انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی
ماشین های کشاورزی

دانشگاه فردوسی مشهد

جلد ۱۰ شماره ۲
سال ۱۳۹۹
(شماره پیاپی: ۲۰)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب ۱۱۵
جابر سلیمانی، محمد حسین کیانمهر، سید رضا حسن بیگی، سید مهدی شریعتمداری، کوروش رضا پور

پیاده‌سازی سامانه ماشین بویایی به‌منظور تشخیص تقلب در روغن حیوانی گاوی ۱۲۹
فردین ایاری، اسماعیل میرزائی قلعه، حکمت ربانی، کبری حیدربیگی

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو ۱۴۱
زهرا خسروبیگی، شاهین رفیعی، سید سعید محتسبی، امین نصیری

استفاده از روش بینایی استریو به‌منظور طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی ۱۵۵
افشین عزیزی، یوسف عباسپور گیلانده، ترحم مصری گندشمین، حمید ابریشمی مقدم

مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار با استفاده از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی ۱۶۹
محمد رحمتیان، رضا یگانه، محمد امین نعمت اللهی

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند آسیاب کردن غلات برای تولید خوراک طیور در آسیاب چکشی با استفاده از روش سطح پاسخ ۱۸۷
زانیار زیباهوش، جلال خدائی، سمیرا زارعی

بهینه‌سازی خشک‌کردن پاششی عصاره گیاه بادرشبو با استفاده از روش سطح پاسخ و تاپسیس ۲۰۱
ادریس رحمتی، فاروق شریفیان، محمد فتاحی، غلامحسن نجفی

پیش‌بینی متغیرهای داخلی یک گلخانه دوطرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی (MLP و RBF) ۲۱۳
مکیه حمدانی، مرتضی تاکی، مجید رهنما، عباس روحانی، مصطفی رحمتی جنیدآباد

اثر زمان برداشت بر تلفات ذرت و پیش‌بینی آن با منطق فازی در منطقه مغان ۲۲۹
مهدی عباسقلی پور

مطالعه ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در خط تولید شکر به روش دینامیک سیالات محاسباتی ۲۴۱
عادل رضوانی وند فنائی، علی حسن پور، علی محمد نیکبخت

مطالعه آیروآکوستیکی پروانه محوری موتور تراکتور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ۲۵۵
بهروز صبر علیلو، آرش محبی، عیوض اکبریان، عادل رضوانی وند فنائی

پردازش سیگنال‌های صوتی خروس به‌منظور تشخیص بلوغ جنسی و پیوبرتی ۲۶۵
محمد یاوری، احمد بناکار، محسن شرفی

بهینه‌سازی و ارزیابی شرایط کاری تیغه خاک‌ورز جدید به‌منظور استفاده در خاک‌ورز مرکب ۲۷۳
مجتبی محمدی، سید حسین کار پرورفرد، سعادت کامگار، محمد رحمتیان

بررسی اثر آب مغناطیسی بر رشد و جوانه‌زنی بذر پنج رقم گندم ۲۸۹
سعید زارعی، مهدی کسرایی، محمد امین نعمت اللهی

ادامه فهرست داخل جلد

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**

جلد ۱۰ شماره ۲ نیمسال دوم ۱۳۹۹

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

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

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

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

ابونجمی، محمد دانشیار- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان (دانشگاه تهران)

برقعی، علی محمد استاد- عضو انجمن مهندسان مکانیک ایران

خوش تقاضا، محمدهادی استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه تربیت مدرس)

راجی، عبدالغنی استاد- گروه مهندسی کشاورزی و محیطزیست، دانشکده فنی (دانشگاه ایبادان، نیجریه)

سعیدی راد، محمدحسین دانشیار- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

عباسپور فرد، محمدحسین استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

علیمردانی، رضا استاد- گروه ماشین‌های 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)

نصیراحمدی، ابوذر دانشیار پژوهشی- گروه مهندسی کشاورزی (دانشگاه کاسل آلمان)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد **چاپ:** چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد- کد پستی ۹۱۷۷۵ صندوق پستی ۱۱۶۳

دانشکده کشاورزی- دبیرخانه نشریات علمی - نشریه ماشین‌های کشاورزی - نمابر:۰۵۱۳۸۷۸۷۴۳۰

این نشریه در پایگاه‌های 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 **به‌صورت مقاله کامل نمایه شده است.**

این نشریه به تعداد ۲ شماره در سال منتشر می‌شود.

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب 115
جابر سلیمانی، محمد حسین کیانمهر، سید رضا حسن بیگی، سید مهدی شریعتمداری، کوروش رضا پور

پیاده‌سازی سامانه ماشین بویایی به‌منظور تشخیص تقلب در روغن حیوانی گاوی 129
فردین ایاری، اسماعیل میرزائی قلعه، حکمت ربانی، کبری حیدربیگی

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو 141
زهرا خسروبیگی، شاهین رفیعی، سید سعید محتسبی، امین نصیری

استفاده از روش بینایی استریو به‌منظور طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی 155
افشین عزیزی، یوسف عباسپور گیلانده، ترحم مصری گندشمین، حمید ابریشمی مقدم

مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار با استفاده از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی 169
محمد رحمتیان، رضا یگانه، محمد امین نعمت اللهی

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند آسیاب کردن غلات برای تولید خوراک طیور در آسیاب چکشی با استفاده از روش سطح پاسخ 187
زانیار زیباهوش، جلال خدائی، سمیرا زارعی

بهینه‌سازی خشک‌کردن پاششی عصاره گیاه بادرشبو با استفاده از روش سطح پاسخ و تاپسیس 201
ادریس رحمتی، فاروق شریفیان، محمد فتاحی، غلامحسن نجفی

پیش‌بینی متغیرهای داخلی یک گلخانه دوطرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی (MLP و RBF) 213
مکیه حمدانی، مرتضی تاکی، مجید رهنما، عباس روحانی، مصطفی رحمتی جنیدآباد

اثر زمان برداشت بر تلفات ذرت و پیش‌بینی آن با منطق فازی در منطقه مغان 229
مهدی عباسقلی پور

مطالعه ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در خط تولید شکر به روش دینامیک سیالات محاسباتی 241
عادل رضوانی وند فنائی، علی حسن پور، علی محمد نیکبخت

مطالعه آیروآکوستیکی پروانه محوری موتور تراکتور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی 255
بهروز صبر علیلو، آرش محبی، عیوض اکبریان، عادل رضوانی وند فنائی

پردازش سیگنال‌های صوتی خروس به‌منظور تشخیص بلوغ جنسی و پیوبرتی 265
محمد یاوری، احمد بناکار، محسن شرفی

بهینه‌سازی و ارزیابی شرایط کاری تیغه خاک‌ورز جدید به‌منظور استفاده در خاک‌ورز مرکب 273
مجتبی محمدی، سید حسین کار پرورفرد، سعادت کامگار، محمد رحمتیان

بررسی اثر آب مغناطیسی بر رشد و جوانه‌زنی بذر پنج رقم گندم 289
سعید زارعی، مهدی کسرایی، محمد امین نعمت اللهی

تاثیر فشردگی و رطوبت خاک بر هدایت الکتریکی ظاهری خاک و مقاومت غلتشی لاستیک تراکتور 299
غزاله صفر علیزاده هریسی، علی محمد برقعی، احمد شریفی مالواجردی

اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر عملکرد و کارآیی مصرف آب چغندرقند 313
احمد حیدری

بررسی اثر سرعت دورانی، دما، نوع پیچ فشاری و قطر دای بر میزان روغن استخراج‌شده از دانه روغنی کنجد 326
منصور عسافی، رسول معمار دستجردی، محمد نوشاد

ارزیابی و انتخاب مدل پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور MF399 (مطالعه موردی: منطقه پارس‌آباد مغان) 337
سعید عباسی، امن اله شکری، محمد غلامی پرشکوهی، سید محسن سیدان، علیمحمد جعفری

بررسی اثر بلند مدت استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر کارایی عملیاتی و روند نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر با استفاده از سری‌های زمانی 347
فاطمه افشارنیا، افشین مرزبان

انتخاب مناسب‌ترین نوع سالن مرغداری از نظر مصرف انرژی در استان خوزستان 361
حسین وکیلی، مصطفی کیانی ده کیانی، مازیار چنگیزیان

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 115-128

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۲۸-۱۱۵

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب

جابر سلیمانی[۱]، محمد حسین کیانمهر[۲*]، سید رضا حسن بیگی[۳]، سید مهدی شریعتمداری[۴]، کوروش رضا پور[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۹

چکیده

یکی از منابع زیست‌توده فضولات دامی می‌باشد. فرآوری کود گاوی با استفاده از دستگاه‌های فشرده‌ساز (اکسترودر) به‌دلیل بزرگ بودن اندازه ذرات کود و محتویات آن (کاه و کلش) همواره با مشکلاتی روبه‌رو است. هدف اصلی در این تحقیق طراحی و ساخت دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب می‌باشد. قسمت‌های مختلف دستگاه شامل واحد کوبنده، ضدکوبنده و فنر و پیچ قابل‌تنظیم می‌باشد. در این خردکن از مکانیزم فنر و پیچ قابل‌تنظیم برای تنظیم فاصله‌ی بین کوبنده و ضدکوبنده برای دستیابی به اندازه ذرات نهایی مطلوب استفاده شده است. در هر آزمون مقداری کود گاوی به‌وسیله دستگاه آسیاب شد و قطر میانگین هندسی اندازه ذرات کود گاوی برای سه سطح محتوای رطوبتی شامل ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد (بر مبنای تر) و سه سطح سرعت دورانی واحد کوبنده شامل ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور بر دقیقه تعیین شد. به این منظور از یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار استفاده شد. توزیع اندازه ذرات کود گاوی درتمام سطوح محتوای رطوبتی و سرعت دورانی واحد کوبنده، به‌صورت نرمال بود. گسترده‌ترین توزیع در محتواهای رطوبتی ۳۵ و ۴۰ درصد (بر مبنای تر) در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و در محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه مشاهده شد. خرد شدن کود گاوی توسط دستگاه خردکن در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر)، دارای کمترین قطر میانگین هندسی اندازه ذرات و برابر با ۱/۰۲ میلی‌متر بود. افزون براین نتایج، بیشترین انرژی مصرفی ویژه دستگاه خردکن کود گاوی در محتوای رطوبتی ۴۵٪ و سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه برابر با ۶۴/۲ کیلوژول بر کیلوگرم بود. همچنین استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب سبب کاهش انرژی مصرفی ویژه خرد کردن کود گاوی به میزان ۹۲٪ نسبت به روش مرسوم (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) در خط تولید پلت شده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات، دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب، قطر میانگین هندسی ذرات، کود گاوی مرطوب

مقدمه

منابع زیست‌توده کشور را می‌توان به پنج منبع تقسیم‌بندی کرد، یکی از این منابع فضولات دامی بوده که در سال، حدود شش میلیون تن کود گاوی در کشور تولید می‌شود. کود گاوی از فضولات مایع، جامد و کاه و کلش مورد استفاده برای تهیه بستر گاوداری تشکیل شده است (Rezaeifar *et al.*, 2008; Suna, 2012). استفاده از فضولات دامی به‌صورت فرآوری نشده با مشکلاتی همراه است. جرم حجمی این کودها کم بوده و با توجه به حجم زیاد مورد استفاده در واحد سطح، حمل و نقل و انبارداری این کودها هزینه بسیاری دربردارد. یکی از راه‌حل‌های مرتفع کردن این مشکلات، فشرده‌سازی و متراکم‌سازی کود است که این کار توسط روش‌های مختلفی از جمله پلت‌سازی توسط دستگاه اکسترودر قابل انجام است. پلت کردن مواد سبب کاهش هزینه‌های جابه‌جایی، ذخیره‌سازی و حمل و نقل و هم‌چنین بهبود کیفیت و دوام مواد می‌شود. مراحل تولید پلت کود با استفاده از دستگاه اکسترودر شامل: ۱- دریافت کود گاوی از دامداری (رطوبت کود گاوی زیاد است و در مواردی به ۸۰٪ می‌رسد)، ۲- خشک کردن، ۳- کاهش اندازه‌ی ذرات مواد کود گاوی، ۳- تولید پلت کود توسط دستگاه اکسترودر (رطوبت کود در هنگام تولید پلت توسط اکسترودور در محدوده ۳۵ الی ۴۵ درصد می‌باشد)، ۴-خشک کردن و ۵- بسته‌بندی می‌باشد (Padilla-Rivera *et al.*, 2017). پلت کود گاوی می‌تواند به‌عنوان کود در زمین‌های زراعی و باغات استفاده شود. هم‌چنین می‌تواند به‌منظور تولید بیوگاز با بقایای کلزا و گندم ترکیب شود (Safari and Abdi, 2015).

از آسیاب‌ها جهت کاهش اندازه ذرات مواد استفاده می‌شود. کاهش اندازه ذرات، مجموع مساحت قابل دستیابی، اندازه منافذ مواد و تعداد نقاط تماس برای اتصال بین ذرات در فرآیند تراکم را افزایش می‌دهد (Drzymała, 1993). هم‌چنین یکی از عوامل موثر در کیفیت پلت تولیدی، اندازه‌ی ابعاد ذرات می‌باشد (Payne, 1978). انواع مختلفی از آسیاب‌ها شامل: آسیاب‌های توپی، ارتعاشی، چکشی،

۱- پژوهشگر مرکز تحقیقات و نوآوری سازمان اتکا، تهران و دانشجوی کارشناسی ارشد بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۲- استاد بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۳- استاد بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۴- مربی بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۵- معاونت تولید شرکت هلدینگ مزارع نوین ایرانیان
(*- نویسنده مسئول: Email: kianmehr@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.74480

چاقویی، غلتکی، کلوئیدی[1] و فرسایشی برای خرد کردن مواد زیست‌توده لیگنوسلولوزی استفاده می‌شود. انتخاب دستگاه آسیاب مناسب به‌طور ویژه به مقدار رطوبت موجود در مواد زیست‌توده بستگی دارد (Taherzadeh and Karimi, 2008). بر این اساس آسیاب‌ها را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی نمود: ۱-دستگاه‌هایی که در محدوده‌ی رطوبتی ۲۰٪-۱۵ (بر مبنای تر) کاربرد دارند و ۲-دستگاه‌هایی که در محتوای رطوبتی بیشتر از ۲۰٪-۱۵ (بر مبنای تر) مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kratky and Jirout, 2011). بررسی‌ها نشان داده که آسیاب‌های کلوئیدی برای خرد کردن مواد مرطوب با رطوبت بیش از ۱۵ تا ۲۰ درصد (بر مبنای تر) مناسب بوده، در حالی‌که آسیاب‌های غلتکی، سایشی، چکشی یا چاقویی مناسب برای خرد کردن مواد زیست‌توده با رطوبت ۱۵-۱۰ درصد (بر مبنای تر) مناسب هستند (Taherzadeh and Karimi, 2008). هم‌چنین آسیاب‌های دیسکی مرطوب و رتینگ میل[2]، توانایی خرد کردن مواد در محتوای رطوبتی بالای ۲۰٪ را دارا هستند. آسیاب‌های توپی به‌دلیل عمکرد آن‌ها در محتوای رطوبتی کمتر از ۲۰٪ و بیشتر از ۲۰٪ در هر دو گروه از این طبقه‌بندی قرار می‌گیرند (Kratky and Jirout, 2011). در صورت استفاده از آسیاب‌هایی مانند آسیاب‌های چکشی جهت کاهش اندازه کود گاوی لازم است محتوای رطوبتی به حدود ۱۵ درصد (بر مبنای تر) کاهش یابد. با توجه به این‌که پلت کردن کود گاوی با استفاده از دستگاه اکسترودر در محدوده‌ی محتوای رطوبتی ۴۵-۳۵ درصد (بر مبنای تر) انجام می‌پذیرد، خرد کردن کود گاوی در محدوده‌ی رطوبتی اشاره شده، با استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب می‌تواند با حذف مرحله‌ی خشک کردن مواد قبل از کاهش اندازه‌ی آن‌ها، سبب تسریع در فرآیند تولید پلت، ذخیره‌سازی انرژی و مقرون به‌صرفه از نظر اقتصادی خواهد بود.

بررسی منابع نشان می‌دهند که جهت کارکرد مناسب واحد کوبنده عوامل متعددی نظیر: قطر کوبنده، سرعت کوبنده، فاصله‌ی بین کوبنده و ضدکوبنده، نرخ تغذیه مواد، محتوای رطوبتی تاثیر می‌گذارند (Klenin *et al.*, 1985). زانکر در سال ۱۹۸۰ جهت تعیین قطر کوبنده از نوموگراف استفاده کرد (Zanker, 1980). در این روش با استفاده از اندازه‌های اولیه و ثانویه مواد و ضریب اصکاک داخلی مواد، قطر واحد کوبنده به‌دست می‌آید.

