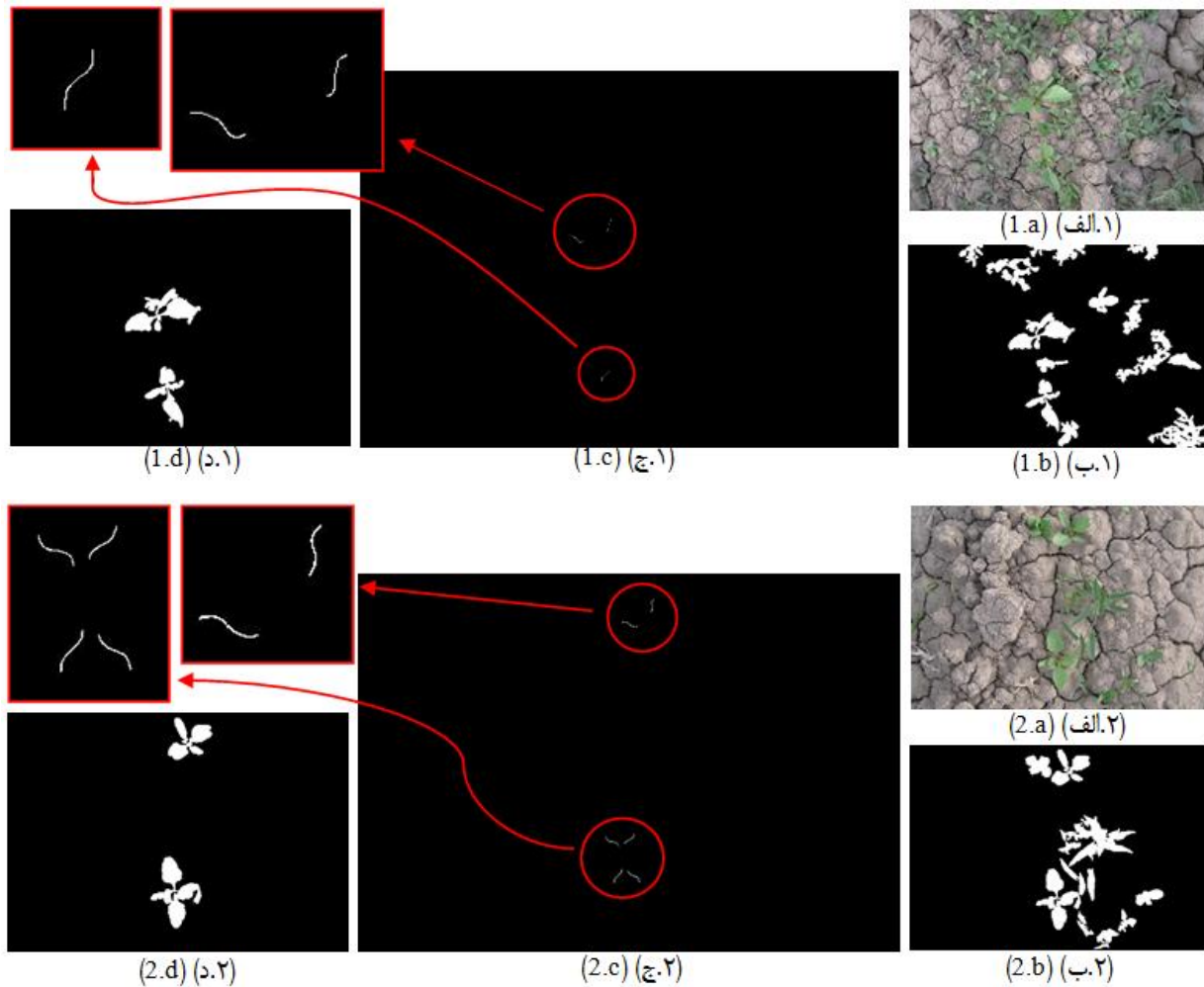
در شکل ۵ تصاویر مربوط به مراحل مختلف الگوریتم بخش بندی تصویر نشان داده شده است. همانطور که از قسمت‌های مختلف این شکل به خصوص قسمت (ج) مشخص است، الگوریتم تشخیص سبزیگی در تشخیص گیاهان موجود در تصاویر بسیار موفق بود. نتایج بررسی در بین ۳۰ عکس مورد ارزیابی نشان داد که نرخ تشخیص سبزینه در تصاویر 100% بود. در تصویر (ه-۵) گیاهان کوچک حذف شده‌اند و این تصویر در الگوریتم تشخیص هاف تعمیم یافته استفاده شد.

شکل ۶ نتایج الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته را در دو تصویر مختلف نشان می‌دهد. تصویرهای (ب) در شکل ۶، تصاویر سیاه و سفید ورودی در الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته هستند. تصاویر (ج) الگوهای S شکلی هستند که توسط تبدیل الگوریتم هاف تعمیم یافته در تصویرهای ورودی تشخیص داده شده‌اند. در نهایت تصاویر (د) آن اشیا را در تصویر اصلی را نشان می‌دهند که الگوهای یافته شده مربوط به آن‌ها بوده‌اند. در واقع تصاویر (د) همان نتایج نهایی الگوریتم ارائه شده در این پژوهش هستند. بررسی دقت الگوریتم هاف تعمیم یافته در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول دقت الگوریتم در تشخیص گیاه چغندر قند در ۲۸ تصویری که ۵۰ الگوی S شکل از آن‌ها استخراج شده بودند، بررسی شد. در حالت دوم توانایی الگوریتم در ۳۷ عکسی که الگوها از آن‌ها استخراج نشده بودند، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. با توجه به جدول ۲ میزان دقت کلی الگوریتم در تصاویری که الگو از



شکل ۵- گالری تصاویر حاصل از مراحل مختلف الگوریتم بخش‌بندی، الف) تصویر رنگی اولیه، ب) تصویر حاصل از تفاضل مؤلفه قرمز از مؤلفه سبز، ج) تصویر حاصل از اعمال حد آستانه بر روی تصویر ب، د) تصویر حاصل از حذف نوفه با استفاده از عملیات شکلی و ه) تصویر مورد استفاده در تبدیل هاف تعمیم‌یافته

Fig. 5. Gallery of the different stages of the segmentation algorithm; a) Original color image, b) Image obtained by subtraction of Red component from Green component, c) Image obtained by applying color threshold on the image (b), d) Image (c) after removing noises using morphological operations, and e) Image used in generalized Hough transform algorithm



شکل ۶- نتایج الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته در دو عکس مختلف، الف) تصویر رنگی اولیه، ب) تصویر سیاه و سفید استخراج شده از تصویر رنگی برای استفاده در الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته، ج) تصویر مربوط به الگوهای یافته شده توسط الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته در تصویر سیاه و سفید (ب و د) تصویر نهایی نشان دهنده گیاه چغندر قند تشخیص داده شده

Fig. 6. Results of generalized Hough transform algorithm in two various images; a) Primary color image, b) Binary image obtained from color image to be used in generalized Hough transform algorithm, c) Patterns found by generalized Hough transform in the (b) binary image, and d) Final image showing detected sugarbeet plants

جدول ۲- نتایج الگوریتم تبدیل هاف تعمیم یافته در تصاویر حاوی الگو و تصاویری که الگویی از آنها استخراج نشده بود (تصاویر آزمون)
Table 2- Results of generalized Hough transform algorithm in images containing extracted patterns and images that patterns were not extracted from them (test images)

نوع گیاه Plant type	تصاویر حاوی الگو Images containing patterns		تصاویر مورد آزمون Test images	
	چغندر قند Sugarbeet	علف هرز Weed	چغندر قند Sugarbeet	علف هرز Weed
چغندر قند Sugarbeet	98%	2%	92%	8%
علف هرز Weed	5.6%	94.4%	8.7%	91.3%

نتیجه‌گیری

به‌تنهایی می‌تواند % ۹۱/۶۵ از بوته‌های چغندرقد را شناسایی نماید. از آنجا که این ویژگی یک ویژگی شکلی می‌باشد، زمان کاربرد الگوریتم، پیش از ایجاد پوشش کامل گیاهی بر سطح مزرعه می‌باشد که منطبق با دوره بحرانی کنترل علف هرز چغندرقد بوده و در این دوره میزان همپوشانی برگ‌ها به اندازه‌ای نیست که موجب محو شدن ویژگی مذکور شود. از این ویژگی می‌توان در کنار سایر ویژگی‌های رنگی، بافتی و شکلی جهت افزایش دقت جداسازی استفاده کرد.

استفاده از یک ویژگی خاص موجود در شکل برگ چغندرقد به‌عنوان معیاری برای تمایز چغندرقد از علف‌های هرز مرسوم در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. این ویژگی خاص که یک انحنای S شکل در نزدیکی اتصال دم‌برگ به برگ اصلی چغندرقد بود، به‌طور مشخص در برگ‌های چغندرقد قابل مشاهده و متفاوت از سایر علف‌های هرز است. نتایج این پژوهش نشان داد، این ویژگی

References

- Ahmed, F., H. A. Al-Mamun, A. S. M. Hossain Bari, E. Hossain, and P. Kwan. 2012. Classification of crops and weeds from digital images: A support vector machine approach. *Crop Protection* 40: 90-104.
- Arribas, J. I., G. V. Sánchez-Ferrero, G. Ruiz-Ruiz, and J. Gómez-Gil. 2011. Leaf classification in sunflower crops by computer vision and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 78 (1): 9-18.
- Ballard, D. H. 1981. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes. *Pattern Recognition* 13 (2): 111-122.
- Blasco, J., N. Aleixos, J. Roger, E. Rabatel, and E. Molto. 2002. Robotic weed control using machine vision. *Biosystems Engineering* 83 (2): 149-157.
- Cooke, D. A., and R. K. Scott. 1993. *The Sugar Beet Crop*. Chapman and Hall, Publishers. pp: 675.
- Cussans, G. W. 1986. The potential for integrated weed management (IWM) control. 49th winter congress. International Institute for Sugar Beet Research 253-262.
- Gee, C., J. Bossu, G. Jones, and F. Truchetet. 2008. Crop/weed Discrimination in Perspective Agronomic Images. *Computers and Electronics in Agriculture* 60 (1):49-59.
- Ghadiri, H. 1996. Concept and application of critical period of weed control. Collections of full papers of 4th Iranian crop production and breeding congress Isfahan 257-265.
- Gillott, I. 2001. Critical herbicide uses in minor crops- an agronomist's view. Proceedings of the BCPC Conference-Weeds, Brighton, UK, 799-802.
- Hakimi, M., and J. Gohari. 1993. Determination of the most suitable row distance in sugar beet cultivation. Publication of Iran sugarbeet seed institute.
- Hemming, J., and T. Rath. 2001. Computer vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78 (3): 233-243.
- Jafari, A. 2005. Developing a Suitable Algorithm for Weeds Segmentation from Sugar Beet Crop Using Machine Vision and Artificial Neural Networks. PhD Thesis, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, Tehran University.
- Jafari, A., S. S. Mohtasebi, H. E. Jahromi, and M. Omid. 2006. Weed detection in sugar beet fields using machine vision. *International Journal of Agriculture and Biology* 8 (5): 602-605.
- Jahadakbar, M. R., R. Tabatabai, and H. R. Ebrahimian. 2004. Critical period of weed competition with sugar beet in Kabotarabad-Esfahan. *Journal of Sugar Beet* 20 (1): 73-92.
- Kavdir, I. 2004. Discrimination of sunflower, weed and soil by artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 44 (2): 153-160.
- Kaya, R., and S. Buzluk. 2006. Integrated weed control in sugar beet through combinations of tractor hoeing and reduced dosage of herbicide mixture. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 30: 137-144.
- Kolivand, M. 1995. Study of sugar beet growth pattern in Kermanshah. *Journal of Sugarbeet* 11 (1): 1-19.
- Leemans, V., and M. F. Destain. 2006. Application of the Hough Transform for Seed Row Localization using Machine Vision. *Biosystems Engineering* 94 (3): 325-336.

19. Morishita, D. W., and M. J. Wille. 2001. Broadleaf weed control in sugar beet with soilapplied and sequential post emergence herbicides compared to micro herbicide rates. Available from: www.uidaho.edu/sugar-beet/weed/00-12.htm.
20. Moshashai, K., M. Almasi, S. Minaei, and A. M. Borghei. 2008. Identification of sugarcane nodes using image processing and machine vision technology. *International Journal of Agricultural Researches* 3: 357-364.
21. Perez, A. J., F. Lopez, J. V. Benloch, and S. Christensen. 2000. Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 197-212.
22. Shahbazi, H. A., and M. Abdollahian-Noghabi. 2000. Critical period of weed competition in sugar beet in Mashhad, 16 (1): 58-74.
23. Shapiro, L. G., and G. C. Stockman. 2001. *Computer Vision*, Prentice-Hall Inc., Upper. Saddle River, New Jersey, pp. 41.
24. Sogaard, H. T. 2005. Weed Classification by Active Shape Models. *Biosystems Engineering* 91 (3): 271-281.
25. Sonka, M., V. Hlavac, and R. Boyle. 1993. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Brooks/Cole Publishing Company.
26. Tellaeché, A., X. P. BurgosArtizzu, G. Pajares, A. Ribeiro, and C. Fernández-Quintanilla. 2008. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 60 (2): 144-155.
27. Terawaki, M., T. Kataoka, H. Okamoto, and S. Hata. 2002. Distinction between sugar beet and weeds for development of automatic thinner and weeding machine of sugar beet. *Proceeding of the Automation Technology for Off-Road Equipment Conference* (Chicago, Illinois, USA).

Application of generalized Hough transform for detecting sugar beet plant from weed using machine vision method

A. Bakhshipour Ziaratgahi¹- A. A. Jafari^{2*}- Y. Emam³- S. M. Nassiri²- S. Kamgar⁴- D. Zare²

Received: 16-09-2015

Accepted: 10-01-2016

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as the second most important world's sugar source after sugarcane is one of the major industrial crops. The presence of weeds in sugar beet fields, especially at early growth stages, results in a substantial decrease in the crop yield. It is very important to efficiently eliminate weeds at early growing stages. The first step of precision weed control is accurate detection of weeds location in the field. This operation can be performed by machine vision techniques.

Hough transform is one of the shape feature extraction methods for object tracking in image processing which is basically used to identify lines or other geometrical shapes in an image. Generalized Hough transform (GHT) is a modified version of the Hough transform used not only for geometrical forms, but also for detecting any arbitrary shape. This method is based on a pattern matching principle that uses a set of vectors of feature points (usually object edge points) to a reference point to construct a pattern. By comparing this pattern with a set pattern, the desired shape is detected. The aim of this study was to identify the sugar beet plant from some common weeds in a field using the GHT.

Materials and Methods

Images required for this study were taken at the four-leaf stage of sugar beet as the beginning of the critical period of weed control. A shelter was used to avoid direct sunlight and prevent leaf shadows on each other. The obtained images were then introduced to the Image Processing Toolbox of MATLAB programming software for further processing.

Green and Red color components were extracted from primary RGB images. In the first step, binary images were obtained by applying the optimal threshold on the G-R images.

A comprehensive study of several sugar beet images revealed that there is a unique feature in sugar beet leaves which makes them differentiable from the weeds. The feature observed in all sugar beet plants at the four-leaf stage was a stretched S-shaped curve at the junction of the leaf and petiole. This unique shape characteristic was used as the pattern for sugar beet detection using GHT. To implement the Hough transform in the images, a 50-member group of samples was prepared from S-shaped curve to build appropriate patterns. Desired features for the Hough transformation were extracted from the patterns. In the next step, the attempts were made to find the images for the shapes similar to each of the patterns.

Results and Discussion

Plants were thoroughly separated from soil and residues. The accuracy of segmentation algorithm was achieved by almost 100%.

The accuracy of the generalized Hough algorithm was evaluated in two stages. In the first stage, the algorithm accuracy was assessed in detecting patterns in the images. Results showed that the accuracy of the algorithm was 96.21%. In the second stage, the algorithm was evaluated for some other test images, whereas the algorithm achieved an overall accuracy of 91.65%. In some cases, the presence of a large overlap between objects in the image reduced the detection accuracy. This was because of two main reasons; 1) high interference and ambiguity in the object edges, so that Hough transform was not able to detect the predefined patterns in the objects and, 2) weeds highly overlapped with sugar beet plants and thereby they were wrongly detected as sugar

1- Ph.D. in Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Professor, Department of Crop Production and Plant Breeding, Shiraz University, Shiraz, Iran

4- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

(*- Corresponding Author Email: ajafari@shirazu.ac.ir)

beet. However, since there is no or little interference between plants at the four-leaf stage, this interference can be eliminated by morphological operations. Due to this fact, it can be said that the results of GHT algorithm are acceptable for the detection of sugar beet in the plants close to four-leaf stage.

Conclusions

A special feature in the shape of sugar beet leaves was used as a criterion to distinguish between sugar beet and weeds. The results showed that by quantifying this special feature, which is an S-shaped curve near the petioles connection of beet leaves, sugar beet can be discriminated from weeds with an accuracy of 91.65 %. Recalled that this feature is a shape characteristic, therefore, the generalized Hough algorithm must be applied prior to plant canopy development, which is consistent with the critical period of weed control in sugar beet fields.

Keywords: Generalized Hough, Shape processing, Sugarbeet, Visible machine vision, Weed

تحلیل فرکتالی سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو مدل ۳۰۶۵

فرزاد مهدیه بروجنی^{۱*} - علی ملکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰

چکیده

کمباین‌ها یکی از مهم‌ترین منابع ایجاد سر و صدا در کشاورزی هستند. با توجه به شرایط متفاوت کاری کمباین‌ها و اینکه رانندگان همواره در معرض سر و صدای ناشی از کمباین‌ها هستند. این پژوهش با هدف دستیابی به بعد فرکتال سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو (SAMPO) در شرایط مختلف صورت گرفت تا از این طریق بتوان به ساختار مناسب جاذب‌های صوتی در کمباین‌ها دست یافت. سیگنال‌های صوتی کمباین مطابق با استاندارد بین‌المللی 5131 و 7216 در دو سطح دور موتور (تند و آرام)، دو وضعیت عملکردی (حرکت آزاد و هنگام برداشت)، چهار حالت دنده (دنده پارک، دنده یک سنگین، دنده دو سنگین و دنده سه سبک) و دو موقعیت میکروفون (کمباین با کابین و بدون کابین) ضبط گردید. بعد فرکتال سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان با استفاده از روش‌های کاتز، سویک، هیگوچی و MRBC و با اعمال سه پنجره لرزان به طول‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌ثانیه محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقادیر بعد فرکتال اعدادی بین ۱ تا ۱/۶ را به خود اختصاص می‌دهد و همچنین با افزایش طول پنجره‌ها مقدار آن افزایش می‌یابد (در پنجره ۵۰ میلی‌ثانیه ۱/۳۴، در پنجره ۱۰۰ میلی‌ثانیه ۱/۳۷ و در پنجره ۲۰۰ میلی‌ثانیه ۱/۴۰) و در وضعیت وجود کابین بعد فرکتال مقدار ۱/۲۵ و در حالت بدون کابین ۱/۴۸ است. همچنین با افزایش دور موتور مقدار بعد فرکتال سیگنال صوتی از ۱/۳۴ به ۱/۴۰ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک، بعد فرکتال، فرکتال، کمباین

مقدمه

یکی از ناهنجارترین پدیده‌های قرن حاضر سر و صدا است که منابع آن پیرامون زندگی انسان به صورت روز افزونی در حال افزایش بوده و می‌تواند در نقش منبعی برای صدمات و اختلالات جسمی و روانی عمل نماید (Depczynski et al., 2011). ورود تراکتورها، کمباین‌ها و ماشین‌های کشاورزی به مزرعه، مشکلات بسیاری را در ارتباط با ایمنی و سلامت شغلی حاصل از کار این دستگاه‌ها برای کاربران آن‌ها و نیز کارگران مشغول به کار در مزرعه به وجود آورده است که از آن جمله می‌توان به سر و صدا و ارتعاش حاصل از کار این ادوات اشاره نمود (Solecki, 2000; Brown, 1998). امروزه تحقیقات متعددی در مورد منبع سر و صدا، نوع آن و اثرات آن در ارتباط با مدت زمان انتشار صورت گرفته است. این تحقیقات باید تا تعیین این که کدام نوع ماده جاذب، در چه تراز فشار صدایی باعث کاهش در مقیاس صدای مینا شنوایی می‌گردد، ادامه پیدا کنند (Aybek et al., 2010). استفاده از هندسه فرکتالی روشی نوین در

این حوزه است.

اصطلاح فرکتال را مندلبروت^۳ در سال ۱۹۷۵ ابداع کرد. فرکتال‌ها در معادلاتی که حرکت بی‌نظم دارند مثل آب و هوا، اقتصاد، سیگنال‌های مغزی، قلبی و صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kantz and Scheriber, 1997). برای درک هندسه فرکتالی باید راهی یافته شود که بتوان پیچیدگی شکل را در قالب عدد نشان داد. این عدد همان بعد فرکتالی است. فرکتال‌ها چه طبیعی باشند و چه مصنوعی، همه بعد خاصی دارند. بعد فرکتال اطلاعات نهفته در سیستم را آشکار می‌کند (Berreto and Hunt, 1999). بعد فرکتال موج یک ابزار قوی برای تشخیص ناپایداری سیگنال می‌باشد. آنالیز بعد فرکتال غالباً برای تشخیص حالت‌های خاص توابع فیزیولوژیکی، پردازش سیگنال‌های بیوالکترونیک و به‌طور ویژه در آنالیز الکتروکاردیوگرام و آنالیز سیگنال EEG^۴ کاربرد دارد (Paramanathan and Uthayakumar, 2008).

نتایج پژوهش ملکی و لشگری نشان داد که برای کمباین‌های سمپو و جاندر تر از فشار صدا با توجه به افزایش بسامد روند کاهشی داشته است. همچنین بیشینه تراز فشار صدای کمباین‌های جاندر و سمپو به ترتیب برابر ۱۱۶ دسی‌بل در بسامد ۲۵۰ هرتز و ۱۱۱/۱

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(Email: Maleki_ali@iran.ir)

*- نویسنده مسئول:

3- Mandelbrot

4- Electroencephalogram

گاه‌پران‌ها، الک‌ها و دمنده دارای حرکت بودند. پس از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات به‌دست آمده، داده‌ها به کمک نرم‌افزار SPSS.۲۰ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. شکل ۱ بخشی از سیگنال ضبط شده در دور تند، دنده یک و در حالت برداشت را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که سیگنال‌های صوتی براساس استانداردهای سازمان بین‌المللی (ISO 5131 and ISO 7216) استاندارد تهیه گردیده است. برای این منظور در زمان آزمون، سرعت باد توسط بادسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد که در تمامی آزمایش‌ها کمتر از ۵ متر بر ثانیه به ثبت رسید. با توجه به اینکه تمامی آزمایش‌ها در فصل تابستان انجام گرفتند، لذا دمای هوای محیط نیز همواره بیشتر از ۵ درجه سانتی‌گراد بود که هر دو مقوله سرعت باد و دمای محیط در زمان آزمایش، کاملاً مطابق با شرایط مندرج در مقررات استاندارد بودند.

به‌منظور دستیابی به بعد فرکتال سیگنال‌های صوتی، سطح کل شکل موج توسط جعبه‌هایی با ابعاد ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌ثانیه به اجزاء کوچک‌تری تقسیم شد. میان هر کدام از جعبه‌ها نیز فاصله‌ای برابر ۲۵ میلی‌ثانیه لحاظ گردید. سپس با استفاده از روش‌های کاتز، سویک، هیگوجی و MRBC^۳ بعد فرکتال برای هر کدام از این پنجره‌ها محاسبه گردید. شکل ۲ نمونه‌ای از نحوه توزیع پنجره‌ها را نشان می‌دهد.

تئوری تحقیق

در سیستم‌های فیزیکی، خاصیت خود متشابهی در اجسام فرکتال محدوده مقیاسی بیشینه و کمینه‌ای دارد. هنگامی که یک رخداد مانند سیگنال‌های فیزیولوژیکی در طبیعت اتفاق می‌افتد، به‌طور دقیق خود را بر روی مقیاس‌های مختلف تکرار می‌کند. دیدگاه تشکیل‌دهنده تخمین مستقیم بعد فرکتال در حوزه زمان یا در حوزه اصلی شکل موج به نحوی است که شکل موج و یا سیگنال اصلی به‌صورت یک شکل هندسی در نظر گرفته می‌شود (Gnitecki and Moussavi, 2005). برای این اساس برای محاسبه بعد فرکتال سیگنال‌ها از نرم‌افزار MATLAB (R2010a) استفاده شد.

دسی‌بل در بسامد ۴۰ هرتز است (Maleki and Lashgari, 2014). در پژوهشی روش جدیدی برای محاسبه بعد فرکتال شکل‌موج مطرح شد. الگوریتم مطرحی نسبت به الگوریتم هیگوجی^۱ دارای سرعت بیشتر و ملاک سنجش دقیق‌تری برای تعیین K_{min} و K_{max} می‌باشد (Paramanathan and Uthayakumar, 2008).

روش تشخیص صدای منتشر شده برای مطالعه آرایش ترک‌های ناشی از خستگی و انتشار آن‌ها بر روی فلز استیل توسط (Biancolini et al., 2006) استفاده شد. آنها با استفاده از آنالیز فرکتال و روش شمارش جعبه^۲ به توصیف خصوصیات پخش‌شدگی فضایی منبع صدا پرداختند. در نتیجه نشان داده شد که بین آسیب خستگی مواد با پارامترهای میکروسکوپی و بعد فرکتال سیگنال‌های صوتی منتشره از آن‌ها همبستگی وجود دارد.

از بعد فرکتال در علم پردازش سیگنال، جهت تشخیص ترک در دیواره لوله‌ها نیز استفاده می‌گردد (Shoupeng and Peiwen, 2007). این پژوهشگران بعد فرکتال سیگنال‌های فراصوت مربوط به عیوب مختلف لوله‌هایی از جنس فولاد سخت و آلومینیوم را با استفاده از روش شمارش جعبه محاسبه نمودند.

انتقال صدا از میان صفحات سوراخ‌دار فرش سرپینسکی به‌عنوان هندسه فرکتال توسط گومز لوزانو و همکاران بررسی شد. نتایج نشان داد که می‌توان در آینده بر این اساس اقدام به ساخت فیلترهای فراصوت نمود. آنالیز فرکتالی برای استخراج خصوصیات سیگنال‌های صوتی مشخصه‌ای مفید است. بنابراین تمرکز اولیه این مطالعه بر روی فرکتال طبیعی سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو می‌باشد و هدف استفاده از روش‌های کاتز، سویک، هیگوجی و MRBC^۳ به‌منظور محاسبه بعد فرکتال، سیگنال‌های صوتی منتشرشده از کمباین سمپو تحت شرایط عملکردی مختلف است (Gómez-Lozano et al., 2013).

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو ۳۰۶۵ که حاصل فعالیت پژوهشی ملکی و لشگری می‌باشد، استفاده گردید (Maleki and Lashgari, 2014). جدول ۱، متغیرها و سطوح آنها را نشان می‌دهد.

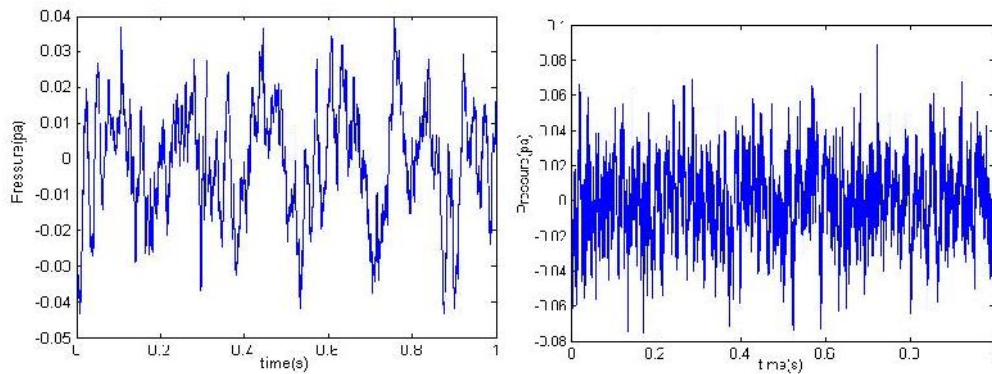
لازم به ذکر است که وضعیت عملیات در سطح حرکت آزاد بیانگر حالتی است که کمباین تنها دارای حرکت انتقالی بوده و تمامی اجزای سیستم برداشت غیرفعال بودند و وضعیت برداشت بیانگر حالت بدون بار و هنگامی است که علاوه بر این که کمباین دارای حرکت انتقالی بوده، تمامی اجزای سیستم برداشت از قبیل سکوی برش، کوبنده،

1- Higuchi
2- Box-counting method

جدول ۱- سطوح مختلف متغیرهای اندازه‌گیری شده

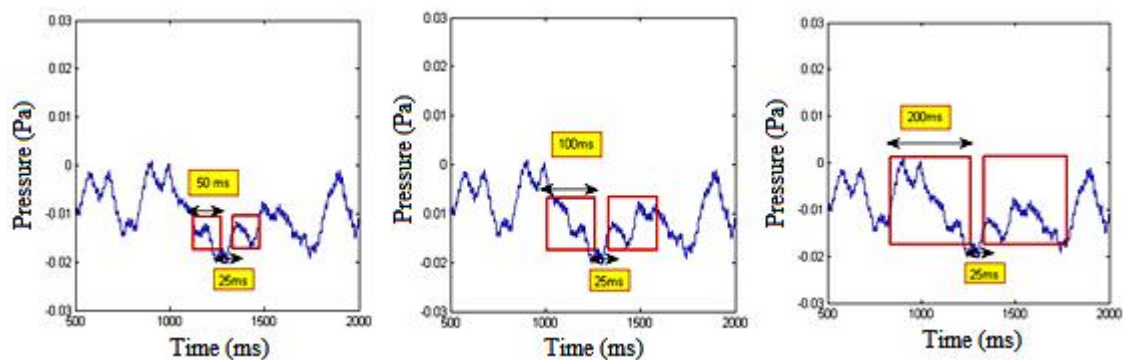
Table 1- Levels of measured parameters

متغیرها Parameters	سطوح متغیرها Levels of parameters			
دور موتور Engine speed	آرام (۱۲۵۰ دور بر دقیقه) Low (1250 rpm)	تند (۲۵۰۰ دور بر دقیقه) High (2500 rpm)		
نسبت دنده Gear ratio	پارک Park Gear	۱ سنگین 1st Gear	۲ سنگین 2nd Gear	۳ سبک 3rd Gear
وضعیت عملیات Type of operation	حرکت آزاد Travelling	هنگام برداشت Harvesting		
موقعیت میکروفن Microphone position	در کابین In the cabin	بیرون کابین Out the cabin		
طول جعبه‌ها Box length	۵۰ میلی ثانیه 50 (ms)	۱۰۰ میلی ثانیه 100(ms)	۲۰۰ میلی ثانیه 200(ms)	
روش‌های محاسبه Methods of calculation	کاتز Katz	سویک Sevcik	هیگوچی Higuchi	MRBC (Multiresolution Box-counting)



شکل ۱- نمونه سیگنال‌های صوتی کم‌باین. موقعیت گوش راننده داخل کابین (راست). موقعیت گوش راننده بدون کابین (چپ)

Fig.1. The sample of combine sound signals near operator ear with cabin (right), without cabin (left)



شکل ۲- نحوه توزیع جعبه‌ها بر روی سیگنال صوتی. توزیع جعبه ۵۰ میلی‌ثانیه‌ای (چپ)، توزیع جعبه ۱۰۰ میلی‌ثانیه‌ای (وسط)، توزیع جعبه ۲۰۰ میلی‌ثانیه‌ای (راست)

Fig.2. Box distribution arrays on the sound signals. 50ms box length (left), 100ms box length (middle), 200ms box length (right)

روش کاتز^۱

برای تعیین بعد فرکتال در این روش شکل موج‌ها به صورت منحنی‌های مسطحی هستند که از زوج مرتب‌های (y و x) تشکیل شده‌اند و مقدار x به صورت تک واحدی افزایش پیدا می‌کند. برای تشخیص بعد فرکتال شکل موج‌ها در روش کاتز از رابطه (۱) استفاده می‌گردد:

$$FD = \log(n) / (\log(n) + \log(d/L)) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، n تعداد مراحل در شکل موج، d توسعه فضایی شکل موج است و L طول کلی شکل موج است. بر این اساس شکل موج دارای گستره بعد فرکتالی از ۱ برای خطوط مستقیم تا ۱/۵ برای موج‌های بیشتر به هم پیچیده می‌باشد (Katz, 1998).

روش سویک (Sevcik)

در سال ۱۹۹۸ کارلوس سویک^۲ تغییراتی را در روش کاتز به وجود آورد، که شامل نرمال‌سازی محورهای X و Y قبل از محاسبه بعد فرکتال است.

$$x_i^* = \frac{x_i}{x_{max}} \quad (2)$$

$$y_i^* = \frac{y_i - y_{max}}{y_{max} - y_{min}} \quad (3)$$

که در این روابط x_i و y_i مختصات نقطه نام را مشخص می‌کنند و همچنین اندیس max و min به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار در هر پنجره هستند. لذا اگر طول کل سیگنال که حاوی N نمونه است L باشد، بعد فرکتال به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$FD = 1 + \frac{\ln(L) + \ln(2)}{\ln(2N^*)} \quad (4)$$

و مقدار $N^* = N - 1$ است (Sevcik, 1998).

روش هیگوچی^۳

در این روش بعد فرکتال شکل موج‌ها به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. اگر $x(1), x(2), \dots, x(N)$ سری زمانی تحت آنالیز باشد، سری زمانی جدید x_m^k طبق رابطه (۵) ساخته می‌شود (Higuchi, 1998):

$$x_m^k = \left\{ x(m), x(m+k), x(m+2k), \dots, x\left(m + \left[\frac{N-m}{k}\right]k\right) \right\} \quad (5)$$

$m = 1, 2, \dots, k$

m مقدار زمان اولیه، k فاصله زمانی مجزا بین نقاط (تأخیر) و [a] جزء صحیح a را مشخص می‌کند. برای هر منحنی یا سری زمانی، x_m^k ساخته شده و طول میانگین به صورت $L_m(k)$ با رابطه (۶)

تعریف می‌شود:

$$L_m(k) = \frac{\sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} |x(m+ik) - x(m+(i-1)k)|(n-1)}{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor k} \quad (6)$$

N طول کامل جماعات داده‌های x و $(N-1)/[(N-m)/k]$ فاکتور نرمال‌سازی است. طول میانگین برای کلیه سری‌های زمانی دارای تأخیر k یکسان محاسبه می‌شود. این فرآیند برای همه k‌ها از دامنه ۱ تا k_{max} تکرار می‌شود. مجموع میانگین طول‌ها برای هر k با رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$L(k) = \sum_{m=1}^k L_m(k) \quad (7)$$

مجموع میانگین طول‌ها برای مقیاس k و $L(k)$ متناسب با k^{-D} است و در حقیقت D بعد فرکتال به روش هیگوچی می‌باشد. در منحنی $\ln(L(k))$ در مقابل $\ln(1/k)$ شیب خط حداقل مربعات خطی که بهترین تطبیق با نمودار را داشته باشد، تخمینی از بعد فرکتال است (Higuchi, 1998).

روش MRBC^۴

در این روش فرض می‌شود که سیگنال مورد بررسی به صورت $s = \{s(1), s(2), \dots, s(N)\}$ با فرکانس نمونه‌گیری f_s و N تعداد کل نقاط نمونه سیگنال است. حال در مرحله اول دو نقطه متوالی $S(i)$ و $S(i+1)$ را بر روی نمودار در نظر می‌گیریم. فاصله زمانی بین این دو نقطه از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$dt = x(i+1) - x(i) = \frac{1}{f_s} \quad (8)$$

ارتفاع بین این نقاط $h = y(i+1) - y(i)$ است. اندازه جعبه‌های مورد نیاز برای پوشش بین این دو نقطه dt و تعداد جعبه به این اندازه برای پوشش نقاط $b(i) = \lceil |h|/dt \rceil$ است. بزرگترین عدد نزدیک به a است. اکنون مقدار $y(i+1)$ به صورت رابطه (۹) تصحیح می‌شود.

$$\text{اگر } h > 0 \Rightarrow y(i+1) = y(i) + |h| - dt \quad (9)$$

$$\text{اگر } h < 0 \Rightarrow y(i+1) = y(i) - |h| - dt$$

این فرآیند برای کلیه نقاط روی منحنی تکرار می‌شود تا به نقطه نهایی دست یابیم. تعداد کل جعبه‌های مورد نیاز برای پوشش کامل منحنی با دقت r برابر است با:

$$B(r) = \sum(b(i)), i = 1, 2, \dots, N - 1$$

در مرحله بعد منحنی با دقت کمتری تقسیم‌بندی می‌شود، به عبارتی نقاط روی محور زمان در منحنی به صورت یک در میان در نظر گرفته می‌شوند. یعنی $r = 2/fs$. اکنون اندازه جعبه‌های مورد

1- Katz

2- Carlos Sevcik

3- Higuchi

4- Multiresolution Box-counting

نیاز برای پوشش کامل منحنی به صورت $dt = 2/fs$ است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس میانگین‌های اثرات دور موتور، وضعیت، موقعیت میکروفن، دنده، طول جعبه و روش محاسبه بر بعد فرکتال و زمان سپری شده

Table 2- ANOVA results of engine speed, position of the microphone, the box length and the method of calculating means effects on the fractal dimension and the elapsed time

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	
		بعد فرکتال Fractal dimension	زمان سپری شده Elapsed time
دور موتور Engine speed	1	29.209**	0.042**
وضعیت عملیات Operation	1	71.16**	6.75×10 ^{-5ns}
موقعیت میکروفن Mic Position	1	681.11**	0.095**
نسبت دنده Gear	3	5.087**	0.015**
طول جعبه‌ها Box Length	2	11.24**	819.06**
روش‌های محاسبه Methods of Calculation	3	143.37**	641.21**
دورموتور × دنده Engine Speed × Gear	3	0.066**	0.013**
دور موتور × وضعیت عملیات Engine Speed × Operation	1	2.66**	0.002**
دور موتور × موقعیت میکروفن Engine Speed × MicPosition	1	339.36**	0.855 ^{ns}
دور موتور × طول جعبه‌ها Engine Speed × Box Length	2	0.119**	0.018**
دور موتور × روش محاسبه Engine Speed × Method	3	9.394**	0.005**
نسبت دنده × وضعیت عملیات Gear × Operation	3	0.783**	0.005**
نسبت دنده × موقعیت میکروفن Gear × MicPosition	3	0.835**	0.001**
نسبت دنده × طول جعبه Gear × Box Length	6	0.015**	0.003**
نسبت دنده × روش‌های محاسبه Gear × Method	9	0.690**	0.010**
وضعیت عملیات × موقعیت میکروفن Operation × MicPosition	1	33.53**	0.004**
وضعیت عملیات × طول جعبه Operation × Box Length	2	0.289**	5.23×10 ^{-5 ns}
وضعیت عملیات × روش محاسبه Operation × Method	3	6.177**	3.46×10 ^{-4 ns}
موقعیت میکروفن × طول جعبه MicPosition × Box Length	2	0.06**	0.021**
موقعیت میکروفن × روش محاسبه MicPosition × Method	3	26.29**	0.019**
طول جعبه × روش محاسبه Box Length × Method	6	7.71**	160.41**

**معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪، *معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ و ^{ns}: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

می‌باشد. در حالت پارک تنها موتور کمباین به‌عنوان منبع مولد صدا مطرح است، اما در هنگام قرارگیری کمباین در وضعیت درگیری دنده، صدایی توسط سیستم انتقال توان ایجاد می‌شود که امواج صوتی حاصل از سیستم انتقال توان که با صدای اصلی اختلاف فاز دارند، باعث کاهش آشفته‌گی‌های صدای اصلی می‌شوند و در نتیجه مقدار بعد فرکتال کاهش می‌یابد. در ضمن با توجه به شکل ۳، راست، با افزایش دنده در یک دور مشخص مقدار بعد فرکتال کاهش می‌یابد.

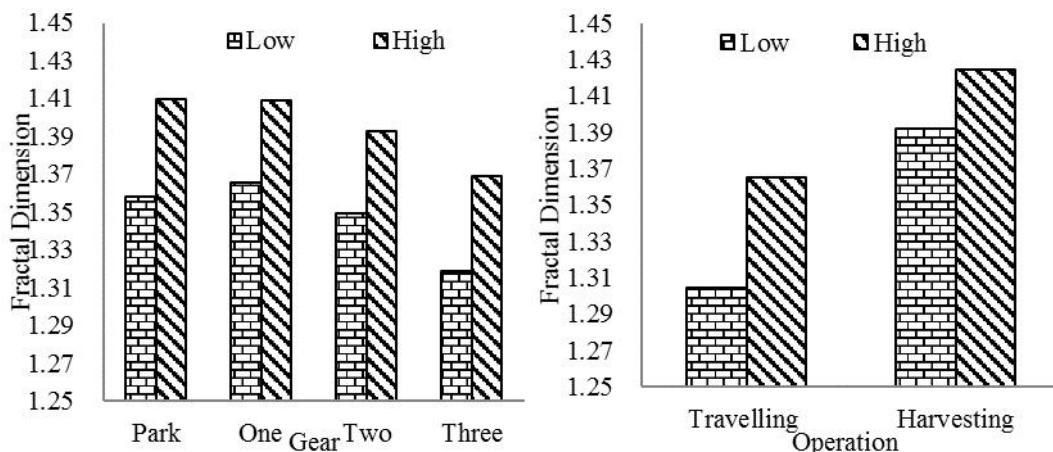
با توجه به شکل ۳، سمت چپ، در حالت برداشت نسبت به حالت آزاد مقادیر بعد فرکتال بزرگتری داریم. با توجه به اینکه در هنگام برداشت محصول، قطعات مرتبط با واحد بردارنده، کوبنده، تمیزکننده و انتقال دهنده نیز مشغول به کار می‌شوند و حرکت این مجموعه‌ها به علت تماس قطعات فلزی با هم باعث افزایش تراز فشار صدا می‌گردد، پیش‌بینی افزایش بعد فرکتال امری بدیهی است. نتایج حاصل نیز در دور موتور کم نشان می‌دهد که مقدار میانگین بعد فرکتال در هنگام برداشت ۱/۳۹۷ است، اما در حالت حرکت آزاد مقدار آن ۱/۲۹۵ است. همچنین نسبت رشد بعد فرکتال در هنگام تغییر دور موتور در حرکت آزاد مقدار بزرگتری را به‌خود اختصاص داده است. با توجه به تعریف تراز فشار صدا و این که با افزایش دور موتور تراز فشار صدا در هر دنده‌ای افزایش می‌یابد (Dewangan *et al.*, 2005)، می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که با افزایش دور موتور میزان اغتشاش امواج بیشتر می‌شود، که این آشفته‌گی در سیگنال‌های صوتی به‌صورت افزایش بعد فرکتال بروز می‌یابد.

با تکرار مراحل فوق برای دقت‌های زمانی متعدد، تعداد جعبه‌های $B(r)$ برای پوششش منحنی در $r = 1/fs, 2/fs, \dots, R/fs$ به‌دست می‌آید که بیشینه مقدار دقت زمانی است و نهایتاً منحنی در آن قرار می‌گیرد. در نهایت شیب نمودار $\log(B(r))$ در مقابل $\log(1/r)$ تخمینی از بعد فرکتال سیگنال زمانی به روش MRBC است (Raghavendra and NarayanaDutt, 2010).

نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس مربوط به بعد فرکتال و زمان صرف‌شده در سطوح مختلف را نشان می‌دهد. این جدول اثرات اصلی و برهم‌کنش تیمارهای موجود را نشان می‌دهد. در ضمن از اثرات برهم‌کنش سه‌گانه صرف نظر شده است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که اثرات دور موتور، وضعیت، موقعیت میکروفن، دنده، طول جعبه و روش محاسبه بر بعد فرکتال و زمان سپری‌شده در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند. کلیه اثرات متقابل دوگانه بر بعد فرکتال در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند. اثرات وضعیت، اثر متقابل دور موتور در موقعیت میکروفن، وضعیت در روش و وضعیت در طول جعبه بر زمان سپری‌شده، معنی‌دار نبوده است.

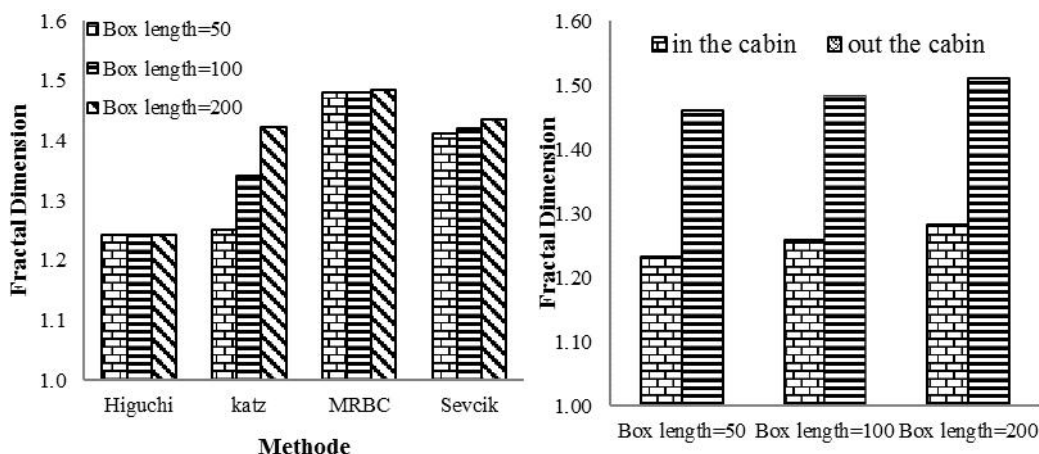
اثرات برهم‌کنش سطوح عامل نسبت دنده و دور موتور در شکل ۳، سمت راست، نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش دور موتور در دنده‌های ذکر شده نسبت تغییرات میانگین بعد فرکتال به‌ترتیب ۱/۰۳۸، ۱/۰۳۱، ۱/۰۳۱ و ۱/۰۳۷ است که بیشترین افزایش بعد فرکتال در حالت تغییر دور موتور مربوط به وضعیت دنده پارک



شکل ۳- اثر برهم‌کنش میانگین‌های سطوح عامل نسبت دنده و دور موتور (راست) و وضعیت عملکرد و دور موتور (چپ) بر بعد فرکتال

Fig.3. Interaction means effect of the gear ratio and engine speed (right) and operation and engine speed (left) on fractal dimension

(شکل ۴-راست). به عبارتی با افزایش طول جعبه‌ها و تعداد داده‌های موجود در هر جعبه مقدار بعد فرکتال افزایش می‌یابد (شکل ۴-چپ). این امر با نتایج حاصل از آزمایشات جنیتکی و موسوی (۲۰۰۵) مطابقت کامل دارد.



شکل ۴- اثر برهم‌کنش میانگین‌های سطوح عامل روش‌های محاسبه و طول جعبه بر مقدار بعد فرکتال (راست) و عامل وجود کابین و طول جعبه بر مقدار بعد فرکتال (چپ)

Fig.4. Interaction means effect of the method of calculation and the box length on the fractal dimension (right), and presence of the cabin and the box length on the fractal dimension (left)

مدت زمان محاسبه

بدیهی است که با افزایش طول جعبه به دلیل قرارگیری تعداد داده بیشتری در جعبه‌ها فرآیند اندازه‌گیری بعد فرکتال زمان بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد که این امر در شکل ۵ سمت راست به‌طور کامل نشان داده شده است. از طرفی در حالتی که کمباین در وضعیت برداشت قرار دارد فرآیند اندازه‌گیری زمان بیشتری را به خود اختصاص خواهد داد. که این امر به این دلیل است که در هنگام برداشت سیگنال‌های صوتی منتشره از کمباین بازه فشاری بزرگتری را به خود اختصاص می‌دهد. در کلیه وضعیت‌های بررسی شده روش کاتز سریعترین روش برای محاسبه بعد فرکتال است (شکل ۵- سمت چپ) و روش هیگچی زمان‌برترین روش است.

نتیجه‌گیری

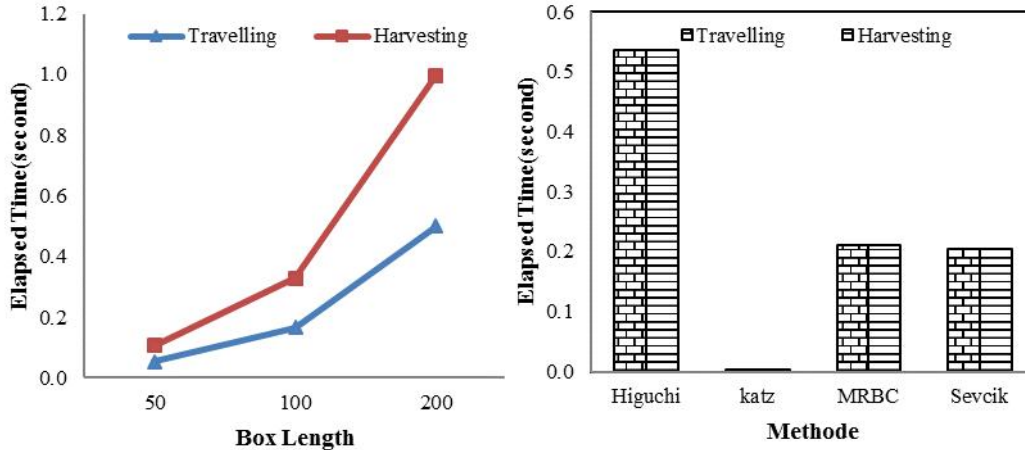
جهت طراحی مناسب وسایل کنترل صدا در کابین کمباین‌ها بر اساس علم هندسه فرکتالی، در ابتدا نیاز است تا مفاهیم مرتبط با بعد فرکتال سیگنال‌های صوتی در حالت‌های مختلف عملکرد این ماشین مطالعه شود. بر این اساس، هدف این پژوهش محاسبه بعد فرکتال سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو در حالت‌های مختلف است. استفاده از مفاهیم هندسه فرکتال در بررسی سیگنال‌های صوتی در مورد ماشین‌های کشاورزی برای اولین بار بوده که انجام شده است و امید است که این پژوهش گام اول در طراحی

مقدار میانگین بعد فرکتال محاسبه شده با روش کاتز برای سیگنال صوتی در جعبه‌هایی با طول ۵۰ میلی ثانیه ۱/۲۵ است. این در حالی است که در جعبه‌هایی با طول ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌ثانیه به ترتیب مقادیر میانگین بعد فرکتال برابر ۱/۳۴ و ۱/۴۲ می‌باشد

در کمباین همراه با کابین تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر سطح فشار صدا نسبت به کمباین‌های بدون کابین وجود دارد که علت این برتری عایق‌گذاری مواد استفاده شده در کابین‌ها می‌باشد که باعث می‌گردد کابین به‌عنوان مانعی در مسیر جریان صوت عمل کرده و باعث کاهش میزان سطح فشار صدا گردد. طبق شکل ۴ سمت چپ مقادیر بعد فرکتال در موقعیت گوش راننده بدون کابین بزرگتر از موقعیت گوش راننده با کابین است. به عبارتی وجود کابین در کمباین باعث کاهش بعد فرکتال صدای رسیده به گوش راننده می‌گردد. شکل ۴، سمت راست روش‌های بررسی شده برای تعیین بعد فرکتال سیگنال‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشهود است در روش هیگچی با افزایش طول جعبه‌ها تفاوت چندانی در مقادیر بعد فرکتال سیگنال حاصل نشده است، اختلاف بین بیشینه و کمینه مقدار بعد فرکتال در روش هیگچی، کاتز، MRBC و سویک در هنگام رشد طول جعبه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۱۷۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۲۴ است. به عبارتی روش کاتز بیشترین حساسیت را نسبت به افزایش طول جعبه‌ها از خود نشان می‌دهد. استفاده از روش MRBC به دلیل روند طی شده در حین محاسبه بعد فرکتال و تفاوت موجود در روابط منجر به دست‌یابی به بعد فرکتال بزرگتری شده است و همانند روش هیگچی حساسیت کمتری در تغییر بعد فرکتال نسبت به تغییر اندازه جعبه‌ها دارد.

مختلف عملکرد در حوزه زمان بررسی گردید.

جاذب‌های فرکتالی مناسب ماشین‌های کشاورزی باشد. در این پژوهش با استفاده از روش کاتز، سویک، هیگوچی و MRBC مشخصات فرکتالی سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو در شرایط



شکل ۵- اثر تغییر طول جعبه بر مدت زمان محاسبه (راست) و روش محاسبه بر مدت زمان محاسبه (چپ) در دو وضعیت عملیات

Fig.5. Effect of box length change on the calculation time (right) and Calculation method on the calculation time (left) in two operation conditions

نسبت دنده عامل دیگری در بروز اختلاف معنی‌دار در بعد فرکتال صدای کمباین است به نحوی که با تغییر دنده از حالت پارک به دنده یک سنگین اختلاف معنی‌داری به وجود نیامده، ولی از دنده یک سنگین به دنده دو سنگین این اختلاف قابل ملاحظه بوده، که ناشی از صدای تولید شده با سیستم انتقال قدرت وسیله است که منجر به تغییر معنی‌دار بعد فرکتال می‌شود.

سپاسگزاری

از کلیه حمایت مالی و فنی دانشگاه شهرکرد و همچنین آقای دکتر مجید لشگری استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه اراک برای همکاری در فراهم آوردن اطلاعات موردنیاز صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

در نهایت مقدار بعد فرکتال برای حالت‌های مختلف مقادیری بین ۱ تا ۱/۵ را به خود اختصاص داد. البته بیشینه مقدار بعد فرکتال معادل ۱/۶۳۰ و مربوط به حالت کمباین بدون کابین و با استفاده از روش MRBC به دست آمد. نتایج نشان داد با افزایش اندازه جعبه‌ها و رشد تعداد داده‌های موجود در آنها مقدار بعد فرکتال افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تراز فشار صدای ساطع شده از کمباین به دلایل افزایش دور موتور، راه‌اندازی قسمت‌های برداشت کمباین در حالت بدون باراز قبیل سکوی برش، کوبنده، کاه‌پران‌ها، الک‌ها و دمنده مقدار بعد فرکتال افزایش یافته است. در دنده سه، کمترین مقدار میانگین بعد فرکتال حاصل شده است. البته آنچه در اثر تغییر نسبت جعبه دنده، منجر به ایجاد تغییر در تراز فشار صدا می‌شود، می‌تواند مربوط به اثرات آگزوز موتور در کمباین باشد.

References

1. Aybek, A. H., A. Kamer, and S. Arslan. 2010. Personal noise exposures of operators of agricultural tractors. *Applied Ergonomics* 41: 274-281.
2. Berreto, E., and B. R. Hunt. 1999. Box counting dimension without boxes: Computing D, from average expansion rates. *Physical Review* 60: 378-385.
3. Biancolini, M. E., C. Brutti, G. Paparo, and A. Zanini, 2006. Fatigue cracks nucleation on steel, acoustic emission and fractal analysis. *International Journal of Fatigue* 28: 1820-1825.
4. Brown R. H. 1998. *Handbook of Engineering in Agriculture*. 1st ed., Prentice & Hall press. U. K.
5. Depczynski, J., K. Challinor, and L. Fragar. 2011. Changes in the hearing status and noise injury prevention practices of Australian farmers from 1994 to 2008. *Journal. Agromedicine* 16 (2): 127-142.
6. Dewagan K., G. Kumar, and V. Tewari. 2005. Noise characteristics of tractors and health effect on farmers. *Applied Acoustics* 66: 1049-1062.

7. Gnitecki J., and Z. Moussavi. 2005. The fractality of lung sounds: A comparison of three waveform fractal dimension algorithms. *Chaos, Solitons and Fractals* 26: 1065-1072.
8. Gómez-Lozano, V., A. Uris, P. Candelas, and F. Belmar. 2013. Acoustic transmission through perforated plates with fractal subwavelength apertures. *Solid State Communications* 165: 11-14.
9. Higuchi, T. 1998. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica* 31:277-283.
10. ISO 5131. 1996. Acoustics: Tractors and machinery for agriculture and forestry measurement of noise at
11. ISO 7216. 1992. Acoustics: Agricultural and forestry wheeled tractors and self-propelled machines.
12. Kantz, H., and T. Schreiber. 1997. *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press.
13. Katz, M. J. 1998. Fractals and the analysis of waveforms. *Computer Bio Medicine* 18: 145-156.
14. Maleki, A., and M. Lashgari. 2014. Analysis of combine harvester sound pressure level in onethird octave band frequency. *Journal of Agricultural Machinery* 4(2): 154-165. (In Farsi).
15. Paramanathan, P., and R. Uthayakumar. 2008. An algorithm for computing the fractal dimension of waveforms. *Applied Mathematics and Computation* 195: 598-603.
16. Raghavendra, B. S., and D. NarayanaDutt. 2010. Computing fractal dimension of signals using Multiresolution Box-Counting method. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 37: 1266-1281.
17. Sevcik, C. A. 1998. Procedure to estimate the fractal dimension of waveforms. *Complexity International* 5: 124-136.
18. Shoupeng, S., and Q. Peiwen. 2007. A Fractal-Dimension-Based Signal-Processing Technique and Its Use for Nondestructive Testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing* 43: 270-280.
19. Solecki, L. 2000. Duration of exposure to noise among farmers as an important factor of occupational risk. *Ann agricultural and environmental medicine* 7: 89-93.

Fractal analysis of sound signals in SAMPO 3065 combine harvester

F. Mahdiyeh Boroujeni¹- A. Maleki^{2*}

Received: 13-02-2015

Accepted: 21-12-2015

Introduction

Nowadays, many studies were performed about noise source and its type and effects related to duration of sound emission. Most of these researches just report sound pressure level in frequency or time domain. These researches should be continued in order to find better absorber material in noise pollution. Use of fractal geometry is a new method in this field. Wave fractal dimension value is a strong tool for diagnosis of signal instability and fractal analysis is a good method to finding sound signal characteristics. Therefore the aim of this study is on the fractal geometry of SAMPO 3065 combine harvester signals and determine the fractal dimension value of these signals in different operational conditions by Katz, Sevcik, Higuchi and MRBC methods.

Materials and Methods

In this research, sound signals of SAMPO 3065 harvester combine that were recorded by Maleki and Lashgari (2014), were analyzed. Engine speed (high and low), gear ratio (neutral, 1st, 2nd, 3rd gear), type of operation (traveling and harvesting) and microphone position (in and out of the cabin) were the main factors of this research. For determining signal fractal dimension value in time domain, wave shape supposed as a geometrical shape and for calculation of fractal dimension value of these signals, total area of wave shape was divided into boxes in 50, 100, 200 milliseconds with an interval 25 millisecond box. Then Fractal dimension value of these boxes was calculated by Katz, Sevcik, Higuchi and MRBC methods using MATLAB (2010a) software. SPSS (Ver.20) software was used for further analysis.

Results and Discussion

Results showed mean effects of engine speed, microphone position, gear ratio, type of operation, box length, calculation method and all of two way interaction effects were significant ($p < 0.01$). Means of Fractal Dimension in the road and field position were 1.4 and 1.28 respectively. The Maximum growth ratio of fractal dimension value during engine speed levels was related to road position. By increasing of box length and number of data points in each box, the fractal dimension value was increased. Investigation of fractal dimension methods showed changes of box length did not affect fractal dimension value in Higuchi method and range of this factor while box length varied were 0.001, 0.171, 0.005 and 0.024 in Higuchi, Katz, MRBC and Sevcik method respectively. These results showed that Katz method has maximum sensitivity and MRBC method like Higuchi method had the minimum sensitivity by changing of box length. In this research fractal dimension value of SAMPO Combine signals in the time domain in different operation conditions were investigated by Katz, Sevcik, Higuchi and MRBC methods. These values varied from 1 to 1.5 in different conditions. Maximum fractal dimension value was 1.63 in case of no cabin by MRBC method. Increasing of box length or further the data point cause of increasing fractal dimension value with increasing of sound pressure level of combine due to increasing of engine speed and working of different parts of harvesting combine. Due to define of sound pressure level, and increasing of this item in each gear ratio, this can be justify that in high engine speed, wave turbulent is higher than low speed and this turbulent appeared in fractal dimension value.

Conclusions

One of the important factors in the evaluation of the time series disturbance is fractal dimension. Therefore, the study of sound signals can be an effective role in this regard. Factors such as the cabin existence, gear type, engine speed and operational state of combining parts had a considerable role in distribution of combining

1- M.Sc. Graduated Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
(*- Corresponding Author Email: Maleki_ali@iran.ir)

sound signals and fractal dimension of these signals. For example cabin acts as a barrier in the sound wave and decrease the sound pressure level near driver ear and cause decrease fractal dimension of signals.

The study of time series with different lengths have shown that the duration time of the calculation in various methods had a significant effect. Increasing the length of signals due to a higher number of signal data cause to increase calculation time of fractal dimension calculation, while the changes of fractal dimension in increasing of the number of data is minimum and negligible. Therefore, the choice of the appropriate length of the signal is important.

Keywords: Acoustic, Combine, Fractal Dimension, Signals

شبیه‌سازی عددی فرآیندهای انتقال رطوبت و گرما در خشک کردن همرفتی هویج پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند و مایکروویو

رضا رستمی باروجی^۱ - سیدصادق سیدلو هریس^{۲*} - جلال دهقان‌نیا^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۴

چکیده

خشک کردن مواد غذایی، میوه‌ها و سبزی‌ها یک روش مناسب برای کاهش ضایعات پس از برداشت این محصولات می‌باشد. هدف از این پژوهش، مطالعه عددی و تجربی انتقال گرما و رطوبت طی فرآیند خشک کردن همرفتی هویج بود. نمونه‌های هویج تحت پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و نیز پیش‌تیمار مایکروویو با توان یک وات بر گرم به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند. شبیه‌سازی ناپایا و سه بعدی انتقال همزمان رطوبت و گرما با مجموعه‌ای از شرایط اولیه و مرزی با روش اجزا محدود صورت گرفت. تأثیر پیش‌تیمارهای مذکور در قالب ضریب انتشار مؤثر رطوبت اصلاح شده در معادلات انتقال جرم و حرارت لحاظ شد. نتایج نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو باعث کاهش رطوبت اولیه محصول و افزایش جزئی این ضریب می‌شود، به طوری که ضریب انتشار رطوبت در بدون استفاده از پیش‌تیمار به مقدار ۷/۶۲ مترمربع بر ثانیه و در استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند و مایکروویو به ترتیب ۹/۰۹ و ۷/۷۲ متر مربع بر ثانیه بود. زمان خشک شدن نمونه‌ها به‌طور میانگین با استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند ۱۵/۳ درصد (۳۱ دقیقه) کاهش یافت. مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده پروفیل‌های رطوبت و گرما نشان دادند که مدل‌سازی مذکور توانسته با دقت قابل قبولی، ضریب همبستگی بالای ۹۹/۹۰ درصد و خطای متوسط ۹ درصد، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را پیش‌بینی نماید. بنابراین این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسب در بهینه‌سازی طراحی و تعیین بهینه پارامترهای عملکردی خشک‌کن استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال جرم و حرارت، اولتراسوند، ضریب نفوذ رطوبت، مدل‌سازی

مقدمه

همزمان گرما و رطوبت ما بین هوای گرم و ماده غذایی جهت تبخیر آب و رسیدن رطوبت آن به حد مورد نظر می‌باشد. خشک کردن با جریان هوای گرم علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما، صرف نظر از اندازه و شکل محصول و عدم نیاز به تماس مستقیم دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله این معایب، می‌توان به زمان طولانی و دمایی بالا برای خشک کردن محصول طی دوره سرعت نزولی اشاره کرد. علاوه بر این، دماهای بالا باعث کاهش ارزش تغذیه‌ای و مصرف انرژی بالا می‌شود (Gowen et al., 2006). استفاده از پیش‌تیمارهایی که سبب کاهش رطوبت اولیه ماده غذایی و نیز اصلاح بافت ماده غذایی برای تسریع انتقال رطوبت و کاهش زمان خشک کردن می‌شوند، بسیار مفید خواهد بود (Fernandes and Rodrigues, 2007).

پیش‌تیمار اولتراسوند با غوطه‌ور کردن میوه در آب مقطر یا محلول آبی هایپرتونیک^۴ و اعمال امواج اولتراسوند صورت می‌گیرد.

میوه‌ها و سبزی‌ها با محتوای رطوبت حدود ۸۰ درصد به‌عنوان مواد بسیار فاسدشدنی طبقه‌بندی می‌شوند. سالیانه حدود ۱/۳ میلیارد تن از مواد غذایی که حدود یک سوم از تولید جهانی آن می‌باشد، به دلیل عدم فرآوری مناسب هدر می‌رود. خشک کردن با پتانسیل بسیار بالا یکی از عمومی‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها جهت حفظ، نگهداری و افزایش بهره‌وری مواد غذایی می‌باشد (Kumar et al., 2012). متداول‌ترین روش خشک کردن مواد غذایی استفاده از جریان هوای داغ است که نیازمند هوای گرم برای فراهم کردن انتقال

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه

تبریز، تبریز

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، تبریز

(*)- نویسنده مسئول: (Email: ss_seiedlo@yahoo.com)

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تبریز، تبریز

DOI: 10.22067/jam.v7i1.38881

(Azarpazhooch and Ramaswamy, 2011).

در کنار استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف در جهت کاهش انرژی مصرفی و افزایش کیفیت و بازده سیستم، مدل‌سازی ریاضی نیز در بهینه‌سازی طراحی‌ها و افزایش بازده در عملیات خشک‌کردن نقش به‌سزایی دارد. مدل‌سازی ریاضی یکی از مفیدترین ابزارها برای مطالعه سریع و کم‌هزینه اثر سیستم‌های مختلف و پارامترهای فرآیند روی خروجی یک فرآیند می‌باشد (Chandra Mohan and Talukdar, 2010). اگرچه مطالعات آزمایشگاهی یک ضرورت در توسعه تکنیک خشک‌کردن می‌باشد، ولی به دلیل هزینه بالا و صرف وقت بیش‌تر در این مطالعات، تحقیقات تئوریک به کمک مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی، یک ابزار قدرتمند و مناسب جهت آنالیز روند انتقال جرم و گرما تحت شرایط واقعی خشک‌کردن را فراهم می‌کند. مدل‌سازی عملیات خشک‌کردن به دلیل همزمانی انتقال جرم و گرما بین ماده خشک شونده و حامل انرژی، پیچیده است. مدل مربوطه آگاهی کافی را در مورد پدیده‌های درگیر در فرآیند خشک‌کردن ارائه می‌کند (Mihoubi et al., 2009). پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه به‌کارگیری برنامه‌های کامپیوتری کارآمد جهت حل عددی صورت گرفته است. آورسا و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش اجزاء محدود، خشک‌کردن ورقه‌های هویج را با استفاده از مدلی دو بعدی که بیانگر رفتار انتقال گرما و رطوبت با پارامترهای متغیر، شبیه‌سازی نمودند. نتایج مطالعات نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی در دو ساعت اول وجود داشته و در مراحل پایانی به دلیل غالب بودن اثر چروکیدگی بر روی پارامترها، خطا افزایش یافته است (Aversa et al., 2007). نتایج شبیه‌سازی خشک‌کردن هویج در خشک‌کن بستر سیال بیالوبزوسکی و همکاران (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن چروکیدگی حاکی از آن بود که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر پیش‌بینی شده با در نظر گرفتن چروکیدگی و بدون در نظر گرفتن آن مشاهده نشده است و همچنین مدل به‌خوبی نتوانسته، تغییرات دمایی نمونه‌ها را پیش‌بینی کند (Białobrzewski et al., 2008).

توسعه مدل فیزیکی در برگزیده تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف بر روند انتقال گرما و رطوبت ماده غذایی در طی فرآیند خشک‌کردن به درک صحیح فرآیند و استفاده کاربردی از آن‌ها منجر می‌شود. دقت در بیان خصوصیات مهندسی به‌صورت تابعی از عوامل درونی و بیرونی ماده غذایی و همچنین مدل‌سازی سه بعدی، شبیه‌سازی دقیق‌تر را به دنبال خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های هویج تازه از بازار محلی تهیه شد و در سردخانه با

امواج اولتراسوند باعث یکسری انقباض‌ها و انبساط‌های متناوب سریع روی دیواره سلولی شده (اثر اسفنجی^۱) که این عمل موجب ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار ماده شده و امکان انتقال رطوبت از ماده به حامل انرژی را افزایش می‌دهد. بدین صورت که با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار ماده، موجب کاهش لایه مرزی نفوذ و تشدید مکانیزم انتقال جرم جابه‌جایی در ماده می‌گردد. همچنین انرژی فراصوتی موجب تشدید پدیده کاویتاسیون و تسریع در دست دادن آب پیوندی قوی در درون ماده می‌شود (Azoubel et al., 2010). مزیت دیگر استفاده از اولتراسوند، نیاز به افزایش کمتر دما در طول فرآیند خشک‌کردن می‌باشد. در نتیجه، اولتراسوند بدون داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌تیمار در خشک‌کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود؛ چراکه باعث افزایش سرعت و کاهش دمایی مورد نیاز برای خشک‌کردن می‌شود (Mason et al., 2005). تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه کاربرد اولتراسوند در پیش‌تیمار مواد غذایی قبل از خشک‌شدن حاکی از آن بود که تأثیر پیش‌تیمار بر روی مواد مختلف متفاوت می‌باشد. در تحقیقی روی اثر پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز، شدت ۴۸۷۰ وات بر مترمربع و زمان ۲۰ دقیقه روی چند میوه نشان داد که این پیش‌تیمار موجب افزایش ضریب انتشار مؤثر به میزان ۱۴/۴ و ۲۸/۸ درصد به ترتیب در موز و انبه هندی شد. نیز افزایش ۱۴/۴ و ۴۵/۱ درصدی ضریب نفوذ رطوبت را به ترتیب در موز و آناناس با پیش‌تیمار اولتراسوند فرکانس ۲۵ کیلوهرتز، شدت ۴۸۷۰ وات بر متر مربع و زمان ۲۰ دقیقه مشاهده کردند (Fernandes and Rodrigues, 2007).

امواج مایکروویو باعث نوسان مولکول‌های دو قطبی نظیر مولکول‌های آب شده و نوسان مولکول‌های آب در ماده غذایی، باعث اصطکاک بین مولکول‌ها و ایجاد گرما می‌شوند. در نتیجه تمام قسمت‌های ماده غذایی به‌طور یکنواخت، انرژی مایکروویو را جذب کرده و گرم می‌شوند و باعث کاهش رطوبت اولیه ماده در مدت زمان کوتاه می‌گردد (Azarpazhooch and Ramaswamy, 2011). متولی و مینایی (۲۰۱۲) تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو ۱۰۰ و ۲۰۰ وات بر هر گرم ماده خشک شونده و به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه را به ترتیب روی انرژی و اکسرژی فرآیند خشک‌کردن همرفتی انار ترش بررسی کردند، نتایج نشان داد که استفاده از توان مایکروویو باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده انرژی می‌شود (Motevali and Minaei, 2012). همچنین در تحقیقی دیگر، اثر پیش‌تیمار مایکروویو و اسمزی بر روی سیب بررسی شد و نشان داد که استفاده ترکیبی از پیش‌تیمارهای اسمزی و مایکروویو، باعث بهبود تغییرات رنگ و همچنین بافت محصول خشک شده‌ی سیب می‌گردد

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

جهت محاسبه ضریب نفوذ رطوبت از قانون دوم فیک^۱ در فرم ورقه نامتناهی استفاده شد. فرم ساده شده حل تحلیلی قانون دوم فیک در رابطه (۱) آورده شده است (Seiedlou Heris *et al.*, 2010).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{l_0^2} \right] \quad (1)$$

که در آن MR نسبت رطوبت بدون بعد، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برحسب مترمربع بر ثانیه، l_0 ضخامت ورقه‌ها بر حسب متر و t زمان خشک‌شدن بر حسب ثانیه می‌باشد. با در نظر گرفتن $F_0 = \frac{t \cdot D_{eff}}{L_0^2}$ و با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه (۱)، رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$F_0 = -0.101 \ln(MR) - 0.0213 \quad (2)$$

با استفاده از داده‌های مقدار رطوبت هویج در زمان‌های مختلف خشک‌کردن و رابطه (۲) ضریب نفوذ در رطوبت‌های مختلف از داده‌های آزمایشی حاصل از خشک‌کردن هویج حاصل شد. سپس ضریب نفوذ به صورت تابعی از رطوبت به صورت فرم کلی رابطه (۳) ضرایب مربوطه محاسبه شد (Azzouz *et al.*, 2002).

$$D_{eff}(c) = D_0 \exp(D_a c) \quad (3)$$

که در آن $D_{eff}(c)$ ضریب نفوذ تابعی از رطوبت، D_0 و D_a ضرایب مدل و C مقدار رطوبت محصول (بر پایه خشک) می‌باشد.

طرح آماری آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در دو دمای هوا، شامل ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای گرم معادل ۱/۲ متر بر ثانیه و در دو ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متری و با اعمال یا عدم اعمال پیش‌تیمارهای ذکر شده در سه تکرار اجرا شدند. در مطالعه، اندازه‌گیری و محاسبه مشخصه‌های ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، زمان صرف شده جهت خشک‌کردن در فرآیند و تغییرات حجم و دانسیته نهایی، آزمون‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شدند. فاکتورها عبارت بودند از:

دمای خشک‌کردن در دو سطح (۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس)، ضخامت نمونه‌ها در دو سطح (۴ و ۶ میلی‌متر) و اعمال و عدم اعمال پیش‌تیمار در سه سطح (بدون پیش‌تیمار، پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و نیز پیش‌تیمار مایکروویو با توان یک وات بر گرم به مدت ۱۵ دقیقه بود.

دمای ۴ درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش خشک‌کردن، نمونه‌ها در ابعاد ۴ و ۶ میلی‌متر ضخامت و قطر ۲۰ میلی‌متر برش داده شد و اندازه‌گیری رطوبت اولیه در هر آزمایش براساس استاندارد AOAC (۲۰۰۰)، در آن ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت انجام شد.

خشک‌کردن نمونه‌ها

خشک‌کردن نمونه‌های آماده شده توسط یک خشک‌کن همرفتی سینی‌دار در دو سطح دمایی ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه در سه تکرار انجام شد. پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و پیش‌تیمار مایکروویو یک وات بر گرم به مدت ۱۵ دقیقه برای ورقه‌های نازک هویج و در سه تکرار انجام شد. هویج‌ها به قطعات استوانه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر برش داده شد و سپس پیش‌تیمار اولتراسوند و یا مایکروویو روی آنها اعمال گردید. برای پیش‌تیمار مایکروویو از یک دستگاه مایکروویو مدل سامسونگ با توان متغیر ۱۰۰ تا ۹۰۰ وات استفاده شد و جهت پیش‌تیمار اولتراسوند از یک حمام اولتراسوند با فرکانس متغیر و مدت زمان قابل تنظیم استفاده شد. تعدادی نمونه نیز بدون اعمال پیش‌تیمار در ضخامت‌ها و سطوح دمایی ذکر شده جهت مقایسه میزان تأثیرگذاری پیش‌تیمارهای اعمالی، مورد آزمایش قرار گرفت. خشک‌کن آزمایشگاهی به یک سامانه داده‌برداری به همراه یک واحد کنترل مجهز بود. اندازه‌گیری دمای هوای داخل خشک‌کن توسط سنسورهای دمایی با مشخصات PT100، درصد رطوبت نسبی هوا گرم توسط رطوبت‌سنج SAMWAN ENG, Taiwan، کنترل سرعت جریان هوای گرم توسط سرعت‌سنج پره‌ای AM-4202-Lutron و نهایتاً کنترل این متغیرها توسط تابلو و مدار فرمان صورت گرفت. جرم نمونه‌های روی قفسه‌های خشک‌کن با استفاده از یک دستگاه ترازوی دیجیتال در فواصل زمانی ۳ دقیقه و با دقت ± 0.1 گرم اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری دمای ورقه‌های هویج در نقاط مختلف آن از ترموکوپل‌های نوع k متصل به یک واحد دیتالاگر (انگلستان، DeleaT) در فواصل زمانی یک دقیقه استفاده شد.

همزمان نمونه‌های هویج روی سینی جداگانه خشک شدند که این نمونه‌ها جهت آزمایش‌های حجم‌سنجی در طی فرآیند خشک‌کردن استفاده می‌شدند. اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها و به تبع آن محاسبه چگالی ظاهری، چگالی ماده خشک در طی فرآیند خشک‌کردن، با استفاده از پیکنومتر و روش جابجایی تولوئن و در رطوبت‌های مختلف ماده صورت گرفت. حجم نمونه‌های استوانه‌ای هویج در طی خشک‌کردن در محتوای رطوبت ۷/۸، ۵، ۲/۵ و ۰/۳۴ (گرم آب بر گرم ماده خشک) اندازه‌گیری شد (Seiedlou Heris *et al.*, 2010).

معادلات حاکم و حل عددی

در تحقیق حاضر، انتقال همزمان گرما و رطوبت در خشک کردن لایه نازک مواد غذایی در نظر گرفته شد و مدل ریاضی توصیف کننده پدیده‌های انتقال درگیر در فرآیند خشک کردن هویج توسعه داده شد. با توجه به پیچیدگی توصیف پدیده‌های انتقال در فرآیند خشک کردن، جهت توسعه مدل فرضیه‌هایی در نظر گرفته شد که عبارت بودند از:

- توزیع اولیه رطوبت و گرما در داخل ماده، یکنواخت می‌باشد.
- ماده مورد مطالعه دو فازي بوده که شامل آب و مواد جامد است.

- تغییر حجم نمونه در طی خشک کردن وجود ندارد.

- در مرزهای ماده انتقال گرما و رطوبت به صورت جابه‌جایی می‌باشد.

- ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی میانگین، در سطح تبادل گرما و رطوبت در نظر گرفته شد.

- انتقال رطوبت و گرما در داخل ماده به ترتیب به صورت مکانیزم‌های نفوذ و هدایت در نظر گرفته شد.

فرض شد که به محض قرار گرفتن ورقه‌های هویج در معرض هوای گرم خشک کن، گرما به صورت همرفتی از حامل انرژی به تمامی سطوح ماده غذایی انتقال می‌یابد. شدت انتقال گرما در سطح ورقه‌ها، توسط گرادیان دمایی بین دمای سطح و دمای هوای گرم و نیز ضریب انتقال گرمای سطحی (h) کنترل می‌شود. مقدار و شدت تبخیر در سطح نمونه، توسط ضریب تبادل رطوبت سطحی (h_m) و گرادیان فشار بخار ما بین سطح نمونه و هوای گرم خشک کن کنترل می‌گردد. سپس به دنبال انتقال رطوبت در سطح، نفوذ غیرپایدار رطوبت در داخل نمونه رخ می‌دهد و رطوبت از همه نقاط داخلی ماده به طرف سطح نفوذ می‌کند.

مدل انتقال گرما

معادله اصلی انتقال گرما در این پژوهش از رابطه (۴) پیروی می‌کند: (Aversa et al., 2007)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho \cdot c_p} \nabla T \right) \quad (4)$$

که در آن شرایط اولیه براساس رابطه (۵) است:

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad (5)$$

شرایط مرزی

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a - T_{surf}) - \dot{m} \times L_{v,surf} \quad (6)$$

$$\dot{m} = -\rho_s D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n} = h_m (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (7)$$

$$= h_m (P_{sat}(T_s) \cdot a_w - P_{sat}(T_a) \cdot RH)$$

در روابط (۶) و (۷) k ، c_p ، ρ و \dot{m} به ترتیب چگالی ظاهری

($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)، گرمای ویژه ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)، ضریب هدایت گرمای هویج ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) و زمان (s) می‌باشد و h : ضریب انتقال گرمای سطحی ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)، h_m : ضریب انتقال رطوبت سطحی ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)، چگالی ماده خشک هویج ($\text{kg}(\text{dry mater}) \cdot \text{m}^{-3}$)، $P_{sat}(T_s)$ و $P_{sat}(T_a)$: به ترتیب فشار بخار اشباع در سطح آزاد در هوا و ماده P_s و P_a ، به ترتیب فشار بخار آب در سطح ماده و هوا $L_{v,surf}$ ، گرمای نهان تبخیر آب ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)، \dot{m} : نرخ تبخیر رطوبت ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)، فعالیت آبی (بدون واحد) و RH : رطوبت نسبی هوای خشک کننده برحسب درصد که در این تحقیق ثابت فرض شده است.

مدل انتقال رطوبت

مدل نفوذ فیک جهت توصیف انتقال رطوبت وابسته به زمان و پیش‌بینی پروفیل‌های رطوبتی محلی ورقه‌های هویج به کار برده شد. این مدل عبارت است از:

رابطه اصلی

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff}(c) \nabla c) \quad (8)$$

شرایط اولیه

$$c(n, t) = c_0 \quad t = 0 \quad (9)$$

شرایط مرزی

$$-D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n}(surf, t) = \frac{h_m \Delta P}{\rho_s} \quad t > 0 \quad (10)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n}(surf, t) = \frac{h_m}{\rho_s} (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (11)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n}(surf, t) = h_m (P_{sat}(T_s) \cdot a_w - P_{sat}(T_a) \cdot RH) \quad (12)$$

روش حل

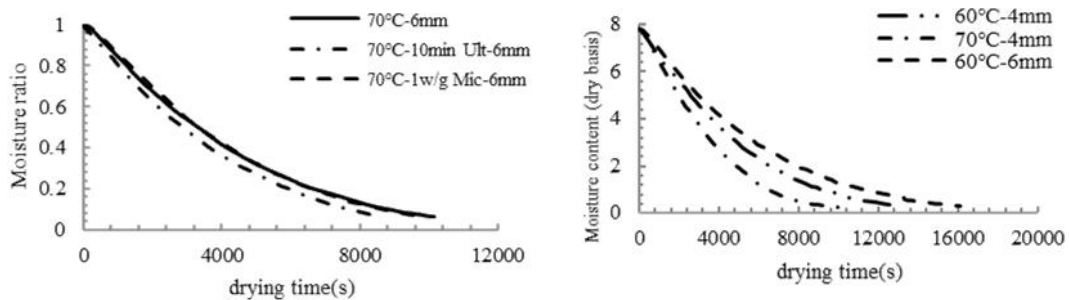
معادلات اصلی دیفرانسیلی مذکور به صورت کوپل با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه در محیط نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 حل شدند. پایه حل معادلات در این نرم‌افزار روش حل عددی براساس اجزای محدود می‌باشد. مدل ایجاد شده قادر است بر مبنای ورودی‌های مختلف از قبیل خصوصیات هوای گرم، خواص فیزیکی محصول، دما و رطوبت اولیه، تعداد المان‌های مورد نظر و نیز زمان‌های خشک کردن مختلف، مقادیر رطوبت و گرما را به عنوان تابعی از زمان و مکان و در نهایت افت کلی وزن را در طی خشک کردن پیش‌بینی نماید.

نتایج و بحث

منحنی‌های خشک شدن

و کاهش رطوبت اولیه محصول در مدت زمان کم به دلیل اعمال مایکروویو می‌باشد که باعث تسهیل خروج رطوبت شده و در نتیجه زمان خشک‌شدن کاهش پیدا می‌کند. نتایج ارائه شده توسط سایر محققین در مورد کاهش زمان خشک‌کردن با استفاده از پیش‌ تیمار اولتراسوند و مایکروویو، تأییدکننده نتایج این تحقیق است (Fernandes and Rodrigues, 2007; Ozbek and Dadali, 2007).

شکل ۱، منحنی‌های سینتیک خشک‌شدن نمونه‌ها تا رطوبت ۰/۳۴ را به صورت محتوی رطوبت بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک) و نیز نسبت رطوبت نمونه‌ها در طول زمان خشک‌شدن و در سطوح مختلف آزمایشی نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوای رطوبت نمونه‌های هویج در طول خشک‌شدن به صورت مداوم و نمایی کاهش می‌یابد. چنانچه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، استفاده از اولتراسوند و مایکروویو، زمان خشک‌شدن را در مقایسه با حالت بدون پیش‌ تیمار کاهش می‌دهند، که علت آن پدیده کاویتاسیون و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در اثر اولتراسوند



شکل ۱- منحنی‌های کاهش رطوبت نمونه‌های هویج در الف) مقایسه با و بدون پیش‌ تیمار، ب) مقایسه سطوح مختلف دمایی
Fig.1. Carrot samples moisture loss curves A) with and without pretreated comparison, B) different temperatures comparison

جدول ۱- تجزیه واریانس زمان خشک‌شدن و D_{eff} بر اساس سه فاکتور دما، ضخامت و پیش‌ تیمار

Table 1- ANOVA results of drying time and D_{eff} based on three factors: temperature, thickness and pretreatment

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean squar	F
دما Temperature	1	30976	D_{eff} 70.2 T 30976	t 90.5* D_{eff} 69.1*
ضخامت Thickness	1	17689	143/8	17689 143.8 51.7* 141.6*
پیش‌ تیمار Pretreatment	2	5869.5	16	293.7 8 8.5* 7.9*
دما × ضخامت Temperature× Thickness	1	361	0.1	361 0.1 1 0.1
دما × پیش‌ تیمار Temperature× Pretreatment	2	921.5	1	460.7 0.5 1.3 0.5
ضخامت × پیش‌ تیمار Pretreatment× Thickness	2	264.5	1.4	132.2 0.7 0.4 0.7
دما × ضخامت × پیش‌ تیمار Temperature× Pretreatment ×Thickness	2	354.5	1.1	177.2 0.5 0.5 0.5
خطای آزمایش Error of experimental	22	752.5	22.3	34 1
کل Total	35	64008	256.4	

*Significant at 0.01 probability level

* تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

از پیش تیمار موجب کاهش زمان خشک شدن شده اما تأثیر معنی‌داری نداشته است. از آن جایی که استفاده از پیش تیمار اولتراسوند، باعث افزایش سهولت خروج رطوبت از طریق تخریب بافت سلولی، باز شدن مسیر لوله‌های موئین و همچنین ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود، بنابراین استفاده از اولتراسوند منجر به انتقال سریع رطوبت از نمونه‌های هویج به هوای گرم در داخل خشک‌کن می‌شود. به‌طور میانگین با استفاده از پیش تیمار اولتراسوند زمان مورد نیاز برای خشک شدن ورقه‌های هویج ۱۵/۳ درصد (۳۱ دقیقه) کاهش یافت.

تجزیه واریانس زمان خشک شدن در تیمارهای مختلف

جدول ۱، تجزیه واریانس زمان خشک شدن براساس سه فاکتور دما، ضخامت و پیش تیمار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر عوامل دما، ضخامت و پیش تیمار بر روی مدت زمان خشک شدن در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد.

مقایسه میانگین‌های زمان خشک شدن براساس نوع پیش تیمار به‌وسیله آزمون بونفرونی انجام شد و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. مطابق با این جدول، زمان خشک شدن با استفاده کردن از اولتراسوند نسبت به استفاده از مایکروویو و همچنین عدم استفاده از پیش تیمار کمتر می‌باشد. استفاده از مایکروویو نسبت به عدم استفاده

جدول ۲- مقایسه میانگین زمان خشک شدن در تیمارهای مختلف به وسیله آزمون بونفرونی

Table 2- Mean comparison drying time in different treatments by Bonferroni test

تیمار Treatment	بدون اعمال پیش تیمار Without pretreatment	اعمال پیش تیمار مایکروویو $1w\ gr^{-1}$ Applying microwave pretreatment	اعمال پیش تیمار اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه Applying ultrasonic pretreatment for 10 min
زمان خشک شدن (min) Drying time	202.25 ^a	193 ^a	171.75 ^b

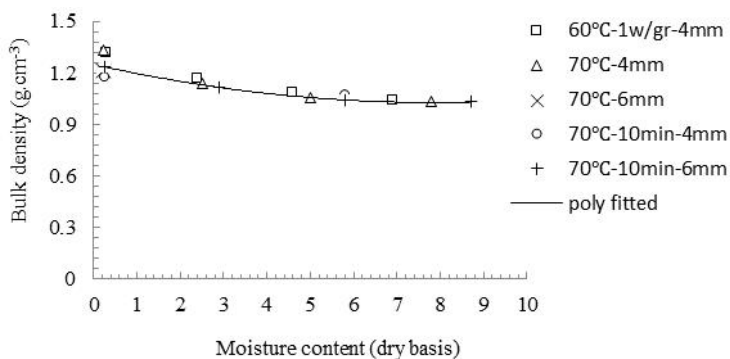
حروف مشابه نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار و حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Similar characters indicate no significant differences and dissimilar characters indicate significant differences in the level of five percent.

تغییرات چگالی ظاهری در طی خشک کردن

داده‌های تجربی به‌دست آمده برای چگالی ظاهری ورقه‌های هویج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت آن‌ها در حین خشک شدن در تیمارهای مختلف در شکل ۲ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، مقدار چگالی ظاهری نمونه‌های هویج با کاهش محتوی رطوبت آن‌ها، افزایش پیدا می‌کند.

نتایج مشابهی توسط فرناندز و رودریگس (Fernandes and Rodrigues, 2007) در خشک کردن با هوای گرم نمونه‌های موز، آناناس و انبه هندی پیش تیمار شده با اولتراسوند، گزارش گردید. آن‌ها در کاربرد اولتراسوند به‌عنوان پیش تیمار به این نتیجه رسیدند که استفاده از پیش تیمار اولتراسوند موجب کاهش زمان خشک شدن به مقدار ۳۱ دقیقه در آناناس، در موز به مقدار ۸۶ دقیقه و در انبه هندی به مقدار ۳۵ دقیقه نسبت به تیمار بدون اعمال اولتراسوند گردیده است.



شکل ۲- چگالی ظاهری نمونه‌های هویج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت در شرایط آزمایشی

Fig. 2. Bulk density samples of carrot as a function of moisture content in the different experimental conditions

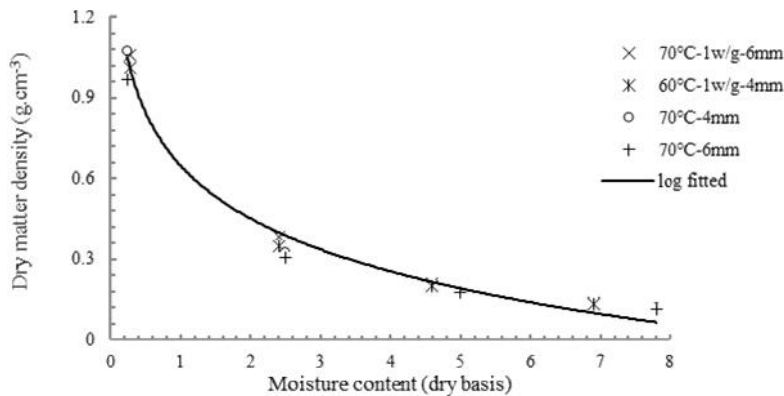
هوایج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت آن‌ها در حین خشک‌شدن در شرایط مختلف آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. برای هر آزمایش تغییرات چگالی ماده خشک (ρ_s) برای رطوبت‌های مختلف محاسبه شد. با بررسی داده‌های حاصل از خشک‌کردن همرفتی نمونه‌های هوایج تغییرات ρ_s در طی آزمایش برای تمامی تیمارها وابسته به میزان رطوبت نمونه‌ها، به‌صورت رابطه (۱۴) برآورد شد.

$$\rho_s = -217.4 \ln(c) + 540.18 \quad R^2=0.989 \quad (14)$$

برای هر آزمایش تغییرات چگالی ظاهری (ρ_m) و در رطوبت‌های مختلف محاسبه شد. با بررسی داده‌های حاصل از خشک‌کردن همرفتی نمونه‌های هوایج تغییرات ρ_m در طی آزمایش برای تمامی تیمارها، به‌خوبی توسط تابع درجه دوم وابسته به میزان رطوبت نمونه‌ها به‌صورت رابطه (۱۳) برآورد شد.

$$\rho_m = 5.51c^2 - 74.11c + 1269 \quad R^2=0.99 \quad (13)$$

تغییرات چگالی ماده خشک در طی خشک‌کردن
داده‌های تجربی به‌دست آمده برای چگالی ماده خشک ورقه‌های



شکل ۳- چگالی ماده خشک نمونه‌های هوایج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت در شرایط مختلف آزمایشی
Fig.3. Density of dried carrot samples as a function of moisture content in the different experimental conditions

جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر دما، ضخامت و استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند روی مقدار D_{eff} رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. میانگین D_{eff} براساس استفاده از پیش‌تیمار به‌وسیله آزمون بونفرونی مقایسه شد و نتایج در جدول ۵ آورده شده است. مطابق با این جدول، D_{eff} با استفاده از اولتراسوند نسبت به استفاده از مایکروویو و همچنین عدم استفاده از پیش‌تیمار بیشتر می‌باشد. مقدار D_{eff} در حالت استفاده از مایکروویو نسبت به عدم استفاده از پیش‌تیمار بیشتر بوده، اما مایکروویو تأثیر معنی‌داری روی D_{eff} نمونه‌ها در مقایسه با بدون پیش‌تیمار نداشت. از آنجایی که استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند باعث افزایش نفوذ رطوبت می‌شود، بنابراین استفاده از اولتراسوند منجر به تسریع انتقال جرم داخلی نمونه‌های هوایج می‌شود. به‌طور میانگین با استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند D_{eff} ورقه‌های هوایج ۱۹/۲۶ درصد نسبت به تیمار بدون اعمال پیش‌تیمار افزایش یافت. نتایج مشابهی توسط فرناندز و رودریگز (Fernandes and Rodrigues, 2007) در خشک‌کردن با هوای گرم نمونه‌های موز، آناناس و انبه هندی پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، گزارش گردید. گارسیا پرز و همکاران (García-Pérez et al., 2009) تأثیر پیش‌تیمار اولتراسوند را روی

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مقادیر ضریب نفوذ ثابت و وابسته به رطوبت با استفاده از داده‌های خشک‌کردن برای تیمارهای مختلف برآورد شدند که ضرایب نفوذ ثابت برآورد شده در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. گستره مقادیر D_{eff} محاسبه شده برای شرایط مختلف در حالت فرض ورقه نامتناهی بین $4/66 \times 10^{-10}$ و $12/81 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه متغیر بود. این مقادیر نزدیک به مقادیر به‌دست آمده برای هوایج می‌باشد که توسط زیلینسکا و مارکویسکی (Zielinska and Markowski, 2010) گزارش شده است که مقادیر گزارش شده توسط آن‌ها در گستره $2/58 \times 10^{-10}$ تا $17/90 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه برای دمای ۶۰-۹۰ درجه سلسیوس متغیر بود. همچنین مقادیر D_{eff} به‌دست آمده برای هوایج، در دامنه اعداد مربوط به ضریب نفوذ هوایج و سیب زمینی، 10×10^{-11} تا 11×10^{-9} مترمربع بر ثانیه بود (Mulet, 1994). تغییرات D_{eff} به‌صورت تابعی از رطوبت نمونه‌ها با رابطه (۳)، توصیف گردید. مقادیر ثابت رابطه مذکور در برای تمامی شرایط آزمایشی آورده شده است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دما، ضخامت، استفاده از پیش‌تیمار روی ضرایب نفوذ مؤثر رطوبت در نمونه‌های هوایج در

خشک کردن پوست لیمو ترش و هویج بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب نفوذ به‌دست آمده از نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به نمونه شاهد داشته است. به عبارتی اولتراسوند باعث افزایش ضریب نفوذ می‌شود.

جدول ۳- تغییرات D_{eff} در شرایط مختلف آزمایشی

Table 3- Changes D_{eff} in the different experimental conditions

نوع پیش‌تیمار Pretreatment types	ضخامت نمونه‌ها (mm) Thickness of samples	دما (T) Temperature	$D_{eff} \times 10^{-10}$
بدون پیش‌تیمار Without pretreatment	4	60	4.660
	6	60	6.847
	4	70	8.130
	6	70	10.880
پیش‌تیمار اولتراسوند Ultrasound pretreatment	4	60	5.000
	6	60	7.963
	4	70	9.930
	6	70	12.810
پیش‌تیمار مایکروویو Microwave pretreatment	4	60	4.770
	6	60	6.997
	4	70	7.607
	6	70	11.117

جدول ۴- ثابت‌های رابطه (۳)

Table 4- Constants of equation 3

نوع پیش‌تیمار Pretreatment types	دما (T) Temperature	ضخامت نمونه‌ها (mm) Thickness of samples	D_a	$D_c \times 10^{-15}$
بدون پیش‌تیمار Without pretreatment	60	4	-0.2415	5.04729
		6	1707.-0	8.72202
	70	4	1629.-0	7.14099
		6	-0.3443	12.9727
پیش‌تیمار اولتراسوند Ultrasound pretreatment	60	4	-0.1635	6.57222
		6	1987.-0	8.6611
	70	4	-0.1635	8.11611
		6	-0.1657	12.3524
پیش‌تیمار مایکروویو Microwave pretreatment	60	4	-0.2668	5.2323
		6	-0.2353	7.91572
	70	4	-0.23	6.25168
		6	-0.2582	11.3913

جدول ۵- مقایسه میانگین D_{eff} در تیمارها براساس آزمون بونفرونی (در سطح ۵٪)

Table 5- Mean comparison D_{eff} in the treatment by Bonferroni test (at 5%)

تیمار Treatment	بدون اعمال پیش‌تیمار Without pretreatment	اعمال پیش‌تیمار مایکروویو $1w\ gr^{-1}$ Applying microwave pretreatment	اعمال پیش‌تیمار اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه Applying ultrasonic pretreatment for 10 min
$D_{eff} (m^2 s^{-1})$	7.62 ^a	7.72 ^a	9.09 ^b

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌داری و حروف غیر مشترک بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد

Similar characters indicate no significant differences and dissimilar characters indicate significant differences in the level of five percent

استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند مقدار D_{eff} افزایش می‌یابد.

مقادیر ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی

مقادیر ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی در هویج در دماها و سرعت‌های مختلف هوا به روش اندازه‌گیری دمای گذرا مقایسه شد

بر این اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌های D_{eff} رطوبت، بیشترین مقدار این ضریب در بالاترین سطوح از نظر دما، ضخامت و استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند و کمترین مقدار آن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و ضخامت چهار میلی‌متر و بدون استفاده از پیش‌تیمار به‌دست آمد. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش دما، ضخامت و

که نمونه‌ای از نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- ضرایب انتقال گرما و رطوبت سطحی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه به روش اندازه‌گیری دمای گذرا
Table 6- Surface heat and moisture transfer coefficient in temperature 60°C and speed 1.2 m s⁻¹ based on transient temperature measurement method

مقدار Value	ضرایب انتقال گرما و رطوبت Heat and moisture transfer coefficients
15.323	$h_T (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
15.63×10^{-3}	$k_m (m \cdot s^{-1})$
1.19×10^{-7}	$h_m (s \cdot m^{-1})$

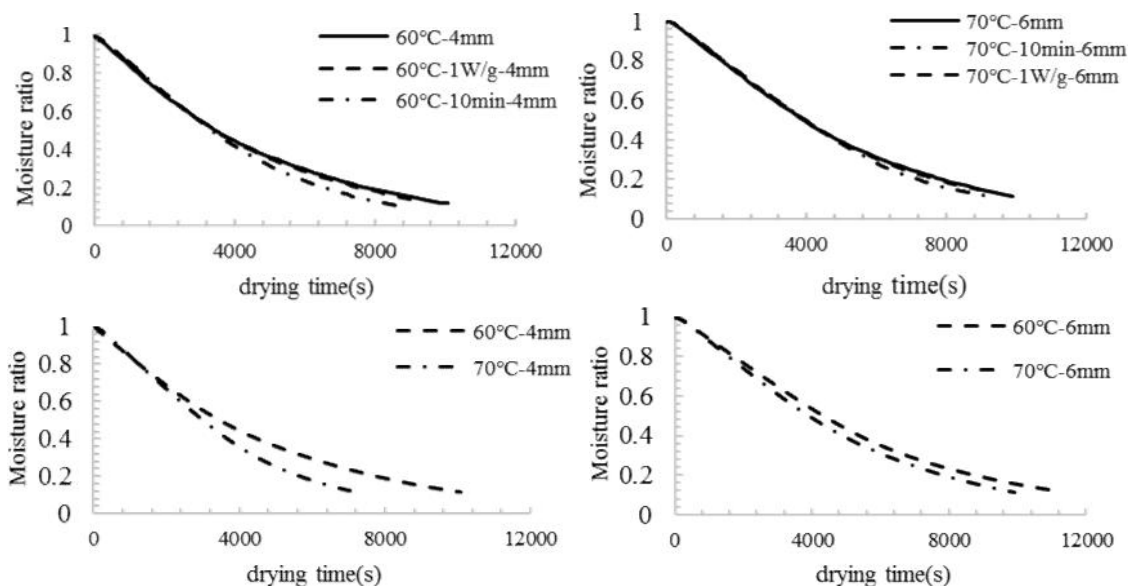
همچنین استفاده از پیش‌تیمار، محتوی رطوبت با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

بررسی اعتبار مدل در پیش‌بینی رطوبت

تغییرات محتوی رطوبت میانگین تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کوپل، به‌صورت تابعی از زمان خشک‌کردن ورقه‌های هویج در شکل ۵ آورده شده است. در همه شرایط مورد مطالعه انطباق خوبی بین مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کوپل وجود داشت. ضریب همبستگی بین داده‌ها در محدوده ۹۹/۸۷ تا ۹۹/۹۸ درصد بود و مقدار خطای بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایش در محدوده ۳/۵٪ تا ۱۲٪ بود.

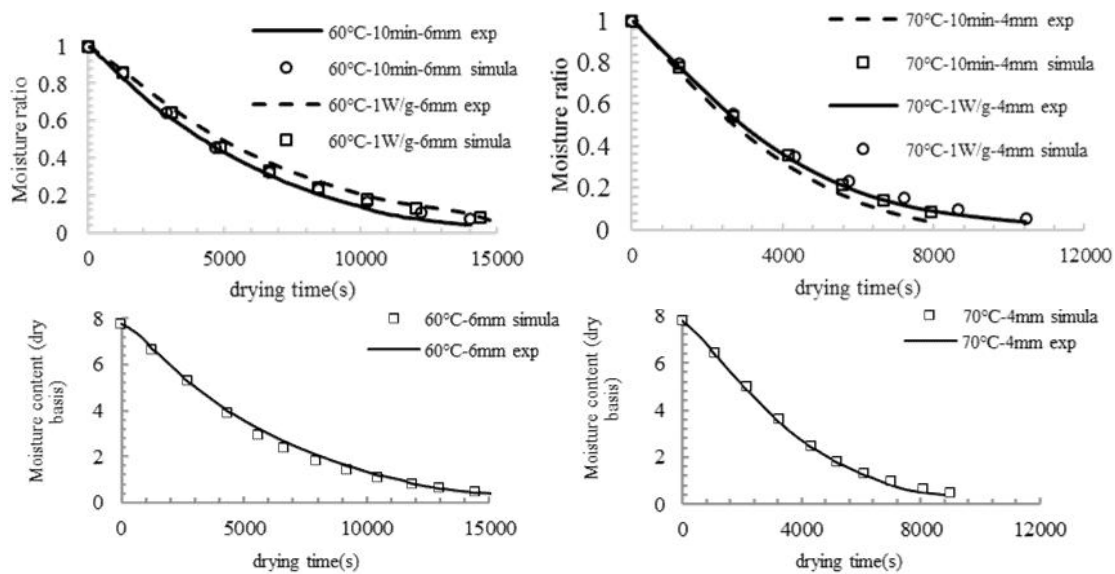
نتایج پیش‌بینی توزیع رطوبت در نمونه‌ها توسط مدل توسعه داده شده

نتایج شبه‌سازی کاهش رطوبت متوسط نمونه‌های هویج در دماها و ضخامت‌های مختلف، با و بدون اعمال پیش‌تیمار با ورودی‌های، مقدار رطوبت اولیه نمونه آزمایشی، D_{eff} تابعی از رطوبت، دانسیته ظاهری، دانسیته ماده خشک و زمان خشک شدن جداگانه برای هر شرایط آزمایشی به‌دست آمد. شکل ۴- نمودار کاهش رطوبت پیش‌بینی شده در دماها، ضخامت‌ها و پیش‌تیمار مختلف، را نشان می‌دهد. به‌دلیل متفاوت بودن رطوبت اولیه در نمونه‌های پیش‌تیماری مختلف جهت مقایسه مناسب، از نسبت رطوبت به‌جای محتوی رطوبت در رسم نمودارها استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل برای انتقال رطوبت نشان داد که با افزایش ضخامت در یک دمای هوای خاص و افزایش دما در یک ضخامت خاص و



شکل ۴- نمودار کاهش رطوبت پیش‌بینی شده در دماها، ضخامت‌ها و پیش‌تیمار مختلف

Fig. 4. Predicted moisture reduction in different temperature, thickness and pretreatment



شکل ۵- مقایسه محتوی رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل در تیمارهای مختلف

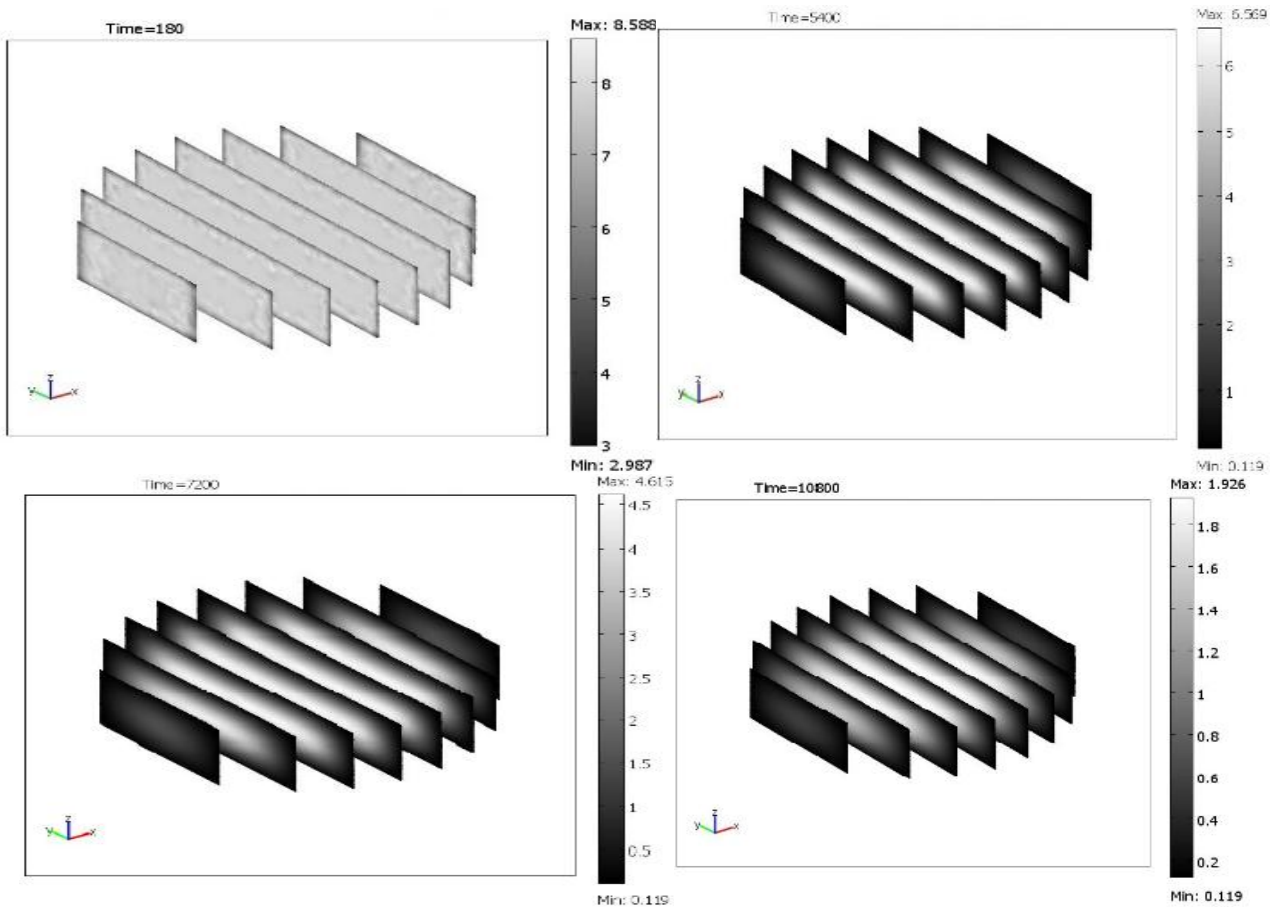
Fig. 5. Comparison of measured and predicted moisture content whit model in different treatments

هویج به صورت سه بعدی با پیشرفت زمان خشک شدن در شکل ۶ آورده شده است. وقتی ماده غذایی در معرض هوای گرم قرار می‌گیرد، رطوبت سطح ماده آن بخار می‌شود. با بخار شدن آب سطحی، گرادیان فشار بخار بین سطح و داخل ماده غذایی موجب نفوذ رطوبت از نقاط داخلی به سطح و بخار شدن آن می‌شود. به دلیل طول مسیر نفوذ کمتر، نقاط نزدیک به سطح، رطوبت بیشتری نسبت به مرکز از دست می‌دهند. بنابراین مرکز در انتهای فرآیند بیشترین مقدار رطوبت را خواهد داشت. رنگ‌های متفاوت بیان‌کننده تفاوت محتوی رطوبت می‌باشد. همچنین مسیر خروج رطوبت در راستای شعاعی و محوری برای نقاط مختلف داخلی نمونه‌ها در شکل ۷ آورده شده است. با پیشرفت خشک‌شدن، محتوی رطوبت در همه نقاط ماده کاهش می‌یابد، ولی مقدار کاهش رطوبت در نقاط سطحی سریع‌تر از نقاط داخلی بود و در ۲۰۰۰ ثانیه اول به رطوبت تعادلی رسید. بدین معنی که مقاومت بیرونی در انتقال جرم از لایه مرزی از همان مراحل اولیه فرآیند، کم بوده است. در این شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که هرچه فاصله نقاط ماده از سطح میانی ورقه هویج زیاد می‌شود، مقدار رطوبت آن نقاط در هر زمان نسبت به سطح میانی کمتر خواهد شد. در سطح محصول که مستقیماً در تماس با هوای گرم بود، رطوبت سریعاً افت کرده است. حرکت رطوبت از نقاط داخلی ماده به طرف سطح بالایی آن تابع D_{eff} رطوبت بوده که دارای مقدار بسیار کوچکی نسبت به تخییر رطوبت سطحی ماده غذایی که تابع ضریب انتقال جرم سطحی است. از طرف دیگر فاصله رطوبت موجود در نقاط داخلی تا سطح محصول، زیادتر از نقاط مرزی بود، بنابراین خروج رطوبت از نقاط داخلی، نیازمند صرف زمان بیشتری بوده است.

نتایج حاصل بیانگر این مطلب است که استفاده از ضریب نفوذ به صورت تابعی از رطوبت و همچنین شبیه‌سازی سه بعدی به همراه استفاده از خواص انتقالی و گرمایی متغیر در معادلات و همچنین دخیل کردن تأثیر پیش تیمار در ضریب نفوذ رطوبت، توانسته است روند کاهش رطوبت نمونه‌های پیش تیمار شده را به خوبی و با اعتبار بالایی پیش‌بینی نماید. آورسا و همکاران (Aversa et al., 2007) گزارش کردند که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کوپل و مقادیر تجربی انطباق خوبی در دو ساعت اول داشته و بعد از دو ساعت اول به دلیل غالب بودن اثر چروکیدگی اختلاف بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده بیشتر شد. سربکاتدن و روبرت (Srikiatden and Roberts, 2008) در پیش‌بینی پروفیل‌های رطوبت در دماهای مختلف به این نتیجه رسیدند که بیان D_{eff} به صورت متغیر تأثیر زیادی در پیش‌بینی پروفیل‌های دمای دارد. نیلنوت و همکاران (Nilonnt et al., 2012) در مدل‌سازی خشک‌کردن قهوه به این نتیجه رسیدند که استفاده از ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما، دقت پیش‌بینی‌ها را نسبت به حالت استفاده از ضریب نفوذ متوسط، بالا می‌برد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که مدل توسعه داده شده بدون در نظر گرفتن چروکیدگی و با احتساب ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما، دقت بالاتری نسبت به حالت لحاظ کردن چروکیدگی با ضریب نفوذ متوسط داشته است.

بررسی پروفیل‌های رطوبت در شرایط آزمایشی مختلف

تغییرات مقادیر محتوی رطوبت محلی شبیه‌سازی شده ورقه‌های

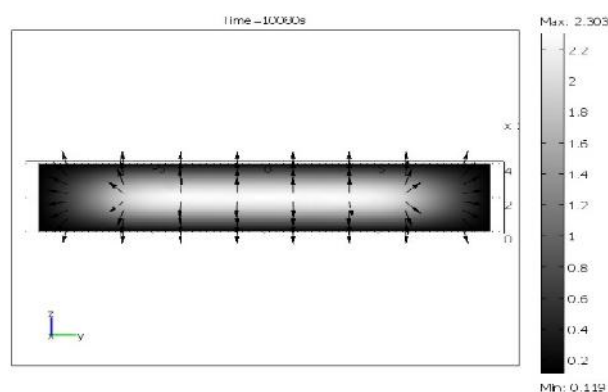


شکل ۶- پروفیل‌های رطوبتی در زمان‌های مختلف
Fig.6. Moisture profiles at different times

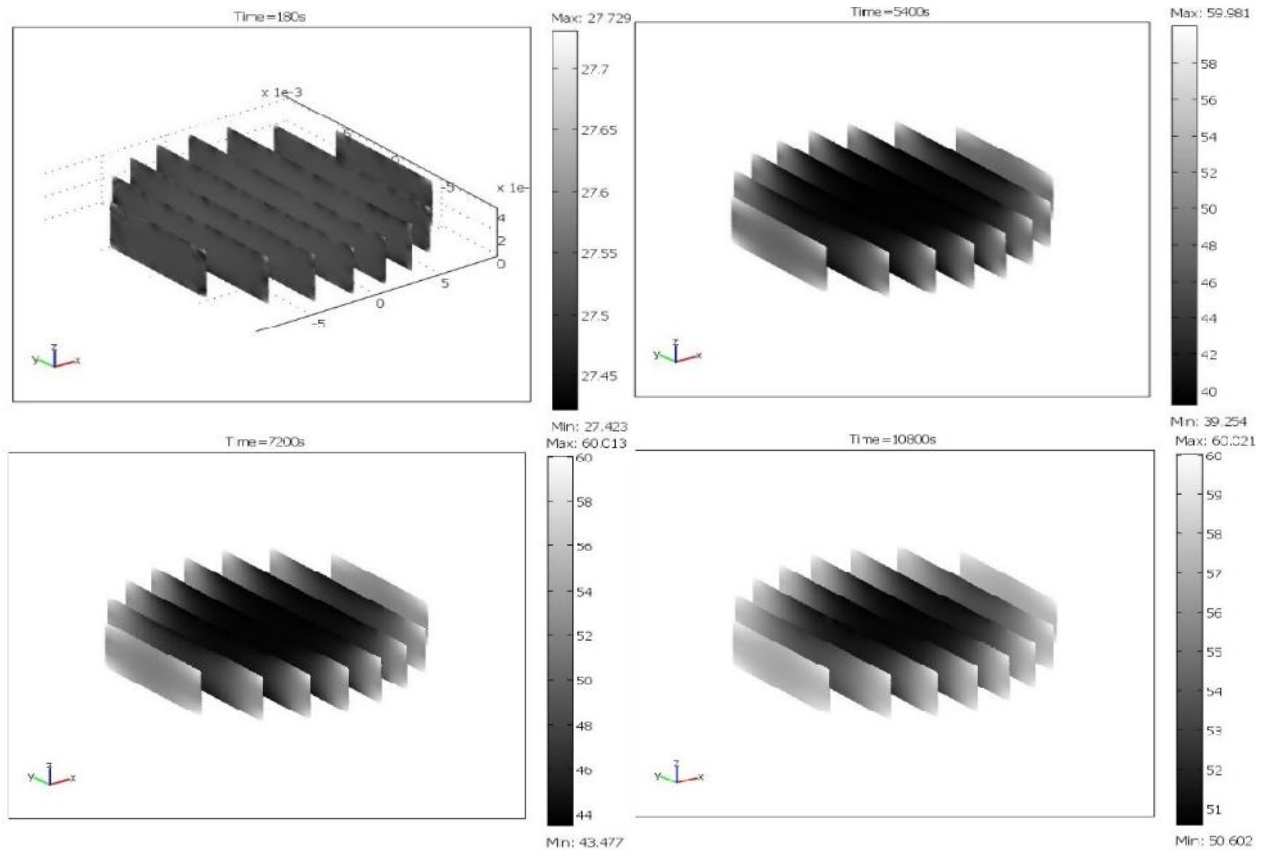
موارد نیز نتیجه مشابه را موجب شده‌اند. مدل شبیه‌سازی شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس هوای خشک‌کن دو ناحیه را به‌روشنی متمایز می‌کند.

شبییه‌سازی توزیع گرما

یک نمونه از شبیه‌سازی پخش سه‌بعدی گرما در داخل نمونه‌های هویج و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند در شکل نشان داده شده است. پیش‌بینی دما در سایر



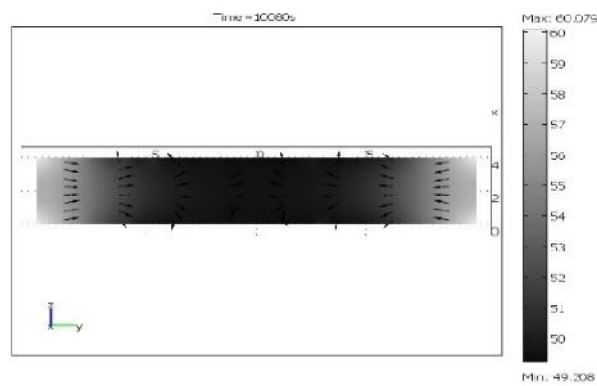
شکل ۷- مسیر نفوذ آب در داخل ماده غذایی
Fig.7. Direction of water diffusion in food



شکل ۸- پروفیل‌های دمایی پیش‌بینی شده
Fig.8. Predicted temperature profiles

ماده غذایی در راستای شعاع و محور نمونه‌های استوانه‌ای نشان می‌دهد. گرمای انتقال یافته از حامل انرژی به سطح ماده غذایی موجب بخار شدن آب سطحی و همچنین باعث ایجاد گرادیان بیشتر فشار بخار بین سطح ماده و هوای اطراف و نیز بین داخل ماده به سطح آن می‌شود که به‌موجب آن جریان رطوبت از داخل ماده به سطح ماده و نیز خروج رطوبت به‌صورت بخار از سطح ماده می‌شود.

دمای نقاط مرکزی نمونه، در پایان زمان خشک‌کردن (درصد رطوبت متوسط ۰/۴)، در حدود ۵۵ درجه سلسیوس بوده در حالی‌که دمای نقاط کناری نمونه در حدود ۵۷ درجه سلسیوس بوده است. شکل ۹ پخش حرارتی پیش‌بینی شده و جریان گرما را در داخل ماده غذایی در راستای محور Y (شعاع نمونه استوانه‌ای) و در راستای محور Z (محور نمونه استوانه‌ای) نشان می‌دهد. شکل ۹ پخش حرارتی پیش‌بینی شده و جریان گرما را در داخل



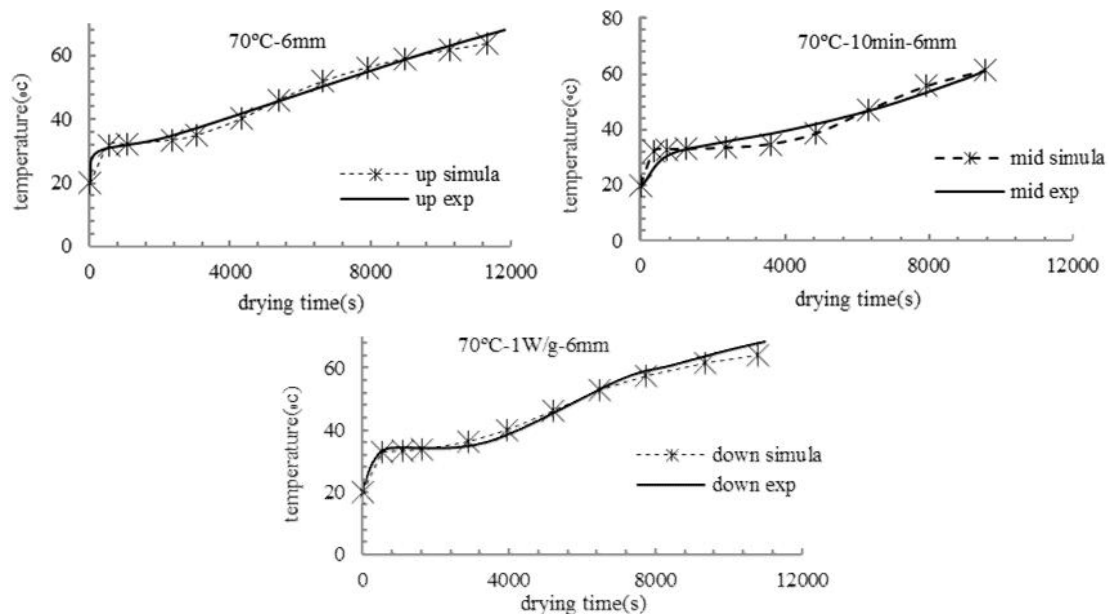
شکل ۹- جریان گرما در داخل ماده در راستای محوری و شعاعی (Y و Z)
Fig.9. Heat flow into the material along the radial and axial

دقت بالایی برخوردار بود. به طوری که روئیز لوپز و همکاران (Ruiz- López *et al.*, 2004). انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده دما از مقادیر تجربی را بسیار بالا برآورد کرده و دلیل این امر را در عدم محاسبه خواص ترموفیزیکی، توسط خود محقق بیان کرده و استفاده از مدل سایر محققین را عامل اصلی انحراف در پیش‌بینی دما دانسته است. بیالوبزوسکی (Białobrzewski, 2006) میزان انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده دما از مقادیر پیش‌بینی شده در نمونه‌های سیب را بسیار بالا ارزیابی نمود. همچنین بیالوبزوسکی و همکاران (Białobrzewski *et al.*, 2008) نشان دادند که نتایج پیش‌بینی توزیع دما در خشک کردن قطعات هویج از دقت پایین و در محدوده صفر تا ۷۰ درصد برخوردار است و اگر پیش‌بینی دما در داخل ماده یک امر بحرانی نباشد، می‌توان از مدل توسعه داده شده استفاده کرد. در غیر این صورت مدل توسعه داده شده آن‌ها نمی‌تواند در کاربردهای دقیق‌تر مؤثر باشد. سیدلو هریس (Seiedlou Heris, 2009) در شبیه‌سازی یک بعدی انتقال گرما و رطوبت در خشک کردن همرفتی نمونه‌های سیب، میزان انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر پیش‌بینی شده را در حدود صفر تا ۱۲ درجه سیلسیوس بیان کرده و دلیل این اختلاف را در عدم نصب دقیق سنسورها در داخل ماده و همچنین به دلیل بالا بودن ضریب انتقال گرمای محاسبه شده نسبت به مقدار واقعی بیان کرد.

به دلیل این که فرآیند بخار شدن ماده غذایی بیشتر در سطح بالا و پایین ماده غذایی صورت می‌گیرد. بنابراین بیشتر انرژی گرمایی در سطح بالا و زیر ماده غذایی صرف گرمای نهان تبخیر می‌شود. نقاط کناری رطوبت خود را سریعاً از دست داده و گرما بیشتر صرف گرم کردن این نقاط می‌شود و به دلیل گرادیان دمایی ایجاد شده بین کناره‌ها و وسط جریان گرما از کناره‌ها به سمت داخل صورت می‌گیرد.

بررسی اعتبار مدل در پیش‌بینی پروفیل‌های گرمایی

تغییرات دما در نقاط مختلف نمونه‌های هویج به صورت تابعی از زمان عملیات، در هر دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده و در دماها، ضخامت‌ها و پیش‌تیمارهای مختلف به صورت نمونه در شکل ۱۰ آورده شده است. سایر آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده مشابه این نمودارها بودند. مطالعه مقدار خطای بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و تجربی حاکی از آن بود که مقدار خطای پایین‌تر از ۱۵ درصد بوده است. بنابراین مدل توسعه داده شده، مقادیر افزایش دما در داخل نمونه را به خوبی پیش‌بینی کرده است. تفاوت جزئی مشاهده شده بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده می‌تواند ناشی از عدم قرارگیری دقیق و صحیح ترموکوپل در لایه‌های سطحی و یا دقیقاً در وسط یا متمایل به کناره‌های نمونه‌های استوانه‌ای هویج باشد. نتایج شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با نتایج منتشر شده در منابع مختلف، از



شکل ۱۰- تغییرات دمای اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در مرکز (mid) و سطح بالایی (up) و سطح پایینی (down) نمونه‌های هویج

Fig.10. Changes of measured and predicted temperature in the center (mid), upper (up) and low (down) surface of Carrot samples

نتیجه‌گیری

دارد و خشک‌شدن در دو دوره نزولی اتفاق می‌افتد. اعمال D_{eff} به صورت تابعی از رطوبت و نیز اعمال اثر پیش‌تیمار به صورت تغییرات D_{eff} و کاربرد آن در مدل، به دقت پیش‌بینی کمک می‌کند. شبیه‌سازی انتقال گرما و رطوبت نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند، پروفیل‌های دمایی را با خطای حداکثر ۱۵ درصد و پروفیل‌های رطوبتی را با دقت ۳ الی ۱۲ درصد در نمونه‌های با و بدون پیش‌تیمار شده پیش‌بینی کند.

هدف اصلی این تحقیق، توسعه مدل کوپل شبیه‌سازی شده انتقال گرما و رطوبت در طی فرآیند خشک‌کردن قطعات هویج تحت اعمال پیش‌تیمار، جهت بهینه‌سازی فرآیند بود. نتایج بررسی داده‌های آزمایشگاهی تغییرات رطوبت مطلق نمونه‌های هویج در حین خشک‌شدن به صورت لایه نازک در دماها، ضخامت‌ها و حالت‌های مختلف کاربرد پیش‌تیمارها نشان داد که دمای هوا و ضخامت و استفاده از پیش‌تیمار تأثیر معنی‌داری روی سرعت خشک‌شدن نمونه‌ها

References

1. Aversa, M., S. Curcio, V. Calabrò, and G. Iorio. 2007. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering* 78: 922-932.
2. Azarpazhooh, E., and H. Ramaswamy. 2011. Optimization of Microwave-Osmotic Pretreatment of Apples with Subsequent Air-Drying for Preparing High-Quality Dried Product. *International Journal of Microwave Science and Technology*.
3. Azoubel, P. M., M. D. A. M. Baima, M. D. R. Amorim, and S. S. B. Oliveira. 2010. Effect of ultrasound on banana cvPacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 97: 194-198.
4. Azzouz, S., A. Guizani, W. Jomaa, and A. Belghith. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering* 55: 323-330.
5. Białobrzewski, I. 2006. Simultaneous Heat and Mass Transfer in Shrinkable Apple Slab during Drying. *Drying Technology* 24: 551-559.
6. Białobrzewski, I., M. Zieli ska, A. S. Mujumdar, and M. Markowski. 2008. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51: 4704-4716.
7. Chandra Mohan, V. P. and P. Talukdar. 2010. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 4638-4650.
8. Fernandes, F. A. N. and S. Rodrigues. 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering* 82: 261-267.
9. García-Pérez, J. V., J. A. Cárcel, E. Riera, and A. Mulet. 2009. *Drying Technology* 27: 281-287.
10. Gowen, A., N. Abu-Ghannam, J. Frias and J. Oliveira. 2006. Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave-hot air combination drying. *Trends in Food Science and Technology* 17: 177-183.
11. Kumar, C., A. Karim, S. C. Saha, M. U. H. Joardder, R. J. Brown, and D. Biswas. 2012. Multiphysics Modelling of convective drying of food materials. *Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference: Global Institute of Science and Technology*.
12. Mason, T. J., E. Riera, A. Vercet, and P. Lopez-Buesa. 2005. 13 - Application of Ultrasound. Pages 323-351 in Da-Wen S, ed. *Emerging Technologies for Food Processing*. London: Academic Press.
13. Mihoubi, D., S. Timoumi, and F. Zagrouba. 2009. Modelling of convective drying of carrot slices with IR heat source. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48: 808-815.
14. Motevali, A., and S. Minaei. 2012. Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 18: 63-72.
15. Mulet, A. 1994. Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering* 22: 329-348.
16. Nilnont, W., S. Thepa, S. Janjai, N. Kasayapanand, C. Thamrongmas, and B. K. Bala. 2012. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. *Food and Bioproducts Processing* 90: 341-350.
17. Ozbek, B. and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves

- undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering* 83: 541-549.
18. Ruiz-López, I. I., A. V. Córdova, G. C. Rodríguez-Jimenes, and M. A. García-Alvarado. 2004. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering* 63: 117-124.
 19. Seiiedlou Heris, S. 2009. Experimental Study and Mathematical Simulation of Drying Process in Convective Air-Dried Apples.
 20. Seiiedlou Heris, S., H. R. Ghasemzadeh, N. Hamdami, F. Talati, and M. Moghaddam. 2010. Convective Drying of Apple: Mathematical Modeling and Determination of some Quality Parameters. *International journal of Agriculture and Biology* 12: 171-178.
 21. Srikiatden, J., and J. S. Roberts. 2008. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering* 84: 516-525.
 22. Zielinska, M., and M. Markowski. 2010. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49: 212-218.

Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave

R. Rostami Baroji¹ - S. S. Seiedlou Heris^{2*} - J. Dehghannya³

Received: 30-08-2014

Accepted: 15-09-2015

Introduction

Drying foods, fruits and vegetables is a suitable method to reduce post-harvest losses of the crops. Drying is considered as a simultaneous heat and mass transfer process. Various physical, chemical and nutritional changes occur during drying of foods and are affected by a number of internal and external heat and mass transfer parameters. External parameters may include temperature, velocity and relative humidity of the drying medium (air), while internal parameters may include density, permeability, porosity, sorption-desorption characteristics and thermo physical properties of the material being dried. In this regard, understanding the heat and mass transfer in the product will help to improve drying process parameters and hence the quality. The mathematical model that reflects the drying process physics is a complex model. Particularly because of the process of convection drying of materials with high initial water content, boundary conditions should be assumed in the model describing heat and mass transfer. Ruiz-López and García-Alvarado (2007) proposed a model that provides a simple mathematical description for food drying kinetics and considered both shrinkage and a moisture dependent diffusivity. Food temperature was considered constant. The objectives of this work are: (a) to develop a mathematical model for simulating simultaneous moisture transport and heat transfer of pretreated carrot sample; (b) to study numerically the effect of the air drying conditions and pretreated on the drying of carrot and (c) to calculate the density and effective diffusion coefficients of carrot under various conditions.

Materials and Methods

In order to compare experimental and numerical analysis results, a laboratory scale convection dryer was used for experimental work. Cylindrical samples before entering the dryer were pretreated with ultrasound at frequency of 28 kHz for 10 min and microwave at 1 W g⁻¹ power for 15 min. Experimental results of moisture evolution and volume changes during drying were used to estimate moisture diffusivity and product density. Transient three-dimensional simulation of heat and mass transfer was performed with a set of initial and boundary conditions using the finite element method. The effect of the aforementioned pretreatments was applied in terms of the modified effective moisture diffusion coefficient in the heat and mass transfer equations.

Results and Discussion

The effect of the ultrasonic pretreatment on drying was mainly observed during the air-drying stage where a significant increase in water effective diffusivity was found. Ultrasonic waves can cause a rapid series of alternative compressions and expansions, in a similar way to a sponge when it is squeezed and released repeatedly (sponge effect). Microwave pretreatment reduced the initial moisture content and slightly increased the coefficient. The values of moisture diffusivity found in this study was in the order of 4.66×10^{-10} - 12.81×10^{-10} m² s⁻¹ which is typical value for drying of agricultural product (Zielinska and Markowski, 2010). Comparison of the experimental and predicted moisture and temperature profiles showed that the model could predict the heat and mass transfer phenomena with good accuracy. In this section, some simulation results are presented. The simulated moisture contents in the center and on the surface during drying showed that moisture content on the surface decreases rapidly for a short time due to the evaporation during precooling. Then it starts to increase because of the moisture diffusion from the layers under the surface towards. The temperature inside the object increases with an increase in the drying time since the temperature of the drying air is higher than that of the object. As a result of these transient and non-uniform temperature distributions, the moisture diffusivity which depends on the moisture will vary and in turn the rate of the moisture diffusion inside the object. As seen

1- M.Sc. Graduated Student, Agricultural Machinery Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Tabriz University, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran

(* - Corresponding Author Email: ss_seiedlo@yahoo.com)

in the figure, the distributions appear not to be symmetrical. Higher temperature and moisture gradients are obtained at the side wall due to the upstream of the drying air.

Conclusions

A theoretical analysis of pretreated and non-pretreated carrot drying process was presented. The main innovation introduced by this study was represented by the model formulation. This, in fact, simulated the simultaneous three dimensional heat and moisture transfer accounting for the variation of both air and food physical properties as functions of local values of temperature and moisture content. Moisture diffusivities of pretreated and non-pretreated carrot have been determined experimentally and moisture diffusivities of pretreated and non-pretreated carrot were found to increase with using of ultrasound pretreated. The effect of the aforementioned pretreatments was applied in terms of the modified effective moisture diffusion coefficient in the heat and mass transfer equations. Comparison of the experimental and predicted moisture and temperature profiles showed that the model could predict the heat and mass transfer phenomena with good accuracy. The model can be used as a proper tool in the design optimization and the optimal determination of the dryer performance parameters.

Keywords: Heat and mass transfer, Modeling, Moisture diffusivity, Ultrasound

ارزیابی و مقایسه خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی و اجباری برای خشک کردن سبزیجات در استان خوزستان

جعفر حبیبی اصل^{۱*} - لیلا بهبهانی^۲ - آذرخش عزیزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶

چکیده

به منظور بهره‌گیری از منابع انرژی پاک، کاهش ضایعات سبزیجات و افزایش سطح درآمد سبزی‌کاران، پژوهش حاضر طی سال‌های ۹۲-۱۳۹۰ در بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجراء گردید. در این پژوهش از خشک‌کن خورشیدی کابینتی سه طبقه با کلکتور شیاردار استفاده شد. برای جریان بهتر هوا در خشک‌کن، یک هواکش در بالای اتاق خشک‌کنی نصب گردید. عملکرد این خشک‌کن، با خشک کردن سبزی نعنای تحت سه تراکم ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم بر مترمربع به روش‌های همرفت طبیعی و اجباری در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار ارزیابی و با روش سنتی (خشک کردن در سایه و هوای آزاد) مقایسه گردید. نتایج آزمایش نشان داد که زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعنای در خشک‌کن خورشیدی بسته به تراکم محصول در سینی‌ها، ۳/۵ تا ۱۵ ساعت بود. در حالی که در روش مرسوم این زمان حدود ۵ روز به طول کشید. در رابطه با تأثیر قرارگیری سبزی نعنای در سینی‌های مختلف خشک‌کن، نتایج نشان داد که در سینی‌های بالاتر به دلیل کندتر شدن جریان هوا، زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت نهایی بین ۱۸ تا ۲۵ درصد افزایش یافت. مقایسه میانگین زمان خشک شدن نعنای نشان داد که زمان خشک شدن به روش همرفت اجباری نسبت به روش همرفت طبیعی به طور متوسط ۲۹/۷ درصد کاهش پیدا کرد. آنالیز رگرسیونی داده‌های مربوط به زمان خشک شدن نعنای نیز نشان داد که بهترین توصیف ریاضی رابطه بین رطوبت درونی سبزی نعنای و زمان خشک شدن معادله نمایی می‌باشد. بیشترین درصد اسانس با مقدار ۰/۸۰ درصد به تیمار خشک کردن به روش همرفت طبیعی و تراکم 3 kg m^{-2} و کمترین آن به مقدار ۰/۳۰ درصد به تیمار همرفت اجباری و تراکم 2 kg m^{-2} تعلق داشت. همچنین بیشترین مقدار کلروفیل را تیمار همرفت طبیعی و تراکم 3 kg m^{-2} با $1/51$ میلی‌گرم بر گرم برگ و کمترین مقدار را تیمار همرفت اجباری و تراکم 2 kg m^{-2} با $4/18$ میلی‌گرم بر گرم برگ دارا بودند. لذا براساس نتایج به دست آمده، می‌توان در شرایط همرفت طبیعی تراکم 3 kg m^{-2} و در شرایط همرفت اجباری تراکم 4 kg m^{-2} را پیشنهاد نمود.

واژه‌های کلیدی: اسانس، خشک‌کن خورشیدی، کلروفیل، نعنای، همرفت اجباری، همرفت طبیعی

مقدمه

شیمیایی در آن، باعث کاهش هزینه نگهداری و حمل و نقل آن می‌شود (Ekechukwa and Norton, 1998). بسیاری از سبزیجات به طور طبیعی فصلی بوده و ممکن است در یک دوره زمانی خاص در یک منطقه ویژه به وفور تولید گشته و عرضه آن‌ها به بازار افزایش یابد. بنابراین به دلیل فسادپذیر بودن آن‌ها، مقادیر زیادی از سبزیجات در یک دوره زمانی کوتاه از بین می‌روند. ضایعات پس از برداشت سبزیجات در اثر کمبود وسایل حمل و نقل، نبود زیرساخت‌های مناسب فرآوری و نگهداری و همچنین مشکلات بازاریابی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد تخمین زده شده‌اند. فرآوری سبزیجات می‌تواند یک نقش حیاتی را در کاهش ضایعات و بالا بردن ارزش آن‌ها داشته باشد که در نتیجه آن، سطح درآمد تولیدکنندگان نیز بهبود خواهد یافت (Ekechukwa and Norton, 1997). خشک‌کن‌های خورشیدی

خشک کردن یک روش مرسوم برای نگهداری مواد غذایی و بسیاری از فرآورده‌هایی نظیر سبزیجات می‌باشد. مهمترین مزیت خشک کردن مواد غذایی، کاهش رطوبت درونی آن‌ها تا رسیدن به سطح اطمینان به منظور افزایش عمر انباری^۴ آن‌ها می‌باشد. حذف رطوبت اضافی در مواد غذایی علاوه بر جلوگیری کردن از ضایعات

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استادیار پژوهش، کارشناس محقق و مربی پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
(*) نویسنده مسئول:
(Email: jhabibi139@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jam.v7i1.48370

4- Shelf life

فشار استاتیکی بالاتر از شرایط همرفت اجباری بود (Almasi *et al.*, 2003). در تحقیقی، یک خشک‌کن خورشیدی با همرفت طبیعی برای خشک کردن انگور مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، آنالیز کیفی روی انگور خشک شده نشان داد که خشک کردن سنتی در سایه و در معرض خورشید به ترتیب ۱۵ و ۷ روز نیاز داشت، در صورتی که استفاده از خشک‌کن خورشیدی در همان شرایط تنها ۴ روز به طول انجامید و کیفیت محصول نیز بهتر بود (Pangavhane *et al.*, 2002). کیفیت محصولات مختلف نظیر گوجه فرنگی، انگور، انجیر، نخود سبز و پیاز که با خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی خشک شده‌اند، در مقایسه با خشک کردن در معرض خورشید بالاتر گزارش گردید (El-Sebaei *et al.*, 2002). به‌طور مشابه قبا و همکاران (۲۰۰۶) یک خشک‌کن خورشیدی با همرفت طبیعی ارزان قیمت را طراحی کرده و ساختند. آنها با خشک کردن قطعات سیب زمینی، موز و انبه آزمایش‌های متعددی روی این خشک‌کن انجام دادند. نتایج نشان داد که کارایی حرارتی خشک‌کن جدید براساس انتقال گرما و جرم تحت تأثیر تابش خورشید در مقایسه با خشک کردن در معرض تابش مستقیم خورشید بسیار بالاتر بود (Ghaba *et al.*, 2006).

در استان خوزستان نیز با توجه به بالا بودن روزهای آفتابی در سال، به نظر می‌رسد که انرژی خورشیدی جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی بوده و لازم است در زمینه راه‌های استفاده از آن تحقیق و مطالعه بیشتری صورت گیرد. در این استان سالانه هزاران تن انواع سبزیجات تولید می‌گردد که اغلب به‌صورت تازه و با قیمت پایین به بازار عرضه شده و به دلیل عمر انباری کم، ضایعات بالایی دارند. از طرفی تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که خشک کردن با خشک‌کن‌های خورشیدی نه تنها کم هزینه و به صرفه می‌باشد، بلکه محصولات خشک شده با این روش دارای کیفیت مناسب است. بهره‌وری بالاتر از انرژی خورشیدی در خشک کردن یک محصول خاص، مستلزم استفاده از روش و سیستم‌های مناسب برای شرایط اقلیمی در هر منطقه می‌باشد. بنابراین به‌منظور استفاده بهینه با بهره‌وری بالاتر از مزایای انرژی خورشیدی در خشک کردن سبزیجات زمستانه در استان خوزستان، پژوهش حاضر با هدف بهره‌گیری از منابع انرژی پاک و کاهش ضایعات سبزیجات در منطقه اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر طی سال‌های ۹۲-۱۳۹۰ در بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجراء گردید. در این پژوهش یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی با کلکتور شیاری به ابعاد ۱×۲ متر برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تبدیل آن

محصولات را به‌طور یکنواخت و بهداشتی خشک می‌کنند که مزیت مهمی در صنعت خشک‌کنی به حساب می‌آید. همچنین محصولات، در زمان خشک شدن، از باران، گرد و خاک، حشرات و جانوران محافظت می‌شوند. این خشک‌کن‌ها سریع‌تر از خشک کردن در معرض مستقیم خورشید عمل می‌کنند و از طرفی قیمت بسیار کمتری نسبت به سیستم‌های خشک‌کن مکانیزه دارند (El-Sebaei *et al.*, 2009; Bagheri *et al.*, 2002). انواع مختلف خشک‌کن‌های خورشیدی به‌وسیله محققین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که اگرچه برای محصولات کشاورزی تجاری، خشک‌کن‌های خورشیدی با همرفت اجباری^۱ کنترل بهتری از هوای خشک‌کننده تأمین می‌کنند، ولی نیاز به انرژی بیشتری برای عملیات خشک‌کنی دارند. از این رو خشک‌کن‌های خورشیدی با همرفت طبیعی^۲ برای خشک کردن مواد غذایی به‌ویژه وقتی که در لایه نازکی قرار گیرند، توصیه شده‌اند (Esper and Muhlbauer, 1998). کنترل مراحل خشک‌کنی در خشک‌کن‌های با همرفت طبیعی مشکل می‌باشد، زیرا برای کاهش هزینه ساخت آن‌ها، مکانیزم‌های کنترل ویژه به‌کار گرفته نمی‌شود. بهترین راه‌حل استفاده از هواکش^۳ می‌باشد (Basunai and Abe, 2001). هواکش زمان بقای هوای گرم در محفظه خشک‌کن را تنظیم می‌کند. نتایج تحقیقات مختلف در این زمینه نشان داده است که اگر هواکش خورشیدی خوب طراحی شود، می‌تواند علاوه بر افزایش ماندگاری هوای گرم در محفظه خشک‌کن، جریان هوای مورد نیاز و آهنگ خشک‌کنی را افزایش دهد (Basunai and Abe, 2001). در ارزیابی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی همرفت اجباری، تأثیر دبی هوای خشک‌کن و نحوه به‌کارگیری آن بر روند کاهش رطوبت انگور و یکنواختی فرآیند خشک شدن روی سینی‌ها نشان داد که مدت زمان لازم برای خشک شدن محصول چهار روز و هر روز به مدت ۶ ساعت (با میانگین شدت تابش خورشید ۸۷۰ وات بر متر مربع) می‌باشد. همچنین مشخص شد که دبی هوا اثر معنی‌داری بر کاهش رطوبت محصول دارد (Dadashzadeh *et al.*, 2008). در آزمایشی با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی طبقه‌ای از نوع مختلط، سبزی شوید در شرایط همرفت طبیعی و همرفت اجباری و در سه عمق مختلف ۳، ۶ و ۱۰ سانتی‌متر خشک گردید. نتایج نشان داد که در عمق کم بین حالت‌های همرفت طبیعی و اجباری تفاوت آماری معنی‌داری وجود نداشت، در حالی که برای عمق‌های ۶ و ۱۰ سانتی‌متر استفاده از سیستم همرفت اجباری سرعت خشک شدن بیشتر از حالت همرفت طبیعی بود. در بررسی دمای کاری دستگاه خشک‌کن نیز مشاهده شد که در شرایط همرفت طبیعی، دمای نقاط مختلف دستگاه به دلیل افت

- 1- Forced convection
- 2- Natural convection
- 3- Chimney

و رطوبتی خشک‌کن رسید، خشک شد. پارامترهای مورد اندازه‌گیری و ارزیابی شامل زمان مورد نیاز خشک کردن محصول، روند تغییر رطوبت در طی زمان خشک شدن، میزان اسانس و مقدار کلروفیل محصول خشک شده بود. ارزیابی داده‌ها در قالب دو طرح آزمایشی انجام گردید. بدین صورت که طرح آزمایشی مربوط به زمان مورد نیاز و روند تغییر رطوبت در طی زمان خشک شدن در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شده و میانگین صفات به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن^۱ مقایسه شد. در مورد پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، یعنی میزان اسانس و مقدار کلروفیل نمونه‌ها، از آزمایش فاکتوریل بر پایه اسپلیت پلات استفاده شد. در این طرح، فاکتوریل نوع همرفت و تراکم محصول به‌عنوان فاکتور اصلی و در شش سطح در نظر گرفته شد. زمان نمونه‌برداری نیز به‌عنوان فاکتور فرعی و در شش سطح قرار گرفت.



شکل ۱- نمای روبه‌رو از خشک‌کن خورشیدی مورد آزمایش
Fig.1. Front view of experimental solar dryer

پارامترهای مورد اندازه‌گیری و ارزیابی و نحوه‌ی تعیین آن‌ها به شرح زیر بود:

- زمان مورد نیاز خشک کردن محصول: زمان خشک کردن سبزیجات در هر روش، از موقع قرار دادن نعنای تازه در معرض خشک شدن تا موقعی که رطوبت درونی آن تغییر نکرده و ثابت بماند، اندازه‌گیری شد. به این منظور سه عدد نمونه نعنای با جرم مشخص در سبدهای کوچک نمونه‌گیری در نقاط مختلف هر سینی قرار داده شد. سپس در طی عملیات خشک کردن، هر نیم ساعت یک بار این نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی و با دقت ۰/۰۱ گرم وزن می‌شدند.

به گرما ساخته شد (شکل ۱). استفاده از صفحه جذب شیاردار باعث افزایش سطح جذب انرژی خورشیدی در کلکتور حاضر، از ۲ متر مربع به ۳/۲ متر مربع شد. اتاق خشک‌کنی از محفظه‌ای عایق دار به ابعاد ۸۰×۸۰×۱۰۰ سانتی‌متر و دارای سه طبقه تشکیل شده بود. لایه‌های سبزی جهت خشک شدن روی سینی‌های مشبک در سه طبقه پهن شدند. از آن‌جایی‌که عبور جریان هوا از میان محصول خشک شونده می‌تواند به‌صورت جابه‌جایی طبیعی (همرفت طبیعی) یا جابه‌جایی اجباری (همرفت اجباری) باشد، خشک‌کن ساخته شده هم در حالت همرفت طبیعی و هم در حالت همرفت اجباری مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت همرفت طبیعی، در بالای محفظه خشک‌کنی هواکش طبیعی نصب گردید. این هواکش باعث تقویت جریان هوا در خشک‌کن شد. برای ایجاد همرفت اجباری، یک دمنده الکتریکی با دبی $0.36 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ در مسیر عبور هوای خشک‌کننده، تعبیه شد. آن در سطح مقطع خروجی فن تعیین گردید. پس از تکمیل مراحل ساخت، کلیه قسمت‌های خشک‌کن روی قاب اصلی نصب گردیدند.

به‌منظور اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت هوا برای هر مدت زمانی دلخواه در قسمت‌های مختلف خشک‌کن، دستگاه داده‌بردار دیجیتال ساخته و روی خشک‌کن خورشیدی نصب گردید (شکل ۲). این دستگاه از دو قسمت دستگاه کنترل مرکزی و حس‌گرها تشکیل شده است. وظیفه دستگاه کنترل مرکزی، راه‌اندازی و کنترل اندازه‌گیرها و ثبت اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط حس‌گرها می‌باشد. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت از حس‌گرهای SHT75 ساخت کارخانه SENSIRION کشور سوئیس استفاده گردید، که یکی از پیشرفته‌ترین حس‌گرهای موجود می‌باشند، به‌طوری‌که دما و رطوبت محیط را با دقت بالایی اندازه‌گیری کرده و احتیاج به واسنجی ندارند. محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری توسط این حس‌گرها بین ۴۰- و ۱۲۳ درجه سلسیوس و با دقت ۰/۰۱ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین محدوده رطوبت قابل اندازه‌گیری توسط حس‌گرها بین صفر تا ۱۰۰ درصد و با دقت ۰/۰۳ درصد می‌باشد.

در پژوهش حاضر تعداد ۶ عدد حس‌گر در نقاط مختلف خشک‌کن از جمله ورودی و خروجی کلکتور، اتاق خشک‌کنی و خروجی خشک‌کن نصب گردید (شکل ۳).

در مرحله بعدی پژوهش، عملکرد دستگاه خشک‌کن خورشیدی ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفته و با روش سنتی خشک کردن نعنای در هوای آزاد (خشک کردن در سایه به‌عنوان تیمار شاهد) مقایسه گردید. عملکرد این خشک‌کن در دو حالت همرفت طبیعی و همرفت اجباری، با خشک کردن سبزی نعنای روی سینی‌های خشک‌کنی تحت سه تراکم ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم بر متر مربع در سه تکرار ارزیابی شد. در کلیه تیمارها، محصول خشک شونده تا زمانی که رطوبت درونی آن به رطوبت به نقطه تعادل رطوبتی در شرایط دمایی



شکل ۳- حس گرهای نصب شده در فضای بین سینی‌ها
Fig.3. Sensors mounted in space of between trays



شکل ۲- دستگاه داده بردار خودکار برای راه اندازی و کنترل سنسورها و ثبت اطلاعات اندازه گیری شده

Fig.2. Automatic data logger for starting, controlling sensors and data recording

دست داده می شود. اسانس ها به دلیل فرار بودن نیز ممکن از این واقعیت مستثنی نباشند و باید مورد ارزیابی قرار گیرند (Davoodi *et al.*, 2007; Duriyaprapan *et al.*, 1986; Negi and Roy, 2001).

برای اندازه گیری اسانس نمونه های آزمایشی، از روش تقطیر با آب توسط دستگاه کلونجر^۱ استفاده شد. بدین ترتیب که ۳۰ گرم از نمونه نعناع به همراه ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر داخل بالن یک لیتری بر روی شعله قرار داده و با سرعت ۳ تا ۴ میلی لیتر در دقیقه با دستگاه کلونجر اسانس گیری شد. برای تعیین مقدار اسانس استحصالی، از گزیلوز^۲ به عنوان حلال تعیین کننده حجم اسانس استفاده گردید. سپس جرم اسانس هر نمونه بر جرم اولیه نمونه تقسیم و به صورت درصد بیان گردید (Duriyaprapan *et al.*, 1986).

- تغییر رنگ محصول خشک شده (تغییرات مقدار کلروفیل): برای ارزیابی رنگ محصول در این تحقیق، مقدار کلروفیل نعناع خشک شده (رنگ سبز نعناع) طی یک دوره شش ماهه (همانند دوره اندازه گیری میزان اسانس) اندازه گیری شد. برای سنجش میزان کلروفیل، ۰/۵ گرم از نمونه خشک شده را با چند میلی لیتر استون ۸۰ درصد به تدریج ساییده تا کلروفیل وارد محلول استونی شود. سپس حجم محلول توسط بالن ژوژه به ۲۵ میلی لیتر رسانده شد. محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ rpm سانتریفوژ و جذب نوری آن در طول موج ۶۵۲ نانومتر به وسیله اسپکتروفوتومتر مدل

- روند تغییر رطوبت در طی زمان خشک شدن: رطوبت اولیه محصول در تیمارهای مختلف بین ۸۲ تا ۸۴ درصد (بر پایه تر) بود و تا رطوبت نهایی میانگین ۱۳/۳ درصد خشک شد. نمونه برداری ها برای اندازه گیری رطوبت در ابتدای هر آزمایش به دلیل نرخ بالای رطوبت دهی محصول هر ۳۰ دقیقه و سپس هر یک ساعت یک بار انجام گرفت. میزان رطوبت درونی نمونه ها توسط دستگاه آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت اندازه گیری شد. بدین ترتیب منحنی روند تغییرات رطوبتی محصول خشک شونده در مقابل زمان برای روش های مختلف خشک کردن رسم گردید (Ethman *et al.*, 2009).

- میزان اسانس: از آن جایی که روش خشک کردن می تواند روی میزان اسانس نعناع به دلیل فرار بودن آن تأثیر زیادی بگذارد (Ethman *et al.*, 2009)، به این لحاظ در این تحقیق ارزیابی این فاکتور مهم در مورد محصول نعناع مدنظر قرار گرفت. به این ترتیب که علاوه بر اندازه گیری اسانس نعناع قبل و بلافاصله پس از خشک شدن (که به عنوان ماه اول در نظر گرفته شد)، نمونه های مربوط به هر تیمار در کیسه های پلاستیکی و جعبه های مقوایی بسته بندی و به مدت ۶ ماه در انبار با شرایط معمول منطقه نگهداری شده و ابتدای هر ماه میزان اسانس نمونه های خشک شده با دستگاه اسانس گیر اندازه گیری شد. انتخاب مدت زمان ۶ ماه برای این آزمایش به این دلیل بود که محصولات کشاورزی پس از فراوری به ویژه خشک شدن، با گذشت زمان برخی ویژگی های کیفی آنها تغییر کرده و یا از

1- Clevenger
2- Xylose

افزایش می‌یابد. این به دلیل افزایش رطوبت نسبی هوا در زمان رسیدن به سینی‌های بالاتر می‌باشد. مشاهدات اندازه‌گیری رطوبت هوای خشک‌کننده در نقاط مختلف خشک‌کن نیز مؤید این مطلب بود.

مقایسه بین روش‌های خشک کردن نشان داد که زمان رسیدن به رطوبت نهایی محصول خشک شونده در روش همرفت اجباری به‌طور متوسط ۲۹/۷ درصد نسبت به روش همرفت طبیعی کاهش یافت. کاهش این زمان در تراکم‌های ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم بر متر مربع به ترتیب ۳۹، ۲۴ و ۲۸ درصد بود. همچنین کاهش زمان خشک شدن در روش همرفت اجباری نسبت به همرفت طبیعی در سینی‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۳۰، ۲۸/۷ و ۳۰ درصد محاسبه گردید. استفاده از دمنده موجب تسریع در جابه‌جایی هوای خشک‌کننده در روش همرفت اجباری گردید و این امر در کاهش زمان رسیدن به رطوبت نهایی محصول تأثیر گذاشته بود. کاهش زمان خشک شدن در همرفت اجباری نسبت به همرفت طبیعی در سینی بالایی بیشتر از سینی‌های پایینی و میانی بود. زیرا در روش همرفت طبیعی به دلیل کندی جریان هوا از میان توده‌های سبزی، روند از دست دادن رطوبت در سینی بالایی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرد. ولی در روش همرفت اجباری محدودیت جریان هوا در بین سینی‌ها کمتر شده و اختلاف سرعت از دست دادن رطوبت بین سینی‌های مختلف نسبت به روش همرفت طبیعی کاهش یافت.

میزان اسانس نعنای خشک شده

قبل از اجرای تیمارهای آزمایشی، میزان رنگ (براساس مقدار کلروفیل) و اسانس نمونه‌های نعنای تازه برداشت شده از مزرعه اندازه‌گیری گردید. مقدار اسانس نمونه تازه ۰/۴۳ درصد و میزان رنگ آن ۰/۰۹ میلی‌گرم کلروفیل در گرم نمونه بود.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع همرفت، تراکم نعنای و تمامی اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار اسانس معنی‌دار می‌باشد، ولی اثر متقابل نوع همرفت در زمان نمونه‌برداری دارای اثر معنی‌دار نبود (جدول ۲).

نتایج همچنین نشان داد که میزان اسانس موجود در نمونه‌های خشک شده به روش همرفت طبیعی به‌طور متوسط ۵ درصد بیش از اسانس مربوط به همرفت اجباری می‌باشد. علت اصلی کمتر بودن میزان اسانس در روش همرفت اجباری نسبت به همرفت طبیعی مربوط به افزایش شدت تبخیر آب از نعنای می‌باشد. در همرفت اجباری شدت برخورد هوای گرم با نعنای در محفظه خشک‌کن (به دلیل استفاده از فن) بیشتر بوده و در نتیجه باعث تبخیر سریع رطوبت و کاهش اسانس در نعنای

Pharmacia Biotech/Novaspec II اندازه‌گیری شد. مقدار کلروفیل بر حسب میلی‌گرم کلروفیل در گرم نمونه طبق فرمول آرنون^۱ به صورت رابطه (۱) محاسبه شد (Arnon, 1994).

$$CF = A(256) / 34.5 \times \frac{V}{W} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، CF مقدار کلروفیل نمونه بر حسب میلی‌گرم کلروفیل در گرم نمونه، V حجم محلول کلروفیلی بر حسب میلی‌لیتر، W جرم برگ بر حسب گرم و A جذب نوری عصاره می‌باشد.

نتایج و بحث

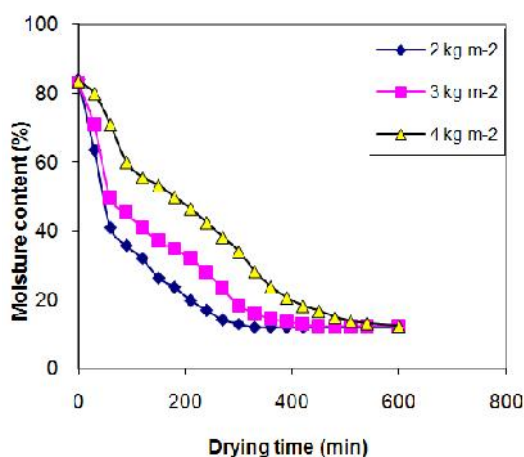
زمان خشک شدن و روند تغییر رطوبت محصول

مقایسه تیمارهای مختلف نشان داد که در نتیجه‌ی استفاده از خشک‌کن خورشیدی در مقایسه با روش خشک کردن در سایه، زمان خشک شدن محصول ۳ تا ۸ برابر کاهش یافت. زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعنای در خشک‌کن خورشیدی در تیمارهای مختلف با توجه به تراکم محصول و روش خشک‌کنی ۳/۵ تا ۱۵/۳ ساعت به طول انجامید. این در حالی است که در روش سنتی این زمان حدود ۵ روز طول کشید. در جدول ۱ زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعنای در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعنای در خشک‌کن خورشیدی به روش همرفت طبیعی و اجباری بسته به تراکم محصول در سینی‌ها، به ترتیب ۶/۲۵ تا ۱۵/۳ و ۳/۵ تا ۱۰ ساعت به طول انجامید. در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب روند تغییر رطوبت نعنای در طول زمان خشک شدن در تراکم‌های مختلف برای همرفت طبیعی و اجباری نشان داده شده است. در این منحنی‌ها رطوبت محصول با نرخ نزولی نسبت به زمان خشک شدن تغییر می‌کند. این نتیجه کاملاً با کارهای انجام گرفته توسط محققین دیگر روی محصولات مشابه مطابقت دارد (Moradi and Zomorodian, 2008; Ethman *et al.*, 2009). همچنین شیب منحنی تراکم کمتر (2 kg m^{-2}) در شکل‌های ۴ و ۵ بیشتر از دو تراکم دیگر می‌باشد. این می‌تواند به دلیل جریان سریع‌تر هوا از میان توده کم‌تراکم نعنای باشد. منحنی‌ها نیز نشان می‌دهند که هرچه تراکم محصول بیشتر شود، به دلیل کندتر شدن جریان هوا در خشک‌کن، رسیدن محصول به رطوبت نهایی دیرتر صورت می‌پذیرد. کندتر شدن جریان هوا نیز باعث افزایش میزان رطوبت در محفظه خشک‌کنی شده و روند از دست دادن رطوبت محصول را کاهش می‌دهد (Almasi *et al.*, 2003). در رابطه با تأثیر قرارگیری سبزی نعنای در سینی‌های مختلف خشک‌کن، نتایج نشان داد که در سینی‌های بالاتر زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت نهایی

جدول ۱- میانگین زمان خشک شدن نعنای (به ساعت) در تیمارهای مختلف خشک‌کن خورشیدی

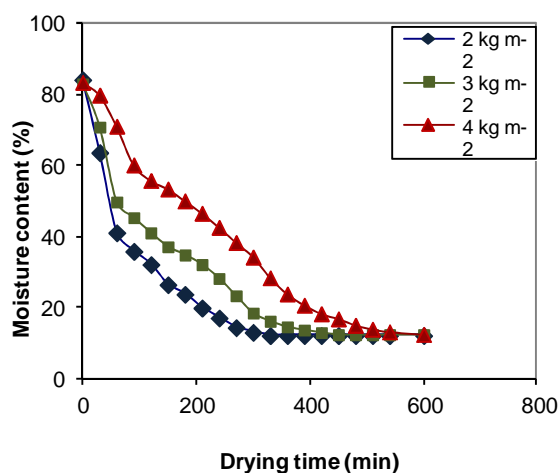
Table 1- Mean of mint drying time (in hours) in different solar dryer treatments

روش خشک کردن Drying method	Trays position محل سینی‌ها	تراکم محصول (kg m ⁻²)			میانگین Mean
		2	3	4	
همرفت طبیعی Natural convection	Down tray	6.25	6.7	9.3	7.42
	Second tray	7.6	8.3	10.5	8.8
	Upper tray	8.3	9.3	15.3	10.97
	Mean	7.38	8.1	11.7	9.06
همرفت اجباری Forced convection	Down tray	3.5	5	7	5.17
	Second tray	4.5	6	8.3	6.27
	Upper tray	5.5	7.5	10	7.67
	Mean	4.5	6.17	8.43	6.37



شکل ۴- روند کاهش رطوبت تراکم‌های مختلف نعنای طی زمان خشک شدن به روش همرفت طبیعی

Fig.4. Moisture downswing of different mint density dried in natural convection method



شکل ۵- روند کاهش رطوبت تراکم‌های مختلف نعنای طی زمان خشک شدن به روش همرفت اجباری

Fig.5. Moisture downswing of different mint density dried in forced convection method

جدول ۲- جدول آنالیز واریانس تأثیر تیمارهای مختلف مورد ارزیابی بر رنگ و مقدار اسانس

Table 2- ANOVA results of the effect of evaluated treatments on color and essence values

منابع تغییرات Source of variations	میانگین مربعات Mean squares		
	درجه آزادی Degree of freedom	مقدار اسانس Essence	مقدار کلروفیل Color
Convection type (A) نوع همرفت	1	0.028*	130.435**
Mass density (B) تراکم محصول	3	0.96**	57.921**
A×B	3	0.386**	17.783**
Error	16	0.004	0.006
Sampling time (C) زمان نمونه گیری	5	0.52**	8.543**
A×C	5	0.003 ^{ns}	0.104**
B×C	15	0.027**	0.082**
A×B×C	15	0.008**	0.092**
Error	80	0.002	0.003

* و **: به ترتیب معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد.

*, **: significant at 1% and 5% levels respectively.

بوده و باعث تاخیر کمتر اسانس شده است.

نتیجه دیگری که در این آزمایش به دست آمد، این بود که برخلاف همرفت اجباری، در روش همرفت طبیعی، با افزایش تراکم از ۳ به ۴ کیلوگرم بر متر مربع، میزان اسانس ۳۳ درصد کاهش یافت. زیرا در روش همرفت طبیعی افزایش تراکم به ۴ کیلوگرم بر مترمربع، باعث گرفتگی بیشتر مسیرهای عبور هوای خشک کننده (به دلیل عدم استفاده از فن) گردید. در این شرایط که مدت زمان خشک شدن نیز به شدت افزایش یافته بود، حالت ماندگی ایجاد و بافت برگ‌های نعنای دچار تخریب شده و در نتیجه میزان اسانس کاهش یافت.

درحالی که در روش همرفت طبیعی، عملیات خشک شدن و کاهش رطوبت نعنای با سرعت کمتری رخ داده و اسانس بیشتری نسبت به روش همرفت اجباری در نعنای خشک شده باقی ماند (Blanco *et al.*, 2002; Dragana *et al.*, 2010). البته این نتایج در تراکم‌های ۳ و ۲ کیلوگرم بر متر مربع به دست آمد. ولی در تراکم ۴ کیلوگرم بر متر مربع نتیجه برعکس بود. یعنی در این تراکم میزان اسانس نعنای در همرفت اجباری به طور متوسط ۴۱ درصد بیش از همرفت طبیعی مشاهده گردید. زیرا تراکم بالاتر نعنای در روش همرفت اجباری مانعی در جهت افزایش سرعت هوای خشک کننده

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل تراکم نعنای در نوع همرفت بر میزان اسانس و کلروفیل

Table 3- Means comparison of the effect of mass density and convection type interactions on essence and chlorophyll content

تیمارهای آزمایشی Treatments	تراکم Density	مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد Means comparison at 5% level of significant*	
		میزان اسانس Essence content (%)	مقدار کلروفیل Chlorophyll content (mg.g ⁻¹)
همرفت طبیعی Natural convection	2 kg m ⁻²	0.354d	6.56d
	3 kg m ⁻²	0.807a	8.51a
	4 kg m ⁻²	0.541c	8.49a
همرفت اجباری Forced convection	2 kg m ⁻²	0.304e	4.18f
	3 kg m ⁻²	0.524c	6.61c
	4 kg m ⁻²	0.763a	5.15e

*: میانگین‌های هر ستون که دارای حروف مشترک هستند، اختلاف معنی‌داری ندارند.

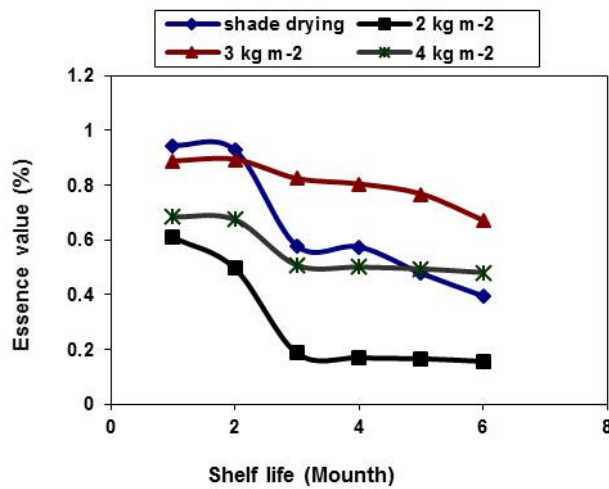
*: There is no significant difference between means which have common letter in each column.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های اثر زمان نمونه‌برداری بر میزان اسانس و کلروفیل مستقل از اثر همرفت و تراکم
Table 4- Means comparison of the effect of sampling time on essence and chlorophyll content

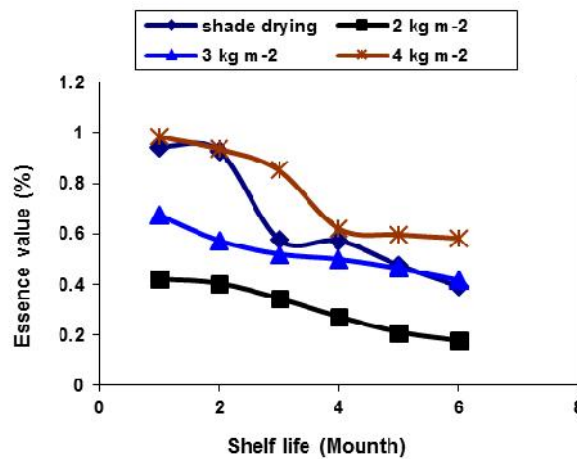
زمان نمونه‌برداری (ماه) Sampling time (month)	مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد Means comparison at 5% level of significant*	
	میزان اسانس Essence content (%)	مقدار کلروفیل Chlorophyll content (mg g ⁻¹)
	1	0.768f
2	0.729e	6.58b
3	0.569d	6.76c
4	0.518c	7.05d
5	0.457b	7.42e
6	0.402a	7.98f

*: میانگین‌های هر ستون که دارای حروف مشترک هستند، اختلاف معنی‌داری ندارند.

*: there is no significant difference between means which have common letter in each column.



شکل ۶- منحنی‌های تغییر اسانس نعنای خشک شده به روش همرفت طبیعی و تیمار شاهد در طی زمان انبارداری
Fig.6. Essence changing curves of natural convection and shade dried mint during shelf time



شکل ۷- منحنی‌های تغییر اسانس نعنای خشک شده به روش همرفت اجباری و تیمار شاهد در طی زمان انبارداری
Fig.7. Essence changing curves of forced convection and shade dried mint during shelf time

از ۶ ماه (۹/۴۸ میلی‌گرم بر گرم برگ) و پایین‌ترین مقدار را نمونه 2 kg m^{-2} بلافاصله پس از خشک شدن با ۴/۸۹ میلی‌گرم بر گرم برگ دارا بود. در این آزمایش نیز با گذشت زمان و کاهش میزان رطوبت، افزایش مقدار کلروفیل نیز مشاهده گردید (جدول ۴). این نتایج با گزارشات محققان مختلفی مطابقت دارد (Abde-Galil and (El-Nakib, 2008; Rocha *et al.*, 1993).

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش نشان داد که زمان مورد نیاز برای خشک شدن سبزی نعناع در خشک‌کن خورشیدی بسته به تراکم محصول در سینی‌ها، ۳/۵ تا ۱۵ ساعت بود. درحالی‌که در روش مرسوم این زمان حدود ۵ روز به طول کشید. همچنین زمان خشک شدن به روش همرفت اجباری نسبت به روش همرفت طبیعی به‌طور متوسط ۲۹/۷ درصد کاهش پیدا کرد. در نتیجه‌ی افزایش تراکم سبزی نعناع در طبقه‌های خشک‌کن از ۲ به ۳ و همچنین از ۳ به ۴ کیلوگرم بر متر مربع، زمان خشک شدن به‌ترتیب ۱۸ و ۲۵ درصد افزایش یافت. بیشترین درصد اسانس با مقدار ۰/۸۰ درصد به تیمار خشک کردن به روش همرفت طبیعی و تراکم 3 kg m^{-2} و کمترین آن به مقدار $0/30$ درصد به تیمار همرفت اجباری و تراکم 2 kg m^{-2} تعلق داشت. همچنین بیشترین مقدار کلروفیل را تیمار همرفت طبیعی و تراکم 3 kg m^{-2} با ۸/۵۱ میلی‌گرم بر گرم برگ و کمترین مقدار را تیمار همرفت اجباری و تراکم 2 kg m^{-2} با ۴/۱۸ میلی‌گرم بر گرم برگ دارا بودند. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان اظهار نمود، به منظور استفاده بهینه از انرژی خورشیدی و کاهش ضایعات سبزیجات در استان خوزستان، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن برگ نعناع تولید شده در فصل زمستان می‌تواند گزینه مناسبی باشد. در این صورت، در شرایط همرفت طبیعی تراکم 3 kg m^{-2} و در شرایط همرفت اجباری تراکم 4 kg m^{-2} پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

از تکنسین‌های بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، آقایان امیر دیباجی و منوچهر مراد اسکندری که در ساخت خشک‌کن خورشیدی و اجرای این پروژه تحقیقاتی، همکاری لازم را مبذول فرمودند، صمیمانه سپاسگزاریم.

مقایسه میانگین اثر متقابل نوع همرفت در تراکم نعناع نشان می‌دهد که بیشترین درصد اسانس با مقادیر ۰/۸۰۷ و ۰/۷۶۳ درصد به‌ترتیب به تیمارهای همرفت طبیعی با تراکم 3 kg m^{-2} و همرفت اجباری با تراکم 4 kg m^{-2} و کمترین آن به مقدار ۰/۳۰۴ درصد به تیمار همرفت اجباری و تراکم 2 kg m^{-2} تعلق داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین نمونه‌ها در طی زمان‌های مختلف نمونه‌برداری نیز نشان داد که میزان اسانس در طی دوره نگهداری به مرور زمان کاهش می‌یابد. بالاترین میزان اسانس را ماه اول با ۰/۷۶ درصد و پایین‌ترین را ماه ششم با ۰/۴۰۲ درصد دارا بود (جدول ۴). در شکل‌های ۶ و ۷ نیز منحنی‌های تغییر میزان اسانس تیمارهای این آزمایش در طی مدت زمان انبارداری مختلف به‌ترتیب برای خشک کردن به روش همرفت طبیعی و اجباری نشان داده شده است. کاهش میزان اسانس در طی انبارداری می‌تواند به دلیل اکسیداسیون و یا سایر تغییرات شیمیایی باشد (Venskutonis, 1996). این نتیجه با گزارش (Negi and Roy, 2001) مطابقت دارد. همچنین پاکت‌های پلی اتیلنی استفاده شده، نسبت به فراریت ترکیبات که اغلب هیدروکربن‌های مونوترپن^۱ می‌باشند، مقاومت نداشته و این ترکیبات طی زمان از آن عبور کرده‌اند. در تحقیقی که به مقایسه دو روش خشک کردن در آون و خشک کردن در شرایط طبیعی در انبار بر روی گیاه آویشن صورت گرفت، نتایج نشان داد که حذف آب به روش خشک کردن طبیعی در انبار مقرون به صرفه‌تر است، زیرا مقدار اسانس بیشتری با این روش می‌شود (Shalaby *et al.*, 1995).

مقدار کلروفیل نعناع خشک شده

براساس نتایج ارائه شده در جدول تجزیه آماری داده‌ها (جدول ۲) تمامی تیمارهای اعمال شده و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار کلروفیل در سطح ۱ درصد اثر معنی‌دار داشته‌اند. اثر متقابل نوع همرفت و تراکم نعناع نشان داد که بیشترین مقدار کلروفیل را تیمار همرفت طبیعی و تراکم 3 kg m^{-2} با ۸/۵۱ میلی‌گرم بر گرم برگ و کمترین مقدار را تیمار همرفت اجباری و تراکم 2 kg m^{-2} با ۴/۱۸ میلی‌گرم بر گرم برگ دارا می‌باشند (جدول ۳). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچه سرعت تغییر دمای خشک‌کن کمتر باشد، تأثیر کمتری بر تغییر میزان رنگ می‌گذارد.

نتایج همچنین نشان داد که زمان نگهداری و گذشت زمان نیز بر مقدار کلروفیل تأثیرگذار بوده و روند کاهشی داشته است. البته تغییرات مقدار کلروفیل در همرفت طبیعی نسبت به همرفت اجباری کمتر بوده و میزان آن بالاتر می‌باشد. اثر متقابل تراکم نعناع و زمان نمونه‌برداری نشان داد که بالاترین مقدار کلروفیل را نمونه شاهد پس

References

1. Abde- Galil, H. S., and A. A. El- Nakib. 2008. Effect of natural convection solar drying on quality of peppermint. The 15th. Annual conference of the Miser Society of Agricultural Engineering. 12-13 March. pp. 513-534.
2. Almasi, M., A. A. Zomorodian, and Y. Sahebi. 2003. Utilizing solar energy for dill drying. First Iranian Farm Machinery Students Conference. Orumieh University, Farm Machinery Department. (in Farsi).
3. Arnon, D. I. 1994. Copper enzymes in isolante chloroplastes plyphenol oxydas in beta vulgarise. Plant Physiology 24: 1-15.
4. Bagheri, N., A. Keihani, S. S. Mohtasabi, and R. Alimardani. 2009. Investigating effective parameters on drying leaves in forced convection solar dryer. Journal of Agricultural Engineering Research 4 (10) : 73-88. (In Farsi).
5. Basunai, M. A., and T. Abe. 2001. Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. Journal of Food Engineering 47 (4): 295-301.
6. Blanco, M. C. S. G., L. C. Ming, M. O. M. Marques, and O. A. Povi. 2002. Drying Temperature effects in peppermint essential oil content and composition. ISHS Acta horticulture 51 (1): 569.
7. Dadashzadeh, M., A. Zomorodian, and Gh. R. Mesbahi. 2008. The effect of drying airflow rates and modes of drying on moisture content reduction for grapes in a cabinet type solar dryer. Journal of Hortical Science 22 (1): 23-34. (In Farsi).
8. Davoodi, M. G., P. Vijayanand, S. G. Kulkarni, and K. V. R. Ramana. 2007. Effect of different pre-treatments and dehydration methods on quality characteristics and storage stability of tomato powder. Food Science and Technology 40 (10): 1832-1840.
9. Dragana, M., M. Sofija, S. Mihailo, T. Dragan, and V. Novica. 2010. Effects of different drying methods on the yield and the composition of essential oil from herb *Mentha Longifolia* (L.) Hudson. Biological Nyssana. 1(12): 89-93.
10. Duriyaprapan, S. E. J., and K. E. Basford. 1986. The Effect of Temperature on Growth, Oil Yield and Oil Quality of Japanese Mint. Annals of Botany 58: 729-736.
11. Ekechukwa, O. V., and B. Norton. 1997. Design and measured performance of a solar chimney for natural-circulation solar-energy dryers. Renewable energy 10 (1): 81-90.
12. Ekechukwa, O. V., and B. Norton. 1998. Review of solar energy drying systems II: an over view of solar drying technology, Energy Conservation and Management 40: 615 -655.
13. El-Sebaai, A. A., S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, and H. G. El-Gohary. 2002. Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables. Energy 27 (9): 845-859.
14. Esper, A., and W. Muhlbauer. 1998. Solar drying-an effective means of food preservation. Renewable Energy 15(1-4): 95-100.
15. Ethman, C. S., M. A. O. Kane1, A. Sid, and M. Kouhila. 2009. Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint leaves (*M. pulegium*). Renewable Energy 12 (3): 449-470.
16. Ghaba, P., H. Yobouet Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kamenan Koua, and S. Toure. 2006. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. Renewable Energy 32 (11): 1817-1829.
17. Moradi, M., and A. Zomorodian. 2008. Best mathematical drying model selection for indirect solar drying of cumin in forced convection solar dryer. The 5th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Ferdosi University of Mashhad. (In Farsi).
18. Negi, P. S., and S. K. Roy. 2001. Retention of quality characteristics of dehydrated green leaves during storage. Journal of Plant Foods for Human Nutrition 56 (3): 285-295.
19. Pangavhane, D. R., R. L. Sawhney, and P. N. Sarsavadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. Energy 27: 579-590.
20. Rocha, T., C. Marty- Audouin, and A. Alebert. 1993. Effect of drying temperature and blanching on the degradation of chlorophyll a and b in mint (*Mentha spicate Huds.*) and basil (*Ocimum basilicum*): Analysis by high performance liquid chromatography with photodiode array detection journal Chromatographia. 3(1): 152-156.
21. Shalaby, A. S., S. El-Gengaihi, and M. Khatlab. 1995. Oil of *Mellisa officinalis* L., as affected by storage and herb drying. Journal of Essential Oil Research 7: 667-669.
22. Venskutonis, R. 1996. Influence of drying and irradiation on the composition of volatile compounds of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). Flavor and Fragrance J 11: 123-128.

Evaluation and comparing of natural and forced solar dryer for mint drying in Khuzestan province

J. Habibi Asl^{1*} - L. Behbahani² - A. Azizi³

Received: 13-07-2015

Accepted: 28-10-2015

Introduction

Many vegetables such as mint are highly seasonal in nature. They are available in plenty at a particular period of time in specific regions that many times result in market glut. Due to perishable nature, huge quantity of vegetables is spoiled within a short period. The post-harvest loss in vegetables has been estimated to be about 30-40% due to inadequate post-harvest handling, lack of infrastructure, processing, marketing and storage facilities. Therefore, the food processing sector can play a vital role in reducing the post-harvest losses and value addition of vegetables which will ensure better remuneration to the growers. Drying is a common technique for preservation of food and other products; including fruits and vegetables. The major advantage of drying food products is the reduction of moisture content to a safe level that allows extending the shelf life of dried products. The removal of water from foods provides microbiological stability and reduces deteriorate chemical reactions. Also, the process allows a substantial reduction in terms of mass, volume, packaging requirement, storage and transportation costs with more convenience. Sun drying is a well known traditional method of drying agricultural products immediately after harvest. However, it is plagued with in-built problems, since the product is unprotected from rain, storm, windborne dirt, dust, and infestation by insects, rodents, and other animals. It may result in physical and structural changes in the product such as shrinkage, case hardening, loss of volatiles and nutrient components and lower water reabsorption during rehydration. Therefore, the quality of sun dried product is degraded and sometimes become not suitable for human consumption. For these reasons, to utilize renewable energy sources, reduce vegetable losses and increase farmers income, the current project has been conducted in the Agricultural Engineering Department of Khuzestan Agricultural Research Center during the years 2011-2013.

Materials and Methods

In this research an indirect cabinet solar dryer with three trays and grooved collector was constructed. To improve air convection, a chimney was mounted above the dryer. The dryer performance was evaluated by drying mint leaves in three levels of mass density of 2, 3, and 4 kg m⁻² at two drying manners of natural and forced convection and compared with drying mint leaves in shade as the traditional method.

Results and Discussion

The results showed that total drying time required in different solar drier treatments was 3.5 to 15 h, while it was about 5 days in traditional method. Drying time in upper trays was more as the air flow decreased due to increase in mass density. Mean required drying time in forced convection was 29.7% less than that of natural convection. Maximum essences with 0.80% and 0.76% were belonged to "natural convection and 3kg m⁻² mass density" and "forced convection and 4 kg m⁻² mass density" treatments respectively, while minimum one with 0.30% was for "forced convection and 2 kg m⁻² mass density" treatment. Also, the highest and lowest chlorophyll content with 8.51 and 4.18 mg ml⁻¹ were measured in "natural convection and 3 kg m⁻² mass density" and "forced convection and 4 kg m⁻² mass density" treatments respectively. According to obtained results, 3 and 4 kg m⁻² mass density can be suggested for natural and forced convection solar drying of mint leaves in Khuzestan condition respectively.

1, 2, 3- Assistant Professor, Researcher and Research Instructor of Agricultural Engineering research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Ahwaz, Iran, Respectively.
(*- Corresponding Author Email: jhabibi139@yahoo.com)

Conclusions

In order to reduce vegetable losses and increase Khuzestan vegetable producers income, indirect cabinet solar dryer for drying mint leaves in winter season, could be an appropriate option. For natural and forced convection drying methods, mass density of 3 and 4 kg m⁻² is recommended respectively.

Keywords: Chlorophyll, Essences, Forced convection, Mint, Natural convection, Solar dryer

اثر متغیرهای سامانه آکوستیک بر سیگنال‌های صدای دو رقم خربزه

فرهاد خوشنام^{۱*} - سید رضا حسن‌بیگی بیدگلی^۲ - مسلم نامجو^۳ - مهدیه دوروزی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۹

چکیده

در این تحقیق از دو رقم خربزه صادراتی "زرد ایوانکی" و "سوسکی سبز" و سامانه آزمایشگاهی مبتنی بر فناوری آکوستیک استفاده شد. سامانه آزمایشگاهی شامل مکانیزم تحریک مکانیکی میوه، حسگر صوتی، تجهیزات نمایش و ضبط سیگنال صدا و تکیه‌گاه میوه می‌باشد. در این سامانه میوه توسط ضربه آونگ تحریک شده، پاسخ سیگنال به کمک صداسنج دریافت و سپس پردازش گردید. عوامل متعددی روی پاسخ آکوستیکی میوه خربزه و در نتیجه پارامترهای آکوستیکی تأثیر دارند. در این تحقیق اثر پارامترهای جنس گوی ضربه‌زن (سه سطح)، زاویه برخورد آونگ به میوه (سه سطح)، موقعیت صداسنج نسبت به محل ضربه (دو سطح) و نوع رقم (دو سطح) به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی و با سه تکرار روی هر نمونه خربزه مورد مطالعه قرار گرفت. در هر دو رقم مشخص شد که اثر متغیرهای جنس گوی، زاویه برخورد و موقعیت صداسنج برتر از فشار صوت و اندازه FFT و نیز اثر متقابل موقعیت صداسنج و زاویه برخورد بر اندازه FFT در سطح یک درصد در هر دو رقم معنی‌دار هستند. هیچ کدام از متغیرها و اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر فرکانس تشدید نداشتند. به دلیل این که جنس ماده ضربه‌زن، زاویه برخورد، محل دریافت صدا و نوع رقم تأثیر معنی‌داری بر فرکانس تشدید ندارند، استفاده از آن‌ها در آزمون‌های آکوستیکی به منظور تشخیص عیوب داخلی و مرحله رسیدگی خربزه توصیه می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از گوی پلاستیکی، زاویه برخورد ۷۰ درجه و موقعیت میکروفن ۹۰ درجه در طراحی سامانه آکوستیک برای دریافت پاسخ آکوستیک مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک، پاسخ به ضربه، خربزه، فرکانس تشدید

مقدمه

خربزه بومی آسیا و به احتمال زیاد ایران است. خربزه از جنس Cucumis، گونه Melo و تیره یا خانواده کدویان (کدوسانان) با نام علمی کوکومیس ملو^۱ می‌باشد. کدویان که به آن‌ها گیاهان جالیزی نیز گفته می‌شود، دارای ۹۰ جنس و ۷۵۰ گونه بوده و انواع زراعی مهم آن هندوانه، خیار، خربزه، طالبی، گرمک و انواع کدوها می‌باشد. خربزه دارای وارته‌های زیادی است که از نظر شکل و طعم متفاوتند و گوشت آن‌ها به رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد، سبز و سفید است. خربزه گیاهی یکساله و یک پایه و در بعضی موارد دو پایه است (Peyvast, 2005).

آکوستیک به معنای تولید، انتقال و دریافت انرژی به صورت ارتعاش در ماده است. برای تولید و انتشار امواج آکوستیکی، ارتعاش‌های مختلفی وجود دارند. ارتعاش‌هایی را که سبب تولید و انتقال امواج آکوستیکی می‌شوند بر حسب حدود فرکانس‌شان به سه نوع طبقه‌بندی می‌کنند: صداهایی که با گوش شنیده می‌شوند. حدود فرکانس این نوع صداها برای گوش عادی ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز است. صداهایی که فرکانس آن‌ها بیش از ۲۰۰۰۰ هرتز است را فراصوت و صداهایی که فرکانس آن‌ها کمتر از ۲۰ هرتز هستند را فروصوت می‌نامند (Esmail Beygi, 2005). آزمون‌های آکوستیکی یا صوتی به طور فزاینده در صنعت و کشاورزی به کار می‌روند. کاربرد آن در کشاورزی می‌تواند برای درجه‌بندی محصولات با تعیین رسیدگی یا سفتی میوه‌ها و جداسازی تخم‌مرغ‌های شکسته و غیره باشد (Mahmoudi, 2006). مزایای روش‌های آکوستیکی عبارتند از: مدت زمان کم آزمون، غیر مخرب بودن، سادگی کاربرد، تکرارپذیری، هزینه کم و عدم نیاز به اتصال سامانه‌های پیچیده بر روی جسم مورد آزمون (Mahmoudi, 2006). اندازه‌گیری صوتی عموماً خصوصیات مکانیکی میوه‌ی کامل را نشان می‌دهد، برعکس آزمون پانچ یا فشردگی که نمونه‌ها از بافت‌های متمرکز شده در یک نقطه‌اند

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت
(* نویسنده مسئول: Email: F_Khoshnam2000@yahoo.com)

۲- دانشیار، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳- مربی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مشخصه‌های ارتعاشی گلابی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند محل ضربه، محل دریافت ارتعاش، سرعت تحریک و جنس ماده ضربه‌زن تأثیر معنی‌داری روی فرکانس تشدید ندارد (Wang *et al.*, 2004). عوامل متعددی روی پاسخ آکوستیکی میوه خربزه و در نتیجه پارامترهای آکوستیکی تأثیر دارند. این عوامل می‌تواند مربوط به طراحی سامانه آکوستیکی یا تنوع نمونه‌ها باشد. مثلاً عواملی نظیر شکل (نسبت طول به عرض میوه)، جرم، سفتی، چگالی، خواص مکانیکی و شیمیایی مربوط به نمونه و عواملی نظیر نقاط تحریک (محل اعمال ضربه)، جنس و جرم گوی ضربه‌زن، سرعت فرود گوی ضربه‌زن (زاویه برخورد آونگ به میوه)، موقعیت میکروفون نسبت به محل ضربه، نحوه نگه‌داشتن میوه و فاصله میکروفون از سطح میوه مربوط به سامانه آکوستیکی می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر عوامل مرتبط با سامانه آکوستیکی از قبیل محل اعمال ضربه، جنس گوی ضربه‌زن، زاویه برخورد آونگ به میوه و موقعیت صداسنج نسبت به محل ضربه بر پاسخ آکوستیکی دو رقم خربزه زرد ایوانکی و سوسکی سبز (عامل مربوط به تنوع نمونه) است. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی تجهیزات مرتبط با آکوستیک محصولات کشاورزی مفید واقع شود.

مواد و روش‌ها

انتخاب نمونه‌ها

تعداد ۶۵ عدد خربزه از هر دو رقم خربزه صادراتی زرد ایوانکی و سوسکی سبز با مساعدت مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان گرمسار، سازمان جهاد کشاورزی استان سمنان تهیه شد. این دو رقم به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، مقاوم به ارتعاشات در حین حمل و نقل بوده و مناسب صادرات می‌باشند (شکل ۱). خربزه‌ها از طریق کانتینرها از گرمسار به بندرعباس و از آنجا به کشورهای حوزه خلیج فارس و کشورهای اروپایی منتقل می‌شوند. آزمایش‌ها پس از ۲۴ ساعت از زمان برداشت در موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج آغاز شد.

اجزای سامانه اندازه‌گیری آکوستیکی

سامانه اندازه‌گیری آکوستیکی شامل مکانیزم تحریک مکانیکی میوه، صداسنج، نرم‌افزار نمایش و ضبط سیگنال صدا (نرم‌افزار Cool Edit Pro 2.0) و تکیه‌گاه میوه می‌باشد. در این سامانه میوه توسط ضربه آونگ تحریک شده، پاسخ سیگنال به کمک صداسنج دریافت و سپس پردازش می‌شود. برای تحریک مکانیکی میوه از یک آونگ ساده استفاده شد. جنس، جرم و شعاع انحنای ضربه‌زن، طول میله آونگ و زاویه برخورد در انتخاب آونگ مؤثرند. انتخاب آن‌ها بایستی به‌نحوی باشد که میوه آسیب نبیند و در عین حال پس از برخورد به

(Abbott, 1999). در این روش میوه توسط ضربه چکش و یا آونگ، تحریک شده و پاسخ سیگنال به کمک میکروفون، شتاب‌سنج و یا یک حسگر پیزوالکتریک انعطاف‌پذیر دریافت می‌شود و سپس برای استخراج فرکانس تشدید میوه، با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه سریع تحلیل می‌شود. اخیراً این روش برای اندازه‌گیری خصوصیات میوه‌های غیرکروی تعمیم یافته است (Jancsó *et al.*, 2001). در کاربردهای صوتی، فرکانس تشدید، فرکانس معمولی ارتعاشی است که از پارامترهای فیزیکی جسم ارتعاشی تعیین می‌شود و جسم در فرکانس تشدید حداکثر ارتعاش را دارد. به هنگام مطالعه رفتار یک سیگنال در حوزه زمان تنها اطلاعات محدودی از آن به دست می‌آید و بسیاری از مشخصات مهم آن پنهان می‌ماند. بدین منظور سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود. این کار توسط تبدیل فوریه گسسته صورت می‌گیرد. برای بیان و اندازه‌گیری صوت از کمیت‌های فیزیکی (یا کمیت‌های مطلق) شامل توان، شدت و فشار صوت و از کمیت‌های لگاریتمی (یا تراز) شامل تراز توان، تراز شدت و تراز فشار استفاده می‌شود. تراز فشار صوت (SPL)^۱، لگاریتم نسبت فشار صوت به فشار صوت مینا است.

$$\text{SPL (dB)} = 10 \log \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) \quad (1)$$

که در رابطه (۱) P: فشار صوت مورد نظر (N m^{-2}) و P_0 فشار مینا یا آستانه درک فیزیولوژیک فشار صوت بوده و برابر است با $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$.

چن و همکاران (۱۹۹۲) از روش‌های آکوستیکی برای تعیین چند فرکانس طبیعی اول سیب استفاده کردند. آن‌ها دریافتند محل ضربه، محل اندازه‌گیری صدا یا نحوه نگه‌داشتن سیب روی فرکانس‌های تشدید تأثیری ندارد ولی روی دامنه‌ی آن‌ها مؤثر است (Chen *et al.*, 1992). چن و همکاران ابزاری برای اندازه‌گیری پاسخ میوه به ضربه ساختند. حسگر از یک جسم نیمه کروی و شتاب‌سنج تشکیل شده و از ارتفاعات مختلف روی میوه سقوط می‌کرد. آزمایش‌ها روی دو رقم گلابی نشان داد که کاهش جرم ضربه‌زن باعث دریافت سیگنال‌های تقویت شده بهتر و نیز کاهش صدمه به میوه می‌شود (Chen *et al.*, 1996). جانسوک و همکاران برای مطالعه اثر شکل بر پاسخ آکوستیکی میوه گلابی از روش آنالیز مودال اجزای محدود استفاده کردند. نمونه‌ها با شکل‌های مختلف انتخاب و با تصویربرداری کامپیوتری شکل آن‌ها مشخص شد. آن‌ها دریافتند که چگالی تأثیر چندانی بر فرکانس تشدید ندارد؛ اما نسبت طول به عرض (قطر) گلابی به‌صورت معادله درجه دوم بر فرکانس تشدید تأثیر دارد (Jancsó *et al.*, 2001). وانگ و همکاران از یک سامانه آزمایشگاهی شامل آونگ و حسگر پیزوالکتریک برای ارزیابی

1- Sound pressure level

وارد شود، احتمال آسیب وجود دارد. آزمایش‌های اولیه برای انتخاب آونگ مناسب صورت گرفت و سرانجام از سه نوع آونگ با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شد.

میوه، صدا ساطع شود. هر چقدر جرم گوی ضربه‌زن، طول میله آونگ و زاویه برخورد (زاویه انحراف اولیه) بیشتر باشد، احتمال آسیب به پوست میوه نیز بیشتر می‌شود. با این حال مقاومت پوست در کاهش این آسیب نقش مهمی دارد. اگر ضربات متعدد به یک نقطه از میوه



شکل ۱- ارقام مورد مطالعه، بالا: خریزه زرد ایوانکی پایین: خریزه سوسکی سبز
Fig.1. Studied varieties, up: Zard-Eyvanekey down: Sousky-Sabz

جدول ۱- مشخصات سه نوع گوی در آونگ

Table 1- Characteristics of three types of ball pendulum

جنس	جرم (گرم)	قطر (میلی‌متر)	جرم مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
Material	Mass (g)	Diameter (mm)	Density (g cm ⁻³)
پلاستیک	72.13	52.0	0.98
Plastic			
شیشه	72.13	39.5	2.2
Glass			
فلز (فولاد)	72.13	26.0	7.8
Steel			

صداسنج با استفاده از کالیبراتور استاندارد یا پیستونفون مدل ۴۲۳۱ ساخت شرکت B&K کشور دانمارک که تک صدایی^۳ در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز با تراز فشار صدای ۹۴ دسی‌بل ایجاد می‌نمود، کالیبره گردید. از نرم‌افزار Cool Edit Pro 2.0 که دارای قابلیت‌ها و ویژگی‌های مطلوبی نظیر نمایش سیگنال ضبط شده در حوزه زمان، امکان پخش سیگنال صدای ضبط شده، ضبط صدا در حالت MONO می‌باشد، برای انجام این تحقیق استفاده شد. برای نگه‌داشتن نمونه‌ها، آن‌ها روی تکیه‌گاهی از فوم نرم قرار داده شدند. این نوع تکیه‌گاه باعث می‌شود که میوه ارتعاش آزاد^۴ داشته و از اغتشاش الگوی ارتعاش جلوگیری شود (Gómez et al., 2006).

طول میله آونگ تا محل اتصال به گوی، قطر و جرم آن به ترتیب برابر با ۲۵۶ میلی‌متر، ۳ میلی‌متر و ۲۱/۱۷ گرم است. به‌منظور دریافت پاسخ آکوستیکی از دستگاه صداسنج (ترازسنج صوت^۱ با واحد دسی‌بل) نوع ۲۲۷۰ ساخت شرکت B&K کشور دانمارک استفاده گردید. در هنگام ضبط سیگنال‌ها (داده‌گیری) از شبکه وزنی خطی^۲ دستگاه صداسنج استفاده شد. در این حالت مقادیر تراز فشار صوت در فرکانس‌های مختلف توسط دستگاه صداسنج بدون هیچ‌گونه تغییر در کمیت، نشان داده می‌شود. براساس توصیه استانداردهای سازمان بین‌المللی استانداردها به‌منظور اطمینان از عملکرد دقیق میکروفون و دستگاه صداسنج، قبل و بعد از هر سری آزمایش، میکروفون و دستگاه

3- Pure tone

4- Free vibration

1- Sound level meter (SLM)

2- Linear weighting network

جدول ۲- پارامترهای مورد مطالعه

Table 2- Studied parameters

متغیر مورد مطالعه Variables	سطوح متغیر Level of variables
جنس گوی ضربه‌زن Ball impactor material	پلاستیک، شیشه، فلز Plastic, Glass, Steel
زاویه برخورد آونگ به میوه (درجه) Impact angle of pendulum (Degree)	۲۰، ۴۵ و ۷۰ درجه 20, 45 and 70 degrees
موقعیت صداسنج (درجه) SLM position (Degree)	۹۰ و ۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه 90 and 180 degrees respect to impact point
رقم خربزه Melon variety	زرد ایوانکی و سوسکی سبز Zard-Eyvanekey and Sousky-Sabz

اندازه‌گیری و ضبط سیگنال‌های صدای ساطع شده تحلیل‌ها روی سیگنال‌های رقمی و در دو حوزه زمان و فرکانس انجام شد. این عمل با استفاده از برنامه رایانه‌ای نوشته شده بر مبنای تبدیل فوریه سریع و الگوریتم کولی-توکی انجام گردید. این الگوریتم زمان لازم برای محاسبه را به صورت لگاریتمی کاهش می‌دهد به طوری که زمان مورد نیاز برای محاسبه DFT برای N نقطه تقریباً $N \cdot \log_2 N$ می‌باشد. از نرم‌افزار Excel 2007 برای استخراج فرکانس تشدید و محاسبه تراز فشار صوت استفاده شد و بالاخره از نرم‌افزار SAS برای تجزیه و تحلیل میزان تأثیر فاکتورهای مؤثر بر پاسخ آکوستیکی استفاده شد. شکل ۳ دو نوع سیگنال ضبط شده در حوزه زمان و فرکانس را نشان می‌دهد. محور طول برحسب زمان (میلی‌ثانیه) و محور عرضی نمونه‌ها برحسب مقدار نمونه (بی‌بعد) است.

نتایج و بحث

در قسمت نتایج و بحث تأثیر موقعیت صداسنج، جنس گوی ضربه‌زن و زاویه برخورد آونگ به میوه به تفکیک بررسی می‌شود.

الف) اثر موقعیت صداسنج

شکل ۴ یک نمونه سیگنال که صداسنج در دو موقعیت ۹۰ و ۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه دریافت نموده را نشان می‌دهد. سایر فاکتورها یعنی جنس گوی ضربه‌زن (فلز)، زاویه برخورد (۷۰ درجه) و نوع رقم (زرد ایوانکی) ثابت فرض شده است. میانگین بیشینه نمونه‌ها در موقعیت ۹۰ و ۱۸۰ درجه صداسنج نسبت به محل ضربه به ترتیب ۱۰۵۷۶ و ۲۸۶۶۳ می‌باشد. زمان رسیدن به این مقدار بیشینه در هر دو موقعیت، حدود ۲۲ میلی‌ثانیه است. به عبارت دیگر پس از ۲۲ میلی‌ثانیه از شروع ضربه، منحنی به نقطه اوج خود می‌رسد. از این منحنی چنین استنباط می‌شود که تغییر موقعیت صداسنج از ۱۸۰ به ۹۰ درجه، باعث افزایش بیشینه دامنه شده، ولی تأثیری بر زمان رسیدن به آن را ندارد.

برای کاهش خطای ناشی از تنوع ذاتی شکل نمونه‌ها، میانگین سه اندازه‌گیری به فواصل یکسان روی نواحی وسط میوه^۱ (تقریباً ۱۲۰ درجه نسبت به هم) در نظر گرفته شد. همان‌گونه که گفته شد عوامل مربوط به طراحی سامانه آکوستیکی و تنوع نمونه‌ها روی پاسخ آکوستیکی خربزه تأثیر دارند، لذا برای حذف عوامل تنوع نمونه‌ها، خربزه‌ها را هم اندازه و هم شکل و در یک زمان تهیه شدند. با توجه به یافته‌های قبلی، محل اعمال ضربه روی میوه جایی انتخاب شد که گوشت میوه ضخیم‌تر و پوست انعطاف‌پذیرتر باشد. بنابراین روی نواحی وسط میوه ضربه اعمال شد (Chen, 1993). در این تحقیق فاصله میکروفون صداسنج از سطح میوه تقریباً ثابت حدود ۵-۲ mm و جرم گوی‌های ضربه‌زن (۷۲/۱۳ g) انتخاب شد. اثر بقیه موارد به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی و با سه تکرار بر روی هر نمونه خربزه، مورد مطالعه قرار گرفت. جدول ۲ پارامترهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. کل تیمارهای مورد مطالعه (۳×۳×۲×۲)، ۳۶ و برای هر رقم ۶۵ عدد خربزه انتخاب شد.

جهت حصول فاصله ۵-۲ میلی‌متری میکروفون صداسنج از سطح میوه در وضعیت ۹۰ درجه نسبت به محل ضربه از سه پایه با قابلیت تنظیم ارتفاع که به پشت صداسنج پیچ می‌شد، استفاده شد. تنظیم این فاصله در وضعیت ۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه به صورت دستی صورت گرفت. در هر دو حالت باید صداسنج به ترتیب در وضعیت‌های صحیح عمودی و افقی قرار گیرد، به شکلی که میکروفون صداسنج موازی سطح خربزه باشد (شکل ۲). صداسنج تغییرات فشار هوا را به کمک میکروفون به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. سیگنال خروجی از میکروفون نصب شده روی دستگاه صداسنج توسط نرم‌افزار Cool Edit Pro 2.0 ضبط شد. ضبط سیگنال‌های صدا در حالت مونو (یک کاناله) با مقدار تفکیک‌پذیری ۱۶ بیت انجام شد. به علت زمان بسیار کم هر ضربه از بالاترین سرعت نمونه‌برداری نرم‌افزار Cool Edit Pro 2.0 یعنی ۱۹۲۰۰۰ هرتز استفاده شد. پس از

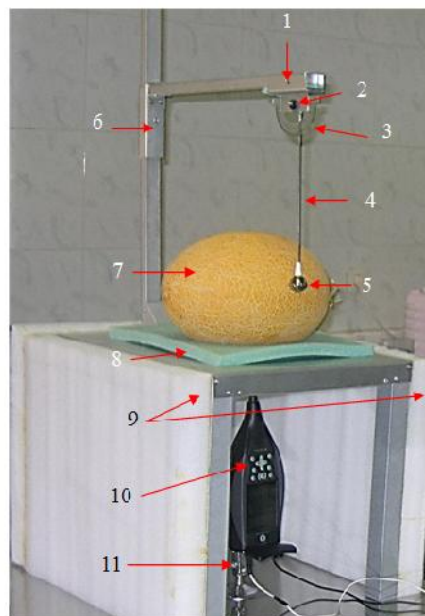
1- Equator or mid-section

تشدید در دو موقعیت صداسنج، ۱۲۳/۰۵ هرتز است. از این منحنی چنین استنباط می‌شود که تغییر موقعیت صداسنج از ۱۸۰ به ۹۰ درجه، باعث افزایش بیشینه دامنه FFT شده ولی تأثیری بر فرکانس تشدید ندارد.

برای به دست آوردن محتوای فرکانسی توسط الگوریتم تبدیل فوریه سریع، سیگنال از حوزه زمان به فرکانس تبدیل می‌گردد (شکل ۵ (a)). در این شکل محور طول لگاریتمی و برحسب فرکانس (هرتز) و محور عرضی دامنه FFT است. میانگین بیشینه دامنه FFT در موقعیت ۹۰ و ۱۸۰ درجه به ترتیب ۰/۰۳۳ و ۰/۰۱۲ می‌باشد. فرکانس



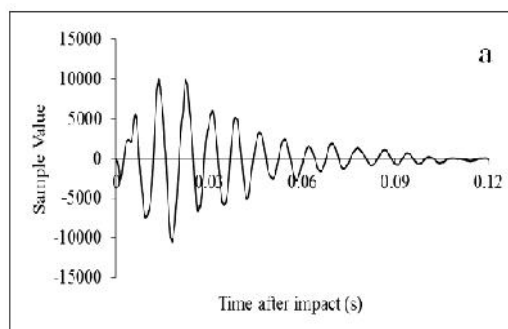
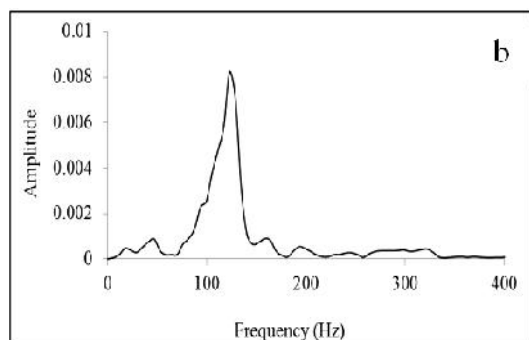
(b)



(a)

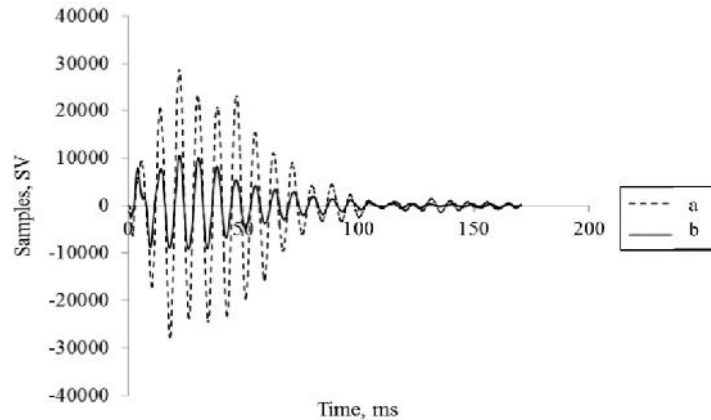
شکل ۲- (a) صداسنج در موقعیت ۹۰ درجه نسبت به محل ضربه در حال دریافت پاسخ آکوستیکی خربزه شامل: (۱) لغزنده افقی، (۲) اتصال لولایی، (۳) نقاله (۴) میله آونگ، (۵) گوی، (۶) لغزنده عمودی (۷) خربزه زرد ایوانکی، (۸) تکیه‌گاه میوه، (۹) محفظه آکوستیک، (۱۰) صداسنج، (۱۱) سه پایه و (b) موقعیت صداسنج ۱۸۰ درجه و جنس ضربه‌زن پلاستیک

Fig.2. (a) Sound level meter in position of 90 degrees from impact place sensing impulse response of melon is comprised: 1) Horizontal sliding, 2) Pivoting linkage, 3) Protractor, 4) Pendulum rod, 5) Steel Ball, 6) Vertical sliding, 7) Zard-Eyvanekey melon, 8) Melon-bed, 9) Acoustic chamber, 10) Sound level meter, 11) tripod and (b) Sound level meter position 180 degree and plastic ball

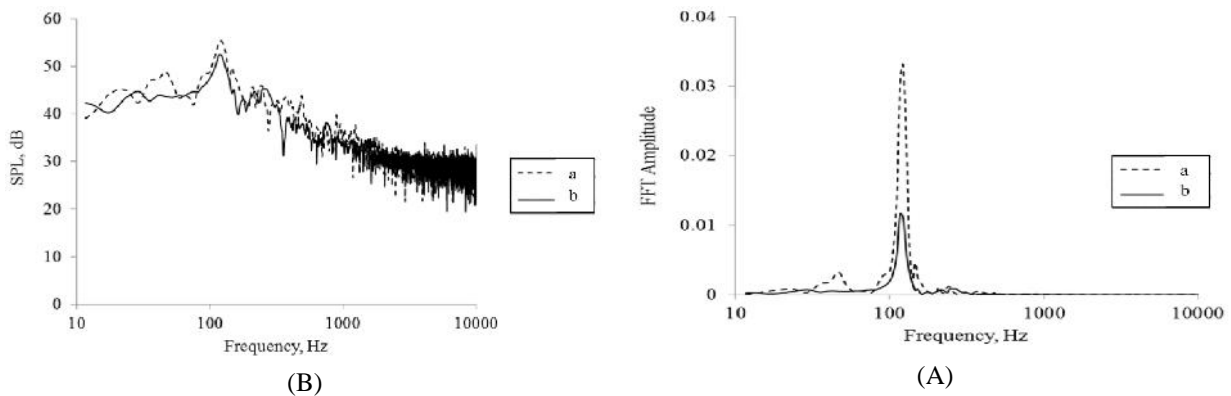


شکل ۳- (a) سیگنال صدای ضبط شده در حوزه زمان و (b) حوزه فرکانس

Fig.3. (a) Recorded signal in time domain and (b) Frequency domain



شکل ۴- یک نمونه سیگنال حاصل از دو موقعیت مختلف صداسنج نسبت به محل ضربه در حوزه زمان، a) ۹۰ درجه و b) ۱۸۰ درجه
Fig.4. Typical signal by two different position of sound pressure meter respect to impact place in time domain, a) 90 degree and b) 180 degree



شکل ۵- (A) یک نمونه سیگنال در دو موقعیت مختلف صداسنج نسبت به محل ضربه در حوزه فرکانس و (B) تراز فشار صوت در دو موقعیت مختلف صداسنج نسبت به محل ضربه، a) ۹۰ درجه و b) ۱۸۰ درجه

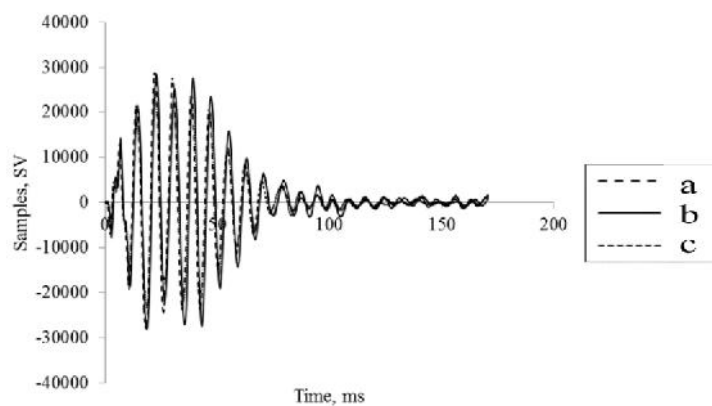
Fig.5. (A) Typical signal by two different position of sound pressure meter respect to impact place in frequency domain and (B) sound pressure level by two different position of sound pressure meter respect to impact place, a) 90 degree and b) 180 degree

برخورد (۷۰ درجه) و نوع رقم (زررد ایوانکی) ثابت فرض شده است. میانگین بیشینه نمونه‌ها توسط سه جنس شیشه، فلز و پلاستیک به ترتیب ۲۴۷۹۸، ۲۸۴۵۹ و ۲۸۹۹۱ می‌باشد. زمان رسیدن به این مقدار بیشینه در هر سه حالت، حدود ۲۲ میلی‌ثانیه است. به عبارت دیگر پس از ۲۲ میلی‌ثانیه از شروع ضربه، منحنی به نقطه اوج خود می‌رسد. از این منحنی چنین استنباط می‌شود که تغییر جنس ضربه‌زن، باعث تغییر بیشینه دامنه شده ولی تأثیری بر زمان رسیدن به آن ندارد. در شکل ۷ میانگین بیشینه دامنه FFT برای جنس‌های شیشه، فلز و پلاستیک به ترتیب ۰/۰۲۶، ۰/۰۲۹ و ۰/۰۳۳ می‌باشد. فرکانس تشدید برای هر سه جنس، ۱۲۳/۰۵ هرتز است. این منحنی چنین استنباط می‌شود که تغییر جنس ضربه‌زن، باعث تغییر بیشینه دامنه FFT شده ولی تأثیری بر فرکانس تشدید ندارد.

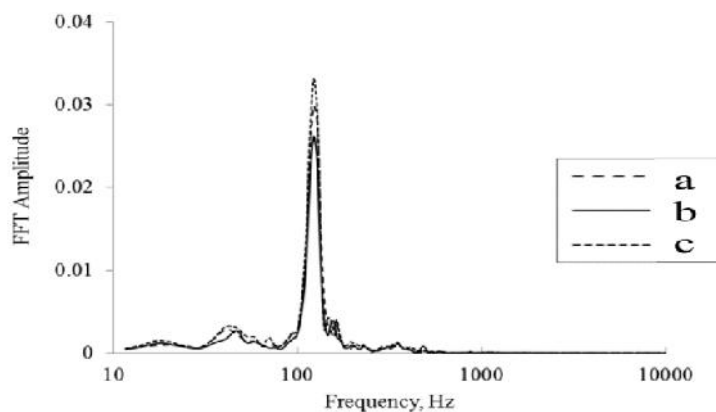
شکل ۵ (b) مقادیر تراز فشار صوت در دو موقعیت ۹۰ و ۱۸۰ درجه صداسنج نسبت به محل ضربه را نشان می‌دهد. در این شکل محور طول لگاریتمی و برحسب فرکانس (هرتز) و محور عرضی تراز فشار صوت (دسی‌بل) است. میانگین بیشینه تراز فشار صوت در موقعیت ۹۰ و ۱۸۰ درجه به ترتیب ۵۵/۲۹ و ۵۲/۳۸ دسی‌بل است. با توجه به شکل تغییر موقعیت صداسنج از ۱۸۰ به ۹۰ درجه، بیشینه تراز فشار صوت را افزایش می‌دهد.

(ب) اثر جنس گوی ضربه‌زن

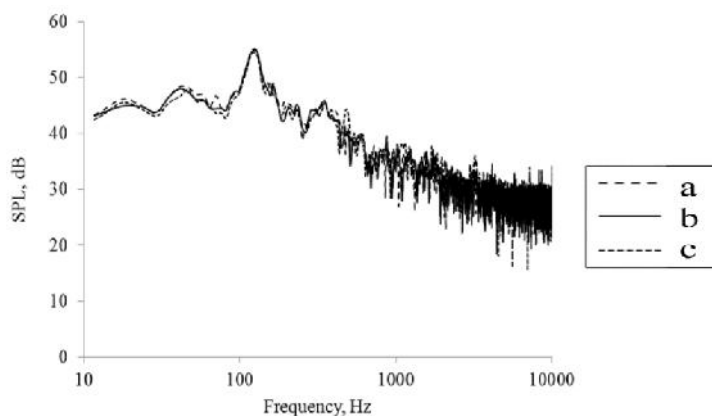
شکل ۶ یک نمونه سیگنال را که توسط سه جنس ضربه‌زن (شیشه، فلز و پلاستیک) به دست آمده را نشان می‌دهد. سایر فاکتورها یعنی موقعیت صداسنج (۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه)، زاویه



شکل ۶- یک نمونه سیگنال حاصل از سه جنس مختلف ضربه‌زن در حوزه زمان، (a) شیشه، (b) فلز و (c) پلاستیک
Fig.6. Typical signal by three different ball materials in time domain, a) Glass, b) Steel and c) Plastic



شکل ۷- یک نمونه سیگنال حاصل از سه جنس مختلف ضربه‌زن در حوزه فرکانس، (a) شیشه، (b) فلز و (c) پلاستیک
Fig.7. Typical signal by three different ball materials in frequency domain, a) Glass, b) Steel and c) Plastic



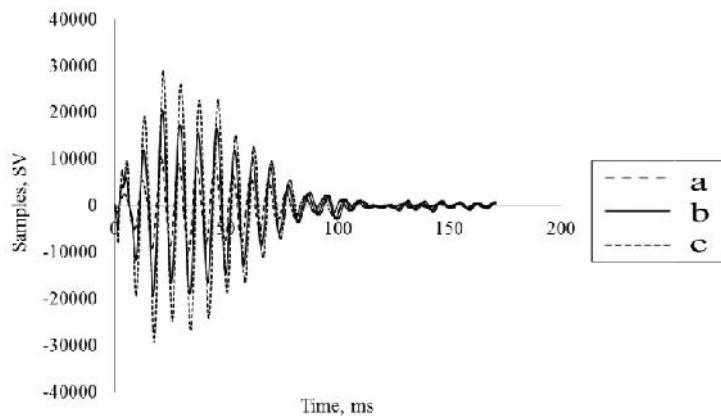
شکل ۸- تراز فشار صوت حاصل از سه جنس مختلف ضربه‌زن، (a) شیشه، (b) فلز و (c) پلاستیک
Fig.8. Sound pressure level by three different ball materials, a) Glass, b) Steel and c) Plastic

(فلز) و رقم (زرد ایوانکی) ثابت است. میانگین بیشینه نمونه‌ها در زاویه‌های ۲۰، ۴۵ و ۷۰ درجه به ترتیب ۱۰۵۴۸، ۲۰۶۰۸ و ۲۸۹۸۹ می‌باشد. زمان رسیدن به این مقدار بیشینه در هر سه زاویه، ۲۱ میلی ثانیه است. به عبارت دیگر پس از ۲۱ میلی ثانیه از شروع ضربه، منحنی به نقطه اوج خود می‌رسد. از این منحنی چنین استنباط می‌شود که افزایش زاویه برخورد آونگ باعث افزایش بیشینه دامنه شده ولی تأثیری بر زمان رسیدن به آن را ندارد.

در شکل ۸ میانگین بیشینه تراز فشار صوت برای جنس‌های شیشه، فلز و پلاستیک به ترتیب ۵۴/۴۳، ۵۴/۸۱ و ۵۵/۱۱ دسی‌بل است. با توجه به شکل تغییر جنس ضربه‌زن بر مقادیر تراز فشار صوت تأثیر می‌گذارد.

ج) اثر زاویه برخورد

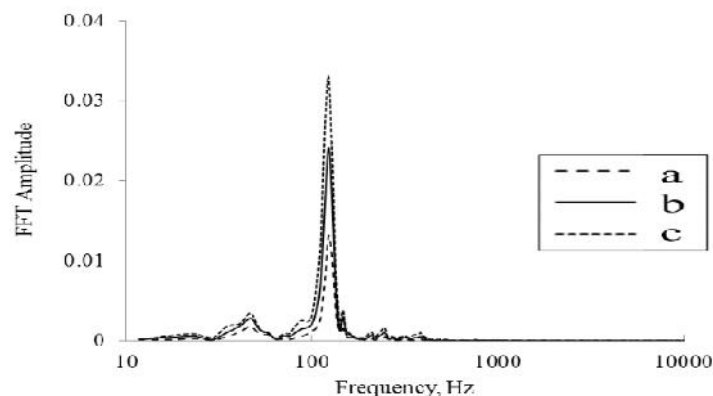
شکل ۹ یک نمونه سیگنال را در زاویه‌های مختلف برخورد آونگ به میوه در حوزه زمان نشان می‌دهد. سایر فاکتورها یعنی موقعیت صداسنج (۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه)، جنس گوی ضربه‌زن



شکل ۹- یک نمونه سیگنال در زاویه‌های مختلف برخورد آونگ به میوه در حوزه زمان (a) زاویه ۲۰ درجه، (b) زاویه ۴۵ درجه و (c) زاویه ۷۰ درجه
Fig.9. Typical signal at different angles of pendulum impact in time domain, a) 20 degrees, b) 45 degrees and c) 70 degrees

می‌شود که افزایش زاویه برخورد آونگ باعث افزایش بیشینه دامنه FFT شده، ولی تأثیری بر فرکانس تشدید ندارد.

در شکل ۱۰ میانگین بیشینه دامنه FFT در زاویه‌های ۲۰، ۴۵ و ۷۰ درجه به ترتیب ۰/۰۱۳، ۰/۰۲۴ و ۰/۰۳۳ می‌باشد. فرکانس تشدید در هر سه زاویه، ۱۲۳/۰۵ هرتز است. از این منحنی چنین استنباط

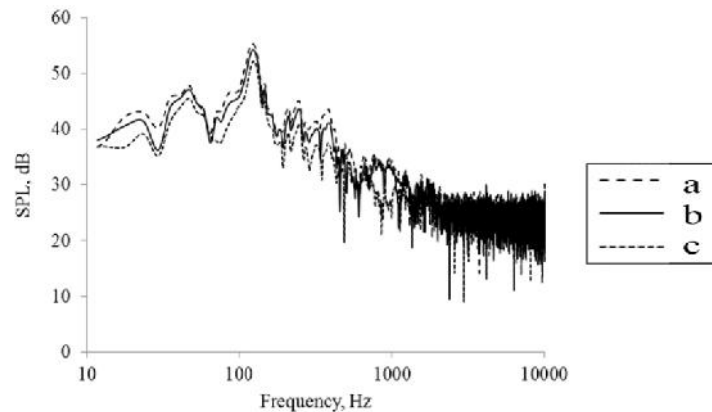


شکل ۱۰- یک نمونه سیگنال در زاویه‌های مختلف برخورد آونگ به میوه در حوزه فرکانس، (a) زاویه ۲۰ درجه، (b) زاویه ۴۵ درجه و (c) زاویه ۷۰ درجه

Fig.10. Typical signal at different angles of pendulum impact in frequency domain, a) 20 degrees, b) 45 degrees and c) 70 degrees

توجه به شکل با افزایش زاویه برخورد، مقادیر تراز فشار صوت نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۱ میانگین بیشینه تراز فشار صوت در زاویه‌های ۲۰، ۴۵ و ۷۰ درجه به ترتیب ۵۲/۲۲، ۵۴/۲۶ و ۵۵/۳۱ دسی‌بل است. با



شکل ۱۱- تراز فشار صوت در زاویه‌های مختلف برخورد آونگ به میوه، (a) زاویه ۲۰ درجه، (b) زاویه ۴۵ درجه و (c) زاویه ۷۰ درجه

Fig.11. Sound pressure level at different angles of pendulum impact, a) 20 degrees, b) 45 degrees and c) 70 degrees

بررسی نتایج آزمون دانکن مقایسه میانگین‌های اندازه FFT برای هر دو رقم خریزه زرد ایوانکی و سوسکی سبز در اثر عوامل موقعیت صداسنج، جنس گوی و زاویه برخورد مشابه جدول ۵ می‌باشد؛ لذا در اینجا به دلیل رعایت اختصار تنها مقایسه میانگین‌های تراز فشار صدا بررسی می‌شود. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که در اثر تغییر موقعیت صداسنج از ۹۰ به ۱۸۰ درجه، مقادیر تراز فشار صوت برای هر دو رقم خریزه مورد مطالعه به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. منبع صوتی (محل برخورد آونگ با پوست خریزه) برای هر دو سیگنال ثابت است و افزایش فاصله از منبع صوت باعث کاهش انرژی ارتعاش در ماده می‌گردد. مطابق شکل ۱۲ به دلیل این که فاصله صداسنج از منبع صوتی در موقعیت ۱۸۰ درجه نسبت به فاصله در موقعیت ۹۰ درجه بیشتر است. پس این امر احتمالاً باعث افزایش مقادیر تراز فشار صوت در موقعیت ۱۸۰ درجه نسبت به موقعیت ۹۰ درجه در هر دو رقم می‌شود.

وضعیت قرارگیری و تنظیم فاصله ۵-۲ میلی‌متر صداسنج از میوه در موقعیت ۱۸۰ درجه مشکل‌تر از موقعیت ۹۰ درجه است، لذا وضعیت ۹۰ درجه نسبت به محل ضربه برای اندازه‌گیری توصیه می‌شود. در هر دو رقم خریزه مورد مطالعه، استفاده از گوی پلاستیکی باعث افزایش معنی‌دار تراز فشار صوت گردید و تفاوت معنی‌داری بین دو جنس شیشه و فلز در سطح ۵ درصد مشاهده نشد.

جدول تجزیه واریانس

جدول ۳ و ۴ به ترتیب نتایج تجزیه واریانس تراز فشار صوت، فرکانس تشدید و اندازه FFT در دو رقم زرد ایوانکی و سوسکی سبز را نشان می‌دهد. داده‌ها به وسیله آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سطوح فاکتورها عبارتند از: موقعیت صداسنج نسبت به محل ضربه (دو سطح)، جنس گوی ضربه‌زن (سه سطح) و زاویه برخورد آونگ به میوه (سه سطح). همانگونه که مشاهده می‌شود اثر متغیرهای موقعیت صداسنج، جنس گوی و زاویه برخورد بر مقادیر تراز فشار صوت و اندازه FFT و نیز اثر متقابل موقعیت صداسنج \times زاویه برخورد بر اندازه FFT در سطح احتمال یک درصد در هر دو رقم معنی‌دار هستند. هیچ کدام از متغیرها و اثرات متقابل آن‌ها تأثیری بر فرکانس تشدید در هر دو رقم نداشتند. با توجه به جداول می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فرکانس تشدید در آزمون‌های آکوستیکی مناسب‌تر از تراز فشار صوت و اندازه FFT است. چون طول میله آونگ و جرم آن ثابت است، لذا با افزایش زاویه، سرعت برخورد نیز افزایش می‌یابد. پس نتیجه فوق را می‌توان در مورد سرعت برخورد (سرعت تحریک) نیز بیان نمود، یعنی سرعت برخورد (سرعت تحریک) تأثیری بر فرکانس تشدید ندارد، در حالی که بر تراز فشار صوت و اندازه FFT مؤثر است. این نتیجه با نتایج دیگر محققان مطابقت دارد (Wang et al., 2004; Chen et al., 1992). به دلیل این که اثر موقعیت صداسنج، جنس گوی و زاویه برخورد بر تراز فشار صوت معنی‌دار شده است، لذا مقایسه میانگین این پارامترها بین دو رقم صورت می‌گیرد (جدول ۵).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر موقعیت صداسنج، جنس گوی و زاویه‌ی برخورد بر تراز فشار صوت، فرکانس تشدید و اندازه FFT در رقم زرد ایوانکی

Table 3- ANOVA results in evaluation of SLM position, ball material and impact angel effects on sound pressure level, resonance frequency and FFT magnitude 'Zard-Eyvanekey' variety

منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	تراز فشار صوت Sound pressure level	فرکانس تشدید Resonance frequency	اندازه FFT FFT magnitude
موقعیت صداسنج SLM position	1	152.63**	3.40 ^{ns}	139.71**
جنس گوی Ball material	2	9.12**	2.40 ^{ns}	9.22**
زاویه برخورد Impact angle	2	87.26**	0.60 ^{ns}	73.65**
موقعیت صداسنج × جنس گوی SLM position × Ball material	2	0.28 ^{ns}	3.20 ^{ns}	2.28 ^{ns}
موقعیت صداسنج × زاویه برخورد SLM position × Impact angle	2	0.25 ^{ns}	1.40 ^{ns}	14.43**
جنس گوی × زاویه برخورد Ball material × Impact angle	4	0.28 ^{ns}	1.20 ^{ns}	.81 ^{ns}
موقعیت صداسنج × جنس گوی × زاویه برخورد SLM position × Ball material × Angle impact	4	0.39 ^{ns}	1.40 ^{ns}	0.40 ^{ns}

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ (Significance Level of 0.01)، * معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ (Significance Level of 0.05)

ns عدم معنی‌داری (No significance)

SLM= Sound Pressure Level

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر موقعیت صداسنج، جنس گوی و زاویه‌ی برخورد بر تراز فشار صوت، فرکانس تشدید و اندازه FFT در رقم سوسکی سبز

Table 4- ANOVA Results in evaluation of SLM position, ball material and impact angel effects on sound pressure level, resonance frequency and FFT magnitude 'Sousky-Sabz' variety

منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Df	تراز فشار صوت Sound pressure level	فرکانس تشدید Resonance frequency	اندازه FFT FFT magnitude
موقعیت صداسنج SLM position	1	138.19**	4.17 ^{ns}	262.89**
جنس گوی Ball material	2	8.27**	2.17 ^{ns}	5.26**
زاویه برخورد Impact angle	2	30.19**	0.85 ^{ns}	69.53**
موقعیت صداسنج × جنس گوی SLM position × Ball material	2	1.00 ^{ns}	1.28 ^{ns}	0.36 ^{ns}
موقعیت صداسنج × زاویه برخورد SLM position × Impact angle	2	0.03 ^{ns}	0.13 ^{ns}	22.79**
جنس گوی × زاویه برخورد Ball material × Impact angle	4	0.04 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.54 ^{ns}
موقعیت صداسنج × جنس گوی × زاویه برخورد SLM position × Ball material × Angle impact	4	0.01 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.14 ^{ns}

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ (Significance Level of 0.01)، * معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ (Significance Level of 0.05)

ns عدم معنی‌داری (No significance)

SLM= Sound Pressure Level

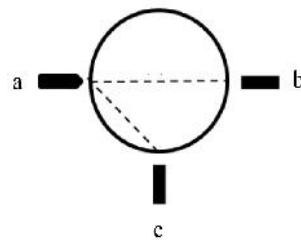
جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین تراز فشار صوت در دو رقم مختلف خربزه

Table 5- Results average comparison sound pressure level on two varieties of melons.

متغیر Variable	سطوح متغیر Variable Levels	سوسکی سبز 'Sousky-Sabz'	زرد ایوانکی 'Zard-Eyvanekey'
موقعیت صداسنج SLM Position	90 Degree	49.61 ^a	49.97 ^a
	180 Degree	36.59 ^b	42.03 ^b
جنس گوی Ball Material	شیشه Glass	42.05 ^b	45.78 ^b
	فلز Steel	41.61 ^b	44.44 ^b
	پلاستیک Plastic	44.61 ^a	47.78 ^a
زاویه برخورد Impact Angle	20 Degree	47.36 ^c	40/45 ^c
	45 Degree	44.23 ^b	46.78 ^b
	70 Degree	47.71 ^a	50.76 ^a

حروف مشترک در هر تیمار، نشان‌دهنده‌ی عدم معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون دانکن می‌باشد.

The same letters in each treatment are significantly different significance level of 0.05 according to Duncan's test.



شکل ۱۲- فاصله صداسنج از محل ضربه (a) در موقعیت ۱۸۰ درجه (b)، بیشتر از فاصله در موقعیت ۹۰ درجه (c)

Fig.12. The distance of sound level meter at position of 180 degrees (b) respect to impact place (a) is more than 90 degrees (c)

مناسب‌تر می‌باشد. فاکتورهای جنس گوی ضربه‌زن، زاویه برخورد آونگ، موقعیت صداسنج و نوع رقم تأثیر معنی‌داری روی فرکانس تشدید ندارند؛ ولی بر مقادیر تراز فشار صوت و اندازه FFT تأثیر معنی‌داری دارند. با توجه به تراز فشار صدای بیشتر و سهولت اندازه‌گیری صدا در موقعیت ۹۰ درجه میکروفن نسبت به محل ضربه، این موقعیت برای اندازه‌گیری توصیه می‌شود.

در حالت موقعیت صداسنج (۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه)، زاویه برخورد (۷۰ درجه) و نوع رقم (زرد ایوانکی)، بیشینه تراز فشار صوت برای جنس‌های شیشه، فلز فولادی و پلاستیک به ترتیب ۵۴/۴۳، ۵۴/۸۱ و ۵۵/۱۱ دسی‌بل به دست آمد. قطر پلاستیک (۵۲ میلی‌متر) بیشتر از قطر شیشه و فلز است ولی جرم همگی (۷۲/۱۳ گرم) است. احتمالاً به دلیل شعاع انحنای بیشتر ضربه‌زن پلاستیکی نسبت به دو ضربه‌زن دیگر مقادیر تراز فشار صوت آن در هر دو رقم بیشتر است. اختلاف معنی‌داری بین مقادیر تراز فشار صوت شیشه و فلز مشاهده نشد. به دلیل تولید تراز فشار صدای بیشتر توسط جنس

احتمالاً به دلیل شعاع انحنای بیشتر ضربه‌زن پلاستیکی نسبت به دو ضربه‌زن دیگر مقادیر تراز فشار صوت آن در هر دو رقم بیشتر است. با این حال مشخصات دیگری نظیر ضریب الاستیسیته و همگنی جنس ضربه‌زن در بلندی صوت دخالت دارند. افزایش زاویه برخورد، تراز فشار صوت را برای هر دو رقم خربزه به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. انرژی مکانیکی منتقله از آونگ به میوه در زاویه ۷۰ درجه بیشتر از دو زاویه دیگر است، پس مقادیر تراز فشار صوت آن نیز بیشتر است. با توجه به این که تراز صدای ایجاد شده در این زاویه بیشتر است و امکان اندازه‌گیری آن در صدهای زمینه بیشتر نسبت به دو زاویه دیگر امکان‌پذیر است، لذا استفاده از آن در اندازه‌گیری صدا توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

به دلیل این که تراز فشار صوت متأثر از فاکتورهای مختلف است؛ لذا استفاده از فرکانس تشدید در آزمون‌های آکوستیکی روی خربزه

۵۵/۳۱ دسی‌بل است. پس با افزایش زاویه برخورد (افزایش انرژی مکانیکی)، مقادیر تراز فشار صوت نیز افزایش می‌یابد. به دلیل تولید تراز فشار صدای بالاتر در زاویه ۷۰ درجه نسبت به زوایای ۲۰ و ۴۵ درجه، استفاده از آن در آزمون‌های آکوستیکی توصیه می‌شود. به شرط صدای زمینه کم، می‌توان از زوایای کمتر نیز استفاده نمود.

پلاستیکی نسبت به فلز و شیشه، استفاده از آن در آزمون‌های آکوستیکی توصیه می‌شود. در حالت موقعیت صداسنج (۱۸۰ درجه نسبت به محل ضربه)، جنس گوی ضربه‌زن (فلز) و رقم (زرد ایوانکی)، بیشینه تراز فشار صوت در زاویه‌های ۲۰، ۴۵ و ۷۰ درجه به ترتیب ۵۲/۲۲، ۵۴/۲۶ و

References

1. Abbott, J. A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 15: 207-225.
2. Chen, H. 1993. Analysis of the acoustic impulse resonance of apples for nondestructive estimation of fruit quality. Ph.D. Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium
3. Chen, P., Z. Sun, and L. Huarng. 1992. Factors affecting acoustic responses of apples. *Transactions of the ASAE (USA)*.
4. Chen, P., M. Ruiz-Altisent, and P. Barreiro Elorza. 1996. Effect of impacting mass on firmness sensing of fruits. *Transactions of the ASAE* 39: 1019-1023.
5. Esmail Beygi, Z., and M. Brekshly. 2005. *Fundamental of Acoustics (translation)*. Amirkabir Press Institute, Fourth Edition (In Farsi).
6. Gómez, A. H., A. G. Pereira and J. Wang. 2006. Acoustic impulse response potential to measure mandarin fruit ripeness during storage. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 15: 24-30.
7. Jancsó, P. T., L. Clijmans, B. M. Nicolai, and J. De Baerdemaeker. 2001. Investigation of the effect of shape on the acoustic response of 'conference' pears by finite element modelling. *Postharvest Biology and Technology* 23: 1-12.
8. Mahmoudi, A. 2006. Development of a suitable algorithm using artificial neural network for sorting of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics. Thesis Ph.D. Agricultural Machinery Departement. University of Tehran. (In Farsi).
9. Peyvast, Gh. 2005. *Olericulture*. Guilan Daneshpazir Publication, Third Edition. (In Farsi).
10. Wang, J., B. Teng, and Y. Yu. 2004. Pear dynamic characteristics and firmness detection. *European Food Research and Technology* 218: 289-294.

The effect of acoustic system variables on sound signals of Melon varieties

F. Khoshnam^{1*} - S. R. Hassan Beygi Bidgoly² - M. Namjoo³ - M. Doroozi⁴

Received: 11-02-2015

Accepted: 10-08-2015

Introduction

Cucumis melo includes a wide range of varieties. The acoustic is production, transmission and energy received form medium vibrations. Acoustic or sonic tests applies for grading productions, ripening determination of fruit firmness and sorting of broken eggs and so on in agriculture. Currently these methods are generalized for measuring non-spherical fruits properties. The primary objective of the present research was to investigate the effect of acoustic system variables such as impact places, impactor material type, pendulum angle and sound level meter position on acoustics response of two different melon varieties, including *Zard-Eyvanekey* and *Sousky-Sabz*. These results can be useful for designing acoustic implements related to agricultural products.

Materials and Methods

This research was conducted on 65 samples of *Zard-Eyvanekey* and *Sousky-Sabz* varieties (export varieties). A laboratory recording system used to acquire the acoustic impulse information that was comprised a mechanical excitement mechanism (an impactor such as pendulum), sound level meter, a lap-top computer and software to control the experimental setup and to analyze its results (Cool Edit Pro 2.0 Software), and melon-bed. The impactor consists of diameter and long copper rod 3 mm and 256 mm, respectively. The ball mass was 72.13 gram. The acoustic signal was sensed by a sound level meter (SLM) type 2270 B&K company Denmark. The samples locate on soft cushion for keeping because this bed prevents vibration distortion and causes free vibration. We consider three measurements on equator or mid-section of each fruit (approximately 120 degree) for diminishing inherent diversity of sample shapes. The sound level meter was placed at a distance of 2-5 mm from the fruit surface. The effects of sound level meter, impactor ball and pendulum angle on sound signals were investigated. The effects of other parameters were analyzed by factorial test in randomized complete plot by three replications for each sample. The treatments were 36 and 65 melons of each variety were selected.

Results and Discussion

The average samples peaks were 10576 and 28663 at 90 and 180 degrees respect to impact place, respectively. Other factors such as impactor ball type (steel), impact angle (70 degrees) and variety type (*Zard-Eyvanekey*) were constant. The resonance frequency was 123.05 Hz for both SLM position. The averages of peak sound pressure level were 55.29 and 52.38 dB at 90 and 180 degrees positions, respectively. It concluded that the change of sound pressure meter (SLM) position of 90 to 180 degree caused to increase sound pressure level but had no effect on reach the time to peak and resonance frequency. The effect of impactor ball material and impact angle of pendulum on recording signals approximately resemble up and did not state here. The factor levels were sound level meter position respect to impact place (two levels), impactor ball material (three levels) and impact angle of pendulum (three levels). We found that effect of sound level meter position; ball material and impact angle variables on sound pressure level values and interaction effect of sound level meter × impact angle on FFT magnitude was significant at 1% level in both varieties. None of the variables and interactions has effect on the resonance frequency in both varieties. It can be concluded from tables that resonance frequency was more suitable than sound pressure level and FFT magnitude in acoustic tests. The increment of angle caused to increase impact velocity because the length and mass of pendulum rod were constant. We can state the above conclusion about impact velocity (excitement velocity) too, e.g. the impact velocity (excitement velocity) had no

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agricultural, University of Jiroft

2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Aboureihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran

3- Instructor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, University of Jiroft

4- M.Sc. Student of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman

(*- Corresponding Author Email: F_khoshnam@ujiroft.ac.ir)

effect on resonance frequency while it effected on sound pressure level and FFT magnitude. This conclusion coincides to others researchers.

Conclusions

The impactor ball, pendulum angle, sound level meter position and variety type factors did not showve significant effect on resonance frequency but they had significant effect on FFT magnitude and sound pressure meter. Because of the high pressure level and measurement easily, it was recommended the position 90 degrees of microphone respect to impact place for acoustics measurements. The maximum sound pressure levels were 54.43, 54.81 and 55.11dB for glass, steel and plastic, respectively. Other factors such as SLM position (180 degrees respect to impact), impact angle (70 degrees) and variety type (Zard-Eyvanekey) were constant. Because of receiving high pressure level from impact angle of 70 degrees respect to 20 and 45 degrees, it was recommended for acoustics measurements. It can be used the lower angles by considering the low background sound.

Keywords: Acoustic, Impulse response, Melon, Resonance frequency

پیش‌بینی غیرمخرب سفتی سیب در طول دوره انبارداری بر پایه تصاویر نقطه‌ای دینامیکی

بهاره جمشیدی^{۱*} - آرمان عارفی^۲ - سعید مینایی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

چکیده

تصویربرداری بایواسپکل با استفاده از تصاویر نقطه‌ای دینامیکی به‌عنوان یک روش نوری نوین در ارزیابی غیر مخرب کیفیت محصولات کشاورزی- غذایی طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، توانایی این روش در ارزیابی شاخص سفتی میوه سیب (رقم رد دلپس) در طول ۵ ماه انبارداری بررسی شد. برای این منظور، تصاویر نقطه‌ای دینامیکی از نمونه‌های سیب در دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر به‌طور جداگانه و در طی دوره انبارداری تحصیل و پردازش شد. در این راستا، افزون بر ویژگی‌های مرسوم در تحلیل تصاویر نقطه‌ای دینامیکی، ویژگی‌های مبتنی بر تبدیل موجک و بافت نیز مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر، اندازه‌گیری سفتی بافت میوه‌ها از طریق آزمون مخرب نفوذ تعیین شد. در نهایت، توانایی این روش در پیش‌بینی سفتی میوه سیب با تدوین مدل‌های رگرسیون غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش مذکور قادر به پیش‌بینی غیر مخرب ویژگی سفتی سیب است. نتایج نشان داد، بهترین مدل واسنجی تدوین شده توانسته با ضریب همبستگی $r_p = 0/81$ و خطای استاندارد $SEp = 8/4 N$ در طول موج ۶۸۰ نانومتر و همچنین ضریب همبستگی $r_p = 0/83$ و خطای استاندارد $SEp = 8/2 N$ در طول موج ۷۸۰ نانومتر، ویژگی سفتی سیب را پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، تصاویر نقطه‌ای دینامیکی، تصویربرداری بایواسپکل، غیر مخرب، لیزر

مقدمه

این که روش‌های مخرب مرسوم برای اندازه‌گیری سفتی میوه سیب عملاً قابلیت به‌کارگیری در سامانه‌های کیفیت‌سنجی برخط را ندارند، ارزیابی غیرمخرب ویژگی سفتی امری لازم به نظر می‌رسد. تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی از قبیل طیف‌سنجی فلورسانس^۴ (Song et al., 1997)، طیف‌سنجی فرو سرخ نزدیک^۵ (Qing et al., 2007)، طیف‌سنجی ثابت زمانی^۶ (Valero, 2001)، تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر^۷ (Qing et al., 2008)، تصویربرداری چندطیفی^۸ (Peng and Lu, 2006) و تصویربرداری فراطیفی^۹ (Lu et al., 2006; Wang et al., 2012) در ارزیابی سفتی میوه سیب به‌کار برده شده‌اند. با این وجود پژوهش‌های پیش‌تر برای دستیابی به روش‌هایی که از عملکرد بهتری برخوردارند، ادامه دارد.

تصویربرداری بایواسپکل^{۱۰} یا استفاده از تصاویر نقطه‌ای

شاخص کیفی سفتی در میوه سیب اهمیت ویژه‌ای دارد، تاجایی که سیب‌های ترد و سفت نزد مصرف‌کنندگان از مقبولیت بیشتری برخوردار هستند (Peng and Lu, 2006; Harker et al., 2008). سیب از جمله میوه‌هایی است که برای مدت زمان نسبتاً طولانی در شرایط انبارداری نگهداری می‌شود. تغییرات فیزیولوژیکی میوه در طول دوره نگهداری، امری اجتناب‌ناپذیر است که منجر به کاهش سفتی آن خواهد شد. از این‌رو، اندازه‌گیری سفتی سیب امری ضروری است، در غیر این صورت عرضه‌کنندگان میوه توانایی رقابت در بازار را از دست خواهند داد (Lu, 2004; Peng and Lu, 2007). با توجه به

۱- استادیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: b.jamshidi@areeo.ac.ir)

۲- دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

DOI: 10.22067/jam.v7i1.49413

4- Florescence spectroscopy
5- Near-infrared spectroscopy
6- Time resolved spectroscopy
7- Laser light backscattering imaging
8- Multispectral imaging
9- Hyperspectral imaging
10- Biospeckle imaging

پژوهش دیگری، تغییرات سفتی سیب در طول دوره عمر قفسه‌ای با روش DSP مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های سیب به مدت ۴ ثانیه در معرض نور لیزر با طول موج ۶۳۵ نانومتر قرار گرفتند و سپس سفتی آن‌ها از طریق آزمون مخرب اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از وجود همبستگی پایین ($r = 0/42$) بین داده‌های مخرب و غیرمخرب اندازه‌گیری شده با روش DSP بود (Adamiak et al., 2012). گزارش دیگری در سال ۲۰۱۲ منتشر شد که حاکی از وجود همبستگی منفی بالا ($r = -0/89$) بین تغییرات سفتی سیب در دوره قبل از برداشت و فعالیت DSP بود (Szymanska-Chargot et al., 2012). با این حال، تاکنون تغییرات سفتی سیب با روش DSP در طول دوره انبارداری طولانی مدت بررسی نشده است. ضمن این‌که، تاکنون هیچ مطالعه‌ای مبنی بر توسعه مدل‌های رگرسیونی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی کیفی سفتی میوه سیب با استفاده از روش DSP گزارش نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی توانایی روش DSP در پیش‌بینی سفتی سیب رقم 'Red Delicious' در طول ۵ ماه انبارداری از طریق توسعه مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی‌کننده است.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌های سیب

در مجموع تعداد ۵۴۰ عدد سیب رقم رد دلشس از باغی واقع در شهرستان اشنویه تهیه شد. نمونه‌ها از لحاظ رنگ نسبتاً یکنواخت بودند و با کم‌ترین اثر ناشی از فشار دست برداشت شدند. نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت به سردخانه منتقل شدند و تحت شرایط دمایی 1 ± 0 درجه سلسیوس و شرایط رطوبتی 5 ± 85 درصد نگهداری شدند. با توجه به شرایط معمول انبارداری میوه سیب در استان آذربایجان غربی و به استناد منابع موجود (Peng and Lu, 2007; Wang et al., 2012)، مدت زمان انبارداری برای نمونه‌های سیب ۱۵۰ روز در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در ۵ مرحله و بر اساس مدت زمان انبارداری انجام گرفت. این مراحل به‌ترتیب در روزهای صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰م انبارداری بود. در هر مرحله از آزمون، نمونه‌های سیب به مدت ۷ تا ۸ ساعت در شرایط دمایی اتاق قرار گرفتند تا به تعادل دمایی برسند. سپس تصاویر DSP در دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر از هر نمونه تحصیل شد و در نهایت نمونه‌ها مورد آزمون مخرب سفتی قرار گرفتند.

تهیه تصاویر DSP

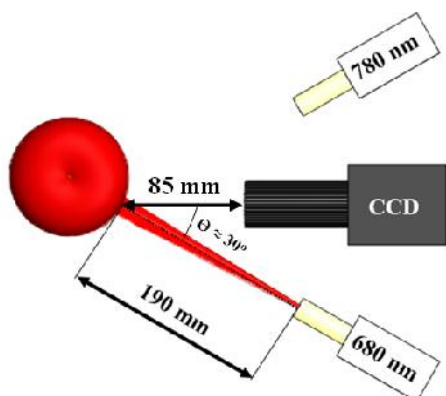
در شکل ۱ طرح‌واره چیدمان تصویربرداری DSP نشان داده شده است. این مجموعه متشکل از یک دوربین CCD (BCP-1050MT, Korea) با محدوده دینامیکی بالا، دارای بازده فوتونی در

دینامیکی^۱ (DSP) از جمله روش‌های غیرمخرب نوین نوری است که در سال‌های اخیر معرفی شده است. در این روش، یک جسم مشخص توسط نور لیزر مورد تابش قرار می‌گیرد و فوتون‌های پس‌پراکنش‌یافته^۲ از آن در طول زمانی معین توسط یک آشکارساز دریافت می‌شود. خروجی آشکارساز، تصاویر نقطه مانندی متشکل از یک سری دانه‌های روشن و تاریک خواهد بود. اگر جسمی که مورد تابش نور لیزر قرار می‌گیرد محصولی غیرزنده باشد، پدیده DSP در طول زمان دارای تغییرات قابل توجهی نخواهد بود و میزان روشنایی یک پیکسل از تصویر در طول زمان ثابت است (Ansari and Nirala, 2013). در این حالت عنوان می‌شود که جسم دارای فعالیت دینامیکی کمی است. از سوی دیگر، فعالیت دینامیکی بالایی برای محصولات که دارای بافتی زنده هستند، انتظار می‌رود. به گونه‌ای که، اگر به سطح جسمی که در معرض نور لیزر قرار گرفته است توجه شود، فعالیت فوتون‌های پس‌پراکنش یافته در طول زمان همچون آب در حال جوش به‌نظر می‌رسد (Rabelo et al., 2005). بنابراین، پدیده DSP در طول زمان دارای تغییرات چشم‌گیری خواهد بود (Briers, 1975). از عوامل اصلی در شکل‌گیری پدیده DSP که موجبات کاربرد آن را در کشاورزی فراهم ساخته است، می‌توان به رشد و تقسیم سلولی، جریان سیتوپلاسمی و سایر واکنش‌های بیوشیمیایی اشاره کرد (Braga et al., 2009). در حوزه کشاورزی-غذایی پژوهش‌های مختلفی از قبیل تشخیص عیوب و بیماری‌ها در میوه‌ها (Adamiak et al., 2012; Pajuelo et al., 2003)، ارزیابی کیفی گوشت (Amaral et al., 2013)، بررسی تغییرات بیوشیمیایی (Zdunek and Cybulska, 2011; Zdunek and Herppich, 2012) و ارزیابی کیفی محصولات در طول دوره عمر قفسه‌ای (Rabelo et al., 2005) با استفاده از روش DSP انجام شده است. گزارش‌هایی مبنی بر کاهش فعالیت DSP در اثر کاهش ملکول‌های نشاسته (Zdunek and Cybulska, 2011) و افزایش فعالیت DSP همزمان با کاهش میزان کلروفیل نیز منتشر شده است (Zdunek and Herppich, 2012).

در یک پژوهش، تغییرات فعالیت DSP برای سه میوه سیب، گلابی و گوجه‌فرنگی در دوره عمر قفسه‌ای (مدت زمان ۶ روز) مورد مطالعه قرار گرفت (Ansari and Nirala, 2013). از یک لیزر با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر و توان ۲ میلی‌وات به‌عنوان منبع نوری استفاده شد. از هریک از نمونه‌ها ۱۵ ثانیه فیلم تهیه شد. همبستگی بین فریم‌های متوالی به‌عنوان ویژگی تصاویر DSP مورد بررسی قرار گرفت. در طول دوره عمر قفسه‌ای نتایج حاکی از کاهش فعالیت DSP و در نتیجه افزایش میزان همبستگی بین فریم‌ها بود. در

- 1- Dynamic speckle pattern (DSP)
- 2- Backscattered photons

پروپ مورد استفاده از نوع استوانه‌ای استیل ضد زنگ با قاعده غیر مسطح و با قطر ۱۱ میلی‌متر بود. پروپ با سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه تا عمق ۹ میلی‌متری بافت سیب نفوذ کرد و مقدار بیشینه نیرو در طول این فرآیند به‌عنوان شاخص سفتی در نظر گرفته شد. شرایط آزمون سفتی مورد استفاده در این تحقیق برگرفته از منابع انتشار یافته بود (Peng and Lu, 2006).



شکل ۱- طرح‌واره چیدمان تصویربرداری DSP

Fig.1. Schematic of dynamic speckle pattern imaging setup

استخراج ویژگی

در این پژوهش علاوه بر ویژگی‌های مرسوم که تاکنون در تحلیل تصاویر DSP به‌کار گرفته شده‌اند، ویژگی‌های دیگری مبتنی بر تبدیل موجک و بافت نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

ویژگی‌های مرسوم در تحلیل تصاویر DSP

تصویربرداری DSP یک روش نوری وابسته به زمان است. مرسوم‌ترین روش پیشنهادی برای بررسی تغییرات نور پس‌پراکنش یافته در طول زمان، تشکیل تصاویر THSP^۱ است. برای این منظور، از هر تصویر تهیه‌شده با رزولوشن $m \times n$ ، تنها یک ستون از پیکسل‌های آن استخراج می‌شود (معمولاً ستونی که در وسط تصویر است). با قرار دادن ستون‌های استخراج‌شده در کنار یکدیگر، در نهایت تصویری شکل می‌گیرد که به تصویر THSP مشهور است (Zdunek et al., 2014). هر سطر از این تصویر حاوی اطلاعاتی درباره تغییرات شدت پیکسل‌ها در طول زمان است. با توجه به این که در پژوهش حاضر تعداد ۵۰۰ فریم تصویر از هر نمونه سیب تهیه شد، تصاویر THSP با اندازه 400×500 تشکیل شدند. در نهایت دو ویژگی آماری مرسوم شامل ممان اینرسی^۲ (IM) و AVD^۳ از تصاویر

ناحیه NIR و مجهز به یک عدد لنز با قابلیت بزرگ‌نمایی بالا (18-120 mm, Avenir CCTV lens, Japan)، هم‌چنین دو عدد لیزر توان پایین (۳ میلی‌وات) در طول موج‌های ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر بود. انتخاب طول موج‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که بیش‌ترین اطلاعات مربوط به ساختار و خواص شیمیایی محصول را در خود داشته باشند. بنابراین و با توجه به این که جذب کلروفیل در نزدیکی طول موج ۶۸۰ نانومتر اتفاق می‌افتد و تغییر در مقدار آن می‌تواند بر ویژگی‌های کیفی میوه تأثیرگذار باشد، این طول موج برای یکی از لیزرها انتخاب شد. هم‌چنین، از یک لیزر ۷۸۰ نانومتر به‌عنوان طول موج ابتدای ناحیه فرورسرخ (NIR) به‌منظور دستیابی به اطلاعات جذبی پیوندهای O-H، C-H، H-N که در ترکیبات شیمیایی میوه به‌وفور یافت می‌شوند و بر ویژگی‌های کیفی آن تأثیرگذارند، استفاده شد (Jamshidi et al., 2014). چیدمان مجموعه تصویربرداری DSP به گونه‌ای طراحی شد که نور لیزر در فاصله ۱۹۰ میلی‌متری و با زاویه تقریبی ۳۰ درجه نسبت به دوربین به نمونه وارد شود. در این زاویه احتمال تشخیص فوتون‌های برگشتی از سطح میوه توسط دوربین کاهش پیدا کرده و فوتون‌های دریافتی مربوط به پس‌پراکنش داخلی خواهند بود (Zdunek et al., 2007). در این چیدمان، دوربین نیز عمود بر نقطه برخورد نور به نمونه و در فاصله ۸۵ میلی‌متری قرار داده شد. انتخاب فاصله‌ها به‌گونه‌ای بود که بهترین تصویر حاصل گردد. معیار قابل قبول بودن تصاویر نیز مشاهده فعالیت DSP در تصویر، پایین بودن پدیده فلورسانس و پوشش نسبتاً کامل تصویر توسط پیکسل‌های با اندازه درشت بود. مجموعه تصویربرداری در یک محفظه تاریک به‌منظور حذف اثر نور محیط قرار داده شد.

به‌منظور تهیه تصاویر DSP، ابتدا نمونه‌ها به‌ترتیب شماره‌گذاری شدند. سپس هریک از نمونه‌ها به داخل محفظه تصویربرداری منتقل و در محل مورد نظر قرار داده شدند. هر نمونه ابتدا در معرض نور لیزر ۶۸۰ نانومتر قرار گرفت و تصویربرداری از سطح آن به مدت ۲۵ ثانیه انجام شد. پس از تحصیل ۵۰۰ فریم تصویر با رزولوشن 480×720 پیکسل، لیزر ۶۸۰ نانومتر خاموش و تصویربرداری با لیزر ۷۸۰ نانومتر انجام گرفت. برای طول موج ۷۸۰ نانومتر نیز ۵۰۰ فریم تصویر تهیه شد. لازم به ذکر است که تحصیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار مهندسی MATLAB 2012b انجام شد.

آزمون مخرب سفتی

پس از تهیه تصاویر DSP، نمونه‌ها مورد آزمون مخرب سفتی قرار گرفتند. برای تعیین سفتی نمونه‌های سیب از دستگاه سنجش بافت Texture Analyzer مدل TA-XTPlus استفاده شد. پس از آن که پوست سیب درست از محل برخورد نور لیزر (روی خط مرکزی سیب) برداشته شد، نمونه‌ها مورد آزمون نفوذ تک‌محوری قرار گرفتند.

- 1- Time historical speckle pattern
- 2- Inertia moment
- 3- Absolute value of the differences

THSP استخراج شد.

که در آن، W ضرایب موجک، $f(x,y)$ تصویر ورودی، تابع موجک، Z پارامتر انتقال، m و n اندازه تصویر هستند.

در پژوهش حاضر، هر تصویر THSP تا سه سطح تحت تابع موجک از نوع دابوچی^۳ (Db4) تجزیه شد (شکل ۳). انرژی (E) (رابطه ۶) و آنتروپی (S) (رابطه ۷) به‌عنوان دو ویژگی مؤثر در تبدیل گسسته موجک برای تمامی سطح‌های تصویر استخراج شد (Borah et al., 2007). به این ترتیب، مجموعاً برای هر تصویر THSP، ۲۴ ویژگی موجک استخراج شد.

$$E = \frac{1}{(XY)^2} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y |W(x,y)|^2 \quad (۶)$$

$$S = -\frac{1}{(XY)^2} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y |W(x,y)|^2 \log |W(x,y)|^2 \quad (۷)$$

آنالیز بافت

ویژگی‌های بافت بیانگر چگونگی توزیع سطح خاکستری پیکسل‌ها در یک تصویر هستند. با توجه به ظاهر و الگوی خاص تصاویر THSP تصمیم گرفته شد تا ویژگی‌های بافت در تحلیل تصاویر THSP نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. ممان اول تا سوم، همواری، یکنواختی، و آنتروپی^۴ به‌عنوان شش ویژگی مؤثر از هیسوگرام نرمال شده تصاویر THSP استخراج شد (جدول ۱).

تدوین مدل‌های واسنجی

تدوین مدل واسنجی مناسب برای تخمین ویژگی کیفی مورد نظر، آخرین مرحله‌ای بود که پس از استخراج ویژگی‌ها از تصاویر انجام گرفت. مدل‌های واسنجی را می‌توان به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی نمود. به‌دلیل وجود عوامل اجتناب‌ناپذیر و ناخواسته‌ای همچون متفاوت بودن اندازه میوه‌ها، تغییرات دمایی محل آزمایش و خطاهایی که ممکن است در حین تصویربرداری رخ دهد، استفاده از مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل‌های خطی از ارجحیت بیشتری برخوردار است (Mollazade, 2013). بنابراین در این پژوهش، از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵ (ANN) با یک لایه مخفی برای تدوین مدل‌های رگرسیونی غیرخطی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی سفتی سیب استفاده شد. در این راستا و برای یافتن تعداد بهینه نرون‌ها، تعداد مختلفی از نرون‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در نرون‌های لایه مخفی از تابع تانژانت سیگموید^۶ و در نرون لایه خروجی از تابع خطی استفاده شد.

استخراج ویژگی ممان اینرسی (IM) از تصاویر THSP:

یکی از روش‌های قوی و معمول در بررسی تصاویر THSP، تشکیل ماتریس هم‌وقوعی^۱ است. تعریف ماتریس هم‌وقوعی به‌صورت رابطه (۱) است (Alves Braga Junior et al., 2007).

$$COM = [N_{ij}] \quad (۱)$$

که در آن، N تعداد دفعاتی است که در تصویر THSP پیکسل با شدت خاکستری Z بلافاصله بعد از پیکسل با شدت خاکستری i اتفاق می‌افتد.

برای اندازه‌گیری پراکندگی آرایه‌های ماتریس هم‌وقوعی حول قطر اصلی، از رابطه (۲) استفاده می‌شود که ویژگی ممان اینرسی (IM) نامیده می‌شود (Alves Braga Junior et al., 2007).

$$IM = \sum_{ij} M_{ij} (i - j)^2 \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، متغیر M ، ماتریس هم‌وقوعی نرمال شده است که به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود (Arizaga et al., 1999).

$$M_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}} \quad (۳)$$

ویژگی AVD:

برای اندازه‌گیری پراکندگی آرایه‌های ماتریس هم‌وقوعی حول قطر اصلی آن، تغییراتی در رابطه (۲) انجام شده است که به‌عنوان روشی جایگزین برای ویژگی IM معرفی شده است (رابطه (۴)). زمانی که سطح فعالیت DSP متوسط باشد این ویژگی می‌تواند مؤثرتر از ویژگی IM باشد (Braga et al., 2011).

$$AVD = \sum_{ij} M_{ij} \times |i - j| \quad (۴)$$

تبدیل موجک^۲

در سال‌های اخیر تبدیل موجک به‌عنوان یک ابزار قوی در پردازش سیگنال و تصویر محبوبیت رو به رشدی را به‌دست آورده است. تبدیل موجک بر خلاف تبدیل فوریه اطلاعات زمانی سیگنال مورد نظر را حفظ کرده و در تحلیل سیگنال‌های ناپایستا بسیار بهتر عمل می‌کند (Nobre et al., 2009). با توجه به این‌که فعالیت DSP نمی‌تواند شرایط ایستایی یک سیگنال را اقلان کند، کاربرد تبدیل موجک منطقی‌تر از تبدیل فوریه به‌نظر می‌رسد (Braga et al., 2011).

تبدیل موجک مجزا را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) تعریف کرد (Gonzalez and Woods, 2002).

$$W(j,m,n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \mathbb{E}_{j,m,n}(x,y) \quad (۵)$$

3- Daubechies

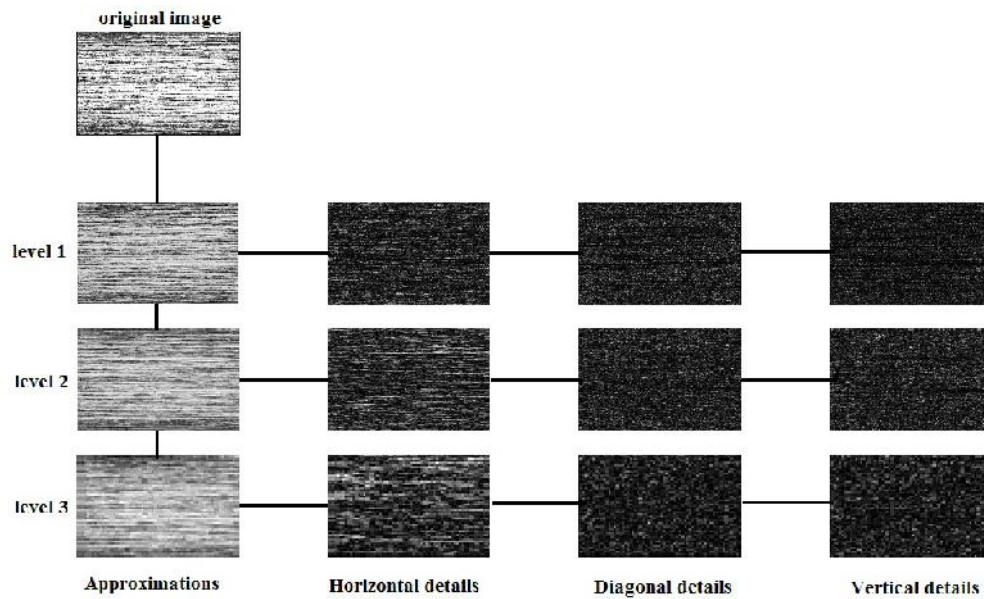
3- Entropy

5- Artificial neural networks

6- Tangent sigmoid

1- Co-occurrence matrix

2- Wavelet transform



شکل ۲- تجزیه تصویر THSP تا سطح سه توسط تبدیل موجک

Fig.2. Decomposition of THSP image into three levels by wavelet transform

جدول ۱- ویژگی‌های بافت (Gonzalez and Woods, 2002)

Table 1- Texture features (Gonzalez and Woods, 2002)

توضیح ویژگی Feature description	معادله ویژگی Feature equation
ممان اول The first moment	$\sim = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$
ممان دوم The second moment	$\dagger = \sqrt{(z_i - \sim)^2 p(z_i)}$
ممان سوم The third moment	$\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - \sim)^3 p(z_i)$
همواری Smoothness	$R = 1 - \frac{1}{1 + \dagger^2}$
یکنواختی Uniformity	$\sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$
آنترپی Entropy	$-\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$

که z_i شدت سطح خاکستری، $p(z_i)$ هیستوگرام نرمال شده و L تعداد سطوح خاکستری هستند.

Where z_i is a random intensity, $p(z_i)$ is the normalized histogram, and L is number of intensity levels.

در مجموع، تعداد ۳۲ ویژگی شامل AVD، IM، AVD، ۲۴ ویژگی مبتنی بر تبدیل موجک و ۶ ویژگی مبتنی بر بافت از هر تصویر THSP استخراج شد.

شد. ارزیابی عملکرد شبکه نیز از طریق بررسی پارامترهای ضریب همبستگی (r)، هم‌چنین خطای استاندارد (SE) (روابط (۸) و (۹)) انجام شد (Romano et al., 2011).

بعد از پیاده‌سازی شبکه در نرم‌افزار MATLAB، از ۶۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی متقاطع مدل واسنجی و از ۲۵ درصد باقی‌مانده داده‌ها برای آزمون شبکه استفاده

نتایج و بحث

بررسی تغییرات ویژگی کیفی سفتی در طول دوره انبارداری

مقادیر آماری مربوط به شاخص سفتی سیب در طول ۵ دوره آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. نتایج بیانگر کاهش معنی‌دار شاخص سفتی سیب در طول دوره انبارداری بود. مقدار میانگین سفتی برای نمونه‌های سیب در روز صفرم انبارداری ۸۲/۸۳ نیوتن به‌دست آمد که این مقدار پس از ۵ ماه انبارداری به ۴۸/۰۵ نیوتن کاهش پیدا کرد.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - m_i - bias)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - m_i)}{n} \quad (9)$$

در این روابط، p و m به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده هستند و n بیانگر تعداد نمونه‌ها است. لازم به ذکر است که هرکدام از ساختارهای مختلف شبکه برای ۲۰ بار اجرا و میانگین مقادیر ضریب همبستگی و استاندارد خطا به‌دست آمده در ۲۰ تکرار به‌عنوان عملکرد نهایی هر شبکه در نظر گرفته شد.

جدول ۲- مقادیر آماری مربوط به سفتی و جرم سیب‌ها

Table 2- Statistical values of firmness and mass for apples

	زمان انبارداری (روز)	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف استاندارد
				Mean	SD
سفتی (نیوتن) Firmness (N)	Storage day	Min	Max		
	0	60.83	103.06	82.83 ^a	7.69
	30	50.52	88.29	70.28 ^b	7.85
	60	48.40	87.92	66.46 ^c	7.36
	120	33.43	74.12	54.76 ^d	7.69
	150	29.53	80.92	48.05 ^e	6.88
Total of samples		29.53	103.06	63.54	14.29
جرم (گرم) Mass (g)	0	88.40	220	151.40 ^a	25.44
	30	102.80	214	149.98 ^a	23.31
	60	95.60	215	144.66 ^a	24.39
	120	100.60	218.20	146.74 ^a	23.48
	150	97	215.20	147.73 ^a	24.45
	Total of samples		88.40	220	148.07

اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند. Different letters denote significant differences ($p < 0.05$) among the mean values.

برخوردار بوده است.

در جدول ۳ تغییرات ویژگی IM در طول دوره انبارداری میوه سیب نشان داده شده است. توضیح این جدول در ادامه و در دو بند جداگانه (الف و ب) بیان شده است.

الف) دوره نگهداری تا روز ۱۶۰م انبارداری

در این دوره یک رابطه معکوس بین میزان فعالیت DSP و شاخص سفتی مشاهده شد. یعنی با کاهش میزان سفتی، میزان فعالیت DSP افزایش پیدا کرد (جدول ۳). میزان فعالیت DSP در روز صفرم انبارداری دارای کمترین مقدار ممکن بود و پس از آن و در روز ۳۰م یک افزایش سریع در فعالیت DSP اتفاق افتاد. افزایش فعالیت DSP تا روز ۱۶۰م از مرحله انبارداری ادامه پیدا کرد، هرچند از سرعت تغییرات تا حد زیادی کاسته شد. وجود رابطه معکوس بین فعالیت DSP و شاخص سفتی حاکی از وجود کلروفیل است. پیش از این نیز گزارش‌هایی مبنی بر وجود رابطه‌ای معکوس بین میزان کلروفیل و

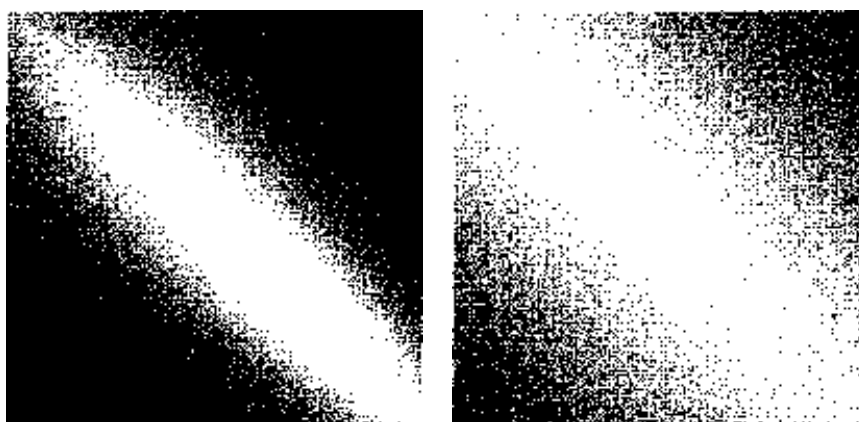
همان‌گونه که از جدول ۲ قابل مشاهده است، مقدار میانگین سفتی اندازه‌گیری شده در هر دوره از آزمایش دارای اختلاف معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) با سایر دوره‌های آزمایش است. این نتیجه می‌تواند حاکی از فعالیت فیزیولوژیکی بالا در میوه سیب باشد. از سوی دیگر، سیب‌های مورد استفاده محدوداً نسبتاً وسیعی از مقادیر سفتی را در بر داشتند که برای تدوین مدل واسنجی قابل اعتماد مفید بود.

بررسی تغییرات فعالیت DSP در طول دوره انبارداری

بررسی فعالیت DSP به‌طور معمول از طریق تشکیل ماتریس هم‌وقوعی و محاسبه ویژگی IM انجام می‌شود. نتایج نشان داد که تعداد پیکسل‌های غیر صفر پراکنده شده در اطراف قطر اصلی ماتریس هم‌وقوعی و در نتیجه مقدار ویژگی IM برای طول موج ۶۸۰ نانومتر بیش از طول موج ۷۸۰ نانومتر است (شکل ۳). این بدان معنی است که در طول موج ۶۸۰ نانومتر، پدیده DSP از فعالیت بیش‌تری

(Herppich, 2012).

فعالیت DSP در محدوده طول موج‌های قرمز ناحیه بینایی منتشر شده است (Szymanska-Chargot *et al.*, 2012; Zdunek and



شکل ۳- نمونه‌ای از ماتریس هم‌وقوعی حاصل از طول موج ۶۸۰ نانومتر (سمت راست) و طول موج ۷۸۰ نانومتر (سمت چپ)
Fig. 3. Typical Co-occurrence Matrix obtained from wavelength of 680nm (Right), and 780nm (Left)

جدول ۳- مقادیر متوسط ممان اینرسی و شدت نور پس‌پراکنش یافته برای سیب‌ها در طول دوره انبارداری

Table 3- Mean values of inertia moment (IM) and backscattered intensity measured for apples during cold storage

	زمان انبارداری (روز) Storage days	680 nm		780 nm	
		Mean	SD	Mean	SD
ممان اینرسی ($\times 10^4$) Inertia moment ($\times 10^4$)	0	23.30 ^e	2.84	3.21 ^c	1.60
	30	44.20 ^b	5.97	7.44 ^{ab}	1.52
	60	48.03 ^a	4.64	8.99 ^a	1.79
	120	34.03 ^d	5.02	6.56 ^b	1.47
	150	37.32 ^c	4.01	8.68 ^a	1.80
شدت نور پس‌پراکنش یافته Backscattered intensity	0	140.90 ^d	4.61	187.76 ^c	5.96
	30	153.50 ^c	3.78	198.70 ^b	3.99
	60	154.07 ^c	3.17	197.02 ^b	3.69
	120	160.38 ^a	3.92	202.96 ^a	2.78
	150	155.71 ^b	3.49	198.82 ^b	3.89

اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.
 Different letters denote significant differences ($p < 0.05$) among the mean values.

موج ۶۸۰ نانومتر به دلیل این که جذب کلروفیل در نزدیکی این طول موج اتفاق می‌افتد به شدت و تصاویر تهیه شده در طول موج ۷۸۰ نانومتر به میزان کمتری تحت تأثیر مقدار کلروفیل در میوه هستند.

ب) دوره نگهداری بعد از روز ۶۰ انبارداری

در این دوره زمانی، کاهش معنی‌داری در فعالیت DSP اتفاق افتاد (جدول ۳). علت اصلی کاهش فعالیت DSP در این دوره به تغییرات فیزیولوژیکی بر می‌گردد که در میوه سیب اتفاق می‌افتد. میوه‌ها حاوی مقدار فراوانی نشاسته ($C_6H_{12}O_5$) با اندازه‌های نسبی ۱ تا ۱۰۰ میکرون و همچنین پکتین، اسیدهای آلی و اسیدهای آمینه هستند. در طول فرآیند رسیدگی، نشاسته و اسیدهای آمینه هیدرولیز شده و تبدیل به کربوهیدرات‌های ساده‌تری همچون گلوکز ($C_6H_{12}O_6$)

در گزارش‌های مذکور، کلروفیل به عنوان یک ماسک معرفی شده است که فعالیت DSP را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به گونه‌ای که با کاهش میزان کلروفیل، تعداد ملکول‌هایی که در فرآیند پس‌پراکنش نور به عنوان مراکز پخش کننده عمل می‌کنند، افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه یک افزایش نسبی در فعالیت DSP اتفاق می‌افتد. وجود کلروفیل را می‌توان از طریق اندازه‌گیری میزان شدت نور پس‌پراکنش یافته اثبات کرد، زیرا بین میزان کلروفیل و شدت نور پس‌پراکنش یافته ارتباط مستقیم وجود دارد (Szymanska-Chargot *et al.*, 2012). نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر حاکی از افزایش معنی‌دار میزان شدت نور پس‌پراکنش یافته در طول ۶۰ روز اول از دوره انبارداری بود (جدول ۳) که بیانگر کاهش میزان کلروفیل در طول این دوره است. از سوی دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که تصاویر تهیه شده در طول

در این پژوهش، نتایج حاصل از روش آزمون و خطا نشان داد که شبکه‌ای با یک لایه مخفی و حداکثر دفعات آموزش برابر با ۱۰۰۰۰، می‌تواند در پیش‌گویی پارامتر سفتی سیب به‌خوبی عمل نماید. تعیین تعداد نرون‌ها به‌عنوان فاکتور مهم دیگری در آموزش شبکه نیز از طریق روش آزمون و خطا انجام گرفت (جدول ۴). ساختارهایی که عملکرد بهتری در پیش‌بینی سفتی داشتند در این جدول به‌صورت پررنگ نمایش داده شده‌اند.

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش زمانی جذاب‌تر خواهد بود که با نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های دیگر مقایسه شود. محققان با استفاده تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی به‌عنوان روش‌های نوری گران قیمت توانسته‌اند، در تخمین پارامتر سفتی سیب به ضرایب همبستگی از ۰/۷۴ تا ۰/۸۹ و خطای استاندارد از ۶ تا ۸/۷ نیوتن دستیابی پیدا کنند (Lu, 2007; Mendoza *et al.*, 2011; Peng and Lu, 2005, 2006). اگرچه نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نتوانست به‌خوبی نتایج پژوهش‌های دیگر باشد، اما تفاوت زیادی نیز بین آن‌ها وجود نداشت. بنابراین می‌توان ادعا کرد که روش DSP به‌عنوان یک روش غیرمخرب ارزان قیمت در تخمین پارامتر سفتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه‌ای همچون تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی باشد.

می‌شوند (Szymanska-Chargot *et al.*, 2012). پژوهش‌های پیشین نشان داده است که دانه‌های نشاسته یکی از عوامل اصلی در پدیده DSP به‌شمار می‌روند و کاهش این ملکول‌ها تأثیر قابل‌توجهی در کاهش میزان فعالیت DSP دارد (Adamiak *et al.*, 2012; Ansari and Nirala, 2013; Szymanska-Chargot *et al.*, 2012). بنابراین می‌توان کاهش دانه‌های نشاسته را عامل اصلی کاهش فعالیت DSP در دوره نگهداری بعد از ۶۰ روز در هر دو طول موج بیان کرد.

ارائه بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده سفتی سیب

پارامترهایی همچون دفعات آموزش، تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها نقش اصلی در یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی ایفا می‌کنند (Lu, 2007). اگر دفعات آموزش، تعداد لایه‌های مخفی و نرون‌ها بیش از حد مجاز باشد، پدیده بیش‌آموزش اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، پایین بودن پارامترهای مذکور می‌تواند موجب شود تا شبکه به‌خوبی آموزش نبیند. در هر دو حالت بیش‌آموزش و کم‌آموزش، شبکه قادر نخواهد بود در مسایل پیش‌گویی و یا طبقه‌بندی به‌خوبی عمل نماید (Mollazade, 2013). یکی از روش‌های مرسوم برای تعیین پارامترهای بهینه، روش آزمون و خطا است.

جدول ۴- نتایج پیش‌بینی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای ویژگی سفتی سیب
Table 4- Prediction results of ANN models for apple firmness attribute

تعداد نرون‌ها No. of neurons	680 nm		780 nm	
	$r_c/r_{cv}/r_p$	$SE_c/SE_{cv}/SE_p(N)$	$r_c/r_{cv}/r_p$	$SE_c/SE_{cv}/SE_p(N)$
7	0.82/0.81/0.80	8.1/8.4/8.5	0.84/0.81/0.81	7.9/8.3/8.2
9	0.83/0.80/0.81	8/8.6/8.4	0.84/0.82/0.80	7.7/8.3/8.4
11	0.82/0.79/0.80	8.1/8.6/8.5	0.85/0.82/0.81	7.6/8.3/8.5
13	0.82/0.82/0.78	8.2/8.2/8.8	0.85/0.82/0.80	7.6/8.3/8.6
15	0.82/0.80/0.78	8.1/8.6/8.9	0.84/0.82/0.80	7.7/8.2/8.5
17	0.83/0.80/0.81	8/8.6/8.4	0.84/0.82/0.81	7.7/8.1/8.4
19	0.83/0.81/0.79	7.9/8.5/8.5	0.85/0.82/0.82	7.5/8.1/8.4
21	0.82/0.80/0.81	8.1/8.5/8.4	0.85/0.82/0.81	7.6/8.3/8.5
23	0.83/0.79/0.79	8/8.6/8.7	0.85/0.82/0.82	7.5/8.3/8.2
25	0.83/0.82/0.79	8/8.3/8.6	0.85/0.82/0.82	7.6/8/8.3
27	0.83/0.81/0.79	8/8.2/8.5	0.86/0.82/0.82	7.4/8.3/8.1
29	0.83/0.80/0.78	7.9/8.5/9	0.85/0.82/0.82	7.6/8/8.2
31	0.83/0.81/0.79	7.9/8.5/8.6	0.85/0.82/0.81	7.5/8.3/8.5
33	0.82/0.79/0.79	8.1/8.4/8.8	0.85/0.83/0.81	7.5/8/8.5
35	0.79/0.77/0.74	8.2/8.6/9	0.85/0.82/0.82	7.5/8.3/8.2
37	0.83/0.79/0.79	7.9/8.7/8.8	0.85/0.81/0.81	7.5/8.2/8.5
39	0.82/0.81/0.81	8/8.5/8.4	0.85/0.82/0.80	7.5/8/8.4
41	0.82/0.81/0.80	8.2/8.3/8.4	0.85/0.83/0.81	7.5/8.2/8.4
43	0.82/0.81/0.81	8.1/8.4/8.4	0.84/0.82/0.80	7.6/8.1/8.7
45	0.83/0.81/0.79	7.9/8.5/8.7	0.85/0.83/0.83	7.4/8.1/8.2
47	0.83/0.81/0.80	7.9/8.3/8.5	0.85/0.82/0.80	7.5/8.3/8.4

r_c , r_{cv} و r_p به ترتیب ضرایب همبستگی برای آموزش، اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی هستند. SE_c , SE_{cv} و SE_p به ترتیب متوسط خطای استاندارد برای آموزش، اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی هستند.

r_c , r_{cv} , and r_p are correlation coefficient for training, cross-validation and prediction, respectively. SE_c , SE_{cv} , and SE_p are mean standard error for training, cross-validation and prediction, respectively.

نتیجه‌گیری

سفتی سیب‌ها را با ضریب همبستگی بیش از ۰/۸۰ در هر دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر داشتند. بنابراین، روش DSP می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی به‌منظور تخمین غیر مخرب پارامتر سفتی میوه سیب باشد. با این وجود مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است تا بتوان عملکرد آن را ارتقاء و زمان لازم برای تصویربرداری را کاهش داد.

در این پژوهش، توانایی روش DSP در ترکیب با مدل‌سازی غیرخطی شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی غیر مخرب سفتی سیب رقم ردلیشس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش حاکی از عملکرد قابل قبول این روش در پیش‌بینی ویژگی سفتی میوه بود. به‌گونه‌ای که، بهترین مدل‌های ANN تدوین شده توانایی پیش‌بینی

References

1. Adamiak, A., A. Zdunek, A. Kurenda, and K. Rutkowski. 2012. Application of the biospeckle method for monitoring bull's eye rot development and quality changes of apples subjected to various storage methods-preliminary studies. *Sensors* 12: 3215-3227.
2. Alves Braga Junior, R., B. Oliveira Silva, G. Rabelo, R. Marques Costa, A. Machado Enes, N. Cap, H. Rabal, R. Arizaga, M. Trivi, and G. Horgan. 2007. Reliability of biospeckle image analysis. *Optics and Lasers in Engineering* 45: 390-395.
3. Amaral, I. C., R. A. Braga Jr, E. M. Ramos, A. L. S. Ramos, and E. A. R. Roxael. 2013. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging. *Journal of Food Engineering* 119: 135-139.
4. Ansari, M. D., and A. K. Nirala. 2013. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments. *Optik* 124: 2180-2186.
5. Arizaga, R., M. Trivi, and H. Rabal. 1999. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. *Optics and Laser Technology* 31: 163-169.
6. Borah, S., E. L. Hines, and M. Bhuyan. 2007. Wavelet transform based image texture analysis for size estimation applied to the sorting of tea granules. *Journal of Food Engineering* 79: 629-639.
7. Braga, R. A., C. M. B. Nobre, A. G. Costa, T. Sáfyadi, and F. M. Da Costa. 2011. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. *Optics Communications* 284: 646-650.
8. Braga, R. A., L. Dupuy, M. Pasqual, and R. R. Cardoso. 2009. Live biospeckle laser imaging of root tissues. *European Biophysics Journal* 38: 679-686.
9. Briers, J. D. 1975. Wavelength dependence of intensity fluctuations in laser speckle patterns from biological specimens. *Optics Communications* 13: 324-326.
10. Gonzalez, R. C., and R. E. Woods. 2002. *Digital Image Processing*. Second Ed. Prentice Hall, New Jersey.
11. Harker, F. R., E. M. Kupferman, A. B. Marin, F. A. Gunson, and C. M. Triggs. 2008. Eating quality standards for apples based on consumer preferences. *Postharvest Biology and Technology* 50: 70-78.
12. Jamshidi, B., S. Minaei, E. Mohajerani, and H. Ghassemian. 2014. Prediction of soluble solids in oranges using visible/near-infrared spectroscopy: Effect of peel. *International Journal of Food Properties* 17: 1460-1468.
13. Lu, R. 2007. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety* 1: 19-27.
14. Lu, R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 31: 147-157.
15. Lu, R., J. Qin, and Y. Peng. 2006. Measurement of the optical properties of apples by hyperspectral imaging for assessing fruit quality. *ASAE Annual International Meeting, USA*.
16. Mendoza, F., R. Lu, D. Ariana, H. Cen, and B. Bailey. 2011. Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology* 62: 149-160.
17. Mollazade, K. 2013. Non-destructive evaluation of some greenhouse products during sorting process using laser-light backscattering imaging and ANFIS. Ph.D. Thesis. University of Tehran. (In Farsi).

18. Nobre, C. M. B., R. A. Braga Jr, A. G. Costa, R. R. Cardoso, W. S. da Silva, and T. Sáfyadi. 2009. Biospeckle laser spectral analysis under inertia moment, entropy and cross-spectrum methods. *Optics Communications* 282: 2236-2242.
19. Pajuelo, M., G. Baldwin, H. Rabal, N. Cap, R. Arizaga, and M. Trivi. 2003. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. *Optics and Lasers in Engineering* 40: 13-24.
20. Peng, Y., and R. Lu. 2005. Modeling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness. *Transactions of the ASAE* 48 (1): 235-242.
21. Peng, Y., and R. Lu. 2006. Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. *Postharvest Biology and Technology* 41: 266-274.
22. Peng, Y. and R. Lu. 2007. Prediction of apple fruit firmness and soluble solids content using characteristics of multispectral scattering images. *Journal of Food Engineering* 82: 142-152.
23. Qing, Z., B. Ji, and M. Zude. 2007. Wavelength selection for predicting physicochemical properties of apple fruit based on near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Quality* 30: 511-526.
24. Qing, Z., B. Ji, and M. Zude. 2008. Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology* 48: 215-222.
25. Rabelo, G. F., R. A. Braga Júnior, and I. Fabbro. 2005. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9: 570-575.
26. Romano, G., M. Nagle, D. Argyropoulos, and J. Müller. 2011. Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying. *Journal of Food Engineering* 104: 657-662.
27. Song, J., W. Deng, R. M. Beaudry, and P. R. Armstrong. 1997. Changes in chlorophyll fluorescence of apple fruit during maturation, ripening, and senescence. *HortScience* 32: 891-896.
28. Szymanska-Chargot, M., A. Adamiak, and A. Zdunek. 2012. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. *Scientia Horticulture* 145: 23-28.
29. Valero, C. 2001. Aplicación de la espectroscopía láser de reflectancia difusa (ERDT) a la medida de calidad interna de frutas y hortalizas. Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid.
30. Wang, S., M. Huang. and Q. Zhu. 2012. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image. *Computers and Electronics in Agriculture* 80: 1-7.
31. Zdunek, A., and J. Cybulska. 2011. Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples. *Sensors* 11: 6317-6327.
32. Zdunek, A., and W. B. Herppich. 2012. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. *Postharvest Biology and Technology* 64: 58-63.
33. Zdunek, A., A. Adamiak, P. M. Pieczywek, and A. Kurenda. 2014. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. *Optics and Lasers in Engineering* 52: 276-285.
34. Zdunek, A., L. Muravsky, L. Frankevych, and K. Konstankiewicz. 2007. New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *International Agrophysics* 21: 305-310.

Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns

B. Jamshidi^{1*} - A. Arefi² - S. Minaei³

Received: 28-08-2015

Accepted: 14-11-2015

Introduction

In recent years, the determination of firmness as an important quality attribute of apple fruits has been widely noticed. Common methods for firmness measurement are destructive and cannot be applied in sorting lines. Therefore, development of a non-destructive, simple, fast, and the low-cost determination technique of firmness is imperative. Dynamic speckle patterns (DSP) or bio speckle imaging as a new optical technique has been recently noticed for non-destructive quality assessment of food and agricultural products. In this research, the feasibility of using this technique was investigated for non-destructive prediction of firmness in intact apples during five months of cold storage.

Materials and Methods

During the harvest season, in 2013, a total of 540 'Red Delicious' apples were obtained from a local orchard in Oshnaviyeh, Iran. The apples with similar color and shape were collected from several trees in the same place. The samples were stored under cold conditions for five months. Five experiments were carried out; the first experiment was done immediately after harvesting and other tests were performed during storage time, i.e. 30, 60, 120, and 150 days after harvesting date. In each experiment, the samples were illuminated by two laser diodes at the wavelengths of 680 nm and 780 nm, separately. DSP images of each fruit were acquired using a CCD camera. Then, time history of the speckle pattern (THSP) was created for each sample. After taking images, reference measurements were carried out for each sample to determine its firmness. Quantification of DSP activity was done using the statistical features of inertia moment (IM) and the absolute value of differences (AVD) extracted from the THSP images. Moreover, features of the images were extracted based on texture and wavelet transform. Finally, artificial neural network (ANN) models were developed for prediction of apple firmness based on image's information obtained from the wavelengths of 680 nm and 780 nm, and the reference measurements. The 60, 15, and 25 percent of total samples were randomly used for calibration, cross-validation, and test validation sets, respectively. The correlation coefficient between measured and predicted values of the firmness and also the standard error of prediction (SEP) were calculated to compare the performance of the different ANN models.

Results and Discussion

After one month of the storage, apples lost about 15 percent of their initial firmness. The softening process continued and the firmness index dropped to 48.05 N (a total decrease of 42%). A significant difference was observed among the mean values of the firmness belong to the different storage times. In first and second months of the storage, a negative linear relationship was observed between DSP activity and the firmness. The lowest value of IM was observed for apples belonged to the harvesting date. DSP activity suddenly increased after 30 days of the storage. This ascending trend continued and reached to its maximum value on the 60th days of the storage. It was noted that DSP activity is significantly affected by the chlorophyll absorption during this period. Moreover, DSP activity at the wavelength of 680 nm was more than that at 780 nm. After two months of the storage, a significant decrease in DSP activity was observed for both wavelengths of 680 nm and 780 nm. The main reason for this phenomenon came back to changes in carbohydrates. During this ripening period, starch,

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2- Ph.D. Graduated Student, Mechanics of Biosystems Department, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Mechanics of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: b.jamshidi@areeo.ac.ir)

which plays a main role in backscattering phenomenon is converted into simpler carbohydrates and it causes an increase in soluble solid contents and a decrease in the number of scattering centers. After developing the ANN models, the correlation coefficient of the prediction (r_p) for different topologies was ranged from 0.74-0.81 and 0.81-0.83 for the wavelengths of 680 nm and 780 nm, respectively. Moreover, standard error of prediction (SEP) was between 8.4-9 N and 8.1-8.7 N for the wavelengths of 680 nm and 780 nm, respectively. The achieved results may be more attractive when they are compared with obtained results using multispectral/hyperspectral scattering imaging, as expensive and rather complicate techniques for non-destructive firmness assessment in apple fruits.

Conclusions

It was concluded that dynamic speckle patterns (DSP) or bio speckle imaging could be a simple, low-cost and appropriate technique for non-destructive prediction of firmness in intact apples during storage.

Keywords: Bio speckle imaging, Dynamic speckle patterns, Laser, Non-destructive, Wavelet

بررسی اثر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر زمان فرآیند، انرژی مصرفی و کیفیت محصول در تولید رب گوجه‌فرنگی به روش گرمایش اهمی

مهدی ترکیان بلداجی^۱ - علی محمد برقی^{۲*} - بابک بهشتی^۳ - سید ابراهیم حسینی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

چکیده

گرمایش اهمی یک روش جدید در فرآوری مواد غذایی است که در آن از جریان الکتریکی برای ایجاد گرما استفاده می‌شود. گرادیان ولتاژ اعمال شده و نوع الکتروود نقش به‌سزایی در این سامانه دارد. در این تحقیق اثر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود در گرمایش اهمی رب گوجه‌فرنگی بر زمان گرمایش، میزان مصرف انرژی و کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفته است. گرادیان‌های ولتاژی $5, 7, 9$ و 11 و چهار نوع الکتروود گرافیت، فولاد ضد زنگ، برنج و آلومینیوم به کار برده شد. نتایج نشان داد که بین میزان مصرف انرژی، زمان گرمایش و کیفیت محصول با گرادیان ولتاژ رابطه معنی‌داری در سطح احتمال 1% و با نوع الکتروود در سطح احتمال 5% وجود دارد. همچنین اثر متقابل این دو تیمار بر روی سه فاکتور زمان، انرژی مصرفی و کیفیت محصول معنی‌دار بود. کمترین مدت زمان و کمترین مصرف انرژی با الکتروود گرافیتی و در گرادیان ولتاژ 11 V cm^{-1} و بیشترین مدت زمان و بیشترین مصرف انرژی در الکتروود آلومینیومی و در گرادیان ولتاژ 5 V cm^{-1} مشاهده گردید. اما بهترین کیفیت محصول با الکتروود فولادی ضد زنگ و در گرادیان ولتاژ 11 V cm^{-1} به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آلومینیوم، جریان الکتریکی، سلول اهمی، فولاد ضد زنگ، عملکرد، گرافیت

مقدمه

کشاورزی از فرآیندهای مهم در صنعت فرآوری مواد غذایی هستند که با کاهش فعالیت آبی، موجب پایداری ماده غذایی می‌گردند. (Ghanbarzadeh, 2004)

بر اساس آمارهای سازمان فائو^۷، تولید سالیانه گوجه‌فرنگی در جهان $141/400$ میلیون تن بوده و ایران با تولید سالیانه $5/88$ میلیون تن، رتبه هفتم جهانی تولید این محصول را به خود اختصاص داده است (Fao, 2013). بخش عمده گوجه فرنگی جهان در راستای تولید رب گوجه فرنگی فرآوری و مصرف می‌شود (Valencia et al., 2003). مهمترین روش تولید رب گوجه‌فرنگی در ایران استفاده از دیگ‌های بخار و روش گرمایش هدایتی است که مهم‌ترین عیب این نوع سامانه علاوه بر مصرف انرژی بالا، عدم توزیع یکنواخت گرما در هنگام پخت و پز می‌باشد. این عدم یکنواختی باعث می‌شود که محصول با کیفیت پایین‌تر تولید گردد. همچنین در روش‌های حرارت‌دهی مرسوم (هدایت حرارتی) به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی، دما به صورت یکنواخت در داخل محصول منتشر نشده، لذا زمان فرآوری افزایش می‌یابد و به تبع آن انرژی مصرفی افزایش و کیفیت محصول کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نکات ذکر

جمعیت جهان رو به افزایش است و این جمعیت نیاز به غذا دارد و می‌بایست محصولات کشاورزی که معمولاً در فصل کشت (بهار و تابستان) تولید می‌شوند را فرآوری کرد تا بتوان از آن‌ها در فصل‌های دیگر استفاده نمود. علاوه بر این معمولاً محصولات کشاورزی به دلیل واکنش‌های شیمیایی همواره در معرض فساد هستند و امکان نگهداری آن‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط مناسب و فرآوری امکان‌پذیر نیست. تغلیظ^۵، خشک کردن و آبگیری^۶ از محصولات

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- ۲- استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- *- نویسنده مسئول: (Email: borghae@ut.ac.ir)
- ۳- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- ۴- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

DOI: 10.22067/jam.v7i1.47150

- 5- Concentrate
- 6- Dehydration

گوشه گاو در محدوده دمایی °C ۲۵ تا ۱۲۵ مورد مطالعه قرار گرفت و بیان گردید که با افزایش دما و گرادیان ولتاژ، ضریب هدایت الکتریکی به طور خطی برای این محصولات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش گرادیان ولتاژ مدت زمان فرآوری کاهش می‌یابد (Zhu et al., 2010).

در تحقیقی دیگر به بررسی هدایت الکتریکی ترکیب توت‌فرنگی-سیب در محدوده دمایی °C ۲۵ تا ۱۰۰ و گرادیان ولتاژهای ۲۵، ۴۰، ۵۵ و 70 V cm^{-1} طی فرآیند گرمایش اهمی پرداخته شد. نتایج حاکی از این بود که با افزایش دما هدایت الکتریکی ترکیب توت‌فرنگی-سیب به صورت خطی افزایش پیدا خواهد کرد (Castro et al., 2002). در مطالعه گرمایش اهمی شیر، بیان گردید که به کارگیری الکتروود فولادی در مقایسه با الکتروود تیتانیوم باعث کاهش قابل توجهی در انرژی مصرفی و مدت زمان گرمایش خواهد شد. همچنین الکتروود فولادی با روکش تیتانیومی دارای خوردگی کمتری نسبت به الکتروودهای فولادی و تیتانیومی می‌باشد (Stancel and Zitny., 2010).

طراحی مؤثر سیستم گرمایش اهمی به ضریب هدایت الکتریکی ماده غذایی وابستگی زیادی دارد و میزان مصرف انرژی به شدت تحت تأثیر گرادیان ولتاژ و ضریب هدایت حرارتی ماده غذا می‌باشد و نوع الکتروود می‌تواند علاوه بر تأثیرگذاری بر روی عملکرد سامانه در کیفیت نهایی محصول تولید شده نیز مؤثر باشد (Sanjay et al., 2008). علاوه بر این نوع الکتروود اثر زیادی بر راندمان حرارتی، انرژی مصرفی و مدت زمان فرآیند گرمایش اهمی دارد (Zell et al., 2009).

هدایت الکتریکی یک ماده غذایی، عکس مقاومت ماده در مقابل عبور جریان الکتریکی از داخل دیواره مولکولی آن می‌باشد. هدایت الکتریکی در مواد غذایی به غلظت و میزان نمک موجود در ماده وابسته است (Icier et al., 2009). در این تحقیق تکنولوژی جدید گرمایش اهمی که در برخی کشورها برای فرآوری مواد غذایی استفاده شده، به منظور کاهش مصرف انرژی و همچنین افزایش کیفیت محصول نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا با طراحی و ارزیابی این سامانه، امکان بهروری از انرژی را افزایش داده و همچنین امکان طراحی سامانه‌های کنترلی دقیق، آسان‌تر و امکان پذیرتر شود. اهداف این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- بررسی تأثیر گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر انرژی مصرفی، زمان فرآیند و کیفیت محصول
- ۲- تعیین بهترین گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود برای تولید رب گوجه‌فرنگی

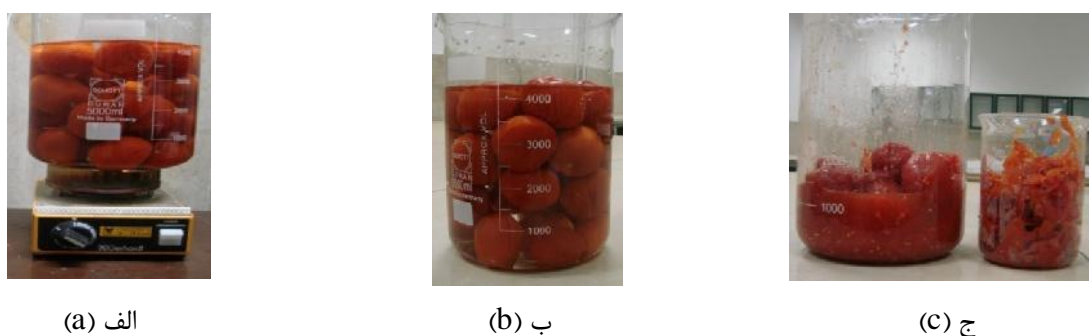
شده، ارائه راه کارهای جدید جهت کاهش مصرفی انرژی همراه با کیفیت بالای محصول امری ضروری است (Chang et al., 2006). گرمایش اهمی یک فرآیند حرارتی است که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی، منجر به تولید گرما می‌گردد. این سامانه گرمایشی از لحاظ تولید گرما و انتقال حرارت و همچنین از لحاظ توزیع دما که در طول گرمایش اتفاق می‌افتد، با روش‌های مرسوم گرمایش متفاوت است (Castro et al., 2004). مطالعات نشان می‌دهند که این روش دارای یکنواختی حرارتی بسیار بالا، دوست‌دار محیط زیست، راندمان بالا و کنترل آسان نسبت به دیگر روش‌های حرارتی رایج است (Shirsat et al., 2004). مقدار گرمای تولید شده در گرمایش اهمی به طور مستقیم به میزان مقاومت الکتریکی ماده و گرادیان ولتاژ اعمالی بستگی دارد (Bozkurt and Icier., 2009b). استفاده از فرآیند گرمایش اهمی سهم عمده‌ای در کاهش میزان مصرف انرژی داشته و از مناسب‌ترین روش‌های حرارتی جهت به کارگیری در صنعت مواد غذایی، شیمیایی، دارویی و خانگی می‌باشد (Lei et al., 2007).

در سال ۲۰۰۴ پوست‌کنی گوجه‌فرنگی برای تولید رب گوجه و سایر محصولات به روش‌های اسیدی، گرمایشی و همیک، با هم مقایسه گردید و بیان شد که روش اهمی دارای عملکرد بهتری می‌باشد (Pisit wongsa-Ngarsa, 2004).

تحقیقی در خصوص وابستگی بین ضریب هدایت الکتریکی و دما به روش گرمایش اهمی در سال ۲۰۰۵ انجام شد. در این تحقیق خشک کردن پوره زردآلو و هلو به روش گرمایش اهمی در گرادیان‌های ولتاژ بین ۲۰ تا 70 V cm^{-1} انجام شد و مشخص گردید که بین ضریب هدایت الکتریکی پوره‌ها و دما یک رابطه خطی برقرار است. همچنین گزارش گردید که عمل جوشش پوره‌ها در بالاترین گرادیان در دمای °C ۶۰ رخ می‌دهد و ضریب هدایت الکتریکی با زیاد شدن دما افزایش می‌یابد. هر چند سرعت تغییرات دما در پوره زردآلو بیشتر از پوره هلو بود. علاوه بر این نشان داده شد که حباب‌های جوشش مایع در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و در گرادیان‌های بالا اتفاق می‌افتد و ضریب هدایت الکتریکی در گرمایش اهمی پارامتر مهمی در طراحی سلول گرمایش است (Icier and Ilicali., 2005a).

در سال ۲۰۰۸ در تحقیقی دیگر به بررسی تأثیر گرمایش اهمی بر فرآوری میوه‌ها پرداخته شد. در این مطالعه تأثیر تغییرات دما بر هدایت الکتریکی شش میوه تازه هلو، سیب‌گلدن، سیب قرمز، توت‌فرنگی و آناناس مورد ارزیابی قرار گرفت. از میوه‌های انتخابی نمونه‌های استوانه‌ای شکل جدا و بین دو الکتروود قرار داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌داد که دما و هدایت الکتریکی با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش می‌یابند (Sanjay et al., 2008).

همچنین شبیه‌سازی گرمایش اهمی هویج، سیب زمینی، اسفناج و



شکل ۱- عمل پوست‌کنی گوجه‌فرنگی به روش حمام گرمایش و سرمایش (الف: گرم کردن ب: حمام آب سرد ج: گوجه پوست‌کنده شده)
Fig.1. Peeling of tomato paste by hot-cool method (a: Heating b: Cooling c: Peeled tomato)

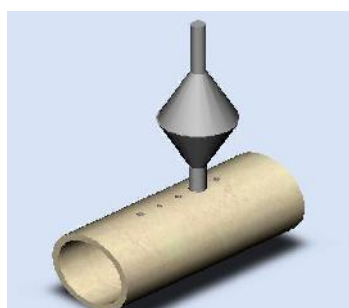
مواد و روش‌ها

انتخاب واریته گوجه‌فرنگی: به‌منظور تولید رب از گوجه‌فرنگی، واریته کال جی ان ۱۳ که جزء بهترین واریته‌های مناسب برای تهیه رب می‌باشد، استفاده گردید. این واریته از گلخانه‌های اطراف شهرستان ورامین تهیه گردید.

آماده‌سازی پوره: ابتدا عمل پوست‌کنی گوجه‌فرنگی به روش تیمار گرمایش و سرمایش (مطابق شکل ۱ ابتدا گوجه‌فرنگی‌ها در آب داغ قرار داده می‌شوند، سپس بلافاصله گوجه‌فرنگی‌ها از حمام داغ به حمام آب سرد انتقال می‌یابند. بر اثر این تنش حرارتی پوست گوجه‌فرنگی ترک برداشته و به راحتی از میوه جدا می‌گردد) انجام شد. سپس به‌منظور تهیه مخلوط همگن از یک همزن مکانیکی (made in Germany IKA Eurostar power control-visc 6000) استفاده شد و با دور ۵۰۰ rpm پالپ گوجه‌فرنگی به هم زده شد تا یک محلول یکنواخت به نام پوره به دست آید. به منظور جداسازی دانه، پوره از صافی با مش ۱ mm عبور داده شد. در مرحله بعد به پوره تولید شده نمک خوراکی (کلرید سدیم) به میزان یک درصد وزنی اضافه شد. این میزان نمک با توجه به میزان استاندارد در صنعت رب گوجه‌فرنگی انتخاب گردید (Hosainpour *et al.*, 2013).

ساخت سیستم گرمایش اهمی

بدنه سلول گرمایش اهمی از جنس تفلون و به شکل یک استوانه توخالی ساخته شد. قطر داخلی استوانه ۵۰ mm و طول آن ۱۰۰ mm در نظر گرفته شد. بر روی بدنه دو سوراخ به قطر ۱۰ mm و سه سوراخ به قطر ۴ mm ایجاد گردید. سوراخ‌های ۴ میلی‌متری جهت قرارگیری ترموکوپل تعبیه شدند. یکی از سوراخ‌های ۱۰ میلی‌متری برای نصب برجک بخار و دیگری به منظور وارد کردن ماده غذایی به داخل سلول مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲- طرح‌واره‌ی بدنه سلول گرمایش اهمی

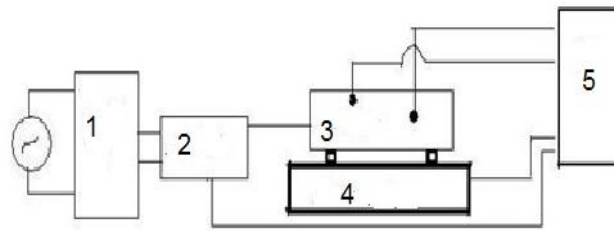
Fig. 2. A schematic of ohmic heating cell used in this study

الکترودهای به کار رفته در این سامانه از جنس‌های استیل زنگ نزن، آلومینیوم، برنج و گرافیت و مطابق شکل ۳ به صورت استوانه استوانه با قطر ۵۰ mm و به ضخامت ۳ mm در نظر گرفته شد.



شکل ۳- نمونه شکل الکتروود استفاده شده در این تحقیق

Fig. 3. A shape of electrode used in this study



شکل ۴- طرح‌واره سامانه گرمایش اهمی: ۱- رگلاتور ولتاژ ۲- پاور آنالیزور ۳- سلول اهمی ۴- ترازوی دیجیتالی ۵- کامپیوتر

Fig. 4. A schematic of ohmic heating: 1- Voltage regulator 2- Power analyzer 3- Ohmic cell 4- Digital balance 5- pc

۱۰۰ میلی‌متری بین دو الکتروود گرادیان ولتاژهای اعمالی ۵، ۷، ۹ و 11 V cm^{-1} به‌دست‌آمد.

$$W = \frac{V}{d} \quad (1)$$

∇V : گرادیان ولتاژ (V m^{-1} یا V cm^{-1})، V : ولتاژ (V) و d : فاصله بین دو الکتروود برحسب m یا cm.

برای تولید رب می‌بایست رطوبت پوره که ۹۱٪ (wt) به‌دست آمده را به میزان ۷۰٪ بر پایه تر رساند تا ربی با کیفیت تولید شود (Hosainpour et al., 2013). بعد از اعمال ولتاژ دمای سلول رو به افزایش می‌گذارد و سریعاً به ۹۳-۹۱ درجه سلسیوس می‌رسد و پوره شروع به جوشش کرده و رطوبت خود را از دست می‌دهد. تولید رب به روش اهمی در ولتاژهای مختلف و با الکتروودهای مختلف در سه تکرار انجام شد و داده‌های: زمان، دمای پوره، ولتاژ، شدت جریان، وات مصرفی، شاخص رنگی a/b و E و وزن نمونه‌ها ثبت گردید.

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

مطابق رابطه (۲) هدایت الکتریکی مواد غذایی از روابط بین ولتاژ و جریان به‌دست می‌آید که معکوس مقاومت ویژه رسانا است (Icier et al., 2009).

$$\sigma = \frac{LI}{VA} \quad (2)$$

: هدایت الکتریکی (S m^{-1})؛ V : ولتاژ بر حسب ولت (V)؛ I : شدت جریان بر حسب آمپر (A)؛ L : فاصله بین الکتروود برحسب متر (m)؛ A : مساحت مقطع مؤثر الکتروود برحسب متر مربع (m^2). ولتاژهای ورودی و آمپر در حین انجام آزمایشات اهمی توسط پاور آنالیزور ثبت شده و سطح مؤثر نیز براساس تغییرات جرم نسبت به زمان و چگالی پوره محاسبه شد.

حجم مؤثر سلول $196/25\text{ cm}^3$ بود. برای اندازه‌گیری دما در داخل سلول گرمایش اهمی از ترمومتر مدل Dual input RTD 804U (ساخت کشور تایلند) استفاده شد. همچنین به‌منظور تبدیل ولتاژ ۲۲۰ ولت (ولتاژ رایج در شبکه برقی ایران) به ولتاژهای مورد نیاز از دستگاه رگولاتور ولتاژ (واریاک) ساخت شرکت امرسان ایران استفاده گردید. برای ثبت داده‌هایی مانند شدت جریان، ولتاژ، توان مصرفی و اختلاف فاز از دستگاه پاور آنالیزور^۱ طراحی شده توسط محقق استفاده شد و همچنین برای ثبت داده در رایانه، نرم افزار لب ویو^۲ و کارت دک^۳ (USB DAQ V3.0) ساخت شرکت کنترل دیجیتال نوین ایران) به کار گرفته شد. از یک ترازوی دیجیتالی مدل GF-6000 با دقت ۰/۰۱ گرم برای ثبت تغییرات وزن در حین انجام پروسه گرمایشی استفاده شد. طرح‌واره سامانه گرمایش اهمی به کار برده شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

اندازه‌گیری رطوبت پوره گوجه‌فرنگی

به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از روش آون استفاده شد. بدین منظور ابتدا نمونه وزن گردید. سپس در داخل آون در دمای 110°C قرار داده شد تا به وزن ثابت برسد (Darvishi et al., 2012; Hosainpour et al., 2013). سپس مجدداً نمونه خشک شده وزن گردید و رطوبت نمونه محاسبه شد. دستگاه آون مورد استفاده مدل Memmert, Beshickung-Loading Model 100-800 ساخت کشور آلمان بود.

تولید رب به کمک سامانه گرمایش اهمی

ابتدا سامانه گرمایش اهمی به‌صورت شکل ۵ آماده گردید. حجم داخلی سلول به‌میزان ۱۰۰ سی‌سی از پوره پر شده و ولتاژهای ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ ولت به سلول اعمال شد. با توجه به رابطه (۱) و فاصله

1- Power Analyzer
2- Labview 2011
3- Data Acquisition



شکل ۵- مجموعه سامانه گرمایش اهمی

Fig.5. Ohmic heating setup

محاسبات انرژی

توان الکتریکی مصرف شده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود و یکای آن $J s^{-1}$ معادل یک وات (W) می‌باشد.

$$P = RI^2 = \frac{V^2}{R} = VI \quad (3)$$

V: ولتاژ بر حسب ولت (V)، I: شدت جریان بر حسب آمپر (A)
P: توان الکتریکی (W)

مقدار انرژی مصرفی (E) از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$E = Pt = RI^2t = \frac{V^2}{R}t = Vit \quad (4)$$

همچنین انرژی داده شده به سیستم طبق رابطه ارائه شده توسط آیسیر و همکاران در سال ۲۰۰۵ براساس رابطه (۵) و (۶) محاسبه می‌شود (Icier and Ilicali, 2005):

$$E_{given} = E_{taken} + E_{loss} \quad (5)$$

$$\sum(Vit) = mc_p(T_f - T_i) + E_{loss} \quad (6)$$

در رابطه (۵)، E_{given} : انرژی داده شده به سیستم، E_{taken} : انرژی جذب شده توسط سیستم، E_{loss} : انرژی اتلافی یا از دست رفته در سیستم، t: زمان (s)، m: جرم آب موجود (kg)، c_p : ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($J kg^{-1} K^{-1}$)، T_f : دمای نهایی نمونه ($^{\circ}C$) و بالآخره T_i : دمای اولیه نمونه ($^{\circ}C$).

انرژی اتلافی سیستم شامل مجموع انرژی لازم برای افزایش دمای سلول، انرژی اتلافی به محیط از طریق جابه‌جایی و انرژی الکتریکی که در داخل الکتروود به حرارت تبدیل می‌شود و از دست می‌رود، می‌باشد (Icier and Ilicali, 2005).

اندازه‌گیری کیفیت محصول

پارامتر رنگ یکی از ویژگی‌های مهم در تولید رب گوجه‌فرنگی می‌باشد. به طوری که این محصول براساس رنگ آن ارزیابی و تجارت می‌گردد (Mazaheri Tehrani et al., 2009; Dolores Rodrigo et al., 2007). برای به دست آوردن رنگ محصول و همچنین مقایسه محصول به دست آمده از تیمارهای مختلف با یکدیگر، از فضای رنگی

$L^*a^*b^*$ استفاده گردید. برای به دست آوردن پارامترهای L^* (روشنایی)، a^* (میزان قرمزی-سبزی) و b^* (میزان زردی-آبی) از رنگ‌سنج مدل (Lutron 1200lab) ساخت کشور تایوان استفاده شد. دو شاخصه مهم برای ارزیابی کیفیت رب گوجه‌فرنگی عبارتند از a^* و E . برای محاسبه E می‌توان از رابطه (۷) استفاده کرد (Dolores Rodrigo et al., 2007).

$$\Delta E = \sqrt{(a - a_0)^2 + (b - b_0)^2 + (L - L_0)^2} \quad (7)$$

که در آن L_0 و b_0 ، a_0 پارامترهای رنگی محصول اولیه و a ، b و L پارامترهای رنگی محصول تولید شده می‌باشد.

قابل ذکر است که خشک کردن پوره گوجه‌فرنگی در آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در ۴ گرادیان ولتاژ و ۴ الکتروود مختلف در سه تکرار صورت گرفت و پارامترهایی نظیر مدت زمان فرآیند، انرژی مصرفی و شاخص رنگی اندازه‌گیری شد. برای تعیین معنی‌دار بودن اختلاف‌ها و مقایسه میانگین‌ها از روش آزمون دانکن استفاده شد و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS 2013 انجام گردید.

نتایج و بحث

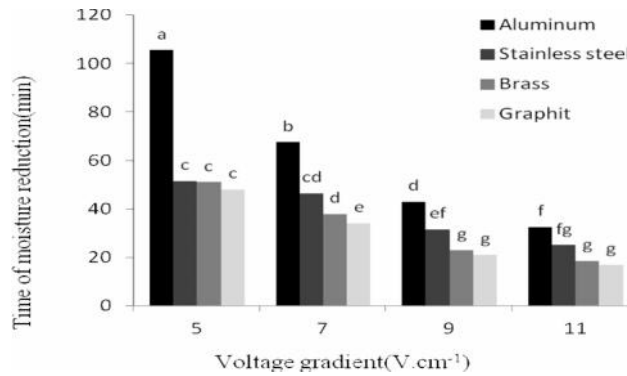
اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی مدت زمان فرآیند

در شکل ۶ مدت زمان کاهش رطوبت برای الکتروودهای مختلف در گرادیان‌های ولتاژی متفاوت در غلظت نمک ۱w/w٪ نشان داده شده است. اثر متقابل دو تیمار الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی مدت زمان کاهش رطوبت در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۱- تیمارهای استفاده شده در این تحقیق و سطوح آنها

Table 1- Examined treatments in this study

تیمار				گرادیان ولتاژ (Voltage gradient) (Vcm ⁻¹)			
نوع الکترود (Electrod type)		نوع الکترود (Electrod type)		11	9	7	5
آلومینیوم	فولاد زنگ نزن	برنج	گرافیت				
Aluminum	Stainless steel	Brass	Graphite				



شکل ۶- اثر متقابل گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر مدت زمان کاهش رطوبت
 Fig.6. Interaction of voltage gradients and electrode type on moisture reduction time

ولتاژ (V m⁻¹ یا V cm⁻¹). در گرادیان ۵ V cm⁻¹ تفاوت معنی داری بین الکترودهای گرافیتی، برنجی و فولادی دیده نشد. در واقع به دلیل ولتاژ اعمالی کم و همچنین نزدیکی هدایت الکتریکی الکترودها تفاوت اساسی وجود ندارد، اما الکترود آلومینیوم به دلیل جرم گرفتی دارای مدت زمان فرآوری بیشتری بود. علاوه بر این الکترود گرافیتی در گرادیان ولتاژ ۵ V cm⁻¹ عملکردی مشابه الکترود فولادی در گرادیان ولتاژ ۷ V cm⁻¹ دارد. این می تواند به دلیل اختلاف هدایت الکتریکی دو الکترود باشد. از آنجایی که گرافیت هدایت الکتریکی بهتری نسبت به فولاد دارد، لذا می تواند انتقال جریان الکتریکی را بهتر انجام دهد. برای جبران این پدیده در الکترود فولادی مجبوریم از گرادیان ولتاژ بالاتری استفاده کنیم. این پدیده در گرادیان ولتاژی دیگر نیز مشاهده شده است. به عنوان مثال الکترود برنجی در گرادیان ولتاژ ۹ V cm⁻¹ عملکردی مشابه به الکترود فولادی در گرادیان ولتاژ ۱۱ V cm⁻¹ دارد. با افزایش گرادیان ولتاژ عملکرد الکترودها بیشتر به هم نزدیک می شود. این پدیده را می توان در شدت تشکیل رسوب حاصل از گرمایش اهمی روی الکترودها و همچنین افزایش خوردگی در سطح الکترودها که منجر به کاهش هدایت الکتریکی آنها می شود، جستجو کرد. با اینکه الکترود استیل ضد زنگ هدایت کمتری نسبت به گرافیت دارد، ولی به دلیل افزایش خوردگی سطحی الکترود گرافیتی هدایت الکتریکی آن کاهش یافته، لذا در گرادیان ولتاژی بالا اختلاف

در همه گرادیان های ولتاژی، الکترود گرافیتی کمترین مدت زمان فرآیند را دارا می باشد و بعد از آن به ترتیب الکترود برنجی و فولاد زنگ نزن قرار می گیرند و در انتها الکترود آلومینیومی قرار دارد. کمترین مدت زمان در گرادیان ولتاژ ۱۱ V cm⁻¹ با الکترود گرافیتی به مدت ۱۷ دقیقه و بیشترین مدت زمان در الکترود آلومینیومی و در گرادیان ولتاژ ۵ V cm⁻¹ به میزان ۱۰۵/۶ دقیقه مشاهده گردید. یکی از مشکلات استفاده از سامانه گرمایش اهمی در پاستوریزاسیون شیر رسوب مواد جامد بر روی الکترودهاست که این امر موجب بروز مشکلاتی از جمله سوختگی مواد غذایی در اطراف الکترود و کاهش رسانایی الکترود می گردد که در نتیجه آن مدت زمان فرآیند نیز افزایش می یابد (Bansal et al., 2005). در اینجا نیز به دلیل رسوب مواد غذایی بر روی الکترود آلومینیومی رسانش آن کم شده در نتیجه مدت زمان فرآوری با الکترود آلومینیوم افزایش یافته است.

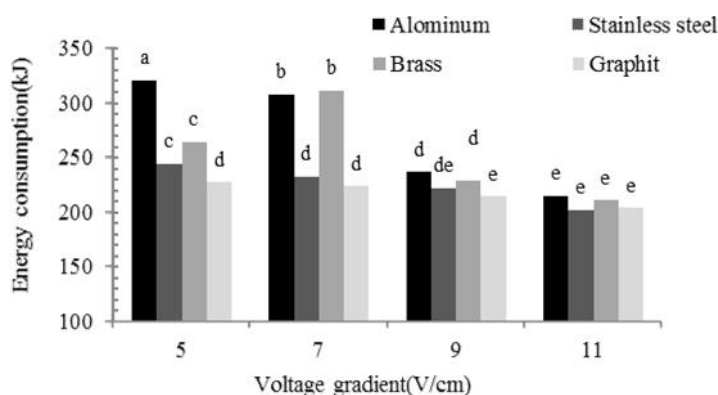
از طرف دیگر با توجه به رابطه (۸) با افزایش ولتاژ اعمال شده به ماده غذایی مقدار انرژی تبدیل شده به گرما افزایش یافته و با افزایش گرمای تولیدی، شدت تخییر افزایش و به تبع آن مدت زمان انجام فرآیند کاهش می یابد (Assiry et al., 2010).

$$u = \dagger \times \nabla V^2 \quad (8)$$

: نرخ تولید گرما، σ: هدایت الکتریکی (s m⁻¹)، ∇V: گرادیان

اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی انرژی مصرفی

اثر متقابل دو تیمار الکتروود و گرادیان ولتاژ بر انرژی مصرفی در سطح ۵٪ معنی‌دار است. در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که در تمامی الکتروودها با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی کاهش پیدا می‌کند. بیشترین میزان انرژی مصرفی مربوط به الکتروود آلومینیوم در گرادیان ولتاژی 5 V cm^{-1} اتفاق افتاد که برابر با 321 kJ به‌دست آمد. و کمترین انرژی مصرفی در الکتروود گرافیتی و با گرادیان ولتاژی 11 V cm^{-1} روی داد که مقدار آن $203/85/12 \text{ kJ}$ محاسبه گردید (شکل ۸).



شکل ۸- اثر گرادیان ولتاژ در الکتروودهای مختلف بر انرژی مصرفی

Fig.8. Interaction of voltage gradients and electrode type on energy consumption

مصرفی سامانه از $7/5 \text{ kJ}$ به $4/9 \text{ kJ}$ کاهش می‌یابد (Darvishi *et al.*, 2012). اسیسیر و همکاران در فرآوری پوره هلو و زردآلو به روش گرمایش اهمی بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Icier *et al.*, 2005). اسیسیری و همکاران در اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب دریا به روش گرمایش اهمی بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Assiry *et al.*, 2010). زل و همکاران در فرآوری گوشت قرمز به نتایج مشابهی دست یافتند (Zell *et al.*, 2010). در پژوهشی دیگر بیان شد که با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی میوه‌جات بهبود پیدا می‌کند و در نتیجه آن انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. ولی در مورد گوشت با افزایش درصد چربی گوشت میزان هدایت الکتریکی کاهش و در نتیجه انرژی مصرفی افزایش می‌یابد (Sanjay sarang *et al.*, 2008).

اسیسیری و همکاران بیان کردند که استفاده از الکتروودهای تیتانیوم به دلیل واکنش کمتر طی فرآیند شیمیایی باعث افزایش کیفیت محصول و کاهش انرژی مصرفی می‌گردد (Assiry *et al.*, 2010).

معنی‌داری بین دو الکتروود مشاهده نمی‌شود. اسیسیر و همکاران اثر گرادیان‌های ولتاژی مختلف را در فرآوری پوره میوه‌جات مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ مدت زمان فرآوری به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا می‌کند (Icier and Ilicali, 2005).

درویشی و همکاران برای فرآوری آب انار از چهار سطح گرادیان ولتاژی 30 ، 35 ، 45 و 55 V cm^{-1} بهره بردند و بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژی زمان فرآوری کاهش می‌یابد (Darvishi *et al.*, 2012). کاسترو و همکاران گرادیان‌های ولتاژی 25 ، 40 ، 55 و 70 V cm^{-1} را برای فرآوری هویج استفاده نمودند و نتایج مشابهی را گزارش کردند (Castro *et al.*, 2004).

در گرادیان ولتاژ 5 V cm^{-1} الکتروود گرافیتی عملکرد مناسبی دارد و در کل می‌توان بیان داشت که الکتروود گرافیتی به‌طور متوسط عملکرد بهتری در زمینه میزان مصرف انرژی نسبت به بقیه الکتروودها دارد و الکتروود آلومینیومی عملکرد مناسبی ندارد. با افزایش گرادیان ولتاژ عملکرد الکتروودها شبیه به هم می‌شود. زیرا با افزایش گرادیان ولتاژ، شدت توان مصرفی در الکتروودها افزایش می‌یابد و شتاب این افزایش برای الکتروودهای مختلف متفاوت است. به‌همین دلیل به‌عنوان مثال تفاوت معنی‌داری بین مصرف انرژی در الکتروود فولاد در دو گرادیان ولتاژ 7 و 9 V cm^{-1} دیده نمی‌شود. و یا به‌همین دلیل تفاوتی بین دو الکتروود آلومینیومی و گرافیتی در دو گرادیان ولتاژ 9 و 11 V cm^{-1} وجود ندارد. در گرادیان ولتاژ بالاتر الکتروودها عملکرد مشابه دارند که نشان می‌دهد برای انتخاب الکتروود پارامترهای دیگری مانند خوردگی الکتروود و کیفیت محصول تولید شده باید مد نظر قرار بگیرند. درویشی و همکاران گزارش کردند که با افزایش گرادیان ولتاژ انرژی مصرفی سامانه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش گرادیان ولتاژ از 30 به 50 V cm^{-1} انرژی

آنکیت و همکاران اثر فرآیندهای حرارتی و همچنین فرآیندهای فشار بالا بر روی خواص پوره گوجه‌فرنگی و هویج را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند نوع عملیات حرارتی اثر معنی‌داری بر روی خواص رنگی از جمله a ، L و b دارد (Ankit *et al.*, 2009). در تحقیقی دیگر بیان گردید که با افزایش مدت زمانی پاستوریزه کردن رب گوجه‌فرنگی در هریک از دماهای ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد شاخص رنگی E افزایش می‌یابد. به طوری که افزایش مدت زمان ۵ دقیقه گرمایش رب گوجه‌فرنگی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش شاخص رنگی E به میزان ۱/۲ برابر می‌شود (Zanoni *et al.*, 2003).

دولورس رودریگو و همکاران بیان داشتند که هم مدت زمان عملیات حرارتی و هم درجه حرارت فرآیند بر روی شاخص‌های رنگی رب گوجه تولیدی تأثیرگذار است. به طوری که با کاهش مدت زمان فرآیند و همچنین افزایش سرعت رسیدن به دمای نهایی فرآوری، شاخص‌های a و L کاهش می‌یابد (Dolores Rodrigo *et al.*, 2007).

نتیجه‌گیری

برای تولید رب گوجه‌فرنگی بایستی رطوبت ۹۱ درصد پوره به ۷۰ درصد کاهش پیدا کند. مشاهده می‌شود که با افزایش گرادیان ولتاژ از ۵ به $11V\ cm^{-1}$ مدت زمان لازم برای کاهش این میزان رطوبت به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که اثر متقابل این دو تیمار گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود، بر مدت زمان فرآیند معنی‌دار است. کمترین مدت زمان در گرادیان ولتاژی $11V\ cm^{-1}$ با الکتروود گرافیتی به مدت ۱۷ دقیقه و بیشترین مدت زمان با الکتروود آلومینیومی و گرادیان ولتاژ $5V\ cm^{-1}$ به میزان ۱۰۵/۶ دقیقه به دست آمد.

با افزایش گرادیان ولتاژ میزان مصرف انرژی به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. علاوه بر این نوع الکتروود نیز در سطح اثر معنی‌داری بر انرژی مصرفی دارد که این می‌تواند به دلیل خواص الکتریکی الکتروود و برهم‌کنش بین الکتروود و ماده غذایی باشد. اثر متقابل این دو تیمار بر انرژی مصرفی نیز معنی‌دار است. به طوری که بیشترین انرژی مصرفی در الکتروود آلومینیومی در گرادیان ولتاژ $5V\ cm^{-1}$ به میزان $321kJ$ و کمترین انرژی مصرفی در الکتروود گرافیتی با گرادیان ولتاژ $11V\ cm^{-1}$ به میزان $203/85kJ$ مشاهده گردید. دو شاخص رنگی a/b و E به عنوان ارزیابی کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفت. اثر متقابل تیمارهای مورد مطالعه روی این دو شاخص کیفی معنی‌دار است. انتخاب بهترین تیمار براساس کمترین انرژی مصرفی و بهترین کیفیت محصول انجام می‌گیرد. با توجه به این که در تولید محصولات کشاورزی کیفیت شاخص بسیار مهمی

در تحقیقی دیگر، توان مصرفی در سامانه گرمایش اهمی با الکتروودهای مختلف مورد بررسی قرار داده شد. آنها نشان دادند که در سامانه گرمایش اهمی با الکتروود فولاد زنگ نزن توان مصرفی با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد (Alhussien *et al.*, 2006). در تحقیقی دیگر سه نوع الکتروود فولاد زنگ نزن، آلومینیوم و تیتانیوم با روکش پلاتینی مورد بررسی قرار گرفت و بیان گردید علاوه بر نوع الکتروود، ابعاد و ضخامت الکتروود نیز بر انرژی مصرفی تأثیرگذار است و مشخص گردید که الکتروود تیتانیوم با روکش پلاتینی عملکرد بهتری نسبت به سایر الکتروودها دارد (Zell *et al.*, 2011). دی‌آلویز و همکاران نوع الکتروود را یکی از عوامل تأثیرگذار در گرمایش اهمی معرفی کرد و نشان دادند که با افزایش هدایت الکتریکی الکتروود میزان انرژی هدر رفته در سامانه کاهش و به تبع آن انرژی مصرفی کل نیز کاهش می‌یابد (De Alwies *et al.*, 1990).

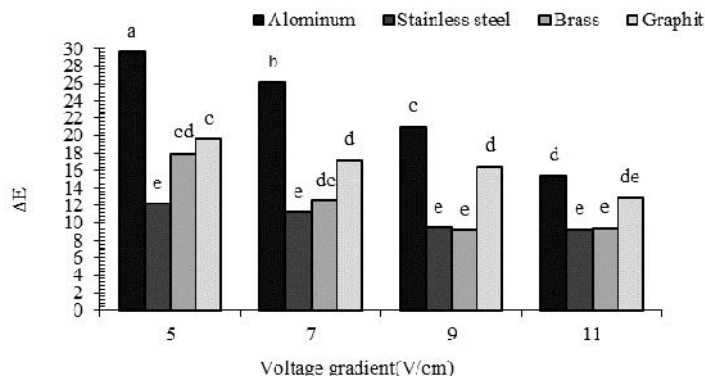
اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی کیفیت رنگ

اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی شاخص E در شکل ۹ نشان داده شده است ($sig < 0.01$). در گرادیان‌های ولتاژی ۵، ۷ و $11V\ cm^{-1}$ الکتروود فولادی بهترین عملکرد را دارد. در حالی که در گرادیان ولتاژ $9V\ cm^{-1}$ الکتروود برنجی کمی بهتر است. خوردگی ایجاد شده در الکتروود گرافیتی و مهاجرت کربن آزاد شده به داخل ماده غذایی باعث گردیده است که تغییرات رنگی به وجود آمده با این الکتروود نسبت به دو الکتروود فولادی و برنجی وضعیت بدتری داشته باشد، هرچند این الکتروود داری مدت زمان فرآیند کمتر می‌باشد. در شکل ۱۰ اثرات متقابل دو تیمار الکتروود و گرادیان ولتاژ بر شاخص رنگی a/b نشان داده شده است ($sig < 0.05$). با افزایش گرادیان ولتاژ مدت زمان فرآیند کاهش می‌یابد و این امر باعث می‌شود که رنگ قرمز محصول درصد بالاتری داشته باشد. با افزایش رنگ قرمز شاخص رنگی a/b بهبود می‌یابد.

در بین چهار نوع الکتروود، فولاد زنگ‌نزن بهترین عملکرد را روی شاخص a/b دارد. مدت زمان کوتاه و همچنین حداقل مهاجرت یون‌های آن به داخل ماده غذایی بر اثر خوردگی کمتر باعث می‌شود که شاخص a افزایش پیدا کرده و در نتیجه شاخص a/b افزایش یابد. ملاحظه می‌شود که فولاد ضدزنگ دارای عملکرد خوبی در گرادیان‌های ولتاژی مختلف می‌باشد. اگر دو شاخص a/b و E را با هم در نظر بگیریم، الکتروود فولاد زنگ نزن در مجموع عملکرد بهتری از لحاظ کیفیت رنگی دارد. بلقیسی و همکاران گزارش دادند که فرآیندهای حرارتی با مدت زمان زیاد باعث از بین رفتن و تغییر رنگ لیکوپین^۱ موجود در رب گوجه‌فرنگی می‌شود و منجر به تیره شده محصول نهایی می‌گردد (Belghysi and Taslimi, 2008).

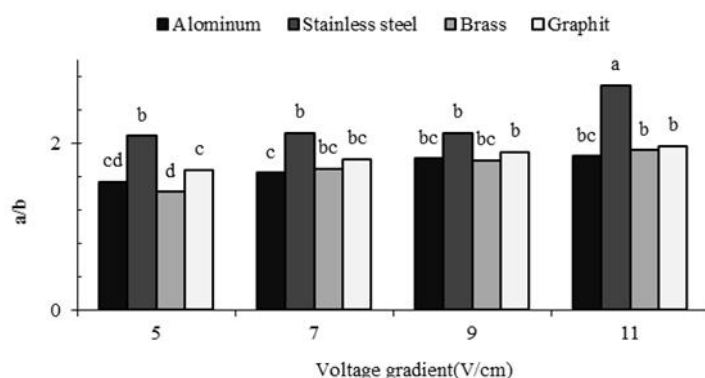
زنگ‌نزن انرژی مصرفی نزدیک به هم دارند. لذا با توجه به عملکرد کیفیتی بهتر الکتروود فولادی با صرف‌نظر از انرژی مصرفی، نسبت به سایر الکتروودها ترجیح داده می‌شود.

است، در صورتی که انرژی مصرفی دو تیمار نزدیک به هم باشد، تیماری که بهترین کیفیت را دارد، ارجحیت دارد. لذا با توجه به این که در گرادیان ولتاژی 11 V cm^{-1} دو نوع الکتروود گرافیتی و فولاد



شکل ۹- اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی شاخص رنگی E

Fig.9. Interaction of electrode type and voltage gradient on ΔE color index



شکل ۱۰- اثر متقابل الکتروود و گرادیان ولتاژ بر روی شاخص a/b

Fig.10. Interaction of electrode type and voltage gradient on a/b index

t: زمان (s)
 m: جرم آب موجود (kg)
 C_p : ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 T_f : دمای نهایی نمونه ($^{\circ}\text{C}$)
 T_i : دمای اولیه نمونه ($^{\circ}\text{C}$)
 G: سرعت گرمایش ($^{\circ}\text{C/s}$)
 ∇V : گرادیان ولتاژ (V cm^{-1})
 : هدایت گرمایی ماده
 DR: نرخ کاهش رطوبت
 M: مقدار رطوبت
 : انرژی گرمایی تولیدشده (J)

نمادها:

V ولتاژ (V)
 d فاصله بین الکتروودها (cm)
 σ : هدایت الکتریکی (S m^{-1})
 V: ولتاژ بر حسب ولت (v)
 I: شدت جریان بر حسب آمپر (A)
 L: فاصله بین الکتروود (m)
 A: مساحت مقطع مؤثر الکتروود (m^2)
 p: توان الکتریکی (w)
 E_{given} : انرژی داده شده به سیستم (J)
 E_{taken} : انرژی جذب شده توسط سیستم (J)
 E_{loss} : انرژی اتلافی یا از دست رفته در سیستم (J)

References

1. AlHusseini, M., K. Assiry, S. K. Sastry, and P. Chaminda Samaranyake. 2006. Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during ohmic heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochemistry* 68: 7-13.
2. Patras, A., N. Brunton, S. D. Pieve, F. Butler, and G. Downey. 2009. Effect of thermal and high pressure processing on antioxidant activity and instrumental colour of tomato and carrot purées. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 10: 16-22.
3. Assiry, A. M., S. K. Sastry, and C. Samaranyake. 2010. Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochem* 68: 7-13.
4. Bansal, B., X. D. Chen, and S. X. Q. Lin. 2005. Skim Milk Fouling During Ohmic Heating. ECI Symposium Series, Volume RP2: Proceedings of 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities, Editors Hans Müller-Steinhagen, M. Reza Malayeri, and A. Paul Watkinson, Engineering Conferences International, KlosterIrsee, Germany, June 5-10.
5. Belghysi, S., and A. Taslimi. 2008. Effects of processing on tomato linchpin. Eighteen national Conference of food science and industrial, Iran, Mashhad.
6. Bozkurt, H., and F. Icier. 2009b. Electrical conductivity changes of minced beef-fat blends during ohmic cooking. *Journal of Food Engineering* 96: 86-92.
7. Castro, I., J. A. Teixeira, S. Salengke, S. K. Sastry, and A. A. Vicente. 2004. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5: 27-36.
8. Castro, I., O. Gonc alves, J. A. Teixeira, and A. A. Vicente. 2002. Comparative study between Selva strawberries and other varieties for industrialization. *Journal of Food Science* (forthcoming).
9. Chang, C. H., H. Y. Lin, C. Y. Chang, and Y. C. Liu. 2006. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *Journal of Food Engineering* 77: 478-485.
10. Darvishi, H., A. Hosainpour, F. Nargesi, M. H. Khoshtaghza, and H. Torang. 2012. Ohmic processing: temperature dependent electrical conductivities of lemon juice. *Modern Applied Science* 5 (1): 210-216.
11. De Alwis, A. A. P., and P. J. Fryer. 1990. A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. *Chemical Engineering Science* 45 (6): 1547-1559.
12. Rodrigo D., A. Van Loey, and M. Hendriks. 2007. Combined thermal and high pressure colour degradation of tomato puree and strawberry juice. *Journal of Food Engineering* 79: 553-560.
13. Ghanbarzadeh, B., and S. Ghanbarzadeh. 2004. Physical properties of food and processing system. Tehran: Arvan. (In Farsi).
14. Pataro, G., M. J. B. Giuseppe, N. P. Ricardo, A. V. António, A. T. José, and G. Ferrari. 2013. Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 15e: 721-730.
15. Hosainpour, A., H. Darvishi, F. Nargesi, and A. Fadavi. 2013. Ohmic pre-drying of tomato paste. *Food Science and Technology International Journal*. SG-FSTJ130080.3d. 1-12
16. Icer, F., and C. Ilicali. 2005. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International* 38: 1135-1142.
17. Icier, F., M. Engin, and H. Bozkurt. 2009. Investigation of Applications of Ohmic Thawing and Ohmic Cooking in Meat Processing. Project Report: TUBITAK TOVAG 107O898, p. 171. (in Turkish).
18. Icier, F., and C. Ilicali. 2005. The use of tylose as a food analog in ohmic heating studies. *Journal of Food Engineering* 69: 67-77.
19. Lei, L., H. Zhi, Z. Xiujin, I. Takasuke, and L. Zaigui. 2007. Effects of different heating methods on the production of protein_lipid film. *Journal of Food Engineering* 82: 292-297.
20. Sanjay Sarang, S., S. K. Sastry, and L. Knipe. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering* 87: 351-356.
21. Mazaheri Tehrani, M., and S. A. Mortazavi. 2005. Optimization of initial conditions heating in order to optimize the production of tomato paste. *Food Science and Technology* 11: 61-74.
22. Pisit Wongsu, N. 2004. Ohmic Heating of Biomaterials: Peeling and Effects of Rotating Electric Field, Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for The Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University.
23. Shirsat, N., J. G. Lyng, N. P. Brunton, and B. McKenna. 2004. Ohmic processing: electrical conductivities of pork cuts. *Meat Science* 67: 507-514.
24. Stancl, J., and R. Zitny. 2010. Direct ohmic Heating and Fouling of Milk. *Journal of Food Engineering* 99 (4): 437-444.

25. Valencia, C., M. C. Sanchez, A. Ciruelos, A. Lattore, J. M. Madiedo, and C. Gallegos. 2003. Non-linear viscoelasticity modeling of tomato paste products. *Food Research Int.* 36: 911-919.
26. [www.Fao.org/Faostat/en/#ranking/countries by commodity/2013](http://www.Fao.org/Faostat/en/#ranking/countries%20by%20commodity/2013).
27. Zaroni, B., E. Pagliarini, G. Giovanelli, and V. Lavelli. 2003. Modelling the effects of thermal sterilization on the quality of tomato puree, *Journal of Food Engineering* 56: 203-206.
28. Zareifard, M. R., H. S. Ramaswamy, M. Trigui, and M. Marcotte. 2003. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4 (1): 45-55.
29. Zell, M., J. G. Lyng, D. J. Morgon, and D. A. Cornin. 2010. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing* 38: 1135-1142.
30. Zell, M., J. G. Lyng, D. J. Morgan, and D. A. Cronin. 2011. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing* 89: 128-134.
31. Zell, M., J. G. Lyng, D. A. Cronin, and D. J. Morgan. 2009. Ohmic cooking of wholebeef muscle – Optimisation of meat preparation. *Meat Science* 81 (4): 693-698.
32. Zhu, S. M., M. R. Zareifard, C. R. Chen, M. Marcotte, and M. Grabowski. 2010. Electrical conductivity of particle–fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation. *Food Research International Journal* 43: 1666-1672.

Investigation of voltage gradient and electrode type effects on processing time, energy consumption and product quality in production of Tomato Paste by ohmic heating

M. Torkian Boldaji¹- A. M. Borghae^{2*}- B. Beheshti³- S. E. Hosseini⁴

Received: 27-05-2015

Accepted: 31-01-2016

Introduction

Thermal processing has a huge impact on the textural attribute of the final food product and texture is a major factor contributing the overall quality of food. Ohmic heating is an advanced thermal processing method in which heat is internally generated within foods by passing an alternating electric current through them. Ohmic heating can volumetrically heat the entire mass of a food system, resulting in faster heating, better quality and less energy consumption than conventional thermal processing. Gradient voltage and electrode type have high effect on ohmic heating system.

Materials and Methods

In this study, the effect of voltage gradient and electrode type on moisture reduction time, a/b , E color indexes and energy consumption were studied. For this purpose, four levels of voltage gradients (5, 7, 9 and 11 $V\ cm^{-1}$) and four electrode types (Aluminum, Stainless steel, Brass and Graphite) was investigated by ohmic heating in tomato paste processing. Tomato used in this study was purchased from a local market. The whole tomatoes were washed, crushed and mixed in a way that a red less-viscous liquid obtained (Fig. 1). This liquid was considered as tomato samples in the remainder of the article. Ohmic cooking experiments were conducted in laboratory scale ohmic heating system consists of a power supply, a variable transformer, power analyzer, a microcomputer, digital scale (GF-6000) and thermometer (Dual input RTD 804U) (Fig. 3). The ohmic cell had a PTF cylinder with an inner diameter of 0.05 m, a length of 0.10 m and two electrodes on both side of the cell. A hole with 3 mm diameter to insert the thermocouple was created and two holes with 5 mm diameter was created on surface of cell. One of them was used for pouring tomato puree and other for exiting steam from cell.

Temperature uniformity was checked during previous heating experiments by measuring the temperatures at different locations in the test cell. Ohmic heating was accomplished till the moisture content of the tomato samples reduced from initial moisture content of as 91(wet basis) to a safer level of 70 (wet basis). Moisture reduction time, a/b and E color indexes, temperature and energy consumption were measured.

Results and Discussion

The results of the nonlinear mathematical model showed that the effect of different voltage gradient levels on moisture reduction time, E parameters and energy consumption had a good agreement ($P < 0.01$) as well as voltage gradient had a significant effect on a/b color index ($P < 0.05$). Electrode type had significant effect on processing time, E ($P < 0.01$), on energy consumption and a/b index ($P < 0.05$). Interaction of voltage gradient and electrode type was significant on processing time, energy consumption, a/b and E ($P < 0.05$). In all electrodes by increasing the voltage gradient, processing time and energy consumption were reduced. For example by increasing the voltage gradient from 5 to 11 $V\ cm^{-1}$, processing time and energy consumption were decreased on average 38% and 23%, respectively. Minimal processing time and minimal energy consumption

1- Ph.D. Student, Department of Mechanic of Agricultural Machinery, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanic of Agricultural Machinery, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanic of Agricultural Machinery, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: borghae@ut.ac.ir)

were observed in 11 V cm^{-1} with graphite electrode that were 17 min and 203 kJ, respectively. As well as maximum processing time and maximum energy consumption were obtained in 5 V cm^{-1} with aluminum electrode that were 105.21 min and 321 kJ, respectively. But maximum a/b parameter and minimal E index were observed with stainless steel electrode in 11 V cm^{-1} . In determining the best electrode, in addition to the processing time and energy consumption, product quality is also an important parameter. However, graphite electrode has better performance in terms of time and energy consumption, but stainless steel electrode has better performance in term of product quality. Since the production of food, quality is an important parameter, and also the two electrodes graphite and steel are similar in terms of energy consumption and processing time, but stainless steel electrode is better in term of quality, so stainless steel electrode is selected for ohmic heating tomato paste.

Conclusions

Different voltage gradients and Electrode type have a significant effect on processing time, energy consumption, E and a/b color indexes. Minimal processing time and minimal energy consumption were observed in 11 V cm^{-1} with graphite electrode that were 17 min and 203 kJ, respectively. But maximum a/b parameter and minimal E index were observed with stainless steel electrode in 11 V cm^{-1} . Stainless steel electrode and 11 V cm^{-1} voltage gradient were the best condition for tomato paste processing by ohmic heating.

Keywords: Aluminum, Efficiency, Electricity flow, Graphite, Ohmic cell, Stainless steel

بررسی ارتعاشات موتور تراکتور MF285 بر اثر ترکیبات مختلف سوخت بیودیزل به کمک روش‌های آماری و ANFIS

علی سفرنگیان^۱ - لایلا ندرلو^{۲*} - حسین جوادی کیا^۳ - مصطفی مصطفایی^۴ - سید سعید محتسبی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

چکیده

ارتعاشات ایجاد شده در تراکتور می‌تواند باعث عدم آسایش و راحتی و موجب کاهش کار مؤثر شود و بر سلامتی و ایمنی افراد تأثیر بگذارد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای جهت بررسی دلایل بروز ارتعاش موتور و روش‌های کاهش آن انجام شده است. یکی از پارامترهای مهمی که در موتورهای دیزلی توانایی ایجاد ارتعاش و کوبش را دارد، نوع سوخت است. در این تحقیق، ارتعاش موتور تراکتور MF285، در سه جهت و سه دور موتور ۱۰۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و ده سطح سوخت حاصل از ترکیبات مختلف سوخت‌های بیودیزل، بیواتانول و دیزل اندازه‌گیری شد. برای تحلیل اثر پارامترهای مورد نظر بر روی ارتعاش موتور از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و نیز مدل ANFIS استفاده شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که ارتعاش حاصل از سوخت B₅E₄D₉۱، بیشترین ارتعاش را داشت که مقدار شتاب RMS کل آن برابر با ۴/۲۶۰۲ g بود. همچنین با افزایش بیودیزل در ترکیب سوخت‌ها میزان ارتعاش به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که سوخت B₂₅E₄D₇۱ با شتاب RMS کل ۳/۱۵۸۲ g، کمترین ارتعاش را داشت. افزایش دور موتور اثر مستقیم بر روی افزایش میزان ارتعاش داشت. همچنین در ترکیبات سوختی که ۲۵ درصد بیودیزل داشتند، با افزایش مقدار بیواتانول، مقدار ارتعاش از ۲ تا ۴ درصد کاهش یافت. سپس با ادامه افزایش از ۴ تا ۶ درصد بیواتانول، مقدار ارتعاش افزایش یافت. این روند در ترکیبات سوختی با درصد بیودیزل ۵٪، معکوس بود. هرچند در ترکیبات سوختی با درصد بیودیزل ۱۵٪، روند کاهشی داشت.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، ارتعاش‌سنج، بیواتانول، دیزل، سوخت زیستی

مقدمه

از زمانی که انسان ماشین را برای استفاده در صنعت و کشاورزی به کار گرفت و به‌ویژه از هنگامی که موتورهای به‌عنوان منابع قدرت استفاده شدند، با ورود تراکتورها به مزرعه مشکلات عدیده‌ای در ارتباط با ایمنی و سلامت شغلی کاربران به‌وجود آمد، آسایش، ایمنی و سلامت کاربران یکی از مواردی است که باید در طراحی، ساخت و استفاده از ماشین‌ها در نظر گرفته شود (Gruber and Zipper, 1994; Milby and Spear, 1994). مشکلات کاهش ارتعاش آن‌ها نظر مهندسان را به‌خود جلب کرده است. ارتعاشات، سطح وسیعی از علوم مهندسی را شامل می‌شود و از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی

قرار می‌گیرد. یکی از این جنبه‌ها مربوط به ارتعاشات انواع مختلف موتورهای می‌باشد. ارتعاشات ایجاد شده ممکن است نشان از خرابی یا شکست قطعات باشند و از همین روست که یکی از راه‌های بررسی عیوب و خرابی دستگاه‌ها آنالیز ارتعاشات می‌باشد. ارتعاشات ایجاد شده همچنین می‌توانند باعث عدم آسایش و راحتی و موجب کاهش کار مؤثر شوند و بر سلامتی و ایمنی افراد تأثیر بگذارند (Rao, 1995; Tewari et al., 2004). عامل تولید ارتعاش، احتراق و ساختار خود موتور می‌باشد. از طرفی احتراق به نوع سوخت و چگونگی طراحی محافظه احتراق بستگی دارد (Sam and Kathirvel, 2006). دو سوخت زیستی بیودیزل^۷ و بیواتانول^۸ به‌دلیل ویژگی‌های مشابه با سوخت‌های دیزلی و بنزینی به‌صورت خالص یا ترکیبی قابلیت استفاده در موتورهای دیزلی را دارند (Ferella et al., 2010).

یکی از شروط اولیه استفاده از این سوخت‌های زیستی، بررسی رفتار ارتعاشی این موتورها در اثر تغییر سوخت است که موضوع اصلی این تحقیق می‌باشد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای جهت بررسی دلایل بروز ارتعاش موتور و روش‌های کاهش آن انجام شده است (Sam

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه رازی

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه رازی

*- نویسنده مسئول: (Email: l.naderloo@razi.ac.ir)

۳- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه رازی

۴- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه رازی

۵- استاد گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران

مخلوط‌های مختلف سوخت بیودیزل و دیزل روی موتور اشتعال تراکمی شش سیلندر پرکینز^۲، قبل و بعد از تعمیر موتور بررسی شد. نتایج نشان داد که مخلوط سوخت به‌طور معنی‌داری بر مقدار ارتعاش تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که مخلوط‌های بیودیزل ۲۰ درصد و بیودیزل ۴۰ درصد، کم‌ترین مقدار ارتعاش و مخلوط‌های بیودیزل ۱۵ درصد و بیودیزل ۳۰ درصد بیش‌ترین مقدار ارتعاش را داشتند. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ارتعاش به مقدار چشم‌گیری بعد از تعمیر موتور کاهش یافت (Taghizadeh-Alisarai *et al.*, 2012). در تحقیقی دیگر بررسی نتایج نشان داد که با افزایش سرعت دورانی موتور، میانگین شتاب ارتعاش به‌طور کلی در همه دنده‌ها و موقعیت‌ها افزایش یافت. مقادیر شتاب ارتعاش وابسته به جهت مختصات بوده و به‌طور کلی شتاب ارتعاش در جهت عمودی بیشتر از جانبی و جانی بیشتر از طولی بوده است (Ahmadian, 2011). سرعت موتور مؤثرترین عامل بر توان موتور می‌باشد. همچنین مقدار سوخت بیودیزل و سرعت موتور مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر مقدار مصرف ویژه سوخت است (Shabani *et al.*, 2012). از آنجا که نوع سوخت مصرفی در تراکتور بر میزان ارتعاش موتور تأثیر می‌گذارد (Sam and Kathirvel, 2006) و ارتعاش تراکتور بر بدن راننده در استفاده طولانی مدت اثرات سوء دارد (Min-Soo *et al.*, 2013; Selim, 2001; Rao, 1995; Tewari *et al.*, 2004; Andrew *et al.*, 2007) لذا ضروری است، میزان ارتعاش تراکتور در استفاده از سوخت ترکیبی جدید اندازه‌گیری شود. هرچند که تحقیقات مختلفی در زمینه ارتعاش موتور انجام شده است، ولی تحقیقات انجام شده بیشتر به بررسی اثر استفاده از سوخت بیودیزل خالص یا در ترکیب با دیزل بر روی ارتعاش موتور پرداخته‌اند که به چند مورد اشاره شد و برخی دیگر نیز به بررسی اثر استفاده از بیواتانول به‌عنوان سوخت بر روی ارتعاشات موتور متمرکز شده‌اند (Hashemifard-Dehkordi *et al.*, 2014). به‌نظر می‌رسد تاکنون محققانی اثر استفاده از سوخت ترکیبی از بیودیزل، بیواتانول و دیزل را روی ارتعاش موتور بررسی نکرده است. لذا در این تحقیق اثرات استفاده از ترکیبات مختلف سوخت‌های بیودیزل، بیواتانول و دیزل، بر ارتعاش موتور بررسی شد. نتیجتاً ترکیبی از سوخت‌های مذکور که کمترین ارتعاش موتور را ایجاد می‌کند به‌عنوان سوخت ترکیبی بهینه شناسایی و معرفی شد.

مواد و روش‌ها

الف) تهیه ترکیبات مختلف سوخت

ابتدا سوخت بیودیزل با پایه گیاهی کلزا در کارگاه تولید بیودیزل تولید شد. شکل ۱ تصویر رآکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد که جهت تولید بیودیزل استفاده شد.

and Kathirvel, 2006; Heidari *et al.*, 2012; Min-Soo *et al.*, 2013). این در حالی است که همچنان موضوع‌های بررسی نشده‌ی فراوانی، از جمله تأثیر نوع سوخت بر ارتعاشات وجود دارد. پارامتر مهمی که در موتورهای دیزلی توانایی ایجاد ارتعاش و کوبش را دارد، نوع سوخت است. این ارتعاش و کوبش می‌تواند باعث استهلاک و فرسایش قطعات متحرک و حتی ثابت موتور شده و از طرفی باعث افزایش هزینه تعمیر و نگهداری و نیز افزایش مصرف سوخت گردد و از طرف دیگر باعث ایجاد ناراحتی و ناامنی در کاربران شود (Sam and Kathirvel, 2006; Salokhe *et al.*, 1995). بررسی صدا و ارتعاش حاصل از فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی همواره مورد توجه محققان بوده است. ارتعاش به‌طور مستقیم اثر مخرب بر روی قطعات موتور و کاربر دارد (Min-Soo *et al.*, 2013). موتورهای دیزل صدا و ارتعاش بیشتری نسبت به موتورهای اشتعال جرقه‌ای تولید می‌کنند که اثر مخرب بر گوش و بدن کاربران می‌گذارد، به‌ویژه در موتورهایی که دارای نسبت تراکم بالا و فشار احتراق زیاد هستند (Selim, 2001; Andrew *et al.*, 2007). محققان نشان دادند که با افزایش دور موتور برای تمامی مخلوط‌های سوخت بیواتانول و دیزل مقدار شتاب افزایش می‌یابد (Hashemifard-Dehkordi *et al.*, 2014). نتایج آزمایش محققان نشان می‌دهد که شتاب ارتعاش، وابسته به جهت مختصات، سرعت موتور و تغییر نوع سوخت می‌باشد. به‌طوری‌که میزان ارتعاش در راستای عمودی بیشترین مقدار را دارد و با افزایش سرعت به‌دلیل افزایش تعداد کورس و ضربه در واحد زمان بیشتر می‌شود و نیز میزان ارتعاش با استفاده از بیودیزل خالص نسبت به دیزل خالص کاهش می‌یابد (Heidari *et al.*, 2012). کاهش سرعت دورانی موتور باعث کاهش ارتعاش پیچشی میل لنگ و کاهش شتاب ارتعاش می‌شود (Heidari *et al.*, 2012). در جلوی موتور تراکتور دو چرخ مدل کوبوتا^۱ آمریکا با ۱۳ اسب بخار توان، با افزایش دور موتور، در همه دورهای موتور از ۱۰۰۰ تا ۲۲۰۰ دور بر دقیقه برای تمامی مخلوط‌های سوخت در سه راستای عمودی، افقی و جانبی، شتاب به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. افزایش سرعت موتور از ۱۴۰۰ تا ۲۲۰۰ دور بر دقیقه مقدار شتاب ارتعاشی موتور تراکتور را افزایش می‌دهد که علت آن افزایش تعداد کورس‌های احتراق و ضربات پیستون در واحد زمان است (Hasan-Beigi *et al.*, 2012).

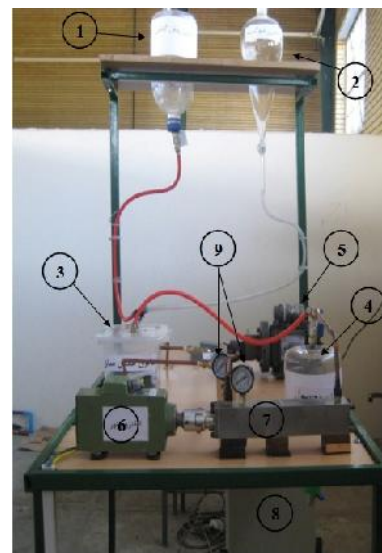
تأثیر مخلوط‌های سوخت بنزین و اتانول بر روی ارتعاش بلوک سیلندر و سر و صدای موتور اشتعال جرقه‌ای توسط محققان بررسی شد. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش اتانول در مخلوط، ارتعاش و سر و صدای موتور به‌خصوص در محدوده دور موتور ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافت (Keskin, 2010). ارتعاشات ناشی از

برای انجام آزمایش‌ها از تراکتور MF285 تک دیفرانسیل تولید شده در سال ۱۳۹۱ از کارخانه تراکتورسازی ایران استفاده شد. برای اندازه‌گیری شتاب RMS ارتعاش موتور از ارتعاش‌سنج مدل VM120 ساخت شرکت MONITRAN انگلیس استفاده شد. این ارتعاش‌سنج بسیار دقیق بوده و قادر به اندازه‌گیری شتاب ارتعاشی در محدوده $\pm 200 \text{ g}$ با حساسیت بالای 10 mV g^{-1} توانایی اندازه‌گیری بسامدهای بین ۱ تا ۱۰۰۰۰ هرتز را دارد. در این تحقیق شتاب‌سنج در بسامد ۵۰۰۰ هرتز تنظیم شد. شتاب‌سنج مطابق شکل ۲، روی بدنه موتور تراکتور به‌واسطه اتصال یک قطعه فلزی مکعبی به کمک نیروی مغناطیسی نصب شد. قطعه فلزی مکعبی در سمت راست موتور تراکتور از موقعیت راننده و پایین فیلترهای سوخت‌رسانی اولیه و ثانویه به‌طور محکم نصب گردید. مخزن موقتی سوخت به‌دلیل لوله‌های سوخت‌رسانی بایستی در سمت راست تراکتور نصب می‌شد (شکل ۲- چپ) و برای این‌که بتوان همزمان هم مقدار سوخت در مخزن را کنترل کرد و هم موقعیت ارتعاش‌سنج را تعویض نمود، ارتعاش‌سنج در همین سمت نصب گردید. اگرچه در سمت مقابل فضای مناسبی برای نصب آن نیز وجود نداشت. ارتعاش موتور در سه محور در راستای X، Y و Z اندازه‌گیری گردید و دور موتور در سه سطح (۲۰۰۰، ۱۶۰۰، ۱۰۰۰ دور بر دقیقه) در نظر گرفته شد. تصویر ارتعاش‌سنج، جهت‌های اتصال و نحوه‌ی اتصال آن به بدنه موتور تراکتور و همچنین محل نصب مخزن در شکل ۲ نشان داده شده است.

آزمایش‌ها بر روی تراکتور و در سطح جاده به‌طور ثابت و مہار شده در حالت ایستگاهی انجام شد. تراکتور قبل از انجام آزمایش‌ها بازرسی شد. آزمایش‌ها در حالت ایستگاهی و بدون بار و با سه تکرار انجام گرفت.

تعداد آزمایش‌ها با توجه به عوامل مورد بررسی در سه جهت، ۲۷۰ آزمایش بود. برای آزمایش سوخت‌های معین، لوله‌های مدار سوخت‌رسانی از محل خروجی و ورودی فیلتر ثانویه سوخت قطع گردید و با ایجاد یک مدار فرعی سوخت‌های مورد آزمایش از مخزن فرعی که سمت راست کاپوت تراکتور از دید راننده قرار داشت وارد پمپ انژکتور دوار (آسیابی) تراکتور می‌شد. به‌دلیل قطع ارتباط پمپ مقدماتی (پمپ سه گوش) با عمل سوخت‌رسانی که وظیفه ارسال سوخت به پمپ انژکتور را به‌عهده دارد، عمل سوخت‌رسانی در مدار کند و یا قطع و یا نیاز به هواگیری داشت. لذا برای رفع این مشکل مخزن سوخت باید در نقطه بالاتری نسبت به پمپ انژکتور قرار می‌گرفت تا سوخت به لحاظ ثقلی در مدار سوخت‌رسانی قرار گیرد. لذا با این اطلاعات عملیات سوخت‌رسانی به‌طور دقیق و بدون وجود هوا در مسیر مدار سوخت‌رسانی صورت گرفت. یک لوله برگشت سوخت از

در این تحقیق از روغن مایع کلزا و الکل متانول با درجه خلوص ۹۹/۹۹ درصد و نسبت مولی ۶ به ۱ و کاتالیزور هیدروکسید سدیم به اندازه ۱٪ وزنی روغن استفاده شد. تنظیمات راکتور عبارت بودند از: حفظ دما در اندازه ۵۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان واکنش ۵ دقیقه و سرعت دورانی ۸۰۰۰ دور بر دقیقه و دبی پمپ ۰/۸۳ لیتر بر دقیقه. بیودیزل تولید شده بعد از سپری کردن مراحل مختلف جهت تصفیه و خالص‌سازی شامل جداسازی گلیسرین، متانول و آب‌شویی حدود ۹۸ درصد متیل استر بود. بیواتانول مورد نیاز نیز با ۹۹/۷ درصد (حجمی) خریداری شد. سپس ترکیبات مختلف سوخت بیودیزل و بیواتانول آماده گردید. به‌عبارت دیگر در این تحقیق از ۱۰ سطح سوخت استفاده شد. ترکیبات این سوخت‌ها عبارت بودند از: بیودیزل (B_i)، بیواتانول (E_j) و دیزل (D_k). به‌طوری‌که اندیس هر کدام بیانگر درصد حجمی آن در ترکیب سوختی می‌باشد. این مخلوط‌های سوختی عبارتند از: $B_5E_2D_{93}$, $B_5E_4D_{91}$, $B_5E_6D_{89}$, $B_{15}E_2D_{83}$, $B_{15}E_4D_{81}$, $B_{15}E_6D_{79}$, $B_{25}E_2D_{73}$, $B_{25}E_4D_{71}$, $B_{25}E_6D_{69}$, $B_0E_0D_{100}$.



شکل ۱- راکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی استفاده شده جهت تولید بیودیزل از روغن کلزا (۱- مخزن روغن، ۲- مخزن متوکسید، ۳- مخزن همگن‌ساز، ۴- مخزن بیودیزل تولیدی، ۵- پمپ با جابه‌جایی مثبت، ۶- الکتروموتور، ۷- راکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی، ۸- مبدل دور راکتور و ۹- فشارسنج)

Fig.1. Used hydrodynamic cavitation reactor to produce biodiesel from canola oil (1-Oil tank, 2- Metoxide tank, 3- Homogenizer tank, 4- Product tank, 5- Positive displacement pump, 6- Electro motor, 7- Hydrodinamic cavitation reactor, 8- Inverter and 9- Pressure indicator)

(ب) روش اجرای آزمایش

د) مدل‌سازی به کمک ANFIS^۱

سیستم استنتاج فازی ANFIS ترکیبی از سیستم فازی و شبکه عصبی مصنوعی است، به طوری که مزایای هر دو را دربر دارد (Buragohain and Mahanta, 2008; Metin and Murat, 2008). این سیستم برای حل مسائل غیرخطی در کاربردهای مهندسی کشاورزی مانند سیستم‌های درگیر با خاک، گیاه و هوا که بسیار پیچیده هستند مفید می‌باشد (Arkhipov *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2002; Buragohain and Mahanta, 2008). ANFIS قادر است به کمک مفاهیم زبانی ارتباط غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را برقرار و استنتاج نماید (Naderloo *et al.*, 2012; Serge, 2001). تحلیل داده‌ها به کمک ANFIS برای تأمین دو هدف انجام شد. هدف اول جهت شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای مختلف بر ارتعاشات موتور و هدف دوم به دست آوردن مدلی برای پیش‌بینی. به طور کلی مدل‌سازی هم در محیط جعبه ابزار ANFIS و هم به کمک کدنویسی برای انجام تعدادی از محاسبات و رسم نمودارها در نرم‌افزار MATLAB R2013a انجام شد و پنج عامل مهم و مؤثر در مدل‌سازی، بهینه شد تا بهترین مدل ANFIS ممکن حاصل گردد. این پنج عامل عبارتند از: نوع مجموعه‌های فازی ورودی، تعداد مجموعه‌های فازی ورودی، نوع مجموعه‌های فازی خروجی، نوع شیوه بهینه‌سازی و تعداد اپوک‌ها^۲. نوع مجموعه‌های فازی ورودی در انواع مختلف مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، سیگموئیدی، تفاضل و حاصل ضرب دو تابع سیگموئیدی، گوسین ترکیبی، زنگوله‌ای تعمیم‌یافته و P شکل بود. نوع مجموعه‌های فازی خروجی به دو نوع کلی ثابت و خطی است و دو نوع شیوه بهینه‌سازی ترکیبی و پس انتشار وجود دارد. در مدل‌های فازی مجموعه داده‌ها نباید تکرار داشته باشند. بنابراین، از میانگین تکرارها استفاده شد. به عبارتی، تعداد کل داده‌ها در مدل فازی-عصبی و رگرسیون خطی ۹۰ مجموعه داده می‌باشد که ۲۷ مجموعه داده (۳۰ درصد داده‌ها) جهت آزمون و ۶۳ مجموعه داده (حدود ۷۰ درصد داده‌ها) جهت آموزش استفاده شد (Saadatfard *et al.*, 2012).

نتایج و بحث

الف) نتایج آماری داده‌ها

نمودار شتاب RMS ارتعاشی حاصل برای سوخت B₂₅E₄D₇₁ در دور ۱۰۰۰ rpm و در سه جهت به عنوان نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر ارتعاش کل یا ارتعاش برآیند در سه جهت اندازه‌گیری برای سوخت‌های مختلف تحت دوره‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است که چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش دور

انژکتورها به سمت بالای مخزن فرعی نیز نصب شد تا سوخت‌های برگشتی را به مخزن انتقال دهد. برای شروع آزمایش بعدی مدت زمان کافی (۲ تا ۵ دقیقه) متناسب با سوخت باقی مانده در مخزن فرعی به تراکتور داده می‌شد تا سوخت قبلی مصرف گردد. با این کار صرفاً داده‌های مربوط به هر سوخت داده‌برداری شده و از تداخل تیمارهای متوالی جلوگیری شد. تحلیل داده‌ها به دو روش تحلیل آماری و تحلیل به کمک ANFIS انجام شد.



شکل ۲- ارتعاش سنج و جهت‌های اتصال آن به بدنه موتور تراکتور (پایین) و محل نصب مخزن (بالا)

Fig.2. Vibration meter and directions of its connection to the body of tractor engine and location of the tank (left)

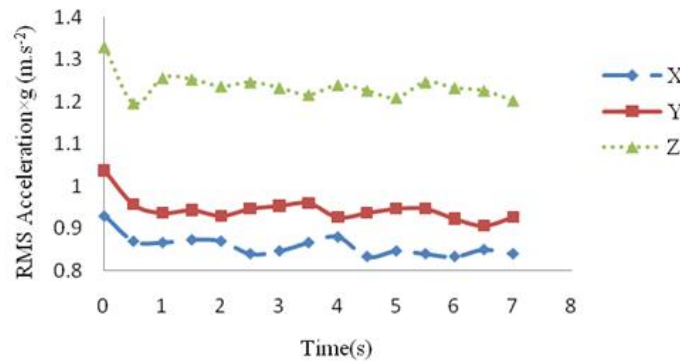
ج) تحلیل آماری داده‌ها

برای تجزیه واریانس، آزمایش به صورت آزمایش فاکتوریل ۳×۱۰ در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در هر سه جهت X، Y و Z به طور جداگانه انجام شد. داده‌ها در نرم‌افزار SPSS19 وارد گردید و تجزیه و تحلیل شد. ۱۰ سطح سوخت شامل سوخت‌های ترکیبی از (۵، ۱۵ و ۲۵ درصد) بیودیزل و (۲، ۴ و ۶ درصد) بیواتانول و مابقی سوخت دیزل بود و دور موتور نیز در سه سطح بود که قبلاً به آن‌ها اشاره شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

1- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

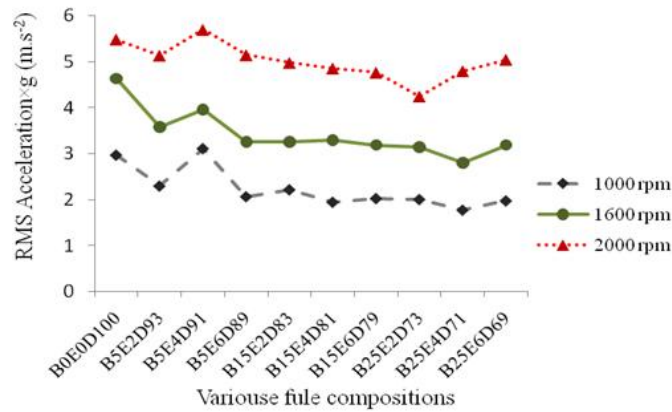
2- Epochs

موتور در تمام ترکیبات سوختی ارتعاش برآیند افزایش یافته است.



شکل ۳- شتاب RMS ارتعاشی حاصل برای سوخت B₂₅E₄D₇₁ در دور ۱۰۰۰ rpm

Fig.3. RMS acceleration of vibration for B₂₅E₄D₇₁ fuel in 1000 rpm



شکل ۴- مقادیر شتاب ارتعاشی کل (شتاب ارتعاش برآیند) برای سوخت‌های مختلف تحت دورهای متفاوت

Fig.4. Total vibration acceleration values (vibration acceleration resultant) of various fuels under different rpm

جدول ۱- تجزیه واریانس شتاب ارتعاشی موتور تحت تأثیر عوامل آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها در محورهای X، Y و Z و برآیند

Table 1- ANOVA results of the engine vibration acceleration affected by the experiment factors and their interactions in the axes of X, Y, Z and resultant

منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square			
		برآیند Resultant	محور Z Z axis	محور Y Y axis	محور X X axis
نوع سوخت Fuel type	9	1.412**	0.349**	1.009**	0.890**
دور موتور Engine speed	2	57.138**	38.720**	10.281**	8.963**
سوخت × دور Fuel type × Engine speed	28	0.193**	0.199**	0.045**	0.120**
خطا Error	60	0.030	0.023	0.013	0.013
ضریب تغییرات Coefficient of variation		0.343	0.383	0.326	0.351

** : معنی‌دار در سطح یک درصد، * : معنی‌دار در سطح پنج درصد، ns: عدم معنی‌داری

** : Significant at 1% level, * : Significant at 5% level, ns: Not significant

مختلف دور موتور در محورهای X ، Y و Z با آزمون دانکن در سطح یک درصد نشان داده شده است. طبق این نتایج کمترین شتاب در هر سه جهت اندازه‌گیری و همچنین در جهت برآیند آن‌ها در دور موتور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بوده است و بیشترین آن در دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه روی داده است. زیرا با افزایش دور موتور تعداد کورس‌های احتراق و ضربه‌ی پیستون در واحد زمان افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان ارتعاش بدنه‌ی موتور افزایش می‌یابد. نتیجه حاصل شده، با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات محققان دیگر مطابقت داشت (Hasan-Beigi *et al.*, 2012; Heidari *et al.*, 2012; Hashemifard-Dehkordi *et al.*, 2014; Taghi zadeh-ali (saraei *et al.*, 2012; Salokhe *et al.*, 1995).

ب) نتایج مدل‌سازی به کمک ANFIS

بهترین مدل ANFIS حاصل دارای سه متغیر ورودی بیودیزل، بیواتانول و دور موتور و یک خروجی میانگین ارتعاشات موتور بود. تعداد مجموعه‌های فازی ورودی سه عدد و از نوع گوسی و نوع مجموعه فازی خروجی خطی بود. روش بهینه‌سازی از نوع هیبرید و با ۳۰ اپوک بود. خروجی مدل انفیس در شکل‌های ۵ تا ۷ به‌صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. نمودار سه‌بعدی شکل ۵ نشان می‌دهد با افزایش مقدار بیودیزل و بیواتانول، میانگین ارتعاش موتور کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش ارتعاش در نقطه ۴ درصد بیواتانول و ۲۵ درصد بیودیزل اتفاق می‌افتد. نقطه بحرانی ارتعاش در سوخت با ترکیب ۵ درصد بیودیزل و ۴ درصد بیواتانول ($B_5E_4D_{91}$) اتفاق افتاده که در واقع بیشترین مقدار میانگین ارتعاش در بین سوخت‌های ترکیبی است. این نتیجه با نتایج تحلیل آماری کاملاً همسو و مشابه می‌باشد.

شکل ۶ نشان می‌دهد که با کاهش دور موتور و افزایش مقدار بیودیزل در ترکیب سوخت، میزان میانگین ارتعاش کاهش می‌یابد. البته شیب تند دور موتور - میانگین ارتعاش، نسبت به شیب ملایم بیودیزل - میانگین ارتعاش، نشان می‌دهد که میزان آهنگ اثرگذاری کاهش دور موتور بر کاهش ارتعاش، بیشتر از آهنگ اثرگذاری افزایش درصد بیودیزل بر کاهش ارتعاش بوده است.

نتایج نمودار سه‌بعدی شکل ۷ نشان می‌دهد با افزایش دور موتور و کاهش بیواتانول میزان میانگین ارتعاش افزایش می‌یابد. کمترین مقدار ارتعاش در نقطه ۴ درصد بیواتانول و سرعت موتور ۱۲۰۰ دور بر دقیقه رخ داده است. این نتیجه با نتایج آماری یکسان می‌باشد.

در جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس ارتعاش موتور تحت تأثیر عوامل آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها در محورهای X ، Y و Z و برآیند آن‌ها نشان داده شده است. براساس این نتایج اثر عوامل سوخت، دور موتور و اثر متقابل سوخت در دور موتور در هر سه جهت اندازه‌گیری و همچنین در برآیند برداری هر سه جهت، در سطح یک درصد معنی‌دار شد.

در جدول ۲ نتیجه مقایسه میانگین برآیند ارتعاش در ۱۰ سطح سوخت با آزمون دانکن^۱ در سطح یک درصد نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، کمترین ارتعاش در سوخت $B_{25}E_4D_{71}$ (۸) به‌دست آمد و این در حالی است که ترکیب سوختی $B_5E_4D_{91}$ (۲) از بین تمام سوخت‌ها بیشترین ارتعاش را داشته است. از طرف دیگر در بین ترکیب‌های مختلف سوختی نیز در یک بررسی اولیه مشاهده شد که در سوخت‌هایی که کمترین ارتعاش را داشته‌اند (۷ و ۸)، سوخت‌های ترکیبی بیشترین درصد بیودیزل (۲۵٪) و در سوخت‌هایی که بیشترین ارتعاش را داشته‌اند (۳، ۴ و ۲)، کمترین درصد بیودیزل (۵٪) را داشته‌اند. بنابراین طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که هرچه درصد بیودیزل در ترکیب افزایش یافته است، ارتعاش موتور کاهش یافته است.

جدول ۲- مقایسه میانگین‌های شتاب ارتعاشی برآیند در سطوح

مختلف سوخت

Table 2- Average comparison of resultant vibration at the different levels of fuel

شماره سوخت	نوع سوخت	شتاب ارتعاشی
Fule number	Fuel type	Acceleration of vibration (m s ⁻²)
8	$B_{25}E_4D_{71}$	3.1582 ^a
7	$B_{25}E_2D_{73}$	3.1819 ^a
6	$B_{15}E_6D_{79}$	3.3128 ^{ab}
9	$B_{25}E_6D_{69}$	3.3721 ^{ab}
5	$B_{15}E_4D_{81}$	3.3723 ^{ab}
4	$B_{15}E_2D_{83}$	3.4662 ^{bc}
3	$B_5E_6D_{89}$	3.5366 ^{bc}
1	$B_5E_2D_{93}$	3.6701 ^c
10	$B_0E_0D_{100}$	4.2415 ^d
2	$B_5E_4D_{91}$	4.2602 ^d

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم معنی‌داری تفاوت بین مقادیر آن ستون است.

Common letters in each column represent no significant difference between the values of each column.

در جدول ۳ نتیجه مقایسه میانگین برآیند ارتعاش در سطوح

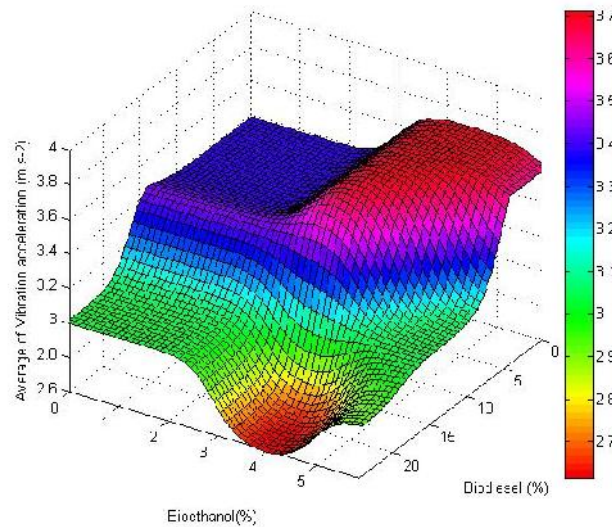
جدول ۳- مقایسه میانگین ارتعاشات در سطوح مختلف دور موتور با آزمون دانکن

Table 3- Average comparison of vibrations at the different levels of engine speed

دور موتور (دور بر دقیقه) Engine speed (rpm)	شتاب ارتعاش				تعداد N
	Acceleration of vibration ($m s^{-2}$)				
	برآیند Resultant	محور Z Z axis	محور Y Y axis	محور X X axis	
1000	2.257 ^a	1.513 ^a	1.243 ^a	1.102 ^a	30
1600	3.409 ^b	2.403 ^b	1.802 ^b	1.575 ^b	30
2000	5.005 ^c	3.768 ^c	2.414 ^c	2.192 ^c	30

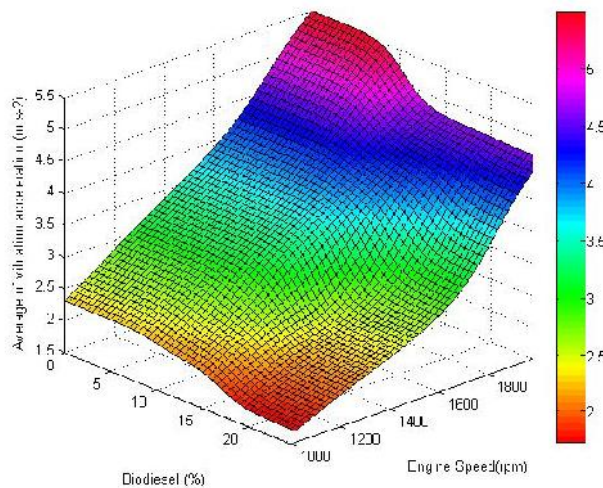
حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم معنی داری تفاوت بین مقادیر آن ستون است.

Common letters in each column represent no significant difference between the values of each column



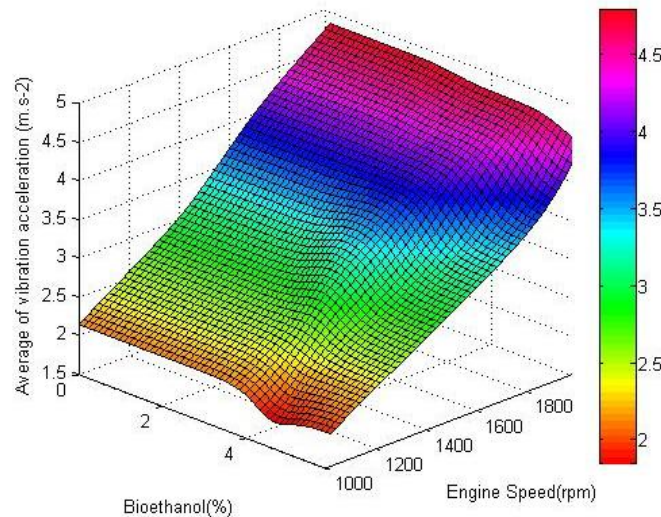
شکل ۵- نمودار سه بعدی ANFIS در بررسی اثر تغییرات بیودیزل و بیواتانول بر میانگین شتاب ارتعاشی کل موتور

Fig. 5. Three-dimensional graph of ANFIS in assessment of biodiesel and bioethanol changes on average of vibration acceleration of the engine



شکل ۶- نمودار سه بعدی ANFIS در بررسی اثر تغییرات بیودیزل و سرعت موتور بر میانگین شتاب ارتعاشی کل موتور

Fig.6. Three-dimensional graph of ANFIS in assessment of biodiesel and engine speed changes on average of vibration acceleration of the engine



شکل ۷- نمودار سه‌بعدی ANFIS در بررسی اثر تغییرات بیواتانول و سرعت موتور بر روی میانگین شتاب ارتعاشات کل موتور
Fig.7. Three-dimensional graph of ANFIS in assessment of bioethanol and engine speed changes on average of vibration acceleration of the engine

آموزش پایین می‌باشد ولی عملکرد مدل نسبت به کل داده‌ها مناسب و قابل قبول است.

نمودار مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل ANFIS در شکل ۸ نشان داده شده است که تقریباً از معادله خطی تبعیت می‌کند. به‌طور کلی مدل حاصل توسط ANFIS مدل مناسبی است و لذا توسط این مدل می‌توان اثر تغییرات پارامترهای ورودی را بر شتاب ارتعاشی کل موتور بررسی کرد و حتی با توجه به عملکرد خوب مدل در مرحله آزمون به کمک این مدل می‌توان برای ورودی‌های مختلفی که در عمل آزمون انجام نشده است، ارتعاش موتور را نیز پیش‌بینی نمود. البته نتایج به‌دست آمده برای پارامترهای ورودی در محدوده تغییرات تعریف شده در تحقیق است و برای ورودی‌هایی که خارج از محدوده مورد تحقیق هستند شاید نتوان با قطعیت از مدل حاصل استفاده کرد و ارزیابی مدل لازم به نظر می‌رسد.

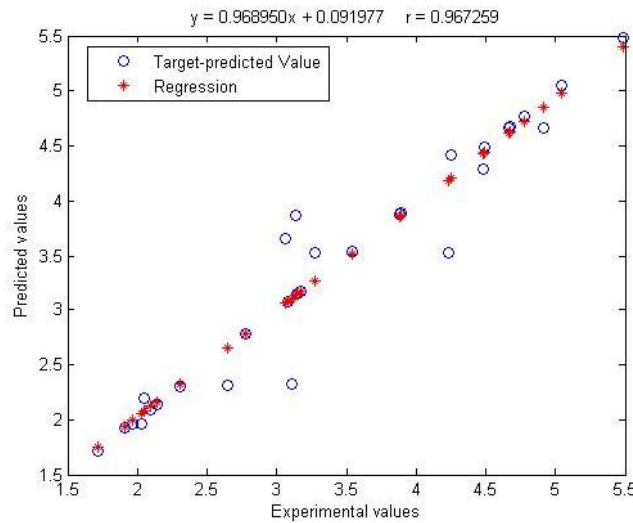
به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد، علت افزایش ارتعاش، در اثر افزایش دور، این است که در دور بالا، تعداد حرکات رفت و برگشتی قطعات متحرک موتور و ضربات پیستون در واحد زمان بیشتر می‌شود و نهایتاً تعداد سیکل کاری موتور در واحد زمان افزایش می‌یابد. از طرفی چون هر سیکل کاری موتور توأم با عمل احتراق است، لذا تعداد احتراق افزایش می‌یابد. از طرف دیگر چون عمل احتراق همراه با مصرف سوخت می‌باشد، لذا مقدار مصرف سوخت در واحد زمان افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش تعداد سیکل کاری موتور و افزایش مصرف سوخت و ضربات پیستون در واحد زمان باعث افزایش ارتعاش در واحد زمان می‌گردد.

در جدول ۴ عملکرد بهترین مدل به‌دست آمده ANFIS نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشخص شده است، با این‌که ضریب همبستگی مدل برای داده‌های آزمون کمی نسبت به داده‌های

جدول ۴- نتایج بهترین مدل ANFIS

Table 4- Results of the best obtained ANFIS model

	میانگین مربعات خطا Mean square error	معنی‌داری P value	ضریب همبستگی Correlation coefficient
نتایج برای داده‌های آزمون Results for testing data	0.189907	0.000768	0.906
نتایج برای کل داده‌ها Results for total data	0.077838	3.26×10^{-18}	0.967
نتایج برای داده‌های آموزش Results for training data	7.46×10^{-4}	4.77×10^{-44}	0.999



شکل ۸- نمودار مربوط به مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده در مدل ANFIS

Fig.8. The plot of actual values and predicted values developed by ANFIS model

ترکیبات مختلف در دوره‌های مختلف بر شتاب ارتعاشی موتور تراکتور براساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد و با روش ANFIS نیز تجزیه و تحلیل شد. نتیجه اینکه با افزایش دور موتور، ارتعاشات به‌طور چشمگیری افزایش یافت. همچنین با افزایش درصد بیودیزل، ارتعاشات کاهش یافت ولی با افزایش درصد بیواتانول ارتعاشات تا حدودی افزایش و سپس کاهش یافت. بهترین سوخت از لحاظ داشتن کمترین ارتعاش موتور سوخت $B_{25}E_{4}D_{71}$ بود که ۲۵ درصد بیودیزل و ۴ درصد بیواتانول و ۷۱ درصد دیزل داشت.

نتیجه‌گیری

با توجه به نیاز به جایگزینی سوخت دیزل و استفاده از روغن‌های پسماند و نیز اهمیت بررسی ارتعاشات موتور، به این منظور در این تحقیق ارتعاشات موتور تراکتور MF285، با جایگزینی قسمتی از سوخت دیزل با بیودیزل تولیدی از روغن کلزا و بیواتانول بررسی شد. به این صورت که ابتدا سوخت بیودیزل لازم توسط راکتور تحقیقاتی کارگاه بیودیزل تولید و سپس با درصد‌های مختلفی با دیزل و بیواتانول ترکیب شده و ده ترکیب سوخت حاصل شد. اثر استفاده از

References

- Ahmadian, H. 2011. Measurement, analysis and evaluation of vibration of the two-wheel tractor in transportation, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj. (In Farsi).
- Andrew, L. G., C. H. Dianne, and J. S. Brian. 2007. The effect of piston friction on the torsional natural frequency of a reciprocating engine. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (7): 2833-2837.
- Arkhipov, M., E. Krueger, and D. Kurtener. 2008. Evaluation of ecological conditions using bioindicators: application of fuzzy modeling. Paper presented at Lecture Notes in Computer Science.
- Buragohain, M., and C. Mahanta. 2008. A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design. *Applied Soft Computing* 8: 609-625.
- Cheng, C. B., C. J. Cheng, and E. S. Lee. 2002. Neuro-fuzzy and genetic algorithm in multiple response optimization. *Computers and Mathematics with Applications* 44: 1503-1514.
- Ferella, F., G. Mazziotti Di Celso, I. De Michelis, V. Stanisci, and F. Veglio. 2010. Optimization of the transesterification reaction in biodiesel production. *Fule* 89 (1): 36-42.
- Gruber, G., and H. Zipper Man. 1994. Relation between WBV and morbidity patterns among motor coach operations. DHEW / MIOSH publication no 75-104 washington DC:US.Government printing office.
- Hasan-Beigi, S. R., E. Johar, B. Ghobadian, M. Abonajmi, and V. Astan. 2012. Measurement and analysis of vibration signals 6-cylinder diesel engine with diesel and bio fuel mixtures in the time domain. In: *Proceedings of 7th International Congress on Mechanization and Machinery in Agriculture*. (In Farsi).