انرژی مصرفی ویژه مواد آسیاب شده به میزان رطوبت، حجم و تراکم ذرات، میزان تغذیه مواد، توزیع اندازه ذرات (اندازه ذرات اولیه / نهایی) و متغیرهای ماشین بستگی دارد (Lopo, 2002). تحقیقاتی در رابطه با انرژی مصرفی ویژه جهت خرد کردن مواد زیست با استفاده از آسیاب‌هایی که قادرند مواد را در محدوده‌ی رطوبتی ۲۰٪-۱۵ (بر مبنای تر) خرد کنند، صورت پذیرفته است. تحقیقات مانی و همکاران در مورد کاهش اندازه ذرات ساقه‌های گندم و جو، علوفه ذرت و سورگوم نشان داد که با افزایش محتوای رطوبتی انرژی مصرفی ویژه افزایش می‌یابد؛ این محققان میزان انرژی مصرفی ویژه آسیاب چکشی برای خرد کردن ساقه‌ی ذرت در محتوای رطوبتی ۸ و ۱۲٪ با اندازه‌ی ذرات مواد اولیه و نهایی به‌ترتیب ۷/۱۶ و ۱/۶میلی‌متر را به‌ترتیب ۱۴/۷۶ و ۱۹/۸۴ $kWht^{-1}$ گزارش کردند (Mani *et al.*, 2004). رضوانی و همکاران با استفاده از آسیاب چکشی، ساقه‌های برنج را در محتوای رطوبتی ۱۲٪، اندازه‌ی غربال آسیاب ۲ میلی‌متر، آسیاب کرده و بیشترین انرژی مصرفی ویژه را ۳۲/۴۶ $kWht^{-1}$ گزارش دادند (Rezvani *et al.*, 2013). هیدنو و همکارن با استفاده از آسیاب سایشی، برای خرد کردن چوب سخت در محدوده‌ی رطوبتی ۶ درصد با اندازه ذرات اولیه و نهایی به‌ترتیب ۱۹/۰۵ و ۱/۶ میلی‌متر انرژی مصرفی ویژه دستگاه را ۴۰۰-۲۰۰ $kwht^{-1}$ گزارش دادند (Hideno *et al.*, 2009). کباباشی و همکاران با استفاده از آسیاب ارتعاشی جهت خرد کردن چوب سخت در محدوده‌ی رطوبتی ۱۱٪، اندازه ذرات اولیه و نهایی به‌ترتیب ۲۲ و ۰/۱۵ میلی‌متر، انرژی مصرفی ویژه آسیاب ارتعاشی ۸۰۰ $kWht^{-1}$ گزارش دادند (Kobayashi *et al.*, 2008). ماندلز و همکاران با استفاده از آسیاب‌های توپی و کلوئیدی، جهت خرد کردن ساقه‌ی برنج در محتوای رطوبتی ۶-۴٪، اندازه ذرات نهایی کم‌تر از ۲ میلی‌متر، انرژی مصرفی ویژه آسیاب توپی ۳۰۰۰۰ $kWht^{-1}$ و انرژی مصرفی ویژه آسیاب کلوئیدی ۱۵۰۰ $kWht^{-1}$ گزارش دادند (به اندازه اولیه ذرات اشاره نشده است) (Mandels *et al.*, 1974). شل و هاردوود انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای آسیاب‌های چکشی، چاقویی و آسیاب دیسکی جهت خرد کردن خرده‌های چوب، ساقه گندم و علوفه ذرت با محتوای رطوبتی ۷-۴٪ (بر مبنای تر) با اندازه نهایی ذرات ۲-۱ میلی‌متر، گزارش کردند (به اندازه‌ی اولیه ذرات اشاره‌ای نشده است). آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای آسیاب دیسکی، ۴۰۰-۲۰۰ $kwht^{-1}$ بود. بدین ترتیب برای آسیاب چکشی، ۱۳۰-۹۰ $kwht^{-1}$ و در نهایت آسیاب چاقویی که انرژی مصرفی ویژه مورد نیازش ۱۲۰-۸۰ $kwht^{-1}$ بود (Schell and Harwood, 1994).

نیری و همکاران انرژی حرارتی مورد نیاز برای تبخیر ۳۰۶ و ۳۰۹ گرم آب از کود گاوی مرطوب، با استفاده از دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی با سرعت هلیس ۲ و ۳ دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر با ۶۹۱/۴۲ و ۶۹۹/۰۸ کیلوژول گزارش دادند (Nayyeri *et al.*, 2008).

از میان انواع آسیاب‌ها، آسیاب‌های کلوئیدی به‌طور گسترده برای خرد کردن مواد زیست‌توده با رطوبت بیشتر از ۲۰-۱۵٪ استفاده شده‌اند. از معایب اساسی آن‌ها می‌توان به انرژی مصرفی ویژه زیاد و

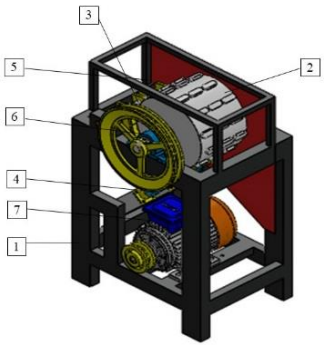
1- Colloid mills
2- Retting mill

خرد کردن مواد به‌صورت آسیاب مدار بسته اشاره کرد. کراتکی در سال ۲۰۱۵ با استفاده از دستگاه رتینگ میل، انرژی مصرفی ویژه خرد کردن ساقه‌های گندم را در محتوای رطوبتی ۴۰٪، با اندازه‌های اولیه و نهایی مواد به‌ترتیب ۲۰۰ میلی‌متر و کمتر از ۱۰میلی‌متر برابر با ۳۰ $kWht^{-1}$ گزارش داد (Kratky and Jirout, 2015). بررسی منابع نشان می‌دهد که تحقیقی در مورد طراحی و ساخت دستگاه خرد کردن کود گاوی با محتوای رطوبتی ۴۵٪-۳۵ انجام نشده است. در تحقیق حاضر با هدف تسریع در فرآیند تولید پلت از کود گاو و کاهش مصرف انرژی یک دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب ساخته شد و عملکرد آن از نظر انرژی مصرفی ویژه با روش مرسوم خرد کردن (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب

شکل ۱ طرحواره و نمونه ساخته شده دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب را نشان می‌دهد. این دستگاه دارای سه بخش اساسی کوبنده، ضد کوبنده، فنر و پیچ قابل‌تنظیم است. برای ساخت دستگاه ابتدا نقشه‌های آن با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks نسخه ۲۰۱۸ رسم و سپس دستگاه براساس نقشه‌ها ساخته شد. آزمایش‌های اولیه روی دستگاه انجام و عیوب احتمالی آن برطرف شد.



شکل ۱- طرحواره‌ی دستگاه خردکن کود دامی مرطوب (۱- شاسی، ۲- واحد کوبنده، ۳- ضد کوبنده، ۴- فنر و پیچ قابل‌تنظیم، ۵- واحد تغذیه، ۶- یاتافان، ۷- موتور الکتریکی)

Fig.1. Schematic and prototype of wet cattle manure size reduction machine (1- Frame, 2- Thresher unit, 3- Anti-thresher, 4- Spring and adjustment screw, 5- Chamber, 6- Bearing, 7. Electric motor)

ساخت کوبنده و ضد کوبنده

عوامل متعددی در کارکرد مناسب کوبنده تأثیر می‌گذارند که می‌توان به قطر کوبنده و فاصله‌ی بین کوبنده و ضدکوبنده اشاره کرد (Klenin *et al.*, 1985). برای طراحی قسمت کوبنده و ضدکوبنده دستگاه یافتن رابطه‌ای بین قطر کوبنده، فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده با توجه به قطر ذره‌ی تغذیه شده ضروری است. رابطه‌ای بین قطر غلتک و اندازه‌ی ذرات نهایی را که می‌توان از آسیاب انتظار داشت توسط رابطه (۱) بیان می‌شود (Ortega-Rivas *et al.*, 2006).

$$\cos\alpha = \frac{R+d}{R+r} \qquad (۱)$$

که در این رابطه: d، نصف فاصله‌ی بین غلتک کوبنده و ضد کوبنده (mm)، r، شعاع ذره (mm)، R، شعاع غلتک (mm) و α، زاویه تماس[1] (زاویه‌ای که از طرف مماس‌های صفحه‌ی غلتک‌ها در نقطه تماس بین یک ذره و غلتک‌ها تشکیل می‌شود) می‌باشد. بنابراین 2R برابر با قطر غلتک، 2r برابر با قطر ذرات اولیه، 2d همان قطر ذرات نهایی می‌باشد.

بعد از محاسبات لازم برای به‌دست آوردن قطر کوبنده و ضد کوبنده، ابتدا واحد کوبنده ماشین ساخته شد. محور واحد کوبنده درون دو عدد یاتاقان خود تنظیم با کد UCP 206 بر روی شاسی قرار گرفت (شماره ۶ در شکل ۱). جهت ساخت واحد کوبنده (شماره ۲ در شکل ۱)، یک لوله فولادی به قطر ۳۱۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. لبه‌ها (لقمه‌های روی کوبنده) به شکل چهار پهلو از جنس فولاد با سطح مقطع ۱۰×۲۰ میلی‌متر مربع و به ضخامت ده میلی‌متر انتخاب شد. لبه‌ها در راستای محور کوبنده شامل ۱۲ ردیف و سه عدد لقمه در هر ردیف با فاصله‌ی ۶۰ میلی‌متر (مرکز تا مرکز) از یکدیگر، بر روی محیط استوانه کوبنده جوش داده شدند. جهت جلوگیری از در رفتگی مواد و بیشترین برخورد لبه‌ها با مواد، چیدمان ردیف‌های لبه به گونه‌ای است که ردیف اول به فاصله‌ی۲۰ میلی‌متر از سمت راست استوانه کوبنده و ردیف بعدی به فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متر از طرف چپ استوانه کوبنده قرار گرفته است (حالت زیگزاگ) و بدین ترتیب تا ردیف دوازدهم ادامه می‌یابد (شکل ۲).

1- Angle of nip

شکل ۲- طرحواره‌ای از کوبنده و نمونه‌ی ساخته شده

Fig.2. Schematic and prototype of drum

برای ساخت ضد کوبنده یک ورق فولادی از جنس St_37 به ابعاد ۲۱ × ۱۰۶ سانتی‌متر مربع، به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، با استفاده از دستگاه نورد به‌صورت دایره‌ای به قطر بیرونی ۳۴۰ میلی‌متر شکل داده شد. ضد کوبنده به‌صورت ربع دایره که شش ردیف از لبه‌هایی به شکل چهار پهلو در محیط داخلی آن جانمایی شده، ساخته شد. لبه‌های ضد کوبنده همانند لبه‌های کوبنده از جهت اندازه، ارتفاع، فاصله‌ی مرکز تا مرکز، چیدمان و فاصله‌ی ردیف‌ها از یکدیگر ساخته شد. در محیط بیرونی ضد کوبنده از تسمه‌هایی برای تقویت ضد کوبنده در برابر نیروهای اعمالی بر آن و اتصال به بدنه‌ی دستگاه و پیچ و فنر استفاده شد (شکل ۳).

شکل ۳- طرحواره ای از ضد کوبنده و نمونه‌ی ساخته شده

Fig.3. Schematic and prototype of anti-thresher

مکانیزم خردکردن این دستگاه ترکیبی از سایش و برش است که نیروها به‌صورت فشاری و برشی به ذرات کود گاوی اعمال می‌شود. از نظر طراحی، دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب به‌صورت صفحه- غلتک (کوبنده و ضد کوبنده) می‌باشد، نیروهای برشی و نیروهای فشاری وارد بر ذرات می‌توانند به‌راحتی از طریق لبه‌های دستگاه خردکن ایجاد شوند. لبه‌های تیز دستگاه خردکن در ردیف‌هایی حول سطح بیرونی کوبنده دستگاه نصب شده‌اند. علاوه بر این، در این نوع خردکن، صفحه (ضد کوبنده) انحنای مناسب دارد، که این حالت هندسی، فضای کافی برای نصب ردیف‌های متفاوت لبه‌های دستگاه خردکن را فراهم می‌آورد و درنتیجه آن نیروهای برشی به کود گاوی اعمال می‌شود.

ساخت فنر مارپیچی فشاری

با توجه به محدودیت فضا برای نصب مکانیزم فنر و پیچ قابل‌تنظیم فنرهایی جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. جدول ۱ مشخصات فنر انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فنر انتخاب شده

Table 1- Characteristics of selected spring

مشخصات فنر **Characteristics of spring**	یکای اندازه‌گیری **Dimension**
تعداد حلقه‌های فعال (دو سر سنگ زده) Number of Active Coils (Squared and Ground)	5
طول آزاد Free length	10.2 mm
طول بسته Solid length	80 mm
قطر میانگین فنر Mean coil diameter	45 mm
مدول برشی Shear modulus	70×10^9 Pa
قطر مفتول Wire diameter	6 mm

برای تعیین ثابت فنر از دستگاه آزمایش کشش و فشار ساخته شده در پردیس ابوریحان استفاده شد. دستگاه مذکور منحنی نیرو–جابه‌جایی فنر را تحت بارگذاری شبه‌استاتیک مشخص می‌کند که با استفاده از آن می‌توان ثابت فنر را تعیین کرد. هم‌چنین داده‌های اندازه‌گیری توسط واحد داده خوان مدل CAMOS ثبت گردید. سرعت بارگذاری ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه بود. بدین منظور از نیروسنج ۲۰۰۰ نیوتنی با دقت ۰/۵ نیوتن استفاده شد.

برای اطمینان از مقدار ثابت فنر به‌دست آمده از منحنی دستگاه آزمایش کشش و فشار (شکل ۵) از رابطه‌ی (۲) استفاده شد .

$$K = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \qquad (۲)$$

که در این رابطه: d، قطر سیم فنر (mm)، k، ثابت فنر ($N\ mm^{-1}$)، D، قطر میانگین فنر (mm)، G، مدول برشی (MPa)، N، تعداد حلقه‌های فعال می‌باشد.

دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب دارای دو حرکت دورانی و خطی می‌باشد (شکل ۴). حرکت خطی ضد کوبنده توسط مکانیزم پیچ قابل‌تنظیم و فنر که در قسمت زیرین ضد کوبنده نصب شده است صورت می‌پذیرد. توسط این مکانیزم فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده تنظیم می‌شود. هم‌چنین این حرکت عکس‌العملی است که ضد کوبنده در هنگام بیش باری خواهد داشت. شکل ۶ قطعات مکانیزم فنر و پیچ قابل‌تنظیم را نشان می‌دهد. برای تنظیم فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده از مهره (به‌طوری‌که بستن مهره‌ها سبب نزدیک شدن ضدکوبنده به کوبنده می‌شود) استفاده شد. به‌منظور باز و بسته شدن مهره، طول ۳۰ میلی‌متر از پیستون (شماره ۳ در شکل ۶) و سیلندر (شماره ۲ در شکل ۶) به قطر ۳۵ میلی‌متر توسط دستگاه تراش با گام کوتاه متریک ۱/۵ رزوه شد.

تعیین سرعت دورانی کوبنده

سرعت دورانی کوبنده تحت تاثیر عواملی نظیر: نوع و محتوای رطوبت کود گاوی، فاصله بین کوبنده و ضدکوبنده، نرخ تغذیه و هم‌چنین میزان خردشدگی (اندازه ذرات) انتخاب می‌گردد در این تحقیق محدوده سرعت دورانی مطلوب برای کوبنده از طریق آزمایش در محدوده‌ی سرعت دورانی ۱۰۰ تا ۷۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمد. آزمایش‌های اولیه نشان داد که برای سرعت چرخشی بیش از ۲۵۰ دور بر دقیقه، کاه غلات موجود در کود گاوی خرد نشده و بدون اثرپذیری از کوبنده و ضد کوبنده، تنها با غلتک کوبنده می‌چرخد و در نهایت در محفظه آسیاب تجمع می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل افزایش نیروی گریز از مرکز واحد کوبنده دستگاه خردکن باشد (اولین محدودیت). همچنین در سرعت‌های بیش از ۲۵۰ دور بر دقیقه واحد کوبنده لرزش دستگاه مشاهده شد که این امر هم می‌تواند سبب تلفات در آسیاب‌های سایشی شود (Klenin *et al.*, 1985). مسدود شدن محفظه آسیاب با کاه موجود در کود گاوی برای سرعت دورانی کمتر از ۱۵۰ دور بر دقیقه مشاهده شد (دومین محدودیت). همچنین به دلیل کم بودن سرعت دورانی و نیروی گریز از مرکز کوبنده توان لازم برای هدایت مواد به سمت فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده وجود نداشت.

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به اثر سرعت دورانی کوبنده بر روی میزان خردشدگی کود گاوی مرطوب و انرژی مصرفی از یک موتور الکتریکی AC، سه فاز، 380 V، 3kW، (MOTOGEN، IRAN، 100L4B) با سرعت دوانی ۱۴۴۰ دور بر دقیقه، استفاده شد.

هم‌چنین برای تغییر سرعت دورانی موتور الکتریکی، از یک اینورتر سه فاز به سه فاز LS مدل SV_40iG5A4 استفاده شد.

تعیین رطوبت و انرژی حرارتی مورد نیاز جهت خشک کردن

دستگاه اکسترودر قادر است کود گاوی با محتوای رطوبتی ۴۵–۳۵ درصد (بر مبنای‌تر) را پلت کند؛ بنابراین سه سطح محتوای رطوبتی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد (بر مبنای‌تر) برای انجام آزمایش‌ها تهیه شد. برای تعیین محتوای رطوبت اولیه کود سه نمونه ۱۰۰ گرمی از کود طبق استاندارد ASAE S358.3 در داخل آون با دمای ۱۰۳±۳°C به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. محتوای رطوبتی طبق رابطه‌ی (۳) بر مبنای تر سنجیده شد.

$$M_{W.b}\% = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100\% \qquad (۳)$$

که در این رابطه: $M_{w.b}$، رطوبت کود دامی بر مبنای تر (٪)، w_w، جرم آب موجود در کود (g) و w_d، جرم ماده خشک موجود در کود (g) می‌باشد. برای تهیه نمونه‌هایی با سطوح رطوبتی مورد نظر برای هر آزمایش، طبق رابطه (۴) با آب‌پاش به کود آب مقطر اضافه گردید.

$$m_w = \frac{m_i(M_{wf} - M_{wi})}{(1 - M_{wf})} \qquad (۴)$$

که در این رابطه: M_{wi}، رطوبت اولیه کود بر مبنای خشک، M_{wf}، رطوبت نهایی بر مبنای خشک، m_i، جرم اولیه کود بر مبنای خشک (g)، و m_w، جرم آب اضافه شده (g) می‌باشد. پس از اضافه نمودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی دربسته در یخچال با دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا رطوبت به‌طور یکنواخت در نمونه‌ها توزیع شود. برای تعیین مقدار واقعی رطوبت نمونه‌ها، سه نمونه ۱۰ گرمی از هر سطح رطوبتی در آون قرار داده شد (ASAE S358.3, 2012).

جهت مقایسه انرژی مصرفی ویژه آسیاب کود گاوی در حالت مرطوب (استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب) و در روش مرسوم (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) در خط تولید پلت، محاسبات لازم جهت خشک کردن یک کیلوگرم کود گاوی از رطوبت اولیه ۴۵ درصد (بر مبنای تر) تا رطوبت ثانویه ۱۰ درصد (برمبنای تر) انجام گرفت. این کاهش رطوبت مواد در خط تولید پلت (در حالت آسیاب مواد به‌صورت خشک)، توسط خشک‌کن‌ها

انجام می‌پذیرد. برای به‌دست آوردن انرژی حرارتی لازم جهت تبخیر آب محصول، از رابطه‌ی (۵) استفاده می‌شود.

$$Q = w_w \lambda \qquad (۵)$$

که در این رابطه:

Q، انرژی حرارتی (J)

W_w، جرم آب موجود در کود (g)

λ ، گرمای نهان تبخیر ($kJ\ kg^{-1}$)

توزیع اندازه ذرات

نمونه‌های ۱۰۰ گرمی از مواد آسیاب شده در حالات مختلف بر روی یک دسته الک که به‌ترتیب از بالا به پایین دارای روزنه‌های ریزتری بودند قرار داده شد. الک‌ها با توجه با اندازه مواد خرد شده انتخاب شد. برای مواد آسیاب شده از الک‌هایی با اندازه استاندارد آمریکایی ۱۰، ۱۶، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ انتخاب شد. اندازه روزنه الک‌ها به‌ترتیب ۴/۷۵، ۲، ۱/۱۹، ۰/۸۴۱، ۰/۵۹۵، ۰/۴۲، ۰/۲۹۷، ۰/۲۱ و ۰/۱۴۹ میلی‌متر بود. دسته الک‌ها بر روی شیکر (فن آزما گستر، مدل SM 12) قرار گرفت. مدت زمان الک نمونه‌ها بر اساس استاندارد ۱۰ دقیقه بود. بعد از الک نمونه‌ها، جرم باقی‌مانده بر روی هر الک اندازه گرفته شد. الک‌کردن نمونه‌ها ۳ بار تکرار شد. میانگین هندسی اندازه ذرات (d_{gw}) و انحراف معیار (S_{gw}) برای نمونه‌ها براساس استاندارد و روابط (۶)، (۷) و (۸) محاسبه شد (ASAE S319.3, 2000). از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ برای توزیع اندازه ذرات و نرمال بودن توزیع اندازه ذرات استفاده شد.

$$d_{gw} = \log^{-1}\left[\frac{\sum(W_i d_i^-)}{\sum W_i}\right] \qquad (۶)$$

$$S_{gw} = log\left[\frac{\sum W_i\left(log d_i^- - log\, d_{gw}\right)}{\sum W_i}\right]^{0.5} \qquad (۷)$$

$$d_i^- = (d_i \times d_{i+1})^{\frac{1}{2}} \qquad (۸)$$

d_{gw}، میانگین هندسی اندازه ذرات (mm)

S_{gw}، انحراف معیار هندسی ذرات (mm)

W_i، ذرات باقی‌مانده در الک i

d_i، اندازه اسمی الک i (mm)

d_{i+1}، اندازه اسمی الک i+1 (mm)

d_i^-، میانگین هندسی اندازه ذرات الک i ام

محاسبه‌ی انرژی مصرفی ویژه

به‌منظور اندازه‌گیری توان مصرفی خرد کردن کود گاوی از دستگاه Power Analyzer (مدل DW-6090A تک‌فاز ساخت کشور تایوان) که توانایی اتصال به رایانه و ذخیره داده‌ها را داشت، استفاده شد. برای نمایش داده‌های اندازه‌گیری شده، خروجی قسمت RS-232 دستگاه پاور آنالیزر به رایانه وصل و داده‌هابا استفاده از نرم‌افزار Lutron-8 ذخیره شد. داده‌های ذخیره شده در رایانه شامل ولتاژ (V)، آمپر (A)، توان الکتریکی (P)، فرکانس (Hz)، cos φ و زمان (S) در هر یک ثانیه بودند. توان لازم برای راه‌اندازی آسیاب قبل از ورود مواد (بدون بار) اندازه‌گیری شد. با توجه به مقدار توان مصرفی آسیاب در حالت بدون بار، توان مصرفی ویژه مورد نیاز برای آسیاب مواد تعیین شد. انرژی مصرفی ویژه برای آسیاب کود گاوی با استفاده از رابطه‌ی (۹) محاسبه گردید (Balk, 1964).

$$E = \frac{\int_0^T (P_t - P_0)\, dt}{m} = \frac{\int_0^T \Delta P_t\ dt}{m} \qquad (۹)$$

که در این رابطه:

E، انرژی مصرفی ویژه برای آسیاب ($kJ\ kg^{-1}$)

P_t، توان مصرفی در لحظه t (kW)

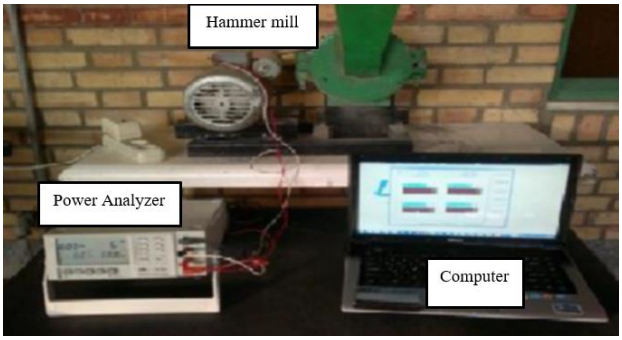
P_0، توان مصرفی در حالت بی‌بار (kW)

ΔPt، توان مصرفی ویژه در زمان t (kW)

m، جرم مواد آسیاب شده (kg)

T= زمان پایان خرد کردن کود

شکل ۴ نحوه‌ی انجام آزمایش و تعیین انرژی مصرفی ویژه برای خرد کردن کود گاوی را نشان می‌دهد. نرخ تغذیه مواد به دستگاه خردکن برای همه‌ی نمونه‌ها مقداری ثابت و برابر با ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه بود.



شکل ٤– آسیاب چکشی به همراه دستگاه پاور آنالایزر و اندازه‌گیری انرژی مصرفی ویژه

Fig.4. Hammer mill with power analyzer and special energy consumption measure

نتایج و بحث

شکل ۵ دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد. شاسی دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب داری ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر، طول ۵۶۰ میلی‌متر و عرض ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد و شاسی مربوط به واحد تغذیه دستگاه داری ارتفاع ۲۱۰ میلی‌متر، طول ۵۶۰ میلی‌متر و عرض ۲۱۰ میلی‌متر و وزن دستگاه ۹۳/۶۲ کیلوگرم می‌باشد. انتقال توان از موتور به محور کوبنده از طریق تسمه و پولی با نسبت ۱:۳ صورت پذیرفت. جزییات بخش‌های دیگر دستگاه در ذیل بیان شده است.

قطر کوبنده

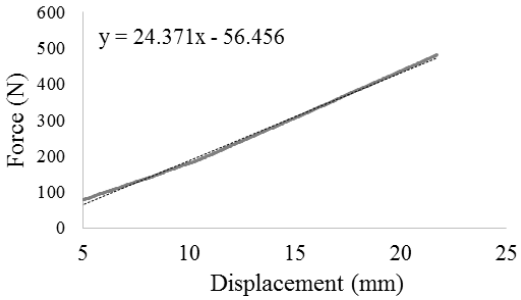
با توجه به اندازه‌ی اولیه و نهایی مواد به‌ترتیب برابر با ۲۰ میلی‌متر و کمتر از ۵ میلی‌متر و مقدار زاویه تماس ۱۸درجه (با توجه به محدودیت فضای نصب)، از یک لوله‌ی استاندارد با قطر بیرونی ۳۱۰ میلی‌متر برای ساخت واحد کوبنده استفاده شد. با استفاده از نوموگراف زانکر قطر کوبنده برای خرد کردن کاه غلات (کاه جو) با اندازه قطر میانگین مواد اولیه زیر ۵ میلی‌متر و ضریب اصطکاک ۰/۲۷ (در محتوای رطوبتی ۴۵/۷ درصد (برمبنای تر))، زیر ۴۰۰ میلی‌متر به‌دست می‌آید (Afzalinia and Roberge, 2007; Zanker, 1980). هم‌چنین برای خرد کردن کود الاغ با اندازه قطر میانگین ۲۰ میلی‌متر با ضریب اصطکاک داخلی ۰/۶، قطر واحد کوبنده زیر ۳۵۰ میلی‌متر به‌دست آمد (Reddy, 2014; Zanker, 1980).

ثابت فنر مارپیچ فشاری

فنر مورد استفاده در مکانیزم دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب از نوع فشاری با مشخصات طول آزاد ۱۰/۲ سانتی‌متر، قطر سیم شش میلی‌متر، قطر میانگین حلقه‌ی ۴۴ میلی‌متر، تعداد کل حلقه‌ها برابر با هفت و به‌صورت دو سر تخت و سنگ‌زده طراحی و ساخته شد. مقدار ثابت فنر با استفاده از رابطه‌ی (۲) برابر با ۲۴/۸۸۸ نیوتن بر میلی‌متر به‌دست آمد. شکل ۶ منحنی نیرو-جابه‌جایی فنر را تحت بارگذاری به‌وسیله‌ی نیروسنج ۲۰۰۰ نیوتنی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مقدار ثابت فنر برابر با ۲۴/۴ نیوتن بر میلی‌متر می‌باشد که با نتایج محاسبه شده تطابق دارد.

شکل ۵- نمونه‌ی ساخته شده دستگاه خردکن کود دامی مرطوب

Fig.5. Prototype of wet cattle manure size reduction machine



شکل ٦- نمودار نیرو-جابه‌جایی برای تعیین ثابت فنر

Fig.6. The Force-displacement diagram for determining the spring constant

محدده‌ی سرعت دورانی کوبنده

بر مبنای آزمایش‌های اولیه، محدوده‌ی سرعت دورانی ۱۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. کرتکی و جیروت در سال ۲۰۱۴ محدوده‌ی سرعت دورانی کوبنده را جهت خرد کردن کاه گندم با محتوای رطوبتی ۴۰ درصد، ۱۵۰ تا ۱۷۰ دور بر دقیقه گزارش دادند (Kratky and Jirout, 2014).

مقایسه انرژی مصرفی ویژه با استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب و روش مرسوم

با محاسبات انجام شده انرژی حرارتی لازم برای تبخیر ۳۵۰ گرم آب موجود در یک کیلوگرم کود گاوی مرطوب برابر با ۷۹۰ کیلوژول می‌باشد. نیری و همکاران انرژی حرارتی مورد نیاز برای تبخیر ۳۳۸ گرم آب از کود گاوی مرطوب، با استفاده از دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی با سرعت هلیس ۲/۵ دور بر دقیقه را برابر ۷۶۴/۱۲ کیلوژول گزارش دادند (Nayyeri *et al.*, 2008). بیشترین انرژی مصرفی ویژه خرد کردن با استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب در سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) برابر با ۶۴/۲ کیلوژول بر کیلوگرم مشاهده شد. همچنین انرژی مصرفی ویژه برای خرد کردن کود گاوی با محتوای رطوبتی ۱۰٪ (بر مبنای تر) بربر با ۳۵/۳۱ کیلوژول بر کیلوگرم به‌دست آمد. بنابراین خرد کردن کود گاوی با استفاده ازدستگاه خردکن کود گاوی مرطوب در مقایسه با روش مرسوم (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) سبب ذخیره‌ی ۹۲٪ انرژی مصرفی مورد نیاز در خط تولید پلت شد. استفاده از خشک‌کن‌ها در خط تولید پلت عامل اصلی افزایش مصرف انرژی می‌باشد.

کادوحه و لوپز (۱۹۸۹) با استفاده از آسیاب چکشی ساقه‌های گندم را در محتوای رطوبتی ۷٪ و با اندازه‌های اولیه و نهایی به‌ترتیب ۲۲/۴۰ و ۱/۶ میلی‌متر آسیاب کرده و بیشترین انرژی مصرفی ویژه را $۴۲\ kWht^{-1}$ گزارش دادند (Cadoche and López, 1989). کرتکی و جیروت، با استفاده از دستگاه رتینگ میل ساقه‌های گندم را با محتوای رطوبتی ۴۰ درصد (بر مبنای تر) و اندازه‌های اولیه و نهایی به‌ترتیب ۲۰۰ و زیر ۱۰ میلی‌متر، بیشترین انرژی مصرفی ویژه را $۳۰\ kWht^{-1}$ گزارش دادند (Kratky and Jirout, 2014). نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد خرد کردن کاه گندم به‌صورت مستقیم و در حالت مرطوب (استفاده از دستگاه رتینگ میل) نسبت به حالت خشک (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی)، سبب ذخیره‌ی ۹۰٪ انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز خرد کردن کاه گندم می‌شود.

میانگین هندسی اندازه ذرات

میانگین هندسی اندازه ذرات و انحراف معیار برای هر نمونه آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که کمترین میانگین هندسی اندازه ذرات مربوط به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و محتوی رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) و بیشترین آن در سرعت دورانی۲۵۰ دور بر دقیقه و محتوی رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) اتفاق افتاد. این امر می‌تواند از طرفی به سبب زمان ماندگاری مناسب مواد در محفظه‌ی آسیاب بوده باشد؛ چرا که ذرات در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه، به علت نیروی گریز از مرکز بالا، زمان بسیار کمی را برای آسیاب شدن در محفظه‌ی آسیاب داشته؛ بنابراین میانگین هندسی ذرات در این حالت نسبت به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه با نیروی گریز از مرکز بیشتر بود. هم‌چنین در سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه به دلیل نیروی برشی کم توسط واحد کوبنده، میانگین هندسی ذرات آن نسبت به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه بیشتر بود. در زمان فشرده‌سازی، ذرات کوچک‌تر با جابه‌جایی و پرکردن فضاهای خالی، یک ماده فشرده‌شده چگال‌تر و مقاوم‌تر تولید می‌کنند (Tabil, 1996).

جدول ۲- میانگین هندسی ذرات و انحراف معیار در حالات مختلف

Table 2- Geometric mean particle diameter and standard deviation at various types

سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	محتوای رطوبتی Moisture content (w.b %)	میانگین هندسی اندازه Geometric mean particle diameter (mm)	انحراف معیار Standard deviation (mm)
150	35	1.06	0.16
150	40	1.08	0.22
150	45	1.16	0.21
200	35	1.05	0.12
200	40	1.05	0.23
200	45	1.02	0.24
250	35	1.26	0.23
250	40	1.31	0.22
250	45	1.38	0.21

نتایج تجزیه واریانس سطوح مختلف محتوای رطوبتی و سرعت دورانی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳، اثر عوامل محتوای رطوبتی و سرعت دورانی در سطح آماری ۱٪ و اثر متقابل آن‌ها در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار شده است.

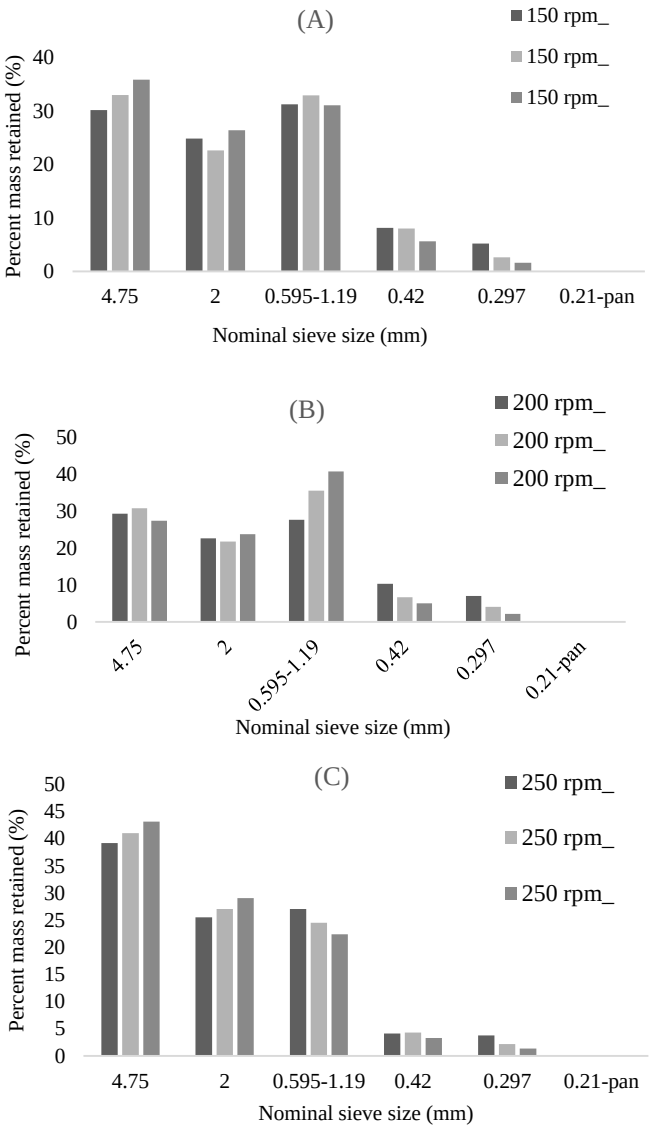
جدول ۳- تجزیه واریانس میانگین هندسی اندازه ذرات

Table 3- Analysis of variance of geometric mean particle diameter

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of square	F
سرعت دورانی Rotational of speed	2	0.353	690.827**
محتوای رطوبتی Moisture of content	2	0.038	74.089**
سرعت دورانی× محتوای رطوبتی Moisture of content× Rotational of speed	4	0.004	3.499*
خطا Error	18	0.005	

** و * به‌ترتیب معنی‌داری احتمال در سطح ۱٪ و ۵٪

** and * show significant difference at 1% and 5% level of probability, respectively.



شکل ۷- توزیع اندازه ذرات و درصد باقی‌مانده بر روی الک‌ها: الف- سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه، ب- سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه، ج- سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه

Fig.7. Distribution of particle size and percent mass retained on sieve: A) Rotational speed 150 rpm, B) Rotational speed 200 rpm, C) Rotational speed 250 rpm

توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات کود گاوی مرطوب آسیاب شده در سه سطح رطوبتی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد (برپایه تر)، و سه سرعت دورانی ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور بر دقیقه در قسمت‌های مختلف شکل ۷ نشان داده شده است. ذرات آسیاب شده با محتوای رطوبتی ۳۵ و ۴۰ درصد (بر مبنای تر) نسبت به ذرات آسیاب شده با محتوای رطوبتی ۴۵ درصد دارای توزیع اندازه ذرات گسترده‌تری بودند.