9. Hashemifard-Dehkordi, S. H., M. Almasi, A. M. Borghaee, and B. Beheshti. 2014. The impact of bioethanol and diesel fuel blends on diesel engine vibration. *Journal of Agricultural Machinery* 4 (2): 243-236. (In Farsi).
10. Heidari, B., S. R. Hasan-Beigi, and B. Ghobadian. 2012. Checking tiller engine vibration in the time domain using a mixture of diesel fuel and bio-diesel. In: *Proceedings of 7th International Congress on Mechanization and Machinery in Agriculture*. (In Farsi).
11. Keskin, A. 2010. The influence of ethanol-gasoline blends on spark ignition engine vibration characteristics and noise emissions. *Energy sources* 32: 1851-1860.
12. Metin, E. H., and H. Murat. 2008. Comparative analysis of an evaporative condenser using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Refrigeration* 31: 1426-1436.
13. Milby, T. H., and R. C. Spear. 1994. Relation between EBV and morbidity patterns among heavy equipment operator. DHEVV / NIOSH publication NO: 77-167 Washington DC:US. Government printing office.
14. Min-Soo, P., F. Takabumi, K. Tae-gu, and M. Setsuo. 2013. Health Risk Evaluation of Whole-body Vibration by ISO 2631-5 and ISO 2631-1 for operators of agricultural tractors and recreational vehicles. *Industrial Health* 51: 364-370.
15. Naderloo, L., R. Alimardani, M. Omid, F. Sarmadian, P. Javadikia, M. Y. Torabi, and F. Alimardani. 2012. Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs. *Measurement* 45: 1406-1413.
16. Rao, S. S. 1995. *Mechanical vibration*. Addison-Wesley, UK
17. Salokhe, V. M., B. Majumder and M. S. Islam. 1995. Vibration characteristics of power tiller. *Journal of Terramechanics* 32: 181-196.
18. Saadatfard, A., M. Mosleh, S. Setayeshi, and M. Kamari. 2012. Sensitivity of accuracy of artificial neural networks to the quantity of incoming data and compare it with the predictions of ANFIS in making artificial petrophysical graphs. *Exploration and Production* 96: 83-90. (In Farsi).
19. Sam, B., and K. Kathirvel. 2006. vibration characteristics of walking and riding type power tillers. *Biosystems Engineering* 95 (4): 517-528.
20. Selim, M. Y. E. 2001. pressure-time characteristics in diesel engine fueled with natural gas. *Renewable energy* 22 (4): 473-489.
21. Serge, G. 2001. Designing fuzzy inference systems from data: Interpretability oriented review. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems* 9: 426-442.
22. Shabani, Z., S. Rafiee, B. Ghobadian, and H. Ahmadi. 2012. Optimize engine performance Tractors with a mixture of biofuels, diesel, and ethanol by response surface methodology. *Journal of Engine Research* 99. (In Farsi).
23. Taghizadewqh-Alisaraei, A., B. Ghobadian, T. Tavakoli-hashjin, and S. S. mohtasebie. 2012. Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and pet diesel fuel blends. *Fuel* 102: 414-422.
24. Tewari, V. K., K. N. Dewangan, and S. Karmakar. 2004. operators fatigue in field operation of hand tractors. *Biosystems Engineering* 89 (1): 1-11.

Investigating the engine vibration in MF285 tractor effected by different blends of biodiesel fuel using statistical methods and ANFIS

A. Safrangian¹ - L. Naderloo^{2*} - H. Javadikia² - M. Mostafaei² - S. S. Mohtasebi³

Received: 22-12-2015

Accepted: 23-02-2016

Introduction

Vibrations include a wide range of engineering sciences and discuss from different aspects. One of the aspects is related to various types of engines vibrations, which are often used as power sources in agriculture. The created vibrations can cause lack of comfort and reduce effective work and have bad influence on the health and safety. One of the important parameters of the diesel engine that has the ability to create vibration and knocking is the type of fuel. In this study, the effects of different blends of biodiesel, bioethanol and diesel on the engine vibration were investigated. As a result, a blend of fuels such as synthetic fuel that creates less vibration engine can be identified and introduced.

Materials and Methods

In this study, canola oil and methanol alcohol with purity of 99.99% and the molar ratio of 6:1 and sodium hydroxide catalyst with 1% by weight of oil were used for biodiesel production. Reactor configurations include: maintaining the temperature at 50 °C, the reaction time of 5 minutes and the intensity of mixing (8000 rpm), and pump flow, 0.83 liters per minute. A Massey Ferguson (MF) 285 tractor with single differential (2WD), built in 2012 at Tractor factory of Iran was used for the experiment. To measure the engine vibration signals, an oscillator with model of VM120 British MONITRAN was used. Vibration signals were measured at three levels of engine speed (2000, 1600, 1000 rpm) in three directions (X, Y, Z). The analysis performed by two methods in this study: statistical data analysis and data analysis using Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

Statistical analysis of data: a factorial experiment of 10×3 based on completely randomized design with three replications was used in each direction of X, Y and Z that conducted separately. Data were compiled and analyzed by SPSS 19 software. Ten levels of fuel were including of biodiesel (5, 15 and 25%) and bioethanol (2, 4 and 6%), and diesel fuel.

Data analysis by ANFIS: ANFIS is the combination of fuzzy systems and artificial neural network so that it has both benefits. This system is useful to solve the complex non-linear problems in agricultural engineering applications such as systems involved in the soil, plant and air. ANFIS by linguistic concepts can establish and inference non-linear relationship between inputs and outputs. In this research, modeling was generally performed by Toolbox of ANFIS and coding in MATLAB too. Five important and effective factors in modeling were optimized until the best ANFIS model is obtained. The five factors were: type of input fuzzy sets, the number of input fuzzy sets, fuzzy set of output, methods of optimization and the number of epochs.

Results and Discussion

Based on the total vibration acceleration values for different fuels in different rpm, pure diesel (B₅E₄D₉₁) had the highest vibration and the lowest vibration was seen in the mixed fuel of B₂₅E₄D₇₁. Based on the results, two combined fuel of (B₂₅E₂D₇₃, B₂₅E₄D₇₁) have the lowest vibration and highest amount of biodiesel fuel (25%). After them, three combined fuels of (B₅E₂D₈₃, B₅E₄D₈₁, and B₅E₆D₇₉) have created more vibration and the lowest amount of biodiesel fuel in this study (5%) has created the greatest amount of vibration. With increasing engine speed, the number of combustion courses and piston shock per unit of time increases. As a result, the engine body vibration increases. The results are consistent with results from other researchers.

1 and 2- Former M.Sc. Student and Assistant Professor respectively, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: l.naderloo@razi.ac.ir)

Conclusions

In this study, motor vibration of MF285 tractors, by replacing a portion of diesel fuel with biodiesel produced from canola oil and bioethanol, was investigated. In the beginning, necessary biodiesel fuel was produced by research reactor in biodiesel workshop, and then different percentages of diesel and bio-ethanol were mixed to biodiesel and ten combined fuels were created. Finally the effect of different fuel combinations and different engine rotational speeds on the tractor engine vibrations was studied based on a factorial randomized complete block design and then analyzed and modeled by ANFIS. The results showed that the vibration of pure diesel fuel had the highest vibration. Also, with increasing biodiesel fuel blends, the amount of vibration reduced significantly. Increase in engine speed had direct effect on increasing the amount of vibration. Also by increasing the percent of bioethanol from 0 to 4%, the amount of vibration was reduced then vibration value increased by raising the percent of bioethanol. After modeling and analyzing, our results showed that the best fuel in terms of having the lowest vibration motor was B₂₅E₄D₇₁.

Keywords: Bio-ethanol, Bio-fuel, Diesel, Oscillato, Vibration

تأثیر زمان پاشش بر آنالیز انرژی و اکسرژی یک موتور دیزل با سوخت بیودیزل

امین فرهادی^۱ - سجاد رستمی^{۲*} - برات قبادیان^۳ - شاهین بشارتی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۱

چکیده

در سال‌های اخیر، روش تجزیه و تحلیل اکسرژی به‌طور گسترده در طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد انواع مختلف موتورهای برای شناسایی تلفات و محاسبه بازده استفاده شده است. از طرفی، بیودیزل خود را به‌عنوان یک سوخت جایگزین مناسب در موتور دیزل معرفی کرده است. در این مطالعه با توجه به قوانین اول و دوم ترمودینامیک به بررسی کیفیت و کمیت انرژی در موتور دیزل OM314 با مخلوط سوخت‌های دیزل و بیودیزل B20 در زمان‌های پاشش ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا پرداخته شده است. با جلو انداختن زمان پاشش، افزایش دمای بیشینه سیلندر و با عقب انداختن زمان پاشش کاهش در فشار بیشینه درون سیلندر مشاهده گردید. با جلو انداختن زمان پاشش پارامترهای کاردهی تلف شده به‌واسطه انتقال گرما، کاردهی اندیکاتور، بازدهی انرژی و اکسرژی افزایش و با عقب انداختن زمان پاشش بازده انرژی و اکسرژی کاهش یافت. همچنین تأثیر سرعت‌های مختلف موتور بر پارامترهای قابلیت کاردهی یا اکسرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که پارامترهای قابلیت کاردهی در سوخت دیزل به‌خاطر اکسرژی شیمیایی بالاتر سوخت دیزل تا حدودی از سوخت B20 بیشتر می‌باشند. با افزایش سرعت موتور در زمان پاشش ۱۵ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا قابلیت کاردهی کل افزایش و کاردهی تلف شده به‌واسطه انتقال گرما در ۱۶۰۰ دور بر دقیقه کاهش و در ۲۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: اکسرژی، انرژی، بیودیزل، زمان پاشش

مقدمه

امروزه کاهش منابع فسیلی و معایب پیشروی استفاده از این سوخت‌ها و سیاست کشورهای دارای منابع سوخت‌های فسیلی در وابسته نگه‌داشتن کشورهای مصرف‌کننده‌ی این سوخت‌ها به خود، بشر را بر آن داشت تا به دنبال سوخت جایگزین سوخت دیزل باشد. موتور دیزل بدون نیاز به تغییرات اساسی، به‌جز تنظیمات مختصر در میزان سوخت پاشیده شده در افشانه و مدت زمان پاشش سوخت، قادر به کار با سوخت بیودیزل می‌باشد، اما از آن‌جا که استفاده از بیودیزل خالص در موتور مشکلاتی را به دنبال دارد، سوخت بیودیزل را با نسبت‌هایی مختلف با سوخت دیزل ترکیب می‌کنند (Awad et al.,

2013). همانطور که اشاره شده استفاده‌ی بیودیزل در موتور دیزل به تغییرات اساسی نیاز ندارد، اما به‌خاطر وجود تفاوت‌هایی از قبیل گرانی^۵، نقطه‌ی اشتعال^۶، عدد ستان^۷ و غیره، با سوخت دیزل تحقیقات مختلفی برای بهینه‌سازی زمان پاشش سوخت صورت گرفته است (Graboski and McCormick, 1998).

در تحقیقی تأثیر زمان پاشش بر انتشار NO_x و مصرف سوخت ویژه ترمزی^۸ BSFC^۸ در یک موتور دیزل پاشش غیرمستقیم با استفاده از سوخت دیزل مطالعه گردید. با جلو انداختن زمان پاشش، افزایش ۱۵ درصدی NO_x و با عقب انداختن زمان پاشش کاهش در میزان آلاینده‌ها و سوخت مصرفی در مقایسه با حالت اصلی مشاهده شد (Parlak et al., 2005). در یک تحقیق آزمایشگاهی به‌منظور تعیین زمان بهینه پاشش برای یک موتور دیزل با سوخت بیودیزل مشخص شد که اوج فشار سیلندر با عقب انداختن زمان پاشش کاهش می‌یابد (Kegl, 2006). احتراق بیودیزل حاصل از میکروجلیک^۹ در یک موتور دیزل پاشش غیرمستقیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*- نویسنده مسئول: (Email: Rostami.sajad@yahoo.com)

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۴- مربی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

DOI: 10.22067/jam.v7i1.50058

5- Viscosity

6- Flash point

7- Cetane number

8- Brake specific fuel consumption

9- Microalgae

نتایج حاکی از آن بود که در سرعت بالا و حالت پربار، انرژی گاز خروجی بزرگ‌تر از انرژی آب خنک‌کننده است و بازده اکسرژی گاز خروجی در ناحیه بار و سرعت بالا، بیشتر می‌باشد. ضمن اینکه بهره‌وری سوخت موتور بنزینی می‌تواند از طریق بازیابی و بهبود اتلاف گرما تا ۲۰ درصد ارتقاء یابد (Fu et al., 2013).

کاربرد قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای آنالیز کمی و کیفی انرژی، در یک موتور دیزل چهار سیلندر پاشش مستقیم و با استفاده از سوخت دیزل و بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر عملکرد انرژی و اکسرژی فعال برای سوخت بیودیزل با سوخت شماره ۵ دیزل مشابه است و مهم‌ترین عامل ناکارآمدی سیستم، تخریب اکسرژی از طریق فرآیندهای برگشت‌ناپذیری می‌باشد که بیشتر در فرآیند احتراق دیده می‌شود (Sekmen and Yilba i, 2011).

بررسی‌های انجام شده بیانگر این موضوع است که با وجود اهمیت پیدا کردن تجزیه و تحلیل اکسرژی در موتورهای دیزل، ولی تاکنون مطالعه‌ای در مورد بررسی تأثیر زمان پاشش بر اکسرژی یک موتور دیزل انجام نشده است. لذا، هدف این تحقیق بررسی و آنالیز انرژی و اکسرژی موتور دیزل با مخلوط سوخت‌های دیزل و بیودیزل (B20) در زمان‌های پاشش ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موتور مورد مطالعه در این تحقیق یک موتور دیزل پاشش مستقیم مدل OM314 ساخت شرکت Edem تبریز می‌باشد. این موتور مجهز به یک پمپ انژکتور ردیفی ساخت کارخانه بوش آلمان است. کارخانه سازنده زمان پاشش استاتیکی این موتور را در حالت استاندارد ۱۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا تنظیم کرده بود. مشخصات این موتور در جدول ۱ نشان داده شده است. بیودیزل استفاده شده در این تحقیق متیل استر روغن گیاهی سویا بود که در آزمایشگاه تولید بیودیزل دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تولید شد و سوخت دیزل استفاده شده، سوخت متداول در ایران (دیزل شماره ۲) می‌باشد. برخی از خواص مهم سوخت‌های دیزل و بیودیزل استفاده شده به همراه استانداردهای این سوخت‌ها و حدود مجاز در جدول ۲ ارائه شده است.

اصول نظری

اکسرژی یک سیستم

اکسرژی یک خاصیت ترمودینامیکی از سیستم و محیط است. حداکثر کار مفیدی که سیستم در طی یک فرآیند برگشت‌پذیر از یک حالت ترمودینامیکی به حالت مرده واقعی می‌رسد (تعادل سیستم با

گشتاور موتور با ۵ درجه جلو انداختن زمان پاشش کمی افزایش و با جلو انداختن بیشتر زمان پاشش، گشتاور کاهش پیدا کرد (Haik et al., 2011).

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و به‌خصوص کامپیوتر و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی می‌توان اقدام به شبیه‌سازی چرخه‌های موتور نمود. این مدل‌ها بر حسب نوع، تقسیمات متنوعی دارند. از ساده‌ترین و در عین حال پرکاربردترین این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های ترمودینامیکی اشاره داشت. در این مدل‌ها با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و سایر معادلات حاکم به شبیه‌سازی مراحل کاری موتور از جمله مرحله احتراق پرداخته می‌شود و می‌تواند بعد از تأیید داده‌های حاصل از مدل با داده‌های تجربی، داده‌های استخراجی از مدل را به تعداد نامحدودی از شرایط عملکردی یا تعداد نامحدودی از نمونه‌های سوخت تعمیم داد که این امر موجب صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه‌های آزمون‌های تجربی موتور می‌شود (Ramadhas et al., 2006). از آن‌جا که قانون اول ترمودینامیک به‌تنهایی قادر به تحلیل کامل پارامترهای مؤثر موتور نمی‌باشد و برای بررسی میزان بازدهی موتور که نیازمند مقداردهی به بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به فرآیندهای مختلف می‌باشد، باید آنالیز قانون دوم مورد بررسی قرار گیرد. یک پارامتر کلیدی در آنالیز قانون دوم، قابلیت کاردهی است که اکسرژی نامیده می‌شود و برخلاف انرژی می‌تواند در اثر برگشت‌ناپذیری‌های موجود در فرآیندهایی از قبیل احتراق، اصطکاک، آشفستگی و اختلاط تخریب شود (Moran et al., 2003).

در مطالعه‌ای با استفاده از یک مدل چندبعدی به آنالیز اکسرژی یک موتور دیزل در بارهای مختلف پرداخته شد. نتایج پارامترهای اکسرژی حاکی از آن بود که با افزایش بار از ۲۵ درصد به ۱۰۰ درصد بار کامل، راندمان اکسرژی در موتور تزریق هوا نسبت به موتور پایه کاهش می‌یابد (Jafarmadar and Mansoury, 2015).

در یک موتور انژکتوری به بررسی انرژی و اکسرژی تحت تأثیر زمان پاشش در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که تغییر نسبت هم‌ارزی تأثیر به‌سزایی در بازگشت‌ناپذیری احتراق و قابلیت کاردهی گازهای خروجی دارد (Nemati et al., 2013). در تحقیق دیگری به تأثیر زمان پاشش و سطح چرخش گاز آگروز بر اکسرژی موتور دیزل پرداخته شد. در زمان پاشش عادی موتور و در سطح صفر EGR مشاهده شد که ۳۰ درصد از اکسرژی سوخت در فرآیند احتراق تخریب می‌شود. با عقب انداختن زمان پاشش افزایش در درصد انتقال اکسرژی از طریق جریان به همراه افزایش EGR مشاهده شد (Zheng and Caton, 2012).

در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی در موتور بنزینی پرداخته شد و پتانسیل بازیابی و بهبود اتلاف حرارت و بازده اکسرژی موتور بنزینی از طریق آنالیز اکسرژی مورد ارزیابی قرار گرفت.

محیط) را اکسرژی گویند (Dincer, 2000). تحلیل اکسرژی، ترکیب قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فنی موتور دیزل OM314

Table1- Technical specifications of diesel engine OM314

مشخصات موتور Engine characteristics	مقدار Value
تعداد سیلندر Number of cylinders	4
قطر سیلندر Cylinder bore	97 mm
طول شاتون Connecting rod length	230 mm
زمان پاشش استاندارد Standard injection timing	15 BTDC
نسبت تراکم Compression ratio	17:1
حداکثر گشتاور Maximum torque	235 N.m @ 2000 rpm
حداکثر توان Maximum power	63 kW @ 2800 rpm

جدول ۲- خواص مهم سوخت‌های دیزل و بیودیزل مورد استفاده

Table 2- Important properties of used diesel and biodiesel fuels

ویژگی Property	روش Method	بیودیزل Biodiesel	دیزل Diesel	واحد Units
نقطه روشنایی Flash point	ASTM D-92	176	64	°C
گرانروی سینماتیک Kinematic viscosity	ASTM D-445	4.73	2.8	mm ² s ⁻¹
نقطه ابری شدن Cloud point	ASTM D-2500	-1	2	°C
ارزش حرارتی پایین LHV	-----	38730	42930	kJ kg ⁻¹
چگالی Gravity	----	0.88	0.845	g cm ⁻³

می‌شود (Ferguson and Kirkpatrick, 2001).

$$X_{T_{FH}} = (E - E_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (1)$$

که در آن E مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی، P₀ و T₀ فشار و دمای محیط در حالت استاندارد می‌باشند. همچنین پارامترهای E₀، V₀ و S₀ به ترتیب انرژی درونی، حجم و آنتروپی در فشار و دمای محیط می‌باشند.

حالت مرده

حالت مرده، به حالتی از ماده گفته می‌شود که در آن حالت، ماده با محیط در تعادل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی باشد. در حالت مرده، دمای ماده برابر با دمای محیط و فشار ماده برابر فشار اتمسفر و سرعت ماده نسبت به محیط، صفر و انرژی پتانسیل آن نیز صفر است

برخلاف انرژی، اکسرژی می‌تواند در اثر برگشت‌ناپذیری‌های موجود از قبیل اصطکاک، احتراق، آشفستگی اختلاط و غیره، تخریب شود. با تحلیل اکسرژی، می‌توان میزان دقیق تلفات کارایی انرژی، محل و علت آن را به‌نحو مطلوبی پیدا و مشخص کرد. برای مشخص کردن کارایی یک سیستم، نه تنها فرآیندهای داخل سیستم، بلکه ارتباط و انتقال انرژی بین سیستم و محیط بیرون آن به جهت افت پتانسیل کار بایستی مورد توجه قرار گیرد. فقط در این صورت است که کارایی واقعی سیستم به‌دست می‌آید (Rosen, 2002). نتایج تجزیه و تحلیل اکسرژی را می‌توان برای طراحی بهینه در سیستم حرارتی مورد استفاده قرار داد.

در یک سیستم بسته، تعادل گرمایی و فشار با محیط اطراف اکسرژی ترمومکانیکی نامیده شده و به‌صورت رابطه (۱) تعریف

(Li, 1995).

خواص گاز شامل آنتالپی، انرژی داخلی و غیره با استفاده از روابط چندجمله‌ای مرتبط با دما مدل‌سازی شده‌اند. حرارت آزاد شده از احتراق به‌طور مساوی در سرتاسر سیلندر توزیع گردیده است.

محاسبه‌ی نرخ انتقال حرارت در هر گام

نرخ انتقال حرارت بین دیواره‌ی سیلندر و محیط بیرون براساس معادله‌ی انتقال حرارت جابه‌جایی نیوتن (رابطه (۵)) محاسبه می‌شود (Woschni, 1967; Ferguson and Kirkpatrick, 2001):

$$\frac{dQ_W}{d\theta} = \frac{h_g(\theta) A_{W}(\theta) [T_g(\theta) - T_W]}{N} \quad (5)$$

نرخ انتقال حرارت بین دیواره‌ی سیلندر و محیط بیرون برحسب J می‌باشد. h_g ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $A_{W}(\theta)$ سطح مؤثر دیواره‌ی سیلندر برحسب مترمربع، $T_g(\theta)$ دمای گاز در محفظه‌ی احتراق، T_W دمای دیواره سیلندر برحسب کلون و N دور موتور می‌باشد.

مدل احتراق

از تابع دوگانه وایب برای محاسبه‌ی نرخ انرژی آزاد شده در مرحله‌ی احتراق استفاده گردید (Heywood, 1988):

$$\frac{dQ}{d\theta} = 6.9 \frac{Q_p}{\theta_p} (M_p + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^{M_p} \exp\left[-6.9 \left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^{M_p + 1}\right] + 6.9 \frac{Q_d}{\theta_d} (M_d + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_d}\right)^{M_d} \exp\left[-6.9 \left(\frac{\theta}{\theta_d}\right)^{M_d + 1}\right] \quad (6)$$

$$Q_f = m_f (LHV) \quad (7)$$

$$Q_p = q_p Q_i \quad (8)$$

که در روابط (۶) تا (۸)، آزادسازی حرارت در هر گام زاویه‌ای بر حسب $J \text{ deg}^{-1}$ و اندیس‌های p و d به مراحل احتراق پیش‌آمیخته و آرام برمی‌گردد. θ_d و θ_p به ترتیب مدت آزادسازی انرژی در احتراق پیش‌آمیخته و آرام برحسب زاویه میل‌لنگ و M_d و M_p به ترتیب فاکتورهای مربوط به احتراق پیش‌آمیخته و آرام می‌باشند، Q_f انرژی شیمیایی کل سوخت است که در فرآیند احتراق آزاد می‌گردد و Q_p و Q_d نیز به ترتیب آزادسازی انرژی در احتراق پیش‌آمیخته و آرام می‌باشند. LHV ارزش حرارتی پایین سوخت برحسب ژول بر کیلوگرم و q_p نیز ضریب احتراق پیش‌آمیخته می‌باشد. پارامترهای θ_p ، q_p ، θ_d و M_p برای سوخت‌ها و موتورهای مختلف متفاوت می‌باشد (Ghojel, 1982; Miyamoto et al., 1985). بنابراین برای مخلوط‌های مختلف بیودیزل و گازوئیل هر کدام از این ضرایب بسته به شرایط عملکردی موتور دارای مقدار مشخصی می‌باشند.

اکسرژی شیمیایی سوخت از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Moran et al., 2003):

$$\alpha_{f,hB} = LHV_B \left(\left(1.0401 + 0.01728 \frac{Y}{Z} \right) + 0.432 \left(\frac{F}{Z} \right) \right) \quad (9)$$

که در رابطه (۹) اندیس‌های Y و Z و F به ترتیب مربوط به تعداد

موازنه‌ی حالت کلی انرژی

برای یک سیستم باز با صرف‌نظر از جریان نشستی و براساس قانون اول ترمودینامیک خواهیم داشت:

$$\frac{dQ}{dt} - P \frac{dv}{dt} + \dot{m}_f h_f = \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، $\frac{dQ}{dt}$ نرخ انتقال حرارت از مرز سامانه برحسب $J \text{ s}^{-1}$ کار انجام‌شده در اثر جابه‌جایی مرز سامانه برحسب J ، \dot{m}_f نرخ جریان جرمی سوخت عبوری از مرز سامانه بر حسب $kg \text{ s}^{-1}$ ، h_f آنتالپی سوخت ورودی به سامانه برحسب $J \text{ s}^{-1}$ و $\frac{dU}{dt}$ نرخ تغییرات انرژی کل سامانه برحسب $J \text{ s}^{-1}$ می‌باشد.

موازنه معادله‌ی اکسرژی

در سیلندر یک موتور احتراق داخلی آهنگ اکسرژی به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Rakopoulos and Giakoumis, 2006):

$$\frac{dA_{exci}}{dt} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot Q_j - \left(W_{cv} - P_c \frac{dv_{cv}}{dt} \right) + \sum_{in} \dot{m}_{in} b_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} b_{out} - I \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، $\frac{dA_{exci}}{dt}$ نرخ تغییرات انرژی در سیلندر، $\int \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot Q_j$ اکسرژی گرما برای انتقال حرارت، $\left(W_{cv} - P_c \frac{dv_{cv}}{dt} \right)$ اکسرژی حاصل از کار موزی و $\sum_{in} \dot{m}_{in} b_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} b_{out}$ به ترتیب ترم‌های انتقال اکسرژی همراه با جرم‌های ورودی و خروجی به داخل سیلندر بوده و به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$b = h - T_0 S - \sum m_i \mu_i^0 \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)، S آنتروپی گازهای داخل سیلندر، μ_i^0 مربوط به پتانسیل شیمیایی گونه i و اندیس صفر مربوط به شرایط محیط است. در رابطه (۳) همچنین I آهنگ تولید برگشت‌ناپذیری در داخل سیلندر موتور به خاطر احتراق، اختلاط، انتقال گرما و غیره می‌باشد.

مدل‌سازی موتورهای احتراق تراکمی

به‌منظور شبیه‌سازی موتور دیزل از مدلی استفاده شد که قادر به توصیف مراحل تراکم، تأخیر در اشتعال، احتراق و انبساط می‌باشد. فرضیات در نظر گرفته شده در حین محاسبات صورت گرفته عبارتند از:

دما، فشار و ترکیبات داخل محفظه‌ی احتراق همگون هستند و تفاوتی بین محتویات درون سیلندر شامل گازهای سوخته و نسوخته نمی‌باشد.

سیال در نظر گرفته شده یک گاز ایده‌آل می‌باشد.

مدل توسعه یافته تولید آنتروپی کل را با توجه به مقدار کار اتلافی کل به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌کند:

$$S_{gen} = (S_{out} - S_{in}) + \frac{Q_W}{T_0} + \frac{I}{T_0} \quad (19)$$

بازدهی اکسرژی نیز مطابق قانون دوم ترمودینامیک از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود: (Sezer and Bilgin, 2013).

$$\eta_{energy} = \frac{A_W}{m_f a_{fch}} \quad (20)$$

معادلات مورد استفاده در زبان برنامه‌نویسی فورترن^۱ محاسبه و نتایج فشار درون سیلندر حاصل از مدل با داده‌های فشار حاصل از آزمون تجربی موتور OM314 برای زمان‌های پاشش مورد بررسی و برای سوخت بیودیزل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

نتایج و بحث

برای صحت‌سنجی مدل قیاسی بین داده‌های فشار حاصل از آزمایشات تجربی در زمان پاشش ۱۵ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا و داده‌های حاصل از مدل صورت گرفت که در شکل ۱ نشان داده شده است. این نتایج برای زمان‌های پاشش ۱۵ و ۲۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا صدق می‌کند. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین داده‌های حاصل از آزمون موتور و داده‌های تجربی وجود دارد. نظر به شکل ۲ در زمان پاشش ۱۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا بیشینه‌ی فشار درون سیلندر نسبت به زمان پاشش استاندارد کاهش یافته است. دلیل این امر این است که با عقب افتادن زمان پاشش به درون سیلندر شروع احتراق بعد از نقطه‌ی مرگ بالا اتفاق می‌افتد و زمان کافی برای آزاد شدن انرژی وجود نداشته و به دنبال آن افت فشار در این زمان پاشش مشاهده می‌شود (Bari et al., 2004). همچنین با جلو انداختن زمان پاشش، زمان کافی برای ایجاد یک مخلوط ایده‌آل جهت احتراق به وجود می‌آید. این امر موجب افزایش نرخ آزادسازی حرارت در اولین فاز احتراق و افزایش فشار بیشینه‌ی سیلندر در نزدیکی نقطه‌ی مرگ بالا گردید (Gumus, 2010). با توجه به شکل ۱ مشاهده شد که با عقب افتادن زمان پاشش دمای درون سیلندر کاهش یافته است. دلیل این امر به دلیل تأخیر در آزادسازی گرما بوده و گرمای حاصل از سوخت زمانی آغاز می‌شود که پیستون از نقطه‌ی مرگ بالا دور شده است و افزایش دمای گازهای خروجی سیلندر در سایر تحقیقات در این زمان پاشش گزارش شده است که امری منطقی می‌باشد (Jindal, 2011). جلو انداختن زمان پاشش باعث افزایش فشار و به دنبال آن افزایش دمای درون سیلندر می‌گردد. در این حالت احتراق زودتر اتفاق افتاده و بیشتر انرژی سوخت در فاز اول احتراق آزاد می‌گردد (Bari et al., 2004).

کربن، هیدروژن و اکسیژن و LHV ارزش حرارتی پایین سوخت بیودیزل می‌باشند.

موازنه اکسرژی سیلندر

برای سیلندر موتور براساس هر درجه از زاویه میل لنگ داریم:

$$\frac{dA_{cycl}}{dt} = \left(\frac{dm}{d\theta}\right)_{in} b_{in} \left(\frac{cm}{d\theta}\right)_{out} b_{out} \frac{dA_W}{d\theta} \frac{dA_Q}{d\theta} + \frac{dA_F}{d\theta} \frac{dI}{d\theta} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، $\left(\frac{dm}{d\theta}\right)_{in} b_{in}$ و $\left(\frac{dm}{d\theta}\right)_{out} b_{out}$ به ترتیب نرخ جریان ورودی و خروجی از سیلندر می‌باشد.

نیز قابلیت کاردهی اندیکاتور است که از رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dA_W}{d\theta} = (P_{CYCL} - P_0) \frac{dV}{d\theta} \quad (11)$$

همچنین در رابطه (۱۰)، $\frac{dA_Q}{d\theta}$ نرخ قابلیت کاردهی تلف شده توسط انتقال گرما به دیواره‌های سیلندر برحسب درجه میل لنگ بوده و از رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dA_Q}{d\theta} = \frac{dQ_W}{d\theta} \left(1 - \frac{T_0}{T_{CYCL}}\right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، T_{CYCL} دمای لحظه‌ای دیواره‌ی سیلندر و $\frac{dQ_W}{d\theta}$ نرخ گرمای انتقال یافته می‌باشد.

در رابطه (۱۰) همچنین $\frac{dA_F}{d\theta}$ بیانگر نرخ قابلیت کاردهی سوخت سوخته شده برحسب درجه میل لنگ است که توسط رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dA_F}{d\theta} = \left(\frac{dm_B}{d\theta} a_{chB}\right) \quad (13)$$

و در نهایت $\frac{dI}{d\theta}$ در رابطه (۱۰) بیانگر نرخ بازگشت ناپذیری در سیلندر بوده و مطابق روابط (۱۴) تا (۱۷) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dI}{d\theta} = -\frac{T_0}{T_{CYCL}} \left(\sum_i \mu_i \frac{dm_i}{d\theta} + \mu_{fB} \frac{dm_{fB}}{d\theta}\right) \quad (14)$$

$$\mu_i = g_i(T, P_i) \quad (15)$$

$$\mu_{fB} = a_{chB} \quad (16)$$

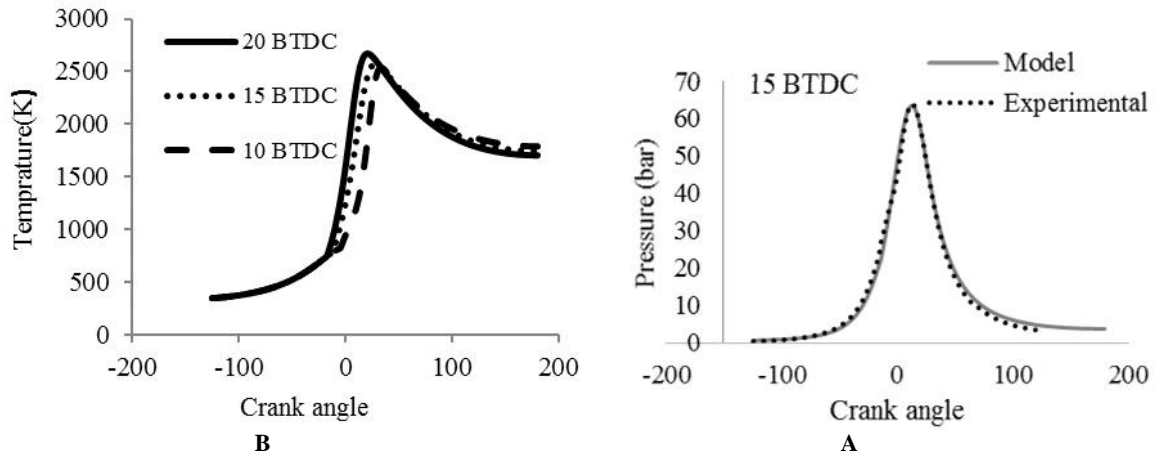
$$g_i(T, P_i) = g_i(T, x_i P) - h_i - T s_i(T, x_i P) - h_i(T) - T \left[s_i(T, P_i) - P_i \ln\left(\frac{x_i P}{P_0}\right) \right] \quad (17)$$

در روابط (۱۴) تا (۱۷)، μ_i و μ_{fB} به ترتیب پتانسیل شیمیایی گازهای موجود و سوخت بیودیزل، X_i ، g_i و s_i نیز به ترتیب کسر مولی گونه i ام، انرژی گیبس و آنتروپی گونه‌های موجود هستند.

در یک سیستم بسته، تعادل گرمایی و فشار با محیط اطراف اکسرژی ترمومکانیکی نامیده شده و به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود (Ferguson and Kirkpatrick, 2001).

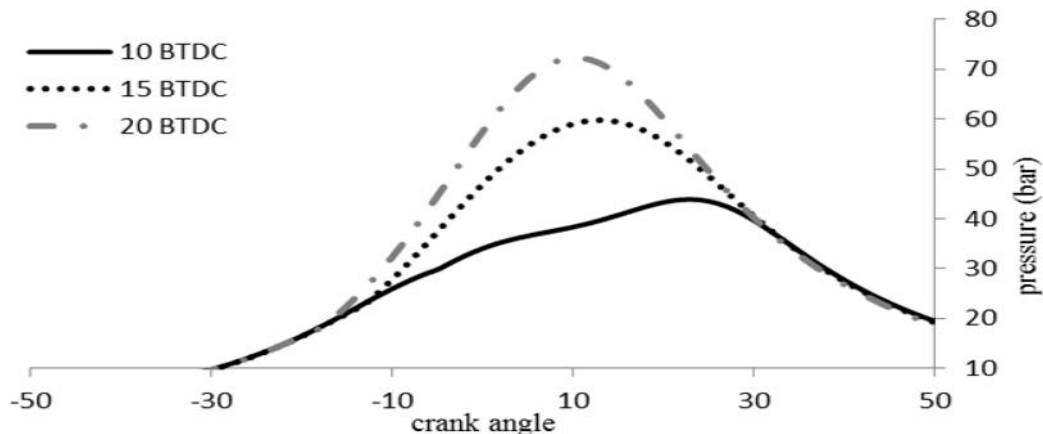
$$X_{T,P} = (E - E_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، E مجموع انرژی‌های درونی، پتانسیل و جنبشی، P_0 و T_0 فشار و دمای محیط در حالت استاندارد می‌باشند. همچنین پارامترهای E_0 ، V_0 و S_0 به ترتیب انرژی‌های درونی، پتانسیل و جنبشی، حجم و آنتروپی در فشار و دمای محیط می‌باشند.



شکل ۱- A: پیش‌بینی فشار در زمان پاشش ۱۵ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا، B: دمای درون سیلندر در زمان‌های مختلف پاشش برای سوخت B20

Fig.1. A: The prediction of in-cylinder pressure injection timing 15 BTDC, B: Temperature at different injection timings for B20 fuel



شکل ۲- تأثیر زمان پاشش سوخت بر بیشینه فشار درون سیلندر

Fig. 2. The effect of fuel injection timing on the maximum of in-cylinder pressure

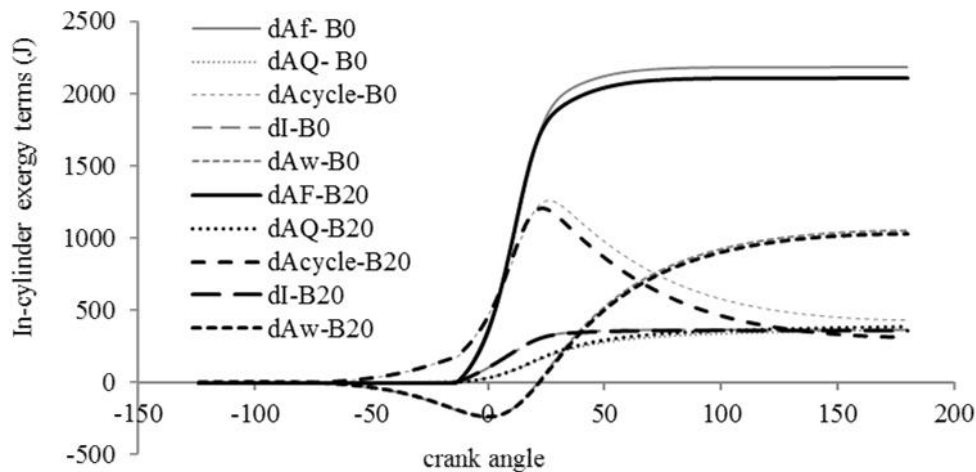
قابلیت کاردهی نیز کاهش دیده می‌شود و از طرفی نرخ تغییرات آن نیز منفی می‌شود (شیب مماس بر نمودار) که علت آن تبدیل قابلیت کاردهی به کار انبساط می‌باشد (Rakopoulos and Giakoumis, 2006). تغییرات قابلیت کاردهی اندیکاتور (dAQ) ناشی از تغییرات فشار و حجم داخل سیلندر بوده که در مرحله‌ی تراکم و تأخیر در اشتعال به علت کار انجام شده توسط پیستون دارای مقادیر منفی و بعد از آن به علت افزایش حجم، عددی مثبت می‌شود (Canakci and Hosoz, 2006; Rakopoulos and Giakoumis, 2006). کاردهی تلف شده (dAQ) از طریق انتقال حرارت از ابتدای مرحله‌ی تراکم تا آخرین مرحله‌ی کاری موتور دارای مقداری ناچیز می‌باشد و در مرحله‌ی تأخیر در اشتعال و افزایش بیشتر درجه حرارت درون سیلندر میزان آن رو به افزایش و بعد از آن در مرحله‌ی احتراق به میزان حداکثری خود می‌رسد. بعد از اتمام احتراق و کاهش دمای درون

در شکل ۳، پارامترهای مختلف کاردهی در دو سوخت B0 (دیزل) و B20 (مخلوط ۲۰٪ بیودیزل) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ قابلیت کاردهی کل (dAcyle) در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی (۱۲۰ BTDC)، به دلیل کار صورت گرفته توسط پیستون در حال افزایش می‌باشد؛ که این میزان برابر با کار اندیکاتور و کار تلف شده از طریق انتقال حرارت که با افزایش حرارت در حال افزایش است، می‌باشد. در لحظه‌ای که سوخت به درون سیلندر تزریق می‌شود و در طی زمانی که تأخیر در اشتعال رخ می‌دهد، حالت منحنی این پارامتر تغییر کرده. به عبارت دیگر نقطه عطف در منحنی قابلیت کاردهی کل مشاهده می‌شود که بعد از آغاز مرحله‌ی احتراق، سوخته شدن سوخت، باعث افزایش قابل توجهی در فشار و درجه حرارت و در نتیجه در قابلیت کاردهی کل می‌شود. در طی مرحله‌ی انبساط، زمانی که فشار و دما شروع به سقوط می‌کند در

انسباط مقادیر این پارامتر ثابت می‌ماند. با توجه به نمودارهای حاصل شده، مشاهده می‌شود که قابلیت کاردهی سوخت سوزانده شده (dAF) تا قبل از مرحله‌ی پاشش سوخت صفر بوده. با شروع مرحله پاشش سوخت قابلیت کاردهی سوخت سوزانده شده افزایش می‌یابد. این افزایش تا پایان مرحله احتراق ادامه می‌یابد. با شروع مرحله انسباط با کاهش جرم سوخت سوزانده شده، روبه رو خواهیم بود. در نتیجه میزان قابلیت کاردهی سوخت سوزانده شده این پارامتر ثابت می‌ماند.

با توجه به نمودارهای حاصل از پارامترهای قابلیت کاردهی دو سوخت B0 و B20 مشخص می‌شود که پارامترهای قابلیت کاردهی سوخت دیزل تا حدودی بیشتر از قابلیت کاردهی سوخت B20 می‌باشند. دلیل این امر ارزش حرارتی بالاتر سوخت دیزل نسبت به سوخت B20 می‌باشد. در واقع اکسرژی شیمیایی سوخت دیزل بیشتر است و همین امر باعث شده تا پارامترهای قابلیت کاردهی در سوخت دیزل بیشتر باشند (Prince et al., 2008).

سیلندر، مقادیر نمودار کاردهی تلف شده از طریق انتقال حرارت ثابت می‌ماند. همچنین می‌توان دریافت که فرآیند احتراق، بیشترین تأثیر را بر روی اکسرژی سیکل کاری موتور و به‌خصوص اتلاف قابلیت کاردهی توسط انتقال گرما دارد (Primus Dinman, 2009). (dI) نرخ تولید بازگشت‌ناپذیری را در درون سیلندر نشان می‌دهد که شامل احتراق، اختلاط، مخلوط شدن هوا و سوخت ورودی با محصولات باقی‌مانده‌ی حاصل از چرخه‌ی قبل می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است در این میان احتراق دارای سهم قابل توجه بوده و طبق آزمایشات (Primus and Flynn, 1986) حدود ۹۰ درصد از میزان بازگشت‌ناپذیری مربوط به احتراق می‌باشد. همان‌طور که در نمودارهای حاصل شده هم قابل مشاهده است، درمی‌یابیم که میزان بازگشت‌ناپذیری در مرحله‌ی تراکم تقریباً ناچیز بوده است. با شروع مرحله‌ی احتراق به‌علت افزایش فشار و دما، بازگشت‌ناپذیری افزایش یافته و بعد از آن به‌علت کاهش آنترپی و کاهش آنتالپی که ناشی از کاهش در میزان فشار و دما است، بازگشت‌ناپذیری نسبت به مرحله قبل (احتراق) کاهش یافته است. در نتیجه با شروع مرحله

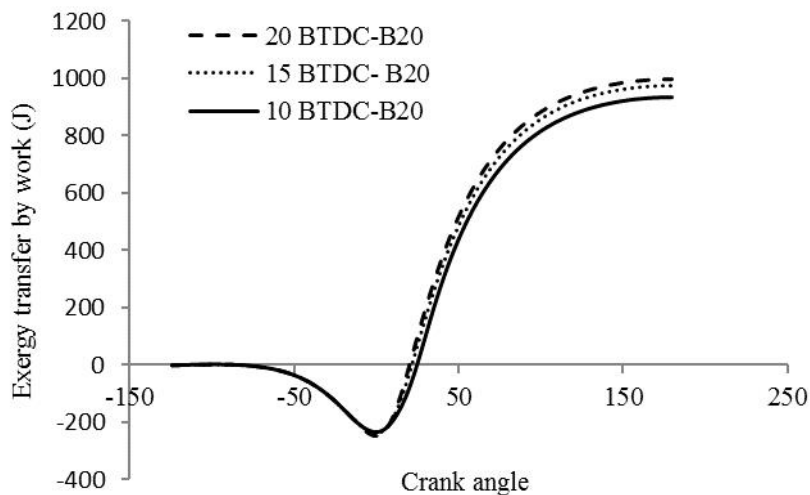


شکل ۳- تغییر پارامترهای قابلیت کاردهی با تغییرات زاویه میل لنگ در دور ۱۶۰۰ rpm و زمان پاشش ۱۵ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا در دو سوخت دیزل (B0) و مخلوط ۲۰٪ بیودیزل (B20)

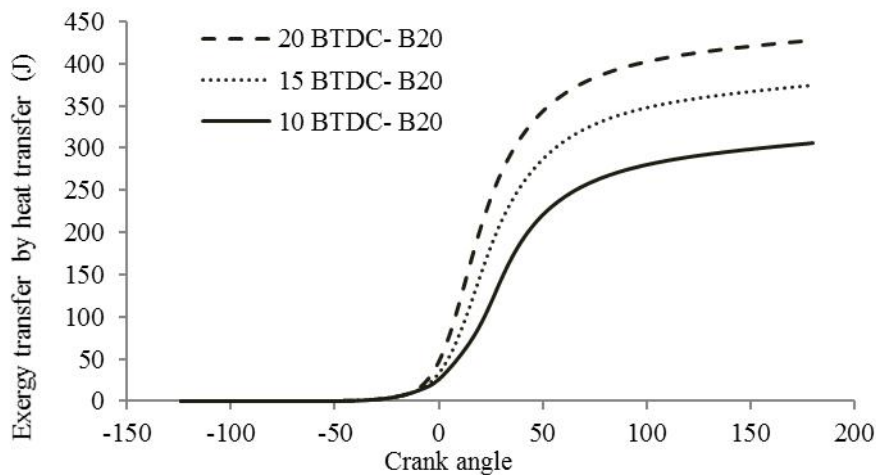
Fig.3. Variation of work availability parameters versus crankshaft angle at 1600 rpm and 15 BTDC injection timing in diesel (B0) and 20% biodiesel blend (B20)

کاهش فشار باعث کاهش میزان قابلیت کاردهی اندیکاتوری می‌شود. با توجه به شکل ۵ جلو انداختن زمان پاشش باعث می‌شود که سوخت تزریق شده به درون سیلندر زمان بیشتری برای آزاد شدن انرژی داشته و در نتیجه باعث افزایش دمای درون سیلندر می‌شود.

در شکل ۴ مشخص است که با عقب انداختن زمان پاشش سوخت به درون سیلندر، احتراق بعد از نقطه‌ی مرگ بالا اتفاق می‌افتد. در این وضعیت آزاد شدن انرژی زمانی شروع می‌شود که پیستون از نقطه‌ی مرگ بالا دور شده و در نتیجه فشار بیشینه‌ی درون سیلندر کاهش یافته و از نقطه‌ی مرگ بالا دور شود (Gumus, 2010) که این



شکل ۴- قابلیت کاردهی اندیکاتوری در زمان‌های مختلف پاشش سوخت
Fig.4. Indicated work availability at different injection timings



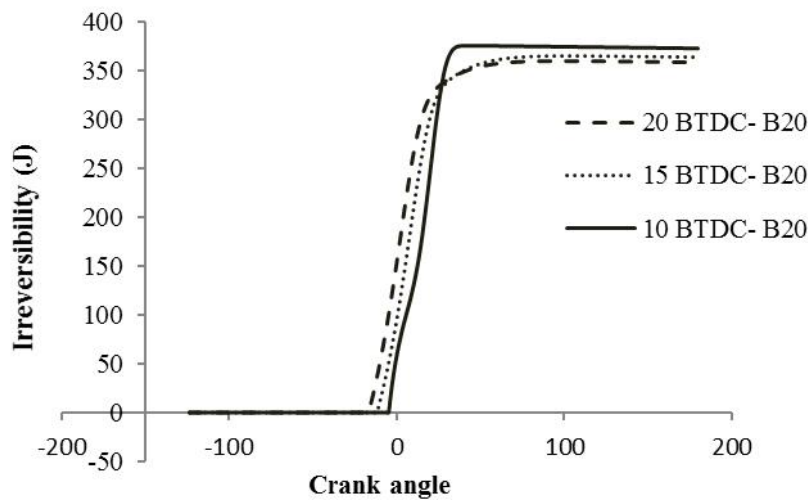
شکل ۵- اکسرژی تلف شده به واسطه‌ی انتقال گرما در زمان‌های مختلف پاشش
Fig.5. Exergy loss with heat transfer at different injection timings

بازگشت‌ناپذیری دارای میزان حداکثر و در زمان پاشش ۲۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا دارای کمترین مقدار می‌باشد که علت آن کاهش دما در زمان پاشش ۱۰ و افزایش دما در زمان پاشش ۲۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا می‌باشد.

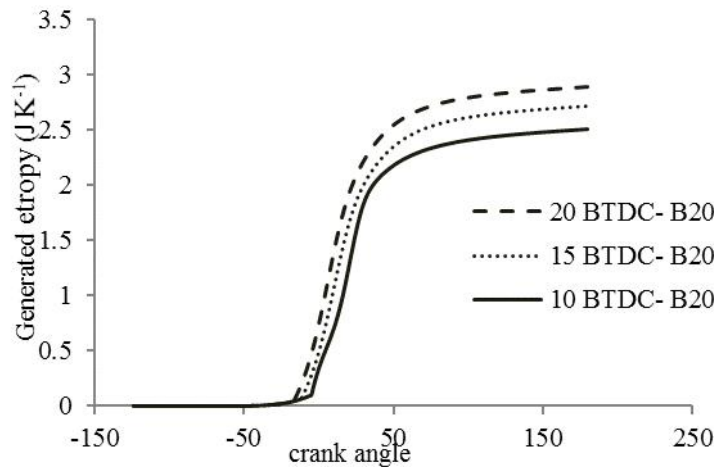
همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، با جلو انداختن زمان پاشش آنتروپی تولید شده ناشی از افزایش دما بیشتر می‌شود (Sezer and Bilgin, 2013). لذا با جلو انداختن زمان پاشش آنتروپی تولیدی افزایش و در حالی‌که زمان پاشش عقب می‌افتد، میزان آنتروپی نیز کاهش می‌یابد (شکل ۷).

با افزایش دما میزان کاردهی تلف‌شده به‌واسطه‌ی انتقال گرما افزایش می‌یابد (Sekmen and Yilba i, 2011). نتایج عکس برای حالتی‌که زمان پاشش در ۱۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا صورت می‌گیرد نیز وجود دارد. به‌عبارت دیگر که با عقب انداختن زمان پاشش سوخت به درون سیلندر زمان کمتری برای آزاد شدن انرژی داشته است. درنتیجه با کاهش دما، میزان کاردهی تلف‌شده به‌واسطه‌ی انتقال گرما کاهش می‌یابد.

شکل ۶ بازگشت‌ناپذیری تولید شده در زمان‌های پاشش را نشان می‌دهد. در زمان پاشش ۱۰ درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا میزان



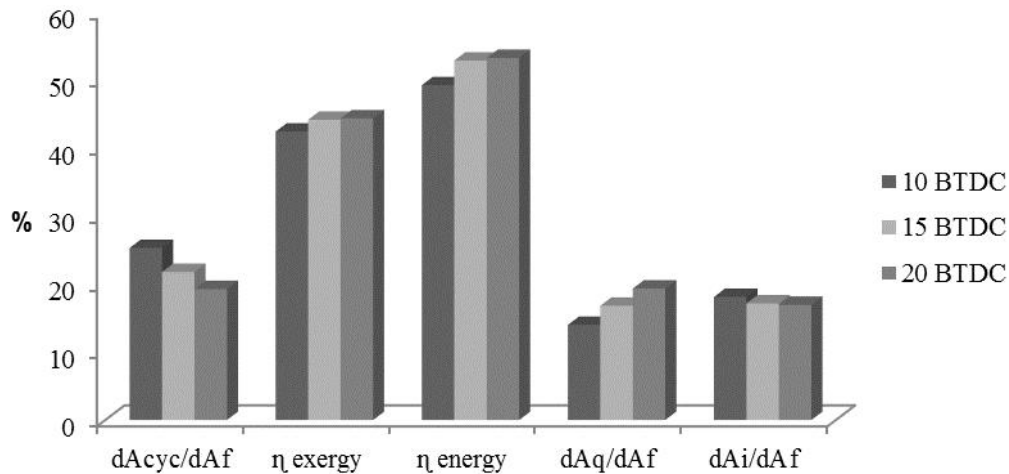
شکل ۶- بازگشت‌ناپذیری در زمان‌های مختلف پاشش
Fig.6. Irreversibility at different injection timings



شکل ۷- آنتروپی تولید شده در زمان‌های مختلف پاشش
Fig.7. Generated entropy at different injection timings

خروجی موتور افزایش می‌یابد (Rostami, 2012). بیشترین گشتاور موتور در دور ۲۰۰۰ و زمان پاشش ۲۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا و برابر با ۱۹۶/۵ نیوتن متر بود. علت افزایش نسبت کاردهی کل به سوخت سوزانده شده را می‌توان کاهش تلفات حرارتی به واسطه‌ی انتقال گرما و زمان کمتر برای انتقال گرما به دیواره‌ی سیلندر در زمان پاشش ۱۰ درجه نسبت به دو زمان پاشش مورد بررسی عنوان کرد. بیشترین نسبت‌های بازگشت‌ناپذیری و قابلیت کاردهی کل به سوخت سوخته شده به ترتیب مربوط به زمان‌های پاشش ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه میل‌لنگ می‌باشند.

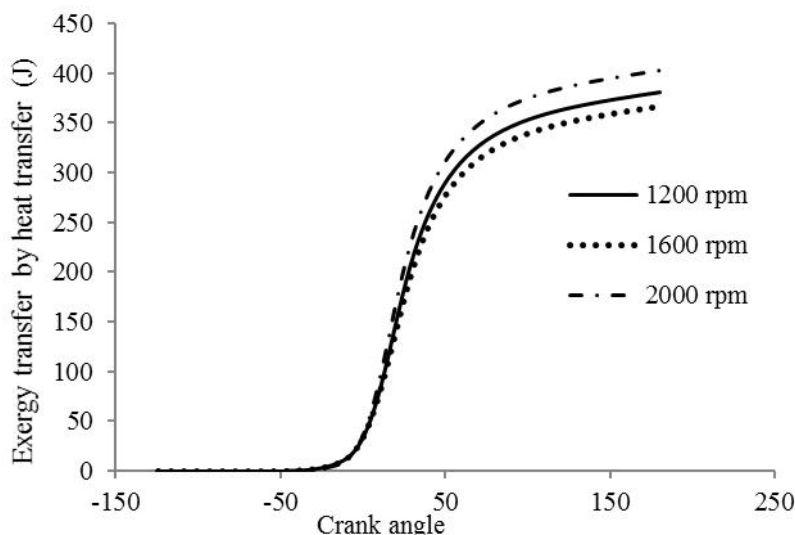
با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که با جلو انداختن زمان پاشش بازدهی انرژی و اکسرژی افزایش و با عقب انداختن زمان پاشش سوخت با کاهش این دو پارامتر روبه رو می‌شویم؛ که علت را می‌توان احتراق بهتر در هنگام جلو انداختن زمان پاشش و افزایش فشار درون سیلندر در اثر نفوذ بیشتر فواره سوخت در داخل هوای موجود در محفظه احتراق و اختلاط بهتر سوخت با هوای درون سیلندر دانست (Gumus, 2010). لذا به‌منظور دستیابی به بازده بیشتر با سوخت B20 در این موتور جلو انداختن زمان پاشش توصیه می‌شود. لازم به ذکر است که با جلو انداختن زمان پاشش گشتاور و توان



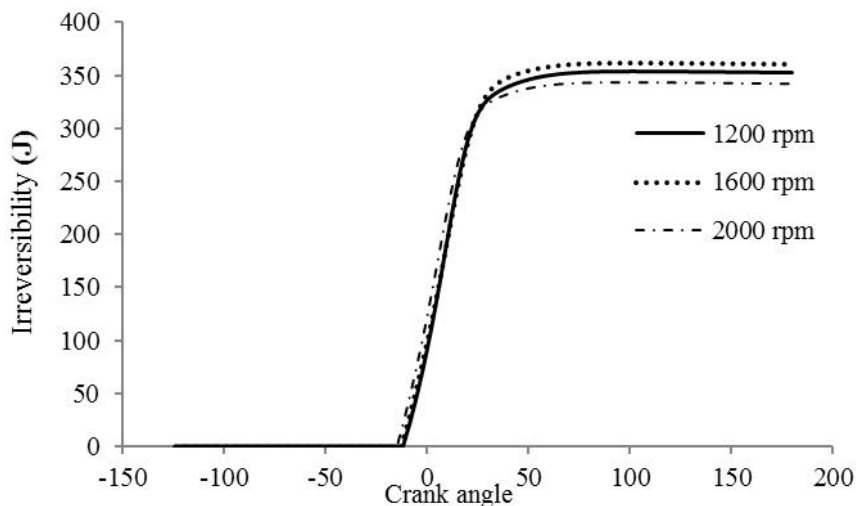
شکل ۸- نتایج حاصل شده از تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی در زمان‌های مختلف پاشش سوخت
Fig.8. The results of the energy and exergy analysis at different injection timings

شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب میزان پارامتر قابلیت کاردهی تلف شده به واسطه‌ی انتقال گرما، بازگشت‌ناپذیری و قابلیت کاردهی کل را در دورهای ۱۲۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۹ با کاهش فشار و دما در سرعت موتور ۱۶۰۰ نسبت به ۱۲۰۰ و همچنین کاهش زمان برای انتقال گرما از گازهای داخل سیلندر به دیواره‌ی سیلندر در سرعت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، کاهش پارامتر قابلیت کاردهی تلف‌شده به واسطه‌ی انتقال گرما انتظار می‌رود، اما در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به علت جلو افتادن زمان پاشش و افزایش در فشار و دما، این پارامتر افزایش داشته است. با قیاس در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که با افزایش دور از ۱۲۰۰ به

۱۶۰۰ دور بر دقیقه، دمای درون سیلندر کاهش و به دنبال آن، بازگشت‌ناپذیری نیز افزایش یافته است. دلیل دمای بیشتر در دور ۱۲۰۰ نسبت به دور ۱۶۰۰ به این علت بود که آزمایشات در بار کامل موتور انجام شد و چون دور ۱۲۰۰ خیلی پایین‌تر از دور بیشینه گشتاور موتور است لذا، دما افزایش می‌یابد. در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه نیز به علت افزایش دمای بالاتر این پارامتر کمترین میزان را دارا می‌باشد. با افزایش سرعت از ۱۲۰۰ به ۱۶۰۰ دور بر دقیقه باعث افزایش اندکی در قابلیت کاردهی کل می‌شود که به خاطر پایین بودن اکسرژی تلف‌شده به واسطه‌ی انتقال گرما می‌باشد.

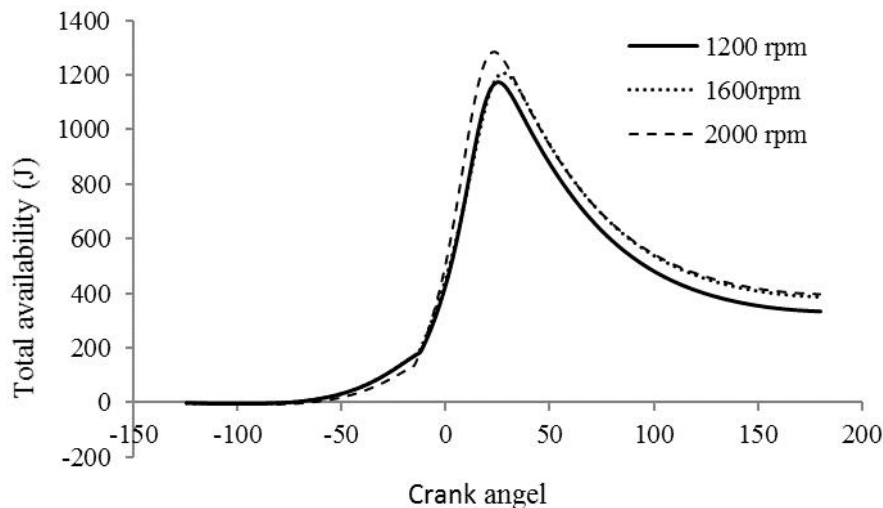


شکل ۹- تأثیر سرعت موتور بر پارامتر کاردهی تلف شده به واسطه انتقال گرما
Fig.9. The effect of engine speed on the exergy loss with heat transfer



شکل ۱۰- تأثیر سرعت موتور بر پارامتر بازگشت ناپذیری

Fig.10. The effect of engine speed on the irreversibility



شکل ۱۱- تأثیر سرعت موتور بر تغییرات پارامتر قابلیت کاردهی کل

Fig.11. The effect of engine speed on the variation of total work availability

گردید.

نتیجه گیری

- ۱- با توجه به شکل ۱، مدل ارایه شده قادر به پیش بینی فشار و دمای سیلندر در زمان های مختلف پاشش با دقت خوبی می باشد.
- ۳- با جلو انداختن زمان پاشش بازدهی انرژی و اکسرژی و قابلیت کاردهی تلف شده به واسطه ی انتقال گرما افزایش یافت.
- ۴- پارامترهای قابلیت های کاردهی سوخت B20 نسبت به سوخت دیزل تاحدودی کمتر می باشند.
- ۵- افزایش در سرعت موتور از ۱۲۰۰ به ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، کاهش در میزان قابلیت کاردهی اندیکاتوری، قابلیت کاردهی تلف شده

اما در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به علت افزایش در میزان کاردهی سوخت سوزانده شده و همچنین کاهش میزان بازگشت ناپذیری این پارامتر افزایش یافته است. نتایج مشابهی در تحقیقات دیگر مشاهده گردید (Jafarmadar and; Rakopoulos and Giakoumis, 2006) در فرمول بالانس قابلیت کاردهی پارامترهای تعیین کننده ی قابلیت کاردهی کل در سرعت های ۱۲۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه اختلاف قابل ملاحظه ای نداشته و تنها تفاوت چشم گیر در قابلیت کاردهی تلف شده توسط انتقال گرما می باشد، لذا این پارامتر غالب بوده و منجر به افزایش اکسرژی کل در سرعت ۱۶۰۰ نسبت به دور ۱۲۰۰ دور بر دقیقه می باشد. از همین رو از ذکر سایر پارامترها که تفاوت چندانی نداشتند در این مقاله صرف نظر

قابلیت کاردهی کل افزایش و پارامتر بازگشت‌ناپذیری نسبت به سرعت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه کاهش یافت.

به‌واسطه‌ی انتقال گرما و کاهش آنتروپی و افزایش بازگشت‌ناپذیری را در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه قابلیت کاردهی تلف شده و

References

1. Awad, S., E. G. Varuvel, K. Loubar, and M. Tazerout. 2013. Single zone combustion modeling of biodiesel from wastes in diesel engine. *Fuel* 106: 558-568.
2. Bari, S., C. Yu, and T. Lim. 2004. Effect of fuel injection timing with waste cooking oil as a fuel in a direct injection diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 218: 93-104.
3. Canakci, M., and M. Hosoz. 2006. Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels. *Energy Sources, Part B* 1: 379-394.
4. Dincer, I. 2000. Thermodynamics, exergy and environmental impact. *Energy sources* 22: 723-732.
5. Dinman, J. D. 2009. The eukaryotic ribosome: current status and challenges. *Journal of Biological Chemistry* 284: 11761-11765.
6. Ferguson, C., and A. Kirkpatrick. 2001. *Internal combustion engine*. Wiley, New York.
7. Fu, J., J. Liu, R. Feng, Y. Yang, L. Wang, and Y. Wang. 2013. Energy and exergy analysis on gasoline engine based on mapping characteristics experiment. *Applied Energy* 102: 622-630.
8. Ghojel, J. I. 1982. A study of combustion chamber arrangements and heat release in DI diesel engines. *SAE Technical Paper*. 821034.
9. Graboski, M. S., and R. L. McCormick. 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 24: 125-164.
10. Gumus, M. 2010. A comprehensive experimental investigation of combustion and heat release characteristics of a biodiesel (hazelnut kernel oil methyl ester) fueled direct injection compression ignition engine. *Fuel* 89: 2802-2814.
11. Haik, Y. M. Y. Selim, and T. Abdulrehman. 2011. Combustion of algae oil methyl ester in an indirect injection diesel engine. *Energy* 36: 1827-1835.
12. Heywood, J. B. 1988. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-hill, New York.
13. Jafarmadar, S., and M. Mansoury. 2015. Exergy analysis of air injection at various loads in a natural aspirated direct injection diesel engine using multidimensional model. *Fuel* 154: 123-131.
14. Jindal, S. 2011. Effect of injection timing on combustion and performance of a direct injection diesel engine running on *Jatropha* methyl ester. *International Journal of Energy and Environment* 2: 113-122.
15. Li, K. W. 1995. *Applied thermodynamics: availability method and energy conversion*. CRC Press.
16. Kegl, B. 2006. Experimental investigation of optimal timing of the diesel engine injection pump using biodiesel fuel. *Energy & Fuels* 20: 1460-1470.
17. Miyamoto, N., T. Chikahisa, T. Murayama, and R. Sawyer. 1985. Description and analysis of diesel engine rate of combustion and performance using Wiebe's functions. *SAE Technical Paper*. 850107.
18. Moran, M. J., H. N. Shapiro, B. R. Munson, and D. P. DeWitt. 2003. *Introduction to thermal systems engineering. Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*, John Wiley & Sons.
19. Nemati, A., V. Fathi, R. Barzegar, and S. Khalilarya. 2013. Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 38: 1189-1199.
20. Parlak, A., H. Ya ar, C. Ha imog˘lu, and A. Kolip. 2005. The effects of injection timing on NOx emissions of a low heat rejection indirect diesel injection engine. *Applied Thermal Engineering* 25: 3042-3052.
21. Primus, R., and P. Flynn. 1986. The assessment of losses in diesel engines using second law analysis. *Computer-Aided Engineering and Energy Systems* 3: 61-68.
22. Prince, R. C., C. Haitmanek, and C. C. Lee. 2008. The primary aerobic biodegradation of biodiesel B20.

- Chemosphere 71: 1446-1451.
23. Rakopoulos, C., and E. Giakoumis. 2006. Second-law analyses applied to internal combustion engines operation. *Progress in Energy and Combustion science* 32: 2-47.
 24. Ramadhas, A. S., S. Jayaraj, and C. Muraleedharan . 2006. Theoretical modeling and experimental studies on biodiesel-fueled engine. *Renewable Energy* 31: 1813-1826.
 25. Rosen, M. A. 2002. Clarifying thermodynamic efficiencies and losses via exergy. *Exergy, an International Journal* 2: 3-5.
 26. Rostami, S. 2012. Theoretical Modeling and Experimental Investigation of Pressure and Injection Timing Effects on a CI Engine Performance Characteristics using Biodiesel Fuel. Ph.D Thesis, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
 27. Sekmen, P., and Z. Yilba i. 2011. Application of energy and exergy analyses to a CI engine using biodiesel fuel. *Mathematical and Computational Applications* 16: 797.
 28. Sezer, ., and A. Bilgin. 2013. Effects of charge properties on exergy balance in spark ignition engines. *Fuel* 112: 523-530.
 29. Woschni, G. 1967. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine. SAE Technical paper. Report no. 0148-791.
 30. Zheng, J., and J. A. Caton. 2012. Second law analysis of a low temperature combustion diesel engine: effect of injection timing and exhaust gas recirculation. *Energy* 38: 78-84.

The effect of injection timing on energy and exergy analysis of a diesel engine with biodiesel fuel

A. Farhadi¹ - S. Rostami^{2*} - B. Ghobadian³ - Sh. Besharati⁴

Received: 21-09-2015

Accepted: 11-01-2016

Introduction

Nowadays, due to higher environmental pollution and decreasing fossil fuels many countries make decisions to use renewable fuels and restrict using of fossil fuels. Renewable fuels generally produce from biological sources. Biodiesel is an alternative diesel fuel derived from the transesterification of vegetable oils, animal fats, or waste frying oils. Considering the differences between diesel and biodiesel fuels, engine condition should be modified based on the fuel or fuel blends to achieve optimum performance. One of the simplest and yet the most widely used models is the thermodynamic model. After verification of the data obtained by model with experimental data it is possible to generalize the extracted data to an unlimited number of functional conditions or unlimited number of fuel types which saves time and reduces costs for experimental engine tests. Using the second law of thermodynamics, it is possible to calculate and analyze the exergy of the engine.⁴

Materials and Methods

In this work, the zero-dimensional model was used to account for internal energy variations, pressure work, heat transfer losses to the solid walls and heat release. The applied assumptions include:

The cylinder mixture temperature, pressure and composition were assumed uniform throughout the cylinder. Furthermore, the one-zone thermodynamic model assumes instantaneous mixing between the burned and unburned gases. The cylinder gases were assumed to behave as an ideal gas mixture, Gas properties, include enthalpy, internal energy modeled using polynomial equations associated with temperature.

In this research, the equations 1 to 20 were used in Fortran programming language. The results of incylinder pressure obtained by the model were validated by the results of experimental test of OM314 engine. Then the effects of injection timing on Energy and Exergy of the engine were analyzed for B20 fuel.

Results and Discussion

Comparing the results of the model with the experimental data shows that there was a good agreement between the model and experimental results. The results showed that advancing fuel injection timing increases the peak cylinder pressure. When fuel injecting occurs before the standard injection timing, the pressure and temperature of the charged air in the cylinder is less than that of the fuel when it is injected at standard injection timing. Thus, ignition delay of the injected fuel extends further. As a consequence, the reaction between fuel and air improves, which prepares a good mixture for burning. When the combustion starts, the rate of heat release increases in the premixed or rapid combustion phase of the combustion process due to the suitability of the mixture of air and fuel and hence the peak pressure of cylinder increases. When the injection timing is retarded, the fuel is injected into charged air that has a high temperature and pressure. Thus, in the injection timing of 10 degrees before top dead center, the maximum of incylinder pressure and temperature are reduced compared to the standard injection timing. By retarding the fuel injection into the cylinder, the indicator availability, the heat loss availability by heat transfer from cylinder walls and irreversibility are increased and by advancing the fuel injection into the cylinder, the indicator availability, the heat loss availability by heat transfer from the cylinder walls and irreversibility are reduced. High temperature will increase the produced entropy, so by advancing the injection timing the produced entropy will increase while the retarding injection timing reduces the produced entropy. Exergy and energy efficiencies increased by advancing the injection timing. At 2000 rpm the total

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

3- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

4- Instructor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

(*- Corresponding Author Email: Rostami.sajad@yahoo.com)

availability and heat loss availability by heat transfer was increased compared to 1200 and 1600 rpm.

Conclusions

The proposed model was able to predict the pressure and temperature of the cylinder at different injection timings. By advancing the fuel injection timing energy and exergy efficiency and heat loss availability by heat transfer was increased. At 2000 rpm the total availability and heat loss availability by heat transfer was increased.

Keywords: Biodiesel, Energy, Exergy, Injection timing

تحلیل کمی و کیفی بیوگاز تولیدی از هضم کود گاوی، فاضلاب شهری و پسماند آشپزخانه

محمود محمودی اشکفتکی^{۱*} - رحیم ابراهیمی^۲ - عبدالله قاسمی پیربلوطی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶

چکیده

در این تحقیق میزان درصد متان تولیدشده در بیوگاز تولیدی برای ترکیبات کود گاوی، پسماند آشپزخانه و فاضلاب شهری، اندازه‌گیری شد. از عوامل مؤثر بر میزان متان تولیدی، ترکیبات فرار شامل ذرات فرار و معلق، شرایط محیطی شامل دما، pH، EC و عناصر موجود در ترکیبات شامل کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سولفات اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد میزان متان تولید شده در سطح ۵ درصد با ذرات فرار و معلق همبستگی دارد. در ضمن در حین هضم مواد pH ثابت باقی ماند و موجب افزایش تولید متان شد. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن بود که تیمارهای دارای مقادیر بیشتر فاضلاب شهری، مقادیر بیشتری ذرات فرار و معلق دارند و تیمارهای دارای مقادیر بیشتری کود گاوی، نسبت کربن به نیتروژن بیشتری داشتند. در این تحقیق متان تولیدی برحسب روابط مختلف از ذرات فرار و معلق مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد بهترین مدل‌های خام ارائه شده برای کلیه پارامترها معادلات درجه دو و سه بود. ضرایب مدل‌ها و بازه تغییرات آن‌ها با نرمال‌سازی داده‌های مربوط به ذرات فرار و معلق محاسبه شد. بهترین مدل به‌دست آمده بین متان تولیدی و تفاضل ذرات فرار و معلق قبل و بعد از هضم بود.

واژه‌های کلیدی: تخمیر بی‌هوازی، ترکیب مواد، ذرات فرار، ذرات معلق جامد، متان

مقدمه

طبق گزارشات ارائه شده از ثابت قدم (۲۰۰۵)، ۵۳/۴ درصد از کل انرژی مصرفی در ایران از فرآورده‌های نفتی، ۳۶/۳ درصد از گاز طبیعی، ۱/۱ درصد از زغال، ۸/۹ درصد از انرژی الکتریسیته و ۰/۲ درصد از انرژی‌های مدرن مانند انرژی خورشیدی، انرژی بیومس، انرژی باد و انرژی هسته‌ای می‌باشد. این در حالی است که استفاده از انرژی‌های پاک روز به‌روز در حال افزایش است، به‌طوری‌که از سال ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۵، استفاده از انرژی الکتریسیته دو برابر شده است و استفاده از گاز طبیعی از ۱/۳ به ۳۶/۳ درصد افزایش یافته و استفاده از فرآورده‌های نفتی از ۸۴/۳ به ۵۳/۴ درصد کاهش یافته است (Sabetghadam, 2005). این کاهش می‌تواند با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر هم شود. با توجه به منابع غنی انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران، در دهه گذشته تحقیق‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته است و پایلوت‌های آزمایشی و صنعتی نیز در

تولید و استفاده از این انرژی‌ها ساخته شده است. اما با توجه به جدید بودن این انرژی‌ها در ایران راه‌های زیادی برای تحقیقات و پیشرفت وجود دارد. به‌طوری‌که با استفاده از این انرژی‌ها در روستاهای دور دست نسبت به مراکز استان‌ها می‌توان هزینه‌های انتقال انرژی را بسیار پایین آورد و امکانات مناسبی برای روستاییان فراهم نمود (Sabetghadam, 2005).

بخش عظیمی از انرژی‌های تجدیدپذیر مربوط به فضولات دامی و گیاهی حاصل از فعالیت‌های دامپروری و کشاورزی می‌باشد. در حالی که استفاده مستقیم از آن‌ها در زمین‌های زراعی و باغی کشور ممکن است، باعث انتقال برخی از بیماری‌ها در سطح کشور شود و یا انباشتن آن‌ها در محیط، برای پوسیدن، باعث ایجاد و انتشار مقداری متان و دی‌اکسید کربن، در اتمسفر می‌گردد که این موضوع می‌تواند باعث تخریب لایه اوزن شود. در صورتی که می‌توان با استفاده از فن‌آوری بی‌هوازی علاوه بر جلوگیری از خطرات فوق‌الذکر، حدوداً ۵۴ میلیون متر مکعب بیوگاز، به‌دست آورد و به‌عنوان منبع انرژی استفاده نمود (Sabetghadam, 2005; Hashemi and Dianat, 2010). به‌طور کلی از سه دیدگاه انرژی، زیست محیطی و اقتصادی، استفاده از منابع بیوانرژی در جهان حائز اهمیت است (Shaygan, 2001). معمولاً بیوگاز با ترکیب کودهای حیوانی، انسانی، مواد غذایی و به‌صورت واکنش بی‌هوازی در یک هاضم به‌وجود می‌آید

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: m.mahmoodi5@gmail.com)

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۳- دانشیار، گروه صنایع غذایی دانشگاه آزاد شهرکرد

جهت تهیه نمونه‌های کود گاوی، مقداری کود تازه گاو از گاوداری دانشگاه شهرکرد تهیه گردید و پس از انتقال به آزمایشگاه به آن آب اضافه شد و با استفاده از همزن مکانیکی مخلوط شده و چگالی آن اندازه‌گیری شد. این عمل مکرراً تکرار گردید تا چگالی آن تا حد امکان نزدیک به $1/0.24 \text{ g ml}^{-1}$ شود.

پسماند آشپزخانه شامل مخلوط میوه و سبزیجات (پوست سیب درختی، انار، سیب زمینی و سبزیجات دورریز) با استفاده از دستگاه سبزی خردکنی تا حد ممکن خرد شد و سپس با استفاده از آسیاب به صورت دستی آسیاب گردید و با اضافه نمودن مکرر آب و اندازه-گیری چگالی مواد حاصل، چگالی مواد تا حد امکان به $1/0.24 \text{ g ml}^{-1}$ نزدیک شد.

در ادامه از هر کدام از مواد آماده شده بالا به میزان $1/8$ لیتر داخل ظروف مخصوصی ریخته شد تا عملیات بی‌هوازی سازی اولیه انجام شود (شکل ۱). ظروف بی‌هوازی ساز مذکور دارای دو لوله مجزا جهت وارد شدن همزمان گاز نیتروژن و خارج شدن هوا بود. برای این منظور از گاز نیتروژن $99/5$ درصد استفاده شد و شیلنگ مربوط به خروج بیوگاز تولیدی در یک طرف آب قرار داده شد تا هوا وارد آن نشود. پس از تزریق گاز نیتروژن به مدت $4-5$ دقیقه در هر ظرف شیلنگ مربوط به تزریق گاز نیتروژن با استفاده از گیره مسدود شد تا مانع ورود هوا به داخل ظروف شود. این تجهیزات به مدت $4-6$ روز به همین حالت رها و هر 8 ساعت یکبار ظروف به آرامی تکان داده شد و مشاهده گردید (Fantozzi and Buratti, 2011). در صورتی که بیوگاز تولیدی از شیلنگ تخلیه وارد ظرف آب شود، حباب‌هایی از داخل آب بالا می‌آید که نشان‌دهنده درستی عملیات‌ها می‌باشد. این عملیات‌ها برای هر سه ظرف حاوی مواد انجام گرفت. پس از 6 روز، مواد داخل بطری‌های کوچک‌تر (بطری‌ها با حجم 250 میلی‌لیتر) ریخته شد. بر روی درب بطری‌ها قبل از ریختن مواد سوراخ‌هایی قرار داده شد تا برداشت گاز از بطری‌ها از طریق این سوراخ‌ها انجام گیرد. از داخل و بیرون درب آن‌ها بر روی این روزنه‌ها چسب سیلیکون زده شد تا روزنه‌ها را ببندد. در ضمن منعطف باشد تا سوزن سرنگ بتواند وارد بطری شود. این کار باعث می‌شود واکنش‌های انجام گرفته در بطری‌ها کاملاً بی‌هوازی باشند. سه ماده‌ای که به‌طور مجزا بی‌هوازی شده بودند (سوپسترا) در بطری‌های آماده شده تحت سه تکرار و در 7 تیمار موجود در جدول ۱ با هم ترکیب شدند. نمونه‌ها در پایان در یک حمام آب گرم در 37 درجه سلسیوس نگهداری شدند (Martin, 2008). استفاده از حمام آب گرم به جای انکوباتور^۴ به دو دلیل انجام گرفت: ۱- نزدیک کردن شرایط آزمایشگاه به شرایط واقعی و ۲- بیشتر بودن ضریب

(Arsova, 2010; Budiyo et al., 2010). عوامل مختلفی بر میزان تولید بیوگاز/متان مؤثر می‌باشند که عبارتند از: درصد ترکیب مواد مختلف، شرایط محیطی واکنش‌ها، ذرات فرار و عناصر موجود در ترکیبات. درصد ترکیب مواد مختلف بر میزان تولید گاز متان مؤثر است. در تحقیق‌های انجام شده ترکیب یک به یک مواد، درصد متان بیشتری را تولید کرده است (Chen et al., 2010). پارامترهای محیطی مانند دما، pH و سمی شدن مواد داخل هاضم در تولید بیوگاز/متان بسیار مهم است و مطالعات نشان می‌دهد با افزایش دما، کاهش pH و سمی شدن محیط، باکتری‌های متان‌زای داخل هاضم، می‌میرند و تولید گاز متان متوقف می‌شود. در ضمن مدت زمان تولید متان نیز بسیار اهمیت دارد و عوامل مختلفی مانند ذرات فرار و ترکیبات فیزیکی و شیمیایی مواد مورد استفاده در آن مؤثر هستند (Miller and Keeney, 1992; Martin, 2008). بنابراین اهداف مورد نظر این تحقیق شامل:

- ۱- بررسی میزان (درصد) تولید متان در بیوگاز تولیدی ناشی از ترکیب‌های مختلف کود گاوی، فاضلاب شهری و پسماند آشپزخانه؛
- ۲- بررسی اثر عوامل مختلف فیزیکی و شیمیایی محیط آزمایش مانند pH، ذرات معلق و جامد و غیره بر میزان تولید متان و مدت زمان تولید آن؛
- ۳- تعیین پارامترهایی که همبستگی بیشتری با متان تولیدی دارند و مدل‌سازی متان تولید شده با این پارامترها.

مواد و روش‌ها

آماده سازی نمونه

مواد اولیه استفاده شده جهت هضم همزمان و تولید بیوگاز، کود گاوی، پسماند آشپزخانه و فاضلاب شهری بودند. جهت آماده‌سازی اولیه آنها سعی شد تا حد امکان چگالی اولیه مواد یکسان باشند. هدف از این کار ایجاد مواد اولیه تا حد امکان مشابه بود. البته آماده‌سازی مواد می‌تواند براساس TS^۱ مواد نیز انجام گیرد، اما با توجه به این‌که یکی از اهداف تحقیق مقایسه TS و VS^۲ مواد است، آماده‌سازی اولیه مواد براساس چگالی انجام گرفت.

فاضلاب شهری از سازمان آب و فاضلاب شهرکرد و از مواد بعد از عملیات آسیاب و آب‌شویی اولیه تهیه شدند. چگالی آن با تقسیم وزن مقدار مشخصی از مخلوط بر حجم نمونه محاسبه شد. جهت اندازه‌گیری چگالی کلی نمونه، 2 لیتر از فاضلاب تهیه شده وزن گردید که چگالی آن برابر $1/0.24 \text{ g ml}^{-1}$ به دست آمد، همان‌طور که مشخص است، چگالی آن بسیار نزدیک به 1 (چگالی آب) می‌باشد و این نشان می‌دهد که ماده استفاده شده دارای مقدار زیادی آب است (Fantozzi and Buratti, 2009; Chandra et al., 2012).

3- Substrate
4- Incubator

1- Total solid
2- Volatile solid

هریک از سه سوبسترا شامل ذرات جامد و فرار، کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، سولفات، EC و pH قبل و بعد از ۴۰ روز هضم بی‌هوازی اندازه‌گیری شد.

انتقال حرارت آب نسبت به هوا. بطری‌ها در داخل حمام به مدت ۴۰ روز قرار داده شد و هر ۵ یا ۶ روز یکبار میزان متان تولیدی از هر کدام از بطری‌ها اندازه‌گیری شد. یک سری از عناصر و پارامترهای مؤثر در

جدول ۱- ترکیب‌های مختلف مواد بی‌هوازی شده با هم جهت تولید بیوگاز

Table 1- Different combination of anaerobic co-digestion substrates to produce biogas

تیمار	فاضلاب شهری (گرم)	کود گاوی (گرم)	پسماند آشپزخانه (گرم)
Treatment	Municipal waste (g)	Cow manure (g)	Kitchen waste (g)
1	200	0	0
2	0	200	0
3	0	0	200
4	66.67	66.67	66.67
5	100	100	0
6	0	100	100
7	100	0	100



شکل ۱- رآکتورهای دست‌ساز برای بی‌هوازی نمودن اولیه مواد

Fig. 1. Hand-made reactors for primary anaerobic the substrates

نیتروژن (N) با استفاده از دستگاه کج‌دال^۲، فسفر (P) با استفاده از اسپکتروفوتومتر^۳، پتاسیم (K) با استفاده از فلیم فوتومتر^۴، سولفات (SO₄²⁻) به روش وزن‌سنجی، EC و pH با استفاده از دستگاه‌های pH متر و EC متر و به روش‌های موجود در “Standard Method for the Examination of Water and Wastewater” اندازه‌گیری شدند.

جهت اندازه‌گیری گاز متان تولید شده از هر بطری، بطری‌های حاوی مواد هر ۵ یا ۶ روز یکبار با استفاده از یک فلاسک ۴/۵ لیتری به شرکت گاز شهرکرد منتقل شده و با استفاده از سرنگ همپلتون، ۱۰۰ μl از گاز تولید شده از بالای هر کدام از بطری‌ها استخراج شده و در دستگاه گازسنج مدل GT-42 موجود در اداره گاز تزریق شد. این

اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی

ذرات جامد معلق (TS) و ذرات فرار (VS) مواد قبل و بعد از هضم براساس روش‌های استاندارد موجود در *Method 1684* و *CEN/TS 15148* و از بطری‌های حاوی تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شدند (Al-Rousan and Zyadin, 2014).

طبق تحقیقات دیگر محققین بعضی از عناصر موجود در سوبسترا اثر بسیار زیادی در تولید متان/بیوگاز دارند (Chen et al., 2010) و با اندازه‌گیری آن‌ها می‌توان توجیه‌های مناسبی از تولید گاز متان/بیوگاز حاصل از ترکیبات مختلف مواد و عناصر داشت. عناصر اندازه‌گیری شده در این تحقیق همراه با روش‌های اندازه‌گیری آن‌ها عبارتند از:

کربن (C) به روش تیتراسیون^۱ (Rongping et al., 2010)،

2- Kejeldahl

3- Spectrophotometer

4- Flame photometer

1- Titration

(خرده‌های میوه و سبزیجات) با آب بود که باعث افزایش ذرات معلق موجود در مایع شد و چگالی را بالا برد. با بررسی TS و VS می‌توان تغییرات چگالی را بیشتر توجیه نمود. در جدول ۲ میانگین TS و VS مربوط به تیمارها ارائه شده است. با توجه به نتایج در اکثر تیمارها، ذرات معلق موجود در ۲۰ ml از محلول انتخاب شده کاهش یافته است و تنها در تیمارهایی که حاوی پسماند آشپزخانه است، این کاهش کمتر بوده است. این امر بر روی تولید طولانی‌تر بیوگاز/امتان در این تیمارها اثرگذار است. بیشترین کاهش TS قبل و بعد از هضم مربوط به تیمار ۱ است و نشان‌دهنده این است که ذرات معلق جامد موجود در فاضلاب شهری در اثر هضم و تولید بیوگاز کاهش بیشتری پیدا کرده است که ناشی از هضم بیشتر آن است. این امر می‌تواند به دلیل میزان بالای نیتروژن نسبت به کربن در فاضلاب شهری باشد که باعث واکنش فعال‌تر، سوختن و هضم مواد موجود در فاضلاب شهری و نهایتاً تولید متان بیشتر می‌شود (Rongping et al., 2010; Chen et al., 2010; Rousan and Zyadin, 2014). با مقایسه نتایج موجود در جدول ۲ و شکل ۲ در تیمارهایی که TS کاهش بیشتری یافته است، متان/بیوگاز بیشتری نیز تولید شده است. به طوری که همبستگی بین تغییرات TS در اثر هضم با تولید متان در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

نتایج نشان داد بیشترین میزان VS در تیمارهای ۲ و ۵ که دارای مقادیر بیشتری کود گاوی بودند و همچنین کمترین میزان VS نیز در تیمارهای ۳ و ۷ که حاوی مقادیر بیشتر پسماند آشپزخانه هستند، وجود دارد (جدول ۲). به طوری که متان تولیدی با VS اولیه مواد در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. در تیمارهایی که کاهش بیشتر VS اتفاق افتاده است، میزان متان بیشتری تولید شده است (تیمارهای ۲ و ۵). این موضوع بیانگر این واقعیت است که کود گاوی به خوبی می‌تواند تولید بیوگاز/امتان کند. البته TS نیز در این دو تیمار کاهش یافته، اما میزان کاهش آن چشمگیر نیست. بنابراین مشخص است که VS و TS تأثیر زیادی بر متان تولید شده دارند. همبستگی بین متان تولید شده در تیمارهای مختلف با TS و VS نیز این موضوع را به خوبی تأیید می‌کند. البته از جدول ۲ هم دیده می‌شود که همبستگی بین میزان متان تولید شده و VS نهایی بیشترین مقدار است (۰/۸۲-).

این نتایج با تحقیقاتی دیگر محققین در مورد وابسته بودن میزان متان تولیدی از هضم بی‌هوازی مواد باز یافتی با ذرات فرار و معلق آن‌ها مشابه بود (Al-Rousan and Zyadin, 2014). نتایج نشان داد که علی‌رغم TS بالای پسماند آشپزخانه اما VS آن کم است و مشخص است که با اینکه ذرات جامد معلق در محلول بالاست اما ذرات فرار آن کم می‌باشد. این نتایج با تحقیقاتی دیگر محققین مشابه است (Chen et al., 2010).

دستگاه دارای یک پمپ است که گاز را از محیط اطراف آن به داخل دستگاه منتقل کرده و میزان متان تولیدی از کل بیوگاز تولید شده را برحسب حالت‌های ppm (ذرات در میلیون) $10000-100000$ LEL^۱ (کمترین حد اشتعال) $100-1000$ درصد و VOL (حجمی) $100-1000$ درصد اندازه‌گیری می‌کند. محدوده دمایی و رطوبتی که دستگاه قادر به اندازه‌گیری گاز می‌باشد در بازه ۲۰- تا ۵۰ درجه سلسیوس و ۰ تا ۹۵ درصد رطوبت نسبی می‌باشد. قابل ذکر است اگر میزان متان تولیدی کم باشد، آن را برحسب ppm نشان می‌دهد و در صورت تولید بیشتر، میزان گاز تولیدی را برحسب LEL بیان می‌کند (یک LEL کمترین میزان غلظت متان در گاز موجود است که باعث اشتعال می‌شود و برای متان $LEL=500$ ppm است). همان‌طور که گفته شد، به‌طور کلی ۷ ترکیب از مواد مختلف وجود داشت که در ۳ تکرار استفاده شد و بنابراین تعداد کل نمونه‌ها ۲۱ عدد شد. با توجه به اینکه ۸ بار تست گازسنجی روی همه نمونه‌ها انجام گرفت، تعداد کل آزمایش‌های اندازه‌گیری گاز ۱۶۸ بار شد. این آزمایش‌ها بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است، بنابراین در این تحقیق از نتایج آزمایشی به‌دست آمده، جهت ایجاد مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود تا موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت آزمایش‌ها برای دیگر محققین شود.

نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، سعی گردید چگالی کلی مواد اولیه آماده شده جهت هضم $1/024 \text{ g ml}^{-1}$ باشد. این اندازه چگالی مربوط به ۲ لیتر از هر کدام از سه ماده اولیه است. با توجه به این که نمونه‌ها ۴-۶ روز در ظروف بی‌هوازی‌ساز اولیه قرار داده شد، میزان متلاشی شدن مواد جامد در آب در سه ماده تغییر می‌کند و در ضمن پراکنش مواد جامد در آب کاملاً یکنواخت نخواهد بود. بنابراین جهت ادامه آزمایشات مجدداً 20 ml نمونه‌گیری شد. چگالی 20 ml مایع برداشته شده از فاضلاب شهری قبل از هضم $1/068 \text{ g ml}^{-1}$ ، کود گاوی $1/093 \text{ g ml}^{-1}$ و پسماند آشپزخانه $0/996 \text{ g ml}^{-1}$ بود. بعد از هضم مواد (تخلیه مواد از بطری‌ها پس از ۴۰ روز هضم بی‌هوازی) مجدداً 20 ml ماده از نمونه‌ها برداشته شد و چگالی مواد مذکور به ترتیب برابر $1/005 \text{ g ml}^{-1}$ ، $1/003 \text{ g ml}^{-1}$ و $1/002 \text{ g ml}^{-1}$ شد. با توجه به این که میزان آب در مواد خیلی زیاد است، با انجام واکنش‌ها و کاهش ذرات فرار و معلق در مواد باید چگالی‌ها به چگالی آب نزدیک‌تر شود و این موضوع به خوبی در مواد بعد از واکنش‌ها مشهود شد. همان‌طور که مشخص است، چگالی فاضلاب شهری و کود گاوی کاهش یافته است، در حالی که چگالی پسماند آشپزخانه افزایش یافته است. دلیل این امر متلاشی شدن خرده‌های میوه و سبزیجات بعد از هضم داخل آب و یکنواخت‌تر شدن ترکیب مواد جامد

جدول ۲- مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن بر روی تغییرات ذرات معلق و فرار موجود در تیمارهای مورد استفاده در تولید متان

Table 2- Average compressions of volatile and total solid differences by Duncan on the treatments used for methane production

پارامتر Parameter	تیمار Treatment							همبستگی با متان Correlation with methane
	1	2	3	4	5	6	7	
First TS (mg l ⁻¹)	6784.86 ^a	4415.65 ^b	3407.24 ^c	3456.24 ^c	3532.46 ^c	3426.23 ^c	3413.92 ^c	0.50*
Final TS (mg l ⁻¹)	3576.24 ^a	1894.81 ^c	1882.38 ^c	1816.53 ^c	1930.69 ^c	1848.13 ^c	2562.03 ^b	0.36 ^{ns}
First VS (mg l ⁻¹)	3235.26 ^b	3460.94 ^a	812.86 ^f	3097.01 ^c	3703.29 ^a	2791.29 ^d	2617.16 ^e	0.58**
Final VS (mg l ⁻¹)	624.75 ^b	187.53 ^e	117.87 ^e	742.60 ^a	818.76 ^a	487.77 ^c	398.21 ^d	0.82**
First TS-Final TS (mg l ⁻¹)	3208.62 ^a	2520.84 ^b	1524.86 ^c	1639.71 ^c	1601.77 ^c	1578.1 ^c	851.88 ^d	0.51*
First VS-Final VS (mg l ⁻¹)	2610.51 ^c	3273.40 ^a	694.99 ^e	2354.42 ^c	2884.52 ^b	2303.52 ^d	2218.95 ^d	0.41 ^{ns}
Methane (ppm)	4117.28 ^a	880.89 ^e	165.60 ^f	3401.76 ^b	2858.17 ^c	2542.46 ^d	186.73 ^f	

پارامترهای اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف با حروف مختلف تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ دارند.

Parameters with different letters have significant differences at probability level 5%

^{ns} معنی‌دار نبودن، * معنی‌داری در سطح ۵٪ و ** معنی‌داری در سطح ۱٪

^{ns} not significant; * significant at level 5%; ** significant at level 1%

و تنها در پسماند آشپزخانه کمی حالت قلیایی دارد. پس از انجام واکنش‌ها، pH تغییر چشمگیری نکرده است، این در حالی است که در نتایج دیگر محققین بیان شده است که با انجام واکنش‌ها در زمان طولانی، محیط باید اسیدی شود و pH کاهش یابد (Fantozzi and Buratti, 2009, 2011).

از دیگر عناصر بسیار مؤثر در تولید گاز متان در واکنش بی‌هوازی C و N است که C تعیین‌کننده مقدار گاز متان و N عامل سوخت و ساز و واکنش در محیط می‌باشد. نسبت C/N پارامتر بسیار مؤثری در تولید متان است. براساس تحقیق‌های دیگر محققین نسبت C/N بین ۲۰ تا ۳۰ برای انجام واکنش‌های بی‌هوازی و تولید گاز متان بسیار مناسب است (Chen *et al.*, 2010; Chandra *et al.*, 2012). همان‌طور که در جدول ۳ هم آمده است در ابتدای واکنش‌ها نسبت C/N کود گاوی ۳۰ است و در محدوده مناسب است. این نسبت قدرت کود گاوی در تولید متان را نشان می‌دهد. در فاضلاب شهری این نسبت ۱۵/۶ است و پایین‌تر از محدوده مناسب است، اما همان‌طور که در سطر آخر جدول ۳ هم مشخص است، پایین بودن نسبت C/N به‌خاطر مقدار زیاد N است، جایی‌که میزان C در فاضلاب شهری خیلی بیشتر از کود گاوی است. این موارد نشان می‌دهد که با شروع واکنش‌ها به‌خاطر N بیشتر موجود در فاضلاب شهری میزان متان تولیدی آن در ابتدای واکنش‌ها بیشتر از کود گاوی خواهد بود. اما با توجه به محدوده مناسب C/N در کود گاوی، این ماده هم می‌تواند

آنها بیان کرده بودند که به‌خاطر آب زیاد موجود در پسماند آشپزخانه VS آنها کم است. از طرف دیگر همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، میزان متان تولیدی در این تیمارها کم بوده یا سریع کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۲ با مخلوط کردن هر سه ماده در تیمارهای ۴-۷، مقدار VS قبل و بعد از هضم به‌طور متوسط بیشتر می‌شود و میزان کاهش VS قبل و بعد از هضم نیز در این تیمارها کمتر می‌شود و نشان می‌دهد که با ترکیب مواد می‌توان در مدت طولانی‌تری بیوگاز/متان تولید نمود. آنالیزهای انجام گرفته به روش دانکن^۱ مشخص کرد که ترکیب مختلف مواد اثرات معنی‌داری بر روی ذرات فرار، معلق و میزان متان تولیدی دارند. به‌طوری‌که میانگین این پارامترها در اکثر ترکیبات اختلاف معنی‌داری دارند.

علی‌رغم همبستگی بالای متان تولید شده با ذرات فرار و معلق، پارامترهای دیگری از مواد نیز وجود دارند که بر میزان متان تولیدی اثرگذار هستند. بعضی از مهمترین آن‌ها عبارتند از میزان C، N، pH، EC، P، K، SO₄²⁻ و غیره (Chen *et al.*, 2010; Chandra *et al.*, 2012; Al-Rousan and Zyadin, 2014). مقادیر این پارامترها و عناصر برای هر سه سوپسترا قبل و بعد از هضم در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۳ pH مواد قبل از هضم در حد خنثی بوده است

1- Duncan

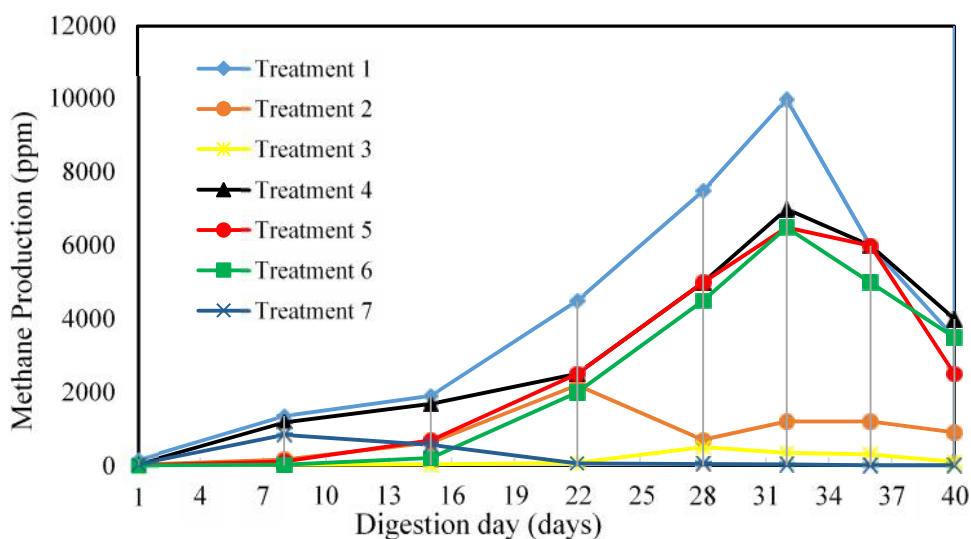
در تیمارهایی که حاوی کود گاوی و فاضلاب شهری هستند می‌توان همچنان انتظار تولید بالای متان داشت. در ضمن محدوده مناسب‌تر C/N در کود گاوی نسبت به فاضلاب شهری قدرت بیشتر کود گاوی نسبت به فاضلاب شهری در تولید متان برای بلند مدت را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده را می‌توان با بررسی روند تولید متان در طول ۴۰ روز در شکل ۲ بررسی نمود.

به‌خوبی متان تولید کند. بالا بودن میزان C و N در فاضلاب شهری باعث انجام واکنش‌های بیشتر در این ترکیبات شده و متان تولیدی بالا می‌رود اما با انجام واکنش‌ها، N نسبت به C بیشتر کاهش یافته و باعث شده است نسبت C/N پس از واکنش‌ها بیشتر شود (۲۴/۶۱-). در حالی که در کود گاوی کاهش C/N کم بوده و در محدوده مناسب باقی مانده است (۲۵/۴۷-). این نتایج نشان می‌دهد

جدول ۳- پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده از سوبستراها قبل و بعد از هضم

Table 3- Physico-chemical properties of substrates before and after digestion

پارامتر Parameter	قبل از هضم Before digestion			بعد از هضم After digestion		
	فاضلاب شهری Municipal waste	کود گاوی Cow dung	پسماند آشپزخانه Kitchen waste	فاضلاب شهری Municipal waste	کود گاوی Cow dung	پسماند آشپزخانه Kitchen waste
	pH	7.62	7.50	8.20	7.42	7.91
EC (ds m ⁻²)	2.50	1.76	2.40	1.82	1.83	1.68
C (%)	35.90	15.90	15.40	22.40	10.70	5.40
N (%)	2.30	0.53	1.98	0.91	0.42	0.45
K (ppm)	167.5	135.0	140.0	91.4	244.3	212.2
P (ppm)	28.06	20.70	11.82	10.77	8.04	7.20
SO ₄ ²⁻	3.14	2.42	2.39	1.43	0.83	1.49
C/N	15.60	30.00	7.78	24.61	25.47	12.00



شکل ۲- حجم متان موجود در بیوگاز تولید شده از هضم سوبستراها در تیمارهای ۱-۷ برای روزهای آزمایش

Fig. 2. Methane contents of biogas produced from digestion of substrates in various treatments of 1-7 for test days

قابل تشخیص است. در تیمار ۲ مقدار C و N مناسب است، اما با توجه به کاهش سریع VS در این تیمار، در پایان واکنش‌ها تولید متان متوقف شده است که مشابه نتایج (Chandra et al., 2012; Al-Rousan and Zyadin, 2014) می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تنها عناصر C و N بر میزان تولید متان مؤثر نیست، بلکه پارامترهای مختلفی بر تولید متان اثرگذار خواهند بود که در این تحقیق بعضی از این پارامترها در حد امکان بررسی شدند.

با توجه به شکل ۲ تیمارهای ۱، ۴، ۵ و ۶ پس از ۴۰ روز قادرند همچنان متان تولید نمایند و تیمارهای ۲، ۳ و ۷ دیگر قادر به تولید متان نیستند. طبق بررسی‌های قبل، تیمارهای ۳ و ۷ به دلیل کم بودن عنصر C و بالا بودن نسبی N نسبت به C، سریع‌تر واکنش داده و به سرعت تولید متان آن پایان می‌یابد، همچنین کم بودن میزان VS در این دو تیمار نیز از عوامل مؤثر بر کم بودن تولید بیوگاز/متان می‌باشد. این موضوع از مقادیر به‌دست آمده از VS در جدول ۲ نیز به‌خوبی

به صورت زیر انتخاب شد.

$$F(x,y) = p_{00} + p_{10}x_1 + p_{01}x_2 + p_{20}x_1^2 + p_{11}x_1x_2 + p_{02}x_2^2$$

مدل ۲: مدل سازی میزان متان تولید شده بر حسب VS اولیه و نهایی مواد ($x_2=VS_2$, $x_1=VS_1$); متغیر x_1 با میانگین ۲۸۱۷ و انحراف معیار ۹۲۰/۸ و متغیر x_2 با میانگین ۴۸۲/۵ و انحراف معیار ۲۵۶ در سطح اطمینان ۹۵ درصد نرمال سازی شد. مدل خام اولیه از نوع معادله چندجمله‌ای درجه ۳ به صورت زیر انتخاب شد.

$$F(x,y) = p_{11} + p_{10}x_1 + p_{01}x_2 + p_{20}x_1^2 + p_{11}x_1x_2 + p_{02}x_2^2 + p_{30}x_1^3 + p_{21}x_1^2x_2 + p_{12}x_1x_2^2 + p_{03}x_2^3$$

مدل ۳: مدل سازی میزان متان تولید شده بر حسب تفاضل VS و TS ($x_2=VS_1-VS_2$ و $x_1=TS_1-TS_2$); متغیر x_1 با میانگین ۱۸۴۷ و انحراف معیار ۷۵۴ و متغیر x_2 با میانگین ۲۳۳۴ و انحراف معیار ۷۸۱/۹ در سطح اطمینان ۹۵ درصد نرمال سازی شد. مدل خام اولیه از نوع معادله چندجمله‌ای درجه ۳ به صورت زیر انتخاب شد.

$$F(x,y) = p_{11} + p_{10}x_1 + p_{01}x_2 + p_{20}x_1^2 + p_{11}x_1x_2 + p_{02}x_2^2 + p_{30}x_1^3 + p_{21}x_1^2x_2 + p_{12}x_1x_2^2 + p_{03}x_2^3$$

همان طور که توضیح داده شد بعد از نرمال سازی داده‌های مربوط به VS و TS، از نرم افزار MATLAB (2013b) جهت مدل سازی متان بر حسب داده‌های نرمال شده استفاده شد. برای این منظور ابتدا مدل خام اولیه انتخاب شد و سپس با استفاده از نرم افزار، ضرایب مربوط به مدل، همراه با دقت آن محاسبه شد و بر حسب متغیرهای مستقل x_1 و x_2 ارائه شد. ضرایب مربوط به مدل‌ها و بازه تغییرات آن‌ها در جدول ۴ و پارامترهای مربوط به دقت مدل‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

دقت مدل با استفاده از پارامترهای ضریب تشخیص (R^2), ضریب تشخیص تعدیل شده ($Adjusted R^2$), مجموع مربعات خطا (SSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بیان شد. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که مدل ۳ بهترین دقت را در بین مدل‌های ارائه شده، دارد. کمترین SSE و RMSE و بیشترین R^2 و Adjusted R^2 را نشان می‌دهد. البته دقت مدل ۲ نیز که برگرفته از پارامترهای VS اولیه و نهایی که دارای بیشترین همبستگی با متان تولید شده است نیز بسیار مناسب می‌باشد، اما دقت مدل ۱ پایین می‌باشد و قابل استفاده در تخمین متان تولیدی نیست.

در شکل ۳ نمودار سه بعدی هر کدام از مدل‌ها همراه با نمودار باقی مانده آنها برای داده‌های آزمایشی ترسیم شده است. طبق نتایج به دست آمده از مدل‌ها مشخص است که صرفاً زیاد بودن مقدار VS یا TS به تنهایی باعث بالا بودن میزان تولید گاز متان نمی‌شود، بلکه در محدوده خاصی از مقادیر TS و VS بیشترین میزان گاز متان تولید می‌شود.

میزان (درصد) متان تولید شده در روزهای مختلف و در تیمارهای مختلف اندازه گیری شد و میانگین گاز تولید شده برای ۳ تکرار از هر تیمار در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که از جدول ۲ هم مشخص است، میزان متان تولید شده از ترکیبات مختلف سه سوپسترا با هم اختلاف معنی داری دارند. با توجه به شکل ۲ در اکثر تیمارها، گاز تولید شده در ششمین آزمایش بیشترین مقدار است. این نتایج نشان می‌دهد، بیشترین تولید گاز متان در کلیه تیمارها مورد بررسی در این تحقیق بین ۳۰ تا ۳۵ روز اتفاق می‌افتد. این زمان توسط دیگر محققین نیز بررسی شده است که بر اساس مواد استفاده شده و شرایط هضم مقادیر مختلفی از ۲۵ تا ۴۵ ارائه شده است (Fantozzi and Buratti, 2009, 2011; Chandra et al., 2012). نتایج نشان داد مقدار TS از شروع واکنش‌ها تا پایان آن در فاضلاب شهری، کود گاوی و پسماند آشپزخانه به ترتیب ۴۶، ۵۷ و ۴۶ درصد کاهش و مقدار VS، ۸۲، ۹۲ و ۸۵ درصد کاهش یافته است، در حالی که میزان متان تولید شده نیز برای سه سوپسترا به ترتیب ۴۳۶۳/۲، ۸۷۵/۱۲ و ۱۶۹/۱۲ ppm به دست آمد.

به طور کلی نتایج این تحقیق مشخص کرد میزان متان تولیدی از فاضلاب شهری بیشتر از کود گاوی و آن نیز بیشتر از پسماند آشپزخانه می‌باشد. البته نتایج نشان داد که با ترکیب مواد مختلف (تیمار ۴) می‌توان میزان و تداوم تولید گاز متان را بالا برد (شکل ۲). به طور متوسط یکی از بهترین حالتی که بیشترین میزان گاز متان تولید شد ترکیب ۱، ۱، ۱ مواد بود. از زمان باستان مشخص شده است که به طور سنتی ترکیب مختلف مواد در هاضم‌ها میزان بیشتری بیوگاز/متان تولید می‌کند (Omran, 1996)، اما توجه مناسبی برای آن وجود ندارد که در این تحقیق تا حدی دلایل آن بررسی و کشف شد.

جهت بررسی میزان تولید متان خارج از محدوده‌های اندازه گیری، می‌توان میزان متان تولید شده را نسبت به پارامترهایی که با آن همبستگی بالایی دارند، مدل سازی نمود. طبق نتایج به دست آمده در این تحقیق میزان گاز تولیدی همبستگی بالایی با میزان VS و TS موجود در ترکیبات دارد، بنابراین مدل سازی میزان متان تولید شده در کل زمان هضم بر اساس VS و TS انجام گرفت. در این معادله متغیرهای مستقل x_1 و x_2 با روابط مختلفی از VS و TS جایگزین شدند و سه مدل مختلف ایجاد شد که در ادامه توضیحات کاملی از این مدل‌ها ارائه شده است. در انتخاب هر یک از مدل‌ها، ابتدا معادلات مختلفی بر هر سری از داده‌ها فیت شد و در پایان معادله‌ای که بهترین دقت را داشت، انتخاب شد.

مدل ۱: مدل سازی میزان متان تولید شده بر حسب TS اولیه و نهایی مواد ($x_2=TS_2$, $x_1=TS_1$); در این مدل متغیر x_1 با میانگین ۴۰۶۲ و انحراف معیار ۱۲۱۰ و متغیر x_2 با میانگین ۲۲۱۶ و انحراف معیار ۶۲۶/۳ در سطح اطمینان ۹۵ درصد نرمال سازی شد. برای این منظور بهترین مدل خام اولیه از نوع معادله چندجمله‌ای درجه ۲

مدل‌های ارائه شده در این تحقیق علی‌رغم مشکلاتی که دارند، می‌توانند در تحقیق‌های آینده به خوبی استفاده شوند، در ضمن می‌توان مدل‌سازی را با استفاده از پارامترهای مؤثر دیگر تقویت نمود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که عوامل گوناگونی بر تولید متان ناشی از واکنش‌های بی‌هوازی در یک هاضم مؤثر هستند و تأثیر متقابل همه این عوامل باعث تولید متان می‌شود. مثلاً با بالا بودن نسبت C/N به‌تنهایی نمی‌توان متان زیادی تولید نمود، بلکه علاوه بر مناسب بودن این ضریب، مقادیر هرکدام از عناصر C و N موجود در مواد نیز حائز اهمیت است. بالا بودن میزان C باعث بالا رفتن ظرفیت تولید متان و بالا بودن میزان N باعث بالا رفتن سوخت و ساز در مواد شده و ظرفیت تولید متان را بالا می‌برد.

همچنین بالا بودن این مقادیر بدون زیاد بودن VS و TS موجود در مواد مقدار زیادی متان تولید نمی‌شود، بلکه باید همه شرایط مناسب فراهم شود. اگر VS و TS در سوبسترا کم باشد، ظرفیت تولید متان پایین می‌آید. حتی اگر C/N مناسب باشد. در ضمن اگر نسبت C/N مناسب باشد و ذرات فرار نیز در سوبسترا به اندازه کافی وجود داشته باشد، عناصر موجود در مواد و pH مواد نیز حائز اهمیت هستند. اگر محیط حالت اسیدی پیدا کند، باکتری‌های بی‌هوازی از بین می‌روند و تولید متان کاهش می‌یابد و در پایان متوقف می‌شود (Rongping *et al.*, 2010). به‌طور کلی باید شرایط متعددی برقرار باشد تا بیشترین میزان متان در مدت طولانی‌تری تولید شود. البته بعضی پارامترها اثرگذاری بیشتری در تولید گاز متان و تداوم آن دارند که از آن قبیل می‌توان به VS، TS و بعضی عناصر موجود در سوبسترا اشاره نمود. با توجه به همبستگی بالای متان تولید شده و VS و TS، مدل‌هایی جهت تخمین متان تولیدی از ذرات فرار و معلق ارائه شد. علی‌رغم دقت بسیار بالای مدل‌های جدید به‌دست آمده، مشکلاتی در آن‌ها وجود داشت که نیاز به بررسی بیشتر و آزمایش‌های کامل‌تری دارد. هرچند مدل‌هایی که در این تحقیق بدست آمد، دارای دقت مناسب بودند، اما با تکرار بیشتر و بررسی پارامترها بیشتر می‌توان مدل‌های خیلی دقیق‌تر با درجه بالاتر و پارامترهای بیشتر ارائه داد که مستلزم تکرارهای بیشتر و بررسی پارامترهای بیشتری می‌باشد. در آینده می‌توان بر روی اثر سایر پارامترها مانند همزدن مواد (نوع همزن و میزان همزدن) و افزایش باکتری‌های بی‌هوازی تحقیق نمود و اثر متقابل پارامترها را در افزایش تولید متان بررسی نمود.

جدول ۴- ضرایب و بازه تغییرات آن‌ها برای هر مدل

Table 4- Coefficients and their variation range for each model

مدل ۱ Model 1	مدل ۲ Model 2	مدل ۳ Model 3
p00 = 2933 (897.5, 4969)	p00 = 2318 (1640, 2995)	p00 = 3124 (2400, 3848)
p10 = 668.5 (-1140, 2478)	p10 = 2339 (50.5, 4627)	p10 = 1312 (-384.1, 3008)
p01 = -147 (-2069, 1775)	p01 = 2249 (413.7, 4084)	p01 = 7.709 (-797.3, 812.7)
p20 = -2101 (-6045, 1843)	p20 = 1870 (-1909, 5649)	p20 = -555.9 (-1087, -25.12)
p11 = 3940 (336.7, 7544)	p11 = -4161 (-9811, 1490)	p11 = -943.7 (-2818, 930.9)
p02 = -1824 (-5356, 1707)	p02 = -1053 (-3040, 933.5)	p02 = -843.8 (-1505, -182.9)
	p30 = -3365 (-7369, 638.6)	p30 = -109.9 (-1025, 805.7)
	p21 = 3213 (-2024, 8449)	p21 = 1878 (-1122, 4879)
	p12 = 156.4 (-2528, 2841)	p12 = -1612 (-3551, 328)

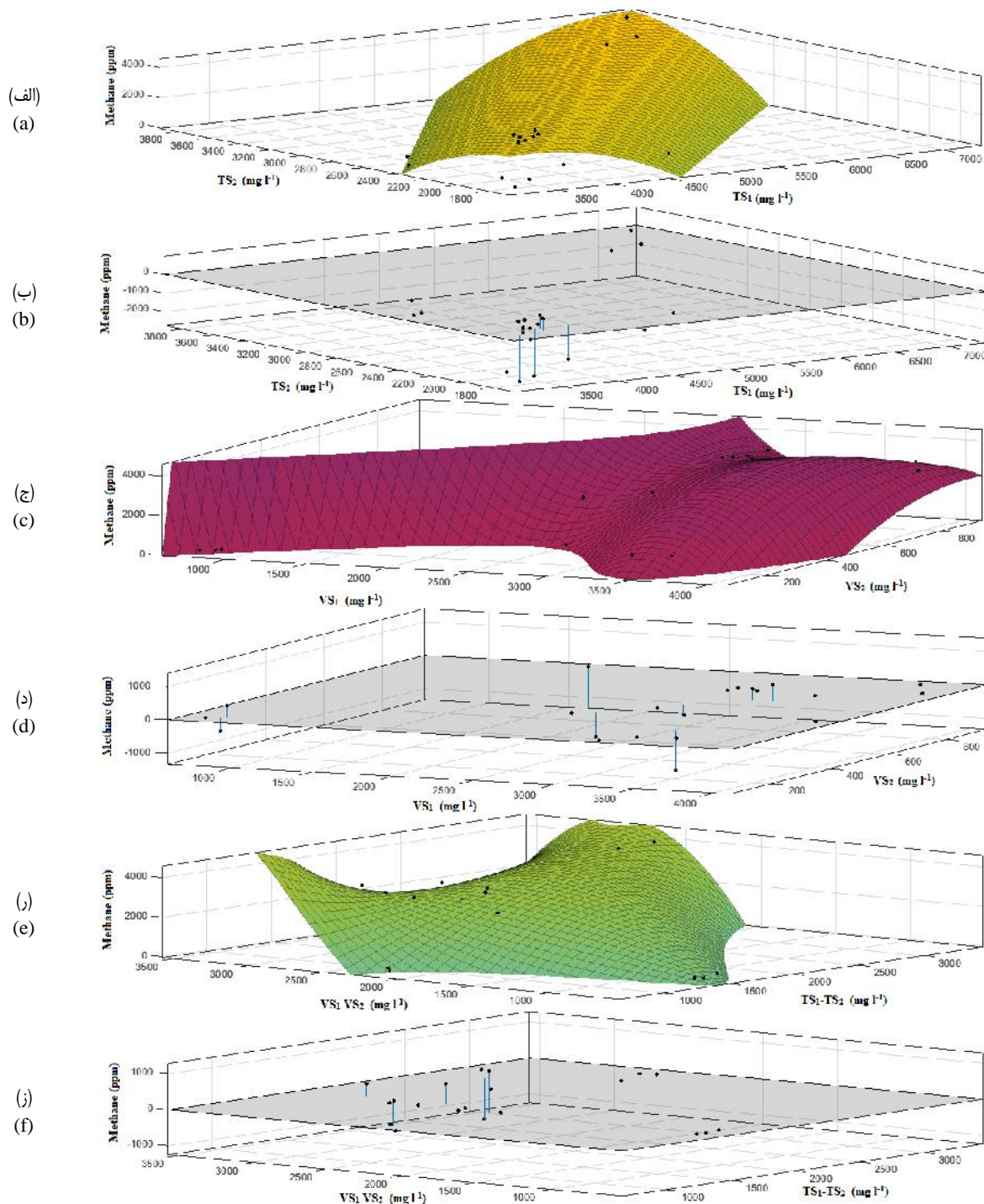
جدول ۵- دقت مدل‌های استفاده‌شده جهت تخمین میزان متان تولیدشده

Table 5- The accuracies of the models used for estimating methane contents

	مدل ۱ Model 1	مدل ۲ Model 2	مدل ۳ Model 3
SSE	2.44e+07	5.98e+06	4.76e+06
R ²	0.483	0.871	0.897
Adjusted R ²	0.31	0.78	0.83
RMSE	1264	706	630

همان‌طور که در شکل ۳ هم دیده می‌شود، مدل‌های به‌دست آمده دارای نقاط اپتیمم محلی هستند بنابراین با مقادیر خاصی از ذرات فرار و معلق می‌توان گاز متان بیشتری تولید نمود. البته مدل‌های به‌دست آمده محدودیت‌هایی نیز دارند که از آن قبیل می‌توان به تعریف نشدن مدل‌ها برای کلیه مقادیر VS و TS اشاره نمود. همچنین جهت به‌دست آوردن مدل مناسب‌تر تکرارهای بیشتری نیاز خواهد بود. هرچه تکرارها بیشتر باشد، مدلی که می‌توان برای آن به‌دست آورد، درجه بالاتری خواهد داشت و دقت آن نیز بیشتر خواهد بود.

مدل‌سازی گاز متان به‌خاطر تکرارهای کم آزمایش‌های اندازه‌گیری گاز متان (هزینه بالای آزمایش‌ها و زمان‌بری آن‌ها) به‌ندرت در تحقیق‌های دیگر محققین استفاده شده است. البته تحقیق‌های اندکی نیز در این زمینه انجام گرفته است اما دقت مدل‌های ارائه شده بسیار پایین می‌باشد. اما با نرمال‌سازی اولیه داده‌های VS و TS در این تحقیق دقت مدل بسیار بالا رفت. بنابراین



شکل ۳- نمودارهای سه‌بعدی و باقی‌مانده ترسیم شده از مدل‌های ارائه شده جهت تخمین متان از VS و TS؛ الف، ب) به ترتیب نمودارهای سه‌بعدی و باقی‌مانده از مدل ۱؛ ج، د) به ترتیب نمودارهای سه‌بعدی و باقی‌مانده از مدل ۲؛ ر، ز) به ترتیب نمودارهای سه‌بعدی و باقی‌مانده از مدل ۳

Fig. 3. 3D and residual diagrams of each model used for methane estimation of VS and TS; a, b are 3D and residual diagrams of model 1; c, d are 3D and residual diagrams of model 2; e, f are 3D and residual diagrams of model 3

دستگاه گازسنج قدردانی می‌شود. در ضمن از دانشگاه شهرکرد نیز به‌خاطر فراهم نمودن تجهیزات آزمایشگاهی کمال تشکر را داریم.

سپاسگزاری

با تمام وجود از شرکت گاز شهرکرد به‌خاطر در اختیار گذاشتن

References

1. Al-Rousan, A., and A. Zyadin. 2014. A technical experiment on biogas production from small-scale dairy farm. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 4: 10-18.
2. Arsova, L. 2010. Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product. Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for M.S. Degree in Earth Resources Engineering Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation of Engineering and Applied Science Columbia University.
3. Budiyo, I. N., S. Widiyasa, and J. Sunarso. 2010. The kinetic of biogas production rate from cattle manure in batch mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* 3 (1): 110-118.
4. Chandra, R., H. Takeuchi, T. Hasegawa, and R. Kumar. 2012. Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy* 43: 273-282.
5. Chen, X., R. T. Romano, and R. Zhang. 2010. Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3 (4): 61-72.
6. Fantozzi, F., and C. Buratti. 2009. Biogas production from different substrates in an experimental continuously stirred tank reactor anaerobic digester. *Bioresource Technology* 100: 5783-5789.
7. Fantozzi, F., and C. Buratti. 2011. Anaerobic digestion of mechanically treated OFMSW: experimental data on biogas/methane production and residues characterization. *Bioresource Technology* 102: 8885-8892.
8. Hashemi, A. A., and A. Dianat. 2010. Mathematical equations usage in biogas production. *Journal of Chemistry Usage in Environment* 2 (5): 39-50.
9. Martin, J. H. 2008. A new method to evaluate H₂S removal from biogas. A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Biological and Agriculture Engineering Raleigh. North Carolina.
10. Miller, R. H., and D. R. Keeney. 1992. Methods of Soil Analysis, in: I, II. Physical, Chemical and Mineralogical Properties. SSSA Publication. Madison.
11. Omrani, G. A. 1996. Biogas development in Iran and World. Biogas Seminar. Mashhad.
12. Rongping, L., C. Shulin, and L. Xiujiu. 2010. Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 160: 643-654.
13. Sabetghadam, M. 2005. Energy and sustainable development in Iran. *Sustainable Energy Watch*.
14. Shaygan, J. 2001. Methane production of sewage organic waste using anaerobic reaction. 1th Seminar of Biogas in Iran. Tehran.
15. "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater". 2005. 21.

Qualitative and quantitative analysis of biogas generated from co-digestion of cow dung, municipal sewage and kitchen waste

M. Mahmoodi-Eshkaftaki^{1*} - R. Ebrahimi² - A. Ghasemi-Pirbaloti³

Received: 22-06-2015

Accepted: 28-10-2015

Introduction

As reported by Sabetghadam (2005), 53.4, 36.3, 1.1, 8.9, and 0.2% of total energy consumption in Iran consisted of oil products, natural gas, coal, electricity energy, and modern energy sources, respectively. The modern energies included solar, biomass, wind and nuclear. The energy mix has been evolving towards clean energies. From 1966–2005, the contribution of natural gas increased from 1.3% to 36.3% and the contribution of electricity was doubled from 4.1% to 8.9%. The share of oil products in domestic consumption has dropped from 84.3% to 53.4%.

Iran has abundant renewable energy resources, including solar energy, wind power, geothermal energy, and biomass, as well as the ability to manufacture the relatively labor-intensive systems that harness these. By developing such energy sources developing countries can reduce their dependence on oil and natural gas, creating energy portfolios that are less vulnerable to price rises. In many circumstances, these investments can be less expensive than fossil fuel energy systems. Over the past ten years some researches on solar and biomass energy have resulted in development and the establishment of a few small- and medium-scale electricity generation plants, powered via solar and biomass energy. There has also been the development of digesters to increase biogas production. Renewable energy is new to Iran and there is a long way to go. Except for the few afore mentioned projects, small-scale technologies to bring power to remote villages have a better chance of being adopted than those implemented at the national level.

Materials and Methods

In this research the amount of generated methane (methane content of biogas %) from co-digestion of municipal sewage, kitchen waste, and cow dung was measured in 7 different combinations (treatment). Two important parameters affecting methane production such as volatile solid (VS) and total solid (TS) were measured according to *Method 1684* and *CEN/TS 15148*. Furthermore some environmental conditions such as temperature, pH, EC and some of the most important elements of desired substrate such as amount of C, N, P, K, and SO_4^{2-} were determined. pH using pH-meter and EC using EC-meter, C using titration method according to Rongping *et al.* (2010) and N using Kjeldahl apparatus, P using Spectrophotometer, K using Flame photometer, and SO_4^{2-} using weighting were determined according to Standard Method for the Examination of Water and Wastewater.

Methane (CH_4) was determined using a multi-function gas detector brand GMI Ltd model GT-42. Its detection ranges were 0–10000 ppm (parts per million), 0–100 % LEL (lower explosive limit), and 0–100 % VOL (volume) in temperature limit -20–50 °C and 0–95% R.H (relative humidity).

Results and Discussion

The mean amount of methane contents of biogas during the co-digestion of the substrates for all 7 treatments reported in table 1 were 4363.25, 875.13, 169.13, 3424.38, 2911.88, 2714.38, and 193.5 ppm, respectively. Methane contents obtained from municipal waste was the highest among the substrates and after that the combination of 1:1:1 of the substrates was more than the others. The methane content was low in the first seven days of digestion, and thereafter rapidly increased over 85% within 22 days. Totally the highest methane contents of treatments were during 30–35 days of digestion which was agreed with other researches. This can be shown in Fig. 5 that the highest methane content was 10000 ppm and appertain to treatment 1.

The results showed that TS and VS of kitchen waste were lower than the other substrates. These findings

1- Assistance Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

3- Associate Professor, Department of Food Science & Technology, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.mahmoodi5@gmail.com)

agreed with Chen *et al.* (2010) researches in which had been reported the commercial kitchen waste has lower TS and VS contents, possibly because the commercial kitchen waste stream contains food with higher moisture contents such as fruits. Furthermore it can be shown that after digestion, the amount of TS of municipal waste, cow manure, and kitchen waste decreased 46, 57, and 46% respectively, while amount of VS of these substrates decreased 82, 92, and 85%, respectively. The results were similar to Chen *et al.* (2010) results. They reported that between 58 and 99% of the VS were degraded to methane and carbon dioxide under most feed concentrations. The obtained methane significantly correlated with VS, TS at level of 5 %. The pH of the substrate nearly was constant during the digestion. The results showed that the treatments with more municipal waste had more VS and TS while the treatments with more cow dung had more C/N.

Some mathematical models were made between the properties and generated methane. The best empirical model which can estimate amount of generated methane using the properties was a polynomial function. The function coefficients were determined for each parameter by normalizing them. Finally the results show that the model made using difference of VS and TS before and after of digestion had the most accuracy among the models ($R^2=0.897$, $RMSE=630$, $SSE=4.76e+06$).

Conclusions

The results of conducted methane fermentation study on physico-chemical properties of substrates including municipal waste, kitchen waste and cow dung revealed that VS, TS, C/N, P, K, and SO_4^{2-} affect biogas and methane production. However the correlation between methane contents with VS and TS was more than the other properties and the methane estimation models made using the VS and TS was more accurate than the other models.