از آزمون شاپیرو – ویلک[1] برای تعیین نرمال بودن توزیع اندازه ذرات در حالات مختلف استفاده شد (جدول ۴). W مقدار آماری آزمون و P مقدار احتمال است که برای قبول یا رد فرضیه نرمال بودن توزیع استفاده می‌شود. در این آزمون اگر مقدار P > ۰/۰۵ باشد توزیع نرمال خواهد بود. در تمام حالت‌های مختلف خرد کردن مواد با سه سطح محتوای رطوبتی و سه سطح سرعت دورانی کوبنده، توزیع‌های به‌دست آمده از خرد کردن ذرات نرمال بودند. در جدول ۴ مقدار چولگی و کشیدگی توزیع کود گاوی آسیاب شده آورده شده است. اگر توزیع اندازه ذرات چوله به راست باشد مقدار چولگی بزرگ‌تر از صفر و اگر چوله به چپ باشد مقدار کوچک‌تر از صفر خواهد بود. اگر توزیع اندازه ذرات کاملاً نرمال باشد مقدار چولگی برابر با صفر خواهد بود. همچنین اگر مقدار کشیدگی توزیع بیشتر از توزیع نرمال باشد کشیدگی مقداری مثبت و در حالت کشیدگی کمتر، مقداری منفی خواهد داشت. توزیع اندازه ذرات وسیع‌تر برای فشرده‌سازی مواد (بریکت و پلت‌سازی) مناسب‌تر گزارش شده است (Adapa *et al.*, 2011; Mani *et al.*, 2004). بنابراین کود گاوی خرد شده جهت فشرده‌سازی و تولید پلت با کیفیت باید دارای توزیع نرمال (آزمون شاپیرو – ویلک: P >۰/۰۵)، چولگی نزدیک به صفر و کشیدگی کمتر از توزیع کاملاً نرمال (کشیدگی کوچک‌تر از صفر) داشته باشند. بر پایه این تئوری می‌توان بهترین حالت را برای آسیاب کود گاوی مرطوب انتخاب کرد (جدول ۴).

جدول ٤– محاسبه توزیع ذرات در حالات مختلف خرد کردن کود گاوی مرطوب در سه سطح رطوبتی و سه سطح سرعت دورانی کوبنده

Table 4- Calculation of particle size distribution of cattle manure grinds obtained from size reduction machine using three different rotational speed and three different moisture content (w.b%)

محتوی رطوبتی (٪) Moisture content (w.b %)	سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	آزمون شاپیرو – ویلکز Shapiroe Wilk Test[a]	چولگی Skewness[b]	کشیدگی Kurtosis[c]	توزیع Observation
35	150	W= 0.835 ; P= 0.151	-0.478	-2.99	P >0.05
35	200	W=0.874 ; P= 0.283	-0.425	-2.75	P >0.05
35	250	W= 0.877 ; P= 0.297	-0.056	-2.15	P >0.05
40	150	W= 0.87; P= 0.267	-0.333	-2.64	P >0.05
40	200	W= 0.903 ; P= 0.426	-0.127	-2.68	P >0.05
40	250	W= 0.911 ; P= 0.474	0.076	-1.77	P >0.05
45	150	W = 0.87; P= 0.265	-0.439	-2.82	P >0.05
45	200	W= 0.925 ; P= 0.564	0.095	-1.72	P >0.05
45	250	W= 0.924 ; P= 0.559	0.196	-1.68	P >0.05

a: Shapiroe Wilk Test: Data is normally distributed if P > 0.05;Wis statistical value of the test; P is the probability value used to accept or reject the hypothesis of whether the data is normally distributed or not.

b: Skewness: Skewness to the left (negative value); Skewness to the right (positive value).

c: Kurtosis: Peak is lower than expected for the normal (negative value); peak is higher than expected for the normal distribution (positive value).

براساس فرضیه گفته شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت برای کود گاوی مرطوب در رطوبت ۳۵ درصد بهترین توزیع جهت فشرده‌سازی در حالت آسیاب با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵ چولگی= ۰/۰۵۶– و کشیدگی= ۲/۱۵–) به‌دست آمد. برای رطوبت ۴۰ درصد بهترین توزیع در حالت آسیاب با سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۷۶ و کشیدگی=۱/۷۷–) به‌دست آمد. همچنین برای رطوبت ۴۵ درصد بهترین توزیع در حالت آسیاب با سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۹۵ و کشیدگی=۱/۷۲–) به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب ساخته شد. عمده نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به‌صورت زیر است.

۱– در مقایسه استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب در خط تولید پلت کود گاوی با آنچه در روش مرسوم آن (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) به‌کار گرفته می‌شود، میزان انرژی مصرفی ویژه جهت خرد کردن کاو گاوی تا ۹۲٪ کاهش یافت.

۲– کمترین میانگین هندسی اندازه ذرات مربوط به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) برابر با ۱/۰۲ و بیشترین آن در سرعت دورانی۲۵۰ دور بر دقیقه و

1- Shapiro- wilk test

محتوی رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) برابر با ۱/۳۸ میلی‌متر اتفاق افتاد.

۳- توزیع اندازه ذرات در کل آزمایش‌ها به‌صورت نرمال و برای کود گاوی مرطوب در محتوای رطوبت ۳۵ درصد گسترده‌ترین توزیع در سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵ چولگی= ۰/۰۵۶- و کشیدگی= ۲/۱۵-)، محتوای رطوبتی ۴۰ درصد گسترده‌ترین توزیع در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۷۶ و کشیدگی=۱/۷۷-) و در محتوای رطوبتی ۴۵ درصد گسترده‌ترین توزیع در حالت آسیاب با سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۹۵ و کشیدگی=۱/۷۲-) به‌دست آمد.

References

1. Adapa, P., L. Tabil and G. Schoenau. 2011. Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw. Biomass and Bioenergy 35: 549-561.
2. Afzalinia, S., and M. Roberge. 2007. Physical and mechanical properties of selected forage materials. Canadian Biosystems Engineering 49: 2.
3. ASAE S319.3. 2000. Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. ASAE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan www.asabe.org
4. ASAE S358.3. 2012. Moisture measurement forages. ASAE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan www.asabe.org.
5. Cadoche, L., and G. D. López. 1989. Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. Biological Wastes 30: 153-157.
6. Drzymała, Z. 1993. Industrial briquetting: Fundamentals and methods. Elsevier Science Ltd.
7. Hideno, A., H. Inoue, K. Tsukahara, S. Fujimoto, T. Minowa, S. Inoue, T. Endo, and S. Sawayama. 2009. Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw. Bioresource Technology 100: 2706-2711.
8. Klenin, N. I., I. F. Popov, and V. A. Sakun. 1985. Agricultural machines : theory of operation, computation of controlling parameters, and the conditions of operation. Amerind Publishing Company. New Delhi.
9. Kobayashi, N., P. Guilin, J. Kobayashi, S. Hatano, Y. Itaya, and S. Mori. 2008. A new pulverized biomass utilization technology. Powder Technology 180: 272-283.
10. Kratky, L., and T. Jirout. 2011. Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. Chemical Engineering & Technology 34: 391-399.
11. Kratky, L., and T. Jirout. 2014. Energy-Efficient Size Reduction Technology for Wet Fibrous Biomass Treatment in Industrial Biofuel Technologies. Chemical Engineering & Technology 37: 1713-1720.
12. Kratky, L., and T. Jirout. 2015. Mechanical disintegration of wheat straw by roller plate grind system with sharp edged segments. Acta Polytechnica 55: 113-122.
13. Lopo, P. 2002. The right grinding solution for you: roll, horizontal or vertical. Feed Management 53: 23-26.
14. Mandels, M., L. Hontz and J. Nystrom. 1974. Enzymatic hydrolysis of waste cellulose. Biotechnology and Bioengineering 16: 1471-1493.
15. Mani, S., L. G. Tabil, and S. Sokhansanj. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy 27: 339-352.
16. Nayyeri, M. A., M. H. Kianmehr, and A. Arab Hsseini. 2008. Construction and Evaluation of a Prototype Moist Dairy Cattle Manure Dryer. MSc Thesis, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
17. Ortega-Rivas, E., P. Juliano, and H. Yan. 2006. Food powders: physical properties, processing, and functionality. Springer Science & Business Media.
18. Padilla-Rivera, A., J. Barrette, P. Blanchet, and E. Thiffault. 2017. Environmental Performance of Eastern Canadian Wood Pellets as Measured Through Life Cycle Assessment. Forests 8: 352.
19. Payne, J. D. 1978. Improving quality of pellet feeds. Milling Feed and Fertiliser 161: 34
20. Reddy, M. C. 2014. Physical and frictional properties of donkey manure at various depths in compost pit. Journal of Academia and Industrial Research 2: 503-506.
21. Rezaeifar, J., M. H. Kianmehr, S. R. Hassan-Beygi, and B. Azadegan. 2008. Physical properties of pletted cattle manure. Journal of Agriculture 10: 53-68.
22. Rezvani, Z., Gh. Chegini, A. Arabhosseini, M. H. Kianmehr, and M. R. Asadi. 2013. Determining the specific energy consumption for grinding Rice straw with a hammer mill. Journal of Automotive and Applied Mechanics 1: 4-9.
23. Safari, M., and R. Abdi. 2015. Comparison of biogas production from rapeseed and wheat residues in compound with cattle manure. Journal of Agricultural Machinery 6: 476-487.
24. Schell, D. J., and C. Harwood. 1994. Milling of lignocellulosic biomass. Applied Biochemistry and biotechnology 45: 159-168.

25. Soleymani, J., M. H. Kianmehr, S. R. Hassan-Beygi, and S. M. Shariatmadari. 2018. Design, fabrication and evaluation of a wet cattle manure size reduction machine. Msc Thesis, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
26. Suna. 2012. Renewable Energy and Energy Efficiency Organization. Available at: :http://www.suna.org.ir/suana_content/media/image/2012/10/1734_org.pdf. Accessed 2012/10/17. (In Farsi)
27. Tabil, L. 1996. Pelleting and binding characteristics of alfalfa. Unpublished Ph. D. thesis, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, Saskatoon, SK Canada: University of Saskatchewan.
28. Taherzadeh, M. J., and K. Karimi. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. International Journal of Molecular Sciences 9: 1621-1651.
29. Zanker, A. 1980. Mining engineering, How to Size smooth Roll Crushers. Available at: https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/How-to-Size-Smooth-Roll-Crushers.pdf. Accessed 2017/5/17.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 115-128

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۲۸-۱۱۵

Design, Fabrication and Evaluation of a Wet Cattle Manure Size Reduction Machine

J. Soleimani[1], M. H. Kianmehr[2*], S. R. Hassan-Beygi[3], S. M. Shariatmadari[4], K. Rezapoor[5]

Received: 31-07-2018
Accepted: 30-12-2018

Introduction

The annually production of cattle manure is estimated around six million tons in Iran. Manure transportation with high moisture and low density recognized as crucial issue. The densification of dry or wet manure is the profound method for decreasing the manure volume which reduces the cost of handling and storage. Besides, the particle size is one of the important factors in the pellet production. Ball mills, vibratory mills, hammer mills, knife mills, two roll mills, colloid mills, attrition mills, or extruders can be used for size reduction of biomass. Specific energy consumption for size reduction of biomass highly depends on moisture content, bulk and particle densities, feed rate of the material, particle size distribution (initial/final particle size) and machine variables. The present study is conducted for wet cattle manure size reduction machine. Furthermore, the relationship between moisture content (35, 40 and 45 %w.b) and drum of special size reduction machine in rotational speed (150, 200 and 250 rpm) considering geometric mean diameter of particle and size distribution of wet cattle manure were investigated. A factorial experiment under randomized complete design method was employed with three replications.

Materials and Methods

The main parts of machine include drum, concave, spring and adjusting screw. The main function of this thresher machine is to combine crushing and cutting in order to conduct the size reduction methods, i.e., to apply compressive and shear forces to the cattle manure particles. The drum is also equipped with several rows of sharp-edged milling segments. The spring constants were determined by evaluating the slope of the force vs. deflection curves. The rotational speed of drum was changed in the range of 100-700 rpm during these experiments. In the test of the machine physical properties of grinds such as geometric mean diameter of grind particles and particle size distribution were determined. One kg of cattle manure was grinded in each test and the particle size distribution of grinded cattle manure was determined according to ASAE standard S319.3. The moisture content of cattle manure was obtained according to ASAE standard S358.3.

Results and Discussion

The initial and final particle size of the materials are 20 millimeters and less than 5 millimeters, respectively and the angle of nip is 30 degrees (according to the installation space limitations), the diameter of the drum is 310 millimeters. The spring constant was equal to 24.371 N / mm and on the basis of the experiments a drum speed in the range of 150–250 rpm is considered to be optimal settings for the milling for cattle manure disintegration. The results of Table 4 show that for wet cattle manure with 35% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum ($P > 0.05$; Skewness = -0.056; Kurtosis = -2.15), 40% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum ($P > 0.05$; Skewness = 0.076; Kurtosis = -1.77), 45% (w.b) moisture content at 200 rpm rotational speed of drum ($P > 0.05$; Skewness = 0.095; Kurtosis = -1.72), in grinds that would potentially produce better compacts. The geometric mean particle size and standard deviation for each test are shown in Table 2. According to Table (2), the lowest geometric mean of particle size is related to rotational speed of 200 rpm and a moisture content of 45% (w.b), and the highest at rotational speed of 250 rpm and a moisture content of 45% (w.b) can be observed.

Conclusions

1- The use of cattle manure of thresher machine reduces the specific energy consumption of cattle manure by 92% compared to the conventional method (using drying and hammer mill) in the pellet production.

1- Researcher of Research and Innovation Center of ETKA Organization, Tehran, Iran, Master of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
2- Professor of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
3- Professor of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
4- Lecturer of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
5- Production Assistant of Mazareh Novin Iraniain Holding co
(*- Corresponding Author Email: kianmehr@ut.ac.ir)

2- The lowest geometric mean diameter of wet cattle manure was 1.02 millimeter for drum rotational speed of 200 rpm at 45% (w.b) moisture content and the highest was 1.38 at rotational speed of 250 rpm and a moisture content of 45% (w.b%).
3- The best particle size distribution was observed for milling of wet cattle manure with 35% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum (P> 0.05; Skewness = -0.056; Kurtosis = -2.15), 40% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum (P> 0.05; Skewness = 0.076; Kurtosis = -1.77), 45% (w.b) moisture content at 200 rpm rotational speed of drum (P> 0.05; Skewness = 0.095; Kurtosis = -1.72)

Keywords: Geometric particle diameter, Particle size distribution, Wet cattle manure, Wet cattle manure size reduction machine

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 129-139

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۳۹-۱۲۹

پیاده‌سازی سامانه ماشین بویایی به‌منظور تشخیص تقلب در روغن حیوانی گاوی

فردین ایاری[۱]، اسماعیل میرزائی قلعه[۲*]، حکمت ربانی[۳]، کبری حیدربیگی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

چکیده

تقلب در محصولات لبنی نه تنها تهدیدی جدی برای سلامت انسان است بلکه زیان‌های اقتصادی متعددی را نیز به دنبال دارد. ازجمله تقلب‌های رایج در روغن حیوانی گاوی، ترکیب کردن آن با روغن نباتی و روغن دنبه است. در این پژوهش، یک سامانه‌ی ماشین بویایی بر پایه هشت حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی ساخته شد و قابلیت آن در تشخیص مقادیر مختلف ترکیب روغن نباتی و روغن دنبه در روغن حیوانی گاوی خالص (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. بردار ویژگی‌ها از سیگنال پاسخ حسگرها به ترکیبات فرار و معطر انواع روغن‌ها، استخراج و به‌عنوان ورودی مدل تشخیص الگو استفاده شد. هم‌چنین جهت طبقه‌بندی ویژگی‌های استخراج‌شده از روش تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA) استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیز مؤلفه‌های اصلی با دو مؤلفه‌ی PC1 و PC2، به‌ترتیب واریانس ۹۸ و ۹۷ درصد را برای ترکیب روغن حیوانی با روغن نباتی و روغن دنبه نشان داد. همچنین نمودارهای لودینگ و رادار نشان داد که بوی روغن حیوانی گاوی بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را به‌ترتیب روی حسگر TGS822 و حسگر MQ135 دارد. همچنین بوی روغن نباتی و روغن دنبه بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را به‌ترتیب روی حسگرهای MQ136 و MQ135 داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمودار رادار مشخص شد که حسگر MQ135 کمترین نقش را در طبقه‌بندی دارد. هم‌چنین براساس نتایج حاصل از طبقه‌بندی، دقت طبقه‌بندی برای روغن حیوانی مخلوط با روغن نباتی و روغن دنبه به‌ترتیب برابر ۹۵/۲۴ و ۹۷/۱۵ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: حسگرهای نیمه‌هادی، روغن حیوانی گاوی، ماشین بویایی، مؤلفه‌های اصلی

مقدمه

امروزه از مهم‌ترین بحث‌های مطرح در جوامع جهانی، اهمیت و نقش روغن‌های خوراکی در تغذیه و سلامت جسمی افراد به‌خصوص در پیشگیری از بیماری‌های قلبی- عروقی است (Oh *et al.*, 2005). در ایران روغن‌های غذایی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ یکی از این روغن‌ها، روغن حیوانی (روغن زرد) است. روغن حیوانی که به آن روغن کرمانشاهی نیز گفته می‌شود، نوعی روغن آشپزی است که از کره تولید می‌شود و جزء سوغاتی‌های اصلی شهر کرمانشاه است (Bahrami *et al.*, 2000). طبق دستورالعمل سازمان استاندارد سلامت مواد غذایی هند (FSSAI)، روغن حیوانی باید فاقد روغن نباتی، چربی بدن حیوانات، روغن‌های معدنی، افزودنی‌های طعم‌دار و هر ماده خارجی دیگر باشد (Amrutha Kala, 2013).

تشخیص تقلب در روغن همواره جامعه علمی را به چالش کشیده است. به‌سختی می‌توان تکنیکی را یافت که بتواند به‌راحتی و با اطمینان، پارامترهای کیفی روغن را ارزیابی کند (Jirankalgikar and De, 2014). تقلب در روغن حیوانی اغلب با افزودن روغن‌های گیاهی، نباتی و چربی بدن حیوانات انجام می‌گیرد. تشخیص تقلب در فرآورده‌های غذایی و برآورد میزان آن از نگرانی‌های کلیدی سال‌های اخیر است (Tajima *et al.*, 1995). کیفیت‌سنجی فرآورده‌های کشاورزی و مواد خوراکی برای تضمین بهداشت و کیفیت تغذیه انسانی دارای اهمیت ویژه است. از این رو در چند دهه اخیر این توجه به‌سوی استفاده از روش‌های بینایی، بویایی و چشایی رایانه‌ای معطوف گردیده است (Kiani *et al.*, 2016).

بو، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های حسی مواد غذایی به حساب می‌آید. ماشین بویایی[۵] (بینی الکترونیک)[۶]، ابزاری است که حس بویایی انسان را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین تشخیص و درک بوهای پیچیده را به کمک آرایه‌هایی از حسگرهای شیمیایی و الکترونیکی انجام می‌دهد (Ghasemi-Varnamkhasti *et al.*, 2009). به‌طور کلی، بینی الکترونیک ابزاری غیر مخرب و با قابلیت اعتماد بالا است که نسبت به سایر روش‌ها مزیت‌هایی همچون کاربری آسان، هزینه‌ی کم و سرعت بالا دارد (Loutfi *et al.*, 2015).

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در زمینه کاربرد ماشین بویایی در بخش‌های مختلف گزارش شده است. سولی و همکاران به منظور طبقه‌بندی پنیر در مراحل مختلف انبارداری از یک سامانه بینی الکترونیک استفاده کردند. آن‌ها پنیر را به کمک شبکه عصبی

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام
(*- نویسنده مسئول: Email: e.mirzaee@razi.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.67524

5- Machine Olfaction
6- Electronic Nose (E-Nose)

مصنوعی ۱۰۰ درصد طبقه‌بندی کردند (Cevoli *et al.*, 2011). توحیدی و همکاران از سامانه بینی الکترونیک برای تشخیص فرمالین، پراکسید هیدروژن و هیپوکلریت سدیم در شیر خام استفاده کردند؛ بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به‌ترتیب ۹۷، ۸۷ و ۸۳ درصد واریانس درون داده‌ها برای فرمالین، پراکسید هیدروژن و هیپوکلریت سدیم به‌دست آمد. تجزیه و تحلیل تفکیک خطی (LDA) به دقت طبقه‌بندی نسبتاً پایین به‌ترتیب ۷۹/۱۶، ۷۰/۸۳ و ۶۶/۶۶ درصد، و در نهایت ماشین بردار پشتیبان به‌ترتیب ۶۴/۹۴، ۸۵/۹۲ و ۷۵/۸۷ درصد دقت برای فرمالین، پراکسید هیدروژن و هیپوکلریت سدیم را نشان داد (Tohidi *et al.*, 2018). در پژوهش دیگری از یک سامانه بینی الکترونیک برای شناسایی و تشخیص تقلب در روغن زیتون استفاده شد. بر اساس نتایج، تفکیک روغن اصل و تقلبی به‌خوبی انجام گرفت (Oliveros *et al.*, 2002). های و وانگ با استفاده از یک بینی الکترونیک، تقلبی و یا غیر تقلبی بودن روغن دانه کاملینا و روغن کنجد را بررسی کردند (Hai and Wang, 2006). همچنین بینی الکترونیک در تشخیص تقلب در روغن آفتاب گردان و روغن دانه ذرت و قهوه نیز به‌کار رفته است و در این مطالعات تشخیص محصول تقلبی با قابلیت اطمینان بالای ۹۵درصد گزارش شده است (Mildner-Szkudlarz and Jeleń, 2008; Son *et al.*, 2009). حیدربیگی و همکاران زعفران اصلی از نوع تقلبی را توسط یک سامانه بینی الکترونیکی مورد بررسی قرار دادند. سامانه ارائه شده توانست نمونه‌های زعفران اصل و تقلبی را به‌ترتیب با دقت بیش از ۸۶/۸۷ درصد تشخیص دهد (Heidarbeigi *et al.*, 2015).

فرآیندهای زیستی روغن حیوانی گاوی در مدت فرآوری و نگهداری آن باعث ایجاد گازهای حاصل از بوی روغن حیوانی گاوی و تولید ترکیبات آلی فرار می‌شود. با ارزیابی این ترکیبات، تشخیص روغن حیوانی گاوی خالص از نوع تقلبی امکان‌پذیر خواهد بود. بر اساس بررسی منابع، تاکنون یک ماشین یا سامانه ویژه برای تشخیص روغن حیوانی گاوی خالص از نوع تقلبی آن طراحی یا ساخته نشده است. بینی الکترونیک از روش‌های جدیدی می‌باشد که اخیراً در کشاورزی و به‌خصوص در زمینه بررسی کیفی مواد غذایی بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. با توجه به قابلیت بالای این فن‌آوری، در این تحقیق سامانه بینی الکترونیک جهت تشخیص روغن حیوانی گاوی خالص از نوع تقلبی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

ساخت سامانه

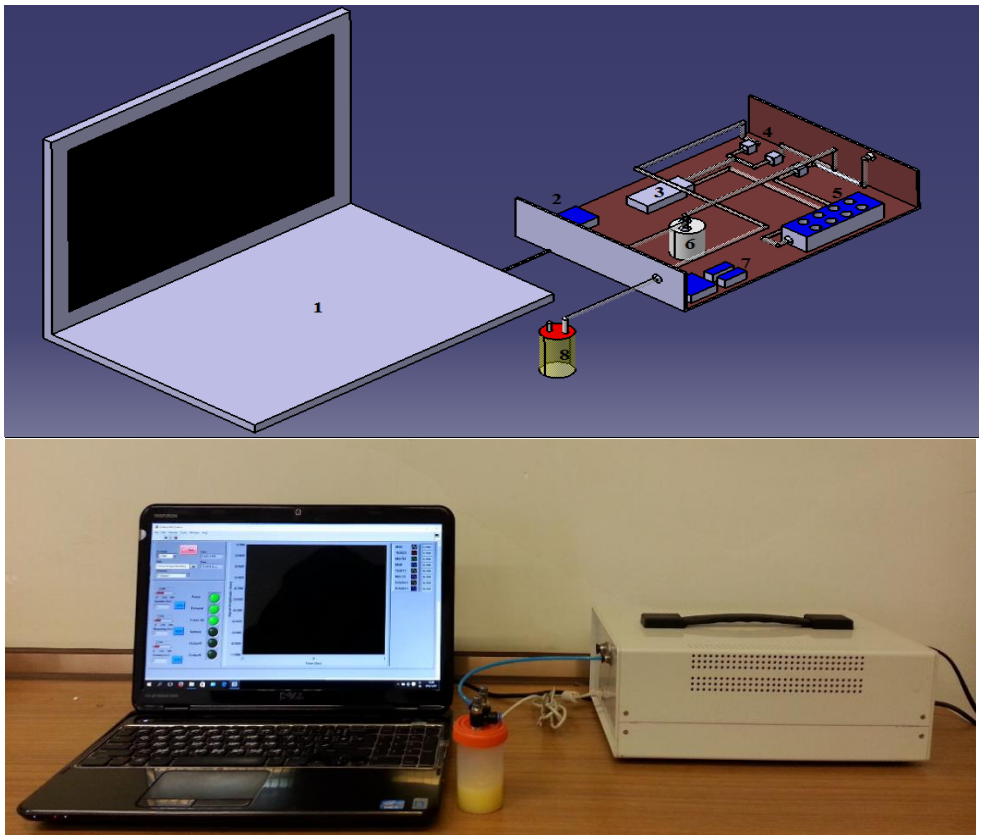
به‌منظور تشخیص میزان تقلب در روغن حیوانی، یک سامانه ماشین بویایی طراحی و ساخته شد. این سامانه شامل بخش سامانه تحصیل داده، حسگرها، محفظه حسگرها، محفظه نمونه‌گیری، منبع تغذیه، اتصالات، شیرهای برقی، پمپ هوا و فیلتر هوا است. شکل ۱ طرح‌واره سامانه بینی الکترونیک طراحی شده را نشان می‌دهد. سامانه طراحی شده به یک پمپ دیافراگمی (مدل TYAP-127 با ولتاژ ۱۲ ولت)، به منظور انتقال گاز نمونه (فضای هد) به محفظه حسگرها مجهز شد. به منظور کنترل خودکار سامانه و گرفتن الگوی بوی نمونه‌ها، سامانه به سه شیر برقی دو راهه (UNI-DO 2/2) یک چهارم اینچ با ولتاژ تحریک ۱۲ ولت مجهز شد. شیرهای برقی در حالت نرمال بسته بوده یعنی در حالتی که بوبین شیر برقی فعال نباشد شیر در وضعیت بسته بوده و بوی اضافه از شیر عبور نمی‌کند.

اساس سامانه‌های بینی الکترونیک بر پایه‌ی حسگرهای گازی است (Ghasemi-Varnamkhasti *et al.*, 2015). در این پژوهش از ۸ حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی استفاده شد که هر کدام به ترکیبات خاصی از مواد فرار در نمونه‌ها واکنش نشان می‌دهند. این حسگرها به دلیل پایداری شیمیایی بالا، عمر زیاد، پاسخ کم به رطوبت و قیمت مناسب به‌طور گسترده در ماشین‌های بویایی استفاده می‌شوند (Sanaeifar *et al.*, 2015). انتخاب مجموعه حسگرها از اهمیت زیادی برخوردار است، به‌طوری که با انتخاب مجموعه مناسبی از آن‌ها می‌توان طیف وسیعی از ترکیبات بو را شناسایی کرد (Doleman and Lewis, 2001). از متداول‌ترین حسگرهای مورد استفاده در سامانه بینی الکترونیک، حسگرهای شیمیایی هستند که قادرند یک کمیت شیمیایی موجود در گاز یا مایع را با ایجاد یک سیگنال الکتریکی پاسخ دهند (Mildner-Szkudlarz and Jeleń, 2008). مشخصات حسگرهای استفاده شده در بینی الکترونیک طراحی شده در جدول ۱ آورده شده است.

این هشت حسگر بر روی یک صفحهٔ الکترونیک مداربندی شد. مداربندی حسگرها بر اساس صفحات داده (دیتا شیت) منتشر شده، انجام شد. با ورود گاز موجود اطراف نمونه به محفظهٔ حسگرها تغییری در ولتاژ خروجی هر حسگر متناسب با نوع حسگر و میزان حساسیت آن ایجاد می‌شود. این اطلاعات توسط سیستم تحصیل داده جمع‌آوری شد. برای این منظور از نرم‌افزار LABVIEW 2012 استفاده شد.

(a)

(b)



شکل ۱- نقشه سه‌بعدی سامانه (a) و سامانه ماشین بویایی طراحی شده (b):

۱-رایانه، ۲- سامانه تحصیل داده، ۳- پمپ، ۴- شیرهای برقی، ۵- حسگرها و محفظه حسگرها، ۶- فیلتر هوا، ۷- منبع تغذیه، ۸-محفظه نمونه

Fig.1. The 3- dimensional draw (a) and the designed e-nose system (b):
1- Computer, 2- Data acquisition card, 3- Pump, 4- Electro valves, 5- Sensors and Sensor chamber, 6- Air filter, 7- Power supply, 8- Sample chamber

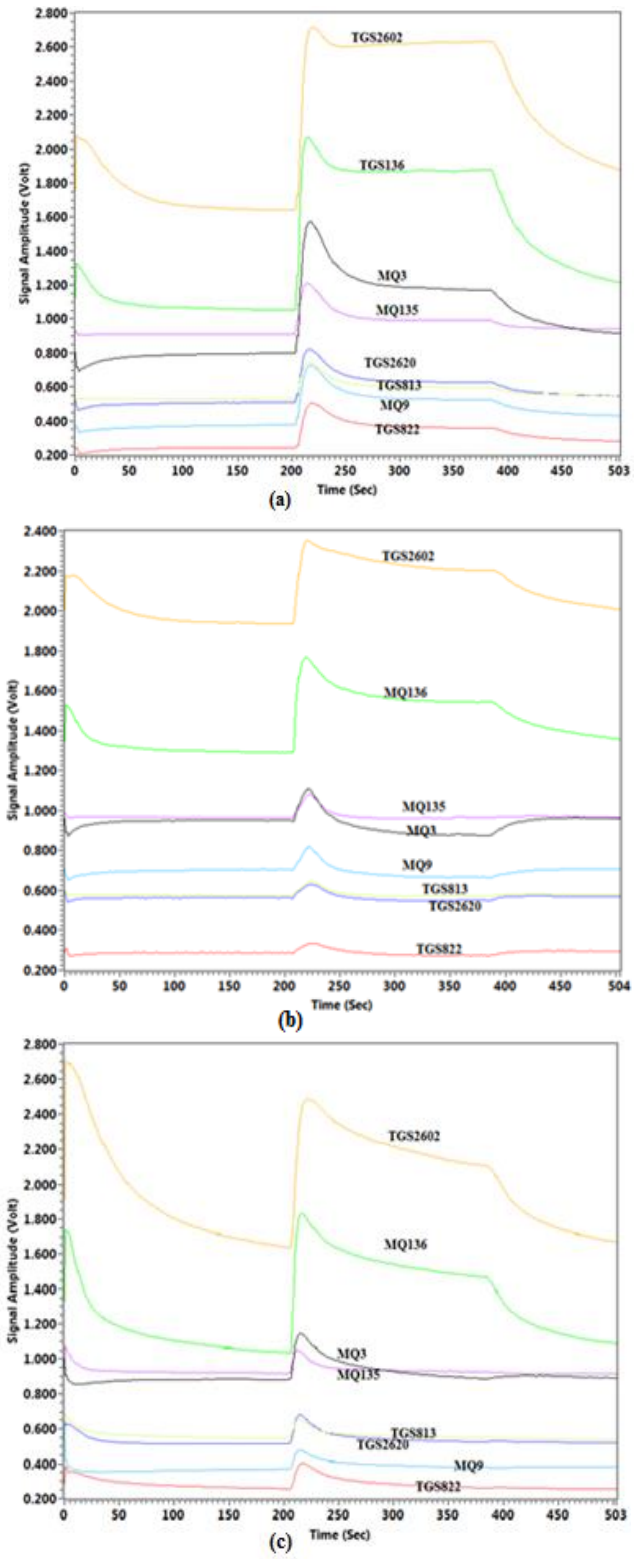
جدول ۱- حسگرهای استفاده شده در سامانه بینی الکترونیک و مشخصات آن‌ها (Heidarbeigi *et al.*, 2015; Tohidi *et al.*, 2018; Sanaeifar *et al.*, 2015)

Table 1- Sensors used in electronic nose system and view them

کاربردهای اصلی **Main applications**	محدوده‌های تشخیص **Typical detection ranges (ppm)**	نوع حسگر **Sensor type**
الکل Alcohol	10-300	MQ3
گاز مونو اکسید کربن، گازهای احتراق پذیر CO and combustible gas	Co 10-1000, Cg 100-10000	MQ-9
بخار آمونیاک، سولفید، بنزین Steam ammonia, benzene, sulfide	10-10000	MQ135
دی اکسد سولفور Sulfur dioxide (SO_2)	1-200	MQ-136
متان، پروپان، بوتان CH_4, C_3H_8, C_4H_{10}	500-10000	TGS813
بخار حلال‌های آلی Steam organic solvents	50-5000	TGS822
سولفید هیدروژن، آمونیاک، تولوئن Hydrogen sulfide, ammonia, toluene	1-30	TGS2602
الکل، بخار حلال‌های آلی Alcohol, Steam organic solvents	50-5000	TGS2620

فرآیند داده‌برداری

در این پژوهش از روغن‌های دنبه و نباتی به‌عنوان تقلب‌های رایج در روغن حیوانی گاوی استفاده شد. برای آماده کردن نمونه‌ها با درصدهای تقلب، ۲۴ ساعت قبل از داده‌برداری با بینی الکترونیک، روغن‌های ذکر شده با نسبت‌های (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی) به روغن حیوانی گاوی خالص افزوده شد. برای هر نمونه آزمایش مقدار ۳۰ گرم در ظرف‌های مخصوص نگهداری شد. ، برای این‌که روغن از حالت جامد به حالت مایع تبدیل شود، نمونه‌ها در داخل حمام آب گرم (دمای ۴۰ درجه سلسیوس) قرار داده شد. این عمل بدین منظور انجام شد که بوی روغن در حالت مایع، هوای داخل محفظه را بیشتر اشباع کرده و غلظت مواد فرار در داخل محفظه افزایش یابد. نحوه‌ی انجام آزمایش بدین صورت بود که ابتدا نمونه در داخل محفظه نمونه قرار داده و درب آن بسته شد. قبل از شروع آزمایش‌ها و فرآیند داده‌برداری روی نمونه‌های مختلف روغن، به‌منظور اختلاط هوای داخل محفظه با بوی نمونه و پر شدن فضای بالای نمونه، به مدت ۱۸۰ ثانیه منتظر مانده و این عمل بدین منظور انجام شد که بوی محصول، هوای داخل محفظه را اشباع کرده و غلظت مواد فرار در داخل محفظه افزایش یابد. سپس مراحل کاری بینی الکترونیک شامل تصحیح خط مبنا، تزریق بوی نمونه و پاک کردن حسگرها و محفظه انجام شد. در ابتدا نمونه در محفظه نمونه قرار گرفت و در مرحله تصحیح خط مبنا (۲۰۰ ثانیه)، هوای تمیز به‌منظور رساندن پاسخ آرایهٔ حسگرها به حالت پایدار از روی حسگرها عبور داده شد. در مرحلهٔ تزریق بوی نمونه (۱۸۰ ثانیه) با ورود گاز اطراف نمونه به محفظهٔ حسگرها تغییری در ولتاژ خروجی هر حسگر متناسب با نوع حسگر و میزان حساسیت آن ایجاد می‌شود. در مرحله پاک کردن حسگرها و محفظه، هوای تمیز شده به منظور رساندن پاسخ آرایهٔ حسگرها به حالت پایدار از روی حسگرها عبور داده می‌شد. همچنین در این مرحله پمپ در مدت زمان ۱۲۰ ثانیه بوی مانده در داخل محفظهٔ نمونه را خارج کرده تا سامانه برای آزمایش نمونه بعدی آماده گردد (Heidarbeigi *et al.*, 2015; Sanaeifar *et al.*, 2015). پاسخ ولتاژی حسگرها در این ۵۰۰ ثانیه توسط سامانه تحصیل داده جمع‌آوری می‌شد. هر تیمار، با ۱۵ تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۲ پاسخ حسگرها به نمونه‌های روغن حیوانی گاوی (a)، روغن نباتی (b) و روغن دنبه (c) آورده شده است.