Keywords: Anaerobic digestion, Material combination, Methane, Total solid, Volatile solid

ارزیابی مدل‌های ریاضی انتقال حرارت و رگرسیون چندگانه در پیش‌بینی متغیرهای داخلی گلخانه نیمه‌خورشیدی

مرتضی تاکی^۱ - یحیی عجب‌شیرچی^۲ - سید فرامرز رنجبر^۳ - عباس روحانی^{۴*} - منصور مطلوبی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

چکیده

در کشاورزی مدرن نقش گلخانه به‌عنوان ابزاری برای افزایش میزان کمیت و کیفیت محصول کشت شده، بسیار حائز اهمیت است. شرایط داخلی گلخانه معمولاً بسیار پیچیده و تابع برخی عوامل داخلی و بیرونی است که معمولاً تخمین آن‌ها به‌درستی امکان‌پذیر نیست. هدف از اجرای این تحقیق، تخمین دمای هوای داخلی (T_a) و دمای سقف گلخانه‌ای نیمه‌خورشیدی با استفاده از مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت و رگرسیون چندگانه است. گلخانه مورد نظر با توجه به انواع مرسوم منطقه و براساس دریافت بیش‌ترین میزان انرژی خورشیدی در تمام فصول سال طراحی و ساخته شد. از برخی عوامل داخلی از جمله دمای هوا، سقف، خاک و برخی عوامل بیرونی از جمله دمای هوای محیط، سرعت باد و شدت تابش خورشید روی سقف گلخانه، به‌عنوان ورودی‌های مدل رگرسیونی استفاده شد. نتایج نشان داد که کارایی مدل رگرسیونی در تخمین پارامترهای موردنظر بیش‌تر از مدل حرارتی است. ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل حرارتی در تخمین پارامترهای (T_a) و (T_{in}) به‌ترتیب معادل ۱/۵۵ و ۶/۵۴ برابر بیش‌تر از مقادیر این شاخص برای مدل رگرسیونی بود. همچنین مقدار شاخص ویلموت (W) و فاکتور کارایی مدل (EF) برای مدل حرارتی در تخمین پارامترهای فوق به‌ترتیب معادل ۰/۰۱۳ و ۰/۲۲۰، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۴۱ کم‌تر از مقادیر مشابه مدل رگرسیونی بود که نشان از عدم تطبیق مناسب داده‌های پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی توسط مدل حرارتی است. پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌ها از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در تخمین متغیرهای داخلی گلخانه استفاده شود و نتایج به‌دست آمده با مقادیر مشابه دو مدل فوق، مقایسه گردد.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، کارایی مدل، گلخانه نیمه‌خورشیدی، مدل‌سازی

- ۱- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، اهواز
 - ۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز
 - ۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۵- استادیار گروه باغبانی دانشگاه تبریز
- *- نویسنده مسئول:
(Email: arohani@um.ac.ir)

Nomenclature اختصارات					
$\Phi_{win} \{m^3 s^{-1}\}$	Outlet air flow rate through the air conditioning system نرخ جریان هوای خروجی از گلخانه توسط سیستم تهویه	$\dots_{a-ri} \{Wm^{-2} K^{-1}\}$	Heat transfer coefficient between inside air and roof ضریب انتقال حرارت مابین هوای گلخانه و سقف	$\dots_a \{kgm^{-3}\}$	Density of air چگالی هوا
$Q_{s-ri} \{W\}$	Heat transfer from soil to roof انتقال حرارت تابشی بین سقف گلخانه و خاک	$\dots_{ri-o} \{Wm^{-2} K^{-1}\}$	Heat transfer coefficient from roof to outdoor air ضریب انتقال حرارت مابین هوای بیرون گلخانه با سقف گلخانه	$c_{p-a} \{Jkg^{-1} K^{-1}\}$	Air specific heat capacity ظرفیت گرمایی ویژه هوا
$\Gamma_{a-s} \{Wm^{-2} K^{-1}\}$	Heat transfer coefficient between air and soil ضریب انتقال حرارت بین هوای گلخانه و خاک	$E_{sk} \{-\}$	Emission coefficient for sky ضریب انتشار نور توسط آسمان	$f_a \{-\}$	Infiltration factor ضریب نشتی گلخانه
$\epsilon_o \{ms^{-1}\}$	Outdoor wind speed سرعت باد در خارج از گلخانه	$F_{ri-sk} \{-\}$	View factor from roof to sky فاکتور دید بین سقف گلخانه و آسمان	$A_r \{m^2\}$	Surface area of roof مساحت سطح سقف گلخانه
$I_{roof} \{Wm^{-2}\}$	Solar radiation intensity on the roof شدت تابش خورشید روی سقف	$A_{nw} \{m^2\}$	Surface area of north wall مساحت سطح دیواره شمالی گلخانه	$V_r \{m^3\}$	Volume of greenhouse roof حجم سقف گلخانه
$T_{nw-o} \{K\}$	Outside north wall temperature دمای قسمت بیرونی دیواره شمالی	$\dots_{nw} \{Wm^{-1} K^{-1}\}$	North wall thermal conductivity ضریب انتقال حرارت هدایتی دیواره شمالی	$Q_{a-s} \{W\}$	Heat transfer between inside air and soil انتقال حرارت همرفتی بین هوای گلخانه و خاک
$T_{nw-in} \{K\}$	Inside north wall temperature دمای قسمت داخلی دیواره شمالی	$dnw \{m\}$	Thickness of north wall ضخامت دیواره شمالی گلخانه	$Q_{a-o} \{W\}$	Heat transfer from indoor air to outdoor air انتقال حرارت همرفتی بین هوای گلخانه و محیط بیرون
$T_a \{K\}$	Indoor air temperature دمای هوای گلخانه	$c_{p-r} \{Jkg^{-1} K^{-1}\}$	Specific heat capacity of roof (glass) ظرفیت گرمایی ویژه سقف گلخانه	$\Phi_{leak} \{m^3 s^{-1}\}$	Transferred air flow rate to outdoor air due to leakage جریان هوای منتقل شده از طریق نشتی
$T_{ri} \{K\}$	Roof temperature دمای هوای سقف گلخانه	$Q_{a-ri} \{W\}$	Heat transfer from indoor air to roof انتقال حرارت همرفتی بین هوای گلخانه و سقف	$Q_{rd-ri} \{W\}$	absorption of shortwave radiation by greenhouse roof جذب امواج کوتاه خورشیدی توسط سقف گلخانه
$T_s \{K\}$	Soil temperature (upper layer) دمای قسمت بیرونی خاک گلخانه	$\dots_{ri-is} \{-\}$	Absorption coefficient of shortwave radiation by roof ضریب جذب امواج کوتاه خورشیدی توسط سقف گلخانه	$V_a \{m^3\}$	Volume of greenhouse air حجم هوای گلخانه
$T_{ss} \{K\}$	Soil temperature (subsoil layer) دمای قسمت عمقی خاک گلخانه	$E_s \{-\}$	Emission coefficient for soil ضریب انتشار نور توسط خاک	$\dots_r \{kgm^{-3}\}$	Density of roof (Glass) چگالی سقف گلخانه (شیشه)
$T_{sk} \{K\}$	Sky temperature دمای آسمان	$E_{ri} \{-\}$	Emission coefficient for roof ضریب انتشار نور توسط سقف گلخانه	$\dagger \{Wm^{-2} K^{-4}\}$	Stefan-Boltzmann constant ضریب ثابت استفان بولتزمن
				$F_{s-ri} \{-\}$	View factor from soil to roof فاکتور دید بین خاک و سقف گلخانه

مقدمه

ساخت گلخانه‌های کشاورزی معمولاً مبتنی بر مدل‌سازی اولیه فرآیند انتقال حرارت و جرم می‌باشد که متأسفانه در این راستا تحقیقات بسیار اندکی انجام گرفته است. مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت داخل گلخانه، از دهه ۶۰ میلادی شروع شد. مدل‌های اولیه بسیار ساده و در عین حال پر خطا بودند. مدل مورد استفاده در هر گلخانه باید به قدری عمومی و قابل فهم باشد که بتوان در مقیاس تجاری و به صورت آسان از آن استفاده کرد. این در حالی است که این مدل‌ها باید به طور نسبی کامل باشند تا بتوانند وقایع حرارتی مهم داخل گلخانه را به طور کامل نشان دهند (Alonso et al., 2012).

تلاش‌های اولیه برای توسعه مدل‌های مختلف تنها به ارائه انواع ساده به منظور محاسبه میزان گرمای مورد نیاز و همچنین نرخ تهویه

مصرف بی‌رویه انرژی در اکثر گلخانه‌های ایران باعث افزایش قیمت تمام شده محصول، آلودگی محیط‌زیست و هدر رفت منابع با ارزش فسیلی طی دهه‌های گذشته شده است. در این راستا تحقیقات بسیاری در مورد بررسی مصرف انرژی و بهینه‌سازی آن در گلخانه‌های کشاورزی انجام شده است (Abdi et al., 2012; Banaeian et al., 2011; Taki et al., 2013; Canakci and Akinci, 2006; Omid et al., 2011). در اکثر تحقیقات صورت گرفته، نهاده سوخت مصرفی بیش‌ترین سهم از کل نهاده‌های اولیه را در بر می‌گیرد. یکی از دلایل اصلی مصرف بی‌رویه این نهاده در گلخانه‌های ایران، پوشش و اسکلت نامناسب و غیرعلمی در انواع گلخانه‌های مرسوم ایرانی است. ابتدایی‌ترین اصول مهندسی در

حرارت به‌منظور تخمین دمای گلخانه‌ای یک‌طرفه با شیب سقف ۲۶/۶ درجه در کشور عراق استفاده شد (Joudi and Farhan, 2015). نتایج نشان داد که مدل مورد استفاده قادر است دمای هوا و خاک گلخانه را به‌ترتیب با خطای مطلق بین ۸ تا ۱۳٪ پیش‌بینی کند. با توجه به موارد فوق، هدف از این مقاله مقایسه بین مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت و مدل‌های رایج رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف یک گلخانه نیمه‌خورشیدی تحقیقاتی ساخته شده در دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز است. مقایسه بین این دو نوع مدل نیمه‌تجربی و ریاضی می‌تواند به‌درستی میزان خطا در هر دو نوع مدل را مشخص کرده و در آینده مورد استفاده طراحان و سازندگان گلخانه‌های پیشرفته قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

انتخاب نوع گلخانه و محل اجرای تحقیق

گلخانه در حالت کلی از نظر دریافت انرژی خورشیدی می‌تواند به انواع خورشیدی و یا مرسوم دسته‌بندی شود. در گلخانه‌های خورشیدی معمولاً انتخاب بهترین نوع گلخانه از نظر دریافت انرژی خورشیدی بارزترین شاخص است. مواردی از قبیل افزودن صفحه حرارتی داخلی و خارجی^۵، کاهش میزان تلفات انرژی داخلی، انتخاب بهترین جنس از نظر دریافت و تلفات انرژی، افزودن منابع جاذب انرژی خورشیدی (از جمله دیوار شمالی^۶، کلکتور زمینی^۷، آبخوان زیرزمینی^۸ و سایر منابع)، استفاده از منابع تجدیدپذیر به‌منظور تأمین نیاز حرارتی گلخانه در فصل زمستان و در نهایت تأمین تمامی نیازهای حرارتی گلخانه از منابع تجدیدپذیر می‌تواند یک گلخانه مرسوم را به سمت گلخانه خورشیدی سوق دهد (Vadiei and Martin, 2013). در این تحقیق چون چندین عامل از مشخصه‌های یک گلخانه خورشیدی (بهترین شکل و جهت، دیواره سیمانی شمالی و صفحه حرارتی (انواع پلاستیکی منعطف‌شونده یا سخت) به یک گلخانه مرسوم افزوده شد، لذا گلخانه مورد استفاده یک گلخانه نیمه‌خورشیدی محسوب می‌شود (شکل ۱).

این تحقیق در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و محل ساختمان بیوانرژی و بازیافت دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز واقع در جاده باسمنج انجام گرفت. بدین منظور در ابتدا از انواع طرح‌های متداول و مرسوم گلخانه در منطقه (شکل ۲)، بهترین آن‌ها با توجه به دریافت حداکثری میزان تابش خورشید براساس داده‌های مربوط به ایستگاه هواشناسی شهرستان تبریز (میزان تابش) و با در نظر گرفتن

گلخانه‌ها معطوف بود که همگی مدل‌های پایا^۱ بوده و دقت پایینی داشتند (Morris, 1956; Mccune and Stipe, 1960; Walker, 1965). در طبقه‌بندی دوم، برخی از تحقیقات معطوف به بررسی اثرات ساختار گلخانه، محل قرارگیری، جهت قرارگیری و فاکتورهای گرم‌کردن و خنک‌کاری گلخانه شد (Chandra, 1976; Simpkins, 1979; Chandra and Albright, 1978). تحقیقات بعدی بیش‌تر معطوف به مدل‌سازی شرایط داخلی گلخانه با توجه به پارامترهای داخلی و بیرونی و در نظر گرفتن جزئیات بیش‌تر شد. مدل‌سازی گلخانه از سال ۱۹۸۵ با سرعت بیش‌تری پیشرفت کرد. این نوع مدل‌ها معمولاً با نام نویسندگان مقاله مشهور هستند و به‌ترتیب عبارتند از (Willits et al., 1985; Fuller et al., 1987; Hollmuller and Lachal, 1998; Buchholz et al., 2006; Heuvelink and Bakker, 2008; Hoes and Desmedt, 2008; Van Straten et al., 2011). مدل‌های فوق معمولاً با اعتبارسنجی در انواع گلخانه‌ها و براساس کم‌ترین میزان خطا پیشنهاد می‌شوند. از نرم‌افزارهای TRANSYS، Fortran و همچنین متلب^۲ برای حل عددی یا ریاضی معادلات انتقال حرارت و جرم در مدل‌های فوق استفاده می‌شود. در تحقیقی به ارائه روابط عمومی انتقال حرارت به‌منظور مدل‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ای گنبدی شکل در کشور عربستان پرداخته شد (Abdel Ghany and Helal, 2011). در این تحقیق گلخانه‌ای پلاستیکی به مساحت ۳۴ مترمربع ساخته و فرآیند انتقال حرارت بین گیاه، پوشش، خاک و هوای داخل گلخانه مدل‌سازی شد. همچنین نرخ تبخیر و تعرق گیاه به‌صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اگر شاخص سطح برگ^۳ برای گیاه گوجه‌فرنگی کم‌تر از ۱/۵ باشد، میزان خطای مدل حدود ۱/۷٪ خواهد بود و اگر شاخص سطح برگ بیش‌تر از ۵ باشد، خطا تا حدود ۰/۷٪ کاهش خواهد یافت. از کل تابش خورشیدی ورودی به گلخانه، حدود ۱۰٪ آن صرف تبخیر و تعرق گیاه شده بود (شاخص سطح برگ معادل سطح برگ گیاه به سطح زمینی است که توسط گیاه اشغال شده است). در تحقیق دیگری در کشور هند از مدل‌های تجربی انتقال حرارت و روش شبه‌پایا به‌منظور تخمین دمای یک گلخانه‌ی مجهز به کلکتور هوایی تحت استفاده شد (Nayak and Tiwari, 2006). نتایج نشان داد که مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE) مدل حرارتی در تخمین دمای گلخانه در شرایط مختلف بین ۷/۰۵ تا ۱۷/۵۸ درصد قابل تغییر است. این درحالی است که ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۷ متغیر بود. در تحقیق دیگری از مدل‌های انتقال

5- Inside and outside thermal screen
6- North wall
7- Ground collector
8- Ground aquifer

1- Steady state models
2- MATLAB
3- Leaf area index (LAI)
4- Root Mean Square Error (RMSE)

بین هوای داخل گلخانه و قسمت داخلی سقف و همچنین بین هوای گلخانه و خاک توسط روابط موجود در جدول ۱ حاصل می‌شود. مقادیر ضریب انتقال حرارت همرفتی () نیز در جدول ۱ آورده شده است.

فاکتور Q_{a-o} اشاره به فرآیند تهویه در گلخانه نیمه‌خورشیدی دارد که مقدار آن توسط رابطه (۲) مشخص می‌شود (Van Ooteghem, 2007):

$$Q_{a-o} = \dots \times c_{p-a} \times \{ T_a - T_o \} \quad (2)$$

در رابطه فوق، مقدار Φ_{a-o} توسط رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$\Phi_{a-o} = A_s (8.3 \times 10^{-5} + 3.5 \times 10^{-5} v_o \times f_a) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، v_o مقدار سرعت باد در خارج از گلخانه و f_a فاکتور نفوذ^۴ و بدون بعد می‌باشد. فاکتور نفوذ برای گلخانه‌های تازه ساخت معمولاً عدد یک در نظر گرفته می‌شود (Vadice, 2011). در این تحقیق چون تمام تلاش بر این بود که رفتار گلخانه شبیه به گلخانه‌های بسته و تقریباً خورشیدی مورد بررسی قرار گیرد و از طرفی به دلیل عدم کشت گیاه، در طول آزمایش در پیچه‌های تهویه باز نشدند، بنابراین نرخ جریان هوای عبوری از طریق پنجره گلخانه صفر در نظر گرفته شد.

پارامتر $Q_{nwi-nwo}$ یا میزان تلفات ناشی از هدایت دیواره شمالی با محیط بیرون از رابطه (۴) به دست می‌آید (Van Straten et al., 2011):

$$Q_{nwi-nwo} = A_{nw} \times \left\{ \frac{dnw}{dnw} (T_{nwo} - T_{nwi}) \right\} \quad (4)$$

دیواره شمالی در گلخانه مورد نظر از جنس آجر با روکش سیمان است به قطر ۲۵ سانتی‌متر که به منظور جلوگیری از تلفات بیش از حد از دیواره شمالی در فصل زمستان (قسمت بیرونی دیواره شمالی به دلیل عدم دریافت نور در طول روز، همیشه اختلاف دمای زیادی با قسمت داخلی دارد که عایق کاری این دیواره در فصل زمستان و براساس منابع می‌تواند تا بیش از ۲۰٪ از تلفات هدایتی دیواره به محیط بیرون بکاهد) ساخته شده است. در رابطه (۴)، T_{nwo} و T_{nwi} به ترتیب دمای داخل و بیرون دیواره شمالی است که توسط حسگر دما (SHT11) در چندین نقطه جمع‌آوری شد و سپس از مقادیر به دست آمده میانگین‌گیری به عمل آمد.

نرخ تغییرات زمانی دمای سقف داخل گلخانه نیمه‌خورشیدی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Van Straten et al., 2011):

$$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{Q_{nl-ri} + Q_{a-ri} + Q_{s-ri} - Q_{ri-o} - Q_{ri-sk}}{\dots \times c_{p-r} \times V_r} \quad (5)$$

در رابطه (۵) پارامتر Q_{a-ri} (رجوع به جدول ۱) اشاره به میزان جذب انرژی خورشیدی توسط سقف گلخانه دارد که توسط رابطه ۶

شیب سقف (انتخاب این شیب براساس ارتفاع اوج گلخانه، دیواره‌های جانبی و میزان دریافت حداکثری نور خورشید بود) انتخاب شد. بر اساس نتایج اولیه تخمین میزان دریافت انرژی خورشیدی، گلخانه یک‌طرفه شرقی- غربی (گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد نظر) در مقایسه با متوسط تابش دریافتی سالیانه سایر گلخانه‌ها، ۹٪ تابش قابل استفاده بیش‌تری دریافت می‌کند. همچنین میزان دریافت انرژی خورشیدی این ساختار در فصول سرد (پاییز و زمستان) نسبت به سایر گلخانه‌ها ۱۱/۵٪ بیش‌تر است.

در این تحقیق به دلیل کار در فصل تابستان و نیاز به برودت بالای گلخانه، از کشت در محیط گلخانه خودداری شد و رفتار گلخانه شبیه به حالت گلخانه بسته در نظر گرفته شد (یعنی از بازکردن پنجره تهویه گلخانه در طول آزمایش خودداری شد که این کار سبب بالا رفتن دمای گلخانه در اواسط روز می‌شد). این گلخانه دارای مساحت کف ۱۵/۳۶ مترمربع، حجم ۲۶/۴ مترمکعب، مساحت سقف ۱۷/۷ مترمربع، مساحت دیواره جنوبی ۳/۸۴ مترمربع، مساحت دیواره شمالی ۱۱/۵۲ مترمربع و دیواره‌های غربی و شرقی هر کدام ۵/۱۲ مترمربع است. اسکلت گلخانه مورد نظر فلزی است و نوع پوشش آن در سقف به صورت شیشه سکوریت به ضخامت ۴ میلی‌متر و دیواره‌ها از شیشه معمولی به ضخامت ۴ میلی‌متر است که به صورت شرقی- غربی ساخته شده است.

معادلات انتقال حرارت در گلخانه نیمه‌خورشیدی

بزرگترین و مهمترین منبع تولید انرژی در هر گلخانه امواج کوتاه نور خورشید است و انتقال حرارت در گلخانه به سه حالت همرفت^۱، هدایت^۲ و تابش^۳ صورت می‌گیرد که در این بین انتقال حرارت از طریق همرفت بزرگترین نقش در اتلاف انرژی داخلی هر گلخانه را بر عهده دارد (Ntinis et al., 2014). به عنوان نمونه فرآیندهای کلی انتقال حرارت و جرم در گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد نظر در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. در این مقاله، مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت در دو منطقه یک گلخانه نیمه-خورشیدی یعنی هوای داخلی و سقف گلخانه دنبال می‌شود.

نرخ تغییرات زمانی دمای هوای داخل گلخانه نیمه‌خورشیدی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Van Straten et al., 2011):

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-s} - Q_{a-o} - Q_{a-ri} - Q_{nwi-nwo}}{\dots \times c_{p-a} \times V_a} \quad (1)$$

مقادیر فاکتورهای Q_{a-s} و Q_{a-ri} یعنی انتقال حرارت همرفتی

- 1- Convection
- 2- Conduction
- 3- Raddiation

4- Infiltration factor

$$r_{ni-o} = 2.8 + 1.2V_o \quad \forall V_o < 4 \quad (9)$$

$$r_{ni-o} = 2.5V_o^{0.8} \quad \forall V_o \geq 4$$

پارامتر Q_{ni-sk} یا تلفات ناشی از تابش امواج بلند از سقف گلخانه به آسمان (موجود در رابطه (۵)) توسط رابطه (۱۰) به دست می‌آید (Van Straten *et al.*, 2011):

$$Q_{ni-sk} = A_r \times E_{ni} \times E_{sk} \times F_{ni-sk} \times \dagger (T_{ni}^4 - T_{sk}^4) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، T_{sk} اشاره به دمای آسمان در نقاط دوردست می‌کند که از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود (Joudi and Farhan, 2015):

$$T_{sk} = 0.0552(T_o)^{1.5} \quad (11)$$

مقادیر ثابت روابط و همچنین مقادیر مربوط به ساختار گلخانه در جدول ۲ آورده شده است. به منظور حل دستگاه معادلات فوق از نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۰۹ استفاده شد. بدین منظور برای مدل‌سازی یا به عبارتی تخمین ریاضی مقادیر دمای خاک و هوای گلخانه، مقدار اولیه این دماها به روابط فوق اضافه شد.

مشخص می‌شود:

$$Q_{nl-ni} = A_r \times y_{ni-Is} \times I_{roof} \quad (6)$$

به منظور جمع‌آوری داده‌های مربوط به I_{roof} ، از تابش‌سنج مدل TES 133 هم‌راستا با شیب گلخانه استفاده شد. داده‌ها در چند منطقه گلخانه به‌طور هم‌زمان جمع‌آوری شد و نهایتاً در هر زمان از مقادیر مربوطه میانگین‌گیری به عمل آمد.

در رابطه (۵)، مقدار متغیر Q_{s-ni} یا انتقال حرارت تابشی بین خاک و قسمت داخلی سقف گلخانه توسط رابطه (۷) مشخص می‌شود (Van Ooteghem, 2007):

$$Q_{s-ni} = A_s \times E_s \times E_{ni} \times F_{s-ni} \times \dagger (T_s^4 - T_{ni}^4) \quad (7)$$

در رابطه (۵)، پارامتر Q_{ni-o} اشاره به میزان تلفات ناشی از جریان همرفتی بیرون با سقف گلخانه دارد که از رابطه (۸) حاصل می‌شود (Van Ooteghem, 2007):

$$Q_{ni-o} = A_r \times r_{ni-o} (T_{ni} - T_o) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، r_{ni-o} یا ضریب همرفتی بین هوای بیرون و سقف گلخانه با توجه به سرعت باد بیرون (V_o) از رابطه (۹) به دست می‌آید (Vadiei, 2011):

جدول ۱- روابط مربوط به محاسبه مقدار Q_{a-s} و Q_{a-ni} در گلخانه نیمه‌خورشیدی (Vadiei, 2011)

Table 1- Equation for calculate the Q_{a-ni} and Q_{a-s} in semi-solar greenhouse (Vadiei, 2011)

معادله Equation	ضریب انتقال حرارت همرفتی Conductive heat transfer coefficient $r (Wm^{-2}K^{-1})$
$Q_{a-ni} = A_r \times r_{a-ni} (T_a - T_{ni})$	$r_{a-ni} = 3 T_a - T_{ni} ^{1/3}$
$Q_{a-s} = A_s \times r_{a-s} (T_a - T_s)$	$r_{a-s} = 1.7 T_a - T_s ^{1/3} \quad \forall T_a < T_s$
	$r_{a-s} = 1.3 T_a - T_s ^{0.25} \quad \forall T_a \geq T_s$



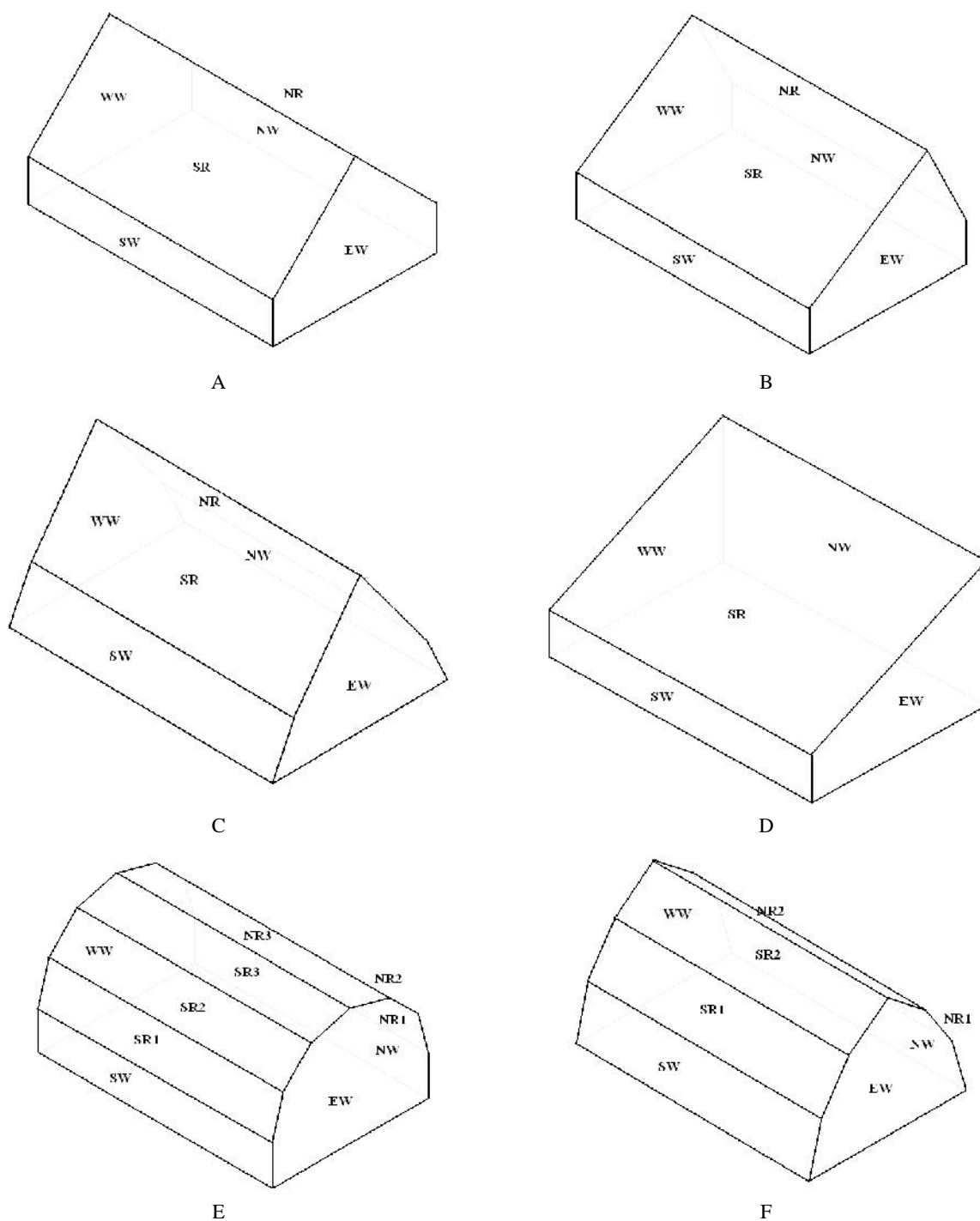
(A)



(B)

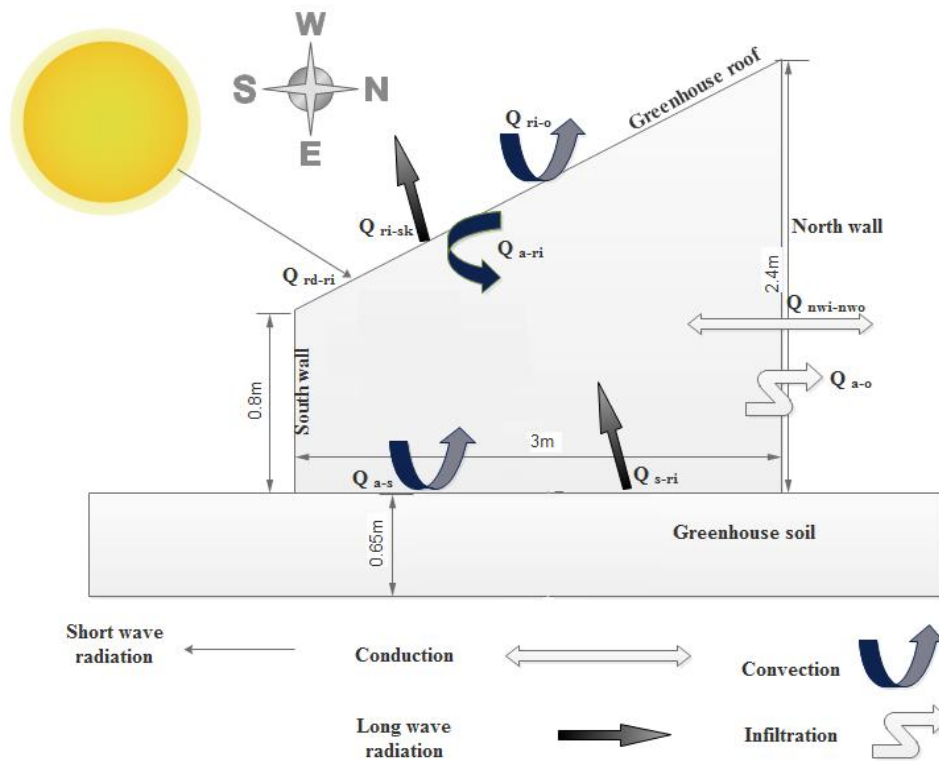
شکل ۱- گلخانه نیمه‌خورشیدی مجهز به دیواره شمالی سیمانی (A و B از دو زاویه کناری)

Fig.1. Semi-solar greenhouse equipped by cement north wall (A and B from two sides)



شکل ۲- انواع گلخانه‌های مرسوم مورد استفاده در این تحقیق (A: دوطرفه، B: نیمه‌دوطرفه، C: خیمه‌ای، D: نیمه‌خورشیدی، E: تونلی، F: کوانست، SW= دیواره جنوبی، SR= سقف جنوبی، NW= سقف شمالی، EW: دیواره شرقی، WW: دیواره غربی)

Fig.2. Typical greenhouse shapes used in this research (A: Even span, B: Uneven span, C: Vinery, D: Semi-solar, E: Arch and F: Quonset, SW= South Wall, SR= South Roof, NR= North Roof, NW= North Wall)



شکل ۳- فرآیندهای کلی انتقال حرارت در گلخانه نیمه-خورشیدی در دو فاز
 Fig.3. The heat transfer mechanism in the semi-greenhouse in two phase

جدول ۲- مقادیر ثابت روابط و همچنین پارامترهای ساختاری گلخانه نیمه-خورشیدی

Table 2- Constant values of equations and structural factors of semi-solar greenhouse

Definition تعریف	Name عنوان	Value مقدار	Definition تعریف	Name عنوان	Value مقدار
Absorption coefficient of shortwave radiation by roof ضریب جذب امواج کوتاه خورشیدی توسط قسمت گلخانه	$\gamma_{ri-ls} \{-\}$	0.0173	Density of air چگالی هوا	$\rho_a \{kgm^{-3}\}$	1.21
Emission coefficient for soil ضریب انتشار نور توسط خاک	$E_s \{-\}$	0.7	Specific heat capacity of air ظرفیت گرمای ویژه هوا	$c_{p-a} \{Jkg^{-1}K^{-1}\}$	1000
Emission coefficient for sky ضریب انتشار نور توسط آسمان	$E_{sk} \{-\}$	0.8	Infiltration factor ضریب نشتی گلخانه	$f_a \{-\}$	1
View factor from roof to sky فاکتور دید بین سقف گلخانه و آسمان	$F_{ri-sk} \{-\}$	0.86	Surface area of roof مساحت سطح سقف گلخانه	$A_r \{m^2\}$	17.7
Surface area of north wall مساحت سطح دیواره شمالی گلخانه	$A_{nw} \{m^2\}$	11.52	Volume of greenhouse roof حجم سقف گلخانه	$V_r \{m^3\}$	0.0708
North wall thermal conductivity ضریب انتقال حرارت هدایتی دیواره شمالی	$\lambda_{nw} \{Wm^{-1}K^{-1}\}$	0.397	Volume of greenhouse air حجم هوای گلخانه	$V_a \{m^3\}$	26.4
Thickness of north wall ضخامت دیواره شمالی گلخانه	$dnw \{m\}$	0.25	Density of roof (Glass) چگالی سقف گلخانه (شیشه)	$\rho_r \{kgm^{-3}\}$	2500
Specific heat capacity of roof (glass) ظرفیت گرمای ویژه سقف گلخانه (شیشه)	$c_{p-r} \{Jkg^{-1}K^{-1}\}$	840	Stefan-Boltzmann constant ضریب ثابت استفان بولتزمن	$\dagger \{Wm^{-2}K^{-4}\}$	5×10^{-8}
Emission coefficient for roof ضریب انتشار نور توسط سقف گلخانه	$E_{ri} \{-\}$	0.95	View factor from soil to roof فاکتور دید بین خاک و سقف	$F_{s-ri} \{-\}$	0.8

$$EF = \frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2 - \sum_{j=1}^n (p_j - d_j)^2}{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2} \quad (۱۴)$$

$$W = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n [d_j - p_j]^2}{\sum_{j=1}^n [p_j - \bar{d}] + [d_j - \bar{d}]^2} \quad (۱۵)$$

در روابط (۱۲) تا (۱۵)، d_j ، p_j ، \bar{d} ، زامین داده از خروجی واقعی، p_j ، \bar{d} زامین داده از خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل حرارتی، \bar{d} متوسط کل داده‌های واقعی و n تعداد کل داده‌هاست. از بین مدل‌های برازش شده مدلی بهترین است که دارای کم‌ترین مقادیر خطای MAPE و RMSE و بیش‌ترین مقدار عملکرد از شاخص‌های EF و W باشد.

نتایج و بحث

در شکل ۴ (الف) و (ب) میزان دریافت نور خورشید به‌طور ساعتی و دقیقه‌ای روی سقف گلخانه و خارج از گلخانه روی سطح تراز شده زمین نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، پس از عبور از ظهر خورشیدی (تقریباً بعد از ساعت ۱۲) میزان دریافت انرژی روی سقف از میزان دریافت روی سطح آزاد بیش‌تر است که این به‌دلیل شیب سقف گلخانه است (۲۶/۵۷ درجه). نتیجه این اشکال به‌وضوح میزان درستی محاسبه شیب سقف گلخانه از نظر دریافت حداکثر میزان انرژی خورشیدی در طی روز را نشان می‌دهد. در تحقیقی میزان دریافت و تلفات انرژی در پنج نوع ساختار معمول گلخانه‌ای در کشور هند بررسی شد (Singh and Tiwari, 2010). نتایج نشان داد که گلخانه نیمه دوطرفه با شیب سقف ۲۰ درجه هم از نظر دریافت و هم تلفات انرژی بهترین نوع ساختار است. این گلخانه برای ثابت نگه‌داشتن دما در طول یک روز نیاز به ۲۲۶ مگاژول انرژی داشت که مقدار ۱۲۸ مگاژول آن توسط نور خورشید و مابقی آن توسط سوخت‌های فسیلی به‌دست می‌آمد. معمولاً در مناطقی که در نیم‌کره شمالی قرار می‌گیرند شیب سقف متمایل به سمت جنوب با زاویه‌ای در حدود ± 10 درجه نسبت به عرض جغرافیایی منطقه می‌تواند بیش‌ترین میزان دریافت انرژی را حاصل کند.

در تحقیق حاضر، از رگرسیون چندگانه به‌منظور ایجاد مقایسه با نتایج حاصل از مدل حرارتی استفاده شد. بدین منظور متغیرهای مستقل مدل رگرسیونی برای تشخیص دمای هوای داخل گلخانه

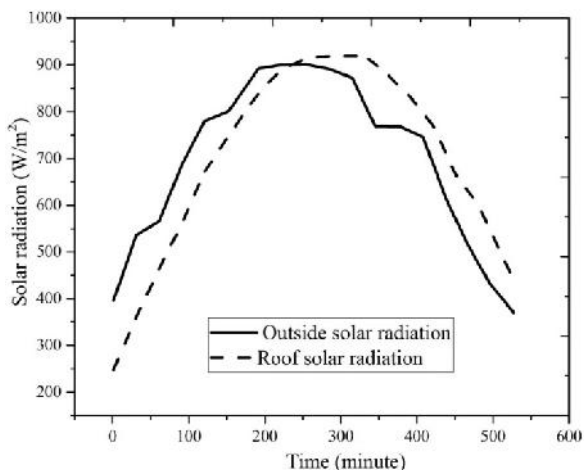
به‌منظور برداشت داده‌های دما از گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد نظر از حسگرهای دما مدل SHT 11 ساخت شرکت CMOS آمریکا استفاده شد. این حسگر از دو نوع حسگر دما و رطوبت مجزا تشکیل شده که خروجی آن‌ها به یک مبدل ۱۴ بیتی آنالوگ به دیجیتال متصل شده است. دقت این حسگر در جمع‌آوری دما و رطوبت به‌ترتیب ± 0.4 درجه سانتی‌گراد و ± 3 درصد است. این حسگرها همراه با بورد میکروکنترلر^۱ در قسمت‌های مورد نظر از گلخانه قرار گرفتند و براساس برنامه‌نویسی انجام شده به‌صورت دقیقه‌ای داده‌های دما و رطوبت مربوطه را برداشت می‌کردند. محل نصب حسگرهای تشخیص دما و رطوبت هوای داخلی گلخانه در چهار نقطه گلخانه بود که پس از ضبط داده‌ها از آن‌ها میانگین‌گیری به‌عمل آمد. همچنین حسگر خاک گلخانه، در چند نقطه سطح خاک گلخانه نصب شد و درنهایت از تمامی حسگرها میانگین‌گیری به‌عمل آمد. شبیه به این حالت برای حسگر تشخیص دمای سقف گلخانه اتفاق افتاد. به‌منظور برداشت داده‌های تابش در خارج از گلخانه، در ارتفاع یک متری و تراز شده زمین، از تابش‌سنج مدل TES1333 استفاده شد. این نوع تابش‌سنج قادر است داده‌های تابش در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر را بادقتی در حدود ۵٪ برداشت کند. همچنین داده‌های مربوط به شدت تابش خورشید روی سقف گلخانه و داخل گلخانه نیز برداشت گردید. سرعت باد در خارج از گلخانه نیز توسط بادسنج مدل YK-2004AH در ارتفاعی حدود دو متر از سطح زمین با دقتی در حدود ± 0.1 متر بر ثانیه برداشت شد. به‌منظور برداشت دمای هوای محیط بیرون نیز از حسگر SHT11 استفاده شد. این حسگر در محفظه‌ای خاص (که در آن جریان آزاد هوا برقرار باشد) و در ارتفاع دو متری سطح زمین قرار گرفت و به‌صورت دقیقه‌ای دما و رطوبت هوای بیرون را ضبط می‌کرد. به‌منظور ارزیابی قابلیت مدل حرارتی در پیش‌بینی دمای هوا، خاک و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی، از معیارهای متوسط قدرمطلق خطا^۲ (MAPE)، ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)، درصد کارایی مدل^۳ (EF) و شاخص بازنگری شده ویلموت^۴ (W) بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل حرارتی و مقادیر واقعی آن‌ها استفاده شد (Vadiei, 2011; Taki et al., 2016):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{d_j - p_j}{d_j} \right| \times 100 \quad (۱۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - p_j)^2}{n}} \quad (۱۳)$$

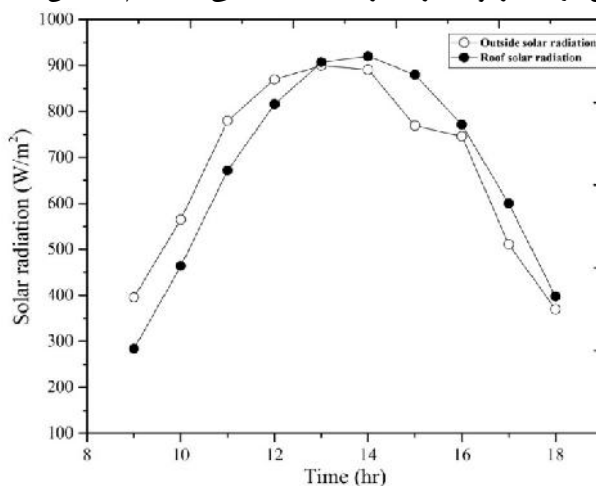
- 1- Microcontroler
- 2- Mean Absolute Percentage Error
- 3- Model efficiency
- 4- Willmott facto

مقدار دمای هوای داخل گلخانه، ابتدا مقادیر اولیه مربوط به دمای هوا و سقف در روابط قرار داده شد و سپس در مرحله بعدی مقادیر ثانویه توسط روابط سنجیده شد و این کار تا پایان ادامه یافت؛ به همین دلیل در صورت بروز خطایی جزئی در هر مرحله، این خطا در مراحل بعدی با خطاهای ایجاد شده جمع شد و در نهایت در اعداد تخمین زده شده، نمایان شد.



(ب)

B



(الف)

A

شکل ۴- دریافت ساعتی (الف) و دقیقه‌ای (ب) انرژی تابشی خورشید روی سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی و محیط بیرون در تاریخ ۱۳۹۴/۰۴/۹

Fig.4. Hourly (A) and minute (B) solar radiation absorption on the roof of semi-solar greenhouse and outdoor surface 30/07/2015

تجدیدپذیر برای گرمایش گلخانه استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت هریک از فاکتورهای ورودی در نتایج خروجی مدل رگرسیونی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که قسمت الف این شکل نشان می‌دهد، دمای خاک بیش‌ترین تأثیر را بر دمای هوای پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی دارد و این نتیجه قابل انتظار است؛ چون در مدل‌های حرارتی رابطه بین دمای خاک با دمای هوا به‌صورت معادله همرفتی (Q_{a-s}) است و مقدار آن همیشه منفی (یعنی انرژی از خاک به هوا منتقل می‌شود) و عددی نسبتاً بزرگ است. قسمت ب این شکل به وضوح نشان می‌دهد که دمای هوای داخل گلخانه بیش‌ترین اثر را بر دمای سقف تخمین زده شده توسط مدل رگرسیونی دارد و دلیل آن رابطه همرفتی هوای داخل گلخانه با سقف شیشه‌ای (Q_{a-n}) است.

در تحقیق دیگری رفتار گلخانه‌ای مرسوم و مجهز به لوله‌های حرارتی با توجه به مدل‌های حرارتی مورد مدل‌سازی قرار گرفت (Du *et al.*, 2012). نتایج حاصل از مدل حرارتی نشان داد که دمای هوای داخل گلخانه و همچنین دمای لایه‌رویی خاک گلخانه بین بازه $\pm 20\%$ اطراف مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده این دو پارامتر در حال تغییر است. این میزان تغییرات با توجه به نتیجه‌گیری نویسندگان در

شامل: دمای خاک (T_s)، دمای سقف (T_{ri})، شدت تابش دریافتی روی سقف (I_r) و دمای هوای بیرون (T_o) در نظر گرفته شد. برای تخمین (T_{ri}) از دمای هوای داخل گلخانه (T_a)، دمای هوای بیرون، سرعت باد بیرون از گلخانه (V_o) و شدت تابش دریافتی روی سقف استفاده شد در این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی متغیرهای مورد نظر توسط مدل حرارتی، از مقادیر اولیه هر متغیر استفاده شد. یعنی به‌هنگام تخمین

به‌منظور بررسی دقیق اثر استفاده از مدل حرارتی و رگرسیون چندگانه بر نتایج به‌دست آمده، میزان ضریب همبستگی بین داده‌های به‌دست آمده با نتایج واقعی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۳ مقادیر ضریب همبستگی و همچنین ضرایب رگرسیون خطی برای تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد، میزان همبستگی بین داده‌های واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی بیش‌تر از مدل حرارتی است. نتایج این تحقیق در مقایسه با سایر پژوهش‌ها نشان از بیش‌تر بودن دقت حاصل از مدل حرارتی مورد استفاده دارد. در تحقیقی به مدل‌سازی حرارتی گلخانه‌ای مجهز به صفحه حرارتی و آبخوان زیرزمینی پرداخته شد (Shukla *et al.*, 2006). تخمین دمای هوای گلخانه در دو منطقه آن توسط مدل حرارتی نشان از دقت پایین این مدل و رابطه ضعیف بین داده‌های پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی داشت ($r=0.81$, $r=0.87$). میزان خطای مدل مورد استفاده برای تخمین دمای هوا در دو منطقه گلخانه به‌ترتیب معادل $9/7\%$ و $10/2\%$ درصد بود. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان تغییرات دمای هوای گلخانه در صورت عدم استفاده از منبع گرم‌کننده بسیار شدیدتر از زمانی است که از منابع فسیلی یا

حد قابل قبول برای مدل‌های حرارتی است.

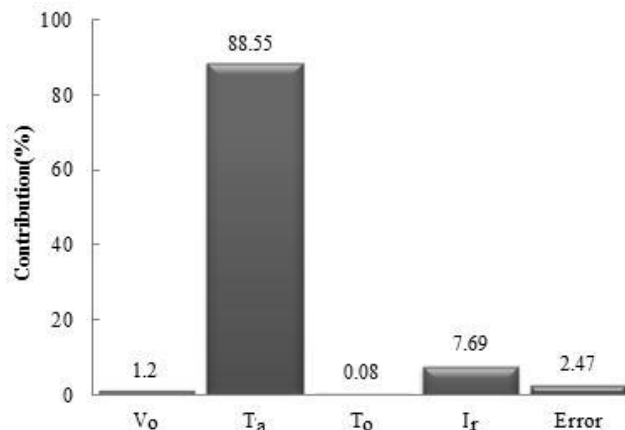
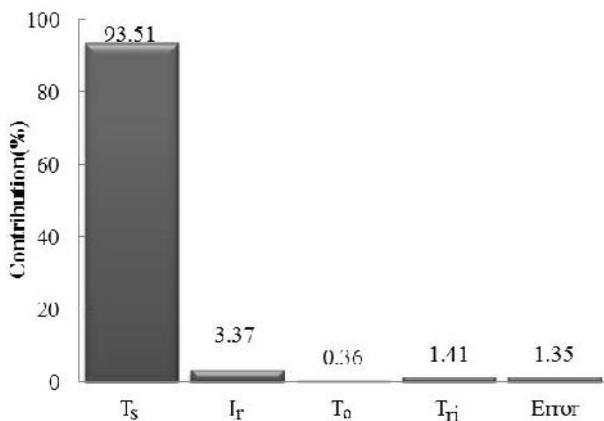
جدول ۳- معادلات حرارتی و رگرسیونی همراه با ضریب همبستگی به‌منظور تخمین دمای هوا و سقف

Table 3- Heat and regression equations to predict inside air and roof temperature

پارامتر Parameter	مدل Model	معادلات رگرسیونی و حرارتی Regression and heat equation	r
T_a	مدل رگرسیونی Reg model	$T_a = 10.98 + (0.3599 \times T_s) - (0.0196 \times I_r) - (0.2003 \times T_o) + (0.7581 \times T_{ri})$	0.992
	مدل حرارتی Heat model	$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-s} - Q_{a-o} - Q_{a-ri} - Q_{nwi-nwo}}{r_a \times c_{p-a} \times V_a}$	0.961
T_{ri}	مدل رگرسیونی Reg model	$\ln T_{ri} = 2.9963 - (0.09128 \times v_o) + (0.0099 \times T_a) + (0.00721 \times T_o) + (0.000357 \times I_r)$	0.975
	مدل حرارتی Heat model	$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{Q_{rd-ri} + Q_{a-ri} + Q_{s-ri} - Q_{ri-o} - Q_{ri-sk}}{r_r \times c_{p-r} \times V_r}$	0.944

مدل‌های حرارتی استفاده از روابط نیمه‌تجربی-نیمه‌ریاضی است. محیط داخلی گلخانه به‌دلیل پیچیدگی‌های زیاد و سروکار داشتن با موجود زنده و همچنین تبخیر و تعرق گیاه همیشه با روابط ریاضی و تخمین دقیق پارامترها دچار مشکل بوده است. روابط مورد استفاده به‌طور طبیعی دارای خطای نهفته هستند و ترکیب این روابط با یکدیگر سبب افزایش این خطاها شده و کاهش دقت را در پی خواهد داشت. استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری نیز به‌دلیل داشتن خطاهای طراحی و همچنین خطا در لحظه اندازه‌گیری به کاهش دقت نتیجه نهایی می‌افزایند (Vadiei, 2012).

از مدل شبکه عصبی و مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی درصد رطوبت و دمای هوای داخلی گلخانه‌ای در مراکش استفاده شد (Dariouchy *et al.*, 2009). از رطوبت هوای بیرون از گلخانه، شدت تابش خورشید در سطح افق، جهت و سرعت باد و دمای هوای خروجی به‌عنوان متغیرهای ورودی و دما و درصد رطوبت داخلی گلخانه به‌عنوان خروجی استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد شبکه عصبی از مدل‌های رگرسیونی هم بیشتر است. میزان ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی برای دمای هوا و رطوبت داخلی گلخانه به‌ترتیب معادل ۰/۹۶۵ و ۰/۹۷۸ گزارش شد. یکی از دلایل افزایش میزان خطا در



شکل ۵- اثر فاکتورهای ورودی بر دمای هوا (سمت چپ) و دمای سقف (سمت راست) پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی

Fig.5. Effect of input variables on inside air (left) and roof temperature (right) predicted by multiple regression

واریانس و توزیع آماری هر دو سری داده دلالت دارد. هر فرض در سطح احتمال ۹۵ درصد به کمک پارامتر Pvalue آزمایش گردید. بنابراین اگر p محاسبه شده برای هر مقایسه بیشتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر را نمی‌توان رد کرد (Rohani *et al.*, 2011). به‌ترتیب

برای بررسی بیش‌تر قابلیت مدل حرارتی و روش رگرسیون چندگانه در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی، میانگین و واریانس مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط هر دو مدل، از نظر آماری مقایسه گردید. در این جا فرض صفر، بر تساوی میانگین،

تخمین (T_{ii}) با مقادیر مشابه در مدل رگرسیون کاملاً باهم متفاوتند. جدول ۵ معیارهای عملکردی دو نوع مدل حرارتی و رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی را نشان می‌دهد. شاخص کارایی (EF) کارایی دو نوع مدل را برحسب عددی بین صفر تا صد محاسبه می‌کند. زمانی که درصد کارایی برابر ۱۰۰ باشد، مقدار پارامتر پیش‌بینی شده با مقدار واقعی آن برابر می‌شود و در صورتی که این عدد منفی باشد نشان از عدم کارایی مدل مورد استفاده است (Shukla et al., 2003). شاخص بازنگری شده ویلموت (W) نیز بین صفر تا یک متغیر است و مقدار یک آن بیان‌گر یکسان بودن مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است (Willmott et al., 1985).

برای مقایسه میانگین و واریانس از آزمون t و F استفاده شد. مقادیر p مقایسه شده برای دمای هوا و سقف گلخانه در جدول ۴ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقایسه میانگین و واریانس مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده دمای هوا و سقف گلخانه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری باهم ندارند و روش رگرسیون چندگانه می‌تواند با قابلیت بالا برای تخمین پارامترهای فوق مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه میانگین برای مدل حرارتی در تخمین دمای هوای داخل گلخانه در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار نیست ولی برای (T_{ii}) هم مقایسه میانگین و هم مقایسه واریانس در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار هستند. یعنی میانگین و واریانس داده‌های حاصل از مدل حرارتی در

جدول ۴- مقایسه میانگین و واریانس برای مدل حرارتی و رگرسیون چندگانه در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه

Table 4- Comparison mean and variance between actual and predicted value for inside air and roof temperature

Parameter پارامتر	مدل Model	نوع تحلیل آماری Statistical analysis type	
		مقایسه میانگین Comparison of means	مقایسه واریانس Comparison of variances
		T_a	مدل رگرسیونی Regression model
	مدل حرارتی Heat model	0.3478	0.006
T_{ir}	مدل رگرسیونی Regression model	0.996	0.998
	مدل حرارتی Heat model	0.000	0.000

جدول ۵- معیارهای عملکردی مدل حرارتی و رگرسیون چندگانه در تخمین T_a و T_{ii}

Table 5- Performance criterion of heat and regression to predict T_a and T_{ii}

نوع مدل Model type	معیار عملکردی Performance criterion					
	MAPE (%)	RMSE (°C)	R	EF	W	
T_a	مدل رگرسیونی Regression model	1.5543	1.7829	0.988	0.955	0.988
	مدل حرارتی Heat model	4.1636	2.7754	0.961	0.952	0.975
T_{ir}	مدل رگرسیونی Regression model	1.5375	1.0262	0.987	0.976	0.991
	مدل حرارتی Heat model	12.0914	6.7093	0.944	0.935	0.771

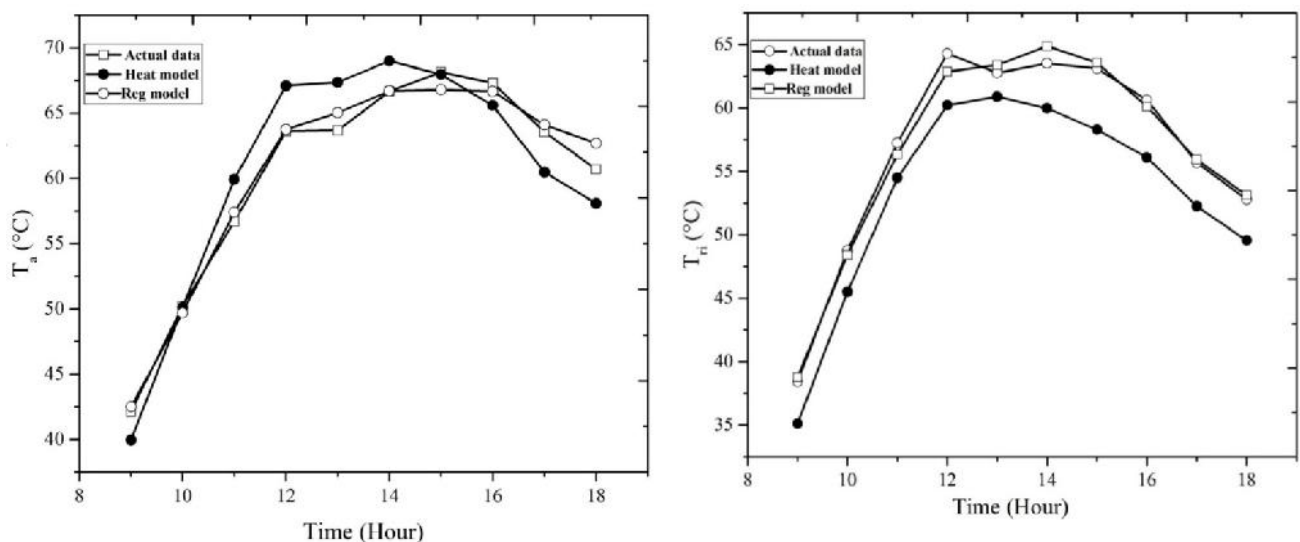
هر دو حالت بیش‌تر است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که مدل حرارتی در تخمین دمای هوای داخلی گلخانه نسبت به دمای سقف گلخانه کارایی بیش‌تری نشان داده است. یکی از دلایل این امر می‌تواند به دلیل جریان باد و عدم یکنواختی توزیع آن در تمام سطح گلخانه باشد؛ همچنین عدم اطمینان از صحت داده‌های برخی فاکتورها از جمله نوع شیشه و ضرایب ثابت مربوط به آن، ضرایب دید

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که متوسط قدر مطلق خطا (MAPE) در مدل حرارتی نسبت به رگرسیون چندگانه در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی به ترتیب حدود ۳ و ۸ برابر بیش‌تر است. همچنین شاخص کارایی مدل رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نسبت به مدل حرارتی بیش‌تر است. مقدار شاخص ویلموت (W) نیز برای مدل رگرسیونی نسبت به حرارتی در

مدل، عدم قطعیت از صحت برخی فاکتورها از جمله T_{sk} (این فاکتور به گفته برخی محققین (Zabeltitz, 2011; Van straiten *et al.*, 2011) می‌تواند بیش‌ترین اثرگذاری بر میزان خطای حاصل از مدل حرارتی در تخمین (T_{ri}) را داشته باشد)، باشد. اکثر محققین از روابط شناخته شده‌ای شبیه به رابطه (۹) و با اطلاع قبلی از میزان خطای آن استفاده می‌کنند، ولی امروزه در برخی کشورهای اروپایی از جمله هلند، از برخی وسایل پیشرفته که محصول شرکت‌های فضایی هستند برای سنجش واقعی این دما با خطای کم استفاده می‌شود (Van Ooteghem, 2007) و سایر فاکتورهای مشابه باشد. در عوض در مدل رگرسیون چندگانه تنها اطلاعات خام در اختیار گرفته می‌شود و ما فقط با دو نوع خطای مدل و خطای ذاتی داده‌ها روبه‌رو هستیم. در صورتی که پارامترهای ورودی مدل به‌درستی انتخاب شوند، به‌دلیل همبستگی بین پارامترهای داخلی گلخانه، تشخیص خروجی مناسب توسط مدل رگرسیونی، آسان و نسبت به مدل‌های حرارتی دارای خطای کم‌تری است.

بین سقف، خاک و آسمان می‌تواند عامل اثرگذار بر افزایش میزان خطای مدل و عدم هماهنگی بین نتایج واقعی و پیش‌بینی شده باشد. در شکل ۶ مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ساعتی توسط مدل حرارتی و رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی نشان داده شده است.

در تحقیقی، به مدل‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ای مجهز به مبدل زمینی در کشور هند پرداخته شد (Tiwari *et al.*, 2006). در این تحقیق از مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت و جرم استفاده شده بود. نتایج نشان داد که میزان خطای مطلق در پیش‌بینی دمای گلخانه در حضور سیستم مبدل زمینی حدود ۵/۹٪ و در عدم حضور مبدل زمینی ۵/۵٪ است. در اکثر مقالات خطای مطلق در تخمین پارامترهای داخلی گلخانه مابین ۵ تا ۲۰٪ گزارش شده است (Panwar *et al.*, 2011). در تحقیق حاضر استفاده از مدل حرارتی در کنار مدل رگرسیونی نشان از برتری مدل رگرسیونی داشت. این امر می‌تواند به‌دلیل عدم ورود خطاهای مدل حرارتی، پارامترهای ثابت



شکل ۶- مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ساعتی دمای هوا (سمت چپ) و سقف گلخانه (سمت راست) توسط مدل حرارتی و رگرسیونی

Fig.6. Comparison between actual and predict hourly temperature values of indoor air (left) and roof of greenhouse (right) for heat and regression models.

مطالعات به قدرت شبکه‌های عصبی در تخمین برخی روابط غیرخطی بین متغیرهای داخلی گلخانه اشاره کرده‌اند. نتایج این تحقیق نیز به‌درستی نتایج سایر تحقیقات مشابه را تأیید می‌کند و لزوم استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون چندگانه در تخمین پارامترهای داخلی گلخانه را تأیید می‌کند. فاکتورهای مهم در گلخانه شامل دمای هوای گلخانه، دمای سقف، دمای خاک، دمای گیاه و رطوبت هوا و خاک گلخانه است که با توجه به تحقیقات فوق در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان انتظار داشت که این فاکتورها با

امروزه تحقیقاتی زیادی در زمینه هوشمند کردن گلخانه‌ها و حرکت به سمت گلخانه‌های خورشیدی تمام بسته در جریان است که در این بین نقش هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی در تخمین پارامترهای گلخانه‌ای برجسته و قابل توجه است. در این زمینه مطالعات مختلف ولی تقریباً کم انجام شده است (He and Ma, 2010; Boaventura *et al.*, 2000; Dariouchy *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2002; Linker *et al.*, 1998). ولی تمامی این

۰/۹۴۴، ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۷ گزارش شد. مقدار فاکتور کارایی مدل (EF) برای مدل حرارتی در تشخیص دمای هوا و سقف گلخانه به ترتیب معادل ۰/۹۵۲ و ۰/۹۳۵ گزارش شد که ۰/۰۰۳ و ۰/۰۴۱ کم‌تر از مقدار مشابه برای مدل رگرسیونی است. در این تحقیق متوسط قدر مطلق خطا (MAPE) برای مدل حرارتی در تشخیص دمای هوا و سقف گلخانه به ترتیب معادل ۲/۶۷ و ۷/۸۶ برابر بیش‌تر از مقادیر مشابه برای مدل رگرسیونی گزارش شد. پیشنهاد می‌شود با توجه به صنعت رو به پیشرفت گلخانه‌سازی و استفاده از روش‌های نوین در این شاخه، اثر استفاده از ابزارهای مختلف از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های پیشرفته الگوریتم ژنتیک در تخمین پارامترهای داخلی گلخانه بررسی شود و در صورت دستیابی به نتایج بهتر، از خروجی این ابزارها برای بررسی فرآیند انتقال حرارت و جرم در گلخانه‌های کشاورزی استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز به دلیل مساعدت‌های مالی در اجرای این تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از زحمات Dr. Rachel Van Oothenhem استاد دانشگاه Wageningen هلند در بررسی اولیه و همچنین راهنمایی در اجرای این تحقیق کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

دقت بیش‌تری توسط این روش تخمین زده شود و سپس میزان تلفات حرارتی گلخانه توسط هدایت، همرفت و تابش محاسبه شده و تراز انرژی گلخانه در کشت یک محصول به‌درستی محاسبه شده و در محاسبات مربوط به طراحی و ساخت اولیه گلخانه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از هوش مصنوعی در گلخانه‌ها علاوه‌بر افزایش دقت محاسبات، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های نصب انواع حسگرهای دما، رطوبت و باد در گلخانه شود و هزینه‌های اولیه را تا حد قابل توجهی کاهش دهد (Linker and Seginer, 2004).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل حرارتی و رگرسیونی چندگانه به‌منظور تخمین دمای هوا و سقف گلخانه‌ای نیمه‌خورشیدی در محیط دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز استفاده شد. طراحی و انتخاب شکل و جهت مناسب گلخانه با توجه به بیش‌ترین میزان دریافت انرژی و انتخاب از بین مدل‌های رایج گلخانه‌ای در منطقه انجام گرفت. از مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت به‌منظور تشکیل تراز انرژی در دو منطقه گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که به‌دلیل مجموع انواع خطاها در مدل حرارتی، مقدار نهایی داده‌ها دارای درصد خطای بیش‌تری نسبت به مدل رگرسیونی است. میزان ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و نتایج به‌دست آمده از مدل حرارتی و رگرسیونی برای تخمین دمای هوا و سقف گلخانه به ترتیب معادل ۰/۹۶۱ و

References

1. Abdel Ghany, A. M. and I. M. Helal. 2011. Solar energy utilization by a greenhouse: General relations. *Renewable Energy* 36: 189-196.
2. Abdi R., M. Taki, and M. Akbarpour. 2012. An Analysis of Energy input-output and Emissions of Greenhouse Gases from Agricultural Productions. *International Journal of Natural and Engineering Sciences* 6 (3): 73-79.
3. Alonso, J. P., M. P. Garcia, M. P. Romera, and A. J. C. Ferre. 2012. Performance analysis and neural modeling of a greenhouse integrated photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 4675-4685.
4. Banaeian, N., M. Omid, and H. Ahmad. 2011. Application of Data Envelopment Analysis to Evaluate Efficiency of Commercial Greenhouse Strawberry. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 3 (3): 185-193.
5. Boaventura, L., C. Couto, and A. E. B. Ruano. 2000. A greenhouse climate multivariable predictive controller, *Acta Horticulturae* 534: 269-276.
6. Buchholz, M., R. Buchholz, and P. Jochum. 2006. Temperature and humidity control in the Watergy greenhouse. *Acta Horticulturae* 2: 719-731.
7. Canakci, M., and I. Akinci. 2006. Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy* 31 (8-9): 1243-1256.
8. Chandra, P. 1976. Predicting the effects of greenhouse orientation and insulation on energy conservation. Unpublished M.Sc. thesis. Department of Agricultural Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
9. Chandra, P., and L. D. Albright. 1978. Analytical determination of the effects of using night curtains in greenhouses Paper ASAE.
10. Dariouchy, A., E. Aassif, K. Lekouch, L. Bouirden, and G. Maze. 2009. Prediction of the intern parameters tomato greenhouse in a semi-arid area using a time-series model of artificial neural

- networks. *Measurement* 42: 456-463.
11. Du, J., P. Bansal, and B. Huang. 2012. Simulation model of a greenhouse with a heat-pipe heating system. *Applied Energy* 93: 268-276.
 12. Ferreira, P. M., E. A. Faria, and A. E. Ruano. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing* 43 (1-4): 51-75.
 13. Fuller, R., C. Meyer, and P. Sale. 1987. Validation of a dynamic model for predicting energy use in greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering* 38: 1-14.
 14. He, F., and C. Ma. 2010. Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Computers and Electronics in Agriculture* 71S: S19-S23.
 15. Heuvelink, E., and M. Bakker. 2008. Climate and yield in a closed greenhouse. *Acta Horticulture* 801: 1083-1092.
 16. Hoes, H., and J. Desmedt. 2008. The GESKAS project, closed greenhouse as energy source and optimal growing environment. *Acta Horticulture* 801: 1355-1362.
 17. Hollmuller, P., and B. Lachal. 1998. TRNSYS compatible moist air hypocaust model. Final report. Project number 19507. University De Geneve.
 18. Joudi, K. A., and A. Farhan A. 2015. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy conversion and management* 91: 76-82.
 19. Linker, R., and I. Seginer. 2004. Greenhouse temperature modeling: a comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Mathematics and Computers in Simulation* 65: 19-29.
 20. Linker, R., I. Seginer and P.O. Gutman. 1998. Optimal CO₂ control in a greenhouse modeled with neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 19: 289-310.
 21. McCune, W. F., and D. Stipe .1960. Electric heating for plastic greenhouses, a summary of progress report to the Texas Farm Electrification Committee. Texas A&M University, College Station, TX: Department of Agricultural Engineering.
 22. Morris, L. G. 1956. Some aspect of the control of plant environment. *Journal of agricultural engineering research* 1: 156-166.
 23. Nayak, S., and G. N. Tiwari. 2006. Energy metrics of photovoltaic/thermal and earth air heat exchanger integrated greenhouse for different climatic conditions of India. *Applied Energy* 87: 2984-2993.
 24. Ntinias, G. K., V. P. Fragos, and C. H. N. Martzopoulou. 2014. Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse. *Energy Conversion and Management* 81: 428-439.
 25. Omid, M., F. Ghobabeige, M. Delshad, and H. Ahmadi. 2011. Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis. *Energy conversion and Management* 52: 153-162.
 26. Panwar, N. L., S. C. Kaushik, and S. Kothari. 2011. Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3934-3945.
 27. Rohani, A., M. H. Abbaspour-Fard and S. Abdolahpour. 2011. Prediction of tractor repair and maintenance costs using artificial neural network. *Expert Sys. Applications* 38: 8999-9007.
 28. Shukla, A., G. N. Tiwari, and M. S. Sodha. 2006. Thermal modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and an earth-air heat exchanger. *Building and Environment* 41 (7): 843-850.
 29. Shukla, M. K., R. Lal, and P. Unkefer. 2003. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. *Soil Science* 168 (3): 178-191.
 30. Simpkins, J. C., D. R. Mears, and W. J. Robert. 1979. Reducing closes in polyethylene covered greenhouses. *ASABE* 19 (4): 714-719.
 31. Singh, R. D., and G. N. Tiwari. 2010. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis. *Energy* 35: 2367-2373.
 32. Taki, M., R. Abdi, M. Akbarpour, and H. G. Mobtaker. 2013. Energy inputs – yield relationship and sensitivity analysis for tomato greenhouse production in Iran. *Agric Eng Int: CIGR Journal* 15 (1): 59-67.
 33. Taki, M., Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, A. Rohani, and M. Matloobi. 2016. Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse. *Energy and Buildings* 110: 314-329.
 34. Tiwari G. N., M. A. Akhtar, A. Shukla, and M. Emran Khan. 2006. Annual thermal performance of greenhouse with an earth-air heat exchanger: An experimental validation. *Renewable Energy* 31:

- 2432-2446.
35. Vadiiee, A. 2011. Energy Analysis of the Closed Greenhouse Concept-Toward one Sustainable Energy Pathway. KTH School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology Division of Heat and Power Technology SE-100 44 STOCKHOLM.
 36. Vadiiee, A., and V. Martin. 2012. Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 5087-5100.
 37. Vadiiee, A., and V. Martin. 2013. Energy analysis and thermo economic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building. *Applied Energy* 102: 1256-1266.
 38. Van Ooteghem, R. J. C. 2007. *Optimal Control Design for a Solar Greenhouse*, Systems and Control. Wageningen: Wageningen University.
 39. Van Straten, G., G. Van Willigenburg, E. Van Henten, and R. Van Oothghem. 2011. *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC press, Taylor and Francis, New York.
 40. Walker, J. N. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouse. *Transactions of the American society of agricultural engineers* 8 (3): 445-448.
 41. Willits, D., P. Chandra, and M. Peet. 1985. Modeling solar energy storage system for greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering* 32: 73-79.
 42. Willmott, C., J. Ackleson, S. G. Davis, R. E. Feddema, J. J. Klink, K. M. Legates, D. R. Donnell, and C. M. Rowe. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90: 8995-9005.
 43. Zabeltitz, C. V. 2011. *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Evaluation of heat transfer mathematical models and multiple linear regression to predict the inside variables in semi-solar greenhouse

M. Taki¹ - Y. Ajabshirchi² - S. F. Ranjbar² - A. Rohani^{4*} - M. Matloobi⁵

Received: 06-08-2015

Accepted: 14-11-2015

Introduction

Controlling greenhouse microclimate not only influences the growth of plants, but also is critical in the spread of diseases inside the greenhouse. The microclimate parameters were inside air, greenhouse roof and soil temperature, relative humidity and solar radiation intensity. Predicting the microclimate conditions inside a greenhouse and enabling the use of automatic control systems are the two main objectives of greenhouse climate model. The microclimate inside a greenhouse can be predicted by conducting experiments or by using simulation. Static and dynamic models are used for this purpose as a function of the metrological conditions and the parameters of the greenhouse components. Some works were done in past to 2015 year to simulation and predict the inside variables in different greenhouse structures. Usually simulation has a lot of problems to predict the inside climate of greenhouse and the error of simulation is higher in literature. The main objective of this paper is comparison between heat transfer and regression models to evaluate them to predict inside air and roof temperature in a semi-solar greenhouse in Tabriz University.

Materials and Methods

In this study, a semi-solar greenhouse was designed and constructed at the North-West of Iran in Azerbaijan Province (geographical location of 38°10' N and 46°18' E with elevation of 1364 m above the sea level). In this research, shape and orientation of the greenhouse, selected between some greenhouses common shapes and according to receive maximum solar radiation whole the year. Also internal thermal screen and cement north wall was used to store and prevent of heat lost during the cold period of year. So we called this structure, 'semi-solar' greenhouse. It was covered with glass (4 mm thickness). It occupies a surface of approximately 15.36 m² and 26.4 m³. The orientation of this greenhouse was East-West and perpendicular to the direction of the wind prevailing. To measure the temperature and the relative humidity of the air, soil and roof inside and outside the greenhouse, the SHT 11 sensors were used. The accuracy of the measurement of temperature was ±0.4% at 20 °C and the precision measurement of the moisture was ±3% for a clear sky. We used these sensors in soil, on the roof (inside greenhouse) and in the air of greenhouse and outside to measure the temperature and relative humidity. At a 1 m height above the ground outside the greenhouse, we used a pyranometre type TES 1333. Its sensitivity was proportional to the cosine of the incidence angle of the radiation. It is a measure of global radiation of the spectral band solar in the 400–1110 nm. Its measurement accuracy was approximately ±5%. Some heat transfer models used to predict the inside and roof temperature are according to:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-s} - Q_{a-o} - Q_{a-ri} - Q_{nwi-nvo}}{\dots_a \times c_{p-a} \times V_a} \quad (1)$$

$$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{Q_{rd-ri} + Q_{a-ri} + Q_{s-ri} - Q_{ri-o} - Q_{ri-sk}}{\dots_r \times c_{p-r} \times V_r} \quad (2)$$

The regression model was formed for output (T_{ri} and T_a) using four inputs for each of them according to:

1- Assistant Prof. Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Ramin Agriculture and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Ahvaz

2- Prof. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3- Associate Prof. Department of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz

4- Assistant Prof. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

5- Assistant Prof. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(*- Corresponding Author Email: arohani@um.ac.ir)

Inside air temperature (T_a), solar radiation on the roof (I_r), wind speed (v_o), outside air temperature (T_o).
Inside soil temperature (T_s), solar radiation on the roof, roof temperature (T_r), outside air temperature.

Results and Discussion

Results showed that solar radiation on the roof of semi-solar greenhouse was higher after noon so this shape can receive high amounts of solar energy during a day. From statistical point of view, both desired and predicted test data have been analyzed to determine whether there are statistically significant differences between them. The null hypothesis assumes that statistical parameters of both series are equal. P value was used to check each hypothesis. Its threshold value was 0.05. If p value is greater than the threshold, the null hypothesis is then fulfilled. To check the differences between the data series, different tests were performed and p value was calculated for each case. The so called *t-test* was used to compare the means of both series. It was also assumed that the variance of both samples could be considered equal. The variance was analyzed using the *F-test*. Here, a normal distribution of samples was assumed. The results showed that the p values for heat model in all 2 statistical factors (Comparison of means, and variance) is lower than regression model and so the heat model did not have a good efficient to predict T_{ri} and T_a . RMSE, MAPE, EF and W factor was calculated for to models. Results showed that heat model cannot predict the inside air and roof temperature compare to regression model.

Conclusions

This article focused on the application of heat and regression models to predict inside air (T_a) and roof (T_{ri}) temperature of a semi-solar greenhouse in Iran. To show the applicability and superiority of the proposed approach, the measured data of inside air and roof temperature were used. To improve the output, the data was first preprocessed. Results showed that RMSE for heat model to predict T_a and T_{ri} is about 1.58 and 6.56 times higher than this factor for regression model. Also EF and W factor for heat model to predict above factors is about 0.003 and 0.041, 0.013 and 0.220 lower than regression model respectively. We propose to use Artificial Neural Network (ANN) and Genetic Algorithm (GA) to predict inside variables in greenhouses and compare the results with heat and regression models.

Keywords: Heat transfer, Model efficiency, Modeling, Semi-solar greenhouse

تحلیل عددی استفاده از آب گرم کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک- گرمایی در ایران

مسعود محمدی ساردوئی^۱ - حمید مرتضی پور^{۲*} - کاظم جعفری نعیمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

چکیده

در این تحقیق مطالعه عددی یک سامانه ترکیبی فتوولتائیک-گرمایی آبی با توان نامی ۸۸۰ وات برای ایران استفاده شده است. این سامانه از اجزایی شامل جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی آبی، گرم‌کن کمکی، پمپ، مخزن، مبدل حرارتی و لوله‌های اتصال تشکیل شده بود. عملکرد این سامانه در چهار فصل سال برای شهرهای مختلف (بندرعباس، تبریز، تهران و کرمان) توسط نرم‌افزار TRNSYS بررسی عددی شد. نتایج نشان داد که برق تولیدی توسط سامانه طراحی شده در شهرهای مختلف تقریباً ثابت است. به طوری که، بیش‌ترین مقدار اختلاف بین میانگین سالانه انرژی الکتریکی تولیدی در شهرهای مختلف، ۰/۵۲ کیلووات ساعت بر روز به‌دست آمد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار میانگین انرژی الکتریکی به‌ترتیب در تابستان برابر ۴/۶۵ و زمستان برابر ۲/۶۷ کیلووات ساعت بر روز مشاهده شد. بیش‌ترین میانگین انرژی حرارتی ۱۶ کیلووات ساعت بر روز و سهم انرژی حرارتی خورشیدی ۵۰ درصد در شهر بندرعباس مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی، سهم خورشیدی، فتوولتائیک-گرمایی

مقدمه

(Chow, 2010). سامانه‌های ترکیبی یا فتوولتائیک-گرمایی سامانه‌هایی هستند که در آن‌ها به‌صورت هم‌زمان، انرژی حرارتی و الکتریسیته تولید می‌گردد (Kroiß *et al.*, 2014). در سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی، اولویت اول تولید الکتریسیته است، که برای این منظور باید دمای سلول فتوولتائیک را در کم‌ترین سطح نگاه داشت تا بازده الکتریکی مناسبی داشته باشد (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007). در بیش‌تر سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی، امروزه از آب به‌عنوان سیال انتقال‌دهنده گرما استفاده می‌شود، زیرا بازده بیش‌تری نسبت به هوا دارد (Herrando *et al.*, 2014). گردش سیال در درون شبکه خنک‌کننده به‌صورت گردش طبیعی و یا به‌صورت گردش اجباری انجام می‌گردد (Chow, 2010). طرح‌های مختلفی برای سامانه خنک‌کننده پنل فتوولتائیک در جمع‌کننده‌های فتوولتائیک-گرمایی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به انواع پوسته-لوله، صفحات موازی و جریان دوتایی اشاره کرد (Ziapour *et al.*, 2014). برای افزایش بازده حرارتی سامانه فتوولتائیک-گرمایی، به‌طور معمول از یک پوشش شیشه‌ای که در قسمت بالای پنل فتوولتائیک قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. پوشش شیشه‌ای، با ایجاد یک مانع حرارتی موجب کاهش اتلاف حرارت از سطح رویی جمع‌کننده می‌گردد (Dupeyrat *et al.*, 2014). تحقیقات نشان می‌دهند که سامانه فتوولتائیک-گرمایی مجهز به پوشش شیشه‌ای بازده حرارتی بیش‌تری نسبت به حالت بدون پوشش شیشه‌ای دارد (Joshi *et al.*, 2009). با توجه به

امروزه انرژی خورشیدی یک منبع انرژی جایگزین مهم برای سوخت‌های فسیلی است و نسبت به دیگر منابع انرژی ترجیح داده می‌شود، چرا که رایگان، فراوان، تمام‌نشده و غیرآلاینده می‌باشد (Basunia and Abe, 2001). یکی از راه‌های به‌کارگیری انرژی خورشیدی استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک است. در این سامانه‌ها، انرژی خورشیدی به‌صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود (Rothwarf and Böer, 1975). سلول‌های فتوولتائیک بیش از ۸۰ درصد تابش خورشید را جذب کرده و تنها ۵ تا ۲۰ درصد از آن را به انرژی الکتریکی و باقی‌مانده را به گرما تبدیل می‌کنند (Van Helden *et al.*, 2004). برطبق ساختار سلول‌های خورشیدی گرما باعث کاهش توان آن‌ها می‌شود. دلیل این امر افزایش نرخ باز ترکیب حامل‌های شارژ به‌دلیل افزایش تراکم آن‌ها در دماهای بالا است (Dubey *et al.*, 2013). با خنک کردن سلول‌های خورشیدی به‌وسیله جریان سیالی مانند آب یا هوا عملکرد تولید برق آنها بهبود می‌یابد. برای این منظور از سامانه فتوولتائیک-گرمایی استفاده می‌شود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲ و ۳- استادیار بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

*- نویسنده مسئول

(Email: h.mortezapour@uk.ac.ir)

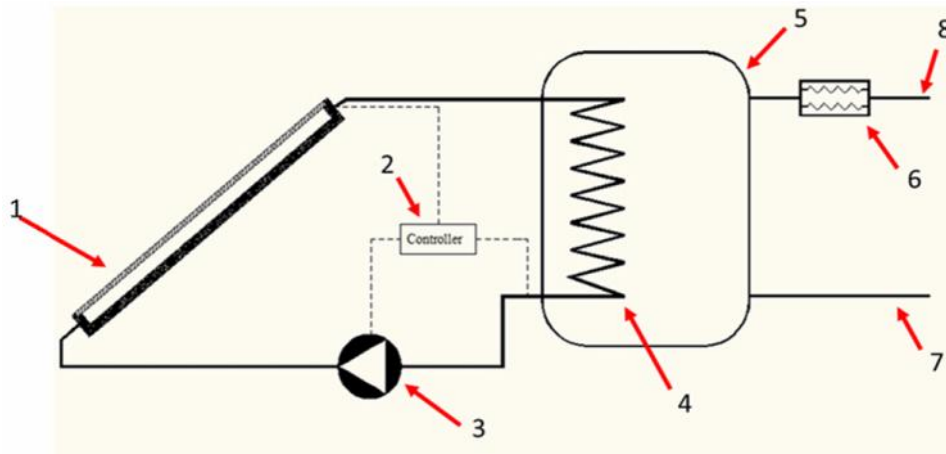
DOI: 10.22067/jam.v7i1.47426

مواد و روش‌ها

مشخصات سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی

شکل ۱ طرح‌واره‌ای از سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی مورد نظر در تحقیق را نشان می‌دهد. سامانه مورد نظر دارای دو مدار جریان سیال مستقل از یکدیگر است. مدار جریان بسته، که از اجزاء جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی، پمپ و مبدل حرارتی تشکیل گردید و مدار جریان باز، که از لوله‌های ورود و خروج آب مصرفی و مبدل حرارتی ساخته شد. در این سامانه، دو مدار در درون مخزن، به صورت غیرمستقیم با هم در ارتباط هستند و تبادل حرارت صورت می‌گیرد. جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی آبی مورد نظر، ترکیبی از پنل فتوولتائیک مرسوم و شبکه خنک‌کننده است. در این جمع‌کننده به طور هم‌زمان انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی تولید می‌شود. جمع‌کننده دارای ابعاد ۵/۶ متر مربع و با توان نامی الکتریکی ۸۸۰ وات در نظر گرفته شد. شبکه لوله‌های آب در مدار بسته، برای انتقال آب از شبکه خنک‌کننده پشت جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی به مبدل حرارتی و از مبدل حرارتی به پمپ انتقال سیال؛ و در مدار باز، از آب شهری به مخزن و از مخزن به لوله آب مصرفی کاربر متصل می‌باشد. مخزن دارای ظرفیت ۳۰۰ لیتر است و در آن یک مبدل حرارتی برای تبادل حرارت بین سیال گرم خروجی از جمع‌کننده و جریان آب مصرفی کاربر وجود دارد. در مدار بسته، سیال خنک‌کننده توسط پمپ از مبدل حرارتی، برای خنک کردن سلول‌های فتوولتائیک، به درون شبکه جمع‌کننده حرارتی فرستاده می‌شود. در جمع‌کننده خورشیدی، گرمای سلول‌های فتوولتائیک توسط سیال جذب و در ادامه با عبور از داخل شبکه مبدل حرارتی مخزن، به جریان آب مصرفی منتقل می‌گردد. جریان آب مصرفی، یک مدار جریان باز می‌باشد که توسط یک پمپ با دبی ثابت از شبکه لوله‌کشی آب شهری تغذیه می‌شود. برای رساندن دمای آب مصرفی به دمای مطلوب، یک گرم‌کن کمکی در مسیر خروجی آب از مخزن نصب گردید. با توجه به این‌که، در ساختمان‌های مسکونی قدیمی برای داشتن تهویه مطبوع، دمای آب ۷۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس مورد نیاز بوده، و در ساختمان‌های جدید به دلیل عایق‌بندی مناسب، دمایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس، کفایت (Van Helden *et al.*, 2004)، دمای کاری گرم‌کن بر روی ۶۰ درجه سلسیوس تنظیم شد. یک سامانه کنترل، برای کنترل و فعال‌سازی پمپ گردش آب در مدار بسته مورد استفاده قرار گرفت. این کنترل‌کننده، در هر لحظه دمای آب خروجی از جمع‌کننده و خروجی از مخزن در مدار بسته را مقایسه و چنانچه دمای آب خروجی از جمع‌کننده بیش‌تر از دمای آب داخل مخزن می‌شد، پمپ موجود در مدار جریان بسته را روشن می‌کرد.

هزینه‌های نسبتاً بالای ساخت و راه‌اندازی تجهیزات فتوولتائیک، تخمین عملکرد آن‌ها قبل از نصب، امری ضروری و حیاتی می‌باشد. از این رو، در پژوهش‌های متعددی، اقدام به شبیه‌سازی و تحلیل سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی در مناطق جغرافیایی مختلف گردیده است. در پژوهشی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی در سه شهر فرانسه توسط نرم‌افزار TRNSYS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیش‌ترین انرژی الکتریکی تولید شده در فصل‌های گرم سال می‌باشد (Dupeyrat *et al.*, 2014). در پژوهش دیگری عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی توسط نرم‌افزار TRNSYS در کشور کانادا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق مشخص کرد که در صورت استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی به‌جای فتوولتائیک مرسوم و آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی، هزینه نگهداری سالانه ۲۱ درصد و انتشار گازهای گلخانه‌ای ۱۶ درصد کاهش می‌یابد (Kegel *et al.*, 2014). در ایران پس از هدف‌مندی‌سازی یارانه‌ها، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، کاهش منابع و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف آن‌ها و ازطرفی، پاک، رایگان، در دسترس و فراوان بودن انرژی تابشی خورشیدی در اکثر مناطق جغرافیایی، باعث شده که استفاده از انرژی خورشید، مورد توجه فراوان قرار گیرد. در این راستا، می‌توان به نصب آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی، نیروگاه‌های فتوولتائیک کوچک در ابعاد خانگی و یا تأمین برق منازل روستایی با استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک اشاره کرد. با این وجود، با توجه به هزینه‌های پایین حامل‌های انرژی، استفاده از برق فتوولتائیک در ایران، هنوز توجیه اقتصادی چندانی ندارد (Mortezapour *et al.*, 2012). لذا، به‌کارگیری سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی به‌منظور تأمین هم‌زمان انرژی الکتریکی و گرمایی مورد نیاز، می‌تواند ضمن افزایش توان الکتریکی و تولید هم‌زمان انرژی حرارتی، راه‌حل مناسبی برای بهبود توجیه‌پذیری اقتصادی استفاده از برق خورشیدی باشد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که علاوه‌بر ساختار جمع‌کننده، موقعیت جغرافیایی، نیز بر عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی مؤثر می‌باشد (Herrando *et al.*, 2014). از طرفی، رفتار سامانه‌های ترکیبی فتوولتائیک-گرمایی با سامانه‌های فتوولتائیک یا گرمایی جداگانه متفاوت است و به‌سادگی نمی‌توان براساس عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک یا آب‌گرم‌کن خورشیدی مرسوم، برآورد دقیقی از مقدار تولید برق یا گرمای سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی ارائه کرد. لذا، هدف از انجام این تحقیق بررسی عددی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی در شهرهای مختلف ایران (شامل: بندرعباس، تبریز، تهران و کرمان) توسط نرم‌افزار TRNSYS است و پارامترهای انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی و سهم خورشیدی برای هر شهر مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد.



شکل ۱- طرح‌واره سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي: ۱- جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمايي آبي ۲- کنترل‌کننده ۳- پمپ ۴- مبدل حرارتي ۵- مخزن ۶- گرم‌کن کمکی ۷- ورودی آب شهری ۸- خروجی آب به سمت مصرف‌کننده

Fig. 1. Schematic view of the PVT system 1- PV/T collector 2- Controller 3- Pump 4- Heat exchanger 5- Tank 6- Auxiliary heater 7- Urban water inlet 8- Water outlet to consumer

۳۸/۰۶ درجه شمالی)، تهران (با طول ۵۱/۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۷ درجه شمالی) و کرمان (با طول ۵۷/۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰/۳ درجه شمالی) مورد بررسی قرار گرفت. زاویه قرارگیری جمع‌کننده ترکیبی نسبت به افق، در هر شهر برابر عرض جغرافیایی منطقه در نظر گرفته شد. به منظور انجام آزمایش‌ها، روزهای پنجم، پانزدهم و بیست و پنجم در تمام ماه‌های سال برای شبیه‌سازی انتخاب شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در هر آزمایش شامل، دمای آب خروجی از جمع‌کننده، دمای آب ورودی به آن، دمای آب مصرفی خروجی و ورودی به مخزن و خروجی از گرم‌کن کمکی، دمای میانگین سلول‌های خورشیدی و انرژی الکتریکی تولیدی توسط پنل بود. یکی دیگر از پارامترهای مورد ارزیابی، سهم خورشیدی بود. سهم خورشیدی بیان‌گر بخشی از انرژی حرارتی مصرفی که توسط خورشید تأمین گردیده است، می‌باشد. در ادامه سهم خورشیدی از رابطه‌ی (۱) محاسبه شد (Nualboonrueng et al., 2013).

$$SF = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \quad (1)$$

که در آن Q_{load} مقدار گرمای مورد نیاز برای رسیدن دمای آب شهری به مقدار مطلوب (kWh) و Q_{aux} انرژی حرارتی تأمین شده توسط منبع حرارتی کمکی (kWh) می‌باشند، صورت کسر آورده شده در رابطه (۱)، در واقع بیان‌گر انرژی حرارتی تأمین شده به وسیله‌ی جمع‌کننده‌ی خورشیدی فتوولتائیک-گرمايي است.

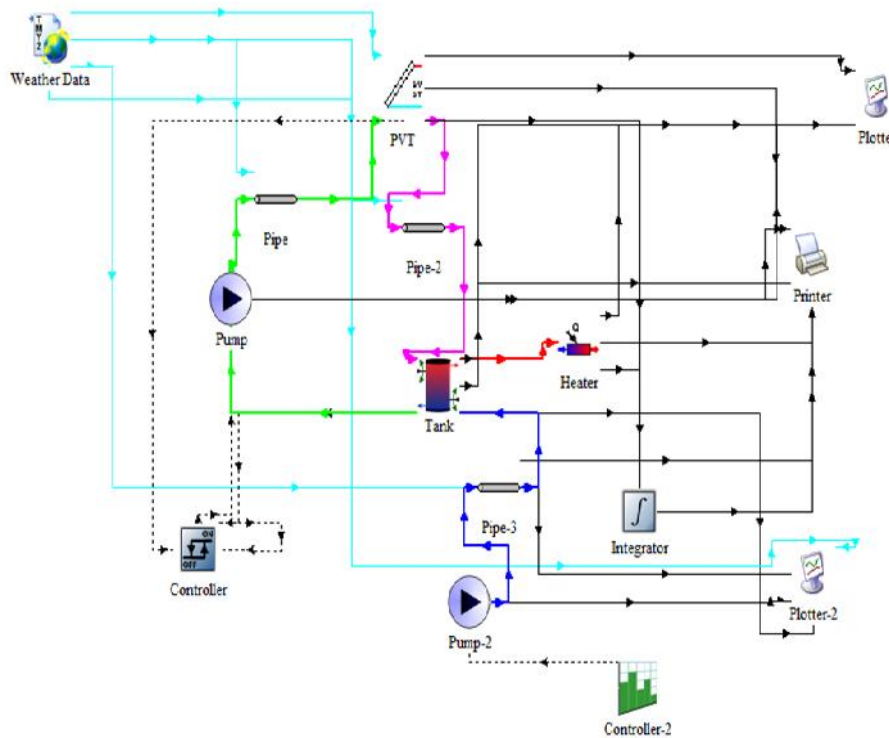
شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي

در نرم‌افزار شبیه‌سازی TRNSYS پارامترها و ورودی‌های متناسب با کارکرد سامانه به هریک از اجزاء آن داده می‌شود و نرم‌افزار با اعمال ریاضی بر روی پارامترها و ورودی‌ها، خروجی را به دو صورت گرافیکی و عددی نمایش می‌دهد. در این نرم‌افزار، هر جزء با مدل ریاضی حاکم بر عملکرد آن و به صورت یک المان مستقل، از قبل تعریف و در بانک المان‌های آن قرار داده شده است. طراحی یک سامانه در این نرم‌افزار، شامل چیدمان المان‌های مختلف به کار رفته در آن و اتصال صحیح خروجی و ورودی هر یک از آن‌ها می‌باشد. در شکل ۲ مدار طراحی شده سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي مورد نظر، در نرم‌افزار TRNSYS نشان داده شده است.

در جدول ۱ اجزای مورد استفاده در نرم‌افزار TRNSYS برای شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي آورده و نوع هر کدام مشخص شده است.

روش انجام آزمایش

سامانه فتوولتائیک-گرمايي علاوه بر این که الکتریسیته تولید می‌کند، به صورت هم‌زمان گرمای سطح پنل فتوولتائیک را به کمک سامانه خنک‌کننده‌ای که در پشت آن قرار دارد جذب و باعث تولید توان حرارتی می‌شود. در تحقیق حاضر مجموعه فتوولتائیک-گرمايي آبي برای استفاده در مکان‌های آموزشی و اداری پیشنهاد شده است. عملکرد سامانه‌ی ترکیبی فتوولتائیک-گرمايي طراحی شده، در چهار شهر مختلف از نظر شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی شامل بندرعباس (با طول ۵۶/۲۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷/۱۷ درجه شمالی)، تبریز (با طول ۴۶/۲۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی



شکل ۱- مدار سامانه فتوولتائیک- گرمایی آبی طراحی شده در نرم‌افزار TRNSYS

Fig. 2. The simulated circuit of PV-thermal system in TRNSYS

جدول ۱- لیست اجزاء مورد استفاده برای شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک- گرمایی آبی

Table 1- List of the Component types used in the PV/T system simulation

Component اجزای سامانه	Type نوع المان	Input values مقدار ورودی
Controller 1 کنترلر ۱	Type 2b	-
Controller 2 کنترلر ۲	Type 14h-2	-
Collector جمع‌کننده خورشیدی	Type 50b	5.6 m ² and 880 W (Nualboonrueng <i>et al.</i> , 2013) مساحت ۵/۵ متر مربع و توان نامی ۸۸۰ وات
Auxiliary heating گرم‌کن کمکی	Type 6	Set point temperature (60 °C), maximum heating rate (2000 W). نقطه تنظیم ۶۰ درجه سلسیوس و توان بیشینه ۲۰۰۰ وات
Integrator	Type 24	-
Ploter	Type 65d	-
Printer چاپگر	Type 25a	-
Piping لوله	Type 31	Loss coefficient (29.83 W m ⁻² K ⁻¹), pipe length (3 m), inside diameter (2.56 cm) ضریب اتلاف حرارت ۲۹/۸۳ وات بر متر مربع کلین، طول لوله ۳ متر و قطر داخلی آن ۲/۵۶ سانتی‌متر
Pump دمنده	Type 3b	Flow rate (90 kg h ⁻¹) با دبی ثابت ۹۰ کیلوگرم بر ساعت
Weather data generator داده‌های هواشناسی	Type 109-TMY2	Inlet (Ambient temperature. Wind velocity. Total radiation on tilted surface) داده‌های دمای محیط، سرعت باد و شدت تابش خورشید
Tank مخزن	Type 4d	Cold-Side temperature 15 °C دمای شاره سرد مخزن ۱۵ درجه سلسیوس

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل آماری

تمرکز اصلی این مقاله بر بررسی عددی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی در چهار شهر (بندرعباس، تبریز، تهران و کرمان) می باشد. نتایج تجزیه واریانس اثر شهر و فصل بر انرژی حرارتی و الکتریکی تولید شده در جمع کننده خورشیدی به کار رفته در سامانه فتوولتائیک-گرمایی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول، انرژی الکتریکی تولیدی سالانه در بین شهرها تفاوت چندانی نداشت. به طوری که، بیشترین مقدار اختلاف بین میانگین سالانه انرژی الکتریکی تولیدی در شهرهای مختلف، ۰/۵۲ کیلووات

ساعت بر روز به دست آمد. در حالی که، براساس یافته های (Besarati et al., 2013) بیشترین اختلاف تولید برق تولیدی سالانه در بین چهار شهر مورد بررسی در تحقیق حاضر ۰/۳۳ کیلووات ساعت بر روز بود.

جدول ۲ همچنین نشان می دهد که انرژی حرارتی تولید شده در سامانه فتوولتائیک-گرمایی در شهرهای مختلف، متفاوت است و مقدار انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی در سامانه مورد نظر، در فصل های مختلف با احتمال ۹۹ درصد متفاوت می باشد. با توجه به جدول اثر متقابل شهر و فصل بر انرژی الکتریکی در سطح ۱٪ معنی دار و بر انرژی حرارتی معنی دار نیست.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای شهر و فصل بر انرژی الکتریکی و حرارتی

Table 2- Analysis of variance of the effect of city and season on the thermal and electrical energy generation

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean of square	
		Electrical energy انرژی حرارتی	Thermal energy انرژی الکتریکی
شهر City	3	1.053 ^{n.s}	364.524 **
فصل Season	3	46.048 **	1803.344 **
فصل × شهر City × Season	9	2.481 **	17.840 ^{n.s}
خطا Error	128	0.658	15.455
کل Total	144		

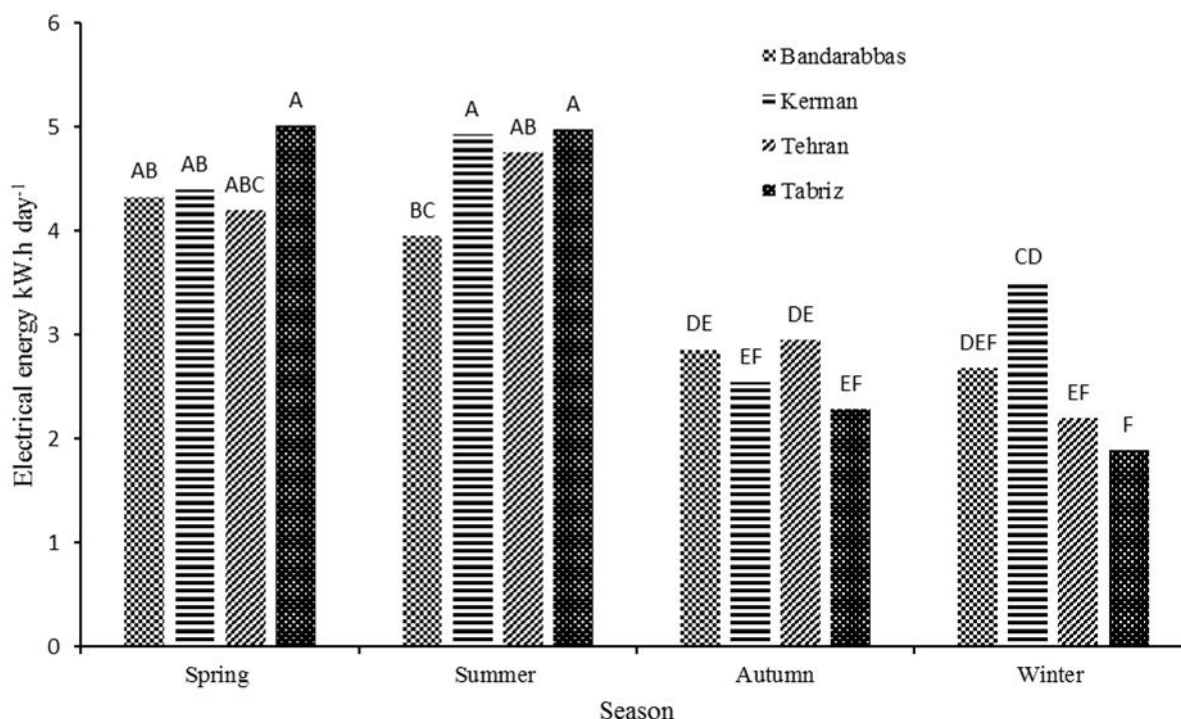
** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، ^{n.s} غیر معنی دار

** Significant at 1% of probability levels, ^{ns} Non, Significant

گرمایی انرژی الکتریکی بیش تری نسبت به مناطقی که در عرض جغرافیایی پایین تری هستند، تولید کند. در نیمه دوم سال شدت تابش و ساعت های آفتابی کمتر است. در نتیجه انرژی الکتریکی کم تری در تمام شهرها تولید می گردد. همچنین در نیمه دوم سال مناطقی که در عرض جغرافیایی پایین تری هستند، شدت تابش و ساعت های آفتابی بیش تری نسبت به مناطقی که در عرض جغرافیایی بالاتری هستند، دارند. در فصل زمستان شهر کرمان با ۳/۵ کیلووات ساعت بیش ترین و شهر تبریز با ۱/۸۹ کیلووات ساعت کم ترین میانگین انرژی الکتریکی تولیدی روزانه را دارا می باشند. عامل مؤثر دیگر در تولید توان الکتریکی پنل های فتوولتائیک-گرمایی دمای سلول است. افزایش دمای کاری سلول فتوولتائیک باعث کاهش بازده الکتریکی می شود (Vokas et al., 2014). این امر می تواند دلیل بیش تر شدن انرژی الکتریکی تولیدی در کرمان نسبت به بندرعباس باشد.

انرژی الکتریکی تولید شده به وسیله سامانه فتوولتائیک-گرمایی

میانگین انرژی الکتریکی برای هر فصل در شکل ۳ نشان داده شده است. بالاترین میانگین انرژی الکتریکی تولیدی روزانه در شهرهای مورد بررسی، در فصل تابستان و کم ترین آن در فصل زمستان به ترتیب روزانه ۴/۶۵ و ۲/۵۷ کیلووات ساعت می باشد. در فصل تابستان بیش ترین انرژی الکتریکی تولیدی در شهر تبریز با ۴/۹۸ کیلووات ساعت و کم ترین مقدار آن مربوط به شهر بندرعباس با ۳/۹۵ کیلووات ساعت می باشد. با توجه به این که، در تابستان، مقدار انرژی تابشی روزانه بر روی سطح شیب دار، در شهر تبریز، که در عرض جغرافیایی بالاتری قرار دارد، بیش تر است (Moini et al., 2011; Haj Duffie and Beckman, 2006;) (Saghati, 2009)، این امر باعث می شود سامانه ی فتوولتائیک-



شکل ۳- مقایسه میانگین انرژی الکتریکی تولیدی هر شهر در فصل‌های مختلف

حروف مشترک روی هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

Fig. 3. Average electrical energy produced in each city and various seasons

Columns with similar letters have no significant difference at the probability level of 1% according to Duncan's multiples range test significantly.

هر فصل متفاوت است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، میانگین سالانه انرژی حرارتی تولیدی در بین شهرها دارای اختلاف معنی‌داری است. بیش‌ترین انرژی حرارتی تولیدی در شهر بندرعباس با متوسط سالانه ۱۶ کیلووات ساعت در هر روز و کم‌ترین مقدار آن در شهر تبریز با ۸/۵۶ کیلووات ساعت در هر روز می‌باشد. با وجود این که در نیمه اول سال تبریز نسبت به بندرعباس شدت تابش و ساعت آفتابی بیش‌تری دارد، اما به دلیل شرایط اقلیمی بندرعباس، دمای محیط آن بیش‌تر است. از این رو بیش‌ترین میانگین سالانه انرژی حرارتی در شهر بندرعباس می‌باشد.

سهم خورشیدی

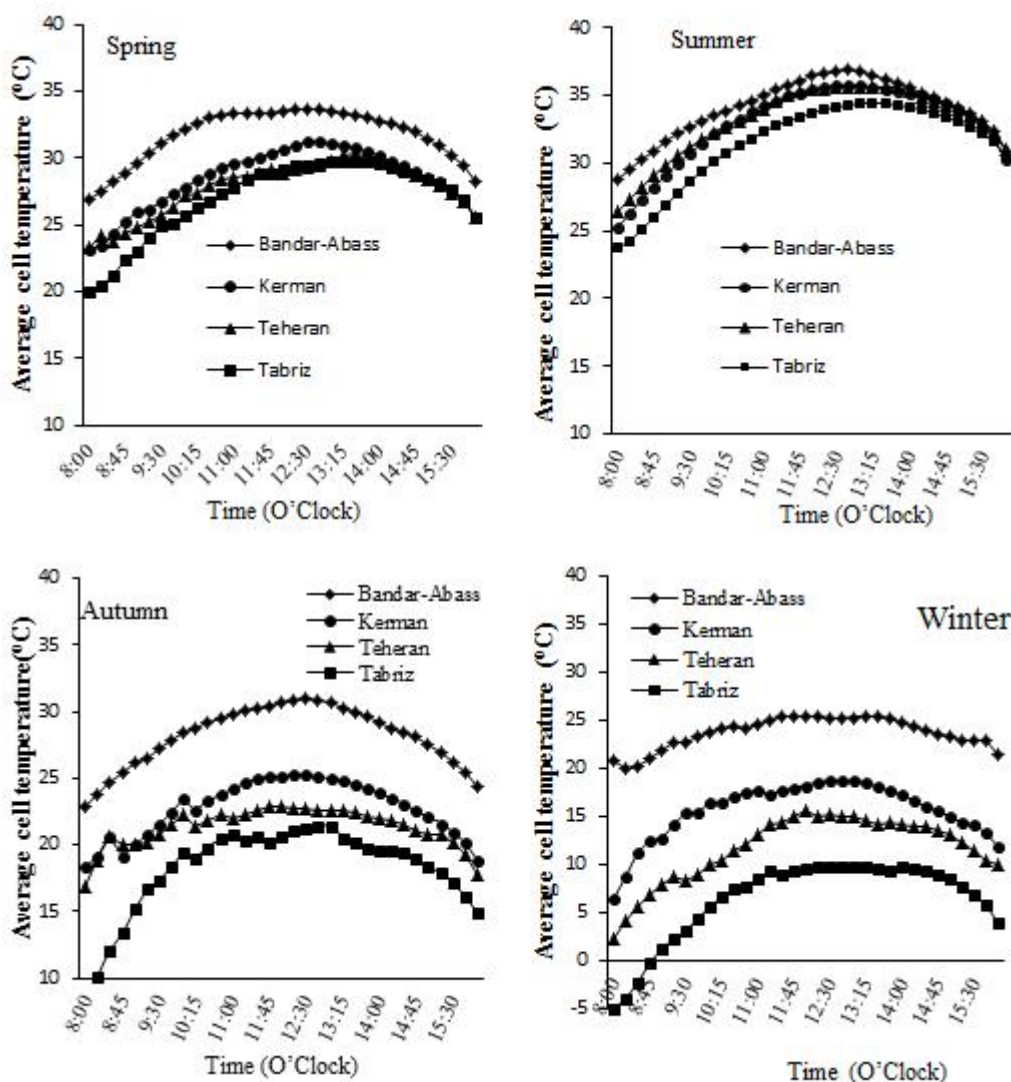
شکل ۷ نحوه تغییر سهم خورشیدی در ساعات مختلف روز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در فصل زمستان در شهرهای مانند تبریز و تهران در ساعت‌های اولیه طلوع خورشید سهم خورشیدی صفر است، به عبارت دیگر در این ساعت‌ها سامانه فتوولتائیک-گرمايي هیچ نقشی در تولید حرارت مورد نیاز ایفا نکرده است (به دلیل پایین

انرژی حرارتی تولید شده به وسیله سامانه فتوولتائیک-گرمايي

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در بین شهرها بیش‌ترین اختلاف دمای میانگین سلول فتوولتائیک در نیمه دوم سال است. با وجود این که در فصل زمستان بندرعباس نسبت به کرمان دارای شدت تابش و ساعت آفتابی بیش‌تری است، اما انرژی الکتریکی تولیدی در شهر کرمان بیش‌تر است (شکل ۴) که دلیل آن می‌تواند مربوط به بالاتر بودن دمای کاری سلول‌های فتوولتائیک در شهر بندرعباس باشد. بیش‌ترین دمای کاری سلول فتوولتائیک-گرمايي در شهر بندرعباس و در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۳۳، ۳۷، ۳۱ و ۲۵ درجه سلسیوس بود که بین ساعت‌های ۱۲ و ۱۳ اتفاق افتاد. اثر تغییر فصل بر انرژی حرارتی تولید شده در سامانه فتوولتائیک-گرمايي در شکل ۵ نمایش داده شده است. انرژی حرارتی تابعی از شدت تابش خورشید، ساعت آفتابی و دمای محیط است. از آنجا که هر فصل به دلیل زاویه و فاصله زمین نسبت به خورشید دارای شدت تابش و دمای محیطی متفاوتی می‌باشد، انرژی حرارتی تولیدی توسط سامانه فتوولتائیک-گرمايي در

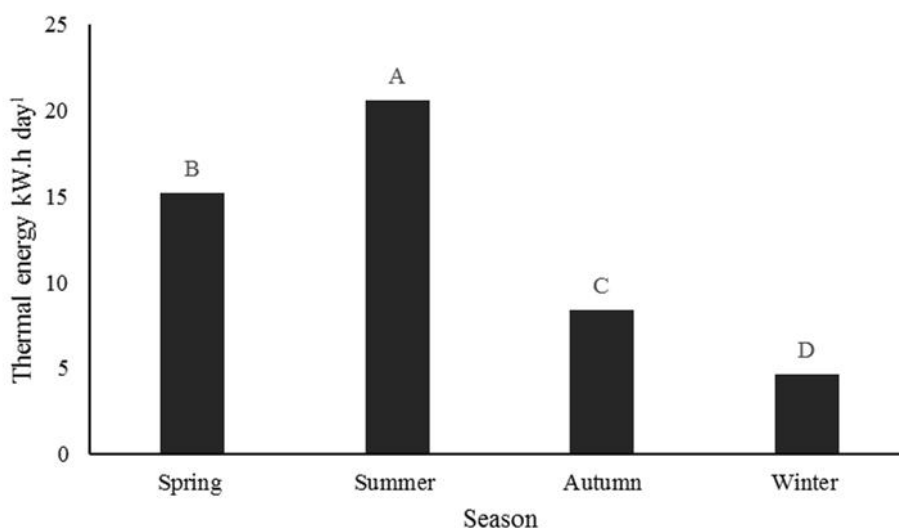
(۱) سهم خورشیدی تابعی از انرژی حرارتی تولید شده توسط جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی است. بیشترین سهم خورشیدی در نیمه اول سال و در فصل تابستان می باشد. کمترین سهم خورشیدی در شهر تبریز و فصل زمستان است. به طوری که، بیشترین میانگین سهم خورشیدی در فصل تابستان با ۶۰ درصد و کمترین سهم خورشیدی در فصل زمستان با ۲۴ درصد می باشد. میانگین سالیانه سهم خورشیدی در شهرهای بندرعباس، کرمان، تهران و تبریز به ترتیب برابر ۵۰، ۴۱، ۳۴ و ۲۹ درصد می باشد.

بودن دمای جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی جریان سیال مدار بسته توسط کنترلر قطع شده تا از هدررفت حرارتی جلوگیری شود) و این اتفاق در فصل پاییز برای شهر تبریز در ساعت های اولیه صبح قابل مشاهده است. همچنین، با توجه به شکل ۷، بیشترین مقدار سهم خورشیدی در طول روز برای شهرهای مختلف، با توجه به شدت تابش خورشید و دمای محیط، حدود ظهر و بین ساعت های ۱۲ و ۱۴ مشاهده می گردد. میانگین مقدار سهم خورشیدی برای شهرهای مورد آزمایش در فصل های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به رابطه



شکل ۴- دمای میانگین جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی در هر فصل

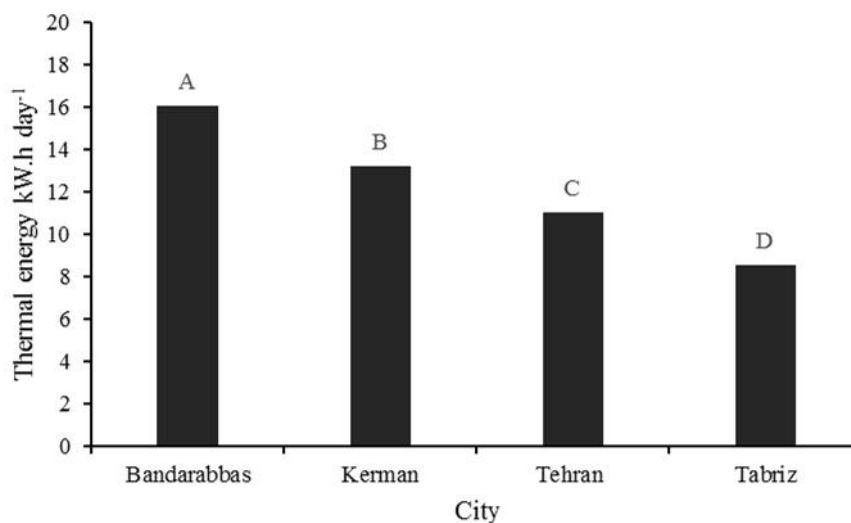
Fig. 4. Collector average temperature in each season



شکل ۵- میانگین تولید انرژی حرارتی شهرهای مختلف در هر فصل

حروف مشترک روی هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

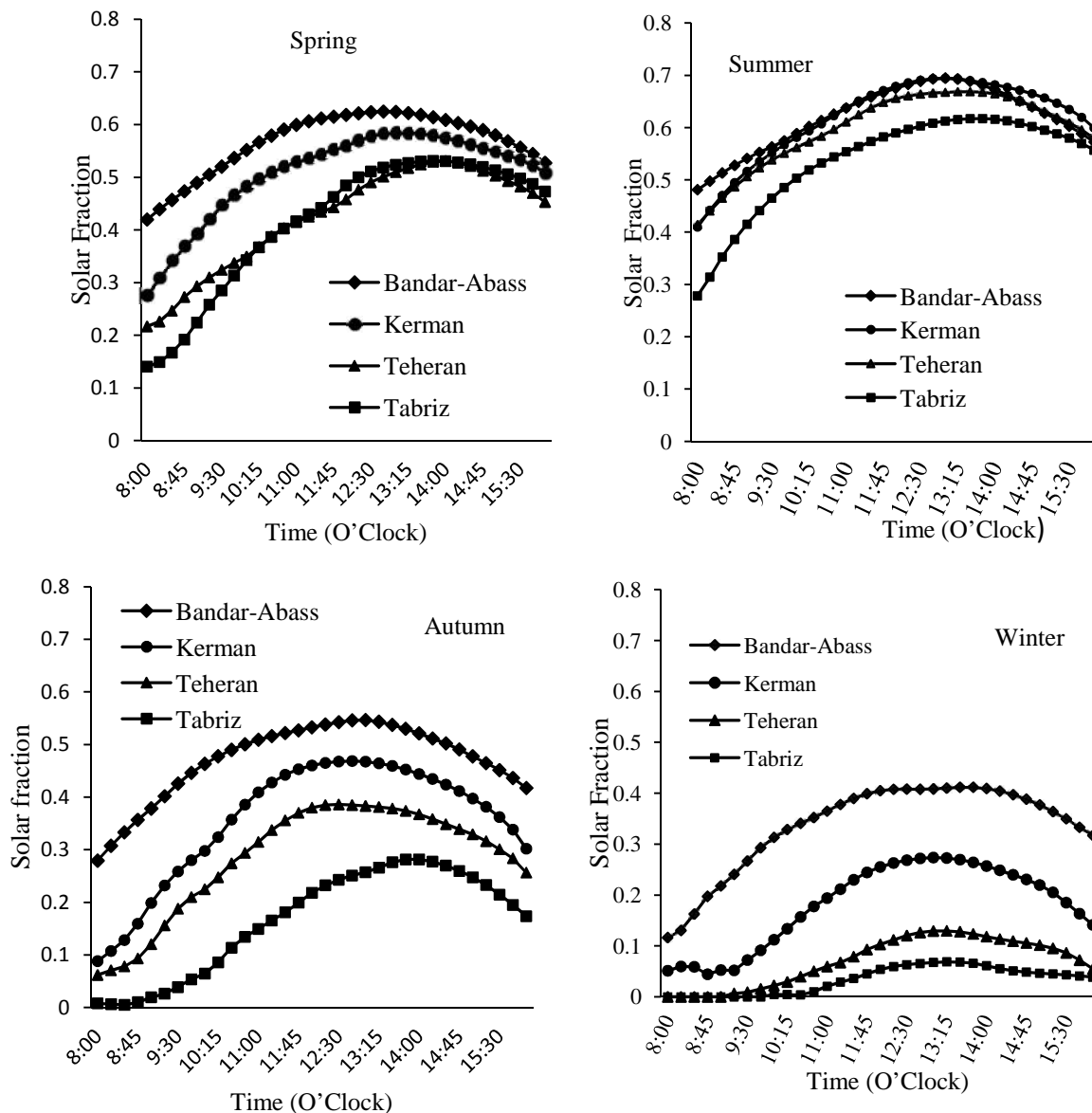
Fig. 5. The Average of thermal energy generation of studied cities in each season
Columns with similar letters have no significant difference at the probability level of 1% according to Duncan's multiples range test significantly



شکل ۶- تغییرات انرژی حرارتی سالانه در شهرهای مختلف

حروف مشابه روی هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

Fig. 6. Variation of annual thermal energy in different cities
Columns with similar letters have no significant difference at the probability level of 1% according to Duncan's multiples range test significantly



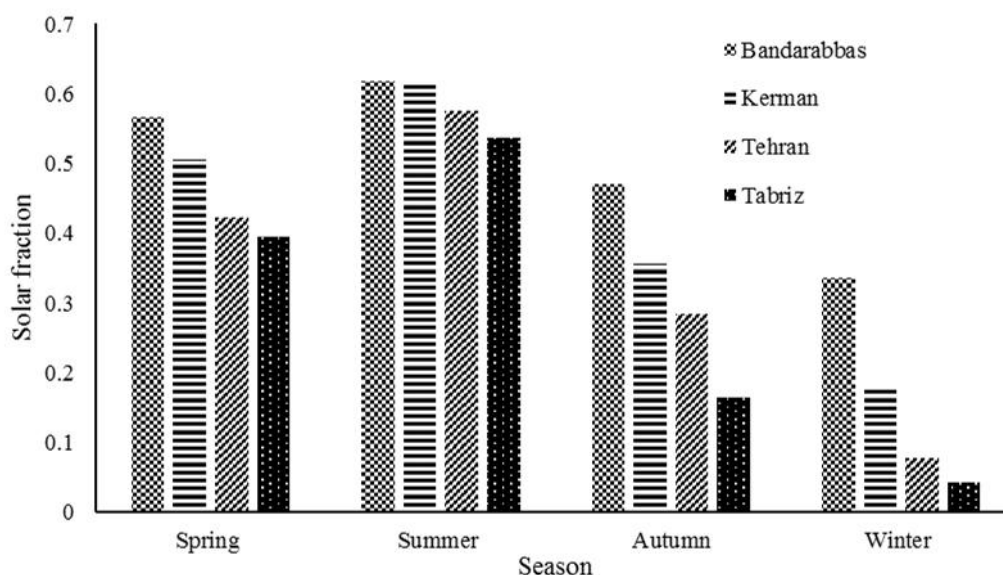
شکل ۷- میانگین سهم خورشیدی روزانه در چهار فصل
Fig. 7. The Average of solar fraction at the four seasons

- ۲- بیشترین میانگین سالانه انرژی حرارتی و سهم خورشیدی در شهر بندرعباس و به ترتیب ۱۶ کیلووات ساعت در هر روز و ۰/۵ می باشد.
- ۳- بیشترین دمای کاری سلول فتوولتائیک-گرمایی در شهر بندرعباس و در فصل های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۳۳، ۳۷، ۳۱ و ۲۵ درجه سلسیوس مشاهده گردید.
- ۴- در شهر تبریز با بالاترین عرض جغرافیایی، انرژی الکتریکی تولیدی سامانه مورد بررسی، در فصل های گرم سال از سایر شهرها بیش تر است.

نتیجه گیری

به طور خلاصه، نتایج حاصل از بررسی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی برای شهرهای بندرعباس، کرمان، تهران و تبریز در طول سال نشان داد که:

- ۱- جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی در بندرعباس با کمترین عرض جغرافیایی در میان شهرهای مورد بررسی، دارای بالاترین تولید انرژی حرارتی و سهم خورشیدی در فصل های مختلف سال است. در حالی که، انرژی الکتریکی آن در تابستان از سایر شهرها کم تر می باشد.



شکل ۸- میانگین سهم خورشیدی در شهرها و فصل‌های مختلف

Fig. 8. Variation of solar fraction at different seasons and cities

References

- Basunia, M., and T. Abe. 2001. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering* 47: 295-301.
- Besarati, S. M., R. V. Padilla, D. Y. Goswami, and E. Stefanakos. 2013. The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants. *Renewable Energy* 53: 193-199.
- Chow, T. T. 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy* 87: 365-379.
- Dubey, S., J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri. 2013. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy Procedia* 33: 311-321.
- Duffie, J., and W. Beckman. 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Jone Wiley & Sons Inc. New York.
- Dupeyrat, P., C. Menezo, and S. Fortuin. 2014. Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. *Energy and Buildings* 68: 751-755.
- Haj Saghati, A. 2009. *Solar Energy; Fundamental and Application*. Elmo o Sanat University. (In Farsi).
- Herrando, M., C. N. Markides, and K. Hellgardt. 2014. A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. *Applied Energy* 122: 288-309.
- Joshi, A. S., A. Tiwari, G. N. Tiwari, I. Dincer, and B. V. Reddy. 2009. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system. *International Journal of Thermal Sciences* 48: 154-164.
- Kegel, M., J. Tamasauskas, and R. Sunye. 2014. Solar Thermal Trigeneration System in a Canadian Climate Multi-unit Residential Building. *Energy Procedia* 48: 876-887.
- Kroiß, A., A. Präbst, S. Hamberger, M. Spinnler, Y. Tripanagnostopoulos, and T. Sattelmayer. 2014. Development of a seawater-proof hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector. *Energy Procedia* 52: 93-103.
- Moini, S., and S. Javadi, and M. Dehghan-Manshadi. 2011. Feasibility study of solar energy in Iran and preparing radiation atlas. *Recent Advances in Environment, Energy Systems and Naval Science* 2011: 1-7.
- Mortezapour, H., B. Ghobadian, and A. Abbasbour. 2012. Financial Investigation of Using Solar-Powered LED For Park Lighting in Iran. *EWRES & ECRES The European Workshop & Conference on*

- Renewable Energy Systems. Antalya, TURKEY.
14. Nualboonrueng, T., P. Tuenpusa, Y. Ueda, and A. Akisawa. 2013. The performance of PV-t systems for residential application in Bangkok. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21: 1204-1213.
 15. Rothwarf, A. and K. Böer. 1975. Direct conversion of solar energy through photovoltaic cells. *Progress in Solid State Chemistry* 10: 71-102.
 16. Tonui, J., and Y. Tripanagnostopoulos. 2007. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy* 32: 623-637.
 17. van Helden, W. G., and R. J. C. van Zolingen, and H. A. Zondag. 2004. PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12: 415-426.
 18. Vokas, G. A., and N. G. Theodoropoulos, and D. P. Georgiou. 2014. Simulation of Hybrid Photovoltaic/Thermal Air Systems on Building Facades. *Energy Procedia* 50: 917-930.
 19. Ziapour, B. M., V. Palideh, and M. Baygan. 2014. Performance comparison of four passive types of photovoltaic-thermal systems. *Energy Conversion and Management* 88: 732-738.

Numerical analysis of using hybrid photovoltaic-thermal solar water heater in Iran

M. Mohammadi Sarduei¹ - H. Morteza pour^{2*} - K. Jafari Naeimi²

Received: 09-06-2015

Accepted: 14-11-2015

Introduction

Electrical performance of solar cells decreases with increasing cell temperature, basically because of growth of the internal charge carrier recombination rates, caused by increased carrier concentrations. Hybrid Photovoltaic/thermal (PVT) systems produce electrical and thermal energy simultaneously. PVT solar collectors convert the heat generated in the solar cells to low temperature useful heat energy and so they provide a lower working temperature for solar cells which subsequently leads to a higher electrical efficiency.

Recently, in Iran, the reforming government policy in subsidy and increasing fossil fuels price led to growing an interest in use of renewable energies for residual and industrial applications. In spite of this, the PV power generator investment is not economically feasible, so far. Hybrid PVT devices are well known as an alternative method to improve energy performance and therefore economic feasibility of the conventional PV systems. The aim of this study is to investigate the performance of a PVT solar water heater in four different cities of Iran using TRNSYS program.

Materials and Methods

The designed PVT solar water system consists of two separate water flow circuits namely closed cycle and open circuit. The closed cycle circuit was comprised of a solar PVT collector (with nominal power of 880 W and area of 5.6 m²), a heat exchanger in the tank (with volume of 300 L), a pump and connecting pipes. The water stream in the collector absorbs the heat accumulated in the solar cells and delivers it to the water in the tank through the heat exchanger. An on/off controller system was used to activate the pump when the collector outlet temperature was higher than that of the tank in the closed cycle circuit. The water in the open circuit, comes from city water at low temperature, enters in the lower part of the storage tank where the heat transfer occurs between the two separate circuits. An auxiliary heater, connected to the tank outlet, rises the fluid temperature to the set point.

The performance of the designed system has been investigated in different cities (including Tabriz, Tehran, Kerman and Bandar-Abbas) during 4 seasons of year using Transient System Simulation (TRNSYS) program. The performance parameters included electrical and thermal energy generation and solar fraction. Solar fraction, which expresses the share of energy supplied by solar radiation on the collector in total thermal energy consumption, was obtained from equation 1.

$$SF = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \quad (1)$$

where Q_{load} and Q_{aux} are the total thermal energy consumption (kWh) and energy supplied by the auxiliary heater (kWh), respectively.

Results and Discussion

The results showed that the average daily electricity generation in the cities for summer and winter were 4.65 and 2.67 kWh day⁻¹, respectively. The annual electricity generation of the designed system is almost constant in the various cities. In winter, in spite of lower solar intensity and sunny hours, lower average temperature of solar cells in Kerman leads to a slightly better electrical performance than Bandar-Abbas. The highest cell

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2 - Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

(* - Corresponding Author Email: h.morteza pour@uk.ac.ir)

temperatures, in Bandar-Abbas between 12 noon and 1pm, were found to be 33, 37, 31 and 25 °C in spring, summer, autumn and winter, respectively.

Thermal energy generation was significantly different at various cities and seasons. In winter, the designed system provides a little fraction (below 10 percent) of thermal demands in Tabriz and Tehran. This is mainly because of the low ambient temperature and solar intensity. The PVT system had a maximum average thermal energy of 16 kWh day⁻¹ and solar fraction of 0.5 which were observed in Bandar-Abbas. Tabriz, because of the lowest ambient temperature, had the least thermal energy generation and solar fraction. The maximum average solar fraction obtained in summer was about 60% while its lowest value in winter was 24%.

Conclusions

In the present study, a hybrid PVT solar water heater with nominal power of 880 W was proposed for application in Iran. The system was comprised of a PVT solar water collector, an auxiliary heater, a pump and connecting tubes. Technical feasibility of applying the proposed system in different cities was investigated using TRNSYS program. The results are summarized as follows:

The annual electricity generation of the designed system was almost constant in the various cities.

The highest and lowest values of average electricity generation in summer and winter were determined to be 4.65 and 2.67 kWh day⁻¹, respectively.

The PVT system had the maximum average thermal energy of 16 kWh day⁻¹ and solar fraction of 50%, which was observed in Bandar-Abbas.

Keywords: Electrical energy, Photovoltaic-thermal, Solar fraction, Thermal energy

بررسی و مدل‌سازی تغییرات بازده حجمی نقاله‌های ماریپیچی در دورها و شیب‌های مختلف به کمک ANFIS و روش‌های آماری

اشکان زارعی^۱ - رحمان فرخی تیمورلو^۲ - لیلا ندرلو^{۳*} - سید محمد حسن کماریزاده اصل^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تغییرات بازده حجمی نقاله ماریپیچی به‌عنوان تابعی از قطر هلیس، سرعت دورانی هلیس و زاویه انتقال است. در این تحقیق از سه نقاله ماریپیچی با قطرهای ۱۳، ۱۷/۵ و ۲۲/۵ سانتی‌متر و ۵ سطح سرعت دورانی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه و سه زاویه انتقال ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای انتقال گندم استفاده شد. سپس مدل‌سازی به‌کمک جعبه ابزار ANFIS در نرم‌افزار متلب انجام شد و پنج عامل مهم و مؤثر، در مدل‌سازی بهینه شد تا بهترین مدل ANFIS ممکن حاصل گردد. این پنج عامل عبارتند از: نوع مجموعه‌های فازی ورودی، تعداد مجموعه‌های فازی ورودی، نوع مجموعه فازی خروجی، نوع شیوه بهینه‌سازی و تعداد اپوک‌ها. سپس مجموعه داده‌ها در نرم‌افزار آماری SPSS براساس آزمایش فاکتوریل ۳×۵×۳ در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با پنج تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین از مدل رگرسیون چندمتغیره خطی نیز جهت پیش‌بینی بازده حجمی استفاده شد. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت دورانی هلیس و شیب نقاله ماریپیچی بازده حجمی در هر سه هلیس کاهش یافت. همچنین با افزایش قطر هلیس تغییرات بازده حجمی منظم نبود و روند مشخصی را نمایان نکرد. بیشترین بازده حجمی مربوط به سرعت دورانی ۱۰۰ دور بر دقیقه، شیب ۱۰ درجه و قطر پره ۱۷/۷۵ سانتی‌متر بود که مقدار آن ۲۹/۱۱ درصد به‌دست آمد. در ضمن، مدل حاصل از ANFIS با ضریب همبستگی ۰/۹۸ بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بازده حجمی دقیق‌تر از مدل رگرسیون خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۴ بود.