شکل ۲– پاسخ سامانه بینی الکترونیک به نمونه‌های (a) روغن حیوانی گاوی، (b) روغن نباتی، (c) روغن دنبه

Fig.2. Electronic nose system Response to Samples (a) Cow ghee, (b) Vegetable oils and (c) Fat oil

استخراج ویژگی‌ها از سیگنال‌ها

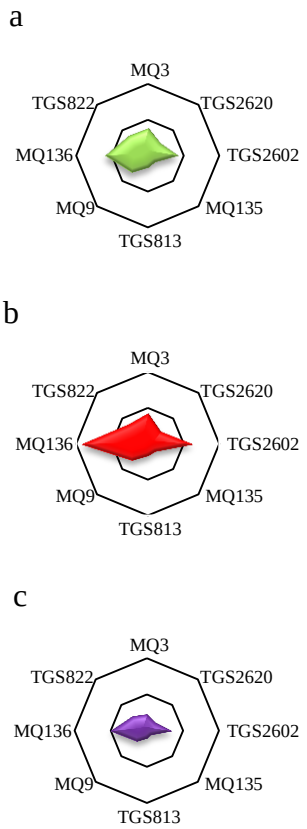
سیگنال‌های به‌دست آمده از حسگرها ابتدا به‌صورت داده‌های خام ثبت و ذخیره شدند. در مرحله بعدی، سیگنال‌های حسگرها پیش‌پردازش شدند. پیش‌پردازش شامل سه مرحله تصحیح خط مبنا، فشرده‌سازی و نرمال‌سازی داده‌ها بود. هدف از تصحیح خط مبنا جبران رانش[1] و افزایش کیفیت پاسخ حسگرها است. در این پژوهش، از روش کسری برای تصحیح خط مبنا استفاده شد (رابطه ۱). این روش علاوه بر تصحیح خط مبنا، داده‌ها را نیز نرمال می‌کند و به‌طور گسترده در حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی استفاده می‌شود (Pearce *et al.*, 2003):

$$Y_s(t) = [X_s(t) - X_s(0)]/X_s(0) \qquad (۱)$$

که در این رابطه $X_s(0)$ کم‌ترین پاسخ حسگر قبل از مرحله اندازه‌گیری (خط مبنا)، $X_S(t)$ پاسخ حسگر در زمان t (پاسخ حسگری) و $Y_s(t)$ پاسخ نرمال شده حسگر است. داده‌های پیش‌پردازش شده به‌عنوان ماتریس ورودی برای روش‌های تحلیلی چند متغیره مورد استفاده قرار گرفت. روش چند متغیره بدون سرپرست[2] تحلیل مؤلفه‌های اصلی[3] (PCA) به‌منظور تحلیل داده‌ها استفاده شد. PCA روشی شناخته شده در فشرده‌سازی داده‌های خطی و استخراج ویژگی‌ها می‌باشد. برای طبقه‌بندی از روش تحلیل تفکیک درجه دوم[4] (QDA) استفاده شد. روش تحلیل تفکیک درجه دوم از روش‌های مورد استفاده در آمار، تشخیص الگو و یادگیری ماشین برای پیدا کردن ترکیبی از ویژگی‌های مورد نظر متمایز شده است. در این تحقیق، دو سوم داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و یک سوم باقیمانده برای آزمون در نظر گرفته شد. برای اجرای این مدل طبقه‌بندی، یک برنامه در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۳ کدنویسی شد. تمام محاسبات و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Unscrambler x10.4، نرم‌افزار متلب ۲۰۱۳ و Excel 2013 انجام شد.

نتایج و بحث

پاسخ حسگرها با استفاده از روش کسری نرمال شد و پس از استخراج بیشینه پاسخ حسگرها، نمودار رادار[5] آن‌ها رسم گردید. در شکل ۳ نمودار رادار برای روغن حیوانی، روغن دنبه و روغن نباتی نشان داده شده است.



شکل ۳– نمودار رادار پاسخ حسگرها برای (a) روغن حیوانی گاوی، (b) روغن نباتی و (c) روغن دنبه

Fig.3. Radar graph response of the sensors for (a) Cow ghee, (b) Vegetable oils and (c) Fat oil

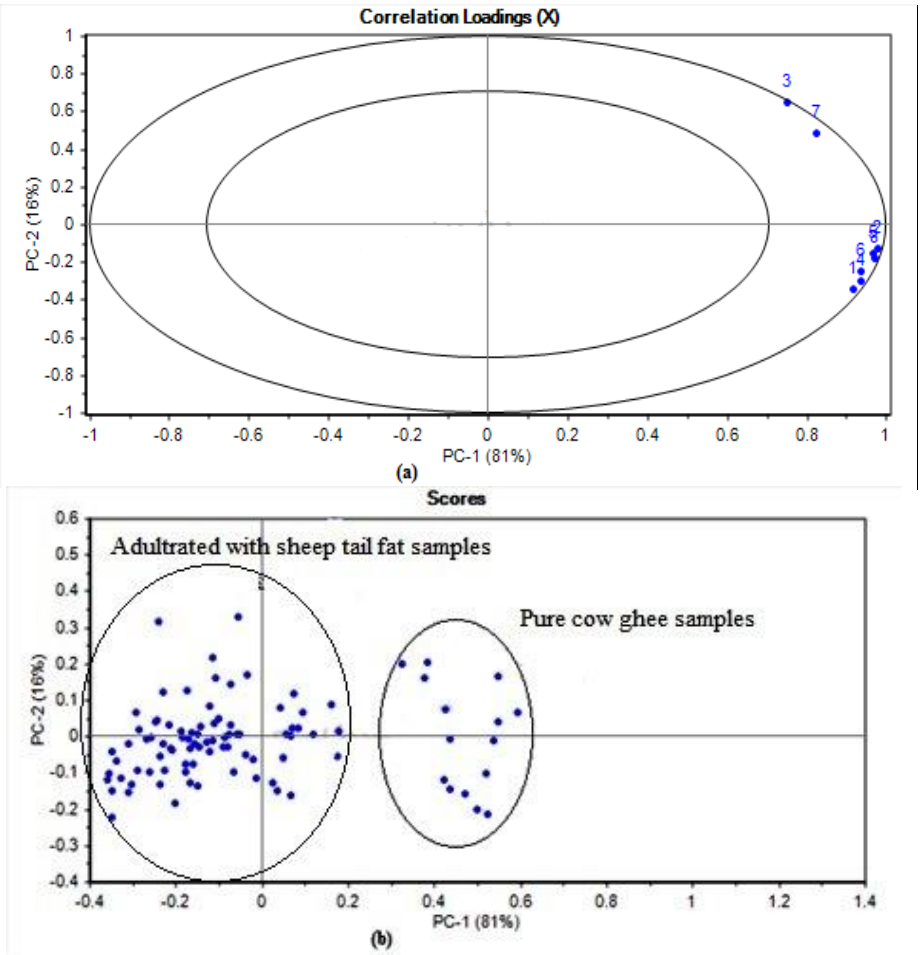
نمودار رادار نشان می‌دهد که بوی روغن حیوانی گاوی بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را به‌ترتیب بر حسگر MQ136 که مربوط به تشخیص بوی دی‌اکسید سولفور و حسگر MQ135 که مربوط به تشخیص بخار آمونیاک، بنزن و سولفید است، دارد. همچنین بوی روغن نباتی بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را به‌ترتیب بر حسگر MQ136 و MQ135 دارد. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده در مورد بوی روغن دنبه بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را به‌ترتیب بر حسگر MQ136 و MQ135 دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمودار رادار می‌توان نتیجه گرفت که حسگر MQ136 که مربوط به تشخیص بوی دی‌اکسید سولفور است در مقایسه با سایر حسگرها، بیشترین نقش را در طبقه‌بندی دارد.

ارزیابی کیفیت روغن حیوانی گاوی با استفاده از PCA

از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌منظور تشخیص روغن حیوانی گاوی خالص از نمونه‌های تقلبی استفاده شد. داده‌های نرمال شده به کمک روش کسری، به‌عنوان ورودی PCA مورد استفاده قرار

1- Drift
2- Unsupervised
3- Principal Component Analysis (PCA)
4- Quadratic Discriminant Analysis (QDA)
5- Radar

گرفت. تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش بعد داده‌ها و ارزیابی مقدماتی شباهت بین کلاس‌ها استفاده شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در تعریف ریاضی یک تبدیل خطی متعامد است که براساس نتایج نمودارهای گرافیکی آن، تجسمی از تمام اطلاعات موجود در یک مجموعه داده ایجاد شده را نشان می‌دهد. همچنین این روش به درک این مطلب که یک نمونه با چه نسبتی از سایر نمونه‌ها متفاوت بوده (نمودار اسکور) و کدام متغیرها بیشترین سهم در این تمایز را دارند (نمودار لودینگ) کمک می‌کند. نمودارهای اسکور معمولاً برای مشخص کردن الگوها و طبقه‌بندی داده‌ها به‌کار می‌رود و به نحوی داده‌ها را بیان می‌کند که شباهت‌ها و تفاوت‌های بین آن‌ها آشکار شود. در حالی‌که نمودار لودینگ اطلاعاتی در رابطه با نقش نسبی مجموعه حسگری در تحلیل مؤلفه‌های اصلی ارائه می‌دهد (Ghasemi-Varnamkhasti *et al.*, 2011).



شکل ٤- (a) نمودار لودینگ و (b) نمودار اسکور تحلیل PCA در تشخیص روغن حیوانی گاوی و مخلوط با روغن دنبه

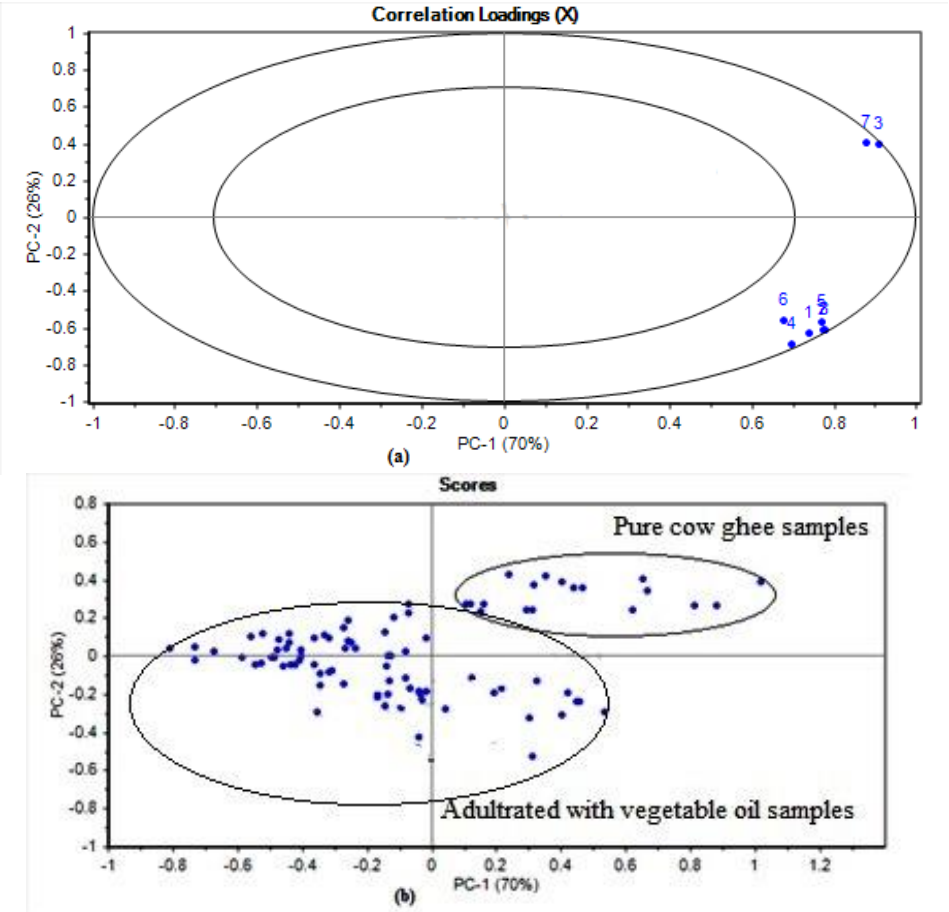
Fig.4. (a) Loading graph and (b) Score graph of PCA analysis in the diagnosis of cow ghee mixed with sheep tail fat

نمودار اسکور[1] مؤلفه‌های اصلی، واریانس بین داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌ها را بیان می‌کند. براساس نتایج حاصل از تحلیل PCA در نمونه روغن حیوانی خالص با تقلب روغن دنبه دو مؤلفه‌ی اصلی PC1 و PC2 به‌ترتیب ۸۱ و ۱۶ درصد نمونه‌های روغن حیوانی گاوی خالص و تقلبی (تقلب روغن دنبه) را از یکدیگر تفکیک کردند و در مجموع ۹۷ واریانس بین نمونه‌ها را پوشش دادند (شکل ۴-b). برای اطلاع از میزان تأثیر هرکدام از حسگرها در تحلیل‌های شناسایی الگو، پاسخ نرمال شده حسگرها در نموداری به نام نمودار لودینگ[2] با ضرایب مقادیر ویژه تصویر شدند. هرچه مقدار لودینگ حسگری روی یک مؤلفه‌ی اصلی بزرگ‌تر باشد، بیانگر نقش بیشتر آن حسگر در تشخیص و تمایز میان نمونه‌های روغن حیوانی گاوی با درصدهای مختلف تقلب است. بنابراین می‌توان با حذف حسگر یا حسگرهایی که

1- Score plot

2- Loadings

کم‌ترین سهم را در تشخیص تمایز بین گروه‌ها دارند، علاوه بر کاستن از پیچیدگی فرآیند تحلیل داده، هزینه‌ی ساخت آرایه حسگری را نیز کاهش داد (Heidarbeigi *et al.*, 2015). نمودار لودینگ به‌منظور تعیین نقش حسگرها در جداسازی گروه‌ها بررسی شد. نمودار لودینگ برای تشخیص روغن حیوانی گاوی از روغن دنبه در شکل۴ (a) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین مقدار بر روی مؤلفه اصلی برای حسگرهای ۲ (TGS822)، ۳ (MQ136)، ۴ (MQ9) و ۸ (TGS2620) به‌دست آمده است. همچنین بر اساس شکل ۴ حسگرهای ۶ (MQ135) و ۷ (TGS2602) کم‌ترین نقش را در طبقه‌بندی دارند. عدم تغییرات قابل ملاحظه حسگر ۶(MQ135) و ۷ (TGS2602) بیانگر این حقیقت است که بوی این گازها در تفکیک روغن حیوانی گاوی نقشی ندارند و می‌توان با توجه به لزوم کاهش هزینه ساخت ماشین بویایی، این حسگرها را حذف نمود. شش حسگر دیگر یعنی حسگرهای شماره ۱ (MQ3)، ۲ (TGS822)، ۴ (MQ9)، ۵ (TGS813)، ۶ (MQ135) و ۸ (TGS2620) نزدیک به هم قرار دارند که نشان‌دهنده این مطلب است که این حسگرها نتایج مشابهی در سامانه و در تشخیص ترکیبات مورد نظر را ایجاد می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با توجه به مقدار ضریب لودینگ بالای حسگرهای ۵، ۲ و ۸ و همچنین نزدیکی مقادیر آن‌ها به یکدیگر، این حسگرها تأثیر تقریباً یکسانی در شناسایی الگو داشته و می‌توان از هرکدام آن‌ها فقط یکی را در فرآیند تحلیل داده استفاده کرد.



شکل ۵- (a) نمودار لودینگ و (b) نمودار اسکور تحلیل PCA در تشخیص روغن حیوانی گاوی و مخلوط آن با روغن نباتی

Fig.5. (a) Loading graph and (b) Score graph of PCA analysis in the diagnosis of cow ghee mixed with vegetable oil

در شکل ۵ (b) نمودار اسکور با دو مؤلفه اصلی به‌منظور تمایز بین دو گروه نمونه‌های روغن حیوانی خالص و ترکیب‌های مختلف آن با روغن نباتی نشان داده شده است. بر اساس نتایج دو مؤلفه‌ی اصلی PC1 و PC2 به‌ترتیب ۷۰ و ۲۶ درصد نمونه‌های روغن حیوانی گاوی خالص و تقلبی (تقلب روغن نباتی) را از یکدیگر تفکیک و واریانس بین نمونه‌ها در مجموع ۹۶ درصد کل داده‌ها بود. نمودار لودینگ شکل ۵ (a) برای ترکیب روغن حیوانی و روغن نباتی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بر روی مؤلفه اصلی متعلق به حسگرهای ۲ (TGS822)، ۳ (MQ136)، ۴ (MQ9) و ۸ (TGS2620) و ۵ (TGS813) بود و میزان پاسخ حسگرهای شماره ۱ (MQ3)، ۲

(TGS822)، ۴ (MQ9)، ۵ (TGS813)، ۶ (MQ135) و ۸ (TGS2620) نزدیک به هم بود و حسگرهای ۶ (MQ135) و ۷ (TGS2602) تغییراتی جزئی در تشخیص روغن حیوانی گاوی نشان دادند. همچنین حسگرهای ۲ و ۸ با وجود این‌که مقدار ضریب لودینگ بالایی دارند تأثیر تقریباً یکسانی در شناسایی الگو داشته‌اند و می‌توان از هرکدام آن‌ها فقط یکی را در فرآیند تحلیل داده استفاده کرد.

همچنین حسگر ۶ (MQ135) تأثیر کمی در فرآیند تشخیص داشت می‌توان آن را از آرایه حسگری حذف کرد. باید توجه داشت که علی‌رغم این‌که برخی حسگرها که مقدار ضریب لودینگ بالایی دارند اما با توجه به نزدیکی مقادیر آن‌ها به یکدیگر، تأثیر تقریباً یکسانی در شناسایی الگو داشته‌اند و می‌توان از هرکدام آن‌ها فقط یکی را در فرآیند تحلیل داده استفاده کرد.

مارینا و همکاران از سامانه بینی الکترونیک با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تشخیص تقلب در روغن نارگیل استفاده کردند. براساس نتایج، نمونه‌های تقلبی و خالص در دو دسته‌ی مجزا با دقت ۷۴ درصد برای مؤلفه اول و ۱۷ درصد برای مؤلفه دوم و درمجموع کل ۹۱ درصد واریانس داده‌ها را پوشش داد (Marina *et al.*,2010). وریدی و همکاران سامانه بینی الکترونیکی را به‌عنوان روش سریع دسته‌بندی تازگی نمونه‌های گوشت چرخ شده شتر در شرایط بسته‌بندی مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج، نمونه‌های گوشت به دو دسته تازه و فاسد برحسب افزایش تعداد روزهای نگهداری برودتی و شرایط بسته‌بندی قابل دسته‌بندی بود. دو مؤلفه اصلی اول و دوم ۹۰/۵۸ درصد واریانس داده را برای طبقه‌بندی گزارش کردند (Varidi *et al.*, 2018).

نتایج تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA)

برای طبقه‌بندی روغن حیوانی گاوی خالص از نمونه‌های تقلبی از روش تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA) استفاده شد. ماتریس اغتشاش طبقه‌بندی تقلب روغن حیوانی با روغن نباتی در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است نمونه‌های شماره ۱، ۳، ۶ و ۷ که به‌ترتیب مربوط به روغن حیوانی خالص، ۱۰، ۴۰ و ۵۰ درصد تقلب روغن نباتی می‌باشند به‌طور کامل (۱۰۰ درصد) تشخیص داده شده است. در نمونه‌های ۲ و ۴ که به‌ترتیب مربوط به روغن نباتی خالص و مخلوط روغن حیوانی با ۲۰ درصد روغن نباتی هستند، از تعداد ۱۵ نمونه، ۱۳ نمونه به‌درستی تشخیص داده شده و ۲ نمونه به اشتباه نامطلوب شناخته شده است. هم‌چنین در نمونه ۵ (روغن حیوانی مخلوط با ۳۰ درصد روغن نباتی) از ۱۵ نمونه، ۱۴ نمونه با شکل مطلوب و ۱ نمونه با شکل نامطلوب طبقه‌بندی شدند. در نهایت بر اساس جدول ۲، مدل توانسته است با نرخ طبقه‌بندی صحیح ۹۵/۲۴ درصد نمونه‌های روغن حیوانی و روغن نباتی را طبقه‌بندی نماید.

ماتریس اغتشاش تحلیل تفکیک درجه دوم برای طبقه‌بندی مخلوط روغن حیوانی با روغن دنبه در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های ۳، ۵، ۶ و ۷ که به‌ترتیب مربوط به مخلوط ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد روغن دنبه با روغن حیوانی خالص هستند به‌طور ۱۰۰ درصد تشخیص داده شده است. هم‌چنین در نمونه‌های ۱، ۲ و ۴ که به‌ترتیب مربوطه به روغن حیوانی خالص، روغن دنبه خالص و مخلوط ۲۰ درصد روغن دنبه با روغن حیوانی خالص هستند از مجموع ۱۵ نمونه، ۱۴ نمونه به‌درستی و ۱ نمونه به اشتباه تشخیص داده شده است. در نهایت بر اساس جدول ۳، مدل توانسته است نمونه‌های روغن حیوانی و دنبه را با نرخ طبقه‌بندی صحیح ۹۷/۱۵ درصد تفکیک کند. خیرعلی‌پور و پرما برای طبقه‌بندی خیار از تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA) استفاده کردند. براساس نتایج، دقت طبقه‌بندی به روش QDA برابر ۹۳/۱ درصد به‌دست آمد (Khairalipour and Parma, 2015)

جدول ۲- ماتریس اغتشاش طبقه‌بندی درجه دوم روغن حیوانی با روغن نباتی

Table 2- Confusion matrix obtained to identify cow ghee from vegetable oil

نمونه Sample	1	2	3	4	5	6	7
1	15	0	0	0	0	0	0
2	0	13	0	0	0	0	0
3	0	2	15	0	0	0	0
4	0	0	0	13	1	0	0
5	0	0	0	2	14	0	0
6	0	0	0	0	0	15	0
7	0	0	0	0	0	0	15
دقت طبقه‌بندی صحیح Correct classification rate						95.24 %	

جدول ۳- ماتریس اغتشاش طبقه‌بندی درجه دوم روغن حیوانی با روغن دنبه

Table 3- Confusion matrix obtained to identify cow ghee from animal fat

نمونه Sample	1	2	3	4	5	6	7
1	14	1	0	0	0	0	0
2	1	14	0	0	0	0	0
3	0	0	15	0	0	0	0
4	0	0	0	14	0	0	0
5	0	0	0	1	15	0	0
6	0	0	0	0	0	15	0
7	0	0	0	0	0	0	15
دقت طبقه‌بندی صحیح Correct classification rate						97.15	

نتیجه‌گیری

قابلیت یک سامانه ماشین بویایی بر پایه هشت حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOS) با روش شناسایی الگو PCA در تشخیص وجود تقلب در روغن حیوانی گاوی خالص مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل PCA دو مؤلفه‌ی اصلی برای نمونه‌های روغن حیوانی گاوی خالص و ترکیب آن با روغن دنبه و روغن نباتی مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفت که واریانس بین نمونه‌ها در مجموع به‌ترتیب برابر با ۹۷ درصد و ۹۸ درصد بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ماشین بویایی بر پایه حسگرهای MOS در ترکیب با روش‌های شناسایی الگو توانایی تشخیص تقلب روغن‌های نباتی و روغن دنبه را در روغن حیوانی گاوی خالص دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمودار رادار و PCA می‌توان نتیجه گرفت که حسگرهای شماره ۲ (TGS822)، ۳ (MQ136)، ۴ (MQ9) و ۸ (TGS2620) بالاترین مقادیر ضریب لودینگ و حسگر شماره ۶ (MQ135) کم‌ترین مقدار این ضریب را به خود اختصاص دادند. همچنین حسگر MQ135 که مربوط به تشخیص بخار آمونیاک، بنزن، سولفید است در تفکیک روغن حیوانی گاوی، روغن دنبه روغن نباتی عمل‌کردی ندارد. با توجه به نتایج طبقه‌بندی به روش تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA)، دقت طبقه‌بندی صحیح برای مخلوط روغن حیوانی با روغن نباتی و روغن دنبه به‌ترتیب برابر ۹۵/۲۴ و ۹۷/۱۵ درصد به‌دست آمد.

References

1. Amrutha Kala, A. 2013. Detection of possible adulteration in commercial ghee samples using low-resolution gas chromatography triglyceride profiles. International Journal of Dairy Technology 66: 346-351.
2. Bahrami, G. R., H. Rahi, and Z. Pyravi-Vanak. 2000. Change in fatty acids composition of milk products during the traditional Ghee-making process. Journal of Kerman University of Medical Sciences 7: 14-19.
3. Cevoli, C., L. Cerretani, A. Gori, M. Caboni, T. G. Toschi, and A. Fabbri. 2011. Classification of Pecorino cheeses using electronic nose combined with artificial neural network and comparison with GC–MS analysis of volatile compounds. Food Chemistry 129: 1315-1319.
4. Doleman, B. J., and N. S. Lewis. 2001. Comparison of odor detection thresholds and odor discriminablities of a conducting polymer composite electronic nose versus mammalian olfaction. Sensors and Actuators B: Chemical 72: 41-50.
5. Ghasemi-Varnamkhasti, M., S. S. Mohtasebi, M. Siadat, and S. Balasubramanian. 2009. Meat quality assessment by electronic nose (machine olfaction technology). Sensors 9: 6058-6083.
6. Ghasemi-Varnamkhasti, M., S. S. Mohtasebi, M. Siadat, H. Ahmadi, and S. H. Razavi. 2015. From simple classification methods to machine learning for the binary discrimination of beers using electronic nose data. Engineering in Agriculture, Environment and Food 8: 44-51.
7. Ghasemi-Varnamkhasti, M., S. S. Mohtasebi, M. Siadat, J. Lozano, H. Ahmadi, S. H. Razavi, and A. Dicko. 2011. Aging fingerprint characterization of beer using electronic nose. Sensors and Actuators B: Chemical 159: 51-59.
8. Hai, Z., and J. Wang. 2006. Detection of adulteration in camellia seed oil and sesame oil using an electronic nose. European Journal of Lipid Science and Technology 108: 116-124.
9. Heidarbeigi, K., S. S. Mohtasebi, A. Foroughirad, M. Ghasemi-Varnamkhasti, Sh. Rafiee, and K. Rezaei. 2015. Detection of adulteration in saffron samples using electronic nose. International Journal of Food Properties 18: 1391-1401.
10. Jirankalgikar, N. M., and S. De. 2014. Detection of tallow adulteration in cow ghee by derivative spectrophotometry. Journal of Natural Science, Biology, and Medicine 5: 317.

11. Kiani, S., S. Minaei, and M. Ghasemi-Varnamkhasti. 2016. Application of electronic nose systems for assessing quality of medicinal and aromatic plant products: A review. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants 3: 1-9.
12. Khairalipour, K., and A. Prma. 2015 .Using linear (LDA) and quadratic (QDA) discriminant analysis to classify shape features of cucumber fruit. Eighth National Conference on Agricultural Research Findings. (In Farsi).
13. Loutfi, A., S. Coradeschi, G. K. Mani, P. Shankar, and J. B. B. Rayappan. 2015. Electronic noses for food quality: A review. Journal of Food Engineering 144: 103-111.
14. Marina, M., Y. B. Che Man, and I. Amin. 2010. Use of the SAW Sensor Electronic Nose for Detecting the Adulteration of Virgin Coconut Oil with RBD Palm Kernel Olein. Journal of the American Oil Chemists Society. 87: 263-270.
15. Mildner-Szkudlarz, S., and H. H. Jeleń. 2008. The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of the adulteration of olive oil with hazelnut oil. Food Chemistry 110: 751-761.
16. Oh, K., F. B. Hu, J. E. Manson, M. J. Stampfer, and W. C. Willett. 2005. Dietary fat intake and risk of coronary heart disease in women: 20 years of follow-up of the nurses' health study. American Journal of Epidemiology 161: 672-679.
17. Oliveros, M. C. C., J. L. P. Pavón, C. G. A. Pinto, M. E. F. Laespada, B. M. Cordero, and M. Forina. 2002. Electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors as a fast alternative for the detection of adulteration of virgin olive oils. Analytica Chimica Acta 459: 219-228.
18. Pearce, T. C., S. S. Schiffman, H. T. Nagle, and J. W. Gardner. 2003. Handbook of machine olfaction: electronic nose technology. John Wiley & Sons.
19. Sanaeifar, A., S. S. Mohtasebi, M. Ghasemi-Varnamkhasti, and H. Ahmadi. 2015. Designing, manufacturing and evaluating the function of the olfactory machine (electronic nose) based on metal oxide semiconductor (MOS) sensors to monitor banana. Journal of Agricultural Machinery 5 (1): 111-121. (In Farsi).
20. Son, H. J., J. H. Kang, E. J. Hong, C. L. Lim, J. Y. Choi, and B. S. Noh. 2009. Authentication of sesame oil with addition of perilla oil using electronic nose based on mass spectrometry. Korean Journal of Food Science and Technology 41: 609-614.
21. Tajima, A., S. Kawahara, K. Shin, K. Imaizumi, T. Nakamura, and T. Ito. 1995. Is beef tallow really hazardous to health? Nutrition Research 15: 1429-1436.
22. Tohidi, M., M. Ghasemi-Varnamkhasti, V. Ghafarinia, M. Bonyadian, and S. S. Mohtasebi. 2018. Development of a metal oxide semiconductor-based artificial nose as a fast, reliable and non-expensive analytical technique for aroma profiling of milk adulteration. International Dairy Journal 77: 38-46.
23. Varidi, M. J., M. Varidi, M. Vajdi, and A. Sharifpour. 2018. Design, development and application of electronic nose instrument to rapidly detect spoilage of air, vacuum and modified atmosphere packaged camel minced meat. Food Science and Technology: 15(74): 243-254.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 129-139

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۳۹-۱۲۹

Implementation of a Machine Olfaction for the Detection of Adulteration in Cow Ghee

F. Ayari[1], E. Mirzaee- Ghaleh[2*], H. Rabbani[3], K. Heidarbeigi[4]

Received: 20-09-2017
Accepted: 26-05-2018

Introduction

One the most important discussions of the world community is the importance and the role of edible oils in the nutrition and physical health of individuals, especially in the prevention of cardiovascular disease. One of these oils, used in cooking, is cow ghee. Cow ghee should be free of vegetable oil, animal fat, mineral oils, flavored additives and any other external ingredients. It is hard to find a technique that can easily and reliably measure the quality of the oil. So far, no special machine or system has been designed or built to distinguish the pure cow ghee from the adulterated ones. Electronic nose is a new method that has recently been considered by researchers in agriculture especially in the field of food quality. Because of high ability of e-nose system, in this research, this system was used for the detection of pure cow gee from the adulterants ones.

Materials and Methods

An olfactory machine system based on eight MOS sensors was designed to detect pure cow ghee from the adulterated with various proportions of vegetable oil and animal fat. Designed system includes data acquisition system, sensors, sensors chamber, sample box, power supply, connections, electric valves, air pump and air filter. The sensor array was consisted of the 8 MOS sensors that each of them react to specific volatile compounds. These sensors are widely used in olfactory machines because of their high chemical stability, high durability, low response to moisture and affordable prices. These are the most commonly used sensors in electronic nose system. To prepare samples with different percentages of adulteration, animal body fat and refined vegetable oils were added to pure cow ghee. In order to carry out the experiments, the sample was placed in sample box and in the baseline correction step (200 seconds), clean air was passed through the sensors to transmit the response of sensor array to steady state. At the injection step (180 seconds), the sample headspace was transmitted and passed through sensors chamber. Output voltage of each sensor depends on the type of sensor and its sensitivity. At the cleaning step (120 seconds) the clean air was passed through sensors to get the sensor array responsive to a stable state. Also, at this step the pump removed the odor remaining inside the sample container and system was prepared for the next test. The signals obtained from the sensors were recorded and then pre-processed.

Results and Discussion

PCA and QDA analysis were used for detection the differences between pure cow ghee and adulterated ones. The data obtained from the signals processing with fractional method were used as input of PCA. The PCA results showed that the total variance between pure cow ghee and mixture of cow ghee with animal's fat was 97%. Also score plot of cow's ghee and its mixture with vegetable oil showed the total variance of 96% between different samples. Sensors are the main components of an electronic nose system therefore it is necessary to select the best sensors to detect differences between samples. The loading plot was obtained to show the role of sensors in e-nose system and demonstrates that the selected sensors have a high degree of complementarity. Based on confusion matrix obtained from QDA analysis, pure samples were detected from vegetable oil and animal fat samples with correct classification rate of 95.24 and 97.15, respectively.

Conclusions

An eight-sensory olfactory machine system (MOS) was designed to detect pure cow ghee from the presence of vegetable oil and animal fat oil. In PCA analysis, the variance between samples was 97% and 98%, respectively. According to the results the radar graph of PCA analysis, it can be concluded that the sensors No 2 (TGS822), 3(MQ136), 4(MQ9) and 8(TGS2620) have the highest and sensor 6 (MQ135) has the lowest ability in classification. The MQ135 sensor reacts to the detection of ammonia, benzene, and sulfide. In other words these gases did not play important role in separating of cow ghee from other mixed oils.

Keywords: Cow ghee, Olfaction machine, Principal component, Semiconductor sensors

1, 2 and 3- MSc Graduated, Assistant Professor and Associate Professor respectively, Mechanical Engineering of Biosystems Department, Razi University, Kermanshah, Iran
4- Assistant Professor, Mechanical Engineering of Biosystems Department, Ilam University, Ilam, Iran
(*- Corresponding Author Email: e.mirzaee@razi.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 141-153

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۵۳-۱۴۱

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو

زهرا خسروبیگی[۱]، شاهین رفیعی[۲*]، سید سعید محتسبی[۳]، امین نصیری[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان (SLAM) گامی ضروری در خودکار نمودن عملیات‌های کشاورزی و در نتیجه اعمال کشاورزی دقیق می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از یک دوربین استریو به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از چارچوب راس پرداخته شد. قبل از تهیه تصاویر استریو از محیط گلخانه دوربین کالیبره شده و مسیر حرکت دوربین در گلخانه طراحی و اعمال شد. مسیر طراحی شده دارای طول ۳۲/۷ متر و تعداد تصاویر گرفته شده در این مسیر ۱۵۰ جفت تصویر استریو بود. جهت ارزیابی الگوریتم طراحی شده، میزان خطای مکان‌های تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم با مکان‌های واقعی دوربین استریو با استفاده از فاصله اقلیدسی محاسبه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم معرفی شده دارای میانگین خطای مکان‌یابی ۰/۰۶۷۹۴۱۲ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۵۶۴۳۱ متر و ریشه میانگین مربع خطای ۰/۰۰۷۵۵۶۹ متر برای مسافت ۳۲/۷ متری پیموده شده توسط دوربین استریو می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بینایی استریو، راس، گلخانه، مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان (SLAM)

مقدمه

به‌کارگیری کشاورزی دقیق در تولید محصولات کشاورزی امری غیر قابل‌اجتناب در افزایش راندمان این محصولات می‌باشد. اعمال کشاورزی دقیق نیازمند به‌کارگیری نیروی کارگری فراوان است. همچنین به علت خطرپذیر بودن اغلب عملیات‌های کشاورزی، انجام مستقیم آن توسط انسان توصیه نمی‌شود. به همین دلیل، خودکار نمودن عملیات‌های کشاورزی امری ضروری است. اولین گام در خودکار نمودن عملیات‌های کشاورزی، هدایت خودکار وسیله نقلیه می‌باشد. این امر در صورتی میسر می‌شود که وسیله نقلیه در یک محیط ناشناخته به شناسایی آن محیط پرداخته و در عین حال مکان خود را در این محیط پیدا کند. به عبارتی، باید قابلیت تهیه نقشه از محیط و در عین حال مکان‌یابی در این محیط را داشته باشد (li *et al.*, 2008). این مهم به‌وسیله مسئله مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان[۵] (SLAM) قابل حل می‌باشد (Thrun *et al.*, 1998).

مسئله SLAM یک فرآیند تخمین بازگشتی بوده که با استفاده از آن می‌توان میزان خطا در نقشه و مکان‌یابی ربات را به حداقل رساند (Auta Cheein *et al.*, 2011). بر همین اساس الگوریتم‌های متنوعی جهت حل این مسئله گسترش پیدا کرده است که تنوع این الگوریتم‌ها به علت تنوع در به‌کارگیری حس‌گرهای مختلف، تنوع در نوع محیط و نوع نقشه تهیه شده از این محیط‌ها می‌باشد (Leonard and Durrant-Whyte, 1991; Montemerlo *et al.*, 2002; Eliazar, 2003; Estrada *et al.*, 2005; Eliazar and Parr, 2004).