واژه‌های کلیدی: دورسرخ دیجیتالی نوری، زاویه انتقال، مجموعه‌های فازی، نقاله ماریپیچی

مقدمه

یا طولانی و فیزیکی استفاده می‌شود. این انتقال یا به‌صورت مستقل (مانند انتقال گندم در کارخانجات تولید آرد) و یا به‌صورت بخشی از اجزای تشکیل‌دهنده سایر ادوات و تجهیزات کشاورزی نظیر ماشین‌های برداشت و ماشین‌های مخلوط‌کن، خشک‌کن‌ها، ذخیره‌سازی و یا سیستم‌های سیلو به‌کار می‌رود. لذا مطالعه روی نقاله‌های ماریپیچی جهت اطلاع از میزان توان مصرفی، بازده حجمی و دیگر شاخص‌های مهم تحت تأثیر پارامترهای مختلف جهت به‌دست آوردن بهترین وضعیت بسیار مهم است. در این میان محققان پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام داده‌اند که به چند نمونه از آن‌ها اشاره می‌گردد. رگان و هندرسون (Regan and Henderson, 1959) عملکرد نقاله ماریپیچی را در پنج سطح دور نقاله یعنی، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه و شش سطح از زاویه انتقال ۰، ۲۱/۵، ۳۹/۲۵، ۵۴/۷۵، ۶۹/۵ و ۸۴/۷۵ درجه بررسی کردند؛ آن‌ها گزارش کردند که با افزایش دور نقاله، توان موردنیاز نیز افزایش می‌یابد. در ابتدا با افزایش زاویه شیب، توان نیز افزایش یافته، اما پس از گذر از یک زاویه خاص شروع به کم شدن می‌نماید. آن‌ها گزارش

نقاله‌های ماریپیچی وسیله‌های انتقال بسیار مؤثر برای جریان آزاد یا نسبتاً آزاد مواد توده‌ای جامدات می‌باشند که توان عملیاتی خوبی ایجاد کرده و برای حل مشکلات انتقال، راه حل مناسبی هستند که این امر به‌دلیل ساختار ساده، بازده بالا و هزینه نگهداری کم می‌باشد. چرخش هلیس درون پوسته (پوشش) استوانه‌ای ثابت، به‌طور گسترده‌ای برای انتقال و فشردن‌سازی انواع مواد دانه‌ای و جریان آزاد

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی،

دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(*- نویسنده مسئول: Email: l.naderloo@razi.ac.ir

۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه ارومیه، ارومیه

باعث شد راندمان حجمی نقاله‌ها ۲۵ درصد کاهش پیدا کند. دای و گرس (Dai and Grace, 2008) یک مدل نظری را با توجه به مکانیک حرکتی مواد توده‌ای برای محاسبه گشتاور مورد نیاز موزع‌های ماریچی که در داخل یک مخزن قرار گرفته بودند، ارائه دادند. آن‌ها گزارش کردند که گشتاور مورد نیاز متناسب با تنش عمودی است که در خروجی مخزن توسط مواد توده‌ای اعمال می‌شود و به قطر موزع ماریچی بستگی دارد. ذرعی‌فروش و همکاران (Zareiforoush *et al.*, 2010) مشخصه‌های عملکردی نقاله‌های ماریچی به‌عنوان تابعی از ابعاد نقاله، سرعت دورانی هلیس و شیب انتقال مواد را بررسی کردند. آن‌ها مشخصه عملکردی نقاله را توان مصرفی در نظر گرفتند و گزارش کردند که با افزایش سرعت دورانی و شیب انتقال مواد، توان مورد نیاز برای نقاله‌ها افزایش یافت. با توجه به اهمیت بازده حجمی نقاله‌های ماریچی در انتقال محصولات کشاورزی و به‌تبع آن صرفه‌جویی در توان مصرفی و نیز بررسی عوامل مؤثر بر آن و به‌دست آوردن بهترین وضعیت ممکن، تحقیق در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از این تحقیق به‌دست آوردن مدلی مناسب از تغییرات بازده حجمی نقاله‌های ماریچی انتقال محصولات کشاورزی به‌صورت شیب‌دار بوده است که برای این منظور از سه هلیس با قطرهای مختلف، پنج سطح سرعت دورانی و سه شیب استفاده شد تا بتوان اثر تغییرات این پارامترها را بر روی بازده حجمی هلیس‌ها مورد ارزیابی قرار داد. شیوه مورد استفاده برای این منظور تاکنون در این زمینه استفاده نشده است.

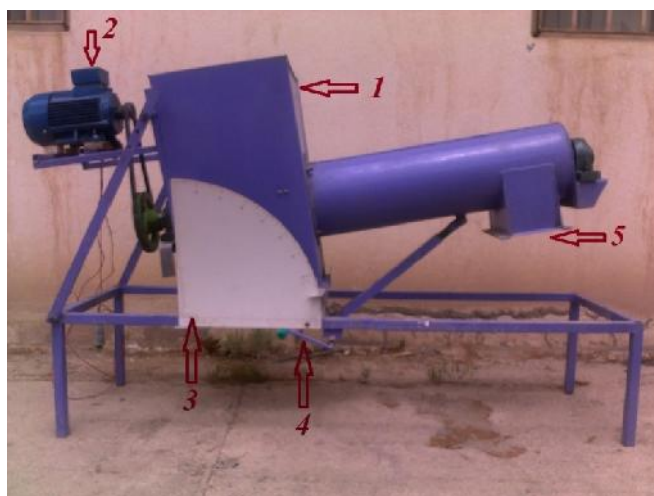
مواد و روش‌ها

از دو قسمت عمده آزمایش‌های میدانی، مدل‌سازی و تحلیل تشکیل شده است.

آزمایش‌های میدانی

آزمایش‌ها جهت انجام این تحقیق در کارگاه گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی واقع در دانشگاه ارومیه انجام گرفت. در این تحقیق از گندم نوع (سایوس) SAYOS استفاده گردید که گندم مذکور دارای دانه‌های سخت و سطح رطوبتی ۱۲ درصد بر پایه تر بود. قبل از انجام آزمایشات، تمام مواد خارجی از قبیل: سنگ، گرد و خاک، کاه و کلس و دانه‌های نارس از گندم جدا شد. جرم مخصوص ظاهری 790 kg m^{-3} بود. نحوه‌ی کار این نقاله ماریچی به‌صورتی است که شافت هلیس از طریق تسمه پولی نیروی چرخشی خود را از الکتروموتور دریافت می‌کند و چرخش آن منجر به انتقال محصول به قسمت خروجی می‌گردد. به‌منظور بررسی عملکرد نقاله‌های ماریچی در شیب‌های مختلف از دستگاه نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد.

کردند که تغییر شیب نقاله ماریچی در انتقال مواد، تأثیر چندانی بر راندمان حجمی نمی‌گذارد. بور و همکاران (Burr *et al.*, 1998) یک نقاله ماریچی مخروطی را به‌منظور تخلیه یکنواخت مواد توده‌ای از مخزن‌های با سطح مقطع مستطیلی طراحی کرده و آن‌را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که تخلیه مواد از مخزن با استفاده از نقاله ماریچی طراحی شده تا زمانی که ارتفاع مواد مخزن در بالای هلیس تخلیه به ۳۰ سانتی‌متر برسد، دارای حالت یکنواختی است؛ به‌طوری‌که شیب سطح مواد موجود در مخزن در حین تخلیه با چنین هلیسی تقریباً برابر صفر است. نیکولای و همکاران (Nicolai *et al.*, 2004) تأثیر مشخصات نقاله‌های ماریچی را بر عملکردشان مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ظرفیت، بازده حجمی و توان مورد نیاز برای دو هلیس به قطرهای ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر و طول ۱۵/۲ متر، را نسبت به زوایای انتقال ۱۳، ۲۰ و ۳۰ درجه در گستره سرعت دورانی هلیس ۲۵۰ تا ۱۱۰۰ دور بر دقیقه در انتقال دانه‌های ذرت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که حداکثر ظرفیت انتقال نقاله‌های ماریچی بررسی شده در تمامی زوایای انتقال، در گستره سرعت دورانی ۷۸۴ تا ۸۵۳ دور بر دقیقه قرار دارد. آن‌ها دریافتند که تغییر شیب نقاله ماریچی در انتقال مواد، تأثیر چندانی بر راندمان حجمی نمی‌گذارد. توان مورد نیاز نقاله‌های ماریچی در شیب ۱۳ درجه، به‌ازای هر ۱۰۰ دور بر دقیقه افزایش در سرعت دورانی، ۰/۵ کیلووات کاهش می‌یابد. موسی و تامسون (Moysey and Thompson, 2005) یک مدل جدید سه‌بعدی را به‌منظور تشریح جریان مواد ورودی و در حال انتقال توسط نقاله‌های تخلیه‌کننده ماریچی با استفاده از روش المان گسسته ارائه کردند. آن‌ها گزارش کردند که مدل ارائه شده ابزار مناسبی برای تخمین جریان مواد دانه‌ای می‌باشد. نیکولای و همکاران (Nicolai *et al.*, 2006) توان و بازده انتقال چهار نقاله ماریچی با قطرهای ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متری را در هنگام کار در ظرفیت کامل و سرعت مجاز بررسی کردند. این نقاله‌ها یک‌بار در وضعیت انتقال توان از پایین به بالا و بار دیگر از بالا به پایین توسط محرک راه‌اندازی شدند. طول نقاله‌ها ۱۵/۵ متر بود. مخزن‌های نوسانی به‌صورت مکانیکی به حرکت درمی‌آیند و با ذرت پر می‌شود، تا اطمینان حاصل شود که هلیس کوتاه در مخزن غوطه‌ور می‌باشد. نقاله‌های ماریچی در شیب‌های انتقال ۱۳، ۲۰ و ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها نشان دادند که توان مورد نیاز در حالتی که مواد از قسمت پایین نقاله انتقال داده می‌شود، بیش از دو برابر وضعیتی بود که مواد از قسمت بالای نقاله انتقال می‌یافت. آن‌ها دریافتند که با افزایش شیب انتقال مواد از ۱۳ به ۲۰ درجه توان مصرفی ۲/۸۹ کیلووات و با افزایش شیب از ۲۰ به ۳۰ درجه به اندازه ۴/۴۷ کیلووات افزایش یافته است. آن‌ها گزارش کردند که بازده انتقال نقاله‌های ماریچی در وضعیت انتقال توان از پایین در اثر تغییر زاویه انتقال مواد تفاوت معنی‌داری پیدا نکرد، اما در وضعیت انتقال توان از بالا، تغییرات زاویه انتقال



شکل ۱- مکانیزم انتقال محصول با قابلیت تغییر شیب: ۱- مخزن ورودی، ۲- الکتروموتور، ۳- قطاع زاویه نما، ۴- اهرم تنظیم‌کننده زاویه، ۵- دریچه خروجی

Fig.1. Crop handling mechanism with slop changing ability: 1- Input tank, 2- Electromotor, 3-Sector represents the angle, 4- Regulator lever of angle, 5- The outlet gate

جدول ۱- مشخصات فنی نقاله‌های ماریچی مورد آزمایش

Table 1- Technical specifications of tested helix conveyors

شماره نقاله	H1	H2	H3
قطر پره هلیس (سانتی‌متر) Helix blade diameter (cm)	22.5	17.5	13
قطر محفظه انتقال (سانتی‌متر) Transmission chamber diameter (cm)	25	20	15.5
قطر محور هلیس (سانتی‌متر) Helix shaft diameter (cm)	3.5	4.5	
گام هلیس (سانتی‌متر) Helix pitch (cm)	13	17.5	
ضخامت پره هلیس (میلی‌متر) Helix blade thickness (mm)	1.2	1.5	
طول نقاله (سانتی‌متر) Conveyor length (cm)	150	150	
طول قسمت ورودی (سانتی‌متر) Inlet section length (cm)	32	32	

در این تحقیق از سه نوع نقاله ماریچی با گام استاندارد استفاده شد. مشخصات فنی این نقاله‌ها در جدول ۱ آورده شده است. به منظور حصول ظرفیت انتقال وزنی در هر آزمایش، گندم در مخزن ریخته شد. با شروع آزمایش و چرخش هلیس، دانه‌ها در داخل استوانه به سمت جلو رانده و محصول از قسمت تخلیه خارج گردید. سپس مقدار گندم خارج شده در بازه زمانی یک دقیقه توزین و به عنوان ظرفیت انتقال وزنی برحسب ($m^3 \min^{-1}$) تعیین شد. پس از محاسبه ظرفیت انتقال وزنی واقعی و تقسیم آن بر جرم مخصوص ظاهری گندم، ظرفیت حجمی واقعی نقاله ماریچی برحسب

در این مکانیزم، بسته به نوع آزمایش، با استفاده از اهرم تنظیم‌کننده زاویه، چک بالابر شیب دستگاه را تنظیم می‌کند. با استفاده از قطاع زاویه نما می‌توان زاویه نقاله ماریچی را قرائت کرد. طراحی و ساخت این دستگاه مطابق با استانداردهای (ASABE APR1990; JUN1993, 2006MAR1975, 2006) انجام گرفته است. به منظور حصول سرعت‌های موردنظر در این دستگاه، الکتروموتور به یک مبدل (مدل IC5) ساخت کشور کره جنوبی متصل گردید. سپس با استفاده از یک دورسنج دیجیتالی نوری-تماسی مدل DT-2268 ساخت کشور تایوان سرعت شافت هلیس اندازه‌گیری شد.

مجموعه‌های فازی ورودی، نوع مجموعه فازی خروجی، نوع شیوه بهینه‌سازی و تعداد اپوک‌ها. مجموعه‌های فازی ورودی در انواع مختلف مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، سیگموئیدی و ترکیبی از این‌ها مورد استفاده و بررسی قرار گرفت تا بهترین آن‌ها که خطای کمتری را ایجاد می‌کند، انتخاب شود. مجموعه‌های فازی خروجی نیز در دو نوع کلی ثابت و خطی می‌باشد و دو نوع شیوه بهینه‌سازی ترکیبی و پس‌انتشار در مدل استفاده می‌گردد تا بهترین مدل به‌دست آید. تعداد کل داده‌های تحقیق با تکرار ۲۲۵ مجموعه داده است (برای هر وضعیت ۵ تکرار وجود دارد) که در مدل‌های فازی مجموعه داده‌ها نباید تکرار داشته باشند و لذا از میانگین تکرارها استفاده شده است و به عبارتی تعداد کل داده‌ها در مدل فازی - عصبی و رگرسیون خطی ۴۵ مجموعه داده می‌باشد که ۱۴ مجموعه داده (۳۰ درصد داده‌ها) جهت آزمون و ۳۱ مجموعه داده (حدود ۷۰ درصد داده‌ها) جهت آموزش استفاده شده است.

ساختار کلی مدل‌های ANFIS طراحی شده در شکل ۲ نشان داده شده است. نوع مجموعه‌های فازی مورد استفاده در مدل ANFIS که منجر به بهترین نتیجه شد، در شکل ۳ ارائه شده است که از نوع مثلثی بوده است.

تجزیه و تحلیل آماری

مدل آماری به کمک SPSS و به شیوه رگرسیون گیری چندمتغیره انجام شد که ورودی‌های این مدل آماری، قطر پره هلیس (گام هلیس)، سرعت دورانی هلیس و زاویه شیب هلیس بودند. ضمناً بررسی اثر قطر پره هلیس، سرعت دورانی و شیب بر بازده حجمی نقاله با طرح آزمایشی فاکتوریل ۳×۵×۳ در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با پنج تکرار با نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ انجام گرفت. قطر پره هلیس در سه سطح ۲۲/۵، ۱۷/۵ و ۱۳ سانتی‌متر، سرعت دورانی در پنج سطح ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ دور در دقیقه و شیب در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه بودند.

($m^3 \min^{-1}$) محاسبه گردید (BehroozilAr, 2006). برای محاسبه‌ی ظرفیت انتقال حجمی نظری نقاله ماریچی، با توجه به سرعت دورانی و مشخصات ابعادی هر هلیس (جدول ۱) و جای‌گذاری در رابطه (۱) می‌توان این مقدار را تعیین کرد (BehroozilAr, 2006).

$$Q_t = \frac{f}{4} (d_{sf}^2 - d_{ss}^2) I_p n \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q_t ظرفیت حجمی نظری برحسب ($m^3 \min^{-1}$)، قطر پره هلیس برحسب (m)، d_{ss} قطر محور هلیس برحسب (m)، I_p گام هلیس برحسب (m) و n سرعت دورانی هلیس برحسب (rpm) می‌باشد. با به‌دست آوردن ظرفیت حجمی واقعی و ظرفیت حجمی نظری می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۲) بازده حجمی را محاسبه کرد (BehroozilAr, 2006).

$$y_v = \frac{Q_a}{Q_t} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، y_v بازده حجمی، Q_a ظرفیت حجمی واقعی برحسب ($m^3 \min^{-1}$)، Q_t ظرفیت حجمی نظری برحسب ($m^3 \min^{-1}$) می‌باشد.

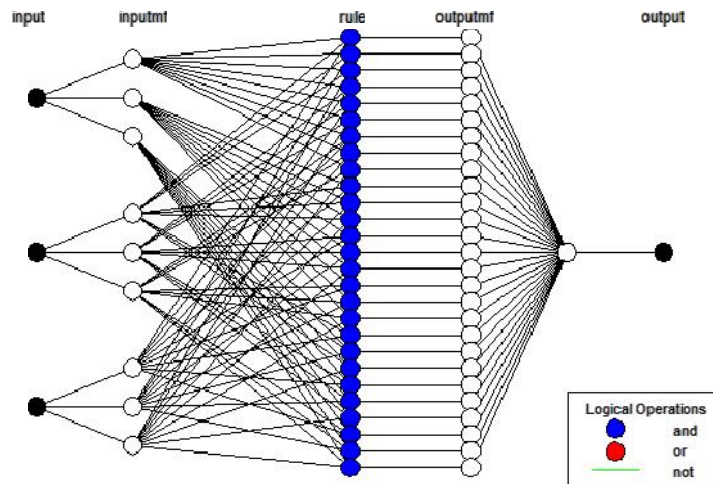
مدل‌سازی و تحلیل

این قسمت در دو مرحله کلی انجام شده است. مرحله اول به کمک مدل‌سازی توسط سیستم استنتاج انطباقی فازی-عصبی^۱ و مرحله دوم به کمک تحلیل در نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۹.

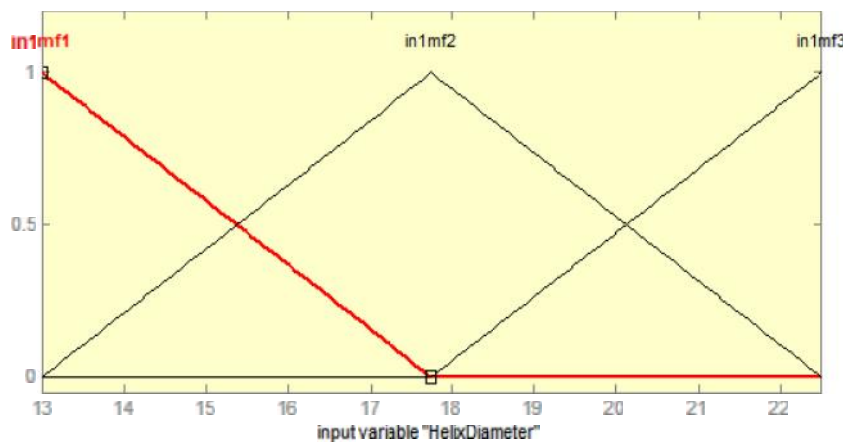
مدل‌سازی به کمک ANFIS

سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی یا ANFIS ترکیبی از سیستم فازی و شبکه عصبی مصنوعی است به طوری که مزایای هر دو را دربر دارد (Metin and Murat, 2008; Buragohain and Mahanta, 2008). این سیستم برای حل مسایل غیرخطی در کاربردهای مهندسی کشاورزی مانند سیستم‌های درگیر با خاک، گیاه و هوا که بسیار پیچیده هستند مفید می‌باشد (Buragohain and Mahanta, 2008; Arkhipov et al., 2008) و ANFIS قادر است به کمک مفاهیم زبانی ارتباط غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را برقرار و استنتاج نماید (Serge, 2001; Naderloo et al., 2012).

به‌طور کلی مدل‌سازی هم در محیط جعبه‌ابزار ANFIS و هم به کمک کدنویسی در متلب^۲ انجام شد و پنج عامل مهم و مؤثر، در مدل‌سازی بهینه شد تا بهترین مدل ANFIS ممکن حاصل گردد. این پنج عامل عبارتند از: نوع مجموعه‌های فازی ورودی، تعداد



شکل ۲- ساختار کلی مدل‌های ANFIS طراحی شده
Fig.2. General structure of developed ANFIS models



شکل ۳- تصویری از نوع مجموعه‌های فازی مورد استفاده در مدل ANFIS مربوط به هلیس شیب‌دار
Fig.3. A schematic of fuzzy input types in ANFIS model corresponding inclined helix conveyor

جدول ۲- مشخصات بهترین مدل ANFIS حاصل برای نقاله مارپیچ شیب‌دار

Table 2- Specifications of the best obtained ANFIS models corresponding to inclined helix conveyor

ورودی‌های مدل Model Inputs	تعداد مجموعه‌های فازی ورودی No. of Input MFs	مجموعه‌های فازی ورودی Type of Input MFs	مجموعه‌های فازی خروجی Type of Output MFs		شیوه بهینه‌سازی Optimization method	تعداد اپوک‌ها No. of Epochs	MSE	MAE	R
زاویه شیب نقاله Conveyor slop angle	3	مثلثی Triangle	خطی Linear	هیبرید Hybrid	2	0.777	0.244	0.987	

نتایج و بحث

نتایج آزمون بهترین مدل ANFIS حاصل برای هلیس‌های شیب‌دار در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج بازده حجمی مربوط به هر سه هلیس در سرعت‌های دورانی و شیب‌های مختلف در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. ضمناً برای به‌دست آوردن بیشترین بازده حجمی از مدل چهاربعدی (سه ورودی و یک خروجی) فازی-عصبی به‌دلیل پیچیدگی مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. تا با تغییر دادن پارامترهای ورودی در محدوده تعریف شده به روش‌های ژنتیک بتواند بیشترین بازده حجمی را به‌دست آورد. برای این منظور از یک ژن با سه کروموزوم که هر کروموزوم مربوط به هر ورودی بود، استفاده شد و محدوده پایین و بالای هر کروموزوم مطابق محدوده پارامترهای ورودی اعمال گردید. تابع هزینه جهت محاسبه بیشترین بازده حجمی در یک منفی ضرب شد.

نتایج زیر را می‌توان از این تصاویر سه‌بعدی استنباط نمود:

در نقاله‌های مارپیچ شیب‌دار با افزایش سرعت دورانی و زاویه شیب هلیس، بازده حجمی کم می‌شود تا آن‌جا که کمترین بازده حجمی در قطر ۲۲/۵ سانتی‌متر و زاویه شیب ۳۰ درجه به‌دست می‌آید. و بیشترین بازده حجمی براساس نتایج الگوریتم ژنتیک زمانی است که قطر ۱۷/۵ سانتی‌متر و زاویه شیب ۱۰ درجه و سرعت دورانی ۱۰۰ دور بر دقیقه باشد.

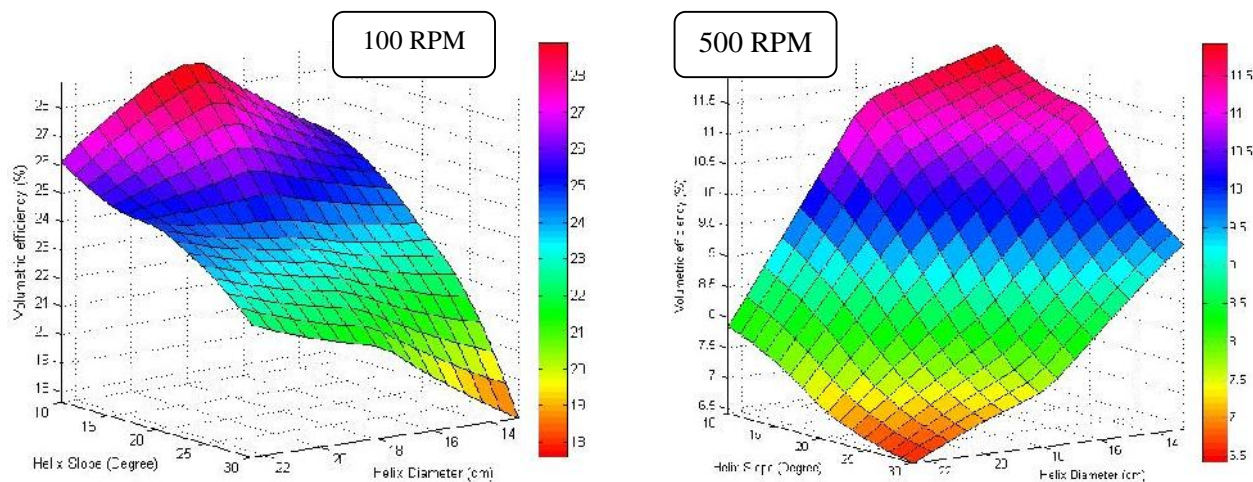
در نقاله‌های مارپیچ شیب‌دار با افزایش قطر هلیس و سرعت

دورانی آن بازده حجمی کم می‌شود تا آن‌جا که در قطر ۲۲/۵ سانتی‌متر و سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه بازده حجمی ۶/۴۲ درصد می‌گردد. ولی بیشترین بازده مربوط به کمترین قطر و کمترین سرعت دورانی نیست و به‌عبارتی بیشترین بازده حجمی زمانی حاصل می‌شود که قطر هلیس ۱۷/۵ سانتی‌متر و سرعت دورانی آن ۱۰۰ دور بر دقیقه باشد. اگرچه این تأثیر در سرعت‌های دورانی بیشتر برقرار نیست و به‌نظر می‌رسد در سرعت‌های دورانی کم با کاهش قطر هلیس مانند هلیس‌های افقی نیروی رو به جلوی وارده به محصول کاهش یافته و شاید این عامل بر روی بازده حجمی اثر می‌گذارد.

در نقاله‌های مارپیچ شیب‌دار با افزایش زاویه شیب و سرعت دورانی هلیس بازده حجمی کم می‌شود تا آن‌جا که در زاویه شیب ۳۰ درجه و سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه کمترین بازده حجمی به‌دست می‌آید. بیشترین بازده حجمی زمانی است که زاویه شیب ۱۰ درجه و سرعت دورانی ۱۰۰ دور بر دقیقه باشد.

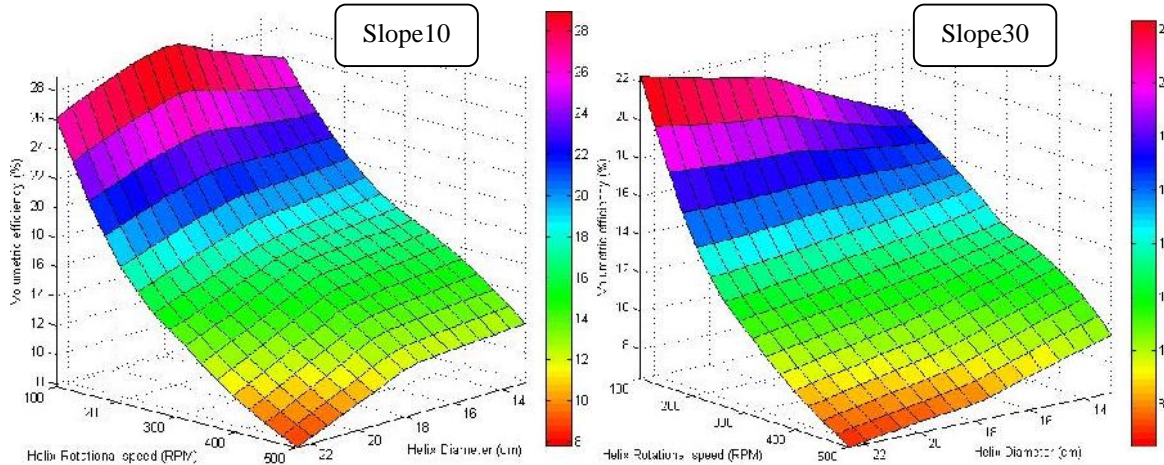
از تصاویر سه‌بعدی می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین بازده حجمی در نقاله‌های مارپیچ شیب‌دار مربوط به سرعت دورانی ۱۰۰ دور بر دقیقه، زاویه شیب ۱۰ درجه و قطر پره ۱۷/۵ سانتی‌متر بوده و مقدار آن ۲۹/۱۱ درصد می‌باشد.

رابطه بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بازده حجمی در مدل ANFIS در شکل ۷ نشان داده شده است. عملکرد این مدل با توجه به مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بازده حجمی ۰/۹۸ و مقدار MSE ۰/۷۷ درصد رضایت‌بخش می‌باشد.

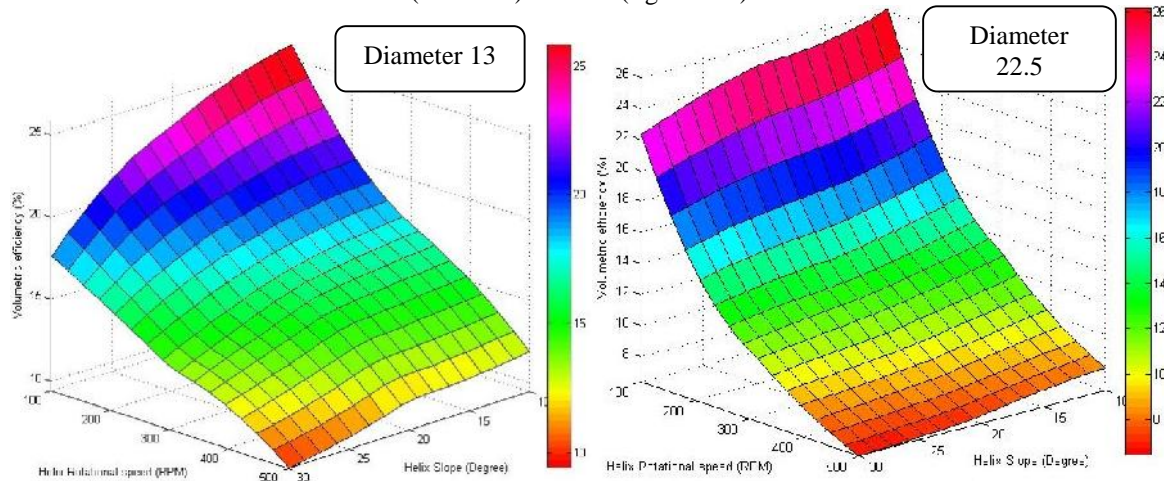


شکل ۴- اثر قطر پره هلیس و زاویه شیب نقاله بر بازده حجمی نقاله مارپیچی شیب‌دار در سرعت‌های دورانی ۱۰۰ rpm (سمت چپ) و ۵۰۰ rpm (سمت راست) هلیس

Fig.4. The effect of blade diameter and slope angle of conveyor on volumetric efficiency of inclined spiral conveyor at 100 rpm (left-hand) and 500 rpm (right-hand) of helix



شکل ۵- اثر قطر پره هلیس و سرعت دورانی هلیس بر بازده حجمی نقاله مارپیچی شیب‌دار در زوایای ۱۰ درجه (سمت چپ) و ۳۰ درجه (سمت راست) نقاله
Fig.5. The effect of blade diameter and rotational speed on volumetric efficiency of inclined spiral conveyor at angles of 10° (left-hand) and 30° (right-hand) for helix



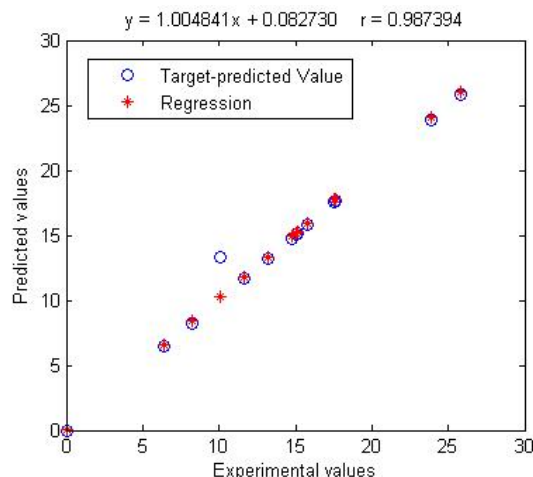
شکل ۶- اثر سرعت دورانی هلیس و زاویه شیب نقاله بر بازده حجمی نقاله مارپیچی شیب‌دار در قطرهای ۱۳ cm (سمت چپ) و ۲۲/۵ cm (سمت راست)
 (راست)

Fig.6. The effect of rotational speed and slope angle of conveyor on volumetric efficiency of inclined spiral conveyor at diameters of 13 cm (left-hand) and 22.5 cm (right-hand)

جدول ۳- مشخصات مدل رگرسیون چندمتغیره خطی حاصل برای نقاله مارپیچی شیب‌دار به کمک SPSS

Table 3- The specifications of multivariate linear regression model obtained by SPSS for inclined helix conveyor

وضعیت هلیس Status helix	ضرایب ورودی‌های مدل Coefficients of the model input				MSE	SSE	R	P
	قطر پره هلیس (گام هلیس) Blade diameter of helix (Helix pitch)	سرعت دورانی هلیس Rotational speed of helix	مقدار زاویه شیب نقاله The slop angle of conveyor	مقدار ثابت Constant				
شیب‌دار Inclined	-0.259	-0.035	-0.204	34.322	3.086	138.806	0.949	0

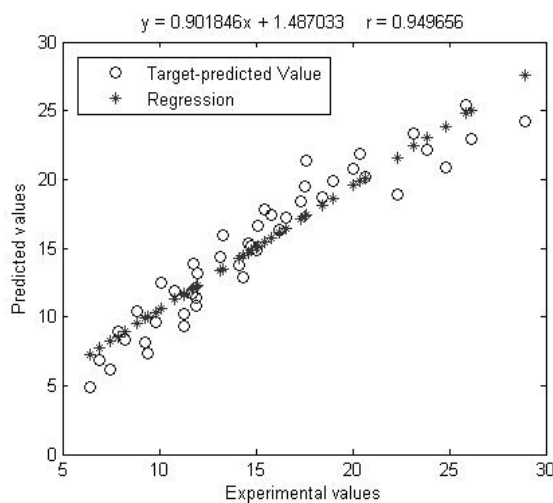


شکل ۷- نمودار مربوط به مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده بازده حجمی (درصد) در مدل ANFIS

Fig.7. The plot of actual values and predicted values of volumetric efficiency developed by ANFIS model

شده است که در آن ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده بازده حجمی ۰/۹۴ به دست آمد. با مقایسه این نتیجه با نتیجه مدل ANFIS مشخص می شود که پیش بینی بازده حجمی با مدل ANFIS می تواند دقیق تر باشد.

خصوصیات مدل آماری حاصل و نتیجه رگرسیون چندمتغیره خطی برای پیش بینی شده بازده حجمی نقاله ماریچ شیب دار به کمک SPSS در جدول ۳ و رابطه بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده بازده حجمی در مدل آماری با نرم افزار SPSS در شکل ۸ نشان داده



شکل ۸- نمودار مربوط به مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده بازده حجمی (درصد) در مدل آماری SPSS

Fig.8. The plot of actual values and predicted values of volumetric efficiency developed by SPSS statistical model

نتایج تجزیه واریانس بازده حجمی نقاله که با طرح آزمایشی فاکتوریل ۳×۵×۳ در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با پنج تکرار با نرم افزار SPSS نسخه ۱۹ انجام گرفت در جدول ۴ و ۵ نشان داده شده است. طبق نتایج جدول ۴ در تجزیه واریانس، اثر بلوک (تکرار) معنی دار نشد. اثر قطر پره هلیس، سرعت دورانی و شیب و نیز اثرات متقابل آنها بر بازده حجمی نقاله همه در سطح یک درصد معنی دار گردید. این نتایج نشان می دهد که قطر پره هلیس، سرعت دورانی و شیب و اثرات متقابل آنها بر بازده حجمی نقاله تأثیر زیادی دارد. جدول ۵ نتیجه مقایسه میانگین های بازده حجمی را با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش قطر پره هلیس، سرعت دورانی و شیب بازده حجمی کاهش یافته است.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر قطر پره هلیس، سرعت دورانی و شیب بر بازده حجمی نقاله

Table 4- Analysis of variance the effect of the diameter of the auger blades, rotational speed and slope on the volumetric efficiency

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات The sum of squares	میانگین مربعات Mean of squares	F	معنی داری Significant
تکرار Repeat	4	2.3	0.575	2.03 ^{ns}	0.093
قطر Diameter	2	242.89	121.46	427.72 ^{**}	0.000
سرعت Speed	4	5674.46	1418.62	4996.21 ^{**}	0.000
شیب Slope	2	630.04	315.02	1109.47 ^{**}	0.000
قطر×سرعت Diameter ×Speed	8	224.14	28.02	98.67 ^{**}	0.000
سرعت × شیب Speed × Slope	8	82.30	10.29	36.23 ^{**}	0.000
قطر×شیب Diameter × Slope	4	63.29	15.82	55.73 ^{**}	0.000
قطر×سرعت×شیب Diameter × Speed × Slope	16	31.72	1.98	6.98 ^{**}	0.000
خطا Error	176	49.97	0.28		
کل Total	224	7001.12			

**معنی‌دار در سطح ۱٪، ns: عدم معنی‌داری
** : Significant at level 1%, ns: Non-significant

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های بازده حجمی با آزمون دانکن (۵٪)

Table 5- Average comparisons of volumetric efficiencies based on Duncan test (5%)

بازده حجمی The volumetric efficiency	شیب Slope	بازده حجمی The volumetric efficiency	سرعت دورانی Rotational speed	بازده حجمی The volumetric efficiency	قطر پره هلیس The diameter of the helix blades
13.006 a	30	9.111 a	500	13.705 ^a	22.5
15.304 b	20	11.615 b	400	15.556 ^b	17.5
17.094 c	10	13.987 c	300	16.142 ^c	13
		17.398 d	200		
		23.560 e	100		

سرعت دورانی هلیس، به‌طور متوسط کمتر از ۳ درصد راندمان حجمی نقاله ماریچی کاهش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد که با افزایش سرعت دورانی هلیس، نیروی گریز از مرکز دانه‌ها افزایش یافته و به‌دنبال آن، قابلیت بارگیری دانه‌ها در فضای بین پره‌های هلیس کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه انتقال محصول، در هر سه نقاله ماریچی، بازده حجمی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی تأثیر افزایش شیب نقاله‌های ماریچی بر کم شدن بازده حجمی در انتقال شیب‌دار محصول، ممکن است در اثر کاهش قابلیت بارگیری هلیس از قسمت تغذیه نقاله در زاویه‌های انتقال بالاتر باشد، زیرا ثابت شده است که

چنان‌چه مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی، بازده حجمی در هر سه نقاله ماریچی کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به‌واسطه‌ی آن باشد که ظرفیت حجمی نقاله‌ها در عمل، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر از ظرفیت حجمی نظری آن است. این کاهش ظرفیت به کاهش بازده حجمی نقاله می‌انجامد (Behroozi Lar, 2006). در مجموع می‌توان گفت، به‌ازای افزایش دور هلیس، میزان انتقال وزنی و حجمی افزایش می‌یابد. ولی مقادیر افزایش‌ها (ظرفیت انتقال وزنی و حجمی)، با افزوده شدن دور کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش می‌توان گفت که برای هر ۱۰۰ دور بر دقیقه افزایش

نشان دادند که بیشترین بازده حجمی در هر سه نقاله‌های ماریچی مورد تحقیق در رنج سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه اتفاق افتاد. با افزایش سرعت دورانی و شیب انتقال نقاله ماریچی طی انتقال محصول در حالت شیب‌دار، بازده حجمی به‌طور معنی‌داری در هر سه نقاله ماریچی کاهش پیدا کرد. اثر قطر نقاله ماریچی بر بازده حجمی در انتقال محصول، نامنظم بود و روند مشخصی را نمایان نکرد. ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده بازده حجمی در مدل حاصل از ANFIS ۰/۹۸ و در مدل رگرسیون چندمتغیره خطی با SPSS ۰/۹۴ به‌دست آمد که نشان داد مدل ANFIS دقیق‌تر از مدل آماری بود. با مقایسه مشخصات عملکردی نقاله‌های ماریچی در انتقال دانه‌های گندم، با مقادیری که توسط محققین دیگر برای نقاله‌های ماریچی با شیب‌های مشابه، در انتقال دانه‌های ذرت گزارش شده بود، مشخص شد که اثر زاویه انتقال نقاله‌های ماریچی بر بازده حجمی در انتقال دانه‌های گندم در مقایسه با انتقال دانه‌های ذرت، کاملاً معنی‌دار بود. بنابراین، ثابت شد که عملکرد نقاله‌های ماریچی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر خصوصیات مواد انتقالی قرار دارد.

ظرفیت بارگیری هلیس نقاله ماریچی در حالت انتقال شیب‌دار، حدود یک‌سوم ظرفیت بارگیری در وضعیت انتقال افقی مواد است. محققان گزارش کردند که نقاله ماریچی با قطر بزرگتر دارای راندمان حجمی بیشتری نسبت به نقاله‌های با قطر کوچکتر است، که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مطابقت ندارد. با مقایسه جداول ۲ و ۳ و نمودارهای مربوطه در شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان این نتیجه را گرفت که با توجه به مقادیر r و MSE مربوط به مدل‌های حاصل به شیوه ANFIS (به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۷۷) نسبت به مدل‌های آماری (به ترتیب ۰/۹۴ و ۳/۰۸) از دقت بیشتری برخوردار هستند و این قدرت بسیار بالای مدل‌سازی به کمک ANFIS در این زمینه را تأیید می‌نماید.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مشخصه عملکردی نقاله ماریچی به‌عنوان تابعی از قطر هلیس، سرعت دورانی هلیس و شیب انتقال بررسی شد. مشخصه عملکردی برحسب بازده حجمی و به کمک دو شیوه استفاده از ANFIS و مدل‌های آماری به کمک SPSS بررسی شد. نتایج

References

1. Arkhipov, M., E. Krueger, and D. Kurtener. 2008. Evaluation of ecological conditions using bioindicators: application of fuzzy modeling. Paper presented at Lecture Notes in Computer Science. Auger Flighting Design Considerations. JUN1993. ANSI/ASAE EP389.2.
2. Behrooz Lar, M. 2006. Grain Combine harvesters. Agricultural bank Publishing. Tehran. (In Farsi).
3. Buragohain, M., and C. Mahanta. 2008. A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design. Applied Soft Computing 8: 609-625.
4. Burr, M. S., M. F. Kocher, and D. D. Jones. 1998. Design of tapered augers for uniform unloading particulate materials from rectangular cross-section containers. Trans. of the ASAE 41: 1415-1421.
5. Cheng, C. B., C. J. Cheng, and E. S. Lee. 2002. Neuro-fuzzy and genetic algorithm in multiple response optimization. Computers and Mathematics with Applications 44: 1503-1514.
6. Dai, J., and J. R. Grace. 2008. A model for biomass screw feeding. Powder Technology 186: 40-55.
7. McFate, K.L., and R. M. George. 1971. Power-capacity relationships of nominal 8-inch screw conveyors when handling shelled corn. Trans. of the ASAE 24: 121-126.
8. Metin, E. H., and H. Murat. 2008. Comparative analysis of an evaporative condenser using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. International Journal of Refrigeration 31: 1426-1436.
9. Moysey, P. A., and M. R. Thompson. 2005. Modeling the solids in flow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method. Powder Technology 153: 95-107.
10. Naderloo, L., R. Alimardani, M. Omid, F. Sarmadian, P. Javadikia, M. Y. Torabi, and F. Alimardani. 2012. Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs. Measurement 45: 1406-1413.
11. Nicolai, R., J. Ollerich, and J. Kelly. 2004. Screw auger power and throughput analysis. Paper presented at ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, Ontario, Canada.
12. Nicolai, R., A. Dittbenner, and S. Pasikanti. 2006. Large portable auger throughput analysis. Paper presented at ASAE Annual International Meeting, Portland, Oregon, USA.
13. Regan, W. M., and S. M. Henderson. 1959. Performance characteristics of inclined screw conveyors. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal.

14. Safety for Portable Agricultural Auger Conveying Equipment. APR1990. ASAE S361.3.
15. Serge, G. 2001. Designing fuzzy inference systems from data: Interpretability oriented review. IEEE Transaction on Fuzzy Systems 9: 426-442.
16. Srivastava, A. K., C. E. Goering, R. P. Rohrbach, and D. Buckmaster. 2006. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Michigan, USA.
17. Terminology and Specification Definitions for Agricultural Auger Conveying Equipment. MAR1975. ASAE S374.
18. Zareiforoush, H., M. H. Komarizadeh, and M. R. Alizadeh. 2010. Effects of crop-machine variables on paddy grain damage during handling with an inclined screw auger. Biosystems Engineering 106 (3): 246-254.

Study and modeling of changes in volumetric efficiency of helix conveyors at different rotational speeds and inclination angels by ANFIS and statistical methods

A. Zareei¹- R. Farrokhi Teimourlou²- L. Naderloo^{3*}- S. M. H. Komarizade Asl⁴

Received: 04-07-2015

Accepted: 13-12-2015

Introduction

Spiral conveyors effectively carry solid masses as free or partly free flow of materials. They create good throughput and they are the perfect solution to solve the problems of transport, due to their simple structure, high efficiency and low maintenance costs.

This study aims to investigate the performance characteristics of conveyors as function of auger diameter, rotational speed and handling inclination angle. The performance characteristic was investigated according to volumetric efficiency. In another words, the purpose of this study was obtaining a suitable model for volumetric efficiency changes of steep auger to transfer agricultural products. Three different diameters of auger, five levels of rotational speed and three slope angles were used to investigate the effects of changes in these parameters on volumetric efficiency of auger. The used method is novel in this area and the results show that performance by ANFIS models is much better than common statistical models.

Materials and Methods

The experiments were conducted in Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery in Urmia University. In this study, SAYOS cultivar of wheat was used. This cultivar of wheat had hard seeds and the humidity was 12% (based on wet). Before testing, all foreign material was separated from the wheat such as stone, dust, plant residues and green seeds. Bulk density of wheat was 790 kg m^{-3} . The auger shaft of the spiral conveyor was received its rotational force through belt and electric motor and its rotation leading to transfer the product to the output. In this study, three conveyors at diameters of 13, 17.5, and 22.5 cm, five levels of rotational speed at 100, 200, 300, 400, and 500 rpm and three handling angles of 10, 20, and 30° were tested.

Adaptive Neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is the combination of fuzzy systems and artificial neural network, so it has both benefits. This system is useful to solve the complex non-linear problems in agricultural engineering applications. ANFIS by linguistic concepts can establish and inference non-linear relationship between inputs and outputs. In this research, generally modeling was performed by using toolbox of ANFIS and coding in MATLAB software. Five important and effective factors in modeling were optimized until the best ANFIS model was obtained. The five factors were: type of fuzzy sets for inputs, number of fuzzy sets for inputs, type of fuzzy set for output, method of optimization and number of epochs. The statistical model was done by using SPSS and in the multivariate regression method. In multivariate linear regression in statistical model, the independent variables were auger blade diameter, rotational speed and the angle of slope of the auger and dependent variable was volumetric efficiency. The factorial test in randomized complete block design was conducted for variance analysis of volumetric efficiency. Mean Comparison of volumetric efficiency in different levels of factors was performed using Duncan' test in 5% level.

Conclusions

In this study, volumetric efficiency of spiral conveyors was investigated as a function of auger blade diameter, auger rotational speed and slope of transfer. The performance was measured in terms of volumetric

1- M.Sc. Graduated Student, Mechanical Engineering of Agricultural Machinery Dept., Urmia University, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Mechanical Engineering of Agricultural Machinery Dept., Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Mechanics of Biosystems Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

4- Professor, Mechanical Engineering of Agricultural Machinery Dept, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: l.naderloo@razi.ac.ir)

efficiency using ANFIS and statistical models with SPSS. The results showed that:

Volumetric efficiency almost decreased by increasing of rotational speed, for all three conveyors.

Maximum volumetric efficiency in all three spiral conveyors was in the speed range of 100 to 200 rpm.

Volumetric efficiency significantly reduced in all three spiral conveyors by increasing in rotational speed and slope of transferring in spiral conveyors.

Effect of spiral conveyor diameter on the volumetric efficiency in product transferring was irregular and no specific process is appeared.

The correlation coefficient between the actual and predicted values was obtained as 0.98 in ANFIS model and 0.94 in multivariate linear regression with SPSS which showed the ANFIS model was more accurate than statistical model.

Comparison between performances of spiral conveyor to transfer the seeds of wheat, with results by other researchers that has been reported for spiral conveyors with the same slope to transfer of corn kernels, was found that the angle effect on volumetric efficiency is quite significant. Therefore, it proves that performances of spiral conveyor are impressed by characteristics of transition material considerably.

The maximum volumetric efficiency was corresponded in rotational speed of 100 rpm, inclination angle of 10°, and blade diameter of 17.5 cm that it was approximately 29.11%.

Keywords: Angle of transfer, Fuzzy sets, Helix conveyor, Optical digital tachometer

استفاده از آنالیز ابعادی جهت تعیین پارامترهای مؤثر دستگاه جداکننده میز ثقلی برای کمینه نمودن ناخالصی موجود در توده عدس

هادی باقری^۱ - منصور راسخ^{۲*} - محمد حسین کیانمهر^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲

چکیده

در تحقیق حاضر از یک جداکننده میز ثقلی برای حداکثر جداسازی ناخالصی موجود در توده عدس استفاده شد. دستگاه جداکننده میز ثقلی دارای پنج پارامتر قابل تنظیم شیب طولی میز، شیب عرضی میز، دامنه نوسان میز، فرکانس نوسان میز و سرعت هوا می‌باشد، تأثیر این پارامترها برای حصول به حداکثر جداسازی ناخالصی موجود در توده عدس، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعدی حاصل شد که در بررسی اثر و کاهش تعداد پارامترها مؤثر بوده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش شیب عرضی میز از 5° به 1° و افزایش شیب طولی میز از 1° تا 2° سبب افزایش جداسازی ناخالصی موجود در توده عدس می‌شود. همچنین اثر عدد بدون بعد $\frac{V}{a\omega}$ که نسبت سرعت جریان هوای دمیده شده به عدس‌ها به حداکثر سرعت نوسانات میز را نشان می‌دهد، در نسبت جداسازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که در $\frac{V}{a\omega} = 171$ ، شیب عرضی میز 1° و شیب طولی میز 2° ، درصد جداسازی ناخالصی موجود در توده عدس به $90/2\%$ می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، جداسازی ثقلی، عدد بدون بعد، عدس، ناخالصی

مقدمه

بررسی راه‌کارهای رسیدن به این هدف اجتناب‌ناپذیر است. از جمله محدودیت‌های مهم کشت عدس در سطح دنیا تداخل علف‌های هرز است (Amin et al., 2004). که وجود این عامل، خود یکی از عوامل منفی در خلوص محصول برداشت شده از مزارع عدس، نیز می‌باشد، بدین ترتیب وجود و یا عدم وجود علف‌هرز، در نهایت کمیت و کیفیت محصول را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (Turk and Tawaha, 2003). از علف‌های هرز موجود در مزارع کشت عدس، می‌توان به شیر پنیر (*Galiumtricornne*)، یولاف وحشی (*Avenaludoviciana*)، گل‌جالیز (*Orobanch Crenate*)، قیاق (*Sorghum Halepense*)، پیچک (*Convolvulus arvensis*) و پنجه مرغی (*Cynodon dactylon*) اشاره نمود. یکی از راه‌های از بین بردن علف‌هرز استفاده از مواد شیمیایی مانند تری بوتیل^۴ و مالوران^۵ است، اما با توجه به اثرات سوء زیست‌محیطی و کاهش کیفیت و بالاخره اثر سوء آن‌ها بر سلامت انسان استفاده از روش‌های تکنولوژی پس از برداشت در جدا نمودن علف‌هرز از محصول عدس بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کند. در صنایع غذایی، برای دو مورد اساسی تمیز کردن و مرتب کردن (دسته‌بندی) مواد از دستگاه جداکننده وزنی استفاده می‌شود. استان

عدس (*Lens culinaris medic*) گیاهی متعلق به خانواده بقولات است که در فصل سرد و در شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای رشد می‌نماید (Johnson et al., 2015; Kaur et al., 2014). سطح زیرکشت محصول عدس در جهان در سال ۲۰۱۳ در حدود ۴۳۲۰۰۰۰ هکتار و میزان تولید آن برابر ۴۹۷۰۰۰۰ تن بود، سطح زیر کشت محصول عدس در ایران در این بازه زمانی، در حدود ۱۲۰۰۰۰ هکتار و میزان تولید عدس برابر ۷۳۰۰۰ تن بود (Anonymous, 2015). نظر به این که در کشاورزی کنونی یکنواختی و خلوص محصول تولیدی، از موارد لازم و ضروری است، بنابراین

۱- دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
* - نویسنده مسئول: (Email: dr.mara1349@gmail.com)
۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران، پردیس اهوریحان، پاکدشت، ایران

4- Tributyl
5- Maloran

روش را مورد بررسی و مقایسه قرار داد. وی بیان داشت که انتخاب وسیله جداسازی مناسب برای کاربرد مشخص باید همیشه به‌وسیله آزمایش‌های کاری در اولویت قرار گیرد، درحالی‌که بهینه‌سازی عملیات جداسازی در شرایط تولید نیاز به بررسی کارخانه تحت پارامترهای مختلفی دارد (Falconer, 2003). در مطالعات تخصصی‌تر، راسخ^۴ (۲۰۰۶)، به جداسازی گندم سن زده از گندم سالم توسط جداکننده وزنی پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد چگالی گندم سن زده و گندم سالم به‌ترتیب $1102/21 \text{ kg m}^{-3}$ و $1298/65 \text{ kg m}^{-3}$ است. آن‌ها در این مطالعه نتیجه گرفتند که افزایش شیب عرضی میز از $0/5^\circ$ به 1° و کاهش شیب طولی میز از 5° به 3° باعث افزایش درصد جداسازی گندم سن زده می‌شود، که این تغییرات با درصد جداسازی رابطه خطی داشتند و این تنظیمات به‌همراه فرکانس نوسان میز $450 \text{ cycle min}^{-1}$ و سرعت هوای 8 m s^{-1} بهترین کارایی را ارائه داد (Rasekh, 2006). در تحقیق دیگری هولاتز و کوپک^۵ (۲۰۰۳) گزارش دادند که در نرخ تغذیه پایین، جدایش آبرودینامیکی دانه از کاه و کلش در روی غربال‌ها اتفاق می‌افتد و در نرخ تغذیه بالا ذرات ریز، در روی غربال به شکل یک عامل منفی، تلفات جدایش را افزایش می‌دهد (Hollatz and Quick, 2003).

در تحقیق دیگر روند حذف پوسته سویای رسیده به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. به‌طوری‌که قطر میانگین سویا، با نسبت میانگین ۹۵٪ مغز سویا و ۵٪ پوسته در رطوبت $11/8 \text{ mm}$ ، $2/75$ و چگالی واقعی پوسته و مغز سویا 1090 kg m^{-3} و 1267 kg m^{-3} برای میانگین قطر از $2/11 \text{ mm}$ و $2/74 \text{ mm}$ بود. پوسته عمدتاً در سرعت هوای $2/7 \text{ m s}^{-1}$ - $4/5 \text{ m s}^{-1}$ و مغز سویا در سرعت هوای $9/1 \text{ m s}^{-1}$ - $13/7 \text{ m s}^{-1}$ به‌صورت معلق در سیستم قرار گرفتند و بدین ترتیب از همدیگر جدا شدند. در این حالت هم‌پوشانی پروفیل سرعت حد مورد نیاز عملیات پنوماتیک و تفکیک برای جداسازی بهینه شد. همچنین در این پژوهش تأثیر غلظت ذرات در جداسازی پوسته از مغز سویا برای سه نسبت میزان تغذیه مواد به دستگاه در شرایط سرعت هوای متغیر دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیان داشت که در شرایط بهینه، توسط روش جدایش پنوماتیکی ۹۹٪ پوسته‌ها را از مغز سویا جدا می‌شود (Murilo et al., 2009).

همچنین کاشی (۲۰۱۰) در تحقیق خود با استفاده از یک دستگاه جداکننده وزنی، توانست به جداسازی یولاف وحشی (*Avena Sativa*) از گندم پردازد و در شیب طولی میز 4° ، شیب عرضی میز 1° ، فرکانس نوسان میز $450 \text{ cycle min}^{-1}$ ، سرعت هوا $5/7 \text{ m s}^{-1}$

اردبیل یکی از تولیدکنندگان اصلی عدس در کشور می‌باشد، به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۱ میزان ۲۳۸۰۰ تن عدس از ۳۲۰۰۰ هکتار مزارع استان اردبیل برداشت شده است. بیشترین میزان تولید عدس در این استان مربوط به شهرستان بيله سوار می‌باشد که در سال ۱۳۹۱، ۵۰۰۰ هکتار از ۲۰۰۰۰۰ هکتار اراضی آبی و دیم این شهرستان به زیرکشت این محصول اختصاص یافته، که از این اراضی ۳۵۰۰ هکتار عدس برداشت شد.

در رابطه با استفاده از جداکننده‌های وزنی مطالعات متعددی صورت گرفته است. گال^۱ و همکاران (۱۹۸۶) از یک جداکننده ثقلی برای تقسیم‌بندی سه وارسته لوبیا استفاده کردند و نتیجه‌گیری نمودند که اجزاء تقسیم‌بندی شده اختلاف مؤثر در جرم بذر داشتند و سبک‌ترین جزء، چگالی کمتری داشت (Gaul et al., 1986). همچنین در تحقیق دیگری فیلر^۲ و همکاران (۱۹۸۱) از یک جداکننده ثقلی برای جداکردن سنگ و کلوخ از بادام زمینی استفاده کردند. این جداکننده سطح سوراخ‌داری بود که جریان هوا از زیر آن به طرف بالا دمیده می‌شد. اجزاء سبک‌تر به‌وسیله نیروی هوا به طرف بالا پرتاب می‌شدند و سپس در اثر نیروی وزنشان به پایین می‌افتادند. تکه‌های سنگین در تماس با سطح باقی می‌ماندند و نیروی هوا قادر به بلند کردن آن‌ها نبود. در این دستگاه ارتعاش مکانیکی در دستگاه برای انتقال و به‌هم زدن اجزاء به‌کار می‌رفت (Feller et al., 1981). در تحقیقی اساس کار جداکننده وزنی بررسی و معادلات حرکت برای یک بذر معلوم شد و از این مطالعات، شبیه‌سازی کامپیوتری انجام شد، تا تأثیر سرعت ارتعاش میز، شیب میز و مکش هوا روی جداسازی مطالعه و معلوم شود. لذا این نتایج ممکن است در بهبود بخشیدن به کیفیت جداسازی و پارامترهای طراحی جداکننده استفاده شود (Chen and Hua, 1991). در تحقیقی دیگر از یک الک بادی که در یک جداکننده وزنی قرار داشت، برای تقسیم‌بندی بذرهای نخودفرنگی که در شرایط مختلف آب و هوایی در مرحله رسیدگی و برداشت قرار گرفته بودند، استفاده شد. نتیجه این کار بهبود درجه خلوص و مؤثر بودن دستگاه در طبقه‌بندی بذرها بود (Amaral et al., 1984). در تحقیقی دیگری جداسازی پنوماتیک دانه و کاه در مخلوط کاه و دانه بررسی شد. هوای تحت فشار برای جداسازی کاه و دیگر ناخالصی‌ها از مواد کوبیده شده به‌کار رفت. به‌طوری‌که در سرعت هوای $9/14 \text{ m s}^{-1}$ همه گندم جدا و در سرعت هوای $8/53 \text{ m s}^{-1}$ ، ۹۳٪ گندم جدا شد (Uhl and Lamp, 1966). فالكونر^۳ در سال ۲۰۰۳، تحقیقی مقایسه‌ای بر روی تکنیک‌های قدیمی و روش‌های جدید جداسازی وزنی انجام داد و در آن مزایا، معایب، اصول و متغیرهای هر

4- Rasekh

5- Hollatz and Quick

1- Gaul

2- Feller

3- Falconer

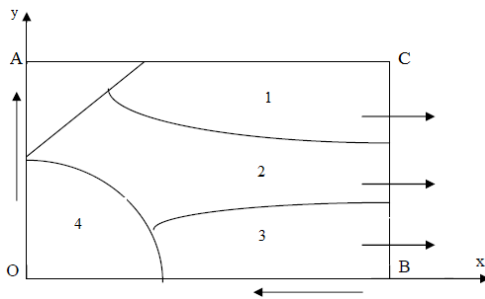
هوا (در جهت بدست آمدن حداکثر جداسازی ناخالصی از توده عدس) محاسبه شد.

مواد و روش ها

در این آزمایش از عدس (رقم بیله سوار) تهیه شده از مرکز تحقیقات کشاورزی استان اردبیل استفاده شد. توده عدس مورد آزمایش دارای درجه خلوص ۶۸٪ بود. از دستگاه جداکننده ثقلی مدل LA-K ساخت شرکت (WESTRUP) دانمارک استفاده شده است (شکل ۱). دستگاه جداکننده ثقلی دارای یک میز است که در دو جهت طولی و عرضی شیبدار است و سطح آن مشبک و سوراخدار است. میز در راستای طولی حرکت نوسانی رفت و برگشتی دارد و جریان رو به بالای هوا توسط دمنده از زیر میز به دانه‌ها برخورد می‌کند.

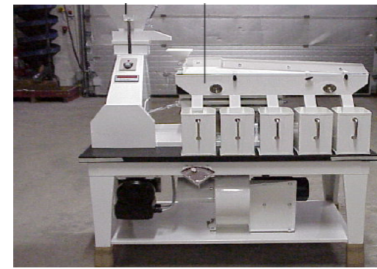
دامنه نوسان میز ۷ mm حداکثر میزان جداسازی برابر با مقدار ۵۶/۲۴۳٪، را به دست آورد. چگالی ذره یولاف و گندم به ترتیب برابر با $۰/۹۰۲ \text{ gr cm}^{-3}$ و $۱/۳۲۷ \text{ gr cm}^{-3}$ بوده و چگالی توده یولاف و گندم به ترتیب برابر با $۰/۴۳۹ \text{ gr cm}^{-3}$ و $۰/۸۱۰ \text{ gr cm}^{-3}$ تعیین شد (Kashi, 2010). با توجه به مطالب بیان شده و بررسی‌های انجام شده تاکنون مطالعه جامعی در خصوص جداسازی ناخالصی‌های توده عدس ایرانی (منطقه اردبیل) توسط دستگاه جداکننده میز ثقلی، صورت نپذیرفته است و این امر ضرورت مطالعه در این زمینه را بیان می‌دارد.

هدف این پژوهش استفاده از جداکننده میز ثقلی برای جداسازی ناخالصی موجود در توده عدس می‌باشد. در این پژوهش با تکیه بر روش آنالیز ابعادی، مناسب‌ترین مقدار پارامتر قابل تنظیم شیب طولی میز، شیب عرضی میز، دامنه نوسان میز، فرکانس نوسان میز و سرعت



شکل ۲- طرح‌واره میز جداکننده میز ثقلی: ۱- مواد سنگین، ۲- مواد متوسط، ۳- مواد سبک، ۴- محل تغذیه مواد

Fig. 2. A schematic vertical view of the surface of the gravity table separator: 1- Heavy materials, 2- Medium materials, 3- Light materials, 4- Feed place



شکل ۱- دستگاه جداکننده میز ثقلی

Fig. 1. Gravity table separator

دامنه نوسان دستگاه، زوایای طولی و عرضی میز و سرعت نوسان میز به وسیله اهرم‌های مربوط به آن‌ها واقع در روی دستگاه تنظیم شد. در هنگام انجام آزمایش سرعت نوسان میز به وسیله سرعت‌سنج دیجیتال واقع در روی دستگاه مشاهده و کنترل می‌شد. محدوده قابل تنظیم پارامترهای دستگاه به شرح زیر است: شیب طولی میز (α_1) : $۰-۶^\circ$ ، شیب عرضی میز (α_2) : $۰-۳^\circ$ ، فرکانس نوسان میز (ω) : $۰-۵۰۰ \text{ cycle min}^{-1}$ ، سرعت هوا $۰-۱۳/۳ \text{ m s}^{-1}$ ، دامنه‌های نوسان میز ۵ mm، ۷ mm، ۹ mm و ۱۱ mm. براساس نتایج آزمایش محققان سرعت حد عدس در محدوده $۸/۱-۸/۳ \text{ m s}^{-1}$ است (Tang *et al.*, 1991; Gorial and O'Callaghan, 1990). آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق نشان داد که تنظیم سرعت باد با این سرعت، در حرکت دانه‌های عدس روی سطح میز آشفتگی شدیدی به وجود می‌آورد و دانه‌ها را از تماس با سطح میز جدا می‌کند. در نتیجه برای حصول الگوی صحیح حرکت مواد روی میز مناسب

ارتفاع میز در شکل ۲ در جهت مثبت y (شیب طولی میز) و در جهت منفی x (شیب عرضی میز) و در جهت فلش‌های نشان داده شده در شکل ۲ افزایش می‌یابد. بنابراین در شکل ۲، گوشه پایین سمت راست (نقطه B) کمترین ارتفاع و گوشه بالا سمت چپ (نقطه A) بیشترین ارتفاع را دارد. مواد در گوشه پایین سمت چپ میز (نقطه O) از مخزن خارج شده و روی میز می‌ریزند و در امتداد ضلع CB از میز خارج می‌شوند. حرکت رفت و برگشتی میز در جهت محور Y است. دانه‌های سبک‌تر که به وسیله جریان هوا و حرکت نوسانی میز روی دانه‌های سنگین‌تر شناور هستند و در اثر شیب‌های طولی و عرضی میز در گوشه پایین سمت راست (نقطه B) میز جدا می‌شوند و مواد سنگین‌تر در تماس با میز باقی می‌مانند و در اثر حرکت نوسانی رفت و برگشتی به گوشه بالای سمت راست (نقطه C) منتقل شده و در آن جا جدا می‌شوند. برای اندازه‌گیری سرعت هوا در دستگاه جداکننده ثقلی از بادسنج دیجیتال با دقت $۰/۱ \text{ m s}^{-1}$ استفاده شد.

۷ mm) و فرکانس نوسان (ω) ($380 \text{ cycle min}^{-1}$ ، $400 \text{ cycle min}^{-1}$ ، $420 \text{ cycle min}^{-1}$ و $450 \text{ cycle min}^{-1}$) مقدار ثابت $\left(\frac{v}{a\omega}\right)$ به دست می‌آید (Rasekh, 2006). به‌طور مثال برای پارامترهای سرعت هوا (v) ($5/7 \text{ m s}^{-1}$)، دامنه نوسان (a) (5 mm) و فرکانس نوسان (ω) ($380 \text{ cycle min}^{-1}$)، مقدار ثابت $\left(\frac{v}{a\omega}\right)$ برابر با ۱۸۰ محاسبه شد.

نتایج و بحث

جدول تجزیه واریانس پارامترهای شیب طولی، شیب عرضی و فرکانس نوسان میز در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۱، اثر اصلی فاکتورهای فرکانس نوسان میز، شیب عرضی میز، شیب طولی میز و اثرات متقابل دوتایی شیب عرضی میز در شیب طولی میز، فرکانس نوسان میز و اثرات متقابل سه‌تایی فرکانس نوسان میز در شیب عرضی میز در شیب طولی میز در سطح احتمال ۱ درصد، در دامنه نوسان 5mm و اثرات متقابل دوتایی فرکانس نوسان میز در شیب عرضی میز در سطح احتمال ۵ درصد، در دامنه نوسان 5mm معنی‌دار شد.

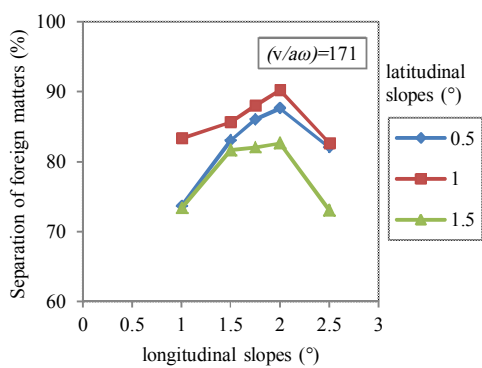
نبوده و الگوی صحیح کار میز به دست نمی‌آید. ذکر این نکته لازم است که دانه‌های عدس در این دستگاه صرفاً براساس سرعت حد حرکت نمی‌کنند. لذا سرعت هوای مورد استفاده در این تحقیق $5/7 \text{ m s}^{-1}$ انتخاب شد. به‌منظور تعیین تأثیر پارامترهای شیب طولی، شیب عرضی و فرکانس نوسان میز بر درصد جداسازی مواد خارجی از دانه‌های عدس، آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در شرایط شیب عرضی میز در سه سطح $0/5$ ، 1 و $1/5$ ، شیب طولی میز در پنج سطح 1 ، $1/5$ ، $1/75$ ، 2 و $2/5$ ، دامنه نوسان میز در دو سطح 5 mm و 7 mm، فرکانس نوسان میز در 4 سطح $380 \text{ cycle min}^{-1}$ ، $400 \text{ cycle min}^{-1}$ ، $420 \text{ cycle min}^{-1}$ و $450 \text{ cycle min}^{-1}$ انتخاب شد و هر آزمایش در ۵ تکرار انجام شد. در هر آزمایش مقداری دانه‌های عدس به‌همراه مواد خارجی همراه از محل خروج دانه‌های سبک (گوشه پایینی سمت راست میز در شکل ۲ برداشته و به‌وسیله دستگاه بذرشمار الکترونیکی ۵ نمونه ۱۰۰ تایی از آن‌ها شمارش و انتخاب شد. سپس با مشاهده تک تک دانه‌ها و میانگین‌گیری، درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه عدس، در هر تکرار و در نتیجه در هر آزمایش معلوم شد. با توجه به مقادیر پارامترهای سرعت هوا (v) ($5/7 \text{ m s}^{-1}$)، دامنه نوسان (a) (5 mm) و

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس بررسی اثر شیب طولی، شیب عرضی و فرکانس نوسان میز بر درصد جداسازی ناخالصی از دانه‌های عدس
Table 1- The results of variance analysis effect longitudinal slope, latitudinal slope and frequency of oscillation on separation percentage of impurities from lentil

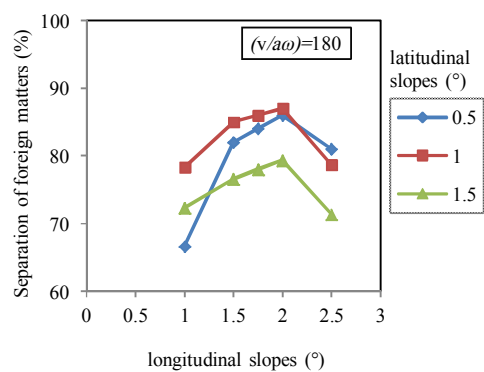
منابع تغییرات Source of variations	میانگین مربعات Mean of square	درجه آزادی Degree of freedom
شیب طولی میز Longitudinal slope	1015.025**	4
شیب عرضی میز Latitudinal slope	1421.490**	2
شیب طولی میز و شیب عرضی میز Longitudinal slope and latitudinal slope	94.026**	8
فرکانس نوسان میز Frequency of oscillation	1686.794**	3
شیب طولی میز و فرکانس نوسان میز Longitudinal slope and frequency of oscillation	24.370**	12
شیب عرضی میز و فرکانس نوسان میز Latitudinal slope and frequency of oscillation	6.111*	6
شیب طولی میز، شیب عرضی میز و فرکانس نوسان میز Longitudinal slope, latitudinal slope and frequency of oscillation	16.013**	24
خطا Error	2.151	240
کل Total	-	299

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد. * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد. CV=2.41%

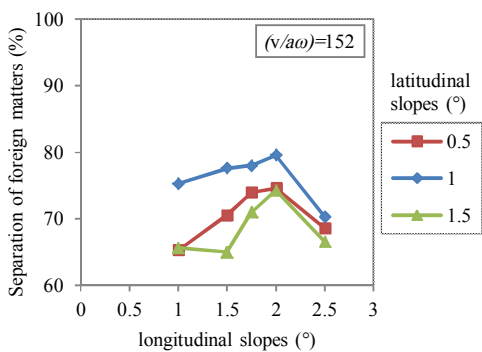
**Significant at 1% probability level, *significant at 5% probability level, CV=2.41%



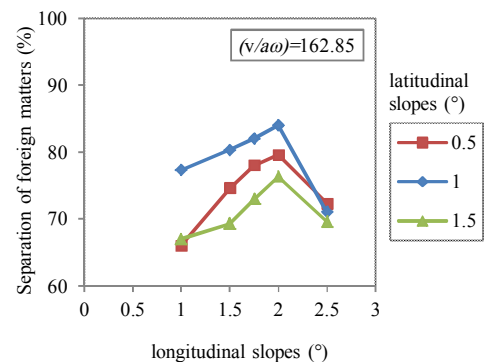
(b)



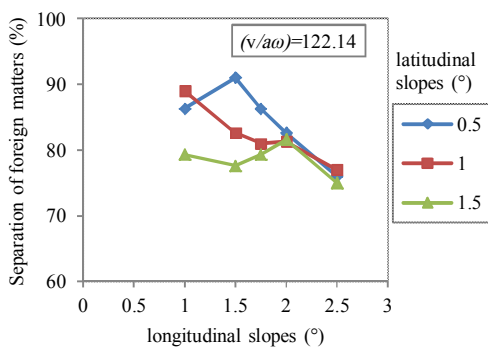
(a)



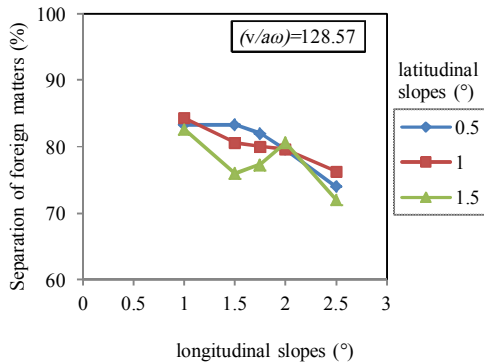
(d)



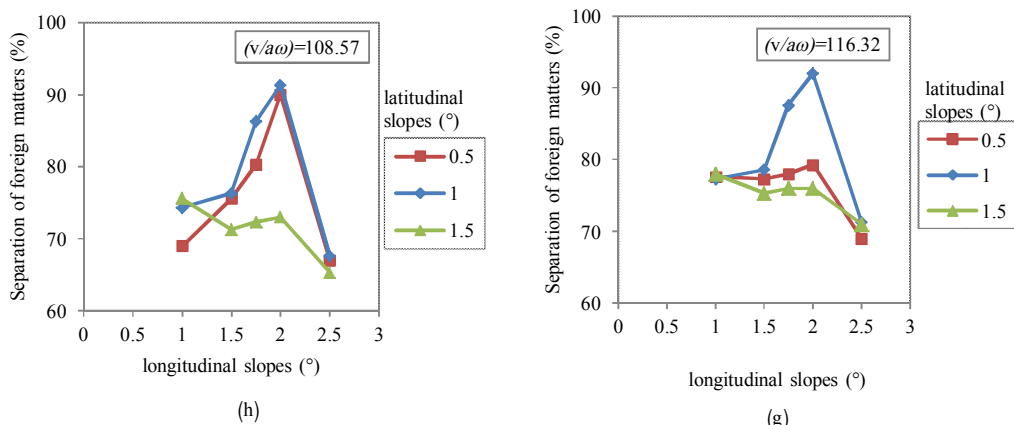
(c)



(f)



(e)



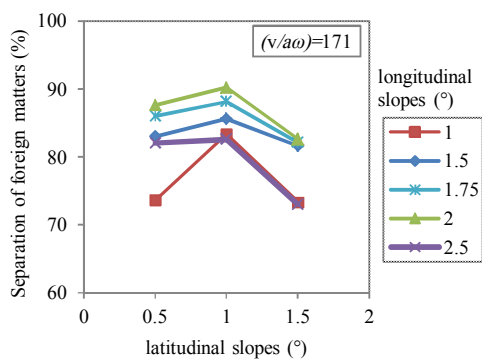
شکل ۳- (a-h): درصد جداسازی ناخالصی از عدس با تغییر شیب طولی میز و در شرایط شیب عرضی میز و ثابت $\frac{v}{aw}$
Fig. 3. (a-h): The separation percentage of impurities from lentil with the variation of longitudinal slopes under the different latitudinal slopes and dimensionless number of $\frac{v}{aw}$

افزایش شیب عرضی میز از 0.5° به 2° و کاهش شیب طولی از 5° به 3° باعث افزایش جداسازی گندم سن زده از گندم سالم شد (Rasekh, 2006).

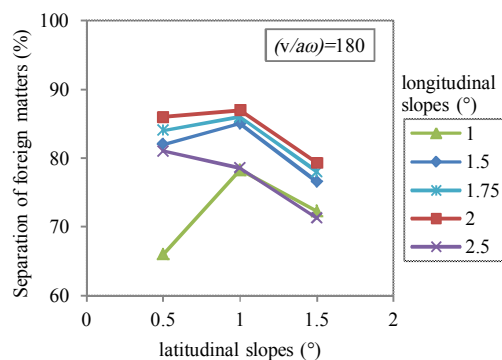
درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس نسبت به شیب عرضی میز و شرایط مختلف شیب طولی میز و پارامتر ثابت $\frac{v}{aw}$ حاصل از آنالیز ابعادی، در دامنه نوسان میز به مقدار 5 mm در شکل‌های 4a تا 4d و در دامنه نوسان میز به مقدار 7 mm در شکل‌های 4e تا 4h نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های 4a تا 4d نشان می‌دهد، که افزایش شیب عرضی میز از 0.5° به 1° سبب افزایش جداسازی و افزایش شیب عرضی میز از 1° تا 1.5° سبب کاهش درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس می‌گردد. همچنین در شکل‌های 4e تا 4h در مقادیرهای $\frac{v}{aw} = 116/32$ و $\frac{v}{aw} = 108/57$ حاصل از آنالیز ابعادی، افزایش شیب عرضی میز از 0.5° به 1° سبب افزایش جداسازی و افزایش شیب عرضی میز از 1° تا 1.5° سبب کاهش درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس می‌گردد. علت این امر این است که اولاً در بازه اول (0.5° تا 1°) نسبت به بازه دوم (1° تا 1.5°)، اولاً تأثیر منفی اثرات متقابل سه‌تایی شیب طولی، شیب عرضی و فرکانس نوسان میز کمترین مقدار بود، دوماً مواد مدت زمان بیشتری بر روی سطح میز باقی‌ماند و در نتیجه توزیع دانه‌ها روی سطح میز (ارتفاع دانه‌ها روی میز) یکنواخت‌تر است. لذا در اثر نیروی باد دمیده شده به دانه‌ها از زیر میز، عمل شناورسازی بهتر انجام می‌شود و همین امر سبب افزایش جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس می‌گردد.

نتایج آزمایش‌ها با تکیه بر آنالیز ابعادی در شکل‌های 3a تا 3h، 4a تا 4h، 5a تا 5c و 6a تا 6c نشان داده شده است.

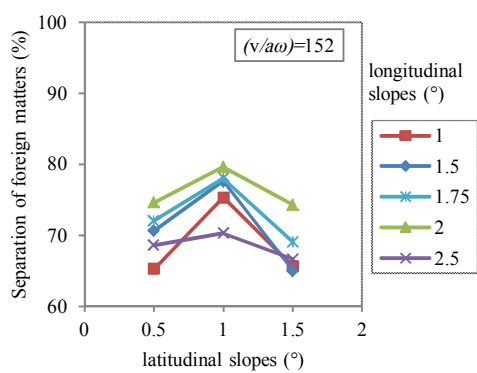
درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس را نسبت به تغییرات شیب طولی میز و شرایط مختلف شیب عرضی میز و پارامتر ثابت $\frac{v}{aw}$ حاصل از آنالیز ابعادی، در دامنه نوسان میز به مقدار 5 mm در شکل‌های 3a تا 3d و در دامنه نوسان میز به مقدار 7 mm در شکل‌های 3e تا 3h نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های 3a تا 3d نشان می‌دهد، که افزایش شیب طولی میز از 1° تا 2° سبب افزایش درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس می‌شود، این امر در همه حالات دیده می‌شود و افزایش شیب طولی میز از 2° تا 2.5° سبب کاهش درصد جداسازی می‌گردد. همچنین در شکل‌های 3e تا 3h در مقادیرهای $\frac{v}{aw} = 122/14$ و $\frac{v}{aw} = 128/57$ در شیب عرضی میز 0.5° و در مقادیرهای $\frac{v}{aw} = 116/32$ و $\frac{v}{aw} = 108/57$ حاصل از آنالیز ابعادی، شیب‌های عرضی میز 0.5° ، 1° و 1.5° در بازه شیب‌های طولی میز 0.5° تا 2° سبب افزایش درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس می‌شود. علت این امر بدین سبب است که در بازه‌های ذکر شده اولاً تأثیر منفی اثرات متقابل سه‌تایی شیب طولی، شیب عرضی و فرکانس نوسان کمترین مقدار بود، دوماً مواد مدت زمان بیشتری بر روی سطح میز باقی‌ماند و در نتیجه توزیع مواد روی سطح میز یکنواخت‌تر بوده و به همین علت شناورسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس بهتر می‌شد و در نتیجه جداسازی توسط دستگاه افزایش می‌یافت. البته شایان ذکر است که در دامنه نوسان میز 7 mm در تمام بازه‌های ذکر شده، مواد به سمت راست لبه خروجی میز منتقل نمی‌شوند و این امر سبب ایجاد خطا در شرایط آزمایش می‌گردد. نتایج آزمایش‌های راسخ نشان داد که



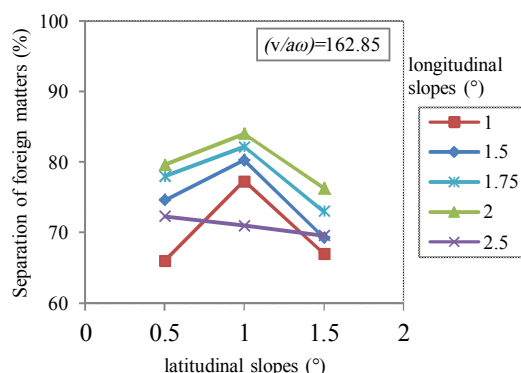
(b)



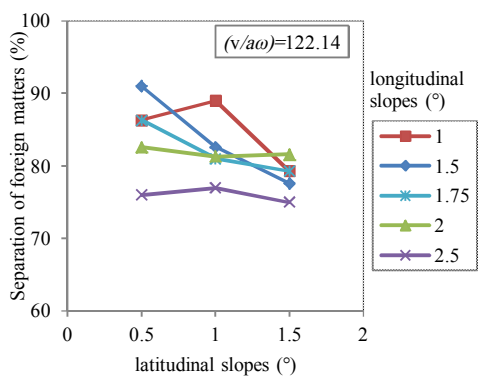
(a)



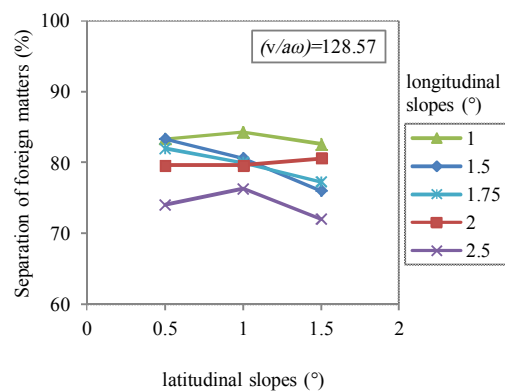
(d)



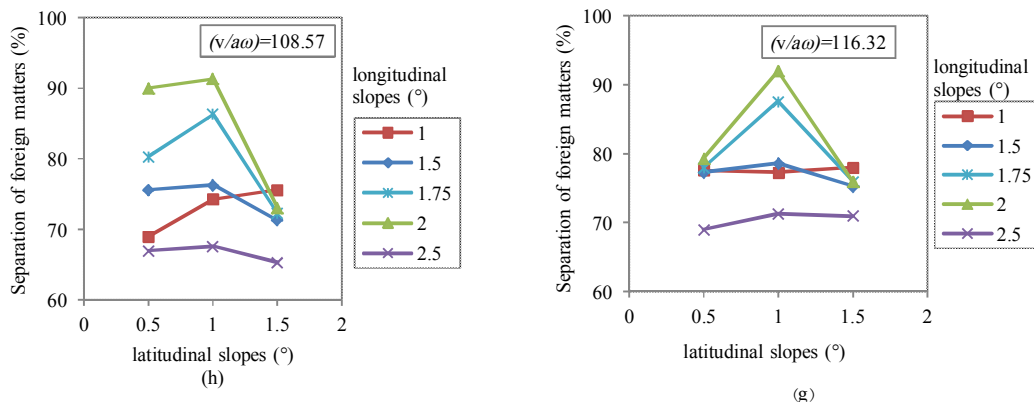
(c)



(f)



(e)



شکل ۴- (a-h): درصد جداسازی ناخالصی از عدس با تغییر شیب عرضی میز و در شرایط مختلف شیب طولی میز و ثابت $\frac{v}{aw}$
Fig. 4. (a-h): The separation percentage of impurities from lentil with the variation of latitudinal slopes under the different longitudinal slopes and dimensionless number of $\frac{v}{aw}$

نامناسب $\frac{v}{aw}$ به کاهش شدید درصد جداسازی می‌انجامد. بین مقادیر شیب طولی میز (α_1)، شیب عرضی میز (α_2)، تابع سرعت هوا بر دامنه نوسان میز در فرکانس نوسان میز ($f(\frac{v}{aw})$)، درصد جداسازی مواد خارجی همراه دانه‌های عدس در خروجی دستگاه میز ثقیلی (Q_h) و درصد مواد خارجی همراه توده عدس (Q_t)، می‌توان رابطه (۱) را بیان نمود:

$$\frac{Q_h}{Q_t} = \alpha_1 \times \alpha_2 \times f\left(\frac{v}{aw}\right) \rightarrow f\left(\frac{v}{aw}\right) = \frac{Q_h}{Q_t \times \alpha_1 \times \alpha_2} \quad (1)$$

با محاسبه f به‌ازای مقادیر مختلف شیب طولی (α_1)، شیب‌های عرضی (α_2)، $\frac{v}{aw}$ ، $\frac{Q_h}{Q_t}$ و رسم منحنی‌های مربوطه می‌توان فرم تابع f و ضریب تبیین هر حالت (R^2) را به‌ازای شیب‌های عرضی میز مختلف و در مقادیر مختلف شیب طولی میز، $\frac{v}{aw}$ ، $\frac{Q_h}{Q_t}$ تعیین نمود (شکل ۶).

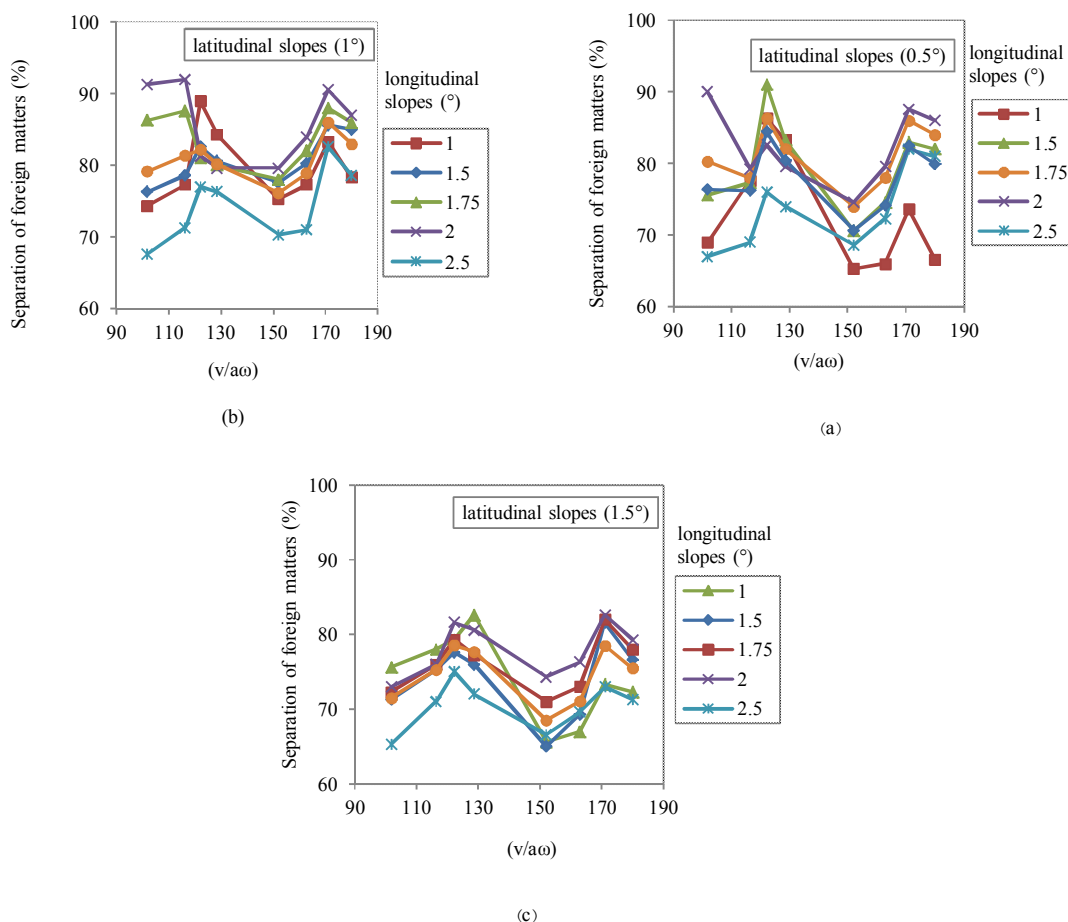
تابع مربوطه و مقادیر ضریب تبیین (R^2) در حالت‌های مختلف شیب عرضی میز در جدول ۲ نشان داده شده است. از این نتایج می‌توان برای به‌دست آوردن $\frac{Q_h}{Q_t}$ در حالت‌های مختلف α_1 ، α_2 و $\frac{v}{aw}$ استفاده کرد. نحوه استفاده از روابط جدول ۲ به این شرح است، با داشتن مقدار $\frac{v}{aw}$ و شیب‌های طولی و عرضی میز و انتخاب رابطه مربوطه از جدول ۲ مقدار $f(\frac{v}{aw})$ از محور قائم به‌دست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه (۱) مقدار Q_h معلوم می‌شود.

به‌طوری‌که در دیگر بازه‌ها، انتقال مواد به سمت راست لبه خروجی میز منتقل نمی‌شود و توزیع مواد روی سطح میز یکنواخت نمی‌شود. نتایج آزمایش‌های راسخ (۲۰۰۶) نشان داد که در مقدار ثابت $\frac{v}{aw} = 152/3$ حاصل از آنالیز ابعادی، شیب عرضی 2° و شیب طولی 3° درصد جداسازی گندم سن زده به حداکثر ۹۵/۱۴٪ رسید (Rasekh, 2006). همچنین نتایج کاشی نشان داد که در شیب طولی 4° ، شیب عرضی 2° ، فرکانس نوسان $450 \text{ cycle min}^{-1}$ ، سرعت هوای $5/7 \text{ m s}^{-1}$ و دامنه نوسان ۷mm بیشترین درصد جداسازی صورت گرفت (Kashi, 2010).

در شکل‌های 3h و 4h (حالتی که سرعت هوا برابر با $5/7 \text{ m s}^{-1}$ ، دامنه نوسان میز برابر با ۷ mm و فرکانس نوسان برابر با $450 \text{ cycle min}^{-1}$ است) درصد جداسازی نسبت به حالت دیگر کمتر می‌باشد. دلیل این امر این است که در فرکانس نوسان میز $450 \text{ cycle min}^{-1}$ ، به‌علت محتوی رطوبتی کم دانه عدس حالت آشفته‌گی شدیدی در عدس‌های روی سطح میز دستگاه به‌وجود می‌آید و در این حالت الگوی منظم حرکت مواد در روی میز تشکیل نمی‌شود. البته همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در دامنه نوسان میز ۷ mm در تمام بازه‌ها، انتقال مواد به سمت راست لبه خروجی میز انجام نمی‌شود.

شکل‌های ۳ و ۴ نشان داد که تغییرات شیب طولی میز نسبت به تغییرات شیب عرضی میز، در جدا نمودن ناخالصی از توده عدس، تأثیر بیشتری دارد.

در شکل‌های 5a تا 5c درصد جداسازی مواد خارجی از دانه‌های عدس نسبت به مقادیر $\frac{v}{aw}$ حاصل از آنالیز ابعادی و در شرایط شیب‌های طولی و عرضی میز مختلف نشان داده شده است. انتخاب



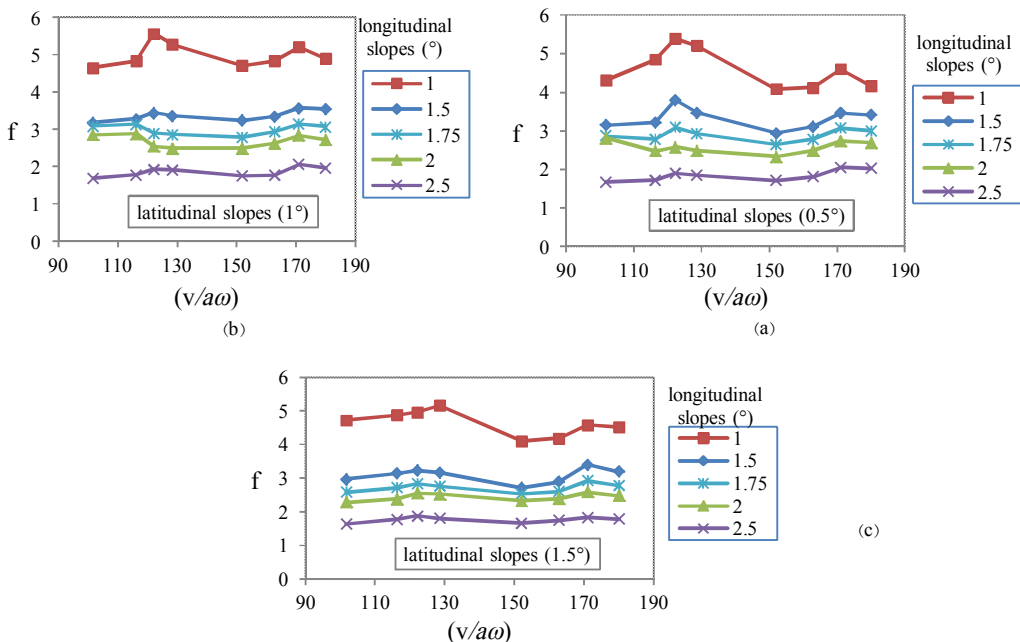
شکل ۵- (a-c): درصد جداسازی ناخالصی از عدس با تغییرات $\frac{v}{a\omega}$ و در سطوح مختلف شیب‌های طولی و عرضی میز
Fig. 5. (a-c): The separation percentage of impurities from lentil with the dimensionless number $\frac{v}{a\omega}$ under the various levels of latitudinal and longitudinal slopes

۷ mm، سرعت هوا برابر با $5/7 \text{ m s}^{-1}$ ، شیب عرضی میز $1/5^\circ$ و شیب طولی میز $2/5^\circ$ بیشترین درصد جداسازی ناخالصی همراه توده عدس برابر با $65/3\%$ می‌باشد که نسبت به ۷ حالت دیگر کمتر می‌باشد. دلیل این امر فرکانس نوسان زیاد میز است که باعث عدم دستیابی به الگوی صحیح حرکت دانه‌ها روی سطح میز است.

۴- برازش تابعی که نشان‌دهنده اثرات $\frac{v}{a\omega}$ باشد، به گونه‌ای انجام شده که حداکثر نقاط حاصل از آزمایش را پوشش دهد. در نتیجه به طور متوسط حدود $57/1\%$ نقاط آزمایش در مدل تئوری حاضر قرار دارند.

نتیجه‌گیری

- ۱- افزایش شیب عرضی میز از $0/5^\circ$ به 1° و افزایش شیب طولی میز از 1° به 2° باعث افزایش درصد جداسازی ناخالصی همراه توده عدس می‌گردد.
- ۲- در مقدار عدد بدون بعد $\frac{v}{a\omega} = 171$ حاصل از آنالیز ابعادی (فرکانس نوسان میز $400 \text{ cycle min}^{-1}$ ، دامنه نوسان میز 5 mm ، سرعت هوای $5/7 \text{ m s}^{-1}$ ، شیب عرضی میز 1° و شیب طولی 2° میز بیشترین درصد جداسازی برابر $90/2\%$ می‌باشد.
- ۳- در مقدار عدد بدون بعد $\frac{v}{a\omega} = 108/57$ حاصل از آنالیز ابعادی (فرکانس نوسان میز $450 \text{ cycle min}^{-1}$ ، دامنه نوسان میز برابر با



شکل ۶- (a-c): فرم تغییر تابع f نسبت به α_2 ، $\frac{v}{aw}$ و $\frac{Q_h}{Q_t}$ در شرایط شیب عرضی میز

Fig. 6. (a-c). The extent of f Function toward α_2 , $\frac{v}{aw}$ and $\frac{Q_h}{Q_t}$ under the various latitudinal slopes

جدول ۲- رابطه تابع f در شرایط شیب طولی و شیب عرضی میز مختلف

Table 2- The relation of function under the various latitudinal and longitudinal slopes

تابع Function	شیب عرضی (°) Latitudinal slopes (°)	شیب طولی (°) Longitudinal slopes (°)	R^2
$f = 2 \times 10^{-5} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.009 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 1.332 \left(\frac{v}{aw}\right) - 56.69$	0.5	1	0.727
$f = 1 \times 10^{-5} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 + 0.005 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.755 \left(\frac{v}{aw}\right) - 30.59$		1.5	0.467
$f = 5 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.002 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.293 \left(\frac{v}{aw}\right) - 9.794$		1.75	0.360
$f = -2 \times 10^{-7} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.078 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 7.772$		2	0.739
$f = 4 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.001 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.252 \left(\frac{v}{aw}\right) - 9.584$		2.5	0.703
$f = 1 \times 10^{-5} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.005 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 - 0.76 \left(\frac{v}{aw}\right) - 30.58$	1	1	0.416
$f = 5 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.002 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 - 0.274 \left(\frac{v}{aw}\right) - 9.120$		1.5	0.714
$f = 1 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 + 0.016 \left(\frac{v}{aw}\right) + 3.415$		1.75	0.569
$f = -8 \times 10^{-7} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.109 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 9.08$		2	0.554
$f = 5 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.001 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.265 \left(\frac{v}{aw}\right) + 10.33$		2.5	0.561
$f = 2 \times 10^{-5} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.006 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.937 \left(\frac{v}{aw}\right) - 36.7$	1.5	1	0.745
$f = 9 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.003 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.513 \left(\frac{v}{aw}\right) - 19.44$		1.5	0.402
$f = 6 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.002 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.326 \left(\frac{v}{aw}\right) - 11.98$		1.75	0.527
$f = 4 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.001 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.267 \left(\frac{v}{aw}\right) - 9.993$		2	0.476
$f = 4 \times 10^{-6} \left(\frac{v}{aw}\right)^3 - 0.001 \left(\frac{v}{aw}\right)^2 + 0.245 \left(\frac{v}{aw}\right) - 9.573$		2.5	0.603

References

1. Amaral, A., S. Dos, L. H. F. Bicca, and L. A. Wobeto. 1984. Classification of pea seeds. *Lavoura Arrozeira* 37: 187-193.
2. Amin, M. N., M. A. Hussein, and K. C. Roy. 2004. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. *Journal of Food Engineering* 83: 83-87.
3. Anonymous. 2015. Agriculture Database of FAO-STAT. Available on the <http://FAOSTAT3.FAO.ORG>.
4. Chen, F. S., and G. Z. Hua. 1991. Computer-simulated separation process and design parameters of gravity separator. International agricultural mechanization conference. Proceeding of a conference held in Beijing, China 4: 26-30.
5. Falconer, A. 2003. Gravity separation: Old technique/New methods. *Physical separation in science and engineering* 12: 31-48.
6. Feller, R., A. Mizrach, A. Zaltzman, and Z. Schmilovitch. 1981. Gravity separation over a mesh belt conveyor. *Journal of Agricultural Engineering Research* 26: 371-377.
7. Gaul, A. D., M. K. Misra, C. J. Bern, and C. R. Hurburgh. 1986. Variation of physical properties in gravity separated soybeans. *Transactions of the ASAE* 29: 1146-1149.
8. Gorial, B. Y., and J. R. O' Callaghan. 1990. Aerodynamic properties of Grain /straw materials, *Journal of Agricultural Engineering Research* 46: 275-290.
9. Hollatz, B., and G. R. Quick. 2003. Combine tailings returns, part 1: the effects of combine performance and settings on tailings. In e- Proceedings of the International Conference on Crop Harvesting and Processing. Kentucky USA. ASAE Publication Number 701P1103e. St Joseph, Mich. ASAE.
10. Johnson, R. C., D. Thavarajah, P. Thavarajah, S. Payne, J. Moore, and J-B. Ohm. 2015. Processing, cooking, and cooling affect prebiotic concentrations in lentil (*Lens culinaris Medikus*). *Journal of Food Composition and Analysis* 38: 106-111.
11. Kaur, S., N. O. I. Cogan, A. Stephens, D. Noy, M. Butsch, J.W. Forster, and M. Materne. 2014. EST-SNP discovery and dense genetic mapping in lentil (*Lens culinaris Medik.*) enable candidate gene selection for boron tolerance. *Theoretical and Applied Genetics* 127: 703-713.
12. Kashi, M. 2010. Investigate the possibility of separating wild oats (*Avena Sativa*) of wheat by gravity separator. Faculty of Agriculture. University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran. (In Farsi).
13. Murilo, D. M. Innocentini, W. S. Barizan, M. N. O. Alves, and R. Pisani Jr. 2009. Pneumatic separation of hulls and meats from cracked soybeans. *Food and Bioproducts Processing* 87 (4): 237-246.
14. Rasekh, M. 2006. Effective parameters in gravity separator apparatus of sunn pest- damaged wheat. Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi).
15. Tang, J., S. Sokhansanj, and F. Sosulski. 1991. Determination of the breakage susceptibility of lentil seeds. *American association of cereal chemists* 68: 647-650.
16. Turk M. A., and A. M. Tawaha. 2003. Weed control in cereals in Jordan. *Crop Protection* 22: 239-246.
17. Uhl, J. B., and B. J. Lamp. 1966. Pneumatic separation of grain and straw mixtures. *Transactions of the ASAE* 9 (2): 244-246.

Using of dimensional analysis to determine the parameters of gravity separator table device to minimize impurities in bulk lentils

H. Bagheri¹ - M. Rasekh^{2*} - M. H. Kianmehr³

Received: 11-06-2015

Accepted: 04-10-2015

Introduction

Lentil (*Lens culinaris medic*) is an important and highly nutritious crop belonging to the family of legumes. Lentil is cultivated worldwide but competition with weeds is a problem affecting production and can reduce yield by more than 80%. The study on the separation of impurities in bulk lentils (*Euphorbia helioscopia weed*, *Wild oat weed* and etc.) by a gravity separator has an extreme importance. Since no study has been done to date, in this study, the effects of different parameters of a gravity separator (longitudinal and latitudinal slopes, oscillation frequency and amplitude) on the separation of foreign matters in lentil seeds were evaluated. A dimensionless number ($v/a\omega$) which shows ration of air current velocity blown to lentil to the maximum velocity of table oscillation, was considered in ratio of separation.

Materials and Methods

In this research, lentil samples were taken from farms in Ardebil Province (Bileh-Savar cultivar). A gravity separator apparatus was also used for separating impurities from lentil seeds. A Laboratory Gravity Separator Type LA-K (Westrup A/S Denmark) was used to separate impurities from bulk lentils. In this machine, table settings were as follows; longitudinal slope parameters (1° , 1.5° , 1.75° , 2° and 2.5°), latitudinal slope (0.5° , 1° , and 1.5°), frequency of oscillation (380, 400, 420 and 450 cycles min^{-1}), and amplitude of oscillation (5 and 7 mm), these settings were all adjustable. Similarly, the instrument had 5 boxes whereby, through proper adjustment, the heavier material was transferred toward the right side of the table and lighter material moved toward the left side. Through proper adjustment of the main parameters of the instrument, the impurities were separated from bulk lentils. Then using an electronic seed counter, five groups of seed which each group containing 100 seeds were counted and selected.

Results and Discussion

The results of variance analysis of the factorial design with three factors of table settings; (longitudinal slope at 5 levels, latitudinal slope at 3 levels, and frequency of oscillation of the table at 4 levels) are demonstrated in Table 1. It showed the main effect of table settings. Oscillation of frequency, latitudinal slope, and longitudinal slope, the mutual binary effect of latitudinal and longitudinal slope, the mutual binary effect of the latitudinal slope and the frequency of oscillation, the mutual binary effect of the longitudinal slope and the frequency of oscillation and the mutual triple effect of oscillation frequency, longitudinal slope, and latitudinal slope, were significant at the probability level of 1% and the mutual binary effect of the latitudinal slope and frequency of oscillation significant at the probability level of 5%.

The results showed that increase of latitudinal slope of table and increase of longitudinal slope from 1 to 2 degrees will increase the separation percentage of impurities from lentil seeds. Moreover, the separation percentage of impurities from lentil seeds to longitudinal slope, under the various latitudinal slope and dimensionless number of ($v/a\omega$) and amplitude of oscillation of 5 mm and 7 mm, were investigated. Results showed that in all conditions with increasing of the longitudinal slope from 2° - 2.5° , separation percentage of impurities from bulk lentils will decrease. This was due to the fact that under the stated conditions, distribution of seeds on the surface of the table was more homogenous. Note that at the amplitude of oscillation of 7 mm, transference of materials towards the right side of the table output edge was halted and the surface of the table

1- Ph.D. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tehran, College of Abouraihan, Pakdasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: dr.mara1349@gmail.com)

was not fully covered by the fed materials, and separation decreased. The results of the experiment showed that the maximum separation of impurities from bulk lentils was 90.2 percent ($\frac{v}{a\omega} = 171$).

Conclusions

1- Increased latitudinal slope of the table from 0.5° to 1° and longitudinal slope of table from 1° to 2° were resulted in increased separation percentage of impurities from bulk lentils.

2- The results demonstrated that at settings of longitudinal slope of 2° , latitudinal slope of 1° , and frequency of oscillation of $400 \text{ cycles min}^{-1}$, air velocity of 5.7 m s^{-1} and amplitude of oscillation of 5 mm ($\frac{v}{a\omega} = 171$), the maximum separation will be 90.2%. In this case, the output lentil seeds contained the least amount of impurities here.

Keywords: Dimensional analysis, Dimensionless number, Gravity separation, Impurities, Lentil

بهینه‌سازی عملکرد رآکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی جهت تولید بیودیزل به کمک سطح پاسخ (مطالعه موردی: روغن آفتابگردان)

حسین جوادی کیا^{۱*} - یوسف نصرتی^۲ - مصطفی مصطفایی^۳ - لیلا ندرلو^۴ - میثم طباطبایی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

چکیده

توسعه و به کارگیری فن‌آوری‌های شدت بخشی فرآیند تولید بیودیزل در واکنش ترانس استریفیکاسیون جهت بهبود فرآیند همزنی و انتقال جرم و حرارت بین دو فاز مایع واکنش، منجر به ابداع رآکتورهای جدید شد که این امر سبب افزایش بازده واکنش و کاهش زمان تولید سوخت بیودیزل شده است. بنابراین، در این تحقیق عملکرد رآکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی ساخته شده که جزء رآکتورهای نوین و قابل توسعه در ابعاد صنعتی می‌باشد، بررسی شد تا تنظیمات دقیق رآکتور برای تولید بیودیزل بهینه شود. روغن مورد استفاده در این آزمایش، روغن آفتابگردان بود و نسبت مولی متانول به روغن ۶ به ۱ در نظر گرفته شد. همچنین، از هیدروکسید سدیم به عنوان کاتالیزور قلیایی با درصد وزنی ۰/۱ نسبت به روغن استفاده گردید. موارد مورد مطالعه دور رآکتور، دبی سیال ورودی به رآکتور و مدت زمان چرخش سیال در رآکتور بود. نمونه‌های حاصل توسط دستگاه کروماتوگراف گازی تجزیه و تحلیل شد و درصد متیل استر تولید شده استخراج شد. سپس به کمک روش سطح پاسخ با استفاده از نرم افزار Design Expert عملکرد رآکتور مدل شد و در فرآیند بهینه‌سازی بهترین شرایط تولید بیودیزل بررسی گردید. بهترین عملکرد در تولید بیودیزل: دبی سیال ورودی ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه، زمان گردش ۱/۰۲ دقیقه و سرعت دورانی رآکتور ۸۴۴۷ دور بر دقیقه با عملکرد ۶/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوژول حاصل شد که بهترین خلوص بیودیزل تولیدی بالغ بر ۸۸ درصد متیل استر بود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، بیودیزل، ترانس استریفیکاسیون، روش سطح پاسخ

مقدمه

بیودیزل مانع اصلی تولید تجاری آن می‌باشد که استفاده از روغن‌های پسماند، انطباق با فرآیند پیوسته ترانس استریفیکاسیون و بازیافت گلیسرین^۶ با کیفیت بالا از بیودیزل از مواردی هستند که هزینه تمام شده بیودیزل را کمتر می‌کنند (Fangrui and Milford, 1999). البته کیفیت بیودیزل تولیدی از روغن‌های پسماند برابر کیفیت بیودیزل تولید شده از روغن گیاهی می‌باشد (Mangesh and Ajay, 2006).

از بین روش‌های تولید بیودیزل، روش ترانس استریفیکاسیون معمول‌ترین روش تولید مونو آلکیل استرهای روغن گیاهی و چربی‌های حیوانی می‌باشد. البته روش مذکور با هدف کاهش ویسکوزیته^۷ روغن در طی واکنش بین تری‌گلیسرید و الکل در حضور کاتالیزور^۸ و یا بدون آن است. در تحقیق حاضر از روش ترانس استریفیکاسیون^۹ با کاتالیزور قلیایی^{۱۰} که معمول‌ترین و تجاری‌ترین روش تولید صنعتی بیودیزل می‌باشد، استفاده گردیده است. تولید

سوخت‌های گیاهی یکی از عمده‌ترین منابع تولید سوخت‌های تجدیدپذیر یا جایگزین سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شوند. احتراق سوخت‌های با پایه گیاهی در واقع استفاده غیرمستقیم از انرژی خورشید می‌باشد. سوخت‌های گیاهی به‌طور عمده آلودگی‌های کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارند و به راحتی می‌توانند از بقایای مواد گیاهی تولید گردند. زباله‌ها و ته‌مانده‌های مربوط به غذاها و مواد دور ریختنی صنایع غذایی و همچنین فاضلاب می‌تواند منبع خوبی برای تولید سوخت‌های گیاهی باشند (Demirbas, 2009). هزینه تولید

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

*- نویسنده مسئول: (Email: pjavadikia@gmail.com)

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۵- استادیار، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران

DOI: 10.22067/jam.v7i1.51920

6- Glycerol

7- Viscosity

8- Catalyst

9- Transesterification

10- Alkaline catalyst

هیدرودینامیکی در مقایسه با رآکتورهای حفرةزایی صوتی بیشتر می باشد که به نوبه خود عملکرد تولید آن نیز بیشتر شده است. بنابر این اثر شدت بخشی مدل هیدرودینامیکی بیشتر است (*et Mandar*, 2008). در مقیاس تولید صنعتی نیز روش حفرةزایی هیدرودینامیکی راحت تر حاصل می شود (Jianbing, 2006). محققانی تأثیر تغییرات شکل و سطح را بر روی فرآیند حفرةزایی، به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده اند و یافته های آن ها نشان داد که تغییرات فشار تابعی از تغییر ساختار و ابعاد ایجادکننده است (*Ozonek and Lenik*, 2011). برخی از پژوهشگران با تکنیک حفرةزایی هیدرودینامیکی که در آن از صفحه های سوراخ دار استفاده کرده اند، توانستند بیودیزلی با زمان ماند کمتر و کیفیت مناسب تولید نمایند (*Amit et al.*, 2010). در این تحقیق تنظیمات رآکتور حفرةزای هیدرودینامیکی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت تا کیفیت سوخت بیودیزل تولیدی اندازه گیری شده و عملکرد دستگاه با یافتن شرایط بهینه ارتقاء یابد. برای این منظور از نرم افزار Design Expert روش سطح پاسخ^۲ استفاده شد.

مواد و روش ها

در این تحقیق از روش ترانس استریفیکاسیون استفاده شد. البته روش مذکور با هدف کاهش ویسکوزیته روغن در طی واکنش بین تری گلیسیرید و الکل در حضور کاتالیزور و یا بدون آن است (Demirbas, 2009). مواد مورد نیاز در تولید بیودیزل به روش ترانس استریفیکاسیون عبارتند از: روغن گیاهی، الکل، کاتالیزور.

روغن مورد استفاده در فرآیند تولید بیودیزل، روغن گیاهی آفتاب گردان بوده که با توجه به روش تیتراسیون به مقدار ۰/۶ لیتر در فرآیند تولید هر آزمون استفاده شد. الکل مورد استفاده متانول ایرانی با درجه خلوص ۹۹/۸ درصد ساخت مجتمع صنایع شیمیایی و دارویی کیان کاوه آزما بود که طبق معادله تیتراسیون، با توجه به مراجع تحقیقاتی موجود بهترین نسبت به صورت نسبت مولی ۶ به ۱ استفاده شد (*Gharat and Rathod*, 2013; *Amit et al.*, 2014; *Liu and Wang*, 2013) که نسبت مولی الکل به روغن، در کلیه واکنش های تولیدی در این تحقیق بوده است. کاتالیزور به کار رفته در فرآیند تولید پیوسته، سدیم هیدروکسید با خلوص بالا (۹۹٪) ساخت شرکت صنایع شیمیایی دکتر مجللی بوده که از نوع کاتالیزورهای قلیایی است. به مقدار یک درصد وزنی از مقدار روغن به کار برده شده در واکنش استفاده شده است (*Amit et al.*, 2014). در تحقیق حاضر از روغن تازه آفتاب گردان که به تصفیه مواد اضافی و حذف آب احتمالی در آن نیازی نداشت استفاده شد. به منظور افزایش انحلال و واکنش پذیری کاتالیزور، محلول متوکسید (مخلوط کاتالیزور و متانول)، درون یک

سوخت بیودیزل به طور گسترده از اوایل دهه ۱۹۹۰ شروع شد و تا امروز تولید آن به شدت در حال افزایش است. با این که سوخت بیودیزل یک محصول از منابع تجدیدپذیر است، اما بعضی مسائل و مشکلاتی برای تولید با روش ترانس استریفیکاسیون وجود دارد، مانند زمان تولید طولانی، هزینه تولید بالاتر، بازده تولید کمتر و غیره که لازم است در طراحی و ساخت سیستم های تولید بیودیزل به آن ها پرداخته شود تا تولید سوخت بیودیزل بهینه و به صرفه تر گردد. در سال های اخیر مطالعات در رابطه با تولید بیودیزل به سمت توسعه فناوری شدت بخشی فرآیند متمرکز شده است تا بتواند برخی از مسائل مذکور را برطرف سازد. این فن آوری ها شامل رآکتورهای جدید و یا ترکیبی از رآکتور و جداکننده ها هستند که بعضی از خصوصیات فن آوری شدت بخشی واکنش ها، همچون همزنی، انتقال حرارت و انتقال جرم بین دوفاز مایع در فرآیند تولید بیودیزل را دارا می باشند (*Qiu et al.*, 2010). بعضی از توسعه های اخیر استفاده از توان فراصوت، حفرةزایی هیدرودینامیکی^۱ و فرآیند متانول فوق بحرانی می باشد. در میان این نوآوری های فناوری بیودیزل، حفرةزایی هیدرودینامیکی یک روش با پتانسیل بالا برای تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی است که توانایی توسعه راحت تری را دارا می باشد (*Amit et al.*, 2010). برای ایجاد حفرةزایی هیدرودینامیکی به طور ساده در مسیر جریان چرخه ای که ایجاد می شود، از انواع روزنه ها با صفحه های تک سوراخه یا چندسوراخه استفاده می شود که با عبور جریان از آن ها، افزایش سرعت خود باعث افت فشار می شود. شدت حفرةزایی رابطه مستقیمی با ابعاد منفذ صفحه دارد. از جهتی برای افزایش سطح مقطع خط لوله اصلی که باعث کاهش نرخ جریان و به تبع آن افزایش فشار و نوسانات آن خواهد شد، ابعاد دیگر ایجاد حفرةزایی همچون افزایش و افت جریان به طور جدی مورد توجه قرار می گیرد (*Amit et al.*, 2014). استفاده از قدرت مافوق صوت جهت حفرةزایی و حفرةزایی هیدرولیکی هر دو بازده انرژی خوبی داشته و باعث کوتاه تر شدن زمان واکنش با مصرف انرژی کمتر نسبت به روش مکانیکی معمول می شوند (Jianbing, 2006). در رابطه با مقایسه کاربرد رآکتورهای مجهز به تجهیزات حفرةزایی هیدرودینامیکی و یا حفرةزایی فراصوتی، با در نظر گرفتن تعریف عملکرد حفرةزایی که به عنوان پارامتر اصلی می باشد، نسبت به انرژی صرف شده برای سیستم تولید بیودیزل می توان عملکرد تولید را مشخص نمود. با توجه به هزینه ترکیبات و انرژی صرف شده، محاسبه هزینه واقعی انجام عملیات تولید بیودیزل، بسیار مهم است. انرژی صرف شده برای فرآیند حفرةزایی بستگی به تجهیزات به کار برده شده دارد (*Mandar et al.*, 2008). در تحقیقات انجام شده توسط محققان مشاهده شد که بازده انرژی رآکتورهای حفرةزایی

می‌توان میزان کیفیت سوخت و قابلیت‌های آن را بیان نمود. از جمله استانداردهایی که برای بیودیزل تعریف شده است شامل EN14214-08، ASTM D6751-09 و DIN V51606 می‌شود. چنانچه بیودیزل تولیدی با این استانداردها همخوانی داشته باشد به‌عنوان سوخت بیودیزل یا B100 قابل استفاده است (Mostafaei, 2012). راکتور مورد استفاده جهت تولید پیوسته بیودیزل به‌کمک حفره‌زایی هیدرودینامیکی مرکب، شامل قسمت‌های مختلفی است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبه عملکرد حفره‌زایی هیدرودینامیکی

جهت محاسبه میزان عملکرد حفره‌زایی انجام گرفته، مطابق رابطه (۱) نسبت جرم بیودیزل تولید شده به حجم روغن استفاده شده را بر انرژی مصرفی به‌ازای هر لیتر تقسیم می‌کنیم (Vichare et al., 2000).

$$Y_C = \frac{\text{Biodiesel (mg.litr}^{-1})}{\text{power} \times t \text{ (J.litr}^{-1})} \quad (1)$$

در این تحقیق میزان توان مصرفی سیستم که الکتریکی است طبق رابطه (۲) با اندازه‌گیری ولتاژ و آمپر مصرفی هر آزمایش به‌طور جداگانه، محاسبه شد. سپس این مقدار که برحسب وات می‌باشد برای زمان واکنش هر آزمایش ضرب شده و در رابطه (۱) قرار گرفته است.

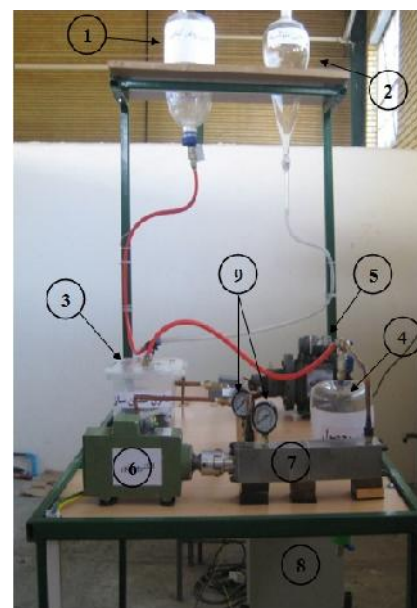
$$P(W) = V(V) \times I(A) \quad (2)$$

روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای توسعه، پیشبرد و بهینه‌سازی فرآیندهایی به‌کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف، بهینه کردن پاسخ مزبور است. به‌عبارت دیگر این روش به‌کمک نرم‌افزار Design Expert با روابط آماری و ریاضی پیشرفته، پارامتر مشخصی را براساس ورودی‌های مورد نظر مدل می‌کند به‌طوری‌که تعداد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی در کمترین حد ممکن باشد. لذا در مواردی که امکان داده‌برداری بسیار مشکل بوده و یا هزینه‌بر می‌باشد به‌خوبی کاربرد دارد (Khuri and Mukhopadhyay, 2010).

برای بهینه‌سازی عملکرد دستگاه سه تنظیم مهم راکتور در نظر گرفته شد که عبارتند از: دبی ورودی به راکتور، دور راکتور و مدت زمان چرخش سیال در راکتور. هر تنظیم در سه سطح در نظر گرفته شد. در صورتی‌که از آزمایش فاکتوریل برای تجزیه و تحلیل استفاده شود، بدون هیچ تکرار ۲۷ وضعیت وجود خواهد داشت که با توجه به هزینه‌های تجزیه و تحلیل هر نمونه توسط دستگاه GC عملاً امکان‌پذیر نبود. لذا از روش سطح پاسخ و به‌کمک نرم‌افزار

ظرف جداگانه با استفاده از یک همزن مغناطیسی مدل MR3001 ساخت شرکت لیدهولف آلمان حل شد و سپس به درون مخزن اولیه متانول انتقال داده شد (به‌بیان دیگر کاتالیزور و متانول قبل از واکنش ترانس استریفیکاسیون تهیه شد). در واقع در این حالت، تعداد مولکول‌های کاتالیزور بیشتری به‌صورت یکنواخت و همگن در دسترس مولکول‌های متانول و روغن بوده و واکنش با سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت. جهت اندازه‌گیری میزان تأثیر روش حفره‌زایی هیدرودینامیکی با راکتور ابداعی تولید بیودیزل، در این تحقیق در پایان هر آزمایش، ۱۵ میلی‌لیتر از نمونه‌های تولیدی را برداشته و در ظرف مخصوص ۱۵ میلی‌لیتر محصولات شیمیایی، نمونه‌ها به داخل یخچال با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد منتقل شد تا واکنش در همان مرحله زمانی متوقف شود و تأثیر پارامترهای دستگاه ساخته شده و میزان شدت بخشی واکنش تعیین شود. البته این شرایط تا زمان تجزیه با دستگاه کروماتوگراف گازی (GC) حفظ شده است (Mostafaei, 2012).



شکل ۱- راکتور حفره‌زایی هیدرودینامیکی مورد استفاده (۱- مخزن روغن، ۲- مخزن متوکسید، ۳- مخزن همگن‌ساز، ۴- مخزن بیودیزل تولیدی، ۵- پمپ با جابه‌جایی مثبت، ۶- الکتروموتور، ۷- راکتور حفره‌زایی هیدرودینامیکی، ۸- اینورتر و ۹- فشارسنج)

Fig.1. Used hydrodynamic cavitations reactor (1- Oil tank, 2-Metoxed tank, 3- Homogenizer tank, 4- Biodiesel tank, 5- Positive displacement pump, 6- Electro motor, 7- Hydrodinamic cavitation reactor, 8- Inverter and 9- Pressure indicator)

سوخت بیودیزل تولید شده دارای خواص و ویژگی‌هایی می‌باشد که با مطابقت دادن آن خواص با استانداردها و قراردادهای بین‌المللی

متغیرها و محدوده آن‌ها، نرم‌افزار تعداد آزمایش‌های لازم با متغیرهای Expert_Design استفاده شد. به عبارت دیگر بعد از تعریف تعداد مربوطه را تعیین نموده است. در جدول ۲ محدوده پارامترهای ورودی و کدهای هر کدام در نرم‌افزار Design Expert نشان داده شده است.

جدول ۱- محدوده پارامترهای مستقل ورودی مدل و کدهای هر کدام در روش سطح پاسخ

Table 1- Input independent variables range and their encoded values in response surface method

متغیر ورودی Input variable	سطح تغییرات Variables ranges			برچسب Lable
	1 ()	0	-1 (-)	
دور (دور بر دقیقه) Reactor speed (rpm)	16000	12000	8000	A
دبی (لیتر بر دقیقه) Flow (lit min ⁻¹)	3.09	1.96	0.83	B
زمان (دقیقه) Time (min)	5	3	1	C

جدول ۲- نتایج مدل عملکرد رآکتور به روش سطح پاسخ

Table 2- The results of reactor performance model by response surface method

عامل Factor	مجموع مربعات خطا Sum square error	میانگین مربعات خطا Mean square error	درجه آزادی Freedom degree	ضریب معناداری p significant factor
مدل Model	47.54	5.28	9	0.0001>
دور رآکتور A-(rpm) Reactor rotational speed	0.46	0.46	1	0.0021
دبی ورودی رآکتور B – (lit min ⁻¹) Reactor inlet flow	0.13	0.13	1	0.0425
زمان کار رآکتور C –(min) Reactor time	39.34	39.34	1	0.0001>
AB	0.02	0.02	1	0.3596
AC	0.27	0.27	1	0.0083
BC	0.073	0.073	1	0.1006
A ²	0.15	0.15	1	0.0312
B ²	0.091	0.091	1	0.0726
C ²	6.76	6.76	1	0.0001>
باقی‌مانده (خطا) Residual (Error)	0.14	0.02	7	

جدول ۳- ضرایب تعیین مدل عملکرد رآکتور به روش سطح پاسخ

Table 3- The determination coefficient of performance model of reactor by RSM

R ²	Adjust R ²	R ² پیش‌بینی Predicted R ²	C.V. %
0.9970	0.9932	0.9814	5.29

نتایج و بحث

خروجی مدل در نظر گرفته شد. با استفاده از روابط (۱) و (۲)، بیشترین عملکرد حفرة‌زایی هیدرودینامیکی رآکتور برابر با ۶/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوژول و کمترین عملکرد برابر با ۱/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوژول شد. نتایج مدل مطابق جدول ۲ و ۳ می‌باشد. معادله حاصل بین ورودی‌ها و عملکرد رآکتور به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

در تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از رآکتور و دستگاه GC^۱ توسط نرم‌افزار Design Expert سه پارامتر دور، دبی ورودی و زمان کار رآکتور به عنوان متغیرهای ورودی مدل و عملکرد رآکتور به عنوان

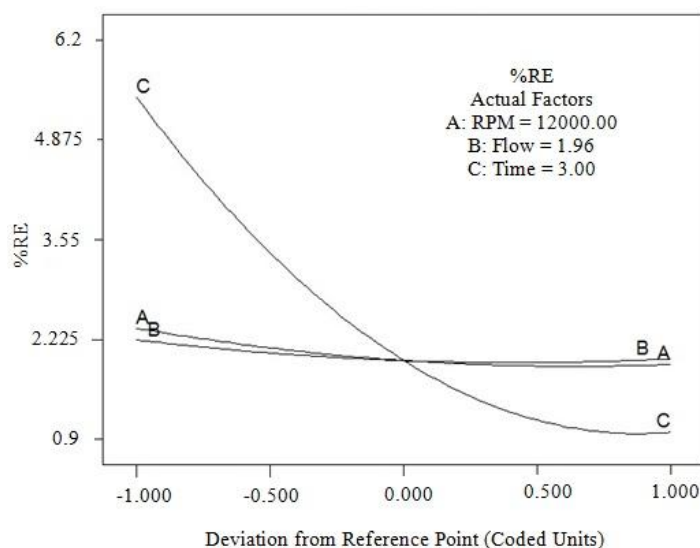
1- Gas Chromatography

نمودارهای سه‌بعدی مدل عملکرد رآکتور به کمک سطح پاسخ در مقابل سه ورودی دور، دبی و زمان کار رآکتور در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل مذکور، عملکرد رآکتور به‌ازای کاهش سرعت دورانی و کاهش نرخ جریان، سیر صعودی داشته و بیشترین مقدار آن در دور ۸۴۴۷ دور بر دقیقه و نرخ جریان ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه حاصل شد که برابر ۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوژول می‌باشد. در ضمن عملکرد رآکتور به‌ازای کاهش زمان و سرعت دورانی سیر صعودی داشته ولی همانند اثر نرخ جریان بر روی عملکرد رآکتور، با گذشت زمان بیشتر موجب کاهش آن می‌گردد که به‌دلیل بازگشت‌پذیر بودن واکنش مذکور زمان کار بیشتر واکنش باعث کاهش عملکرد رآکتور می‌شود. همچنین عملکرد رآکتور به‌ازای افزایش زمان و کاهش نرخ جریان، سیر صعودی داشته و با گذشت زمان بیشتر عملکرد رآکتور کاهش یافته است. مناسب‌ترین زمان و نرخ جریان برای حصول عملکرد بیشینه در کمترین مقادیر نرخ جریان سیال و زمان واکنش ۱ دقیقه می‌باشد. با کاهش نرخ جریان عبوری از رآکتور عملکرد رآکتور بیشتر می‌شود (Visscher et al., 2013) که این نتیجه از شکل‌های مذکور به روشنی پیدا می‌باشد.

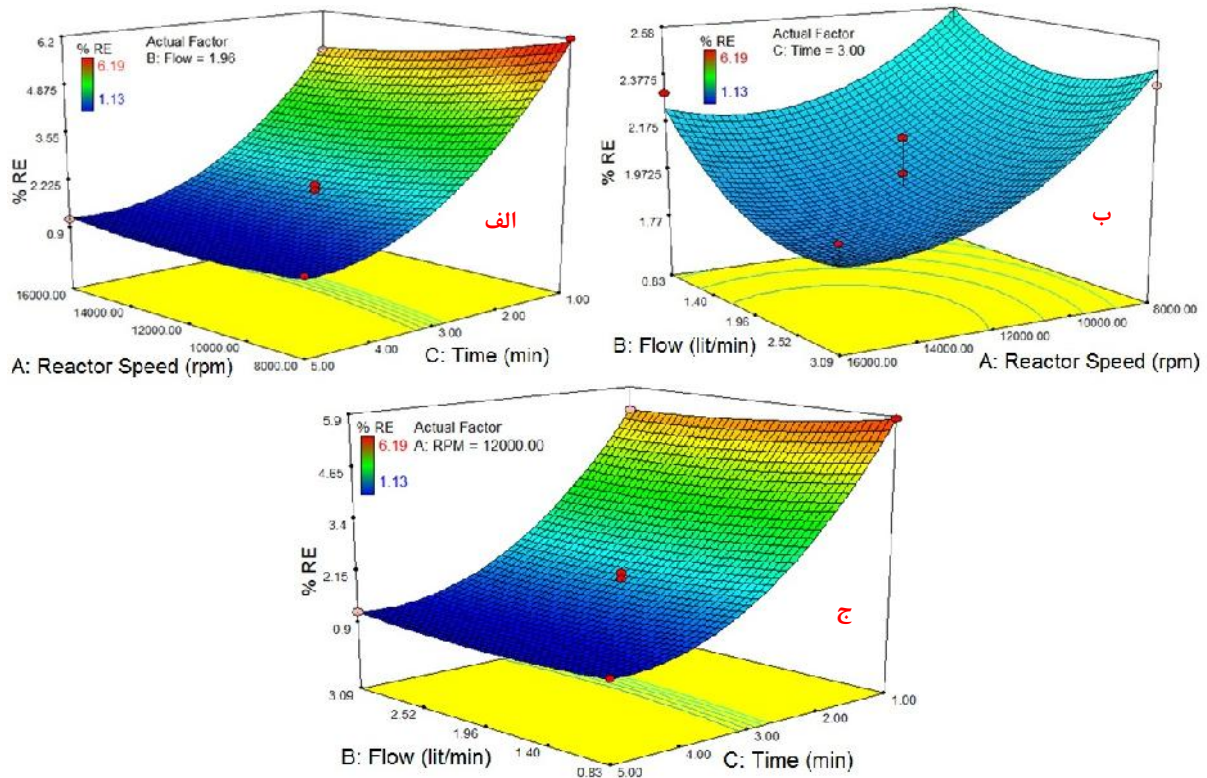
$$\begin{aligned} \text{عملکرد رآکتور} &= ۱۲/۳۴۲۰۶ - (\text{دور} \times ۴ - ۴/۰۷ E) - (\text{دبی} \times ۰/۵۵) - (\text{زمان} \times ۳/۵۱) - (\text{دور} \times \text{دبی} \times ۵ E) \\ &+ (۱/۵۴۸) + (\text{دور} \times \text{زمان} \times ۵ - ۳/۲۵ E) + (\text{دبی} \times \text{زمان} \times ۰/۵۹) \\ &+ (\text{دور} \times \text{دور} \times ۸ - ۱/۱۶۸۷ E) + (\text{دبی} \times \text{دبی} \times ۰/۱۱۵) \\ &+ (\text{زمان} \times \text{زمان} \times ۰/۱۳۱۶) \end{aligned} \quad (۳)$$

نمودار برهم‌کنش بین ورودی‌های مدل نسبت به خروجی مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش دور و دبی ورودی رآکتور عملکرد آن اندکی کاهش می‌یابد. شاید علت این امر به‌دلیل افزایش توان مصرفی الکتروموتور و ثابت بودن تولید متیل استر باشد. اما نتایج ارزیابی سه زمان مختلف کار رآکتور ۱، ۳ و ۵ دقیقه نشان می‌دهد که با افزایش زمان، عملکرد رآکتور سیر نزولی دارد. علت آن را شاید بتوان به این صورت توجیه نمود که گلیسرین و متانول هر دو قطبی بوده و در همدیگر حل می‌شوند، لذا با افزایش زمان و تولید بیشتر گلیسرین، مقدار متانول بیشتری در آن حل و از دسترس واکنش اصلی خارج می‌شود. لذا واکنش به سمت تولید متانول برگشته و از بازده واکنش اصلی کاسته می‌شود. محققان دیگری (Capocelli et al., 2014; Mostafaei, 2012; Jianbing, 2006) نتایج مشابهی را در رابطه با افزایش زمان واکنش و کاهش عملکرد رآکتور به‌دست آورده‌اند.



شکل ۲- برهم‌کنش ورودی‌های مدل نسبت به یکدیگر (محور افقی: پارامترهای ورودی کد شده، محور عمودی: درصد عملکرد رآکتور)

Fig.2. Interaction of model inputs relative to each other (Horizontal axis: the codes of input parameters, Vertical axis: Reactor efficiency)



شکل ۳- نتایج مدل سطح پاسخ برای عملکرد رآکتور (الف: دور و دبی، ب: دور و زمان، ج: دبی و زمان)

Fig.3. Results of response surface model for the reactor performance (A: reactor speed and flow, B: reactor speed and time, C: flow and time)

بیودیزل تولیدی را نشان می‌دهد. میزان گرانیوی سینماتیکی روغن آفتاب گردان با روش ترانس استریفیکاسیون به $4/2 \text{ (mm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ کاهش یافته است که نشان‌دهنده امکان استفاده مستقیم از این سوخت در موتور دیزل می‌باشد. این امر باعث افزایش عملکرد موتور می‌شود و سازگاری سوخت بیودیزل تولیدی را با موتورهای دیزل نشان می‌دهد.

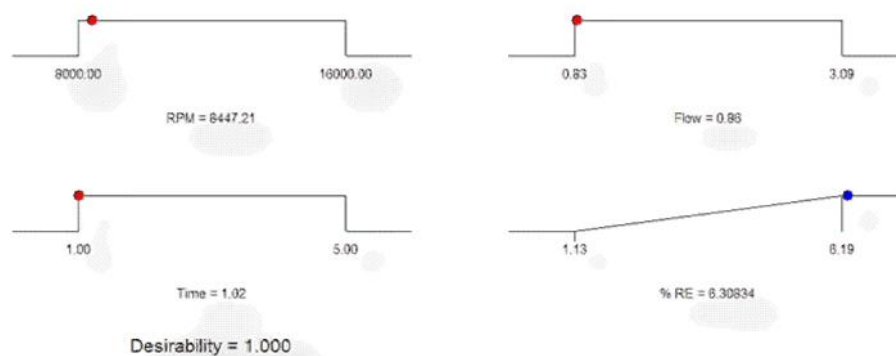
بعد از اندازه‌گیری درصد متیل استر در نمونه‌های رآکتور بهترین نتیجه به دست آمده مطابق جدول ۴ می‌باشد. محدوده مجاز هریک از پارامترها مطابق استانداردهای ذکر شده نیز در جدول مشخص می‌باشد. با توجه به مقادیر جدول ۴ نقطه اشتعال بالای این سوخت که تفاوت معنی‌داری با نقطه اشتعال سوخت دیزل (64°C) دارد، میزان ایمنی و اطمینان کافی در نگه‌داری و حمل و نقل سوخت

جدول ۴- خواص بیودیزل تولید شده به همراه استانداردهای مربوطه

Table 4- Properties of produced biodiesel along with the relevant standards

واحد Unit	مقدار اندازه‌گیری شده برای بیودیزل The measured value for biodiesel	حدود مجاز Limits	روش استاندارد آزمون Standard test method	خصوصیات Properties
$^\circ\text{C}$	172	>101	ISO2719 ISO3679	نقطه اشتعال Flash point
$\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$	4.2	5-3.5	ISO3104	گرانیوی سینماتیکی در دمای 40°C Kinematic viscosity at 40°C
kg m^{-3}	861	860-900	ISO3675 ISO12185	چگالی در دمای 15°C Density at 15°C
درصد جرمی	88.53	96.5	EN14103	درصد متیل استر Methyl ester percent

مورد نظر در محدوده تعریف شده قابل تغییر است. خروجی مدل یعنی عملکرد راکتور با شرط حداکثر تنظیم شده است و در نتیجه نرم‌افزار این شرط را به صورت خط مورب با شیب مثبت نشان می‌دهد. به طور کلی هدف این بهینه‌سازی، به دست آوردن شرایط مربوط به پارامترهای ورودی است که بیشترین عملکرد را دربر داشته باشد که نتیجه با نقاطی بر روی نمودارها نشان داده شده است. بیشترین عملکرد راکتور در سرعت ۸۴۴۷ دور بر دقیقه و دبی ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه و زمان ۱/۰۲ دقیقه حاصل شد که عملکرد برابر ۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوژول بود. برای ارزیابی نتیجه بهینه‌سازی در شرایط آزمایشگاهی، تنظیمات پیشنهادی نرم‌افزار تا حد امکان پیاده‌سازی شد به این صورت که با توجه به گام کنترل کننده دور راکتور، این پارامتر در سرعت ۸۴۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و عملکرد راکتور در دبی ۰/۸۳ لیتر بر دقیقه و زمان ۱ دقیقه، برابر با ۶/۱۹ میلی‌گرم بیودیزل بر کیلوژول بود که با توجه به نتیجه حاصل شده از نرم‌افزار قابل قبول می‌باشد.



شکل ۴- بهینه‌سازی مدل سطح پاسخ برای یافتن تنظیمات مناسب راکتور با بیشترین عملکرد

Fig.4. Optimization of response surface model to find the suitable settings of reactor with the highest yield

به کار برده شد. تنظیمات مورد مطالعه دور، دبی، زمان کار راکتور بود و بیودیزل تولید شده توسط دستگاه کارموتوگراف گازی آنالیز شد. نتایج نشان داد که در سرعت دورانی ۸۴۴۷ دور بر دقیقه راکتور، دبی ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه سیال ورودی و زمان ۱/۰۲ دقیقه کار راکتور بهترین عملکرد تولید بیودیزل حاصل می‌شود. نقطه اشتعال بیودیزل تولیدی در این تحقیق ۱۷۲ درجه سلسیوس، گرانیوی سینماتیکی ۴/۲ میلی‌متر مربع بر ثانیه و چگالی آن ۸۶۱ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. بیشترین و کمترین عملکرد حفره‌زایی راکتور تولید بیودیزل با روش حفره‌زایی هیدرودینامیکی در این تحقیق به ترتیب برابر با ۶/۱۹ و ۱/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوژول شد.

با توجه به این که روش تولید سوخت در این تحقیق ترانس استریفیکاسیون بوده، آزمایش‌های انجام گرفته و بهینه‌سازی شده با نرم‌افزار نشان داد در ۳/۵۱ دقیقه زمان ماند مواد اولیه سوخت بیودیزل در سیستم، در روش ترانس استریفیکاسیون بیش از ۸۸ درصد واکنش انجام می‌گیرد و این نشان دهنده بهبود بسیار خوب زمان واکنش برای تولید بیودیزل خام می‌باشد. این روش زمان ماند بسیار پایینی را نسبت به راکتورهای رایج تولید سوخت بیودیزل ناپیوسته که بیش از ۲۰ دقیقه (Khatamifar, 2006) تا بالاتر از یک ساعت طول می‌کشد، دارا می‌باشد (Ghobadian et al., 2008; Amit et al., 2014; Marchetti et al., 2007).

بهینه‌سازی روش سطح پاسخ

در بهینه‌سازی روش سطح پاسخ برای یافتن تنظیمات مناسب با بیشترین عملکرد راکتور از شرایط زیر مطابق شکل ۴ استفاده شد. در این شکل سه پارامتر ورودی مدل یعنی دور، دبی و زمان کار راکتور بدون هیچ شرطی قابل تغییر می‌باشند. به همین دلیل نمودار آن‌ها به صورت خط راست افقی است که نشان می‌دهد مقادیر پارامترهای

نتیجه‌گیری

بر اساس تحقیقات انجام شده، بازده تولید سوخت بیودیزل در راکتورهای حفره‌زای هیدرودینامیکی از راکتورهای فراصوتی بالاتر است و از طرفی از لحاظ پیاده‌سازی در صنعت متداول‌تر و آسان‌تر است. لذا در این تحقیق تنظیمات یک راکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان تنظیمات مناسب جهت تولید سوخت بیودیزل به صورت بهینه را به دست آورد. روغن آفتابگردان به عنوان روغن مورد مطالعه استفاده شد. متانول با نسبت ۶ به ۱ مولی با روغن و هیدروکسید سدیم به عنوان کاتالیزور

References

1. Amit, P., V. Ashish, S. S. Kachhwaha, and S. Maji. 2010. Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. *Renewable Energy* 35 (3): 619-624.
2. Amit, P., M. Shashank, and T. Dhananjay. 2014. Production and performance testing of waste Frying oil biodiesel. *International Journal of Current Engineering and Technology* 4 (3): 1366-1369.
3. Capocelli, M., D. Musmarra, M. Prisciandaro, and A. Lancia. 2014. Chemical effect of hydrodynamic cavitation: Simulation and experimental comparison. *AIChE Journal* 60 (7): 2566-2572.
4. Demirbas, A. 2009. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management* 50 (1): 14-34.
5. Demirbas, A. 2009. Biofuels from agricultural biomass. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 31 (17): 1573-1582.
6. Fangrui, M., and H. Milford. 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technol* 70 (1): 1-15.
7. Gharat, N., and V. K. Rathod. 2013. Enzyme catalyzed transesterification of waste cooking oil with dimethyl carbonate. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 88: 36-40.
8. Ghobadian, B., H. Rahimi, T. Tavakkoli Hashjin, and M. Khatamifar. 2008. Production of bioethanol and sunflower methyl ester and investigation of fuel blend properties. *Journal of Agricultural Science and Technology* 10: 225-232.
9. Jianbing, J., J. Wang, L. Yongchao, Y. Yunliang, and X. Zhichao. 2006. Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics* 44: e411-e414.
10. Khatamifar, M. 2006. Design, manufacture, test and evaluation the biodiesel processing device, Ph.D. Thesis in Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
11. Khuri, A. I., and S. Mukhopadhyay. 2010. Response surface methodology. *WIREs Computational Statistics* 2: 128-149.
12. Liu, K., and R. Wang. 2013. Biodiesel production by transesterification of duck oil with methanol in the presence of alkali catalyst. *Petroleum & Coal* 55 (1): 68-72.
13. Mandar, K., G. Parag, and P. Aniruddha. 2008. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry* 15 (3): 188-194.
14. Mangesh, G. K., and K. D. Ajay. 2006. Waste cooking oil an economical source for biodiesel: a review. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 45: 2901-2913.
15. Marchetti, J. M., V. U. Miguel, and A. F. Errazu. 2007. Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (6): 1300-1311.
16. Mostafaei, M. 2012. Effect of Ultrasonic Parameters on Continuous Biodiesel Production, Ph.D. Thesis in Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
17. Ozonak, J., and K. Lenik. 2011. Effect of different design features of the reactor on hydrodynamic cavitation process. *Archives of Materials Science and Engineering* 52 (2): 112-117.
18. Qiu, Z., L. Zhao, and L. Weatherley. 2010. Process intensification technologies in continuous biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49 (4): 323-330.
19. Vichare, N. P., P. R. Gogate, and A. B. Pandit. 2000. Optimization of hydrodynamic cavitation using a model reaction. *Chemical Engineering & Technology* 23 (8): 683-690.
20. Visscher, F., J. V. D. Schaaf, T. A. Nijhuis, and J. C. Schouten. 2013. Rotating reactors-A review. *Chemical Engineering Research and Design* 91 (10): 1923-1940.

Optimization of hydrodynamic cavitations reactor efficiency for biodiesel production by response surface methods (Case study: Sunflower oil)

H. Javadikia^{1*} - Y. Nosrati² - M. Mostafaei³ - L. Naderloo⁴ - M. Tabatabaei⁵

Received: 04-12-2015

Accepted: 23-02-2016

Introduction

Biofuels are considered as one of the largest sources of renewable fuels or replacement of fossil fuels. Combustion of plant-based fuels is the indirect use of solar energy. Biofuels significantly have less pollution than other fossil fuels and can easily generate from residual plant material. Waste and residues of foods and wastewater can also be a good source for biofuel production.

Transesterification method (one of biodiesel production methods) is the most common forms to produce mono-alkyl esters from vegetable oil and animal fats. The procedure aims are reduction the oil viscosity during the reaction between triglycerides and alcohol in the presence of a catalyst or without it. In this study, the method of transesterification with alkaline catalysts is used that it is the most common and most commercial biodiesel production method.

In this study, configurations of made hydrodynamic cavitation reactor were studied to measure biodiesel fuel quality and enhanced device performance with optimum condition. The Design Expert software and response surface methodology were used to get this purpose.

Materials and Methods

Transesterification method was used in this study. The procedure aims were reduction of the oil viscosity during the reaction between triglycerides and alcohol in the presence of a catalyst or without it. Materials needed in the production of biodiesel transesterification method include: vegetable oil, alcohol and catalysts. The used oil in the production of biodiesel was sunflower oil, which was used 0.6 liters per each test in the production process base on titration method. Methanol with purity of 99.8 percent and the molar ratio of 6:1 to oil was used based on titration equation and according to the results of other researchers. The used catalyst in continuous production process was high-purity sodium hydroxide (99%) that it is one of alkaline catalysts. Weight of hydroxide was 1% of the used oil weight in the reaction.

Response surface methodology: Three important settings of reactor were considered to optimize reactor performance, which include: inlet flow to reactor, reactor rotational speed and the fluid cycle time in the system. Each set was considered at three levels. The factorial design was used to the analysis without any repeat, there will be 27 situations that because of the cost of analysis per sample by GC, practically not possible to do it. Therefore, response surface methodology was used by Design Expert software. In the other words, after defining the number of variables and their boundaries, software determined the number of necessary tests and the value of the relevant variables.

Results and Discussion

Three parameters include the inlet flow to reactor, reactor rotational speed and the fluid cycle time in the system were considered as input variables and performance of reactor as outcome in analyzing of extracted data from the reactor and GC by Design Expert software. The results of tests and optimization by software indicated that in 3.51 minutes as retention time of the raw material of biodiesel fuel in the system, the method of transesterification reaction had more than 88% Methyl ester and this represents an improvement in reaction time of biodiesel production. This method has very low retention time rather than biodiesel fuel production in conventional batch reactors that it takes 20 minutes to more than one hour.

1, 2, 3, 4- Assistant Professor, Former M.Sc. Student, Assistant Professor and Assistant Professor respectively, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Razi University, Kermanshah, Iran

5- Assistant Professor, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: pjavadikia@gmail.com)

Conclusions

According to the researches, efficiency of biodiesel fuel production in hydrodynamic cavitation reactors is higher than ultrasonic reactors so in this study, the settings of hydrodynamic reactor were investigated so that the settings were optimized in production of biodiesel fuel. Sunflower oil was used in this research. The molar ratio of Methanol to oil was 6 to 1 and sodium hydroxide as a catalyst was used. Three important settings of reactor were considered which include: inlet flow to reactor, reactor rotational speed and the fluid cycle time in the system. The results were analyzed by gas chromatography. The results showed that at 8447 rpm of reactor speed, inlet flow of reactor at 0.86 liters per minute and 1.02 minute of circulation time, the best performance of reactor were created. The flash point, kinematic viscosity and density of biodiesel in this study were 172 ° C, 2.4 square millimeters per second and 861 kg per cubic meter, respectively. Maximum and minimum performances of hydrodynamic cavitation reactor in biodiesel production were 6.19 and 1.13 mg kJ⁻¹, respectively.

Keywords: Biodiesel, Optimization, RSM, Transesterification

شناسایی و اولویت‌بندی نیازمندی‌های مشتریان از تراکتور با روش QFD

هوشنگ تقی‌زاده^{۱*} - مصطفی ضیائی حاجی پیرلو^۲ - وحید خدرلی^۳ - بهزاد شمسی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶

چکیده

شناسایی نیازها و انتظارات مشتریان، نقشی راهبردی در بقای تولیدکننده دارد. مطلوبیت‌هنگامی حاصل می‌شود که بتوان خواسته‌ها و نیازهای مشتریان را به‌گونه‌ای مناسبی برآورده نمود. یکی از کارآمدترین روش‌ها در مطالعه خواسته‌های مشتریان، تکنیک گسترش عملکرد کیفی (QFD) است که در آن به خصوصیات مورد علاقه مشتری بهای بیشتری داده می‌شود. هدف تحقیق حاضر، شناسایی و اولویت‌بندی نیازمندی‌های مشتریان از تراکتور مدل فرگوسن MF285، محصول شرکت تراکتورسازی ایران (واقع در تبریز)، با تکنیک گسترش عملکرد کیفی بود. روش تحقیق، توصیفی و جامعه آماری شامل تمامی مشتریان محصول تراکتور شرکت تراکتورسازی ایران در پنج سال گذشته (از فروردین ۱۳۸۹ تا فروردین ۱۳۹۴) بوده است. حجم نمونه آماری توسط شاخص کوکران، ۱۷۱ نفر برآورد شد. در تعیین الزامات فنی محصول نیز، از گروه ۲۰ نفره متخصصین کمک گرفته شده است. به‌منظور گردآوری داده‌ها، از چهار گونه پرسش‌نامه استفاده شد که روایی آن‌ها با روش محتوایی و پایایی با شاخص آلفای کرونباخ بررسی شده است. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها، ضمن در نظر گرفتن مراحل تکنیک گسترش عملکرد کیفی، از آزمون آماری تی تک‌نمونه‌ای برای شناسایی مهم‌ترین نیازها و خواسته‌های مشتریان استفاده شده است؛ همچنین، از تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، برای تعیین اهمیت نیازها و خواسته‌ها از دیدگاه مشتریان، به‌عنوان ورودی تکنیک گسترش عملکرد کیفی استفاده شد. نتایج نشان داد که به‌ترتیب: کیفیت قطعات، ضمانت و گارانتی، قیمت پایین تراکتور، مصرف سوخت، راحتی و آرامش، عمر و دوام، حرکت نرم، پاسخ‌گویی سریع سیستم ترمز، ایجاد اتاقک و دسترسی آسان به قطعات در اولویت‌های اول تا دهم نیازها و خواسته‌های مشتریان تراکتور برحسب مشخصه‌های فنی تولید محصول قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: تراکتور، کیفیت، تکنیک گسترش عملکرد کیفی، مشخصات فنی، نیازهای مشتریان

مقدمه

و حیاتی در طراحی و عرضه‌ی محصول موفق برعهده دارد (Wang and Xiong, 2011).

انتظارات مشتریان از محصول شامل طیف وسیعی از خواسته‌ها و نیازها است که برای کسب شناختی دقیق از آن‌ها، باید از ابزارهای علمی و سازمان‌یافته‌ای بهره‌گیری شود. تکنیک گسترش عملکرد کیفی، یکی از این ابزارها است که ماشین مترجم زبان مشتری به مشخصات فنی و مهندسی پایه نیز نامیده می‌شود. در واقع، گسترش عملکرد کیفی، یک روش ساختاریافته در راستای ترجمه و تفسیر صدای مشتری^۵ در قالب الزامات فنی و مهندسی، اصطلاحات کاربردی است که به‌صورت اطلاعات مستند در قالب ماتریس‌های کمی و اولویت‌بندی خواسته‌ها و انتظارات ارائه می‌شود؛ هدف تکنیک گسترش عملکرد کیفی^۶، ارتقاء کیفیت محصول با بهره‌گیری از صدای مشتری در قالب خواسته‌ها و نیازمندی‌هایش است که از طریق اصطلاحات و زبان خود مشتری بیان می‌شود (Fung et al., 2006).

نظر به این که مشتریان به‌عنوان مهم‌ترین منبع سازمانی به‌شمار می‌آیند (Chan and Wu, 2002)، از اوایل دهه ۹۰ میلادی تلاش برای جلب رضایت مشتریان به‌عنوان سلاحی راهبردی و بسیار مهم برای بسیاری از سازمان‌ها تبدیل شده است (Chuang, 2001)؛ بر همین اساس، امروزه، هیچ سازمانی نمی‌تواند نسبت به انتظارات و خواسته‌های مشتریان بی‌تفاوت باشد (Lam and Lai, 2014). شرط اساسی در ایجاد حس رضایت در مشتری، توجه به خواسته‌ها و نیازهای مشتری می‌باشد (Benner et al., 2003)؛ لذا، داشتن درکی صحیح و دقیق از انتظارات، نیازها و خواسته‌های مشتریان، نقشی مهم

۱- استاد، گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: Taghizadeh@iaut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳ و ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع و کارشناس فنی شرکت

تراکتورسازی ایران

5- Voice of Customer (VOC)

6- Quality Function Deployment (QFD)

تشکیل شده است و منجر به گسترش نظام‌مند روابط مابین تفسیر تقاضای مشتری و ویژگی‌های محصول می‌شود (Costa et al., 2000). در رویکرد مذکور، برای دستیابی به اهداف کیفی و عملکردی، از ابزارها و روش‌های مختلفی استفاده می‌شود؛ ولی ابزار اصلی برای پیاده‌سازی تکنیک گسترش عملکرد کیفی، خانه‌های کیفیت^۳ است (Griffin, 1992).

تکنیک گسترش عملکرد کیفی دارای مجموعه یکپارچه‌ای از ابزارهاست که نیازمندی‌های مشتری و ویژگی‌های مهندسی که این نیازمندی‌ها را برآورده می‌کند را مستند می‌سازد تا مصالحه‌ای^۴ ما بین آنچه مشتری می‌خواهد و آنچه سازمان می‌تواند ارائه کند، برقرار گردد. در بینش گسترش عملکرد کیفی، مدیران و گروه‌های طراحی، توسعه و تکوین محصول، به‌صورت یک روش سازمان‌یافته و همه‌جانبه هدایت می‌شوند تا نیازهای بازار، با مشخصات واقعی محصول منطبق شوند (Bouchereau and Rowlands, 2000). در به‌کارگیری تکنیک گسترش عملکرد کیفی تعدادی از ابزارها و رویه‌های مدیریتی به‌طور سامانمند هماهنگ می‌شوند، از جمله: گروه تمرکز^۵، خانه کیفیت، نمودار وابستگی^۶، نمودار درختی^۷، مهندسی ارزش^۸، الگوبرداری^۹ و تحقیقات بازار. تکنیک گسترش عملکرد کیفی یک سری مراحل سازمان‌یافته ایجاد می‌کند که از ابزارهای فوق به‌طور مؤثر استفاده می‌شود تا رضایت‌مندی مشتری از محصول نهایی تضمین شود (Chang and Wang, 2012). بنابراین می‌توان گفت تکنیک گسترش عملکرد کیفی ابزار بسیار مناسبی برای سازمان‌هایی به‌شمار می‌آید که از طریق خروجی خود در قالب محصولات و خدمات، می‌خواهند یک مزیت رقابتی قوی در مقابل رقبای خود ایجاد کنند (Carnevalli and Miguel, 2008). برخی از مهم‌ترین مزایای استفاده از تکنیک گسترش عملکرد کیفی در جدول ۱ آورده شده است. زیم و همکاران (۲۰۱۴)، فعالیت‌های گسترش عملکرد کیفی محصول را در برنامه‌ریزی برای تبدیل خواسته‌های مشتری به ویژگی‌های فنی محصول و یا خدمت جدید و بهبود آن‌ها یافته‌اند (Zaim et al., 2014). چو (۲۰۱۴) در تحقیقی به بررسی رضایت مشتریان و کیفیت عملکرد هواپیماهای باری پرداخته است؛ نتایج نشان داد که با برنامه‌ریزی زمان پروازها با کمک کارکنان، آسیب‌ها و ضایعات کاهش یافته و رضایت مشتریان افزایش می‌یابد (Chow, 2014). سگارو (۲۰۱۳) به بررسی عوامل مؤثر بر کاهش رضایت و

ارتباطات می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که کارکرد تکنیک گسترش عملکرد کیفی، تنظیم خروجی سازمان در قالب محصولات و خدمات، براساس نظرات و سلیقه مشتری است. یکی از شروط اصلی در پیاده‌سازی تکنیک گسترش عملکرد کیفی آن است که بایستی مدیران، بازاریبان، مهندسان طراح صنعتی و افراد دست‌اندرکار در تولید، با همدیگر همکاری همه‌جانبه داشته باشند (Bevilacqua and Braglia, 2000). تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت تکنولوژی بیان‌گر این مطلب است که ارتباطات و همکاری ما بین واحدهای بازاریابی، تولید، طراحی، تحقیقات و توسعه^۱ به موفقیت محصولات جدید و سودآوری بیشتر منجر می‌شود. تکنیک گسترش عملکرد کیفی ارتباط بین این واحدها را با مرتبط کردن صدای مشتری به تصمیم‌های طراحی، تولید و تحقیقات، توسعه و بهبود می‌دهد (Martins and Aspinwall, 2001). از مزیت‌های بسیار مهم دیگر تکنیک گسترش عملکرد کیفی آن است که از شکل و شمایل ساده برای بیان مقاصدش استفاده می‌کند و این امر، خود ایجادکننده ارتباط ما بین بخش‌های مختلف دست‌اندرکار در تولید و ایجاد ارزش، صرف‌نظر از سطح سواد و آگاهی تکنیکی‌شان ایجاد می‌کند (Kahraman et al., 2006).

ادبیات موضوعی مرتبط با تکنیک گسترش عملکرد کیفی حاکی از آن است که مزیت این روش در گوش دادن به صدای مشتری در جهت توسعه محصولات و خدمات است (Carnevalli and Miguel, 2008)، ضمن این‌که این امر، منشأ اثرات مفید و حیاتی دیگری برای سازمان نیز می‌باشد. به بیان تخصصی‌تر، گسترش عملکرد کیفی روشی برای تبدیل نیازمندی‌های مشتری از طریق ارتقاء سطح کیفیت طراحی و تبدیل خواسته‌های او به الزامات فنی مناسب در قالب یک زبان مشترک مابین واحدهای مختلف سازمان (Griffin, 1992; Zaim et al., 2014)، در هر مرحله از چرخه توسعه و تکوین محصول (Eureka and Ryan, 2006) و معیاری برای کنترل نقاط تضمین کیفیت^۲ در تمامی مراحل تولید (Rezaei et al., 2001) می‌باشد. این امر از طریق استقرار نیازمندی‌ها و خواسته‌های کیفی مشتری در هریک از مراحل توسعه و تکمیل محصول از طراحی‌های اولیه تا تولید نهایی صورت می‌پذیرد. برای استقرار مناسب نیز، به همکاری همه‌جانبه واحدهای مختلف سازمان از جمله: طراحی، تولید، بازاریابی، فروش، برنامه‌ریزی تولید و خدمات پس از فروش نیاز می‌باشد. لذا، در تکنیک گسترش عملکرد کیفی، تمرکز زیادی بر مهارت‌های درون سازمانی هنگام پیاده‌سازی رویه‌های طراحی و ارتباطات می‌شود.

تکنیک گسترش عملکرد کیفی از دو جزء کیفیتی و عملکردی

- 3- House of Quality
- 4- Trade Off
- 5- Focus Group
- 6- Affinity Diagram
- 7- Tree Diagram
- 8- Value Engineering
- 9- Benchmarking

- 1- Research and Development (R&D)
- 2- Quality Insurance Points

به دنبال آن کاهش وفاداری مشتریان در نتیجه عملکرد کیفی پرداخته است (Segoro, 2013).

جدول ۱- مزایای استفاده از تکنیک گسترش عملکرد کیفی
Table 1- Quality function deployment advantages

مزایای نامحسوس Intangible advantages	مزایای محسوس Tangible advantages
۱- افزایش رضایت‌مندی مشتری	۱- کاهش هزینه‌های راه‌اندازی تا ۳۰ درصد
1- Increasing customer satisfaction	1- Reducing set up costs up to 30%
۲- افزایش وفاداری مشتری	۲- کاهش تعداد تغییرات مهندسی
2- Increasing customer loyalty	2- Reducing amount of engineering changes
۳- ایجاد مبنایی برای برنامه‌ریزی بهبود	۳- شناسایی حوزه‌ها با ریسک بالا
3- Creating improvement planning platform	3- Determining high risk areas
۴- ایجاد یک منبع قابل انتقال از دانش مهندسی	۴- تعیین پیش‌نیازهای فرآیند طراحی محصول
4- Creating transferrable engineering knowledge source	4- Determining product design process prerequisites
۵- انجام مستندسازی	۵- کاهش زمان توسعه محصول تا ۵۰ درصد
5- Documentation	5- Reducing product development up to 50%
۶- ارتباط قوی بین مشتری و سازمان	۶- افزایش اثربخشی در تخصیص منابع
6- Strong relationship between customer and organization	6- Increasing allocation efficacy
۷- انتقال تجربیات به پروژه‌های دیگر از طریق تمام افراد گروه	۷- قابل اجرا در صنایع تولیدی و خدماتی
7- transferring of experiences to other projects with using all group members	7- Implementable on both production and service sectors

(Martins and Aspinwall 2001; Cheng *et al.* 2014)

سلسله مراتبی AHP چگونه است؟

وضعیت سازمان در رابطه با وضعیت رقبا بر مبنای خواسته‌ها و نیازهای مشتریان چگونه است؟
 اولویت‌بندی نیازهای مشتریان با استفاده از تکنیک گسترش عملکرد کیفی چگونه است؟

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر براساس هدف، از نوع تحقیقات کاربردی و براساس ماهیت و روش انجام کار، توصیفی-پیمایشی می‌باشد. جامعه آماری تحقیق در تعیین خواسته‌ها و نیازهای مشتریان، شامل کلیه مشتریان شرکت تراکتورسازی ایران در طی پنج سال گذشته (مابین فروردین ماه ۱۳۸۹ تا فروردین ماه ۱۳۹۴) بوده است. حجم نمونه آماری برگرفته شده از مشتریان، با استفاده از رابطه کوکران^۲ برای جوامع با حجم نامعلوم با سطح اطمینان ۹۵٪ و خطای قابل اغماض ۰/۱ = ،
 $z = 1/96$ ، مطابق با رابطه (۱)، به تعداد ۱۷۱ نفر محاسبه شده است.

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \cdot \hat{p}^2}{v^2} = \frac{3.8416 \times 0.444}{0.01} = 170.73 \approx 171 \quad (1)$$

لازم به توضیح است که در تعیین میزان انحراف معیار () در رابطه (۱)، با توجه به استفاده از طیف پنج‌گزینه‌ای لیکرت^۳، از رابطه (۲) استفاده شده است.

پورحسومی و همکاران (۲۰۱۳)، اقدام به شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای انتخاب مشتریان مبتنی بر عملکرد کیفیت (QFD) نموده‌اند (Poorhesomi *et al.* 2013). عمل‌نیک و همکاران (۲۰۱۳) با ارائه رویکرد ترکیبی QFD-DEA، پروژه‌هایی با کارایی بالاتر و اثربخشی بیشتر را به‌عنوان پروژه‌های ارجح مشخص نموده‌اند (Amalnik *et al.* 2013). بنر و همکاران (۲۰۰۳)، با استفاده از تکنیک گسترش عملکرد کیفی برای نمونه‌های مختلف در صنایع غذایی، چندین روش جدید را برای طراحی و توسعه محصولات در راستای رفع نیازهای مشتریان، همچنین کنترل کیفیت محصول ارائه کرده‌اند (Benner *et al.* 2003).

با توجه به کارآمدی تکنیک گسترش عملکرد کیفی در استخراج نیازمندی‌ها و احتیاجات از محصول و تأمین رضایت مشتریان، محققین در تحقیق حاضر قصد داشته‌اند تا با استفاده از این ابزار، خواسته‌ها و نیازمندی‌های مشتریان تراکتورهای تولیدی در شرکت تراکتورسازی ایران را استخراج نموده و آن‌ها را اولویت‌بندی نمایند. بر همین اساس، هدف از انجام تحقیق حاضر، شناسایی نیازمندی‌ها و احتیاجات مشتریان از محصول تراکتور و بررسی آنها با رویکرد تکنیک گسترش عملکرد کیفی بوده است؛ لذا در راستای انجام این کار، سؤالات زیر می‌تواند قابل طرح باشد:

مهم‌ترین خواسته‌ها و نیازهای مشتریان از محصول تراکتور کدامند؟

ترتیب اولویت اولیه نیازها و خواسته‌های مشتریان با رویکرد

1- Analytic Hierarchy Process
 2- Cochran
 3- Likert

استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده، ۱۷۱ مشتری به‌عنوان نمونه آماری انتخاب شده است. در جدول ۲، فراوانی و درصد فراوانی متغیرهای جمعیت‌شناختی نمونه آماری آمده است.

$$t \approx \frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{6} \Rightarrow t = \frac{5-1}{6} = 0.667 \quad (2)$$

در تحقیق حاضر، انتخاب اعضای نمونه آماری به روش تصادفی ساده انجام شده است که در آن، شانس هریک از اعضای جامعه آماری برای انتخاب شدن در نمونه یکسان می‌باشد؛ بنابراین با

جدول ۲- فراوانی و درصد فراوانی متغیرهای جمعیت‌شناختی تحقیق

Table 2- Frequency and frequency percentage of demographical variables

متغیرهای جمعیت‌شناختی Demographic factors	زیرگروه Sub groups	فراوانی Frequency	درصد فراوانی Frequency percentage
سن Age	20-30	6	3.51
	30-40	44	25.73
	40-50	53	30.99
	50-60	48	28.07
	up to 60	20	11.70
میزان تحصیلات Education	فوق‌دیپلم و پایین‌تر under graduated	86	50.29
	لیسانس Bachelor	69	40.35
	فوق‌لیسانس MSc	16	9.36
سابقه به‌کارگیری تراکتور Using tractor experience	کمتر از ۱۰ سال Lower than 10 years	29	16.96
	بین ۱۰ تا ۱۵ سال Between 10 to 15 years	54	31.58
	بین ۱۵ تا ۲۰ سال Between 15 to 20 years	51	29.82
	بالاتر از ۲۰ سال Up to 20 years	37	21.64

اندازه‌گیری در اختیار پنج نفر از متخصصان در زمینه‌ی تحقیق و پنج نفر از اساتید دانشگاهی در رشته‌های مرتبط قرار گرفته و از آنان خواسته شد تا پس از مطالعه پرسشنامه‌ها، نظرات خود را در مورد روایی آن‌ها اعلام نمایند. پس از جمع‌آوری اظهارنظرهای اعلام‌شده و اصلاح برخی سؤالات براساس نظرات خبرگان، پرسشنامه‌های نهایی شده در سطح روایی قابل قبولی حاصل شده است.

بررسی پایایی پرسشنامه نوع اول، سوم و چهارم، با استفاده از شاخص آماری آلفای کرونباخ^۱ تعیین شده است. لازم به توضیح است که برای محاسبه پایایی پرسشنامه نوع اول، نمونه آماری ۳۰ نفری لحاظ شده است. در رابطه با پرسشنامه‌های سوم و چهارم، پایایی پرسشنامه‌ها بر روی نمونه‌ی اصلی محاسبه شده است. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳ آورده شده است.

همچنین، در تعیین الزامات فنی مرتبط با خواسته‌های مشتریان، گروه ۲۰ نفره از متخصصان و کارشناسان حوزه برنامه‌ریزی و تولید، تأمین، طراحی و بخش ارتباط با مشتریان شرکت تراکتورسازی به‌عنوان گروه خبره تحقیق تعیین شده‌اند؛ همچنین برای جمع‌آوری داده‌ها جهت پاسخ به سؤالات تحقیق از روش مصاحبه نیمه‌ساختار یافته و پرسش‌نامه‌های مختلفی استفاده شده است. پرسش‌نامه‌های مورد استفاده در این تحقیق، به تفکیک عبارت‌اند از:

پرسش‌نامه نوع اول جهت شناسایی مهم‌ترین خواسته‌ها و نیازهای مشتریان که گویه‌های آن با طیف لیکرت تنظیم شده است؛ پرسش‌نامه نوع دوم که از گونه مقایسات زوجی بوده و برای جمع‌آوری داده‌های اولیه تکنیک AHP به‌کارگیری شده است؛ پرسش‌نامه نوع سوم مربوط به ارزیابی وضعیت سازمان در رابطه با وضعیت رقبا بر مبنای خواسته‌ها و نیازهای مشتریان؛ پرسش‌نامه نوع چهارم برای وزندهی به الزامات فنی مرتبط با خواسته‌ها و نیازهای مشتریان.

روایی تمامی انواع پرسش‌نامه و ابزار مصاحبه، از طریق روش روایی محتوایی بررسی شده است؛ بدین ترتیب که ابزارهای

جدول ۳- مقادیر ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شده برای پرسش‌نامه‌ها

Table 3- Calculated Chronbach's alpha for questionnaires

مقدار ضریب آلفای کرونباخ Cronbach's alpha coefficient	پرسشنامه Questionnaire
0.768	پرسشنامه نوع اول Questionnaire Type 1
0.784	پرسشنامه نوع سوم Questionnaire Type 3
0.793	پرسشنامه نوع چهارم Questionnaire Type 4

جدول ۴- نتایج آزمون آماری t تک نمونه‌ای برای شناسایی مهم‌ترین نیازها و خواسته‌های مشتریان

Table 4- One sample t-test results for identifying the customers' most important demands and needs

نیازمندی‌های مشتریان Customer Needs	مقادیر t t-test results	سطح معنی‌داری Signification level	فاصله اطمینان برای تفاضل میانگین Confidence for mean difference		نتیجه Result
			حد پایین Lower	حد بالا Upper	
قیمت پایین تراکتور Tractor's low price	5.893	0.00	0.2146	0.4467	تأیید شد Accepted
کیفیت قطعات مورد استفاده Quality of used parts	6.477	0.00	0.2208	0.4567	تأیید شد Accepted
کیفیت و تنوع رنگ و ظاهر خارجی Quality and various outer color	1.341	0.083	-0.02765	0.0765	رد شد Rejected
عمر و دوام محصول Life and durability of product	4.312	0.00	0.1995	0.3961	تأیید شد Accepted
راحتی و آرامش در هنگام کار Peace and comfort during work	8.651	0.00	0.7568	0.9943	تأیید شد Accepted
ایجاد اتاقک تراکتور Creating operator cabin	7.221	0.003	0.2991	0.5009	تأیید شد Accepted
میزان مصرف سوخت Fuel consumption	7.861	0.00	0.3012	0.5046	تأیید شد Accepted
نگهداری آسان قطعات و محصول Easy maintenance of parts and production	0.993	0.091	-0.0123	0.0576	رد شد Rejected
ضمانت و گارانتی محصول Warranty and maintenance	6.456	0.00	0.4789	0.2801	تأیید شد Accepted
دسترسی آسان به قطعات و تعمیرات فنی Easy access to components	2.714	0.007	0.0386	0.2411	تأیید شد Accepted
استفاده از تزئینات داخلی Using internal accessories	-6.440	0.00	-0.4837	-0.2575	رد شد Rejected
پاسخگویی سریع سیستم ترمز هنگام ترمزگیری سریع Fast respond of brake system	4.052	0.00	0.1104	0.3185	تأیید شد Accepted
راحتی تعویض دنده‌ها Easy gear changing	-8.927	0.00	-0.5745	-0.3672	رد شد Rejected
دید وسیع از روبه‌رو و طرفین Having side to side view	-5.544	0.00	-0.4326	-0.2061	رد شد Rejected
حرکت نرم و کوبش کمتر در سطوح مختلف جاده‌ای Smooth movement and less knocking on any road quality	2.777	0.006	0.0409	0.2388	تأیید شد Accepted
قابلیت استارت خوردن تراکتور در تمامی شرایط آب و هوایی Starting ability on any weather conditions	-7.722	0.00	-0.5030	0.2989	رد شد Rejected
انجام اقدامات ایمنی Safety actions	1.003	0.0331	-0.0215	0.0578	رد شد Rejected

توزیع پرسشنامه مقایسات زوجی (پرسشنامه نوع دوم)، داده‌ها جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شده‌اند که نتایج مربوط به تعیین اهمیت اولیه نیازها و خواسته‌های مشتریان و نرخ سازگاری مقایسات زوجی در جدول ۵ آمده است.

همان‌گونه که از جدول ۵ مشخص است، نرخ ناسازگاری تصادفی^۴ (IR) محاسبه شده برای ماتریس مقایسات زوجی، کوچکتر از ۰/۱ به‌دست‌آمده است؛^۵ لذا با توجه به روش بررسی سازگاری ماتریس مقایسات زوجی در روش AHP، می‌توان گفت که نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی در سطح قابل قبولی حاصل شده است؛ این امر حاکی از صحت نتایج مربوط به اوزان اولیه حاصل شده از روش AHP، برای نیازمندی‌های مشتریان می‌باشد.

به‌منظور تشکیل خانه کیفیت، لازم است پس از شناسایی نیازمندی‌های مشتریان، یکی دیگر از مهم‌ترین بخش‌های آن یعنی مشخصه‌های فنی متناسب با هر نیازمندی، تعیین شود. بدین منظور پس از شناسایی نیازمندی‌های مشتریان، تیمی از متخصصین تشکیل شده و نظرات آن‌ها درخصوص هر نیازمندی و وجود ارتباط با خواسته‌ها و نیازمندی‌های مشتریان اخذ شده است. درنهایت با جمع‌بندی نظرات و جلسات متعدد، ۱۵ مشخصه فنی مرتبط ارائه شده است. در ارائه مشخصه‌های فنی به این نکته توجه شده است که با توجه به نیازهای مشتریان که به‌صورت کلان تعریف شده‌اند، مشخصه‌هایی تعیین شوند که در مرحله اول باعث زیاد شدن جدول تکنیک گسترش عملکرد کیفی نگردند و در مرحله بعدی تا حد امکان این مشخصه‌ها هم به‌صورت یک استراتژی نگرینده شوند. نتیجه کار به‌صورت جدول ۶ ارائه شده است. علائم جدول نشان‌دهنده شدت ارتباط ما بین مشخصه‌های فنی با نیازمندی‌ها و الزامات مشتریان می‌باشد و براساس رویکرد دیل (۲۰۰۳)، بدین گونه تعیین شده‌اند: علامت نشان‌دهنده وجود ارتباط قوی (امتیاز ۹)، علامت نشان‌دهنده ارتباط متوسط (امتیاز ۳) و علامت نشان‌دهنده ارتباط

با توجه به مقدار ضریب آلفای محاسبه‌شده در جدول ۳ برای پرسشنامه‌ها، به‌دلیل آن که مقادیر ضریب آلفا بیشتر از ۰/۷ به‌دست‌آمده است، می‌توان ادعا نمود که پرسشنامه‌های طراحی‌شده از میزان پایایی مناسب برخوردار می‌باشند؛ پرسشنامه نوع دوم نیز که از گونه‌ی مقایسات زوجی بوده‌است، به‌دلیل محاسبه نرخ ناسازگاری در قالب گام‌های روش AHP، نیازی به بررسی پایایی نداشته است. بررسی پایایی ابزار مصاحبه (چک لیست) از طریق آزمون مجدد با فاصله زمانی دو هفته انجام پذیرفته است و مقدار ضریب همبستگی^۲ اسپیرمن^۱، ۰/۸۷ به‌دست آمده است.

نتایج و بحث

اولین مرحله در پیاده‌سازی تکنیک گسترش عملکرد کیفی، تعیین خواسته‌ها و الزامات کیفی مشتریان است. به‌منظور تعیین خواسته‌ها و الزامات کیفی مشتریان محصول تراکتور، ابتدا طی مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته از اعضای نمونه آماری، لیستی از نیازها و خواسته‌های مشتریان استخراج شد. بر همین اساس، تعداد ۱۷ خواسته و الزامات کیفی مشتریان که دارای بیشترین فراوانی در بین نیازمندی‌های اعلام‌شده‌ی مشتریان در طی بررسی‌های اولیه از طریق مصاحبه‌های شفاهی بوده‌اند، برای انجام آزمون آماری انتخاب شد. سپس، با استفاده از خروجی مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته، پرسشنامه نوع اول با هدف تعیین مهم‌ترین نیازها و خواسته‌های مشتریان طراحی شده، و پس از اطمینان از روایی و پایایی^۲ مناسب آن، در اختیار اعضای نمونه آماری قرار گرفته است. پس از جمع‌آوری داده‌ها به‌وسیله پرسشنامه نوع اول، از آزمون آماری t تک نمونه‌ای با فاصله اطمینان ۹۵ درصد و $\alpha = 0/05$ ، جهت تعیین نیازها و الزامات کیفی مشتریان استفاده شده است. در جدول ۴ نتایج آزمون t تک نمونه‌ای^۳ (آزمون بر روی میانگین) ارائه شده است.

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از آزمون آماری تی تک نمونه‌ای در جدول ۴، مهم‌ترین خواسته‌ها و نیازهای مشتریان از محصول تراکتور را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد: قیمت پایین تراکتور، کیفیت قطعات مورد استفاده، عمر و دوام محصول، راحتی و آرامش در هنگام کار، ایجاد اتاقک در تراکتور، میزان مصرف سوخت، ضمانت و گارانتی محصول، دسترسی آسان به قطعات و تعمیرات فنی، پاسخگویی سریع سیستم ترمز هنگام ترمزگیری سریع، و حرکت نرم و کوبش کمتر در سطوح مختلف جاده‌ای.

در مرحله بعدی، به‌منظور تعیین اهمیت نیازها و خواسته‌های مشتریان، از مقایسات زوجی استفاده شده است. بدین منظور پس از

4- Inconsistency Random Index (IRI)

۵- در روش AHP بایستی میزان ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی محاسبه شود. برای این منظور از شاخص ناسازگاری (IR: Inconsistency Index) استفاده می‌شود:

$$\Pi = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

در فرمول فوق، λ_{\max} بیشترین مقدار ویژه و n بعد ماتریس مقایسات زوجی است. در ادامه، جهت تصمیم‌گیری در زمینه قابل بودن میزان ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی، میزان شاخص ناسازگاری محاسبه شده برای ماتریس مقایسات زوجی را با شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی هم‌بعد با آن مطابق با رابطه (IR: Inconsistency Ratio) مقایسه می‌کنند:

$$IR = \frac{\Pi}{IRI}$$

در این رابطه، IRI شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی و Π شاخص ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی می‌باشد.

1- Spearman Rank Correlation Coefficient

2- Validity and Reliability

3- One Samplet-test

ضعیف (امتیاز ۱) (Dale, 2003).

پس از تعیین مشخصه‌های فنی متناسب با هر کدام از نیازمندی‌ها، در مرحله بعد بایستی جایگاه محصول تولید شده در مقایسه با محصولات رقبا تعیین شود؛ در یک نظرسنجی اولیه توسط محققین از اعضای نمونه آماری در قالب مشتریان تراکتور، مشخص گردید که اکثر آن‌ها از محصولات سایر رقبا اطلاعی نداشته و از آن‌ها استفاده ننموده‌اند و اساساً شناخت کمی در رابطه با محصولات سایر رقبا در دسترس مشتریان بوده است؛ لذا تصمیم گرفته شد تا این قسمت از خانه کیفیت با همکاری گروه متخصصین ۲۰ نفره که در بخش‌های مختلف شرکت تراکتورسازی ایران مشغول به فعالیت بودند، تکمیل گردد. در این تحقیق، دو شرکت مطرح تولیدکننده تراکتور به نام‌های داروانا^۱ (رقیب اول) و نیولند^۲ (رقیب دوم) که در بازار ایران مشغول به فعالیت بودند، به‌عنوان رقبای شرکت تراکتورسازی ایران در نظر گرفته شده است و نظرات متخصصین در خصوص مقایسه وضعیت محصول سازمان و محصولات رقبا جمع‌آوری شده است. بدین منظور، پرسشنامه نوع سوم تدوین و در اختیار متخصصان قرار گرفته است که سنجه‌های آن‌ها در قالب طیف ۱ تا ۱۰ تنظیم شده است؛ بدین‌گونه که ۱۰ نشان‌دهنده وضعیت خیلی خوب و ۱ نشان‌دهنده وضعیت خیلی بد تراکتور تولیدی در شرکت تراکتورسازی ایران در مقایسه با رقبای تعیین شده است (سطر ششم جدول ۷)؛ همچنین، نتایج ارزیابی وضعیت رقبا در قبال نیازها و خواسته‌های مشتریان نیز در سطرهای چهارم و پنجم جدول ۷ لحاظ شده است.

در مراحل تکمیل خانه‌های جدول ۷، پس از ارزیابی رقبا، بایستی توسعه و بهبود خواسته‌ها و الزامات کیفی مشتریان در ماتریس خانه کیفیت مشخص شود. در ادامه و مطابق با مراحل پیاده‌سازی تکنیک گسترش عملکرد کیفی، پس از تعیین میزان بهبود در هر یک از نیازمندی‌ها نسبت به وضعیت کنونی، میزان اهمیت نسبی هر یک از الزامات کیفی به‌منظور تحلیل و بررسی بیشتر در مراحل بعدی تکنیک گسترش عملکرد کیفی محاسبه شده است. برای محاسبه نسبت بهبود که از حاصل تقسیم ستونی با عنوان برنامه (P) به ستون وضعیت کنونی تعیین می‌شود، ابتدا می‌بایست مقدار هدف‌گذاری برنامه برای رسیدن به نیازمندی‌های مشتریان تعیین گردد. بر همین اساس، به‌منظور تعیین مقادیر هدف‌گذاری برنامه، از گروه متخصصین خواسته شد تا مقادیر هدف را برای رسیدن به نیازمندی‌های مشتریان را تعیین نمایند. طی جلساتی که با گروه ۲۰ نفره متخصصان برگزار شد، نهایتاً براساس توافق کلی مقرر گردید بیشترین امتیاز مربوط به هر یک از نیازمندی‌های مشتری در جدول ارزیابی رقبا به‌عنوان مقادیر هدف در برنامه سازمان تعیین گردد. نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است.

پس از مشخص شدن مقادیر برنامه، می‌توان نسبت بهبود را از حاصل تقسیم ستون برنامه (P) به ستون وضعیت کنونی تعیین نمود. برای مثال، نسبت بهبود برای نیازمندی قیمت پایین تراکتور در جدول ۷ از حاصل تقسیم مقدار برنامه یعنی ۶/۱ به وضعیت کنونی یعنی ۵/۵ مقدار ۱/۱۱ محاسبه شد ($6/1 \div 5/5 = 1/11$). پس از تعیین نسبت بهبود، مطابق با روش، برای تأکید بیشتر در مورد برخی از خواسته‌های مشتریان، ضریبی تحت عنوان ضریب تصحیح به آن‌ها تعلق گرفته است؛ به‌این ترتیب که براساس کار شلیپتو (۱۹۹۴)، به گروهی از مشخصه‌ها که از درجه اهمیت بالایی نزد مشتریان برخوردارند و ارائه آن‌ها در سطحی مطلوب موجب انگیزه و رضایت‌مندی بیشتری در ایشان می‌شود، ضریب ۱/۵ اختصاص داده شده است. همچنین، به مواردی که موجبات رضایت مشتریان را فراهم می‌آورند ولی نه به‌اندازه گروه اول، ضریب ۱/۲ و مابقی ضریب ۱ تخصیص داده شده است؛ جهت انجام این کار با توجه به اهمیت اولیه نیازمندی‌های مشتریان در جدول ۵، برای ده نیازمندی خانه کیفیت که براساس وزن اولویت‌بندی شده‌اند؛ به ۲۰ درصد اول از نیازمندی‌ها، ضریب ۱/۵، ۳۰ درصد دوم نیازمندی‌ها، ضریب ۱/۲ و به بقیه موارد ضریب ۱ تخصیص داده شده است؛ مطابق با اوزان، از ۱۰ نیازمندی بررسی شده، کیفیت قطعات و ضمانت و گارانتی در ۲۰ درصد اول (با ضریب ۱/۵)، قیمت پایین، مصرف سوخت و راحتی و آرامش در ۳۰ درصد دوم (با ضریب ۱/۲) و مابقی ضریب ۱ را به‌خود اختصاص داده‌اند. نتایج در سطر اول جدول ۷ آورده شده است.

در ادامه و پس از مشخص شدن ضرایب تصحیح و نسبت بهبود، طبق الگوریتم تکنیک گسترش عملکرد کیفی به‌منظور محاسبه وزن مطلق، ضرایب تصحیح، نسبت بهبود و اهمیت اولیه نیازمندی‌ها در هم ضرب شده که حاصل این ضرب بیانگر میزان اهمیت و وزن نیازمندی‌های مشتریان در خانه کیفیت می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر مطابق با رابطه (۳) داریم:

(۳) اهمیت اولیه نیازمندی‌ها از نظر مشتری \times نسبت بهبود \times ضرایب تصحیح = وزن مطلق

به‌عنوان نمونه، وزن مطلق قیمت پایین تراکتور به‌صورت $0/222 = 1/167 \times 1/11 \times 1/2$ محاسبه شده است.

جهت مقایسه نسبی نیازمندی‌های مشتریان، در آخرین مرحله اقدام به محاسبه ضرایب نسبی اهمیت هر یک از نیازمندی‌ها پرداخته شده است. جهت این کار وزن مطلق هر یک از نیازمندی‌ها بر مجموع تمام اوزان مطلق تقسیم می‌شود. نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است (به‌عنوان نمونه، وزن نسبی قیمت پایین تراکتور به‌صورت $0/124 = 0/222 / 1/795$ به‌دست آمده است). براساس جمع‌بندی نتایج

به‌دست آمده در جدول ۷، اهم نیازمندی‌ها و خواسته‌های مشتریان را

نتایج حاصل از جدول ۹ بیانگر آن است که از میان خواسته‌ها و الزامات فنی مرتبط با هر یک از نیازمندی‌ها، «کنترل کیفیت مناسب قطعات تولیدی» در اولویت اول و «دید خارجی مناسب‌تر» در اولویت آخر قرار گرفته است.

نتایج و بحث

با توجه به این‌که وضعیت سازمان‌ها و مؤسسات اعم از تولیدی یا خدماتی، انتفاعی یا غیرانتفاعی و دولتی یا غیردولتی تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، جلب رضایت‌مندی مشتریان به‌منظور نیل به تعالی در کسب و کار می‌باشد، بنابراین تأمین رضایت مشتریان یکی از الزامات اساسی نظام‌های مدیریت کیفیت و مدل‌های تعالی در سازمان به‌شمار می‌آید (Amalnik et al., 2013).

تحقیق حاضر، از لحاظ موضوعی به شناسایی و اولویت‌بندی نیازمندی‌های مشتریان از محصول تراکتور با تکنیک گسترش عملکرد کیفی پرداخته است؛ در این راستا، ابتدا مهم‌ترین نیازهای مشتریان شناسایی و وزن‌دهی شده است، تا اهمیت اولیه هر کدام از آن‌ها مشخص شود.

می‌توان به‌صورت جدول ۸ اولویت‌بندی نمود. نهایتاً، به‌منظور تکمیل خانه کیفیت، می‌بایست مهم‌ترین مشخصه‌ها و الزامات فنی نیز براساس اولویت نیازها اولویت‌بندی شوند؛ برای انجام این کار، اوزان نسبی شاخص‌های مربوط به هر کدام از نیازمندی‌ها را در مقادیر عددی نشان‌دهنده شدت ارتباط بین مشخصه‌های فنی و نیازمندی‌های مشتریان ضرب می‌شوند تا مجموع ستونی برای هر نیازمندی محاسبه شود (Lam and Lai, 2014; Shillito, 1994). اوزان نسبی نیازهای مشتریان از جدول ۸ و مقادیر عددی از طریق علائم از جدول ۶ استخراج شده است (همان‌گونه که اشاره شد، مقادیر عددی متناظر با علائم ، و ، به‌ترتیب ۹، ۳ و ۱ می‌باشد).

در ادامه، نتایج نهایی مهم‌ترین خواسته‌ها و الزامات فنی مرتبط با هر یک از نیازمندی‌ها، به‌صورت جدول ۹ به‌دست آمده است. برای مثال در جدول مذکور، وزن مطلق «طراحی براساس اصول ارگونومی» از مجموع حاصل ضرب وزن نسبی نیازهای مشتریان در "حرکت نرم"، "راحتی و آرامش" و "عمر و دوام" در مقادیر عددی آن‌ها در جدول ۶ به‌صورت زیر به‌دست‌آمده است:

$$1/738 = (0.73 \times 1) + (0.113 \times 9) + (0.072 \times 9)$$

همچنین، وزن نسبی این مشخصه فنی، به‌صورت

$$1/739 = 0.75 / 23.074$$

جدول ۵- محاسبات مربوط به تعیین اهمیت اولیه نیازها و نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی

Table 5- Primary important and inconsistency rate of needs and comparison calculations

نیازمندی‌های مشتریان Customer needs	اوزان اولیه Initial weights	WSV	CV	max	II	IR
قیمت پایین تراکتور Tractor's low price	0.167	1.742	10.39	11.458	0.145	0.097
کیفیت قطعات مورد استفاده Quality of used parts	0.260	2.952	11.320			
عمر و دوام محصول Life and durability of product	0.075	0.926	12.295			
راحتی و آرامش در هنگام کار Peace and comfort during work	0.083	0.791	9.440			
ایجاد اتاقک Creating operator cabin	0.024	0.265	10.984			
میزان مصرف سوخت Fuel consumption	0.086	1.323	15.254			
ضمانت و گارانتی محصول Warranty and maintenance	0.171	1.289	7.499			
دسترسی آسان به قطعات Easy access to components	0.026	0.277	10.416			
پاسخ‌گویی سریع سیستم ترمز Fast respond of brake system	0.032	0.347	10.544			
حرکت نرم و کوبش کمتر Smooth movement and less knocking	0.069	1.149	16.439			

جدول ۶- الزامات و مشخصه‌های فنی و ارتباط آن‌ها با نیازمندی‌های مشتریان

Table 6- Technical specifications and their relations with customer requirements

نیازمندی‌های مشتریان Customer needs الزامات و مشخصه‌های فنی Technical requirements and specifications	عمر و دوام Life and durability	راحتی و آرامش Peace and comfort	ایجاد اتاقک Creating operator cabin	مصرف سوخت Fuel consumption	ضمانت و گارانتی Warranty and maintenance	دسترسی آسان به قطعات Easy access to components	سیستم ترمز Brake system	حرکت نرم Smooth movement	کیفیت قطعات Quality of parts	قیمت پایین تراکتور Low price of parts
به‌روزرسانی طرح‌های قدیمی تراکتورهای موجود Updating of old tractor designs										
پایین آوردن هزینه سربار و هزینه‌های جانبی دیگر Decreasing overhead costs and other ancillary expenditures										
کیفیت مونتاژ Quality of assembly										
استفاده از تأمین‌کنندگان دارای دانش روز Using up to date suppliers										
به‌روزرسانی طراحی بدنه Updating body design										
قیمت مواد اولیه Raw material price										
سیستم مناسب سوخت‌رسانی Appropriate fuel system										
توسعه نمایندگی‌های فروش Sales agencies development										
طراحی براساس اصول ارگونومی Ergonomic design										
مصرف اقتصادی سوخت Economic fuel consumption										
دید خارجی مناسب‌تر More pleasant external view										
سامانه‌های انتقال و مانور مناسب Transmission systems and good maneuverability										
سیستم تعلیق (ترمز) مناسب Suitable suspension (brakes) system										
واردات قطعات از کشورهای پیشرفته از لحاظ فناوری Importing parts from advanced countries from technology aspect										
کنترل کیفیت مناسب تأمین‌کننده Appropriate quality control of supplier										

بتوان روش کار و نتایج آن را با این تحقیق مقایسه نمود، توسط محققین مشاهده نشده است.

در ادامه، مشخصه‌ها و الزامات فنی مرتبط با هرکدام از نیازمندی‌های مشتریان تعیین شده است. سپس، با اعمال نسبت بهبود و ضریب تصحیح، اهمیت نهایی هر یک از خواسته‌ها و نیازمندی‌های مشتریان تعیین گردیده و اولویت‌بندی آن‌ها براساس وزن‌های نسبی انجام شده است. در نهایت وزن مطلق و وزن نسبی هر یک از مشخصه‌ها و الزامات فنی مرتبط با هرکدام از نیازمندی‌های مشتریان تعیین و این مشخص‌ها نیز اولویت‌بندی شده‌اند. درخصوص مقایسه نتایج حاصله از تحقیق حاضر با تحقیقات مشابه داخلی و خارجی، تا زمان انجام تحقیق حاضر، تحقیقی که

جدول ۷- اوزان شاخص‌های توسعه و بهبود محصول در راستای فراهم آوردن خواسته‌ها و نیازمندی‌های مشتریان

Table 7- Product development and improvement index weights for obtaining customer demands and needs

	قیمت پایین Low price	کیفیت قطعات Quality of parts	حرکت نرم Smooth movement	سیستم ترمز Brake system	دسترسی آسان به قطعات Easy access to components	ضمانت و گارانتی Warranty and maintenance	مصرف سوخت Fuel consumption	ایجاد اتاقک Creating operator room	راحتی و آرامش Peace and comfort	عمر و دوام Life and durability	
ضریب تصحیح Correction coefficient	1.2	1.5	1	1	1	1.5	1.2	1	1.2	1	
نسبت بهبود Improvement scale	1.11	1.26	1.87	1.46	0.63	1.13	2.09	1.74	2.02	1.73	
برنامه سازمان Organization program	6.1	7.8	8.8	7	5.5	6.8	9	8.7	8.5	8.3	مجموع اوزان
وضعیت رقیب ۱ Competitor 1 situation	3	7.8	8.8	7	5.5	6.8	9	8.7	8.5	8.3	
وضعیت رقیب ۲ Competitor 2 situation	6.1	3.2	2	5.3	3.7	3.2	3.8	1.1	2.4	4.2	
سازمان (وضعیت کنونی) Present situation of organization	5.5	6.2	4.7	4.8	8.7	6	4.3	5	4.2	4.8	
اهمیت اولیه نیازمندی‌ها از نظر مشتریان Primary importance of needs on customer view	0.167	0.260	0.069	0.032	0.026	0.171	0.086	0.024	0.083	0.075	
اوزان مطلق نیازمندی‌های مشتریان Absolute weights of customer needs	0.222	0.491	0.129	0.047	0.016	0.290	0.216	0.042	0.201	0.130	1.784
اوزان نسبی نیازمندی‌های مشتریان Relative weights of customer needs	0.124	0.275	0.072	0.026	0.009	0.162	0.121	0.024	0.113	0.073	1

جدول ۸- نتایج نهایی اولویت‌بندی نیازهای مشتریان در تکنیک گسترش عملکرد کیفی

Table 8- Final results of demands by QFD

نام نیازمندی Needs	اوزان نسبی نیازهای مشتریان Relative weights of customer needs	اولویت Priority
کیفیت قطعات Quality of parts	0.275	1
ضمانت و گارانتی Warranty and maintenance	0.162	2
قیمت پایین تراکتور Low price	0.124	3
مصرف سوخت Fuel consumption	0.121	4
راحتی و آرامش Peace and comfort	0.113	5
عمر و دوام Life and durability	0.073	6
حرکت نرم و کوبش کمتر Smooth movement	0.072	7
پاسخگویی سریع سیستم ترمز Fast respond of brake system	0.026	8
ایجاد اتاقک Creating operator room	0.024	9
دسترسی آسان به قطعات Easy access to components	0.009	10

جدول ۹- مهم‌ترین خواسته‌ها و الزامات فنی مرتبط با هریک از نیازمندی‌ها

Table 9- The most important needs and related technical requirements to each needs

مشخصه‌های فنی Technical specifications	اوزان مطلق Absolute weights	وزن نسبی Relative weights	اولویت Priority
به‌روزرسانی طرح‌های قدیمی تراکتورهای موجود Updating old tractor designs	1.964	0.096	3
پایین آوردن سربار و هزینه‌های جانبی Decreasing overhead costs and other ancillary expenditures	1.116	0.054	9
کیفیت مونتاژ Quality of assembly	0.657	0.032	12
استفاده از تأمین‌کنندگان یا دانش روز Using up to date suppliers	2.532	0.124	2
به‌روزرسانی طراحی بدنه Updating body design	1.257	0.061	8
قیمت مواد اولیه Raw material price	1.914	0.094	4
سیستم مناسب سوخت‌رسانی جهت افزایش قدرت و سرعت موتور Appropriate fuel system	1.089	0.053	11
توسعه نمایندگی‌های فروش Sales agencies development	1.539	0.075	7
طراحی براساس اصول ارگونومی Ergonomic design	1.738	0.085	5
مصرف اقتصادی سوخت Economic fuel consumption	1.089	0.053	10
دید خارجی مناسب‌تر More pleasant external view	0.185	0.009	15
سامانه‌های انتقال و مانور مناسب Transmission systems and good maneuverability	1.665	0.081	6
سیستم تعلیق (ترمز) مناسب Suitable suspension (breaks) system	0.234	0.011	14
واردات قطعه از کشورهای پیشرفته در زمینه‌ی تولید تراکتور Importing parts from advanced countries	0.462	0.022	13
کنترل کیفیت مناسب قطعات تولیدی Appropriate quality control of supplier	2.907	0.142	1
جمع Sum	20.348	1	-

عملکرد کیفی، اولویت نیازهای مشتریان تراکتور را در جهت رضایت مشتریان شناسایی و اهمیت هریک از نیازهای مشخص شده را برحسب مشخصه‌های فنی تولید محصول تعیین کرد. آنچه که مسلم است آن است که کسب اطلاعات فوق فرآیندی دقیق و تخصصی می‌باشد و در صورت عدم استفاده از ابزاری نظام‌مند و ساختار یافته‌ای همچون تکنیک گسترش عملکرد کیفی، تمامی خواسته‌ها و انتظارات مشتریان در فرآیندهای تولیدی مدفون می‌گردند؛ البته به‌نظر می‌رسد که شرکت تراکتورسازی ایران، در این راستا اقداماتی لازم (ولی ناکافی) جهت بهبود تراکتور تولیدی در راستای نیازها و خواسته‌های مشتریان خود انجام داده است که جای بسی تأمل می‌باشد؛ برای حصول موفقیت در این جریان، مدیران و تصمیم‌گیران بایستی آگاه باشند که هرچه قدر به مشتریان و نیازهای آنان به‌عنوان یک پایه تولید محصول تراکتور توجه داشته باشند، کیفیت تراکتور تولیدی آنان روز به روز قابل قبول‌تر و رقابتی‌تر خواهد بود.

توجه به این نکته ضروری می‌نماید که مهم‌ترین مزیت و منفعت

شاید نزدیکترین مطالعه به تحقیق حاضر، مطالعه والری و همکاران (۲۰۰۷) باشد که با هدف بررسی تصمیم خرید مشتریان تراکتور از میان چند برند معتبر با روش ترکیبی صدای مشتریان انجام شده است (Walley *et al.*, 2007)؛ مطالعه دیگری نیز توسط ملمز و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده است که در آن، محققین با استفاده از ترکیبی از روش‌های تریز^۱ و تکنیک گسترش عملکرد کیفی، نوعی کشنده‌ی الوار برای تراکتور را با بهره‌گیری مستقیم از نظرات مشتریان تراکتور طراحی نموده‌اند (Melemez *et al.*, 2013). هر دو موضوع مورد اشاره، با هدف و دستاوردهای تحقیق حاضر دارای زاویه آشکاری هستند و نتایج آن‌ها قابل مقایسه با نتایج تحقیق حاضر نمی‌باشد.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت در پژوهش حاضر نشان داده شده است که چگونه می‌توان توسط الگوریتم نظام‌یافته گسترش

مدل‌سازی بهتر و واقعی‌تر از مسئله تحت مطالعه به کمک تکنیک گسترش عملکرد کیفی؛
 استفاده بیشتر از مفاهیم و اصطلاحات رایج در میان مشتریان در خصوص محصول؛
 از بین رفتن فاصله ما بین سطوح تعریف شده برای سطح ارتباط بین مشخصه‌های فنی و خواسته‌های مشتریان؛
 از بین رفتن حساسیت مسئله نسبت به مقیاس استفاده‌شده در ماتریس کیفیت برای تعریف سطح ارتباط؛
 و به‌کارگیری بهینه از مفاهیم و اصطلاحات رایج در میان مشتریان در خصوص محصول در جهت تأمین رضایت آن‌ها.

استفاده از تکنیک گسترش عملکرد کیفی، دعوت از سازمان به تفکر و فرهنگ «کیفیت‌گرایی عملی» و گسترش آن در تمامی سطوح کاری می‌باشد. به‌گواه بسیاری از کارشناسان، مشاوران و سازمان‌هایی که از تکنیک گسترش عملکرد کیفی استفاده کرده‌اند (مانند شرکت تویوتا^۱ و میتسوبیشی^۲ در ژاپن و فورد^۳ در آمریکا و نظایر آن در شرکت‌های آلمانی)، هنر تکنیک گسترش عملکرد کیفی در دعوت آن از کارشناسان به «شیوه‌ی تفکر گروهی و جمعی در یک سیر مشخص و نظام‌مند» برای تولید محصولاتی است مطابق با آنچه «مشتری» می‌طلبد و نه آنچه در ذهن «مهندس طراح» است. بنابراین، مهم‌ترین منافع استفاده از تکنیک گسترش عملکرد کیفی در مراحل تولید، عملیات، طراحی و بازاریابی را می‌توان به‌صورت زیر فهرست نمود:

References

1. Amalnik, M. S., A. Rokoei, and M. H. Kholusi. 2013. Presenting the QFD-DEA Approach to Prioritizing the EFQM Improvement in High Level Technology Organizations in international conference of industrial engineering. (In Farsi).
2. Benner, M., A. R. Linnemann, W. M. F. Jongen, and P. Folstar. 2003. Quality Function Deployment (QFD)-can it be used to develop food products? *Food Quality and Preference* 14: 327-339.
3. Bevilacqua, M., and M. Braglia. 2000. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety* 70: 71-83.
4. Bouchereau, V., and H. Rowlands. 2000. Quality function deployment: the unused tool. *Engineering Management Journal* 10.
5. Carnevali, J. A., and P. C. Miguel. 2008. Review, analysis and classification of the literature on QFD-Types of research, difficulties and benefits. *International Journal of Production Economics* 114: 737-754.
6. Chan, L. K., and M. L. Wu. 2002. Quality function deployment: A literature review. *European Journal of Operational Research* 143: 463-497.
7. Chang, C. C., and C. M. Wang. 2012. Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17: 185-189.
8. Cheng, C. C., C. I. Yang, and C. Sheu. 2014. The link between eco-innovation and business performance: a Taiwanese industry context. *Journal of Cleaner Production* 64: 81-90.
9. Chow, C. K. W. 2014. Customer satisfaction and service quality in the Chinese airline industry. *Journal of Air Transport Management* 35: 102-107.
10. Chuang, P. T. 2001. Combining the analytic hierarchy process and quality function deployment for a location decision from a requirement perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18: 842-849.
11. Costa, A., M. Dekker, and W. Jongen. 2000. Quality function deployment in the food industry: a review. *Trends in Food Science and Technology* 11: 306-314.
12. Dale, B. H. 2003. *Total Quality Management, Revised 3rd ed*, Anna University. Pearson Education Inc, Prentice Hall.
13. Eureka, W. E., and N. E. Ryan. 2006. *The Customer-Driven Company: Managerial Perspectives QFD*. ASI Press Dearborn MI. Southeastern Michigan, USA.
14. Fung, R. Y., Y. Chen, and J. Tang. 2006. Estimating the functional relationships for quality function

1- TOYOTA

2- MITSUBISHI

3- FORD

- deployment under uncertainties. *Fuzzy Sets and Systems* 157: 98-120.
15. Griffin, A. 1992. Evaluating QFD's use in US firms as a process for developing products. *Journal of Product Innovation Management* 9: 171-187.
 16. Kahraman, C., T. Ertay, and G. Büyüközkan. 2006. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach. *European Journal of Operational Research* 171: 390-411.
 17. Lam, J. S. L. and K. H. Lai. 2014. Developing environmental sustainability by ANP-QFD approach: the case of shipping operations. *Journal of Cleaner Production*.
 18. Martins, A., and E. M. Aspinwall. 2001. Quality function deployment: an empirical study in the UK. *Total Quality Management* 12: 575-588.
 19. Melemez, K., G. Di Gironimo, G. Esposito, and A. Lanzotti. 2013. Concept design in virtual reality of a forestry trailer using a QFD-TRIZ based approach. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 37: 789-801.
 20. Poorhesomi, M. H., A. Arshadi Khamse, and Y. Ghorbanzadeh. 2013. Combining Kano Model of Quality Function Development Extension for Identifying and Prioritizing the Optimized Criteria from Customers' Bank Selection. In 2th International Conference of Management, Entrepreneurship and Economic Development. Tehran. (In Farsi).
 21. Rezaei, K., and H. Hosseini Ashtiani, and M. Hooshyar. 2001. QFD, an Customer Oriented Approach to Production's Planning and Quality Improvement. Tehran. R. W. Tuw and Atena Publication.
 22. Segoro, W. 2013. The influence of perceived service quality, mooring factor, and relationship quality on customer satisfaction and loyalty. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 81: 306-310.
 23. Sener, Z., and E. E. Karsak. 2011. A combined fuzzy linear regression and fuzzy multiple objective programming approach for setting target levels in quality function deployment. *Expert Systems with Applications* 38: 3015-3022.
 24. Shillito, M. L. 1994. *Advanced QFD: linking technology to market and company needs*. John Wiley & Sons.
 25. Walley, K., P. Custance, S. Taylor, A. Lindgreen, and M. Hingley. 2007. The importance of brand in the industrial purchase decision: a case study of the UK tractor market. *Journal of Business & Industrial Marketing* 22: 383-393.
 26. Wang, X. T., and W. Xiong. 2011. An integrated linguistic-based group decision-making approach for quality function deployment. *Expert Systems with Applications* 38: 14428-14438.
 27. Zaim, S., M. Sevkli, H. Camgöz-Akda , O. F. Demirel, A. Y. Yayla, and D. Delen. 2014. Use of ANP weighted crisp and fuzzy QFD for product development. *Expert Systems with Applications* 41: 4464-4474.

Identifying and prioritizing customer requirements from tractor production by QFD method

H. Taghizadeh^{1*} - M. Ziyaei Hajipirlu² - V. Khederli³ - B. Shamsi⁴

Received: 02-05-2015

Accepted: 28-10-2015

Introduction

Discovering and understanding customer needs and expectations are considered as important factors on customer satisfaction and play vital role to maintain the current activity among its competitors, proceeding and obtaining customer satisfaction which are critical factors to design a successful production; thus the successful organizations must meet their needs containing the quality of the products or services to customers. Quality Function Deployment (QFD) is a technique for studying demands and needs of customers which is going to give more emphasis to the customer's interests in this way. The QFD method in general implemented various tools and methods for reaching qualitative goals; but the most important and the main tool of this method is the house of quality diagrams. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a famous and common MADM method based on pair wise comparisons used for determining the priority of understudied factors in various studies until now. With considering effectiveness of QFD method to explicating customer's demands and obtaining customer satisfaction, generally, the researchers followed this question's suite and scientific answer: how can QFD explicate real demands and requirements of customers from tractor final production and what is the prioritization of these demands and requirements in view of customers. Accordingly, the aim of this study was to identify and prioritize the customer requirements of Massey Ferguson (MF 285) tractor production in Iran tractor manufacturing company with t- student statistical test, AHP and QFD methods.

Materials and Methods

Research method was descriptive and statistical population included all of the tractor customers of Tractor Manufacturing Company in Iran from March 2011 to March 2015. The statistical sample size was 171 which are determined with Cochran index. Moreover, 20 experts' opinion has been considered for determining product's technical requirements. Literature and theoretical bases of this study have been collected with research paper tab and the research data has been collected through four researcher-made questionnaires and interview tools. The questionnaire Type 1, used for determining the most important demands and needs of customers based on five choices Likert scale. The questionnaire Type 2 was for gathering data requirements to hierarchical AHP method, and the questionnaire Type 3 was for doing some evaluation about organization's present situation related with competitor's situation based on customer's demands and needs; and the questionnaire Type 4 had been implemented for finding technical requirement weights respect to customer's demands and needs. The reliability of the type 1, 3 and 4 questionnaires determined by Chronbach's Alpha method; after gathering required data for mentioned statistical test, these questionnaires' reliability rates are obtained: 0.768, 0.784 and 0.793, respectively. As well as, the validity of the questionnaires has been examined with content validity method. In this research, for analyzing the gathered data, while taking into account the different stages of QFD method, t- student statistical test was used for identifying the needs and demands of customers, and AHP was used for determining the priority of needs and demands of customers.

Results and Discussion

The results of one sample t-test for identifying the customer's most important demands and needs showed that the factors such as: producing low price tractor, the quality of used auto-parts, sustainability and long-lasting the final production (production life and durability), comfort and peace during work, creating operator cabin,

1- Professor, Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3, 4- M.Sc. Graduated Student of Industrial Engineering and Technical Expert of Iran Tractorsazi Company

(*- Corresponding Author Email: Taghizadeh@iaut.ac.ir)

easy access to spare components, the amount of fuel consumption, warranty and maintenance, easy access to official repair stations, technical experts and suitable auto-parts, fast respond of brake system during braking and smooth moving identified the important demands and needs of customers. The results of AHP method for determining primary priorities of perceived customers needs and demands revealed as follows respectively: quality of parts, warranty and maintenance, low price, fuel consumption, comfort and peace, life and durability, smooth moving, fast respond of brakes, creating operator cabin and easy access to spare components. Finally, the main demands and related technical requirements have been identified and prioritized with QFD method; the Final results of customer demands and needs by QFD method revealed this prioritization: Quality of Parts, Warranty And Maintenance, low price, Fuel Consumption, Peace and Comfort, Life and Durability, Smooth Movement and lower engine knocking, Fast Respond of Braking System, Creating Operator Room and Easy Access to Components.

Conclusions

Without any doubt it is obvious that the obtaining customer satisfaction is the most important strategic tool for having successful and highly developed industry in this era. Knowing the customer demands and needs can lead the organization to enhance competitive advantages. This research showed that how could use structured QFD method for identifying prioritization of tractor customer demands and needs for maintain their satisfaction, and identifying importance of each demands, considering the production techniques.

Keywords: Customer needs, Quality, Quality Function Deployment (QFD), Technical specifications, Tractor

تجزیه و تحلیل سهم نهاده‌های مختلف و تعیین شاخص‌های انرژی در تولید مرغ گوشتی

شهرستان مشهد

حسن صدرنیا^{۱*} - مهدی خجسته پور^۲ - حسن عاقل^۳ - عباس سعیدی رشک علیا^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶

چکیده

صنعت طیور یکی از بزرگ‌ترین و توسعه‌یافته‌ترین صنایع موجود در کشور است و میزان انرژی مصرفی در مرغداری یکی از مهم‌ترین مسائل در پرورش مرغ گوشتی می‌باشد. تحقیق حاضر به بررسی روند مصرف انرژی و میزان مصرف آن در مرغداری‌های پرورش مرغ گوشتی در شهرستان مشهد می‌پردازد. اطلاعات مورد نیاز این تحقیق از طریق پرسش‌نامه و مصاحبه حضوری با ۳۶ پرورش‌دهنده مرغ گوشتی برای یک دوره پرورش در ماه‌های فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۲ جمع‌آوری شد. نهاده‌های اصلی ورودی شامل خوراک مصرفی، سوخت (گاز و گازوئیل)، الکتریسیته، نیروی انسانی، ماشین‌ها و جوجه یک روزه گوشتی و نهاده‌های خروجی گوشت مرغ و فضولات بستر بودند. کل انرژی‌های ورودی و خروجی برای هزار قطعه مرغ به ترتیب ۱۲۵/۲ و ۲۴/۹ گیگاژول به دست آمد. شاخص‌های انرژی شامل نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی ویژه به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۲ و ۰/۱۹ کیلوگرم بر مگاژول و ۵۲ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمدند. سوخت مصرفی (گاز و گازوئیل) با ۵۰/۸۴ و خوراک مصرفی با ۴۲/۴۳ درصد بیشترین سهم و جوجه یک روزه با ۰/۳۹ و نیروی انسانی با ۰/۰۶ درصد کم‌ترین سهم را در بین نهاده‌های ورودی به خود اختصاص دادند. مقایسه انرژی مصرفی در سه سطح جوجه‌ریزی کمتر از ۱۵۰۰۰ قطعه، ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ و بیشتر از ۳۰۰۰۰ قطعه نشان داد که نسبت انرژی در سطح سوم بیشتر از سطوح دیگر می‌باشد. کارایی مرغداران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها انجام شد و نتایج نشان داد که در الگوی بازگشت به مقیاس ثابت تعداد ۱۳ واحد دارای کارایی فنی با میانگین کارایی ۰/۹۳ و در الگوی بازگشت به مقیاس متغیر تعداد ۲۱ واحد دارای کارایی فنی خالص با میانگین کارایی ۰/۹۹ بودند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی انرژی، کارایی فنی، مصرف سوخت

مقدمه

این مدیریت به یک تراز نیازمند است. تراز انرژی در کشاورزی از تجزیه و مقایسه انرژی‌های ورودی و خروجی در یک نظام کشاورزی به دست می‌آید (Biermann et al., 1999). انرژی در صنعت مرغ گوشتی به شکل‌های مختلف مصرف می‌شود. به طور متوسط ۵ درصد از کل منابع انرژی در جوامع مختلف را مصرف می‌کند که با در نظر گرفتن تلفات این سهم به ۱۶ تا ۲۰ درصد نیز افزایش می‌یابد (Fluck, 1999). در ایران مصرف سرانه گوشت مرغ از ۱۳/۳ کیلوگرم در سال ۱۳۸۰ به ۲۵/۹ کیلوگرم در سال ۱۳۹۰ افزایش یافته است (FAO, 2014). این آمار نشان می‌دهد که در رژیم غذایی خانوارهای ایرانی گوشت مرغ به کالایی راهبردی تبدیل شده است. صنعت طیور از بزرگ‌ترین صنایع ایران می‌باشد و با افزایش جمعیت و افزایش تقاضای گوشت سفید توسعه این صنعت امری ضروری به نظر می‌رسد. مطالعاتی در زمینه بررسی مصرف انرژی در مرغداری‌ها صورت گرفته است که به چند نمونه اشاره می‌شود.

در تحقیقی برای اندازه‌گیری کارایی فنی واحدهای تولید مرغ

امروزه بخش کشاورزی به منظور پاسخ‌گویی به نیاز غذا برای جمعیت رو به رشد کره زمین و فراهم کردن مواد غذایی کافی و مناسب، به میزان زیادی وابسته به مصرف انرژی می‌باشد. توجه به منابع طبیعی محدود و اثرات سوء ناشی از استفاده نامناسب از منابع مختلف انرژی روی سلامتی انسان و محیط زیست، لزوم بررسی الگوهای مصرف انرژی را در بخش کشاورزی حیاتی ساخته است (Hatrili et al., 2005). با توجه به این فاکتورها احتیاج به یک مدیریت انرژی در کشاورزی بیش از پیش احساس می‌شود، لذا برای

۱، ۲ و ۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول: (Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دارای کارایی فنی بیشتر از ۹۰ درصد می‌باشند که وضعیت مناسب این واحدها از لحاظ کارایی نشان می‌دهد (Mojarad et al., 2009). اندازه‌گیری کارایی و بازدهی نسبت به مقیاس واحدهای پرورش جوجه گوشتی در استان همدان توسط فطرس و سلگی (۲۰۰۳) انجام شد. آن‌ها گزارش دادند که مقدار کمینه، بیشینه و میانگین کارایی فنی نسبت به بازده متغیر به ترتیب ۱۲/۷، ۱۰۰ و ۶۴/۴ درصد است. همچنین نتایج تحقیق آنان نشان داد کارایی فنی ۱۶/۵ درصد واحدها (۱۴ واحد) و ۴۲/۳۵ درصد واحدها (۲۶ واحد) به ترتیب بیشتر از ۹۰ درصد و ۷۰ درصد است (Fotros and Salgi, 2003). کاربرد تحلیل پوششی داده‌های کراندار در بررسی کارایی واحدهای مرغداری (مطالعه موردی خراسان جنوبی) توسط بلالی و اصفهانی انجام شد. آنان کارایی ۳۰ واحد فعال مرغداری را مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند که میانگین کارایی واحدهای مرغداری براساس معیار نهاده محور ۸۳ درصد بوده و بیش از ۵۶ درصد واحدها دارای کارایی پایین‌تر از میانگین می‌باشند (Esfahani and Balali, 2014) در مطالعه دیگری عوامل مؤثر بر کارایی تکنیکی (فنی) واحدهای مرغداری گوشتی شهرستان سقز و کلیایی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه اطلاعات ۱۰۰ واحد مرغداری گوشتی مستقر در شهرستان سقز و کلیایی استان کرمانشاه از طریق پرسش‌نامه جمع‌آوری گردید. میانگین کارایی تکنیکی (فنی) ۸۲/۱۷ درصد محاسبه شد. همچنین گزارش دادند اختلاف بین کارآمدترین و ناکارآمدترین واحد مرغداری در تحقیق ایشان ۳۰/۷۸ درصد می‌باشد که از تفاوت بین واحدهای مرغداری از نظر تخصیص منابع و نهاده‌ها در تولید گوشت مرغ حکایت می‌کند. اختلاف کارایی نتیجه تفاوت در مدیریت منابع و روش‌های تولید است که خود از عوامل اجتماعی-اقتصادی مختلفی ناشی می‌گردد که به‌عنوان عوامل مؤثر بر ناکارایی مورد بررسی قرار گرفتند (Dashti et al., 2004).

استان خراسان رضوی از لحاظ تعداد مرغداری پرورش مرغ گوشتی در کشور پس از استان‌های اصفهان و مازندران در رتبه سوم قرار دارد (Statistical Center of Iran, 2012). به دلیل مهم بودن مسئله مصرف انرژی در مرغداری و عدم وجود اطلاعات مربوط به مصرف انرژی مرغداری‌های شهر مشهد این تحقیق صورت گرفته است. در این تحقیق از روش تحلیل پوششی داده‌ها به‌منظور آنالیز داده‌های مربوط به پرورش مرغ گوشتی در شهرستان مشهد استفاده شده است. هدف از این کار تفکیک واحدهای کارآ از ناکارآ، روش استفاده درست از منابع انرژی و تعیین میزان کل انرژی قابل صرفه‌جویی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در سال ۱۳۹۲ در شهر مشهد انجام شد. داده‌های این

گوشتی در مناطق مرکزی عربستان سعودی از تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شد. در این مطالعه مشخص گردید که بسیاری از واحدهای تحت مطالعه پایین‌تر از ظرفیت کامل عمل می‌کردند. ستانده در این پژوهش مقدار مرغ تولید شده برحسب کیلوگرم در هر دوره و نهاده شامل ظرفیت جوجه‌ریزی در هر دوره، مقدار خوراک مصرفی، سایر هزینه‌های متغیر به‌استثنای دو نهاده اول و هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری نظیر تجهیزات و سالن بود. این نتایج نشان داد که میانگین کارایی واحدهای کوچک ۸۳٪ و میانگین کارایی واحدهای بزرگ ۸۸٪ است (Alrwis and Francis, 2003).

مطالعه‌ای جهت تجزیه و تحلیل انرژی در مرغداری با ظرفیت‌های مختلف در ترکیه انجام شد. اطلاعات به‌دست آمده شامل شروع و پایان دوره، تعداد جوجه گوشتی وارد و خارج شده برای فروش، وزن زنده قبل از کشتار، وزن لاشه، مصرف خوراک برای شروع و رشد و پایان کار، نیروی کارگری، دارو و واکسن و ماده ضدعفونی کننده بودند و نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش ظرفیت مرغداری بدون تغییر در نوع سامانه و در شرایط یکسان می‌تواند انرژی مصرفی در هر واحد تولید را کاهش دهد (Atilgan and Hayati, 2006).

در بررسی واحدهای تخم‌گذار یکی از ایالات نیجریه واحدها به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شدند و با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها محاسبه کارایی صورت گرفت. سپس با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات خطا، بررسی عواملی نظیر سابقه کار و میزان آموزش‌های ارائه شده بر کارایی انجام گرفت و رابطه معنی‌داری بین ظرفیت تولید مرغ و میزان کارایی هریک از واحدها به‌دست آمد. همچنین اعلام شد واحدهای تولیدی بزرگ‌تر به دلیل صرفه‌جویی ناشی از مقیاس دارای نمرات کارایی بالاتری هستند (Yusuf and Malom, 2007).

بهبود کارایی انرژی یک شاخص کلیدی برای مدیریت انرژی پایدار است. برای افزایش کارایی انرژی باید عملکرد را افزایش داد یا انرژی‌های ورودی را بدون تأثیر بر روی عملکرد کاهش داد (Singh et al., 2004). چندین روش پارامتری و ناپارامتری برای اندازه‌گیری کارایی تولید وجود دارد. تحلیل پوششی داده‌ها یک روش غیرپارامتری است که به‌طور گسترده در بسیاری از تنظیمات برای اندازه‌گیری بهره‌وری و تعیین معیار واحد تصمیم‌گیری (DMU) استفاده می‌شود.

در یک مطالعه موردی در استان سیستان و بلوچستان ایران کارایی فنی ۴۱ واحد فعال مرغداری به کمک تحلیل پوششی داده‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد اغلب واحدهای مرغداری از لحاظ فنی، کارا بوده و میانگین کارایی واحدهای مورد مطالعه ۹۴ درصد گزارش شد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد کارایی فنی تمامی واحدهای مرغداری بالای ۷۰ درصد است و ۷۰ درصد از این واحدها (۲۹ واحد)

نمونه از رابطه (۱) استفاده شد (Cochran, 1997).

$$n = \frac{N(t.s)^2}{Nd^2 + (t.s)^2} \quad (1)$$

که در آن n حجم نمونه (تعداد مرغداری‌های مورد مطالعه)، N اندازه جامعه آماری که ۱۰۱ واحد پرورش مرغ گوشتی شهرستان مشهد در نظر گرفته شد، t ضریب اطمینان قابل قبول که با فرض نرمال بودن از جدول t استیودنت به دست می‌آید که مقدار آن ۱/۹۶، S برآورد واریانس صفت مورد مطالعه که مقدار آن ۳/۶۴ و d دقت احتمالی مطلوب که سطح ۹۵ درصد می‌باشد.

تحقیق توسط پرسش‌نامه و مصاحبه حضوری با ۳۶ مرغدار که به پرورش مرغ گوشتی مشغول بودند در ماه‌های فروردین و اردیبهشت جمع‌آوری شد. اطلاعات پرسش‌نامه شامل اطلاعاتی از قبیل اطلاعات ساختمان و سالن پرورش، تعداد و ظرفیت سالن، تعداد جوجه‌ریزی، خوراک مصرفی، تأسیسات و ماشین‌آلات، میزان سوخت و برق مصرفی، نیروی کارگری، کود بستر، وزن زنده مرغ بود. انرژی‌های ورودی شامل خوراک مصرفی، سوخت، الکتریسیته، نیروی انسانی، ماشین‌ها و جوجه یک روزه گوشتی استفاده شده برای یک دوره کامل در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و انرژی‌های خروجی شامل گوشت مرغ و کود بستر در پایان یک دوره بودند. برای به دست آوردن حجم

جدول ۱ - معادل نهاده‌ها و ستانده‌های انرژی در پرورش مرغ گوشتی

Table 1- Energy equivalents of inputs and outputs in broiler production

منبع Reference	انرژی معادل (MJ Unit ⁻¹) Energy equivalent	واحد Unit	نهاده‌های انرژی Energy inputs
(Najafi-Anari <i>et al.</i> , 2008)	33.10	کیلوگرم kg	جوجه Chick
(Kitani <i>et al.</i> , 1999)	8.47	لیتر L	سوخت دیزل Diesel fuel
(Kitani <i>et al.</i> , 1999)	5.49	مترمکعب m ³	گاز Gas
(Atilgan and Hayati, 2006)	9.7	کیلوگرم kg	خوراک Feed
(Atilgan and Hayati, 2006)	6.12	کیلوگرم kg	ذرت Corn
(Najafi-Anari <i>et al.</i> , 2008)	7.13	کیلوگرم kg	سویا Soya
(Alrwis and Francis, 2003)	10	کیلوگرم kg	گندم Wheat
(Heidari <i>et al.</i> , 2011)	96.1	کیلوگرم فسفات kg	دی کلسیم فسفات CaHPO ₄
(Heidari <i>et al.</i> , 2011)	6.3	ساعت hr	نیروی انسانی Human labor
(Heidari <i>et al.</i> , 2011)	6.3	کیلو وات ساعت kWh	الکتریسیته Electricity
(Chauhan <i>et al.</i> , 2006)	7.62	کیلو وات ساعت kWh	ماشین‌ها Machinery
(Chauhan <i>et al.</i> , 2006)	8.64	کیلوگرم kg	فولاد Steel
(Chauhan <i>et al.</i> , 2006)	8.64	کیلوگرم kg	موتور الکتریکی Electromotor
(Kittle, 1993)	3.46	کیلوگرم kg	پلی اتیلن PE
(Celik and Ozturkcan, 2003)	33.10	کیلوگرم kg	گوشت مرغ Chicken meat
(Kizilaslan, 2009)	3.0	کیلوگرم kg	کود مرغ Manure

(2011).

DEA کارایی را در سه تعریف متفاوت ارائه می‌دهد که از رابطه (۲) پیروی می‌کند.

(۲) کارایی مقیاس \times کارایی فنی خالص = کارایی فنی کارایی مقیاس، بیانگر نسبت کارایی فعلی یک واحد به کارایی در مقیاس بهینه آن واحد تولیدی است. کارایی که توسط مدل CRS^2 اندازه‌گیری می‌شود، کارایی فنی نامیده می‌شود و متأثر از مقیاس و اندازه نیست. از طرف دیگر مدل VRS^3 کارایی فنی خالص را که متأثر از تغییر کارایی مقیاس می‌باشد، نشان می‌دهد. در حقیقت فرمول‌های فوق آنالیز کارایی و همچنین منابع کارایی را نشان می‌دهد و علت ناکارایی را مشخص می‌کند (Bahrami et al., 2011).

اطلاعات جمع‌آوری شده توسط پرسش‌نامه‌ها با استفاده از روش DEA و با بهره‌وری از نرم‌افزار EMS^4 تجزیه و تحلیل شده و مرغداری‌های کارآ و ناکارآ مشخص گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با مدل چارنر، کوپر و رودز (CCR^5) و مدل بنکر، چارنر و کوپر (BCC^6) انجام شده است. مدل CCR توسط چارنر، کوپر و رودز در سال ۱۹۸۷ ارائه شد، آن‌ها با استفاده از روش موزون، کارایی نسبی واحدهای سازمانی را که چندین ورودی و خروجی دارند، مورد اندازه‌گیری و مقایسه قرار دادند. مدل BCC در سال ۱۹۸۴ توسط بنکر، چارنر و کوپر با تغییر در مدل CCR ارائه شد که به ارزیابی کارایی نسبی واحدهایی با بازده متغیر نسبت به مقیاس می‌پردازد. ابتدا داده‌ها در نرم‌افزار اکسل دسته‌بندی شد و سپس توسط نرم افزار EMS برای هر مدل یک مرتبه تحلیل انجام شد.

نتایج و بحث

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده کل انرژی ورودی و خروجی در یک دوره پرورش مرغ گوشتی به‌ترتیب ۱۲۵/۲ و ۲۴/۹ گیگاژول برای هزار قطعه مرغ به‌دست آمد. نتایج نشان داد سوخت مصرفی که برای گرمایش سالن‌ها استفاده می‌شد با ۵۰/۸۴ درصد (۴۲/۵۷ درصد گازوئیل و ۸/۲۷ درصد گاز) و مقدار ۶۳۶۵۲ مگاژول بر هزار قطعه بیش‌ترین سهم را در بین نهاده‌های ورودی داشت. به‌طور میانگین برای هر هزار قطعه مرغ ۱۹۳/۳۵ مترمکعب گاز در مرغداری‌هایی که از گاز به‌عنوان سوخت مصرفی استفاده می‌کردند، مصرف شده است. همچنین به‌طور میانگین برای هزار قطعه مرغ مقدار ۱۰۴۰ لیتر

با استفاده از این روش حجم کل نمونه‌ی مورد نیاز ۳۶ واحد برآورده گردید. نمونه‌گیری به‌صورت خوشه‌ای در مرغداری‌ها با ظرفیت کمتر از ۱۵ هزار، ۳۰-۱۵ هزار و بیش از ۳۰ هزار صورت گرفت، تعداد نمونه در هر خوشه براساس درصد‌های هر خوشه مشخص شده در سرشماری مرغداری‌های پرورش مرغ گوشتی ۱۳۸۸، به‌ترتیب ۱۴، ۱۲ و ۱۰ واحد انتخاب گردید. همچنین برای پایایی پرسش‌نامه تحقیق از آماره ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. روش آلفای کرونباخ یکی از روش‌های تعیین پایایی پرسش‌نامه با تأکید بر همبستگی درونی داده‌هاست که در این روش با استفاده از فرمول و داده‌های مورد مطالعه یک ضریب آلفا محاسبه می‌شود که اگر این ضریب بیشتر از ۰/۷ باشد آزمون از پایایی قابل قبولی برخوردار است که در این تحقیق ضریب آلفا برای پرسشنامه‌ها بیش‌تر از ۰/۷ بود که بیانگر حد قابل قبول پایایی پرسش‌نامه‌ها می‌باشد.

محاسبه انرژی مصرفی با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از پرسش‌نامه‌ها و ضرب معادل انرژی مربوط به هر نهاده در میزان مصرف آن نهاده در مرغداری به‌دست آمد. برای معادل ضرایب انرژی مربوط به هر نهاده از جدول ۱ استفاده شد.

با استفاده از ضرایب جدول ۱ و محاسبه مقدار دقیق هر نهاده سهم انرژی مصرفی هر نهاده در مرغداری محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد و اندازه‌گیری کارایی فنی واحدهای تولیدی روش‌های مختلفی وجود دارد که به دو گروه روش‌های پارامتری و غیر پارامتری تقسیم می‌شوند. در روش‌های پارامتری با استفاده از روش‌های مختلف آماری، تابع تولید مشخصی تخمین زده می‌شود. سپس با به‌کارگیری این تابع، نسبت به تعیین کارایی اقدام می‌گردد. گروه دوم روش‌های غیر پارامتری هستند. مهم‌ترین ویژگی روش‌های غیر پارامتری این است که نیاز به توزیع یا شکل خاص تابع ریاضی ندارند. از مهم‌ترین روش‌های غیر پارامتری، تحلیل پوششی داده‌هاست (Taki et al., 2012). بیشترین کاربرد روش غیر پارامتری، براساس مدل DEA^1 انجام شده است. DEA دارای چهار مدل اصلی: بازگشت به مقیاس ثابت، بازگشت به مقیاس متغیر، بازگشت به مقیاس افزایشی و بازگشت به مقیاس کاهش می‌باشد. هر کدام از این مدل‌ها دارای دو جهت مطالعه (خروجی محور - ورودی محور) هستند. مفهوم خروجی محور این است که به چه میزان باید خروجی‌ها را با ثابت نگهداشتن میزان ورودی‌ها افزایش داد تا واحد مورد نظر به مرز کارایی برسد. یعنی بدون نیاز به عوامل تولید بیشتر، می‌توان تولید را به این میزان افزایش داد. مفهوم ورودی محور این است که به چه میزان باید ورودی‌ها را با ثابت نگهداشتن میزان خروجی‌ها، کاهش داد تا واحد مورد نظر به مرز کارایی برسد (Mousavi-avval et al., 2012).

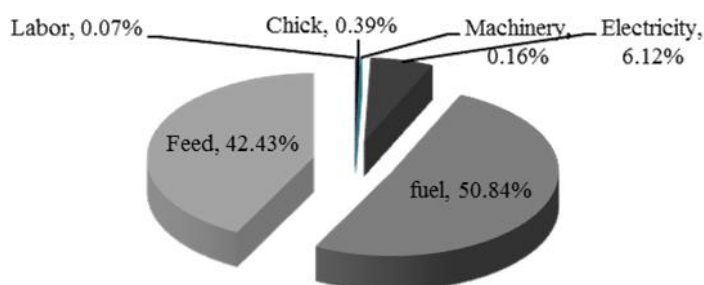
1- Data envelopment analysis (DEA)

- 2- Constant return to scale (CRS)
- 3- Variable return to scale (VRS)
- 4- Efficiency measurement system
- 5 -Charnes, Cooper and Rhodes
- 6- Banker, Charnes and Cooper

اتوماتیک و آب‌خوری با ۰/۱۶ درصد و مقدار ۱۹۶ مگاژول بر هزار قطعه و نیروی انسانی که برای فعالیت‌هایی نظیر دان دادن، آب دادن و نظافت سالن‌ها استفاده می‌شد با ۰/۰۶ درصد و مقدار ۸۶ مگاژول بر هزار قطعه مرغ رتبه‌های بعدی را به خود اختصاص دادند.

نتایج این تحقیق در مقایسه با تحقیق حیدری و همکاران (Heidari et al., 2011) که مصرف انرژی واحدهای مرغداری گوشتی را در استان یزد ماه‌های دی و بهمن بررسی نمودند متفاوت است. آن‌ها گزارش دادند که کل انرژی ورودی ۱۸۶ گیگاژول، مصرف سوخت ۲۳۱۴ لیتر گازوئیل و خوراک مصرفی ۵۵۰۱ کیلوگرم به‌ازای هر هزار قطعه مرغ است. به‌غیر از خوراک مصرفی، مقدار انرژی ورودی و سوخت مصرفی در تحقیق ایشان بیش‌تر از نتایج این تحقیق است که می‌تواند به علت تفاوت در محل واحدهای مرغداری، تجهیزات و سردی هوا در دی و بهمن ماه باشد.

گازوئیل در مرغداری‌هایی که گازوئیل سوخت مصرفی آن‌ها بود، مصرف شد. در تحقیق دیگری که بر روی مصرف انرژی واحدهای تولید مرغ گوشتی در استان البرز در دوره بهمن و اسفند انجام شد، نهاده گازوئیل با مصرف ۱۹۸۱ لیتر به‌ازای ۱۰۰۰ قطعه مرغ و با سهم ۴۳/۰۳ درصدی بیش‌ترین میزان مصرف انرژی را در بین نهاده‌های ورودی به‌خود اختصاص داده بودند (YaminiSefat et al., 2013) که بیشتر از مقادیر این تحقیق است. بعد از سوخت، خوراک مصرفی با ۴۲/۴۳ درصد و مقدار ۵۳۱۲۱ مگاژول بر هزار قطعه بیش‌ترین مصرف انرژی را داشت. برای هر هزار قطعه مرغ مقدار ۴۹۲۲ کیلوگرم خوراک مصرف شده بود. بعد از آن الکتریسیته که برای سامانه تهویه و روشنایی سالن‌ها استفاده می‌شد با ۶/۱۲ درصد و مقدار ۷۶۶۲ مگاژول بر هزار قطعه، جوجه یک روزه با ۰/۳۹ درصد و مقدار ۴۸۹ مگاژول بر هزار قطعه، ماشین‌ها شامل دان‌خوری دستی و



شکل ۱- سهم انرژی نهاده‌های مصرفی در تولید مرغ گوشتی در شهرستان مشهد
 Fig.1. The share of energy inputs in the production of broiler in Mashhad city

استفاده از انرژی برای پرورش مرغ گوشتی در شهرستان مشهد ۰/۲ به‌دست آمد؛ یعنی به‌ازای هریک مگاژول انرژی ورودی ۰/۲ مگاژول انرژی تولید شده است. برای افزایش این شاخص می‌توان عملکرد را افزایش داد یا انرژی ورودی را کاهش و یا هر دو مورد را انجام داد. شاخص شدت انرژی در این تحقیق ۵۲/۵۵ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد که نشان می‌دهد به‌ازای تولید یک کیلوگرم مرغ گوشتی ۵۲/۵۵ مگاژول انرژی مصرف شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در سایر تحقیقات مقدار این شاخص در پرورش مرغ گوشتی در استان البرز ۷۶/۵۹ (YaminiSefat, 2013) و در استان یزد ۷۱/۹۵ (Heidari et al., 2011) به‌دست آمده بود. یکی از دلایل متفاوت بودن بهره‌وری انرژی در این تحقیقات می‌تواند ماه‌های مورد بررسی باشد، از آن‌جا که داده‌های این تحقیق در ماه‌های فروردین و اردیبهشت جمع‌آوری شده است و تحقیقات دیگر در ماه‌های زمستان صورت گرفته است این شاخص برای آنان بیش‌تر بوده است. انرژی مستقیم شامل انرژی نیروی انسانی، سوخت مصرفی، جوجه یک روزه و الکتریسیته، انرژی غیرمستقیم شامل انرژی خوراک و ماشین‌ها می‌باشد. همچنین انرژی تجدیدپذیر همان انرژی نیروی

نهاده‌های خروجی در مرغداری گوشت مرغ و کود بستر می‌باشد. به‌ازای هر هزار قطعه جوجه میزان ۲۳۸۳ کیلوگرم گوشت تولید شده بود که به‌طور میانگین انرژی گوشت مرغ برای هر هزار قطعه مقدار ۲۴۳۲۴ مگاژول بر هزار قطعه به‌دست آمد. همچنین انرژی کود مقدار ۵۷۶ مگاژول بر هزار قطعه محاسبه شد و به‌ازای هر هزار قطعه مرغ مقدار ۱۹۳۵ کیلوگرم کود تولید شده بود. در تحقیق انجام شده توسط یمینی صفت و همکاران (YaminiSefat, 2013) گزارش شد که در واحدهای مرغداری واقع در استان البرز برای هر هزار قطعه ۲۸۶۸ کیلوگرم گوشت و ۲۰۸۳ کیلوگرم کود تولید شده بود. وزن مرغ برای کشتار در حدود ۳۵۰۰-۱۸۰۰ کیلوگرم متغیر است که دلایل اقتصادی و بازار در زمان کشتار می‌تواند عامل اختلاف میانگین وزن گوشت مرغ خروجی از واحدهای مرغداری در زمان و مکان‌های مختلف باشد، هرچند که توصیه می‌شود وزن کشتار پایین باشد. شاخص‌های انرژی در تولید مرغ گوشتی در شهرستان مشهد در جدول ۲ آورده شده است. با استفاده از شاخص‌های انرژی می‌توان سامانه‌های تولید محصولات در نقاط مختلف یا محصولات مختلف یک منطقه را با یکدیگر مقایسه کرد. نسبت انرژی یا همان کارایی

انسانی می‌باشد و انرژی تجدیدناپذیر شامل انرژی سوخت، الکتریسیته، ماشین‌ها، خوراک و جوجه می‌باشد (Kitani, 1999).

جدول ۲- شاخص‌های انرژی پرورش مرغ گوشتی در شهرستان مشهد
Table 2- Energy indices of broiler production in Mashhad city

شاخص‌ها Indicators	واحد Unit	مقدار Value
نسبت انرژی Energy ratio	-	0.2
بهره‌وری انرژی Energy productivity	(kg MJ ⁻¹)	0.019
انرژی ویژه Specific energy	(MJ kg ⁻¹)	52.55
انرژی خالص Net energy	(MJ (1000bird) ⁻¹)	-100306
انرژی مستقیم Direct energy	(MJ (1000bird) ⁻¹)	71400
انرژی غیر مستقیم Indirect energy	(MJ (1000bird) ⁻¹)	53807
انرژی تجدیدپذیر Renewable energy	(MJ (1000bird) ⁻¹)	86
انرژی تجدیدناپذیر Non renewable energy	(MJ (1000bird) ⁻¹)	125121

از ۱۵۰۰۰ قطعه، واحدهای پرورش با تعداد جوجه‌ریزی بین ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ قطعه و واحدهای پرورش با تعداد جوجه‌ریزی بالای ۳۰۰۰۰ قطعه تقسیم‌بندی شدند. انرژی خروجی و شاخص‌های انرژی برای این سه گروه در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای مقایسه واحدها از نظر تعداد جوجه‌ریزی واحدهای پرورش به سه گروه تقسیم شدند و شاخص‌های انرژی و مصرف نهاده‌ها در سه گروه مرغداری‌ها محاسبه گردید. مرغداری‌ها از نظر تعداد جوجه‌ریزی به سه دسته: واحدهای پرورش با تعداد جوجه‌ریزی کم‌تر

جدول ۳- شاخص‌های انرژی برحسب تعداد جوجه‌ریزی در واحدهای تولید مرغ گوشتی
Table 3- Energy indicators of broiler production units with different capacities

تعداد جوجه‌ریزی (قطعه) Number of birds	تعداد واحدها Number of units	انرژی خروجی MJ 1000bird ⁻¹ Output energy	انرژی ورودی MJ 1000bird ⁻¹ Input energy	بهره‌وری انرژی kg MJ ⁻¹ Energy productivity	انرژی ویژه MJ kg ⁻¹ Specific energy
15000	14	24425	132632	0.0174	57.43
15000-30000	12	24802	133456	0.0176	56.93
30000	10	25684	107758	0.0225	44.34

کاهش یافته است. مقدار این کاهش در حدود ۲۰ درصد است. درحالی‌که با افزایش ظرفیت واحد از کمتر از ۱۵ هزار به بیشتر از ۳۰ هزار مقدار انرژی ورودی ماشین در پرورش مرغ گوشتی به‌طور معنی‌داری افزایش داشته که این افزایش در حدود ۲۷ درصد است. در سایر انرژی‌های ورودی بین واحدها با ظرفیت متفاوت اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد که علت آن عدم تغییر در سرانه انرژی به‌ازای تولید یک‌هزار قطعه مرغ بوده است. اگر مجموع انرژی‌های ورودی با یکدیگر مقایسه گردد می‌توان مشاهده نمود که مجموع انرژی ورودی برای پرورش یک‌هزار قطعه مرغ در واحدهای با ظرفیت بالاتر، کمتر

نتایج بررسی انرژی ورودی و خروجی سه سطح جوجه‌ریزی در جدول ۴ آورده شده است. تفاوت انرژی ورودی نهاده‌های نیروی انسانی و ماشین‌ها در سه سطح جوجه‌ریزی در سطح پنج درصد معنی‌دار شد، زیرا با افزایش تعداد جوجه‌ریزی و بزرگ‌تر شدن سالن‌های پرورش استفاده از ماشین‌ها به‌جای نیروی انسانی افزایش پیدا کرده است و سهم انرژی این نهاده‌ها در سطوح مختلف جوجه‌ریزی تغییر پیدا کرده است. بنابر نتایج حاصل شده با افزایش ظرفیت سالن از کمتر از ۱۵ هزار به بیشتر از ۳۰ هزار مقدار انرژی ورودی نیروی انسانی در پرورش مرغ گوشتی به‌طور معنی‌داری

و ۴ که نشان می‌دهد واحدهای بالای ۳۰ هزار از وضعیت مطلوب‌تری نسبت به سایر واحدها (با ظرفیت کمتر از ۱۵ هزار و ۱۵ تا ۳۰ هزار) برخوردارند، متفاوت است. علت آن می‌تواند شرایط متفاوت تولید باشد. استان خراسان رضوی با ۱۰۸۵ واحد فعال مقام سوم تولید در کشور را داراست و از سال‌های مدرن‌تری نسبت به استان همدان با ۴۴۲ واحد فعال برخوردار است (Statistical Center of Iran, 2012).

است، هرچند که واحدهای مورد بررسی در این پارامتر با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند. فطرس و سلگی گزارش دادند مرغداری‌های پرورش مرغ گوشتی در استان همدان با ظرفیت ۱۵۰۰۰-۵۰۰۱ قطعه در مقایسه با سایر ظرفیت‌ها (کمتر از ۵۰۰۰ و بیشتر از ۱۵۰۰۰) وضعیت مطلوب‌تری را دارا هستند (Fotros and Salgi, 2003). نتایج آنان در مقایسه با نتایج این تحقیق در جدول ۳

جدول ۴- میزان انرژی‌های ورودی و خروجی برای تولید مرغ گوشتی در سطوح مختلف جوجه‌ریزی

Table 4- Energy input and output for broiler production in different capacities

ظرفیت واحد Capacity	میانگین وزنی Weighted mean (MJ1000 bird ⁻¹)	کمتر از ۱۵ هزار قطعه 15000	بین ۱۵ تا ۳۰ هزار قطعه 15000-30000	بیشتر از ۳۰ هزار قطعه 30000
پارامتر Parameter				
نیروی انسانی Labour	86	96 ^a	90 ^b	67 ^c
جوجه یک روزه Chick	489	487 ^a	489 ^a	491 ^a
ماشین‌ها Machinery	196	170 ^a	212 ^b	215 ^c
سوخت Fuel	46011	39518 ^a	51942 ^a	47984 ^a
الکتریسیته Electricity	7662	8046 ^a	82312 ^a	6440 ^a
خوراک Feed	53122	52797 ^a	53968 ^a	52562 ^a
انرژی ورودی Total input energy	125207	132632 ^a	133456 ^a	107758 ^a
مجموع انرژی خروجی Total output energy	24901	24425 ^a	24803 ^a	25685 ^a

حروف غیر مشترک (a, b, c) در هر ردیف نشانه تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در سطح پنج درصد است.

کارایی فنی واحدهای تولید مرغ گوشتی شهرستان مشهد بیشتر تحت تأثیر کارایی مقیاس هستند. به عبارت دیگر اکثر واحدها دارای کارایی مدیریتی بالا هستند و به صورت مناسب از نهاده‌های تولید استفاده کردند ولی آنچه که موجب پایین آمدن کارایی آنان شده است، نداشتن مقیاس بهینه تولید بوده است. به عنوان مثال واحد ۲۵ دارای کارایی مدیریتی (فنی خالص) یک است. لیکن با توجه به این که کارایی مقیاس آن ۰/۸۹ است کارایی فنی واحد نیز ۰/۸۹ شده است. این نتیجه با نتیجه حاصل از جدول ۳ مطابقت دارد، در این جدول بهره‌وری انرژی واحدهای بزرگ (مقیاس بهینه) بیش‌تر از واحدهای کوچک به دست آمده است. همچنین جدول ۵ نشان می‌دهد کارایی واحد ۲۳ با ظرفیت ۱۸ هزار قطعه کمترین کارایی را در مجموع دارد که علت آن عدم فعالیت در ظرفیت بهینه است. در تحقیق عمید و همکاران (Amid et al., 2013) در واحدهای پرورش مرغ گوشتی شهرستان اردبیل کارایی فنی، فنی خالص و مقیاس به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۹۲ و ۰/۸۱ گزارش کردند که نشان می‌دهد در این شهرستان نیز

تجزیه و تحلیل مرغداری‌ها با استفاده از مدل بازگشت به مقیاس ثابت و متغیر

توزیع کارایی واحدهای تولیدی براساس مدل بازگشت به مقیاس ثابت CCR که مبین کارایی فنی واحدهای مورد بررسی می‌باشد در جدول ۵ آورده شده است. از بین ۳۶ واحد مورد مطالعه ۱۳ واحد دارای کارایی فنی بوده‌اند. طبق نتایج به دست آمده ۱۴ واحد از واحدهای مورد مطالعه دارای کارایی بین ۰/۸ تا ۰/۹ و ۹ واحد کارایی بین ۰/۹ تا ۱ را داشتند. با توجه به این که روش تحلیل پوششی داده‌ها کارایی نسبی واحدها را در مقایسه با یکدیگر مشخص می‌کند، نتایج به دست آمده در این تحقیق حاکی از شباهت بالای روش تولید مرغ گوشتی در منطقه است و نمی‌توان نتیجه گرفت کارایی مطلق این واحدها نیز در سطح مطلوب جهانی قرار دارد.

کارایی فنی تابعی از کارایی فنی خالص (کارایی مدیریتی) و کارایی مقیاس است، با توجه به این که میانگین کارایی فنی خالص ۰/۹۹ و کارایی مقیاس ۰/۹۴ است. لذا می‌توان نتیجه گرفت کاهش

کارایی فنی بیشتر تحت تأثیر کارایی مقیاس بوده است.

جدول ۵- میزان کارایی فنی، کارایی فنی خالص و کارایی مقیاس در واحدهای تولید مرغ گوشتی

Table 5- Technical efficiency (TE), pure technical efficiency (PTE) and scale efficiency (SE) in broiler farms

شماره واحد Number	ظرفیت واحد (قطعه) Capacity (Birds)	کارایی فنی TE	کارایی فنی خالص PTE	کارایی مقیاس SE
1	20000	0.94	0.99	0.95
2	15000	0.98	0.99	0.99
3	33000	0.90	0.97	0.93
4	33000	0.86	1.00	0.86
5	47000	1.00	1.00	1.00
6	14000	0.89	1.00	0.89
7	12000	0.89	1.00	0.89
8	62500	1.00	1.00	1.00
9	45000	0.90	0.97	0.93
10	40000	1.00	1.00	1.00
11	50000	1.00	1.00	1.00
12	17500	0.92	1.00	0.92
13	6500	1.00	1.00	1.00
14	4500	1.00	1.00	1.00
15	60000	1.00	1.00	1.00
16	10000	0.89	0.97	0.92
17	6500	1.00	1.00	1.00
18	11000	0.94	1.00	0.94
19	18000	0.86	0.97	0.89
20	21000	0.91	0.99	0.92
21	13000	1.00	1.00	1.00
22	25000	0.92	0.98	0.94
23	18000	0.83	0.98	0.85
24	8000	1.00	1.00	1.00
25	14000	0.89	1.00	0.89
26	20000	0.88	0.98	0.90
27	10000	0.86	0.97	0.88
28	9500	1.00	1.00	1.00
29	30000	0.88	0.98	0.90
30	22000	0.83	0.96	0.87
31	35000	1.00	1.00	1.00
32	15000	0.90	0.98	0.92
33	12000	1.00	1.00	1.00
34	13500	0.86	1.00	0.86
35	20000	0.88	0.99	0.90
36	18500	0.86	1.00	0.86
میانگین Average	22500	0.93	0.99	0.94

دوره‌های آموزشی نسبت به استفاده بهینه از نهاده‌ها اقدام نمایند. در جدول ۶ مقادیر متوسط انرژی مصرف شده و مقادیر بهینه، به همراه شاخص^۱ ESTR آورده شده است. شاخص ESTR نشان‌دهنده درصد انرژی ذخیره‌شده هر نهاده می‌باشد.

با استفاده از نتایج جدول ۶ و مقایسه مقادیر بهینه مصرف نهاده‌ها به ازای هزار قطعه مرغ تولیدی و مقدار مصرف شده نهاده در هر واحد، واحدهای پرورش مرغ گوشتی باید نسبت به تعدیل مصرف هر نهاده

همچنین از ۲۵ واحد مورد مطالعه در شهرستان اردبیل در الگوی CCR (کارایی فنی) تعداد ۷ واحد کارآ و در الگوی BCC (کارایی فنی خالص)، ۱۲ واحد کارآ بودند. بررسی نتایج این تحقیق و تحقیق سایرین نشان داد که عدم فعالیت در مقیاس بهینه واحدهای مرغداری علت پایین بودن کارایی فنی آن‌ها است.

نتایج بررسی کارایی واحدهای تولیدی براساس مدل بازگشت به مقیاس متغیر نشان داد که ۲۱ واحد از واحدهای مطالعه شده یعنی ۵۸ درصد واحدها دارای کارایی فنی خالص یک بوده است. برای بهبود کارایی فنی خالص سایر واحدها نیاز است مدیران واحدها با شرکت در

1- Energy-saving target ratios

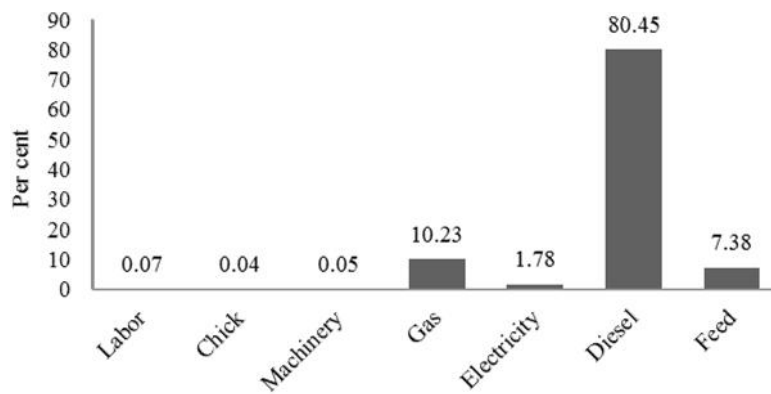
که می‌توان مصرف آن را کاهش داد نهاده الکتریسیته است. به‌طور میانگین واحدهای مورد مطالعه بیش از ۱۶ درصد اضافه مصرف دارند که علت آن می‌تواند پایین بودن راندمان سیستم‌های تهویه باشد.

اقدام نمایند. در میان نهاده‌های ورودی، تعدیل مصرف نهاده گازوئیل از همه شاخص‌تر است که علت آن می‌تواند پایین بودن راندمان موتورخانه‌ها در این واحدهای پرورش مرغ گوشتی باشد. نهاده دیگری

جدول ۶- مقایسه میانگین مقادیر بهینه و واقعی مصرف انرژی

Table 6- Comparison of average optimal and actual energy consumption

نهادها Inputs	میزان واقعی مصرف انرژی (MJ (1000bird) ⁻¹) Actual energy consumption	میزان بهینه مصرف انرژی (MJ (1000bird) ⁻¹) Optimal energy consumption	انرژی قابل ذخیره (MJ (1000bird) ⁻¹) Savable energy	ESTR (%)
نیروی انسانی Labor	86.06	78.1	7.94	9.22
جوجه یک روزه Chick	488.62	483.9	4.66	0.95
ماشین‌ها Machinery	196.41	190.0	6.38	3.25
گاز Gas	1675.21	1459.7	215.33	12.87
گازوئیل Diesel	44335.49	34562.7	9772.8	22.04
الکتریسیته Electricity	7661.86	6418.6	1243.23	16.23
خوراک Feed	53121.74	52225.2	986.55	1.69
مجموع Total	107565.39	95418.3	12147.09	11.29



شکل ۲- میانگین انرژی قابل ذخیره نهاده‌ها

Fig. 2. Average saved energy- of inputs

در شهرستان اردبیل انرژی سوخت و خوراک با ۷۹ درصد بیشترین پتانسیل را برای صرفه‌جویی در انرژی ورودی دارا بود. آنان همچنین گزارش دادند که ۲۰ درصد از مجموع انرژی‌های قابل ذخیره مربوط به الکتریسیته است در حالی که در این تحقیق مقدار آن ۱/۷۸ درصد است. علاوه بر آن مقدار کل انرژی قابل ذخیره در تحقیق عمید و همکاران (Amid et al., 2013) ۱۵۳۵۳ مگاژول به‌ازای هر

در واقع مرگذاران با استفاده از مقادیر بهینه انرژی می‌توانند ۱۲۱۴۷ مگاژول انرژی را به‌ازای تولید هزار قطعه مرغ گوشتی ذخیره و صرفه‌جویی کنند. انرژی ذخیره شده توسط هر نهاده با مدل BCC نهاده محور در مرگذاری‌های مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. از مجموع انرژی قابل ذخیره بیش از ۹۸ درصد مربوط به نهاده سوخت و خوراک است. در تحقیق عمید و همکاران (Amid et al.,)

گرمایشی در سالن‌های مرغداری و ارزان قیمت بودن سوخت مصرفی می‌باشد. کارایی انرژی در تولید مرغ گوشتی ۰/۲ به‌دست آمد که نشان از پایین بودن کارایی انرژی دارد که برای افزایش آن باید عملکرد را افزایش داده یا این‌که در مصرف انرژی‌های ورودی صرفه‌جویی کرد. با توجه به منفی بودن انرژی خالص، در تولید مرغ گوشتی در شهرستان مشهد عدم کارایی مصرف انرژی وجود دارد، یعنی به آن نسبتی که انرژی وارد شده است، انرژی خارج نشده است. با استفاده از الگوی تحلیل پوششی داده‌ها می‌توان با استفاده بهینه از منابع انرژی ۱۱/۲۹ درصد در کل انرژی ورودی صرفه‌جویی کرد.

هزار قطعه مرغ اعلام شده که بیش‌تر از مقدار به‌دست آمده در این تحقیق است. علت آن می‌تواند تجهیزات مناسب و با راندمان بالاتر سالن‌های پرورش و تفاوت آب و هوا شهرستان اردبیل و مشهد و تفاوت در فصل نمونه‌برداری باشد. لیکن برای تعیین علت اختلاف نیاز به تحقیقات بیش‌تری در این بخش است.

نتیجه‌گیری

در بین انرژی‌های ورودی سوخت مصرفی (گاز و گازوئیل) بیش‌ترین سهم را در بین نهاده‌های ورودی به‌خود اختصاص دادند که علت مصرف بالای این نهاده، پایین بودن بازدهی وسایل و تجهیزات

References

1. Alrwis, K. N., and E. Francis . 2003. Technical efficiency of broiler farms in the central region of Saudi Arabia: Stochastic Frontier Approach. Research Bulletin 116 (1): 5-34.
2. Amid, S. 2013. Evaluating the energy efficiency of broiler production by data envelopment analysis (The Case study: Ardabil). The 8th National Congress on Agr. Machinery Eng. (Biosystem) & Mechanization of Iran, Ferdowsi University of Mashhad. (In Farsi).
3. Atilgan, A., and K. Hayati. 2006. Cultural energy analysis on broiler reared in different capacity poultry houses. Italian Journal of Animal Science 5 (4): 393-400.
4. Bahrami, H., M. Taki, and N. Monjezi. 2011. Optimization of energy consumption for wheat production in Iran using data envelopment analysis (DEA) technique. African Journal of Agricultural Research 6 (27): 5978-5986.
5. Biermann, S., G. W. Rathke, K. J. Hulsbergen, and W. Diepenbrock. 1999. Energy recovery by crops in dependence on the input of mineral fertilizer. Martin- Lutther King University.
6. Celik, L., and O. Ozturkcan. 2003. Effects of dietary supplemental L-carnitine and ascorbic acid on performance, carcass composition and plasma L-carnitine concentration of broiler chicks reared under different temperature. Archives of Animal Nutrition 57 (1): 27-38.
7. Chauhan, N. S., P. K. J. Mohapatra, and K. P. Pandey. 2006. Improving energy productivity in paddy production through benchmarking-An application of data envelopment analysis. Energy Conversion and Management 47: 1063-1085.
8. Cochran, W. G. 1997. Sampling Techniques, Third Edition. John Wiley & Sons. New York.
9. Dashti, G. H., S. Yavari, E. Pishbahar, and B. Hayati. 2012. Effective Factors on the Broiler Firms' Technical Efficiency of the Sonqor- Kolyaee County. Animal Science Researches. 21 (3): 84-95.
10. Esfahani, J., and H. Balali. 2014. Application of Bounded Data Envelopment Analysis to Evaluate Efficiency of Broiler Firms (Case study: South Khorasan Province). Agricultural Economics & Development 28 (1): 45-54. (In Farsi).
11. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2014. FAOSTAT. Available from: <http://faostat.fao.org>. Accessed 21 July 2014.
12. Fluck, R. C. 1999. Energy in Farm Production. Elsevier, Amsterdam, pp. 13-29.
13. Fotros, M. H., and M. Solgi. 2003. Measurement of efficiency and return to scale of boiler production units: A case study of Hamden Province. Agricultural Economic Research and Development 2 (38): 47-65.
14. Hatirli, S. A., B. Ozkan, and K. Fert. 2005. An econometric analysis of energy input output in Turkish agriculture. Renewable and Sustainable Energy Reviews 9: 608-623.
15. Heidari M. D., M. Omid, and A. Akram. 2011. Energy efficiency and econometric analysis of broiler production farms. Energy 36 (11): 6536-6541.
16. Kitani, O., T. Jungbluth, R. M. Peart, and A. Ramdani. 1999. Energy CIGR handbook of agricultural engineering, Volume 5: Energy and biomass engineering. ASAE publication. St Joseph.

17. Kittle, A. P. 1993. Alternate daily cover materials and subtitle, the selection technique Rusmar. Incorporated. West Chester, PA.
18. Kizilaslan, H. 2009. Input–output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. *Applied Energy* 86 (7): 1354-1358.
19. Mojarad, E., A. A. Kahkha, and M. Sabouhi. 2009. Evaluating Technical Efficiency of Aviculture Units by Stochastic Nonparametric Approach in the Sistan Zone. *Agricultural Economics* 8 (3): 91-106.
20. Mousavi-Avval, S. H., Sh. Rafiee, A. Jafari, and A. Mohammadi. 2011. Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach. *Energy* 36: 2765-2772.
21. Najafi-Anari, S., N. Khademolhoseini, K. Jazayeri, and K. Mirzade. Assessing of energy efficiency on broiler farm in the Ahvaze zone. 5th National conference on agriculture machinery and mechanization. 26 August 2008, Mashhad, Iran. (In Farsi).
22. Singh, G., S. Singh, and J. Singh. 2004. Optimization of energy inputs for wheat crop in Punjab. *Energy Conversion Management* 45: 453-465.
23. Statistical Centre of Iran. 2013. Selected Census Results of the Layer Chicken Farms the year 2012.
24. Taki M., Y. Ajabshirchi, R. Abdi, and M. Akbarpour. 2012. Analysis of Energy Efficiency for Greenhouse Cucumber Production Using Data Envelopment Analysis (DEA) Technique; Case Study: Shahreza Town ship. *Journal of Agricultural Machinery* 2 (1): 28-38. (In Farsi).
25. YaminiSefat, M. 2013. Modeling of energy efficiency of broiler production units in Alborz Province using artificial neural network (ANN) and studying the impact of education on energy ratio. The 8th National Congress on Agr. Machinery Eng. (Biosystem) & Mechanization of Iran, Ferdowsi University of Mashhad. (In Farsi).
26. Yusuf, S. A., and O. Malomo. 2007. Technical efficiency of poultry egg production in Ogun state: a data envelopment analysis (DEA) approach. *International Journal of Poultry Science* 6 (9): 622-629.

Analysis of different inputs share and determination of energy Indices in broilers production in Mashhad city

H. Sadrnia^{1*} - M. Khojastehpour¹ - H. Aghel¹ - A. Saiedi Rashk Olya²

Received: 13-07-2014

Accepted: 28-10-2015

Introduction

The high energy consumption is one of the serious problems in poultry industry. The poultry industry consume about five percent of total energy sources in different countries, with consideration of losses, it increases up to 16-20%. In the year 2003 also, the Iranian chicken meat consumption per capita was 13.3 kg, while in the year 2013 it increased to 25.9 kg (FAO, 2014). It shows that in the diet of Iranian people, the chicken meat has become a strategic food. Poultry industry is one of the biggest and most developed industries in Iran. In the past two decays, mainly due to population growth and increase demand of white meats, it is necessary to change and improve energy efficiency in this industry.

Technical efficiency of broiler farms in the central region of Saudi Arabia was analyzed through stochastic frontier approach (Alrwis and Francis, 2003). They reported that many farms under study work lower than their total capacity. In the research, the output was chicken meat weight in the term of the kilogram per one period and the inputs were the number of chicks, feed, the total of all variable expenses and fixed input except chicks and feed and the total cost of fixed inputs including building, equipment and machinery used for the broiler houses. They found that the small and large size broiler farms in the Central Region of Saudi Arabia were produced chicken with mean technical efficiency 83 and 88%, respectively (Alrwis and Francis, 2003). Efficiency measurement of broiler production units in Hamadan province was investigated by Fotros and Solgi (2003). They reported that the minimum, maximum and mean technical efficiency under variable return to scale were 12.7, 100 and 64.4%, respectively. Their results showed that technical efficiency at 16.5 (14 units) and 42.35% (24 units) of farms were more than 90 and 70%, respectively (Fotros and Salgi, 2003).

Khorasan Razavi province after Esfahan and Mazandaran provinces is the third largest producer of broilers in Iran. This research was performed because it is necessary to have energy consumption status; also there is a few data about broiler's energy consumption in Mashhad. In this research, the data of Mashhad's broilers was analyzed by Data Envelopment Analysis Method. The other objectives of this study were to separate efficient and inefficient units to use energy resource efficiently and determine total energy saving.

Materials and Methods

This study was performed in 2013 in Mashhad, Iran. The data were collected through interviews and questionnaires from 36 poultry farmers for a growing period of April to May. Input energies were the feed, fuel (gas and gas oil), electricity, labor, equipment and chicken, and the output energies were the chicken meat and the manure. The energy consumption for each element was calculated by multiplied amount of inputs/outputs to energy equivalents.

Results and Discussion

The total of input and output energies were obtained 125.2, 24.9 GJ/1000Birds, respectively. Energy indices such as energy ratio, energy efficiency and specific energy were determined to be 0.2, 0.019 kg/MJ and 52.55 MJ/kg, respectively. The highest share of energy consumption were 50.84 and 42.43%, for fuel (natural gas and diesel fuel) and feed respectively, the lowest share among the input energies were 0.39 and 0.06%, for chicken and labor respectively. Comparison of energy in three levels of farm sizes (15000, 15000-30000 and 30000 chicks) showed the energy ratio for large farms were higher than the other levels.

1- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. Iran

2- Graduated Student, Agricultural Mechanization Engineering, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. Iran

(*- Corresponding Author Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)

Data Envelopment Analysis (DEA) was used to evaluate the poultry efficiency. The results showed that 13 poultry units had average technical efficiency (0.93) in the definition of Constant Returns to Scale (CRS), and 21 poultry units had pure technical efficiency (0.99) in the definition of Variable Returns to Scale (VRS).

Conclusions

The Fuel (natural gas and diesel fuel) consumption energy had the highest shares of energy consumption; it is because of the low efficient heating equipment in poultry houses and low fuel prices in Iran. Energy efficiency of broiler farms in Mashhad was obtained 0.2 that show low energy efficiency. Improvements in energy efficiency could be achieved by increasing yield or reducing inputs energies.

Keywords: Data envelopment analysis (DEA), Energy efficiency, Fuel consumption, Technical efficiency

مقایسه پیش‌بینی دمای خروجی جمع‌کننده خورشیدی تخت با نتایج تجربی: دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی

فاطمه نادى^{۱*} - سامان آبدانان مهدی زاده^۲ - اولدوز نورانی زنونز^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹

چکیده

تجزیه و تحلیل دقیق یک جمع‌کننده خورشیدی با توجه به بالا بودن تعداد پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن کار پیچیده‌ای است. هدف از انجام این تحقیق، مقایسه تجربی و نظری عملکرد جمع‌کننده خورشیدی با توجه به توزیع جریان و درجه حرارت در دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای پیش‌بینی دمای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت است. دمای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت به صورت عددی با دینامیک سیالات محاسباتی و با شبکه عصبی مدل شد و با نتایج تجربی مقایسه شد. به منظور آموزش و ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی از پنج عامل ورودی میزان تشعشع خورشید، سرعت هوا، زمان روز، رطوبت و دمای هوا استفاده شد. برای مدل‌سازی عددی انتقال گرمای جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت از نرم‌افزار تجاری حجم محدود استفاده شد. در کار حاضر یک مدل دو بعدی از جمع‌کننده خورشیدی شامل صفحه جاذب، شیشه و فاصله هوایی بین صفحه جاذب و شیشه در تحلیل انتقال گرما ارائه شد. اثرات آشفتگی با مدل تلاطم $k-\epsilon$ مدل شد. حداکثر اختلاف دما بین نتایج عددی و تجربی با دینامیک سیالات محاسباتی حدود $4/6$ کلوین به دست آمد. تحلیل آماری برای مقایسه نتایج پیش‌بینی دمای خروجی دو روش شبکه عصبی و دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفت. نتایج نشان داد که شبکه عصبی به لحاظ آماری نسبت به روش دینامیک سیالات محاسباتی تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی: جمع‌کننده صفحه تخت خورشیدی، دمای خروجی، دینامیک سیالات محاسباتی، شبکه عصبی مصنوعی

مقدمه

بیشتر شده است. خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات از قبیل انگور، فلفل و غیره یکی از این نیازهای ضروری است که به منابع طبیعی به شکل سوخت نیاز دارد. خشک‌کن خورشیدی به عنوان یک روش برتر خشک کردن میوه‌ها و حبوبات به جهت ذخیره میزان قابل توجهی از سوخت‌های مرسوم و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در حال جایگزین شدن است (Aghkhani et al., 2013).

جمع‌کننده‌های خورشیدی جزء کلیدی در سیستم‌های گرمایشی خورشیدی هستند. آن‌ها انرژی خورشید را جمع‌آوری کرده، انرژی تابشی را به گرما تبدیل کرده و سپس گرما را به سیال (معمولاً هوا یا آب) منتقل می‌کنند. به خاطر اثر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی روی سیستم‌های خورشیدی، عموماً اصلاحاتی روی جمع‌کننده‌های خورشیدی انجام می‌شود. از بین همه جمع‌کننده‌های حرارتی، جمع‌کننده‌های صفحه تخت خورشیدی گرچه دمای کمتری تولید می‌کنند، مزایایی چون طراحی ساده‌تر، نگهداری آسان‌تر و هزینه کم‌تر دارند. گرم‌کننده‌های هوای خورشیدی نوعی از جمع‌کننده‌های خورشیدی هستند که کاربردهای وسیعی در بسیاری از حوزه‌های کشاورزی، صنعت و ساختمان دارند.

به دست آوردن پارامترهای خروجی تحت شرایط آزمایش‌های

انرژی خورشید، به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، پاک و بدون آسیب به محیط زیست، برای تولید الکتریسته و گرما قابل توجه است (Zhai et al., 2013; Fahad et al., 2011). جمع‌آوری انرژی خورشیدی مورد علاقه بسیاری از محققان در دو دهه گذشته بوده است، چرا که هزینه گرمایش خانگی را تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد. به این موضوع از دهه ۷۰ میلادی به علت بحران جهانی نفت در ۱۹۷۳ توجه بیشتری شده است (Selmi et al., 2008). با رشد روزافزون جمعیت، نیاز انسان به منابع انرژی تجدیدپذیر

۱- استادیار، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، واحد آزادشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آزادشهر، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: f.nadi@iaau.ac.ir)

۲- استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، ایران

۳- مربی، گروه مکانیک سیالات، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در شهرستان آزادشهر با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۱ دقیقه انجام گرفت. آزمایش‌ها در شهریور ماه با متوسط ۹/۵۲ ساعت آفتابی و شدت تابش 857 W m^{-2} انجام شد. بهترین زاویه نصب جمع‌کننده خورشیدی برای این که جمع‌کننده بتواند بیشترین میزان انرژی خورشید را دریافت کند، برابر است با (Duffie and Beckman, 1991):

$$\Phi = L + 15 \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، Φ زاویه شیب جمع‌کننده و L عرض جغرافیایی محل می‌باشد. با توجه به این که آزمایش‌ها در شهرستان آزادشهر با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه انجام شد، بنابراین جمع‌کننده در زاویه ۵۲ درجه نسبت به سطح افق نصب شد.

بیان تجربی مسأله

حوزه جریان شامل یک صفحه جاذب است. صفحه جاذب استفاده شده در این جمع‌کننده یک ورق آهن سیاه به طول ۲ متر، عرض ۱/۲ متر و به ضخامت ۰/۰۰۵ متر می‌باشد. یکی از عیب‌های جمع‌کننده‌های هوایی، ظرفیت حرارتی پایین هوا است که برای بهبود ضریب انتقال گرمای بین صفحه جاذب و هوا اصلاحاتی پیشنهاد شده است. این پیشنهادها شامل استفاده از صفحه جاذب سوراخ‌دار، صفحه جاذب شیاردار و نوع ماتریکس می‌باشد که مشخص شد جمع‌کننده با صفحه جاذب سوراخ‌دار و شیاردار بازده حرارتی بالایی بدون افزایش افت فشار داشتند. مزیت دیگر استفاده از صفحه جاذب شیاردار آشفته کردن^۳ هوا است که به بهبود ضریب انتقال گرما کمک می‌کند (Fuxin, 1997). بنابراین در این پژوهش تعداد ۱۲ عدد شیار بر روی صفحه جاذب ایجاد شد تا بعد از شیاردار شدن به ابعاد ۲×۱ متر درآید. نقشه صفحه جاذب شیاردار در شکل ۱ آورده شده است.

در این جمع‌کننده از شیشه معمولی ساختمانی به ضخامت ۰/۰۳ متر و ابعاد ۲×۱ متر به عنوان پوشش استفاده شده است. فاصله هوایی بین شیشه و صفحه جاذب ۰/۰۵ متر بود. قاب، نگهدارنده اجزاء مختلف جمع‌کننده می‌باشد که از ورق MS به ضخامت ۰/۰۳ متر ساخته شد. قاب به شکل مکعب مستطیل به ابعاد ۲×۱×۱ متر ساخته شد به منظور کاهش اتلاف گرما در قسمت پشت و وجوه جانبی جمع‌کننده با یک لایه پشم‌شیشه معمولی به ضخامت ۰/۰۵ متر عایق‌بندی شد (Pangavhane et al., 2002). به منظور جذب بیشتر پرتوهای خورشید رویه این صفحه با رنگ سیاه مات، رنگ‌آمیزی شد. جمع‌کننده ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

متفاوت، نسبتاً هزینه‌بر، طولانی و غیرممکن است. لذا به کارگیری شبکه عصبی مصنوعی^۱ جهت هوشمندسازی سیستم‌های خورشیدی یا استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲ برای پیش‌بینی پارامتر خروجی مورد نظر اطلاعات با ارزشی فراهم می‌کند.

گورلا تحلیل دو بعدی روش اجزاء محدود را برای بررسی عملکرد جمع‌کننده‌های خورشیدی انجام داد (Gorla, 1997). تورگوت و همکاران تحلیل عددی سه‌بعدی و تجربی برای تعیین متوسط ضریب انتقال گرما برای جریان هوای جابه‌جایی اجباری روی یک صفحه تخت مستطیلی انجام دادند (Turgut et al., 2009). سلمی و همکاران جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت که سیال عامل آن آب بود با CFD شبیه‌سازی کردند (Selmi et al., 2008). جانجایی و همکاران یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی عملکرد جمع‌کننده خورشیدی پلاستیکی ارائه دادند (Janjai et al., 2000).

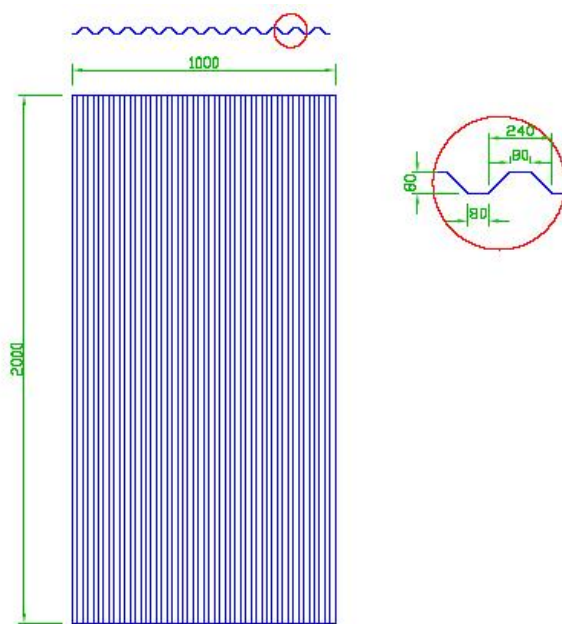
لکوچه و لالوت با استفاده از ANN عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت خورشیدی پیش‌بینی کردند (Lecoeuche and Lalot, 2005). بنلی عملکرد حرارتی دو نوع جمع‌کننده هوایی خورشیدی را با استفاده از ANN بررسی کرد. نتایج نشان داد که ANN می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد حرارتی جمع‌کننده‌های هوایی خورشیدی به‌عنوان یک روش دقیق به کار رود (Benli, 2013). ایسن و همکاران دیدگاه‌های ANN و شبکه عصبی wavelet را برای مدل‌سازی یک جمع‌کننده هوایی خورشیدی استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل شبکه عصبی wavelet می‌تواند برخی از پارامترهای گرم‌کننده‌های هوایی خورشیدی با دقت مناسب تخمین بزند (Esen et al., 2009).

طبق تحقیقات انجام شده مدل‌سازی جمع‌کننده‌های خروجی برای پیش‌بینی دما یا براساس ANN انجام شده یا براساس CFD، هدف این تحقیق استفاده از هر دو روش فوق برای پیش‌بینی دمای خروجی از جمع‌کننده است تا نقاط برتری و توانایی‌های این دو شیوه مقایسه شود. بنابراین در این تحقیق دمای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی به‌طور تجربی اندازه‌گیری شد. سایر اندازه‌گیری‌های تجربی شامل دمای هوای محیط، سرعت هوا، شدت تابش، رطوبت محیط و زمان بود. براساس اطلاعات تجربی به‌دست آمده، یک مدل ANN از جمع‌کننده ایجاد شد. با آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی با بخشی از داده‌های تجربی، پارامتر خروجی تخمین زده شد. همچنین جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت به روش CFD با نرم افزار Fluent & Gambit به‌صورت دو بعدی شبیه‌سازی شد و سپس برای مقایسه ANN با CFD نتایج دو روش با نتایج تجربی ارزیابی شد.

1- Artificial Neural Network (ANN)

2- Computational Fluid Dynamics (CFD)

3- Turbulence



شکل ۱- نقشه صفحه جاذب شیار شده

Fig.1. Scheme of corrugated absorber plate



شکل ۲- صفحه جاذب جمع‌کننده خورشیدی ساخته شده

Fig.2. Corrugated absorber plate of solar collector

ابزار و روش اندازه‌گیری

پارامترهایی که در آزمایش‌ها بایستی اندازه‌گیری شد، عبارت بودند از: الف- دمای هوا در ورودی و خروجی از جمع‌کننده خورشیدی، ب- رطوبت نسبی، ج- میزان تابش خورشید و د- سرعت

هوای محیط.

مشخصات ابزارهای اندازه‌گیری استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱- ابزارهای اندازه‌گیری استفاده شده

Table 1- Used measurement tools

نام ابزار اندازه‌گیری Tools used for measurement	نوع ابزار Tool type	دقت Accuracy	کشور سازنده Manufacturing country
دماسنج دیجیتالی Digital thermometer	Lutron- Tm-915	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	تایوان Taiwan
رطوبت‌سنج هوا Digital temperature & Humidity meter	Lutron HT-3005	$\pm 1 \text{ RH}$	تایوان Taiwan
سرعت‌سنج هوا Anemometer	Lotron A-M-4204	$\pm 2 \text{ m s}^{-1}$	تایوان Taiwan
شیدسنج Pyranometer	HANNi	$\pm 1 \text{ W m}^{-2}$	آلمان Germany

(Zurada, 1996).

$$\nabla E = -(d_i - o_i) f'(w_i^f x) \quad (7)$$

از آن‌جا که کمینه کردن مقدار خطا سبب تغییرات وزن‌ها در جهت منفی می‌گردد، لذا Δw_i به صورت رابطه (۸) در روابط قرار داده می‌شود (Zurada, 1996).

$$\Delta w_i = -\eta \nabla E \quad (8)$$

η یک ثابت مثبت می‌باشد. سپس از روابط (۶) و (۸)، Δw_i مجدداً به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\Delta w_i = \eta (d_i - o_i) f'(net_i) x \quad (9)$$

تنظیمات وزن Δw_{ij} به روش رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta w_{ij} = \eta (d_i - o_i) f'(net_i) x_j \quad (10)$$

for $j = 1, 2, \dots, n$

برای پیش‌بینی دمای خروجی جمع‌کننده، آموزش و ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی از چهار عامل ورودی دبی هوا، زمان روز، رطوبت و دمای هوا استفاده شد. تحت شرایط بیان شده در بخش قبل، شبکه عصبی مصنوعی با ۴ نرون در لایه ورودی و یک نرون در لایه خروجی طراحی شد. تعداد بهینه نرون‌های لایه پنهان از روش آزمون و خطا ۵ به‌دست آمد. به‌منظور ارتباط میان لایه ورودی با لایه پنهان و لایه پنهان با خروجی به‌ترتیب از تابع تان-سیگموئید^۷ و خطی استفاده شد. در این پژوهش به‌منظور آموزش شبکه از قاعده یادگیری لوومبرگ-مارکوت^۸ استفاده گردید. برای آموزش، ابتدا داده‌ها به‌طور تصادفی به دو قسمت تقسیم شد، به‌طوری‌که دو-سوم داده‌ها برای آموزش (۷۰ عدد)، یک-سوم داده (۳۵ عدد) برای آزمون شبکه انتخاب شدند. مقدار خطای متوسط آموزش برای شبکه‌ی تابع پرسپترون چندلایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا و با ساختار مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین الگوریتم مذکور انتخاب و نسبت به بهینه‌سازی آن اقدام شد. ابتدا تعداد لایه‌ی پنهان و تعداد نرون در لایه‌های میانی، به روش آزمون و خطا بررسی شد. پس از انتخاب شبکه‌ی مناسب و مقادیر مطلوب برای توابع آستانه، قاعده‌ی یادگیری، تعداد لایه‌های مخفی و نرون‌ها، تعداد تکرار مناسب، ضریب یادگیری و ضریب اندازه‌ی حرکت انتخاب گردید. همچنین مقدار مناسب ضریب اندازه‌ی حرکت مناسب ۰/۴، ضریب یادگیری برای لایه‌ی اول ۰/۳، برای لایه‌ی پنهان دوم ۰/۲۵ و برای لایه‌ی خروجی ۰/۱۵ انتخاب شد. تعداد تکرار مناسب برای شبکه‌ی مذکور ۲۱۰۰۰ بود. در ضمن برای مدل‌سازی شبکه عصبی از نرم‌افزار MatLab 2013a استفاده شد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی

یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی شامل تعدادی نرون است که با ترتیب خاصی کنار هم قرار گرفته‌اند. نرون‌ها در لایه‌ها قرار گرفته‌اند و هر شبکه شامل چند نرون در لایه‌ی ورودی، یک یا چند نرون در لایه‌ی خروجی و نرون‌هایی در لایه یا لایه‌های پنهان است. اکثر الگوریتم‌ها و معماری‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌وسیله تغییر در مدل نرون، ارتباط بین نرون‌های به‌کار رفته و وزن‌های اعمال شده بین نرون‌ها تغییر می‌کند. متداول‌ترین نوع شبکه‌های عصبی مصنوعی، عبارتند از پیش‌خورد^۱، بازخوردی^۲ و رقابتی^۳ (Dogan et al., 2008). در این پژوهش از شبکه عصبی پیش‌خورد استفاده شده است. الگوریتم آموزش مورد استفاده در این پژوهش از نوع پس‌انتشار^۴ خطا بوده که در کاربردهای تخمین تابع، کاربرد زیادی دارد. شاخص ارزیابی شبکه، میانگین مربعات خطا^۵ بوده (تابع خطا) که مطابق رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$mse = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q (t(k) - p(k))^2 \quad (2)$$

t خروجی مطلوب شبکه و p ورودی به شبکه می‌باشد (Zurada, 1996).

این روش یادگیری برای توابع فعال پیوسته ۶ که دارای رابطه (۳) می‌باشد، صادق است (Zurada, 1996):

$$f(net) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda_{net})} \quad (3)$$

$$f(net) = \begin{cases} 1 & net > 0 \\ 0 & net < 0 \end{cases}$$

سیگنال یادگیری این قانون، دلتا خوانده شده و به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد (Zurada, 1996):

$$r \triangleq [d_i - f(w_i^f x)] f'(w_i^f x) \quad (4)$$

عبارت $f'(w_i^f x)$ مشتق تابع فعال پیوسته $f(net)$ محاسبه شده برای $net = w_i^f x$ می‌باشد. محاسبه بردار گرادیان نسبت به w_i خطای مربعات به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌گردد:

$$E \triangleq \frac{1}{2} (d_i - o_i)^2 \quad (5)$$

که مساوی است با:

$$E = \frac{1}{2} [d_i - f(w_i^f x)]^2 \quad (6)$$

مقدار خطای بردار گرادیان از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد

- 1- Feedforward
- 2- Feedback
- 3- Competitive
- 4- Back propagation
- 5- Mean square error
- 6- Continuous activation functions

7- Tansigmond

8- Leven berg-marguardt

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالاتی محاسباتی (CFD) یکی از روش‌های توانمند برای شبیه‌سازی جریان سیال می‌باشد که به تحلیل سیستم‌های حامل جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم و پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌های شیمیایی، می‌پردازد. در حقیقت CFD تکنیکی بیش از شبیه‌سازی کامپیوتری جریان سیالات است و با استفاده از امکانات گرافیکی، مهندسین را قادر می‌سازد تا درک بهتری از پدیده‌های داخل سیستم داشته باشند. نتایج CFD تنها عدد و رقم نیست بلکه به کمک آن می‌توان مسیر حرکت سیال را هم مشاهده نمود (Kuipers and Van Swaaij, 1998).

برای محاسبه عددی انتقال سیال معادله مدل آشفتگی استفاده شد. از پیش‌پردازنده Gambit برای ایجاد هندسه، مش بندی و تنظیم شرایط مرزی مناسب استفاده شد. سپس خواص جریان سیال مشخص شد، معادلات حل شد و نتایج با نرم‌افزار Fluent تحلیل شد. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای جریان کاملاً متلاطم معتبر است و یک مدل نیمه تجربی براساس معادلات مدل انتقال برای انتقال انرژی جنبشی k و نرخ اتلاف آشفتگی، حاوی ثابت‌های تجربی در بخش‌های تولید و اتلاف معادلات است. معادلات حاکمه برای انرژی و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ به صورت روابط (۱۱) تا (۱۵) است:

$$\mu_T = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho U k) - \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] = P - \rho \epsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho U \epsilon) - \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\epsilon}} \right) \text{grad}(\epsilon) \right] = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (13)$$

که P بخش حاوی تولید آشفتگی به علت تنش در جریان است. مدل $k-\epsilon$ حاوی پنج ثابت تجربی $(C_{\mu}, C_1, C_2, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon})$:

$$\sigma_{\epsilon} = 1.3 \quad \sigma_k = 1.0 \quad C_{\mu} = 0.09 \quad (14)$$

$$C_{2\epsilon} = 1.92 \quad C_{1\epsilon} = 1.44$$

معادله انرژی مورد استفاده برای محاسبات مربوط به تغییرات دما به صورت رابطه (۱۵) است:

$$\text{div}(\rho UT) = \text{div} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \text{grad}(T) \right] \quad (15)$$

فرضیات زیر در تحلیل CFD در نظر گرفته شد:

- هوا محیط پیوسته و غیرقابل تراکم است.
- مسئله دو بعدی و جریان پایدار در نظر گرفته شد.
- سرعت جریان زیاد است، طوری که ویژگی‌های جریان آشفتگی^۱ حاکم است.

- خصوصیات ترموفیزیکی صفحه جاذب با توجه به دمای عملیات

1- Turbulent

ثابت است.

- کف صفحه جذب کننده آدیاباتیک فرض می‌شود.

تعیین شرایط مرزی

تعیین نوع شرایط مرزی و تنظیم آن‌ها یکی از اساسی‌ترین مراحل در کاربردهای مختلف دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. شرایط مرزی، تعیین‌کننده جریان و خاصیت‌های حرارتی در مرزها با توجه به فیزیک مسئله می‌باشد. سیال عامل برای شبیه‌سازی جمع‌کننده خورشیدی، هوا است. خصوصیات هوای استفاده شده در این شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است. خصوصیات شیشه و فولاد استفاده شده به عنوان شرایط مرزی در این شبیه‌سازی در جدول ۳ آورده شده است.

نمایش همگرایی حل

همگرایی خاصیتی از روش عددی برای به دست آوردن جوابی است که به حل دقیق نزدیک می‌باشد، به طوری که فاصله شبکه، اندازه حجم کنترل یا المان به صفر میل می‌کند. همگرایی زمانی حادث می‌شود که معیار همگرایی برای هر متغیر ارضا شود. در شکل ۳ برای تعیین زمان توقف حل مسأله از روش محاسبه باقی‌مانده‌های^۲ معادلات حاکمه استفاده شده است. با این توضیح که در این روش چرخش حل مسأله تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تفاضل کمیت‌های مورد بحث مانند سرعت یا دما به حداقل مقدار خود برسد. تعیین مقدار حداقل اختیاری می‌باشد، ولی هرچقدر به توان به مقدار کوچکتری برسیم دقت نتایج بالاتر خواهد بود. پس از تنظیم همه شرایط مرزی در نرم‌افزار Fluent، برای حل عددی مقداردهی اولیه باید انجام شود. تعداد تکرارها در حدود ۱۰۰ تنظیم شد. پایداری نتایج زمانی است که در آن حل همگرا شود. نتایج برای این شبیه‌سازی بعد از ۴۴ بار تکرار همگرا شد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد مقدار باقی‌مانده برای معادله پیوستگی^۳، مولفه‌های افقی^۴ و عمودی^۵ سرعت، k , epsilon، پارامترهای مربوط به روش عددی مورد استفاده برای حل جریان، کمتر از 10^{-3} به دست آمد، البته، این مقدار برای باقیمانده انرژی^۶ 10^{-6} به دست آمد.

- 2- Residuals
- 3- Continuity
- 4- x-velocity
- 5- y-velocity
- 6- Energy

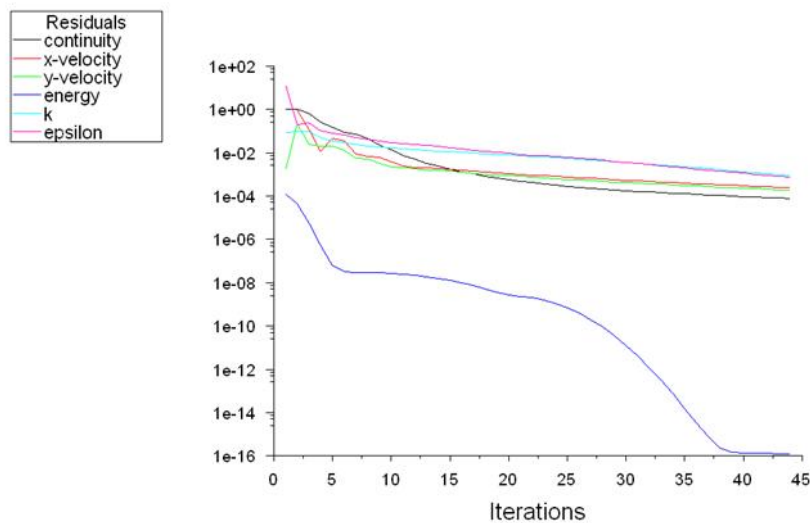
جدول ۲- خصوصیات هوا

پارامتر Parameter	مقدار Value
سرعت سیال Fluid velocity	سرعت محیط Environment velocity
قطر هیدرولیکی Hydraulic diameter	0.18 m
شدت آشفتگی Turbulence intensity	٪۱
دمای ورودی Input temperature	دمای محیط Environment temperature

جدول ۳- خصوصیات شیشه و صفحه جاذب (شرایط مرزی)

Table 3- Properties of glass and absorber plate (Coefficients for boundary conditions)

خصوصیات صفحه جاذب Properties of absorber plate		خصوصیات شیشه Properties of glass	
پارامتر Parameter	مقدار Value	پارامتر Parameter	مقدار Value
چگالی فولاد Density of steel	8030 kg m ⁻³	چگالی شیشه Density of glass	2700 Kg m ⁻³
ضریب انتقال حرارت فولاد Heat transfer coefficient of steel	16.27 W m ⁻² °C	ظرفیت گرمایی ویژه شیشه Heat Capacity of glass	0.84 kJ kg ⁻¹ °C
ظرفیت گرمایی ویژه فولاد Heat capacity of steel	502.48 kJ kg ⁻¹ °C	ضریب انتقال حرارت شیشه Heat transfer coefficient of glass	0.78 W m ⁻¹ °C



شکل ۳- مقدار باقی‌مانده‌ها برای ۴۴ بار تکرار اولیه حل مسئله

Fig. 3. Residuals for 44 running times for solving problem

آماري، يعني، خطای جذر میانگین مربعات^۱ (RMSE)، خطای مجموع مربعات^۲ (SSE)، سطح معنی‌داری^۳ (P-value) و ضریب همبستگی توسط روابط (۱۶) تا (۱۹) محاسبه شدند.

آنالیز آماری

برای مقایسه عملکرد روش دینامیک سیالات محاسباتی با شبکه عصبی برای پیش‌بینی دمای خروجی از جمع‌کننده صفحه تخت خورشیدی، نتایج حاصل از پیش‌بینی با دو روش فوق با داده‌های تجربی به صورت آماری ارزیابی شدند. در این مطالعه، پارامترهای

- 1- Root mean square error
- 2- Error sum of squares
- 3- Significance level

درجه حرارت محیط و رطوبت نسبی به‌عنوان پارامترهای ورودی و تابش خورشیدی به‌عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شدند. براساس نتایج به‌دست آمده ($RMSE=0.028$, $MPE=0.8521$, $R^2=99.96$) هم‌راستایی مناسبی بین مقادیر برآورد و اندازه‌گیری تابش خورشیدی وجود داشت (Azeez, 2011). در پژوهشی دیگر از ترکیب چهار پارامتر روز، حداکثر دمای هوا، دمای متوسط هوا، رطوبت نسبی (به‌عنوان ورودی) به‌منظور برآورد تابش انتشار خورشید در شهرستان ابها^۱ در عربستان سعودی استفاده نمودند. دقت شبکه توسعه‌یافته با میانگین مربعات خطای $5/18 \times 10^{-7}$ گزارش گردید. با توجه به پژوهش‌های یاد شده دقت روش حاضر نیز در پیش‌بینی دمای خروجی جمع‌کننده خورشیدی با $RMSE=0.77$ قابل قبول می‌باشد (Rehman and Mohandes, 2009)

مقایسه نتایج تجربی با روش شبیه‌سازی CFD

نتایج به‌دست آمده از تحلیل CFD جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت در این بخش ارائه شده است. شکل ۵ جهت بردارهای سرعت را نشان می‌دهد. جهت بردارهای سرعت از سمت دیواره ورودی به سمت دیواره خروجی است (به‌علت جهت باد). این شکل نشان می‌دهد که نرم‌افزار به‌خوبی عمل کرده و می‌تواند نتایج را به‌طور صحیح پیش‌بینی کند.

در شکل ۶ توزیع جریان نشان داده شده است. از شکل فوق می‌توان دید که جریان در جمع‌کننده متلاطم است. حرکت سیال و گردش جریان هوا به‌علت صعود و نزول جریان هوا در امتداد دیواره داغ و سرد است. در ضمن برخی گردابهایی در نزدیکی لبه‌های ورودی کانال مشاهده می‌شود و بعد از این پروفیل سرعت یکنواخت‌تر شده و ثابت می‌شود. شاید بتوان گفت نیاز به طولی برای داشتن جریان کاملاً توسعه‌یافته داریم که به‌علت تیزی لبه مقداری گردش هوا داشته و بعد از کمی فاصله از لبه کانال جریان کاملاً توسعه می‌یابد (Incropera and DeWitt, 1985). حداکثر توزیع سرعت در دیواره خروجی در وسط اتفاق می‌افتد. در ضمن توزیع سرعت (کانتور سرعت) روی دیواره بالایی (شیشه) و دیواره پایینی (فولاد) صفر است، چون ملکول‌هایی از هوا که در تماس با دیواره‌ها هستند، سرعتی برابر سرعت دیواره دارند، چون هر دو دیواره ساکن هستند، بنابراین سرعت هوا در مجاورت با این دیواره‌ها صفر است (Streeter, 1962).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_{pre,i})^2 \quad (17)$$

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|T_i - T_{pre}|}{T_i} \quad (18)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - \bar{T}_{exp})^2 - \sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - \bar{T}_{pre})^2}{\sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - \bar{T}_{exp})^2} \quad (19)$$

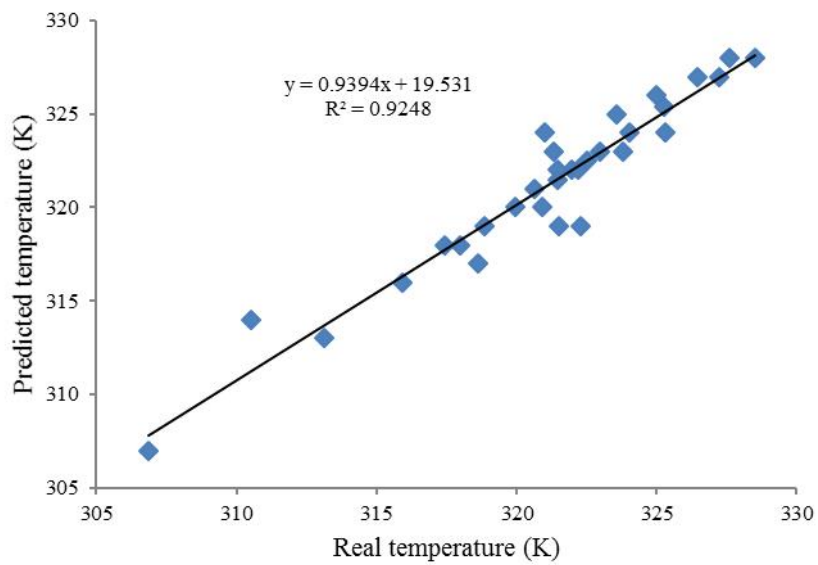
نتایج و بحث

این بخش شامل مقایسه دو روش ANN و CFD با داده‌های حاصل از آزمایش می‌باشد. بدین منظور یک سری شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌سازی شبکه عصبی انجام شد تا عملکرد حرارتی یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت مورد بررسی قرار گیرد.

مقایسه نتایج تجربی با روش شبیه‌سازی ANN

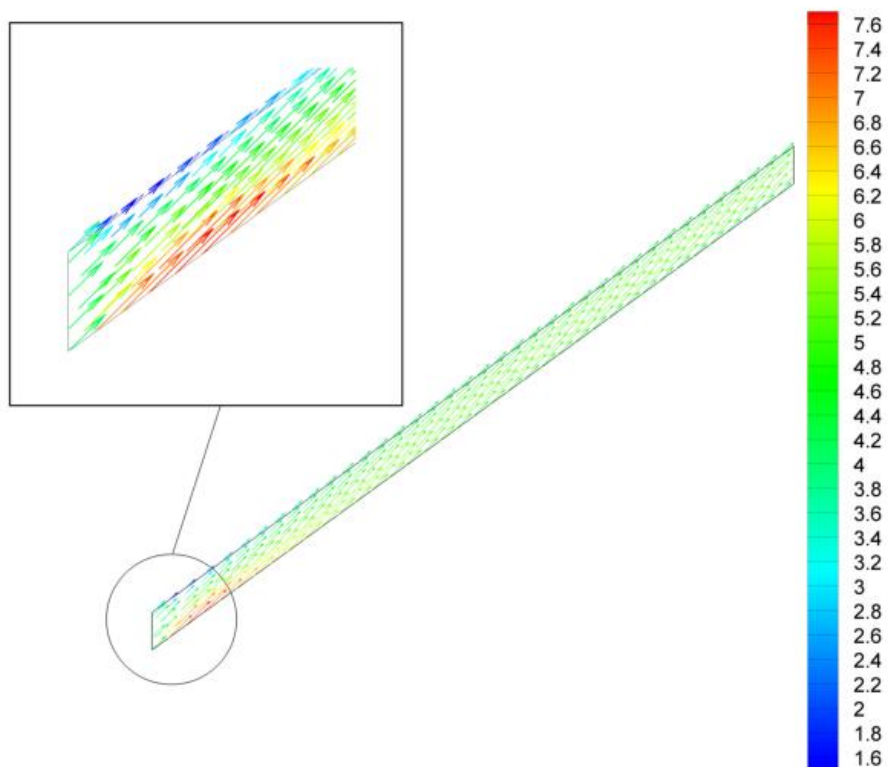
نتایج آموزش نشان داد، کم‌ترین مقدار میانگین مربعات خطا برای داده‌های آزمون شبکه پرسپترون سه‌لایه (ورودی، میانی و خروجی) با تابع انتقال تان-سیگموئید، قاعده‌ی یادگیری لونبرگ، و پنج نرون در لایه‌ی پنهان، $1/23$ می‌باشد. برای $RMSE$ مذکور مقدار $R^2=0.925$ محاسبه شد. مقایسه مقادیر دمای اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط شبکه‌ی عصبی طراحی شده، در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، روند خطی میان دمای واقعی و برآورد شده نشان از موفقیت شبکه عصبی در یادگیری تغییرات دمای جمع‌کننده دارد.

بیشترین خطا در پیشگویی دما $3/3$ کلون می‌باشد، اما در اکثر مواقع (64%) خطایی کمتر از 1 کلون داشت. در ضمن شایان ذکر است که شبکه در اکثر مواقع (74% موارد)، مقادیری کمتری را نسبت به مقدار تجربی پیش‌بینی نموده است. در پژوهشی به کمک شبکه عصبی دمای محصولات در خشک‌کن خورشیدی پیش‌بینی و نتایج آن با مدل‌های تجربی مقایسه شد (Tripathy and Kumar, 2009). مطابق نتایج ارائه شده، شبکه عصبی مقادیر دمای خروجی کمتری نسبت به مقدار واقعی داشت که با پژوهش حاضر در یک‌راستا می‌باشد. در ضمن تریپاسی و کومار نتیجه گرفتند که شبکه عصبی با مقدار $R^2=0.95$ و $RMSE=0.77$ عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های تجربی از خود نشان داد. در پژوهشی عزیز از یک شبکه پس‌انتشار خطا به‌منظور برآورد ماهانه متوسط تابش خورشیدی در یک سطح افقی در شهر گوساو نیجریه استفاده نمود. مدت زمان تابش، حداکثر



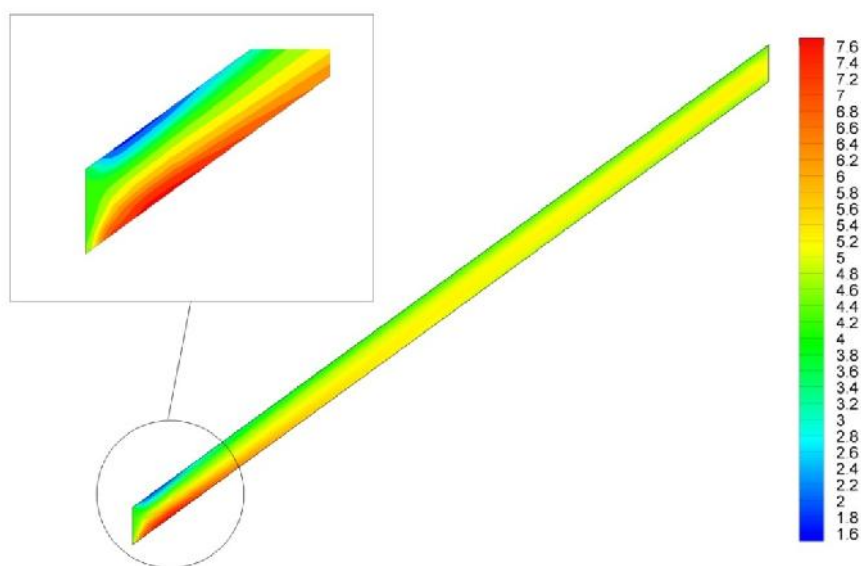
شکل ۴- مقایسه دمای واقعی با برآورد شده در جمع‌کننده

Fig.4. Comparison of real and prediction of output temperature in solar collector



شکل ۵- بردارهای سرعت ($m s^{-1}$)

Fig.5. Velocity vectors ($m s^{-1}$)

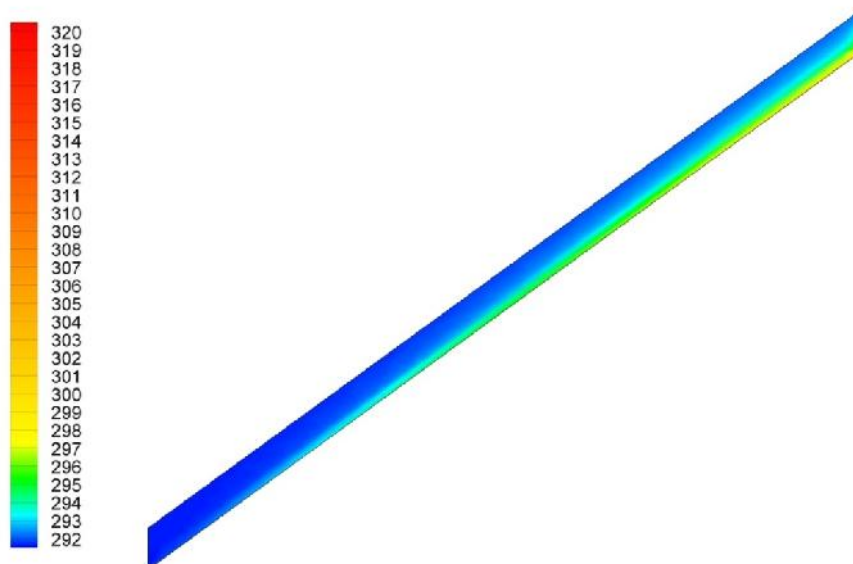


شکل ۶- تخمین توزیع سرعت پس از محاسبات اولیه (m s^{-1})

Fig.6. Estimation of velocity contour after the preliminary calculations (m s^{-1})

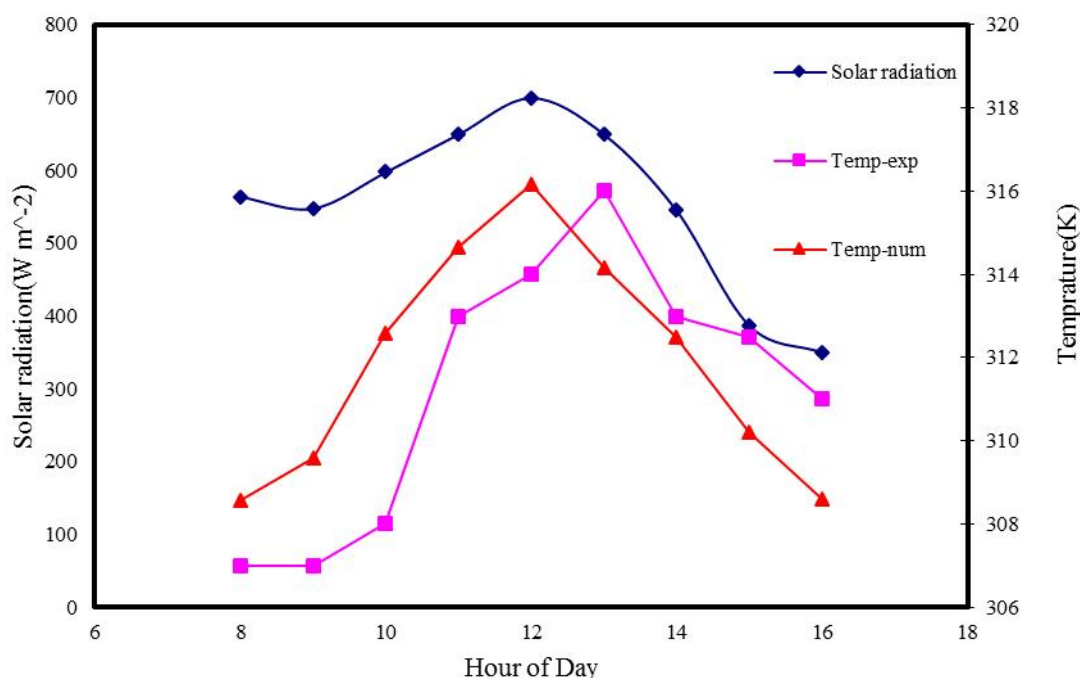
دما روی دیواره پایینی قرار می‌گیرد، چون ابتدا دیواره پایینی (فولاد) گرم می‌شود، سپس گرما به هوا منتقل می‌شود.

در شکل ۷ توزیع کانتور دما نشان داده شده است. یک گرادیان دما می‌توان از شیشه تا صفحه جذب‌کننده داغ مشاهده کرد. حداکثر



شکل ۷- تخمین توزیع دما پس از محاسبات اولیه (K)

Fig.7. Estimation of temperature contour after the preliminary calculations (K)



شکل ۸- مقایسه نتایج عددی و تجربی دمای خروجی

Fig.8. Comparing between numerical and experimental of output temperature

دمای خروجی برای نتایج تجربی در ساعت ۱ بعد از ظهر اتفاق می‌افتد. دماهای خروجی در نتایج تجربی در ساعات قبل از ظهر کمتر از حل عددی هستند. این مسأله می‌تواند به علت ضخامت صفحه جاذب باشد که باعث می‌شود تا دمای این صفحه دیرتر از زمان بیشترین تابش به میزان حداکثر خود برسد (Incropera and DeWitt, 1985; Fluent, 2006).

دمای خروجی در نتایج حل عددی در ساعات بعد از ظهر کمتر از نتایج تجربی هستند که علت این امر نیز ضخامت صفحه جاذب است که باعث می‌شود این صفحه گرما در خود نگاه داشته و دیرتر از دست بدهد. به عبارتی یک پسماند گام زمانی^۱ در دمای پیش‌بینی شده در روش عددی داریم (Incropera and DeWitt, 1985; Fluent, 2006).

آنالیز آماری

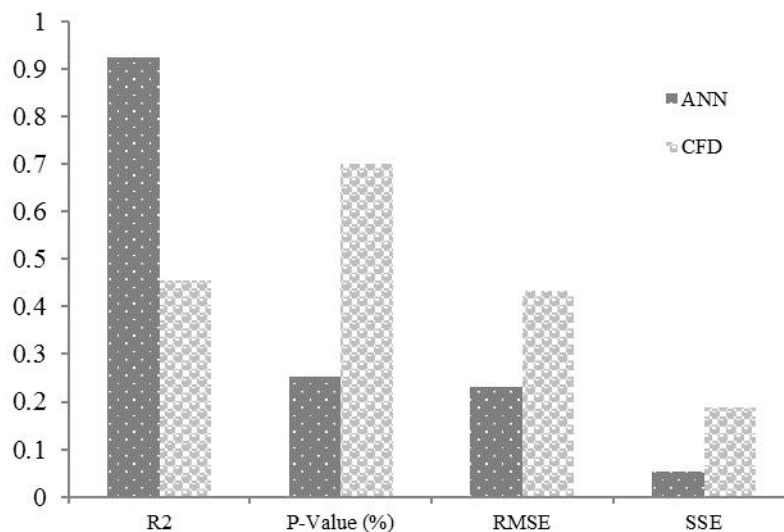
شکل ۹ نتایج محاسبات آماری بررسی تطابق بین نتایج داده‌های تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده را برای دو روش ANN و CFD نشان می‌دهد. روش خوب پیش‌بینی روشی است که SSE، RMSE و P-value نزدیک‌تر به صفر و R² نزدیک‌تر به یک داشته باشد. بنابراین روش ANN به لحاظ آماری نسبت به روش CFD تطابق

شبه‌سازی برای زمان‌های مختلف یک روز از ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر انجام شد. سپس نتایج به دست آمده از این شبه‌سازی همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با نتایج تجربی مقایسه شد. منحنی ترسیم شده دماهای خروجی شبه‌سازی و تجربی را در مقابل زمان نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ بیشترین اختلاف بین دماهای شبه‌سازی شده و تجربی حدود ۲/۴K تا ۴/۶K برای زمان‌های مختلف است. اما در ۱۱٪ مواقع خطایی کمتر از ۱ کلوین وجود دارد. در ضمن شایان ذکر است که شبه‌سازی عددی در ۴۴٪ موارد، مقادیر کمتری را نسبت به مقدار تجربی پیش‌بینی نموده است. سلمی و همکاران و اینگل و همکاران اختلاف دمای ۴ K را بین دمای خروجی تجربی و پیش‌بینی شده به دست آوردند (Ingle et al., 2013; Selmi et al., 2008).

عدم تطابق بین نتایج داده‌های تجربی با پیش‌بینی‌های مدل در زمان‌های مختلف به علت این واقعیت است که ورودی‌های تجربی تعریف نشده‌ای از قبیل شدت تلاطم، تلفات تابشی از صفحه جاذب به محیط، نشت، خطای ابزار اندازه‌گیری و غیره وجود دارد که در شبه‌سازی مدل در نظر گرفته نشده است. این تلفات در شدت تابش‌های بالا قابل توجه‌تر است که مطابق با نتایج بدیجه و همکاران است (Badache et al., 2012). حداکثر شدت تابش در ساعت ۱۲ ظهر اتفاق می‌افتد و حداکثر دمای خروجی از جمع‌کننده در حل عددی نیز در ساعت ۱۲ ظهر اتفاق می‌افتد، در صورتی که حداکثر

1- Time step hysteresis

بهتری با داده‌های تجربی دارد.



شکل ۹- نمایش گرافیکی تست آماری روش ANN و CFD

Fig. 9. Graphic representation of the statistic test for ANN and CFD

داد که ANN بهتر از CFD برای پیش‌بینی دمای خروجی عمل می‌کند. اما برای پیش‌بینی و توزیع پروفیل دما و سرعت در جمع‌کننده خورشیدی روش ANN هیچ‌گونه اطلاعاتی نمی‌دهد. بنابراین روش CFD گرچه دقت پیش‌بینی کم‌تری نسبت به ANN دارد، اما به‌علت در اختیار گذاشتن اطلاعاتی در رابطه با پروفیل سرعت و دما در جمع‌کننده خورشیدی، همچنان روشی سودمند و ارزشمند است.

نتیجه‌گیری

برای بررسی عملکرد دو روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی دمای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی، نتایج حاصل از این دو روش با نتایج تجربی دمای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت مقایسه شد. اندازه‌گیری‌های تجربی شامل پارامترهای ذیل بودند: زمان روز، دمای هوای ورودی و خروجی، شدت تابش خورشید و سرعت هوا. بررسی‌های آماری نشان

References

1. Aghkhani, M. H., M. H. Abbaspour-Fard, M. R. Bayati, H. Morteza pour, S. I. Saedi, and A. Moghimi. 2013. Performance Analysis of a Solar Dryer Equipped with a Recycling Air System and Desiccant Chamber. *Journal of Agricultural Machinery* 3 (2): 92-103. (In Farsi).
2. Azeez, M. A. A. 2011. Artificial neural network estimation of global solar radiation using meteorological parameters in Gusau, Nigeria. *Archives of Applied Science Research* 3: 586-95.
3. Badache, M., D. Rouse, S. Hallé, G. Quesada, and Y. Dutil. 2012. Experimental and two-dimensional numerical simulation of an unglazed transpired solar air collector. *Energy Procedia* 30: 19-28.
4. Benli, H. 2013. Determination of thermal performance calculation of two different types solar air collectors with the use of ANN. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 60: 1-7.
5. Dogan, A., H. Demirpence, and M. Cobaner. 2008. Prediction of Groundwater Levels From Lake Levels and Climate Data Using ANN Approach. *Water SA*, 34 (2): 199.
6. Duffie, J. A., and Beckman, W. A. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley Interscience, New York.
7. Esen, H., F. Özgen, M. Esen, and A. Sengur. 2009. ANN and wavelet neural network approaches for modeling of a solar air heater. *Expert System with Applications* 36: 11240-11248.
8. Fahad, A.A., D. Ibrahim, and H. Feridum. 2011. Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system. *Solar Energy* 85: 2228-2243.
9. Fluent Inc. 2006. *Fluent 6.3 UDF Manual*. Fluent Inc, Lebanon.

10. Fuxin, H. 1997. Solar drying. International solar Energy applications training workshop. Lanzhou, China.
11. Gorla, R. S. R. 1997. Finite element analysis of a flat plate solar collector. *Finite Elements in Analysis and Design* 24: 283-290.
12. Hornik, K., M. Stinchcombe, and H. White. 1989. Multilayer feed forward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2: 359-366.
13. Incropera, F. P., and D. P. DeWitt. 1985. *Introduction to Heat Transfer*. Wiley, USA.
14. Ingle, P. W., A. A. Pawar, B. D. Deshmukh, and K. C. Bhosale. 2013. CFD Analysis of Solar Flat Plate Collector. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3: 337-342.
15. Janjai, S., A. Esper, and W. Muhlbauer. 2000. Modelling the performance of a large area plastic solar collector. *Renewable energy* 21: 363-376.
16. Kuipers, J. A. M., and W. P. M. Van Swaaij. 1998. Computational fluid dynamics applied to chemical reaction engineering. *Advances in Chemical Engineering* 24: 227-328.
17. Lecoeuche, S., and T. S. Lalot. 2005. Prediction of the daily performance of solar collectors, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32: 603-611.
18. Pangavhane, D. R., R. L. Sawhney, and P. N. Sarsvadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy* 27: 579-590.
19. Rehman, S., and M. Mohandes. 2009. Estimation of diffuse fraction of global solar radiation using artificial neural networks. *Energy Sources Part A* 31: 974-84.
20. Selmi, M., M. J. Al-Khawaja, and A. Marafia. 2008. Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector. *Renewable Energy* 33: 383-387.
21. Streeter, V. L. 1962. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill.
22. Tripathy, P. P., and S. Kumar. 2009. Neural network approach for food temperature prediction during solar drying. *International Journal of Thermal Sciences* 48: 1452-1459.
23. Turgut, O., and N. Onur. 2009. Three dimensional numerical and experimental study of forced convection heat transfer on solar collector surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36: 274-279.
24. Versteeg, H. K. and W. Malalasekera. 1995. *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Prentice Hall. London
25. Zhai, R. R., Y. Zhu, Y. P. Yang, K. Y. Tan, and H. Eric. 2013. Exergetic and Parametric Study of a Solar Aided Coal-Fired Power Plant. *Entropy* 15: 1014-1034.
26. Zurada, J. M. 1996. *Introduction to artificial neural systems*. West Publishing Co. USA.

Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network

F. Nadi^{1*} - S. Abdanan Mehdizadeh² - O. Nourani Zonouz³

Received: 21-10-2016

Accepted: 08-01-2017

Introduction

The significant of solar energy as a renewable energy source, clean and without damage to the environment, for the production of electricity and heat is of great importance. Furthermore, due to the oil crisis as well as reducing the cost of home heating by 70%, solar energy in the past two decades has been a favorite of many researchers. Solar collectors are devices for collecting solar radiant energy through which this energy is converted into heat and then heat is transferred to a fluid (usually air or water). Therefore, a key component in performance improvement of solar heating system is a solar collector optimization under different testing conditions. However, estimation of output parameters under different testing conditions is costly, time consuming and mostly impossible. As a result, smart use of neural networks as well as CFD (computational fluid dynamics) to predict the properties with which desired output would have been acquired is valuable. To the best of our knowledge, there are no any studies that compare experimental results with CFD and ANN.

Materials and Methods

A corrugated galvanized iron sheet of 2 m length, 1 m wide and 0.5 mm in thickness was used as an absorber plate for absorbing the incident solar radiation (Fig. 1 and 2). Corrugations in absorber were caused turbulent air and improved heat transfer coefficient.

Computational fluid dynamics

K- turbulence model was used for simulation. The following assumptions are made in the analysis.

- (1) Air is a continuous medium and incompressible.
- (2) The flow is steady and possesses have turbulent flow characteristics, due to the high velocity of flow.
- (3) The thermal-physical properties of the absorber sheet and the absorber tube are constant with respect to the operating temperature.
- (4) The bottom side of the absorber tube and the absorber plate are assumed to be adiabatic.

Artificial neural network

In this research a one-hidden-layer feed-forward network based on the back propagation learning rule was used to simulate the output temperature of a solar collector. The number of neurons within the hidden layer varied from 1 to 20. The hyperbolic tan- sigmoid and pure-line were used as the transfer function in the hidden layer and output layer, respectively. Minimization of error was achieved using the Levenberg-Marquardt algorithm. To carry out the aforementioned steps, the dataset (105 observations) was split into training (70 observations), and test (35 observations) data. Training sets used to develop models included air velocity, solar radiation, time of the day, ambient moisture and temperature values as inputs with an associated temperature of the collector as outputs. The aim of every training algorithm is to reduce this global error by adjusting the weights and biases.

Results and Discussion

1- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Mechanics, Azadshahr Branch, Islamic Azad University, Azadshahr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Ramin Agriculture and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Ahvaz, Khuzestan, Iran

3- Instructor, Department of FluidMechanics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: f.nadi@iauaz.ac.ir)

Compare experimental results with ANN

The performance of the three-layer ANN for the prediction of output temperature of flat-plate solar collector by the Levenberg–Marquardt training algorithm was illustrated in Fig. 4. ANN predicted output temperatures with R^2 and RMSE of 0.92 and 1.23, respectively. Furthermore, the maximum error in prediction of output temperature of solar collector was 3.3 K. These results are in agreement with Tripathy and Kumar, (2009) those who have predicted the output temperatures of food product in the solar drier using ANN with and RMSE of 0.95 and 0.77, respectively.

Compare experimental results with CFD simulation

Fig. 6 shows that over the starting length of the absorber plate, there is a variation of the velocity profile which is caused by sharp geometry and it leads to some recirculation of the air in this part of absorber plate. After this part of boundary layers, flow is fully developed and velocity profile becomes smoother and constant.

Fig. 8 shows that the predicted temperature was within the experimentally measured temperature. The highest differences between simulated and experimental temperatures were around -2.4K to 4.6K for different time periods. The temperature differences of 4K were reported by Selmi *et al.* (2008). This disagreement is due possibly to the fact that there are unknown experimental inputs such as turbulence intensity, radiative heat loss from the absorber sheet to the surroundings, Leakage, and measurement tool errors which were not accounted in the model simulations. These losses by radiation are significant at high irradiation levels. This result agrees with studies done in Badache *et al.* (2012).

Thickness of absorber plate and radiation loss, in CFD model, does not take into consideration. For this reason maximum output temperature is seen in maximum radiation which is 12 p.m. While in real condition, it takes some time for absorber plate to get to its maximum temperature.

Moreover, the numerical temperature is smaller than the real temperature after 12 p.m. This may occur because of the thickness of metal which keeping the absorbed heat and losing it after awhile. Generally there is a time step hysteresis for the numerical temperature.

Conclusions

According to this study it can be concluded that the ANN operates better than CFD to predict the output temperature operation. However, ANN method does not give any information about the prediction of temperature distribution and velocity profiles in the solar collector. Although prediction accuracy of the CFD method is less than ANN method, but the provided information on the velocity and temperature profile of the solar collector is still valuable.

Keywords: Artificial neural network, Computational fluid dynamics, Output temperature, Solar flat plate collector

یادداشت پژوهشی

طراحی و ساخت یک مدل آزمایشگاهی موزع با ترتیب ریزش نردبانی (عرضی) قلمه برای استفاده در کارنده نیشکر

عباس اکبرنیا*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۳

چکیده

نیشکر گیاهی است که برای تولید و استخراج قند از ساقه آن، کشت می‌شود. سطح زیر کشت نیشکر در ایران حدود ۸۰ هزار هکتار و عمل کشت در این مزارع با دست و توسط کارگر انجام می‌گیرد. ماشین‌های کارنده وارد شده به ایران و نمونه‌های ساخت داخل که عموماً الگو برداری از روی نمونه‌های خارجی است، به دلیل لغزش نقاله موزع و عدم یکنواختی در ریزش و آرایش قلمه‌ها در ردیف‌های کشت از کارایی لازم برخوردار نیستند. لذا ساخت موزعی که بتواند موضوع بالا آوردن قلمه‌ها از داخل مخزن و تحویل آنها به لوله سقوط را به‌طور پیوسته، یکنواخت و منطبق با شرایط مزارع نیشکر در کشور انجام دهد، قابل تأمل خواهد بود. در این تحقیق با مطالعه منابع و همچنین بررسی میدانی مشکلات حاکم بر مزارع نیشکر و عدم کارآمدی ماشین‌های کارنده موجود (لغزش نقاله انتقال قلمه‌ها، باقی گذاشتن فضای کشت نشده در مزرعه، صدمه رساندن به جوانه قلمه و غیره) نسبت به ارائه ساز و کار جدید با قابلیت‌های ویژه برای رفع مشکلات فوق اقدام شد. هدف از اجرای این پروژه طراحی و ساخت یک مدل آزمایشگاهی موزع مرکب به‌منظور استفاده در دستگاه‌های کارنده نیشکر است. در این طرح بر عکس موزع‌های موجود که قلمه‌ها را به‌صورت طولی می‌ریزند، قلمه‌ها به‌صورت عرضی (نردبانی) بر روی زمین (ردیف کشت) قرار می‌گیرند. موزع مذکور ساخته و پس از ارزیابی‌های آزمایشگاهی، آماده ساخت در ابعاد واقعی و آزمایش مزرعه‌ای می‌باشد. این عمل موجب کاهش مصرف قلمه در هکتار، ریزش یکنواخت و رفت و آمد کمتر ماشین در مزرعه و بهره‌وری بیشتر کارنده خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: دستگاه موزع مرکب، قلمه نیشکر، کارنده نیشکر، مدل آزمایشگاهی، مکانیزاسیون کشت نیشکر

مقدمه

از آنها استفاده می‌شود. از جمله ماشین‌های کاشت، کارنده قلمه است که در مزارع نیشکر از آن بسیار بهره می‌برند. کشت نیشکر عبارت از قرار دادن قلمه‌های تهیه شده از ساقه‌ی گیاه نیشکر در خاکی که دارای عمق مناسب، تهویه خوب، مواد غذایی کافی، ساختمان مناسب و نفوذپذیری بالا نسبت به آب است. از آن‌جا که نیشکر در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دنیا و در حوالی خط استوا بین مدار ۲۶ درجه جنوبی تا ۳۴ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی می‌روید، منطقه جنوب ایران و استان خوزستان منطقه مساعد برای کشت این گیاه محسوب می‌شود (Anonymous, 2007). سطح زیر کشت نیشکر در ایران (استان خوزستان) حدود ۸۰ هزار هکتار است (Anonymous, 2007).

کشت نیشکر به دو صورت دستی و ماشینی انجام می‌گیرد. در روش دستی پس از تهیه و آماده‌سازی قلمه‌ها، آن‌ها را در داخل جویچه‌ها (شیار) قرار می‌دهند. در این حالت نی‌ها را به‌طور طولی در

شکر به‌عنوان یکی از منابع غذایی بشر نقش مهمی را در سبب مواد غذایی ضروری مردم جهان دارد، به‌طوری‌که ۵۲ درصد از کل تولیدات غذایی جهان به نیشکر و چغندر اختصاص دارد (Frank, 1984). برای تولید محصول، به‌ویژه افزایش محصول در واحد سطح مزرعه و کاهش هزینه‌های تولید، به‌کار بستن روش‌های نوین مکانیزاسیون در مزرعه امری مسلم و ضروری است. ماشین‌های کاشت از جمله تجهیزاتی هستند که در امر مکانیزاسیون مزارع بسیار کاربرد داشته و در راستای کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بازدهی

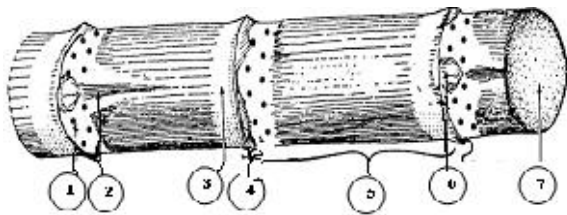
۱- دانشیار، گروه طراحی ماشین و مکاترونیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: abbasakbarnia@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jam.v7i1.45290

سرعت ریزش قلمه زیاد می‌گردد. به دلیل مشکلات فوق‌الذکر در حال حاضر در ایران و در مزارع کشت و صنعت خوزستان در هر دوره از کاشت تعداد زیادی کارگر فصلی به منظور کشت دستی قلمه نیشکر به کار گرفته می‌شوند و با ارسال قلمه‌ها توسط تریلرهای متعدد در مزرعه، کشت نیشکر به روش دستی و توسط کارگر انجام می‌گیرد. این امر از جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و فنی اشکالات عدیده‌ای را دربر دارد از جمله؛ حضور تعداد چند صد نفر کارگر با فرهنگ‌های مختلف، هر ساله موجب درگیری و زد و خورد‌های فیزیکی بین آن‌ها می‌شود. تهیه و فراهم نمودن وسیله رفت و آمد، تغذیه و محل استراحت این تعداد کارگر و نیز تهیه و مصرف تعداد زیاد قلمه در روش دستی، هزینه زیادی را برای کشت و صنعت نیشکر موجب خواهد شد. از جنبه علمی و فنی عملیات کاشت با دست معایبی چند را در بردارد: ۱- محدودیت‌های زمانی ناشی از تغییرات آب و هوا در زمان تهیه بستر و کاشت. ۲- رفت و آمدهای مکرر تراکتور و ادوات متصل به آن که منجر به فشردگی خاک مزرعه می‌شود. ۳- افزایش مصرف تعداد قلمه به کار رفته شده در هکتار.

ساقه نیشکر دارای بندهای مشخصی است که هر کدام شامل یک گره و میان‌گره می‌باشد. هر گره شامل یک جوانه‌ی جانبی، یک نوار حاوی ریشه‌های اولیه و یک حلقه‌ی رشد است. در اراضی نیشکر خوزستان در هر ردیف دو سری قلمه به صورت طولی کشت می‌شود. در کاشت به روش طولی معمولاً طول قلمه‌ها بین ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر تهیه و به گونه‌ای در ردیف کشت قرار داده می‌شوند که مقداری هم‌پوشانی داشته باشند. به طور متوسط در این قلمه‌ها بین ۶ تا ۸ گره وجود دارد و در هر گره یک جوانه دیده می‌شود که منشأ رویش گیاه جدید نیشکر خواهد بود (شکل ۱).



شکل ۱- ساقه نیشکر و بخش‌های مختلف آن

- ۱- نوار ریشه
- ۲- شیار جوانه
- ۳- نوار واکسی
- ۴- گره
- ۵- میان‌گره
- ۶- چشم یا جوانه
- ۷- برش ناحیه میان‌گره

Fig.1. Steam of sugarcane and different parts of it
1- Root Bar 2- Gemma groove 3- Wax strip 4-Node
5- Internode 6- Gemma 7- Section of internode

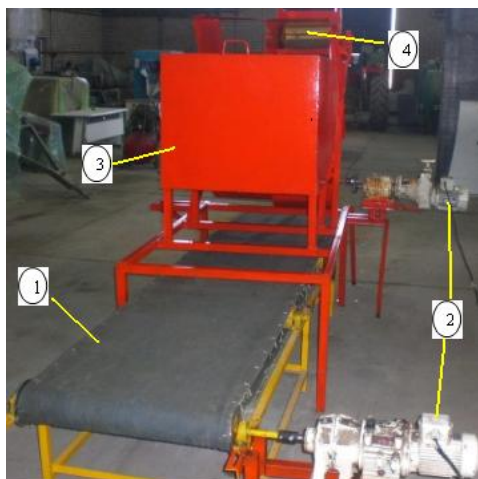
با توجه به بررسی‌های به عمل آمده در مؤسسه تحقیقات شرکت توسعه نیشکر در ارتباط با تعداد ردیف کشت قلمه، مقایسه‌ای بین کشت دو، سه و چهار ردیف قلمه انجام گرفت و بهترین عملکرد گیاه نیشکر در کشت دو ردیف حاصل شد (Anonymous, 2007). از آن‌جا که ماشین‌های کارنده موجود در کشت و صنعت خوزستان

جویچه‌ها به صورتی که بخشی از آن‌ها بر روی یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند، قرار می‌گیرند. سپس به وسیله‌ی کج‌بیل یا پوشاننده‌ی ماشینی، قلمه‌ها را با خاک می‌پوشانند. با توجه به شرایط آب و هوایی مناطق کشت نیشکر و گرم و مرطوب بودن هوا در فصل کشت، عملیات کشت دستی، کاری پر زحمت و طاقت فرسا بوده و راندمان کار بسیار پایین و هزینه‌ی کشت زیاد است (Maleki et al., 2006). در روش کشت ماشینی معمولاً دو طریق کشت نیمه‌مکانیزه (نیمه‌خودکار) و کاملاً مکانیزه (خودکار) وجود دارد (Srivastava, 2004). در سال ۲۰۰۱ یک کارنده نیمه مکانیزه مورد ارزیابی قرار گرفت و ظرفیت مزرعه‌ای آن ۰/۱۵ هکتار بر ساعت گزارش شد (Bhal and Sharma, 2001). دو نمونه دستگاه کارنده نیمه‌مکانیزه در سال ۲۰۰۴ ارزیابی شد. در این تحقیق حداکثر ظرفیت مزرعه‌ای را ۰/۲۴ هکتار بر ساعت و میزان کشت قلمه در هر هکتار را ۹ تن گزارش دادند (Patil et al., 2004). در سال ۲۰۰۷ یک کارنده نیمه‌مکانیزه مورد ارزیابی قرار گرفت و ظرفیت مزرعه‌ای آن ۰/۲۵ هکتار بر ساعت گزارش شد (Bachche et al., 2007).

در روش مکانیزه قلمه‌ها از طریق تسمه نقاله به سمت لوله سقوط که در جلوی دستگاه قرار دارد هدایت و از آن طریق به داخل شیری که توسط شیار بازکن ایجاد شده است، فرو می‌افتد. طی مقایسه انجام شده بین یک کارنده نیمه‌مکانیزه و یک کارنده مکانیزه گزارش شد که عملیات با کارنده مکانیزه از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است (Khedkar and Kamble, 2008). پنج مدل مختلف کارنده در سال ۲۰۱۰ با یکدیگر مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به نتایج ارائه شده مصرف قلمه در این دستگاه‌ها بسیار متغیر و بعضاً بسیار بالا بود ولی از نظر اقتصادی روش مکانیزه به‌طور معنی‌داری ارزان‌تر از روش کاشت نیمه‌مکانیزه گزارش شد (Ripoli and Ripoli, 2010).

ماشین‌های کارنده نیشکر موجود در ایران، خارجی بوده و نمونه‌های ساخت داخل، عموماً الگوبرداری از روی نمونه‌های خارجی است. این کارنده‌ها با توجه به شرایط آب و هوا، بافت و ساختار خاک مزارع کشور و نیز متفاوت بودن الگوی کشت در ایران، قادر به پاسخگویی شرایط مزارع نیشکر نبوده، از کارایی لازم برخوردار نشدند (Namjoo, 2009; Taghinezhad et al., 2012). ضمن این‌که حین کار در مزرعه به دلیل لغزش نقاله انتقال قلمه‌ها و باقی گذاشتن فضای کشت نشده در مزرعه موجب باقی ماندن فضای نکاشت در ردیف‌های کشت می‌شوند. کارنده‌های مذکور به گونه‌ای عمل می‌نمایند که قلمه به صورت طولی به روی زمین و داخل شیار کشت فرو می‌افتد که گاهی به دلیل لغزش تسمه نقاله موجب فاصله‌های ناخواسته بین قلمه‌ها در حین کاشت می‌شود (عدم کشت یکنواخت). این امر به ویژه در ابتدای کار که مخزن کارنده کاملاً پر است، وزن قلمه‌ها موجب لغزش بیشتر تسمه نقاله موزع شده و در زمانی که عملیات کاشت قلمه به نیمه می‌رسد و مخزن قدری خالی می‌شود نیز

است. زاویه‌دار شدن کف مخزن موجب می‌شود تا تمام قلمه‌های موجود در آن به سمت موزع حرکت نماید. ۲- مجرای (لوله) سقوط قلمه‌ها. ۳- تسمه نقاله مرکب ۴- تعدادی پیاله (ناودانی) به‌منظور دریافت و انتقال قلمه‌ها از داخل مخزن و هدایت آن‌ها به سمت لوله سقوط. ۵- تعدادی پهنه‌ی فلزی به‌عنوان نگهدارنده تسمه نقاله مرکب. ۶- سیستم تأمین انتقال قدرت برای حرکت نقاله. ۷- ساز و کار تسمه نقاله متحرک بی‌انتها به‌عنوان بستر سیار (متحرک) به‌منظور نشان دادن نحوه و چگونگی ریزش قلمه‌ها از کانال سقوط در حین پیشروی دستگاه. ۸- دو عدد الکتروموتور دور متغیر به‌منظور تأمین حرکت موزع مرکب و نقاله بستر سیار (متحرک) ۹- ساز و کار کنترل جهت و سوی ریزش قلمه‌ها. قطعات مختلف پس از تهیه و ساخت بر روی شاسی نصب و بعد از آماده‌سازی واحدهای مختلف، دستگاه راه‌اندازی شد (شکل ۲). این تحقیق در پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شد.



شکل ۲- واحدهای تشکیل‌دهنده یک مدل آزمایشگاهی کارنده

نیشکر با موزع مرکب

- ۱- نقاله بستر متحرک، ۲- الکتروموتور دور متغیر محرک نقاله بستر و موزع، ۳- مخزن قلمه‌ها، ۴- نقاله موزع مرکب

Fig. 2. Model of sugar cane planter laboratory with compound distributor unit.

1- Conveyor belt, 2- Electro gearbox, 3- Scions basket, 4- Compound distributor conveyor

شکل ۳ نقاله موزع مرکب، موقعیت پیاله‌های بالابرنده قلمه‌ها و ساز و کار جهت‌دهنده قلمه‌ها را نشان می‌دهد. نبشی نشان داده شده در ساز و کار جهت‌دهنده (شکل ۳) موجب می‌شود تا قلمه‌هایی که در حالت طولی (عمود بر پیاله‌ها) رو به بالا می‌آیند با برخورد به نبشی دوباره به داخل مخزن بیفتند و فقط قلمه‌هایی از مقابل آن عبور می‌کنند که در داخل شیار پیاله و به‌صورت عرضی قرار گرفته باشند. همچنین پدال ارتعاشی پیچ شده در زیر نبشی مذکور موجب می‌شود تا با حرکت ارتعاشی خود باعث لرزش (تکان) قلمه‌های اضافی (دو یا

به‌دلیل مشکلات اشاره شده از کارایی لازم برخوردار نبوده و عملاً از مزارع خارج و کشت با دست جایگزین آن شد، مدیریت ارشد شرکت توسعه نیشکر را بر آن داشت تا به‌منظور برطرف کردن مشکلات اقتصادی، اجتماعی و فنی حاصل از کشت با دست نسبت به تهیه کارنده‌ای که قادر باشد کار کشت قلمه را به‌طور یکنواخت انجام دهد، اقدام نماید. در این بین طی بازدید و مذاکرات به‌عمل آمده توسط نگارنده با مسئولین امر ابتدا پیشنهاد ساخت دستگاهی که قادر باشد بندهای تهیه شده از ساقه نیشکر را کشت نماید (بندکار نیشکر) مطرح شد. این امر به‌دلیل مشکلات تهیه‌ی تعداد بی‌شماری بند قلمه از ساقه و نیز ضرورت ضدعفونی کردن آنها در هر دوره از کاشت، مورد موافقت قرار نگرفت. به‌دنبال ادامه بحث و تبادل نظر با واحد مکانیزاسیون شرکت نیشکر و جلسه توجیهی با مدیران مبنی بر تغییر در روش تهیه زمین (خاک‌ورزی) و روش کشت، پیشنهاد کشت عرضی (نردبانی) مطرح و مورد موافقت اولیه ایشان قرار گرفت. در کاشت به روش عرضی (نردبانی) کافی است قلمه‌ها به‌گونه‌ای تهیه شوند که حداقل جوانه مورد نیاز برای تعداد ردیف کشت (حداقل دو جوانه) وجود داشته باشد.

هدف از این تحقیق، ارائه ساز و کار جدید با قابلیت‌های ویژه برای رفع مشکلات فوق است. موزع انتخاب شده برای این امر، یک موزع مرکب بوده که به هیچ‌عنوان در حین کار لغزش نداشته و با نصب سامانه جهت‌دهنده به قلمه‌ها، فقط اجازه عبور به قلمه‌هایی داده شود که به‌صورت عرضی در داخل پیاله‌های نقاله قرار گرفته باشند (کشت عرضی). یک مدل از موزع مذکور ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. این موزع آماده نصب بر روی ماشین‌های کارنده نیشکر است.

مواد و روش‌ها

ماشین‌های کارنده موجود (وارد شده از خارج یا الگوبرداری ساخت داخل) به‌گونه‌ای عمل می‌نمایند که قلمه به‌صورت طولی بر روی زمین و داخل شیار کشت فرو می‌افتد و گاهی به‌دلیل لغزش تسمه نقاله آنها موجب فاصله‌های ناخواسته بین قلمه‌ها در حین کاشت می‌شود (عدم کشت یکنواخت). در راستای رفع مشکلات فوق، موزع انتخاب شده برای این امر، یک موزع مرکب بوده که به‌دلیل ساختار ترکیبی آن به‌هیچ‌عنوان در حین کار لغزش ندارد. ضمن این‌که در مسیر انتقال قلمه‌ها و قبل از خروج آن‌ها از مخزن با نصب ساز و کار جهت‌دهنده به قلمه‌ها، فقط اجازه عبور به قلمه‌هایی داده می‌شود که به‌صورت عرضی در داخل پیاله‌های نقاله قرار گرفته باشند.

پس از تعیین و انتخاب ساز و کار مورد نظر برای موزع نسبت به ساخت آن اقدام شد. اجزاء مختلف انتخاب شده در این دستگاه مشتمل است بر: ۱- مخزن دو تکه که بخش انتهایی آن به‌واسطه دو عدد لولا به قسمت متصل شده و تحت زوایای مختلف قابل تنظیم



شکل ۴- مخزن، موقعیت موزع مرکب و قلمه‌ها در داخل مخزن
Fig. 4. Scions basket, compound distributor position and sugarcane scions in the basket

برای شروع کار ابتدا الکتروموتور تسمه نقاله بستر متحرک و سپس الکتروموتور موزع مرکب راه‌اندازی شدند. قلمه‌ها به دلیل قرار گرفتن در سطح شیب‌دار کف مخزن آرام آرام به سمت نقاله موزع مرکب لغزیده و با تداوم حرکت موزع، قلمه‌ها در داخل نبشی‌ها قرار گرفته و به سمت بالا و خروج از مخزن و به داخل لوله سقوط هدایت شدند. نحوه‌ی حرکت قلمه‌ها و سقوط آن‌ها در لوله سقوط و در نهایت آرایش قرارگیری قلمه‌ها بر روی زمین به گونه‌ای پیش‌بینی شده است که قلمه‌ها عمود بر مسیر حرکت کارنده (تراکتور) قرار گیرند (ریزش عرضی یا نردبانی قلمه‌ها) (شکل ۵). با استفاده از این موزع و روش کاشت نردبانی دیگر موضوع هم‌پوشانی قلمه‌ها مانند سایر موزع‌هایی که با ریزش طولی قلمه‌ها بر روی زمین می‌ریزند منتفی بوده و به‌جای آن فاصله‌ی قلمه‌ها بر روی یک ردیف کشت مطرح می‌شود که این امر با توجه به تغییر دور سرعت موزع و نیز تغییر سرعت پیشروی کارنده توسط اپراتور قابل کنترل است.



شکل ۵- آرایش قرارگیری قلمه‌ها بر روی زمین (بستر متحرک)
Fig. 5. Arrangement of the sugarcane scions on the grand (conveyor belt)

سه قلمه) که در داخل پیاله روی هم قرار گرفته‌اند شده و این لرزش موجب خارج شدن و باز برگشت قلمه‌های اضافی به داخل مخزن شده و فقط یک قلمه در داخل شیار پیاله حبس می‌ماند تا در ادامه حرکت تسمه نقاله و در مسیر لوله سقوط، پیاله را ترک و روی زمین فرو افتد.



شکل ۳- ۱- نقاله موزع مرکب، ۲- پیاله بالا برنده قلمه، ۳- ساز و کار جهت‌دهنده قلمه‌ها

Fig. 3. 1-Compound distributor conveyor, 2- Cup of scion elevator, 3-Director of billets

پس از نصب قطعات روی شاسی دستگاه، نسبت به راه‌اندازی و انجام آزمون‌های سرد به شرح زیر اقدام شد: به حرکت در آوردن موزع مرکب و کنترل حرکت آزاد آن و پیاله‌های نصب شده روی تسمه نقاله موزع. کنترل دور موزع به منظور به‌دست آوردن سرعت مطلوب برای تعیین حرکت مناسب موزع و انتقال قلمه‌ها. به حرکت درآوردن تسمه نقاله بستر متحرک و کنترل تغییر سرعت حرکت آن (سرعت پیشروی کارنده روی زمین). کنترل چگونگی و میزان قابلیت پذیرش زاویه کف مخزن نسبت به نقاله موزع.

پس از انجام آزمون‌های سرد نسبت به تهیه قلمه از مزارع نیشکر استان خوزستان اقدام شد. طول قلمه بر مبنای طول پیاله‌های نصب شده (نبشی) در موزع مرکب انتخاب و برش داده شد. قلمه‌های آماده شده به داخل مخزن دستگاه منتقل (شکل ۴) و کف مخزن مقداری تحت زاویه (شیب‌دار) قرار گرفت.

طی مراحل ارزیابی موزع مرکب به منظور تعیین بهترین شرایط



شکل ۷- فاصله مناسب بین قلمه‌های ریخته شده توسط موزع
Fig. 7. The most suitable distance between the sugarcane scions by the distributor unit

زوایای لحاظ شده برای این امر شامل؛ ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه نسبت به افق منظور گردید. طی ارزیابی حاصل هرچه زاویه کمتر (تندتر) باشد، تغذیه نقاله روان‌تر و تعداد قلمه‌ی قرار گرفته بر روی پیاله‌های موزع بیشتر بود. آنچه مدنظر است جابه‌جا شدن تدریجی، آرام و تک‌تک قلمه‌ها توسط موزع می‌باشد. لذا مناسب‌ترین زاویه برای نقاله تغذیه بین ۷۰ و ۸۰ درجه به‌دست آمد. خروج آرام قلمه‌ها، هم‌جهت بودن آن‌ها در هنگام خروج از مخزن و قرار گرفتن روی زمین از جمله اهداف طراحی دستگاه بود. موقعیت زاویه قرارگیری نقاله تغذیه نه تنها در حجم بارگیری پیاله‌ها مؤثر واقع شد، بلکه در جهت‌دهی آن‌ها نیز تأثیر گذار بود.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس عملکرد دستگاه در میزان ریزش قلمه توسط موزع مرکب نشان داد که بین تیمارهای مختلف و نیز اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر در سطح آماری یک درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد (جدول ۱). شکل ۹ بیانگر اثر متقابل سرعت نقاله، زاویه نقاله و سرعت بستر بر تعداد قلمه در هکتار است.

شکل ۱۰ آرایش طولی و عرضی روش کشت قلمه را نشان می‌دهد. اگر طول قلمه در هر دو روش یکسان و معادل ۲۵ سانتی‌متر فرض گردد (وجود حداقل دو جوانه در قلمه)، ملاحظه می‌شود که در واحد طول مزرعه، در کشت عرضی مصرف قلمه بسیار کمتر از (حدود نصف) روش طولی (روشی که در حال حاضر به‌صورت دستی و یا ماشینی انجام می‌گیرد) خواهد بود.

لازم برای یکنواخت بودن و تداوم مطلوب در ریزش قلمه‌ها، حفظ فاصله‌ی مناسب در ریزش و سوی قلمه‌ها، متغیرهایی تعریف و مورد بررسی قرار گرفت که شامل؛ ۱- تغییر سرعت حرکت موزع، ۲- تغییر سرعت نقاله بستر متحرک، ۳- تغییر زاویه‌ی نقاله موزع مرکب نسبت به افق، ۴- فاصله‌ی نبشی‌های انتقال قلمه از یکدیگر.

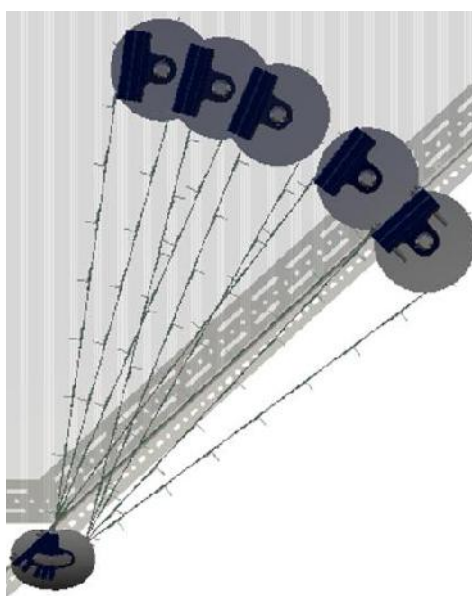
به‌منظور تأمین سرعت‌های متفاوت برای موزع و تأثیر آن بر تغذیه و یکنواختی ریزش قلمه‌ها، شافت محرک موزع مرکب با یک الکتروموتور دور متغیر کوپل و با تغییر دور الکتروموتور، دور شافت موزع بین ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه (سرعت خطی موزع) انتخاب شد. طی آزمون به‌عمل آمده بهترین شرایط یکنواختی ریزش و توزیع قلمه در سرعت ۱ متر بر ثانیه (معادل ۳/۶ کیلومتر بر ساعت) برای سرعت خطی موزع به‌دست آمد (شکل ۶).



شکل ۶- توزیع مناسب ریزش قلمه توسط موزع
Fig. 6. Suitable distribution of the sugarcane scions by the distributor unit

شافت محرک بستر قلمه‌ها نیز با یک الکتروموتور دور متغیر کوپل شده و دامنه تغییر دور شافت آن بین ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ متر بر ثانیه (سرعت خطی نقاله بستر) انتخاب شد تا تأثیر سرعت پیشروی بر نحوه‌ی ریزش قلمه و فاصله قرارگیری آن‌ها بر روی زمین تعیین و بهترین حالت انتخاب شود. طی آزمون به‌عمل آمده حاصل از دوره‌های متفاوت اعمال شده به نقاله بستر و ملاحظه‌ی نحوه‌ی ریزش و توزیع قلمه‌های نیشکر بر روی آن، بهترین شرایط توزیع قلمه در سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه (معادل ۲/۸ کیلومتر بر ساعت) سرعت خطی نقاله بستر با فاصله‌ی طولی حدود ۳۵ سانتی‌متر بین قلمه‌ها حاصل شد (شکل ۷) (Anonymous, 2007; Pelioia et al., 2010).

به‌منظور تعیین موقعیت قرارگیری تسمه نقاله موزع نسبت به کف مخزن در راستای تسهیل استقرار قلمه‌ها در داخل نبشی (پیاله) موزع و نیز جلوگیری از بیش بارگیری موزع حین حرکت، تکیه‌گاه موزع طوری ساخته شد تا امکان جابه‌جایی آن و تغییر زاویه موقعیت قرارگیری نقاله موزع نسبت به خط افق فراهم باشد (شکل ۸).



شکل ۸- تغییرات موقعیت قرارگیری نقاله تغذیه در زوایای مختلف

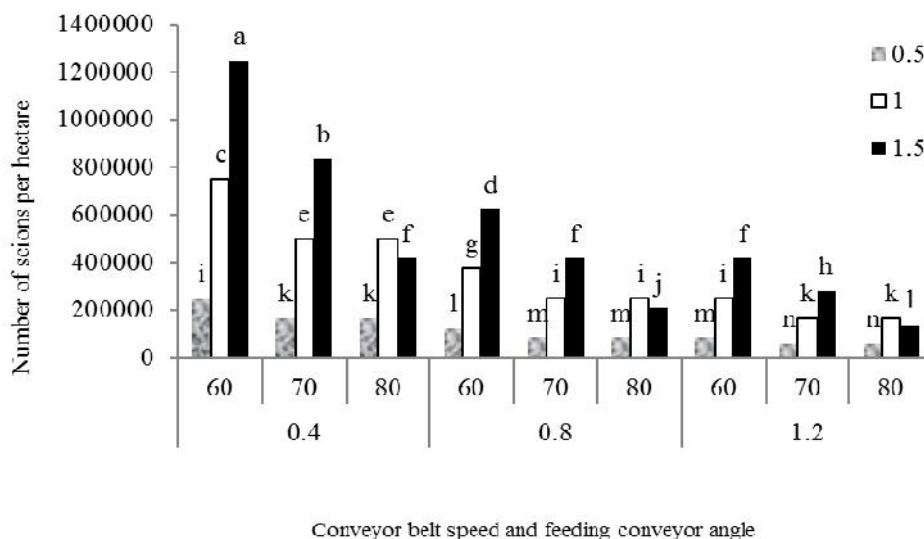
Fig. 8. Variation in the position of the feeding conveyor at various angles

جدول ۱- تجزیه واریانس اثرات سرعت موزع، سرعت بستر و زاویه نقاله بر تعداد قلمه در هکتار

Table 1- Variance analysis of the effects of the seeding unit speed, conveyor belt speed and feeding conveyor angle on the number of scions per hectare

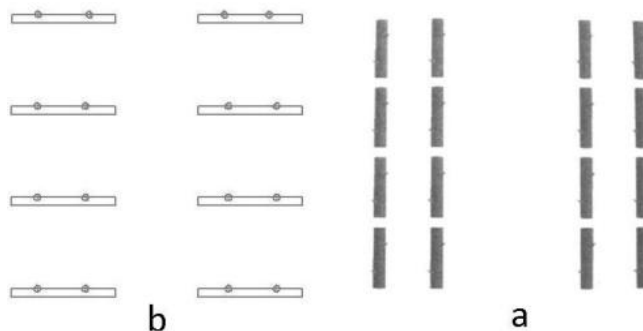
منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares (MS) تعداد قلمه Number of scions
سرعت بستر Substrate conveyor belt speed	2	1875294 **
سرعت موزع Distributor unit speed	2	782377 **
زاویه نقاله feeding conveyor angle	2	2091546 **
سرعت بستر×زاویه نقاله conveyor belt speed* feeding conveyor angle	4	168180 **
سرعت بستر×سرعت موزع conveyor belt speed*seeding unit speed	4	449103 **
سرعت موزع×زاویه نقاله seeding unit speed* feeding conveyor angle	4	540260 **
سرعت بستر×سرعت موزع×زاویه نقاله conveyor belt speed *seeding unit speed* feeding conveyor angle	8	115567 **
خطای آزمایشی Experiments error	54	42
کل Total	80	
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (C.V%)	1.96	

** معنی دار در سطح ۱ درصد
Significant at 1% level **



شکل ۹- اثر سرعت بستر، سرعت نقاله و زاویه نقاله بر تعداد قلمه در هکتار

Fig. 9. Effect of substrate conveyor belt speed, distributor unit speed and feeding conveyor angle on the number of scions per hectare



شکل ۱۰- آرایش و توزیع قلمه به صورت طولی (a) و عرضی (b) در مزرعه

Fig.10. Lengthwise seeding (a) and Widthwise seeding (b) in Sugarcane farm

موزع مرکب در کارنده نیشکر، نه تنها در مصرف قلمه برای کشت صرفه‌جویی می‌شود (شکل ۱۰)، بلکه روش خاک‌ورزی و کاشت تغییر کرده و مزرعه به صورت سطحی صاف و بدون جوی و پشته طی عملیات خاک‌ورزی تهیه و در حین عملیات کاشت، همزمان با قرار دادن قلمه‌ها در سطح زمین نسبت به خاک‌دهی قلمه‌ها اقدام و بدین صورت جوی پشته مورد نظر برای آبیاری نیز حاصل خواهد شد. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده از عملکرد مدل آزمایشگاهی موزع ساخته شده بهترین شرایط کارکرد واحدهای مختلف عبارت از ۱ متر بر ثانیه سرعت خطی حرکت نقاله موزع، ۰/۸ متر بر ثانیه سرعت پیشروی (سرعت نقاله بستر متحرک)، ۷۰ درجه زاویه‌ی نقاله موزع نسبت به سطح افق و فاصله بین نبشی‌ها حدود ۳۵ سانتی‌متر تعیین

نتیجه‌گیری

ساز و کار به کار رفته در کارنده نیشکر اهمیت فراوانی در میزان مصرف قلمه و الگوی کشت دارد (Yadav and Choudhuri, 2001). به کارگیری موزع مرکب مجهز به ناودانی‌های (پیاله) حمل قلمه در کارنده این امکان را فراهم می‌آورد که با ایجاد زمان‌بندی مناسب و عدم لغزش تسمه نقاله، قلمه‌ها با آرایش تعیین شده در شیار حاصل از شیار بازکن قرار گیرند. کاهش میزان مصرف قلمه در عملیات کاشت مکانیزه نیشکر از لحاظ اقتصادی اهمیت زیادی در هزینه تهیه قلمه و کاشت در مزارع نیشکر دارد (به‌طور متوسط در هر دوره کاشت بین ۲۷ تا ۳۲ هزار قلمه در هر هکتار در مزارع نیشکر خوزستان استفاده می‌شود) (Anonymous, 2007). با استفاده از

قلمه و حدود ۵ میلیارد تومان صرفه‌جویی مالی در مزارع نیشکر خوزستان فقط در صورت انجام عملیات کاشت توسط کارنده مجهز به موزع مرکب حاصل می‌شود که علاوه بر آن صرفه‌جویی حاصل از سایر هزینه‌های مربوط به تهیه قلمه، تهیه بستر و موارد دیگر را نیز باید اضافه کرد.

شد. با عنایت به جهت‌دهی قلمه‌ها و قرارگیری آن‌ها به صورت عمود بر خط پیشروی کارنده (عرضی)، مشکل کاشت چند خط قلمه در یک ردیف برطرف شده و فقط با قرار دادن یک قلمه با طول مناسب که دارای چند بند (جوانه‌ی قابل رویش) باشد، یک ردیف با عرض دلخواه و رویش کافی ساقه نیشکر فراهم می‌شود. با توجه به شکل ۹ حدود ۳۰ هزار قلمه در هکتار یعنی حدود یک سوم صرفه‌جویی در مصرف

References

1. Anonymous, 2007. Research and Teaching of Sugar cane Development Institute. Ahvaz, Iran. (In Farsi).
2. Bachche, S. G., S. N. Yewale, V. R. Magdum, and S. B. Patil. 2007. Field Testing of Sugarcane Cutter Planter and its Economic Comparison with Traditional Method. International Agricultural Engineering Conference.
3. Bhal, V. P., and T. R. Sharma. 2001. Present status and scope of tractor drawn automatic lister sugarcane cutter planter in Haryana. Paper presented at annual convention of ISAE held at OUAT Bhubneshwar.
4. Frank, B. 1984. Sugar-cane. United states of America, Longman Inc, New York.
5. Khedkar, M. B., and A. K. Kamble. 2008. Evaluation of mechanized planting of sugarcane. International Journal of Agricultural Engineering 1 (2): 136-139.
6. Maleki, M. R., J. F. Jafari, M. H. Raufat, A. M. Mouazen, and J. De. Baerdemaeker. 2006. Evaluation of Seed Distribution Uniformity of a Multi-flight Auger as a Grain Drill Metering Device. Biosystems Engineering 94 (4): 535-543. (In Farsi).
7. Namjoo, M. 2009. Design, development and evaluation of a sugarcane billet planter equipped with metering unit with overlap planting system. M.Sc. thesis. Faculty of agriculture. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Farsi).
8. Patil, A. B., A. K. Dave, and R. N. S. Yadav. 2004. Evaluation of Sugarcane Cutter Planter. In 38th. ISAE Convention January 2004, D.B.S.K.K.V. Dapoli India.
9. Peloia, P. R., M. Milan, and T. L. Romanelli. 2010. Capacity of the mechanical harvesting process of sugar cane billets. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.) 67 (6): 619-623.
10. Ripoli, M. L. C., and T. C. C. Ripoli. 2010. EVALUATION OF FIVE SUGAR CANE PLANTERS. Eng. Agríc. Jaboticabal. 30 (6): 1110-1122.
11. Srivastava, A. C. 2004. Development of a zero till sugarcane cutter-planter., I. Agr. E. JOU. 59 (2): 3-6.
12. Taghinezhad, J., R. Alimardani, and A. Jafary. 2012. Design, fabrication and evaluation of a laboratory prototype model of sugarcane cutter planter M. Sc. thesis. Faculty of agriculture. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
13. Yadav, R. N. S., and D. Choudhuri. 2001. Mechanization scenario of sugarcane cultivation in India. In Proc. 35th ISAE Annual Convention, OUAT, Bhubaneshar India during February 2001.

Brief Report

Design and fabrication of an experimental model of a seeding unit with widthwise sugarcane scions seeding for use in sugarcane planter

A. Akbarnia^{1*}

Received: 28-10-2015

Accepted: 13-03-2016

Introduction

Sugarcane, a plant which sugar is extracted from, is planted in vast areas with hot and humid climate. Brazil is the largest producer of sugarcane in the world. The next five major producers, in decreasing order, are India, China, Thailand, Pakistan and Mexico. Sugarcane is a tropical, perennial grass that forms lateral shoots at the base to produce multiple stems, typically three to four meters high and about 5 cm in diameter. The total area under sugarcane plantation in Iran (Khuzestan Province) is about 80,000 hectares with an average yield of 100 tons per hectare. To increase the yield per unit of land and reduce production costs and move toward sustainable agriculture, mechanization of agricultural operations seems inevitable. Planters are the most important of farm machinery among the mechanization equipment. Sugarcane cultivation is done both by hand and machine. Hand planting operations is laborious and painstaking work and work efficiency is so low and culture costs are so high. In Iran farms, the sugarcane plantation process is carried out manually by the farmers. Considering the climatic conditions, the agricultural soil composition and constitution, and the different plantation pattern used in Iran, the imported planting machines are not suitable for the farming conditions in the country. Moreover, the domestically produced machines, which are mostly based on the imported versions, do not provide adequate performance. Therefore, fabrication of a machine, capable of continuously lifting the sugarcane scions from a container and sending them to a dropper pipe, uniformly and in conformance with the climatic conditions of the sugarcane farms in the country, is of great importance.

Materials and Methods

In this research, initially, a field study was carried out to identify the problems and shortcomings of imported and copied planting machines in sugarcane farms, such as jamming of the scions conveying mechanism and the existence of unplanted sections in the farm. Subsequently, a new compound seeding unit with unique capabilities for solving the above mentioned problems was fabricated, with the aim of application in sugarcane planting machines. The various components of the system include:

- 1- Tank split in two pieces and connected to each other by two hinges through the middle and it can adjust to different angles.
- 2- Tube fall for cuttings scions.
- 3- Two rows of chain on a conveyor screwed on belt.
- 4- Number of 9 cups (channels) to receive and transmit cutting scions from the tank and guided them to the falls duct.
- 5- 18 pcs of metal preservative, the chain screwed to conveyor.
- 6- Four Number of gears on two shafts in order to drive the conveyor chain.
- 7- Two shafts, one on top and one another on the bottom of the anchor-conveyors chain.
- 8- The mechanism of driven Endless belt as a mobile bed to showing the steady rate of falling the scions from the fallen channel.
- 9- Two variable speeds electromotor to provide the movement of complex distributor and planter's mobile bed belt.
- 10- Controlling mechanism of falling number of scion.

After preparing and manufacturing the different machine's pieces, they were installed on the chassis and then different units were prepared and the machine are run.

Results and Discussion

Therefore, fabrication of a mechanism, capable of continuously lifting the sugarcane scions from a container and sending them to a dropper pipe, uniformly and in conformance with the conditions of the sugarcane farms is

1- Associate Professor of Department of Mechanic, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST)

(*- Corresponding Author Email: abbasakbarnia@yahoo.com)

of great importance. In the new mechanism, as opposed to the existing seeding units in which the seeding operation is performed lengthwise, planting of the scions is performed in a widthwise pattern. Using the manufactured machine had a great effect on method of tillage and planting. The farm field was changed to a smooth surface in tillage then in planting the scions with installing the two diagonal plate the soil putted on scions and the made furrows for irrigating.

Conclusions

This mechanism reduces the number of planted scions per hectare, results in a more uniform planting and growth of the scions, and reduces the number of machine trips in the farm, increasing the planter productivity. The seeding unit was fabricated and is presently ready for use in the sugarcane planters.

Keywords: Compound distributor unit, Experimental model, Mechanization of the sugarcane farms, Sugarcane planter, Sugarcane scions

شرایط پذیرش مقاله در نشریه علمی - پژوهشی ماشین‌های کشاورزی

متن کامل مقاله نوشته شده در نرم افزار MS-Word 2007 و کاملاً مطابق با فرمت درخواستی زیر به سایت نشریه به آدرس <http://jame.um.ac.ir> ارسال گردد.

صفحه مشخصات مقاله: شامل عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و مرتبه علمی آنها به فارسی و انگلیسی و ایمیل نویسنده مسئول بوده و به صورت جداگانه در قسمت فایل های مکمل روی سایت بارگذاری شود.

هر مقاله بایستی دارای عنوان، چکیده فارسی، واژه‌های کلیدی به فارسی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری کلی، منابع، چکیده مبسوط انگلیسی بوده و بخش‌های سپاسگزاری (به صورت کاملاً خلاصه)، پیشنهادات و لیست علائم می‌تواند به متن مقاله اضافه شوند.

- عنوان مقاله کوتاه، روان و گویای کامل موضوع تحقیق باشد و از ۱۵ کلمه تجاوز نکند.
- عنوان مقاله به فارسی، چکیده مقاله و واژه‌های کلیدی (بدون ذکر نام نویسندگان) در صفحه نخست ذکر شوند.
- چکیده در یک پاراگراف نوشته شود و از ۲۵۰ کلمه تجاوز نکند و در عین حال محتوای مقاله را برساند و با تأکید بر روش‌ها، نتایج و اهمیت کاربرد نتایج باشد. در پایان آن و در یک سطر مجزا واژه‌های کلیدی (حداکثر پنج کلمه به ترتیب الفبایی) قید شوند.
- مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری کلی و فهرست منابع کاملاً تفکیک و محتوای آن‌ها متناسب با عنوان هر قسمت باشد.
- مقدمه بایستی شامل اطلاعات مربوط به سوابق کار، توجیه اهمیت تحقیق و هدف بررسی باشد.
- مواد و روش‌ها بایستی به طور مشخص و روشن بیان شود. اگر روش تحقیق از یک منبع گرفته شده فقط به ذکر مأخذ اکتفا شود. لازم است نام محل و یا مؤسسه انجام تحقیق به صورت واضح مشخص گردد. در مورد مقالات تحلیلی، نظری و مدلسازی در صورت لزوم می‌توان زیر بخشی به نام "تئوری تحقیق" اضافه نمود.
- انتهای مقاله چکیده مبسوط انگلیسی (Extended Abstract)، طبق فرمتی که در پایان نحوه نگارش ذکر شده قرار گیرد.

۱- صفحه آرایی

- متن مقاله روی کاغذ A4 بدون هر گونه آرم و نشان، با فاصله ۱/۵ بین خطوط و ۳ سانتی‌متر از حاشیه‌ها نوشته شود.
- کلیه صفحات مقاله باید دارای شماره بوده و تعداد صفحات مقاله، بدون در نظر گرفتن چکیده مبسوط انگلیسی از ۱۵ صفحه تجاوز نکند.
- کلیه سطرهای متن مقاله به صورت ادامه‌دار (Continuous) شماره‌گذاری (Line numbering) شوند.

۲- فونت

- کلیه کلمات فارسی مقاله با قلم فارسی B Mitra نوشته شود.
- کلیه کلمات انگلیسی مقاله با قلم Times New Roman نوشته شود.

- عنوان فارسی و انگلیسی مقاله با اندازه ۱۴ نوشته شود.
- عنوان‌های اصلی با اندازه ۱۲ توپر (Bold) نوشته شود.
- متن مقاله با اندازه ۱۲ تایپ شود.
- کلمات لاتین داخل متن با اندازه ۱۰ نوشته شود (در متن مقاله تا حد امکان از نوشتن کلمات لاتین خودداری شود ولی در صورت نیاز مانند اسامی خلاصه شده علمی و یا نام تجهیزات مطابق دستورالعمل نوشته شود).

۳- واحدهای اندازه‌گیری

- کلیه واحدهای اندازه‌گیری بر اساس سیستم متریک (SI) باشند.
- برای نوشتن واحدها از حالت نمایی استفاده شود (مثلاً به جای m/s از $m\ s^{-1}$ استفاده شود).

۴- فرمول‌ها

- تمام معادلات و فرمول‌ها چپ چین و با شماره‌ای که در منتهی علیه سمت راست در داخل پرانتز آورده می‌شود، مشخص گردند.

۵- شکل‌ها و جدول‌ها

- عناوین شکل‌ها و جدول‌ها به دو صورت فارسی و انگلیسی به ترتیب با اندازه ۱۲ و ۱۰ نوشته شود.
- شماره جدول و شکل به صورت توپر (Bold) بوده و کلیه شکل‌ها و جدول‌ها بدون کادر باشند.
- شماره و عنوان هر جدول در بالای آن به صورت وسط چین نوشته شود.
- عناوین محورها در همه نمودارها و یا شکل‌ها یکسان و اندازه قلم آن‌ها از ۸ کوچکتر و از ۱۱ بزرگتر نباشد.
- در متن شکل‌ها حتی الامکان عبارات لاتین یا فارسی وجود نداشته باشد و در صورت لزوم با شماره گذاری در متن شکل، معرفی جزئیات در ادامه عنوان شکل با قلم فارسی و انگلیسی مشابه با متن اصلی انجام شود.
- همه‌ی تصاویر و نمودارها تحت عنوان «شکل» شماره‌گذاری گردد و از کلمات «چارت» یا «نمودار» استفاده نشود.
- محتوای جداول (اعداد) تنها به انگلیسی نوشته شوند. به طور کلی اطلاعات شکل‌ها و جدول‌ها قابل استفاده برای خوانندگان انگلیسی زبان باشد.
- در تنظیم جداول از خطوط افقی و عمودی استفاده نشود مگر در بالا و پایین سطر اول جدول و پایین آخرین سطر آن.
- هر ستون جدول باید دارای عنوان و واحد مربوط باشد. توضیحات اضافی عنوان و متن جدول باید به صورت زیر نویس ارائه شوند. توجه شود که مانند جدول ۱ ترتیب قرار گرفتن ستون‌ها از چپ به راست باشد.
- برای ارجاع به کلیه شکل‌ها، جدول‌ها و معادلات در متن از شماره آن‌ها استفاده شود و از آوردن کلماتی مثل زیر، بالا و غیره خودداری شود.

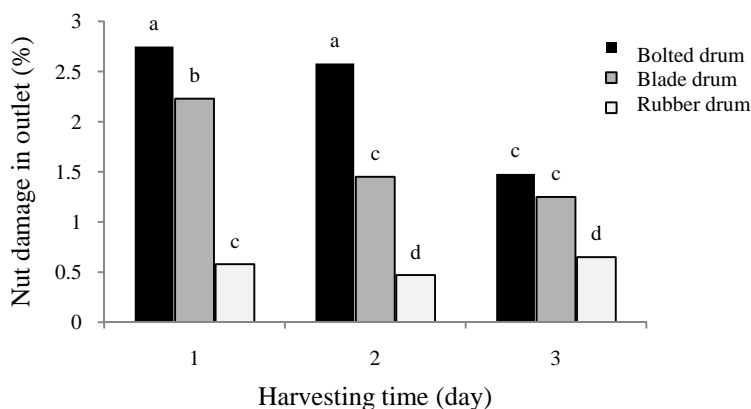
جدول ۱- نهاده های مصرف شده در سال اول مزرعه زعفران

Table 1- Consumption of inputs during the first year of saffron cultivation

نوع نهاده Type of inputs	میزان مصرف (کیلوگرم در هکتار) Consumption (kg ha ⁻¹)
کورم های مصرفی Consumed corms	3000
اوره Urea	100
فسفات آمونیوم Ammonium phosphate	100
کود دامی Animal manure	32000
آب آبیاری مصرف شده Consumed irrigation water	3000 (m ³)*

* میزان آب آبیاری جهت زراعت زعفران در یک سال معادل ۳۰۰۰ متر مکعب در نظر گرفته شده است (Mahdavi, 1999).

* The annual water consumption for saffron cultivation was considered equal to 3000 m³ (Mahdavi, 1999).



شکل ۳- اثر زمان برداشت و نوع ماشین بر درصد شکستگی دانه در خروجی دانه

Fig.3. The effects of harvesting time and machine type on the percentage of cracked shells in the outlet

توجه: در مورد شکل ها از الگوهای با مقیاس خاکستری (Gray scale) مانند شکل نمونه استفاده شود.

۶- منابع

- تمام منابع فارسی و انگلیسی مورد استفاده در داخل متن باید به انگلیسی نوشته شود.
- سال های شمسی به میلادی تبدیل شوند.
- در برگردان اسامی افراد اطمینان حاصل شود که املاء آن ها و سال انتشار درست باشد. در غیر این صورت در شمارش استنادات مجله که برای نمایه شدن در ISI لازم است، لحاظ نخواهد شد. **لازم است برای برگردان صحیح اسامی و عنوان مقالات و دیگر منابع به پایگاه های اطلاعاتی مثل SID، arandoc، Sciencedirect و غیره مراجعه شود و یا رأساً با شخص مورد نظر تماس گرفته شود.**

- نحوه رجوع منابع در متن به صورت اسم نویسنده (نویسندگان) و تاریخ انتشار منبع باشد. در ارجاع به منابع باید تا حد ممکن از نام بردن افراد در شروع جمله خودداری و منابع در انتهای جمله و در پرانتز ارائه شوند. مثال:

(Loghavi, 2008).

- برای منبعی با دو نویسنده از کلمه "and" بین آنها به صورت زیر استفاده شود:

(Aghkhani and Abbaspour-Fard, 2009).

- برای مقاله‌ای با بیشتر از دو نویسنده از کلمه ایتالیک "et al." به صورت زیر استفاده شود:

(Abbaspour-Fard et al., 2008).

- هنگام ارجاع همزمان به چند منبع از علامت ";" به صورت زیر استفاده شود:

(Smith, 1999; Samuel et al., 2008; Smith and Samuel, 2009)

- کلیه منابع فارسی و انگلیسی به زبان انگلیسی و با قلم Times New Roman اندازه ۱۲ در فهرست منابع نوشته شوند.

- همواره در نوشتن نام نشریات و منابع اسم، کامل آنها آورده شود و از اسامی کوتاه شده آنها استفاده نشود.

- از ذکر منابع بی‌نام و غیر قابل دسترس خودداری شود.

در نوشتن لیست منابع از روش زیر استفاده شود:

تذکر: این روش یکی از Style های نرم افزار Endnote می‌باشد که فایل‌های آن در سایت نشریه موجود می‌باشد.

Style Name: Jame Endnote Style

۱- نشریات علمی

Aghkhani, M. H., and M. H. Abbaspour-Fard. 2009. Automatic off-road vehicle steering system with a surface laid cable: Concept and preliminary tests. Biosystems Engineering 103: 265-270.

۲- انتشارات ویژه

Rice, K. 1992. Theory and conceptual issues. In: Gall, G.A.E., Staton, M. (Eds.), Integrating Conservation Biology and Agricultural Production. Agricultural Ecosystems Environment: 9-26.

۳- کتاب تألیف شده

Gaugh, H. G. 1992. Statistical Analysis of Regional Yield Trials. Elsevier. Amsterdam.

۴- مقاله یا یک فصل از کتاب تدوین شده (Edited Book)

Mettam, G. R., and L. B. Adams. 1999. How to prepare an electronic version of your article. PP 281-304 in B. S. Jones and R. Z. Smith eds. Introduction to the Electronic Age. E-Publishing Inc., New York.

۵- رساله‌های تحصیلی (استفاده از این نوع منبع به جز در شرایط خیلی ضروری مناسب نیست)

Abbaspour-Fard, M. H. 2001. The dynamic behavior of particulate biomaterials using discrete element method (DEM). Faculty of Agriculture. Newcastle University, Newcastle Upon Tyne.

۶- کنفرانس‌های علمی

Hemmat, A., V. I. Adamchuk, and P. Jasa. 2007. On-the-go soil strength sensing using an instrumented disc coultter. International Agricultural Engineering Conference (IAEC). Asian Association for Agricultural Engineering, Bangkok, Thailand.

۷- مقالات و منابع الکترونیکی

Britton, A. 2006. How much and how often should we drink British Medical Journal, 332: 1224-1225. Available from: <http://bmj.bjournals.com/cgi/content/full/332/7552/1224>. Accessed 2 June 2006.

۸- برای درج کلیه منابع فارسی به زبان انگلیسی (اعم از کتاب، مقاله و غیره که به صورت تألیف یا ترجمه هستند) در لیست منابع ضمن دقت در ترجمه و برگردان صحیح اسامی افراد و نشریات، مطابق الگوهای فوق عمل شود و در انتها عبارت (In Farsi) اضافه شود:

Arjmand, A., and A., Hassanzadeh Ghourtapeh. 2004. Evaluation of Energy consumption in Potato Cultivation, case study: Eastern Azarbayejan. 8th Agronomy and Plant Breeding Conf., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz. (In Farsi).

مؤکداً توصیه می شود برای تهیه لیست منابع و ارجاع به منابع در داخل متن از پایگاه‌های اطلاعاتی مربوط و همراه با نرم افزار EndNote استفاده شود تا از ایجاد خطای نگارشی به خصوص برای اسامی اشخاص و اسامی خاص جلوگیری شود. این امر برای صحت استنادات ضروری است. به منظور کمک شما در این باره فایل‌هایی آماده شده است که می توانید از سایت نشریه دانلود نمایید.

دستورالعمل نگارش چکیده مبسوط انگلیسی (Extended Abstract):

ارائه دهندگان محترم مقالات (اساتید، دانش پژوهان، دانشجویان و سایر محققین گرامی) از این پس و بر اساس رویکرد جدید دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و در راستای لزوم توجه به کیفیت مقالات دریافتی و همچنین اراده و اهتمام دست اندرکاران انتشار آن با هدف افزایش اعتبار و منزلت نشریات مختلف این دانشکده در نزد مجامع و مراجع علمی ملی و بین‌المللی و نظام‌های رتبه‌بندی و اعتبار سنجی رسمی، مقرر شده است که چکیده مبسوطی به زبان انگلیسی با فرمت ذیل تهیه و به همراه آخرین پیش نویس مقاله جهت بررسی و داوری ارسال گردد.

1. Title
2. Introduction
3. Materials and Methods
4. Results and Discussion
5. Conclusions
6. Keywords

• این خلاصه مبسوط بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ کلمه باشد.

Study and modeling of changes in volumetric efficiency of helix conveyors at different rotational speeds and inclination angels by ANFIS and statistical methods	245
A. Zareeit, R. Farrokhi Teimourlou, L. Naderloo, S. M. H. Komarizade Asl	
Using of dimensional analysis to determine the parameters of gravity separator table device to minimize impurities in bulk lentils	258
H. Bagheri, M. Rasekh, M. H. Kianmehr	
Optimization of hydrodynamic cavitations reactor efficiency for biodiesel production by response surface methods (Case study: Sunflower oil)	268
H. Javadikia, Y. Nosrati, M. Mostafaei, L. Naderloo, M. Tabatabaei	
Identifying and prioritizing customer requirements from tractor production by QFD method	283
H. Taghizadeh, M. Ziyaei Hajipirlu, V. Khederli, B. Shamsi	
Analysis of different inputs share and determination of energy Indices in broilers production in Mashhad city	296
H. Sadrnia, M. Khojastehpour, H. Aghel, A. Saiedi Rashk Olya	
Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network	310
F. Nadi, S. Abdanan Mehdizadeh, O. Nourani Zonouz	
Brief Report	
Design and fabrication of an experimental model of a seeding unit with widthwise sugarcane scions seeding for use in sugarcane planter	320
A. Akbarnia	

Contents

Development and evaluation of a vibratory-pneumatic pomegranate arils extractor	11
S. M. Nassiri, S. Samsami, M. Loghavi	
Design, construction and evaluation of solar flat-plate collector simulator based on the thermohydraulic coefficient	24
H. Rahmati Aidinlou, A. M. Nikbakht	
Testing and evaluation of a rototiller with new ridged blades	35
H. Gholami, D. Kalantari, M. R VandeChali	
The selection of best tillage implements in terms of energy use efficiency using simple additive weighting methodology	46
K. Andekaeizadeh, M. J. Sheykh Davodi, M. E. Khorasani Fardavani	
Analysis of factors affecting the mechanical olive harvesting in Guilan province	59
H. Abedi, S. Firouzi, M. S. Allahyari	
Study of the operational parameters of crops turbine sprayer (turbo liner) on spray quality and diameter of droplets, using image processing	71
F. Behzadi Pour, M. Ghasemi Nejad Raeeni, M. A. Asoodar, A. Marzban, S. Abdanan Mehdizadeh	
Application of generalized Hough transform for detecting sugar beet plant from weed using machine vision method	84
A. Bakhshpour, A. Jafari, Y. Emam, S. M. Nassiri, S. Kamgar, D. Zare	
Fractal analysis of sound signals in SAMPO 3065 combine harvester	95
F. Mahdiyeh Boroujeni, A. Maleki	
Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave	112
R. Rostami Baroji, S. S. Seiedlou Heris, J. Dehghannya	
Evaluation and comparing of natural and forced solar dryer for mint drying in Khuzestan province	124
J. Habibi Asl, L. Behbahani, A. Azizi	
The effect of acoustic system variables on sound signals of Melon varieties	138
F. Khoshnam, S. R. Hassan Beygi Bidgoly, M. Namjoo, M. Doroozi	
Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns	150
B. Jamshidi, A. Arefi, S. Minaei	
Investigation of voltage gradient and electrode type effects on processing time, energy consumption and product quality in production of Tomato Paste by ohmic heating	163
M. Torkian Boldaji, A. M. Borghei, B. Beheshti, S. E. Hosseini	
Investigating the engine vibration in MF285 tractor effected by different blends of biodiesel fuel using statistical methods and ANFIS	175
A. Safrangian, L. Naderloo, H. Javadikia, M. Mostafaei, S. S. Mohtasebi	
The effect of injection timing on energy and exergy analysis of a diesel engine with biodiesel fuel	190
A. Farhadi, S. Rostami, B. Ghobadian, S. Besharati	
Qualitative and quantitative analysis of biogas generated from co-digestion of cow dung, municipal sewage and kitchen waste	202
M. Mahmoodi-Eshkaftaki, R. Ebrahimi, A. Ghasemi-Pirbaloti	
Evaluation of heat transfer mathematical models and multiple linear regression to predict the inside variables in semi-solar greenhouse	219
M. Taki, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, A. Rohani, M. Matloobi	
Numerical analysis of using hybrid photovoltaic-thermal solar water heater in Iran	232
M. Mohammadi Sarduei, H. Mortezapour, K. Jafari Naeimi	

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 7

No. 1

2017

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Editor in charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

General Chief Editor: Prof., M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng.
Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Aghkhani, M. H.	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Ferdowsi University of Mashhad
Borgheei, A. M.	Mechanics of Agricultural Machinery	Prof. Member of Iranian Society of Mechanical Engineers
Saghafi, M.	Mechanics of Agricultural Machinery	Prof. Member of Iranian Society of Mechanical Engineers
Khazaei, J.	Mechanics of Agricultural Machinery	Asso. Prof. University of Tehran
Khoshtaghaza, M. H.	Mechanics of Biosystems Engineering	Asso. Prof. Tarbiat Modares University
Rafiee, Sh.	Mechanics of Agricultural Machinery	Prof. University of Tehran
Abbaspour-Fard, M. H.	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Ferdowsi University of Mashhad
Alimardani, R.	Mechanics of Agricultural Machinery	Prof. University of Tehran
Ghazanfari	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Shahid Bahonar University of Kerman
Moghaddam, A.		
Kadkhodayan, M.	Mechanical Engineering	Prof. Ferdowsi University of Mashhad
Loghavi, M.	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Shiraz University
Modarres Razavi, M.	Mechanical Engineering	Prof. Ferdowsi University of Mashhad

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad Press

Printed by: Printing office of Ferdowsi University of Mashhad

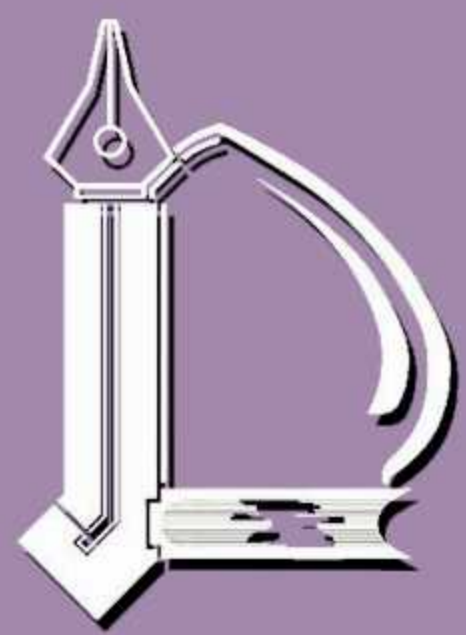
Address: College of agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: Jame@um.ac.ir

Web Site: <http://jame.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 7 No. 1

2017

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

- Development and evaluation of a vibratory-pneumatic pomegranate arils extractor 11**
S. M. Nassiri, S. Samsami, M. Loghavi
- Design, construction and evaluation of solar flat-plate collector simulator
based on the thermohydraulic coefficient..... 24**
H. Rahmati Aidinlou, A. M. Nikbakht
- Testing and evaluation of a rototiller with new ridged blades 35**
H. Gholami, D. Kalantari, M. R Vandechali
- The selection of best tillage implements in terms of energy use efficiency using simple
additive weighting methodology 46**
K. Andekaeizadeh, M. J. Sheykh Davodi, M. E. Khorasani Fardavani
- Analysis of factors affecting the mechanical olive harvesting in Guilan province..... 59**
H. Abedi, S. Firouzi, M. S. Allahyari
- Study of the operational parameters of crops turbine sprayer (turbo liner) on spray
quality and diameter of droplets, using image processing 71**
F. Behzadi Pour, M. Ghasemi Nejad Raeeni, M. A. Asoodar, A. Marzban, S. Abdanan Mehdizadeh
- Application of generalized Hough transform for detecting sugar beet plant from weed using
machine vision method..... 84**
A. Bakhshipour, A. Jafari, Y. Emam, S. M. Nassiri, S. Kamgar, D. Zare
- Fractal analysis of sound signals in SAMPO 3065 combine harvester 95**
F. Mahdiyeh Boroujeni, A. Maleki
- Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot,
pretreated by ultrasound and microwave 112**
R. Rostami Baroji, S. S. Seiedlou Heris, J. Dehghannya
- Evaluation and comparing of natural and forced solar dryer for mint drying in Khuzestan
province..... 124**
J. Habibi Asl, L. Behbahani, A. Azizi
- The effect of acoustic system variables on sound signals of Melon varieties..... 138**
F. Khoshnam, S. R. Hassan Beygi Bidgoly, M. Namjoo, M. Doroozi
- Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle
patterns 150**
B. Jamshidi, A. Arefi, S. Minaei
- Investigation of voltage gradient and electrode type effects on processing time, energy
consumption and product quality in production of Tomato Paste by ohmic heating..... 163**
M. Torkian Boldaji, A. M. Borghei, B. Beheshti, S. E. Hosseini
- Investigating the engine vibration in MF285 tractor effected by different blends of biodiesel
fuel using statistical methods and ANFIS..... 175**
A. Safrangian, L. Naderloo, H. Javadikia, M. Mostafaei, S. S. Mohtasebi
- The effect of injection timing on energy and exergy analysis of a diesel engine with
biodiesel fuel..... 190**
A. Farhadi, S. Rostami, B. Ghobadian, S. Besharati

Continue Content in Cover