اما در حالت کلی الگوریتم‌های SLAM به دو دسته برخط[۶] و کامل[۷] طبقه‌بندی می‌شوند (Thrun *et al.*, 1998). در روش SLAM برخط، مکان ربات (x_t) در هر گام (t) و نقشه محیط (m) با به‌کارگیری مشاهدات محیط ($z_{1:t}$) و داده‌های کنترلی ربات ($u_{1:t}$) از ابتدا حرکت تا گام t و با استفاده از تابع احتمال نشان داده شده در رابطه (۱) تخمین زده می‌شود (Thrun *et al.*, 2005):

$$p\,(x_t, m | z_{1:t}, u_{1:t}) \qquad (۱)$$

فیلتر کالمن و فیلتر کالمن توسعه‌یافته از جمله الگوریتم‌هایی جهت حل مسئله SLAM برخط می‌باشند (Leonard and Durrant-Whyte, 1991). این فیلترها با استفاده از توزیع گوسی به تخمین موقعیت ربات و به‌روزرسانی نقشه می‌پردازند. از معایب این فیلترها پیچیدگی فرآیند به‌روزرسانی و عملیات خطی‌سازی برای فرآیندهای غیرخطی می‌باشند (Thrun *et al.*, 2005). جهت بر طرف کردن این معایب الگوریتم Fast SLAM بر مبنای فیلتر ذره‌ای

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۴- دانشجوی سابق دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Shahinrafiee@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.78256

5- Simultaneous Localization and Mapping
6- Online-SLAM
7- Full-SLAM

Rao-Blackwellized توسعه داده شد. در این الگوریتم از فیلتر ذره‌ای جهت تخمین مکان ربات و از فیلتر کالمن توسعه‌یافته جهت به‌روزرسانی نقشه محیط استفاده شده است (Montemerlo *et al.*, 2002).

بر خلاف SLAM برخط، SLAM کامل مسیر حرکت کلی ربات ($x_{1:t}$) را تخمین می‌زند. Graph-SLAM یکی از الگوریتم موجود جهت حل مسأله SLAM کامل می‌باشد. ساختار کلی Graph-SLAM به شکلی است که از یک گراف با گره‌ها و یال‌ها تشکیل شده که گره‌ها نمایان‌گر مکان ربات و یال‌ها محدودیت‌های اعمال شده بین مکان‌ها را نمایش می‌دهند (Grisetti *et al.*, 2010). ادومتری[1] و لوپ کلوزر[2] از جمله محدودیت‌هایی هستند که در یال‌ها به شکل ماتریس تبدیل (دوران و انتقال) و ماتریس کواریانس نمایان می‌شوند. الگوریتم Graph-SLAM با اعمال این محدودیت‌ها و با استفاده از یک بهینه‌کننده سراسری، مسیر حرکت کلی ربات و همچنین نقشه محیط را بهینه می‌کند (Pierzchała *et al.*, 2018).

در حل مسئله SLAM الگوریتم‌های متنوعی براساس نوع حس‌گر به‌کار رفته توسعه پیدا کرده‌اند. لیزر اسکنر رایج‌ترین حس‌گری است که در حل این مسئله استفاده می‌شود. از مهم‌ترین این الگوریتم‌ها که با استفاده از لیزر اسکنر توسعه پیدا کرده‌اند Hector mapping و Gmapping می‌باشند. Gmapping یک روش استاندارد بوده که بر پایه فیلتر ذره‌ای Rao-Blackwellised به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان می‌پردازد. هدف از این روش کاهش تعداد ذره‌ها و در عین حال افزایش میزان دقت الگوریتم می‌باشد. این الگوریتم با استفاده از داده‌های قبلی لیزر اسکنر منجر به کاهش عدم قطعیت مکان‌یابی شده و در نهایت مکان دقیق ربات را در محیط برآورد می‌کند (Grisetti *et al.*, 2007; Grisetti *et al.*, 2005). Hector mapping یک روش بهینه‌شده برای راهروهای باریک و محیط‌های پیچیده می‌باشد. این الگوریتم نیازمند داده‌های اضافی براساس ادومتری[3] نبوده و بدون این داده‌ها هم دارای دقت کافی می‌باشد. این الگوریتم برای تعریف مکان فعلی ربات از روش انطباق–اسکن و فیلتر نیوتن–گوسی براساس توزیع ذره‌ها استفاده می‌کند. همچنین این الگوریتم قابلیت تولید نقشه‌های چند لایه را دارد (Kohlbrecher *et al.*, 2013; Kohlbrecher *et al.*, 2011).

به‌کارگیری لیزر اسکنر دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که از جمله می‌توان به دقت فضایی کم، زمان داده‌برداری زیاد و قیمت بالای آن اشاره کرد. حل مسئله SLAM با استفاده از حس‌گرهای بینایی[4] (VSLAM) (تک دوربین، یک دوربین استریو و یا یک دوربین RGB-D) مشکلات موجود در رابطه با به‌کارگیری لیزر اسکنر را مرتفع نموده است. در VSLAM مکان‌یابی ربات با استفاده از شناخت ویژگی‌های محیط به‌دست می‌آید (Diebel *et al.*, 2004). به‌کارگیری تک دوربین به علت عدم تخمین موقعیت سه‌بعدی ویژگی‌های محیط دارای کمبود می‌باشد (Kim *et al.*, 2005). جهت حل این مشکل می‌توان از دوربین استریو استفاده نمود. بینایی استریو به معنای توانایی استخراج عمق براساس تحلیل دو تصویر گرفته شده از زوایای مختلف یک صحنه می‌باشد. مزیت اصلی بینایی استریو نسبت به بینایی یک چشمی معمولی توانایی آن در شناسایی فاصله بین اشیای واقعی و دوربین است. دوربین یک چشمی تصویر مسطحی ایجاد می‌کند که در آن هر پیکسل نتیجه افکنش دوبعدی جهان سه‌بعدی است. به عبارتی، سامانه استریو، یک جفت از تصاویر دیجیتالی را که به‌طور هم‌زمان به‌وسیله یک دوربین استریو به‌دست آمده‌اند به یکدیگر ارتباط داده و اشیای مشابه در هر دو تصویر را شناسایی کرده و تفاوت موقعیت آن‌ها را به‌صورت پیکسل اندازه‌گیری می‌کند. این تفاوت همراه با سایر پارامترها، سامانه را قادر به بازسازی صحنه واقعی یک تصویر مجازی سه‌بعدی می‌نماید (Mousazadeh and Javan bakht, 2015). رایج‌ترین الگوریتم SLAM که براساس حس‌گرهای بینایی سه‌بعدی توسعه پیدا کرده است، RTAB-Map می‌باشد. RTAB-Map یک روش گراف–مبنا بوده که قابلیت تشخیص لوپ کلوزر را دارا می‌باشد. به عبارت دیگر در این الگوریتم بعد از تشخیص لوپ‌کلوزر، محدودیت جدید به گراف اضافه شده و در نهایت نقشه تهیه شده با استفاده از یک بهینه‌کننده گراف اصلاح شده و خطاها موجود در آن را به حداقل می‌رساند. این الگوریتم قادر است تنها با استفاده از یک دوربین استریو نقشه‌ی جامعی از محیط تهیه کند.

در سال‌های اخیر استفاده از مسئله مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان جهت ناوبری خودکار در محیط‌های کشاورزی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۱، الگوریتمی بر مبنای فیلتر اطلاعات توسعه‌یافته[5] جهت ناوبری خودکار در باغ زیتون توسعه داده شد. جهت طراحی الگوریتم از اطلاعات یک دوربین و یک لیزر اسکنر استفاده شد. الگوریتم براساس تشخیص ساقه‌های زیتون در تصاویر گرفته شده با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان[6] عمل می‌کرد. همچنین از یک روش بهینه‌کننده سراسری جهت کاهش خطاهای الگوریتم استفاده شد (Auta Cheein *et al.*, 2011). در پژوهشی دیگر، با استفاده از یک دوربین و لیزر اسکنر الگوریتمی جهت مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان ربات در محیط‌های کشاورزی طراحی شد. دامنه فرکانس و همبستگی برای الگوریتم طراحی شده

1- Odometry
2- Loop clouser
3- Odometry
4- Vision-based SLAM (V SLAM)
5- EIF-SLAM
6- Support Vector Machine (SVM)

استفاده شد. میزان جابه‌جایی ربات با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی و دوران دو گام متوالی محاسبه شد (Lepej and Rakun, 2016). در سال ۲۰۱۶، از الگوریتم مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در یک ربات تک چشمی جهت برداشت فلفل دلمه‌ای استفاده شد. جهت برآورد این هدف از الگوریتم LSD-SLAM استفاده شد که این الگوریتم با استفاده از یک دوربین به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان ربات می‌پرداخت (Barth *et al.*, 2016).

به دلیل محدود بودن پژوهش‌های انجام شده در زمینه مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط‌های کشاورزی، هدف از این پژوهش، مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو و در نتیجه ایجاد نقشه سه‌بعدی و دوبعدی از این محیط می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سیستم تصویربرداری

سیستم تصویربرداری مورد استفاده در این پژوهش از قسمت‌های اصلی دوربین استریو، پایه دوربین و کامپیوتر تشکیل شده بود (شکل ۱). دوربین استریو توسعه داده شده به‌وسیله نصیری و همکاران جهت تصویربرداری استریو از گلخانه مورد استفاده قرار گرفت (Nasiri *et al.*, 2016). دوربین استریو شامل دوربین‌ها و قاب دوربین بود. دوربین‌های مورد استفاده در این سیستم شامل دو وب‌کم ساخت شرکت ماکروسافت[1] با رزلوشن تصویربرداری ۵۴۴×۹۶۰ پیکسل بودند که از طریق USB2 به کامپیوتر متصل می‌شدند.

شکل ۱– سیستم تصویربرداری توسعه داده شده

Fig.1. The image acquisition system

برای ساخت قاب دوربین استریو به‌طوری‌که امکان انتخاب خط‌مبنای متفاوت بین دو دوربین وجود داشته باشد، از یک شمش آلومینیومی به ابعاد ۳۰×۷×۵ سانتی‌متر استفاده نمودند. در طول شمش آلومینیومی متناسب با ابعاد دوربین، شیارهایی به فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ایجاد شده بود. انتخاب خط‌مبنای مناسب یک فرآیند بهینه‌سازی بین دقت و انطباق می‌باشد به همین دلیل با آزمون و خطا فاصله دو دوربین ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Nasiri, 2017). جهت تصویربرداری استریو، دوربین استریو توسعه داده شده بر روی پایه دوربین با ارتفاع تقریبی ۷۵ سانتی‌متر قرار داده شده و به کامپیوتر متصل شد و جهت تهیه تصاویر، به داخل محیط گلخانه انتقال یافت.

طراحی الگوریتم

در این تحقیق جهت مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان از محیط گلخانه با استفاده از بینایی استریو، از چارچوب راس[2] در محیط اوبونتو[3] استفاده شد. راس شامل کتابخانه‌ها و ابزارهای مختلف از جمله بسته‌ها[4] و نرم‌افزارهای متن باز[5] جهت به‌کارگیری در زمینه‌های مختلف رباتیک می‌باشد (Lepej and Rakun, 2016). همچنین راس دارای ساختار شبکه‌ای بوده که باعث ارتباط بین قسمت‌های مختلف الگوریتم به‌وسیله گره‌ها[6] می‌شود. شکل ۲ طرح کلی الگوریتم طراحی شده، گره‌های به‌کار برده شده و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر را نمایش می‌دهد.

کالیبراسیون دوربین

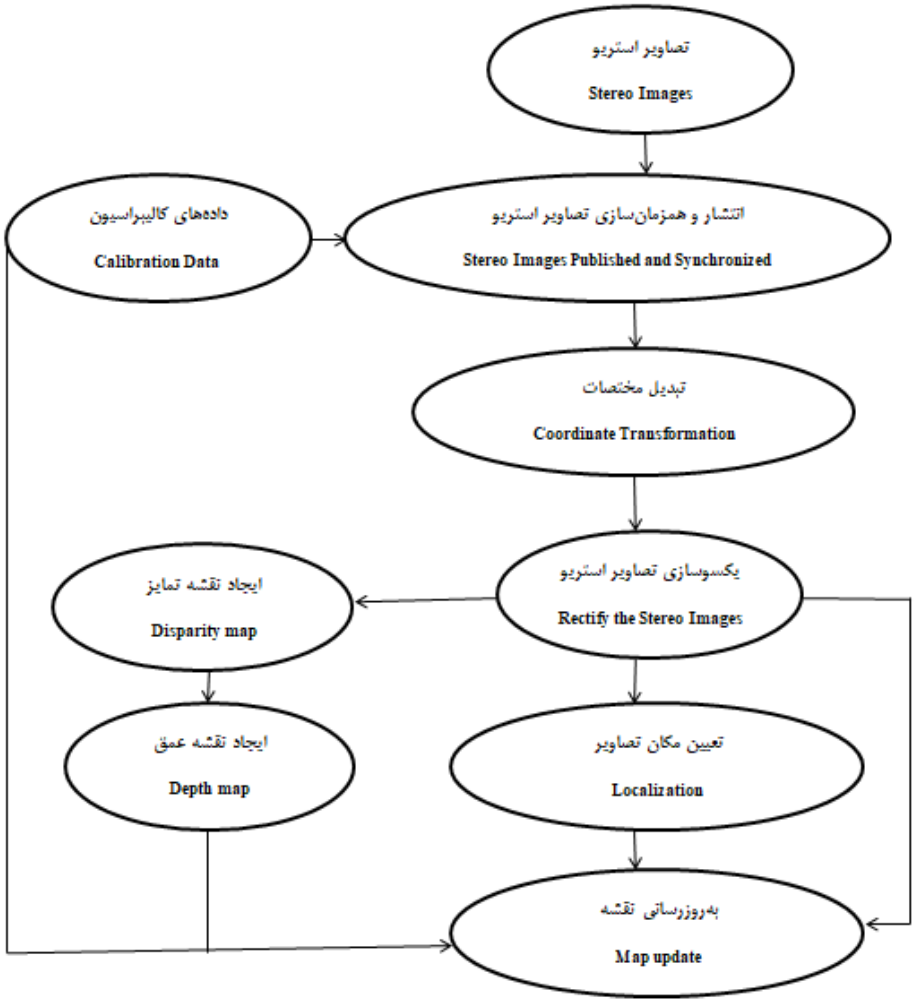
در مرحله اول قبل از اجرای الگوریتم، نیاز است که دوربین استریو کالیبره شود. دقت بازیابی سه‌بعدی در فرآیند بینایی استریو تحت تاثیر پارامترهای متعددی است که عمدتاً در طی فرآیند کالیبراسیون تعیین می‌گردند (Nasiri *et al.*, 2016). در این تحقیق از روش ارائه شده توسط ژنگ[7] برای کالیبراسیون دوربین‌ها استفاده شد. در این روش اغتشاشات ناشی از نقص لنز دوربین برای مدل دوربین در نظر گرفته می‌شود (Zhang, 1999).

سیستم تصویربرداری بعد از انتقال به گلخانه و قبل از تهیه تصاویر استریو از این محیط، کالیبره شد. برای این منظور از یک صفحه شطرنجی ۶×۷ با ابعاد ۳۳ میلی‌متر برای هر مربع به‌عنوان الگوی کالیبراسیون استفاده شد. تصویربرداری از الگو در فواصل و جهت‌های مختلف نسبت به دوربین انجام گرفت. در طی فرآیند کالیبراسیون محل تقاطع مربع‌های سیاه و سفید (گوشه‌ها) به‌عنوان نقاط کنترلی به کمک الگوریتم‌های گوشه‌یابی با دقت زیر پیکسل تعیین، سپس با تخمین مختصات سه‌بعدی نقاط انتخاب شده و حل دستگاه معادلات کالیبراسیون، پارامترهای داخلی، خارجی و ضرایب

1- Microsoft lifecam studio webcam

2- Robot Operating System (ROS)
3- Ubuntu 14.04 LTS
4- Package
5- Open source software
6- Nodes
7- Zhang

اعوجاج استخراج شد (Zhang, 1999). برای ارزیابی دقت کالیبراسیون از خطای اپیپولار و پارامترهای خارجی استخراج شده از نتیجه کالیبراسیون، استفاده شد (Camera-calibration_ros software package).



شکل ۲- طرح کلی الگوریتم طراحی شده

Fig.2. Design of the algorithm

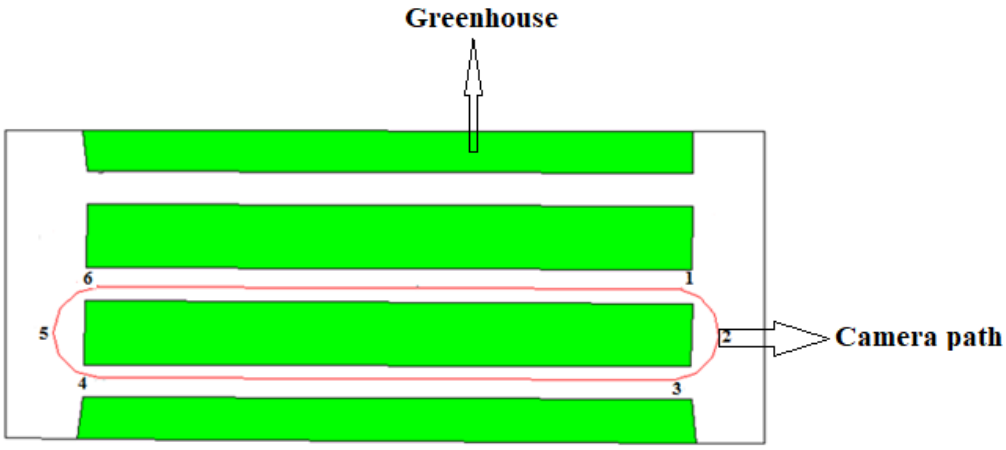
تصاویر استریو

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان برای یک قسمت از گلخانه‌ای به ابعاد تقریبی ۶/۵×۱۹ متر و دارای ۴ بستر کشت مستطیلی واقع در شهر اراک انجام شد (شکل ۳). بسترهای کشت شامل قلمه‌های گونه‌های مختلف گل رز، شمشاد و همچنین دارای مکان‌های کشت نشده بودند که گلدان‌هایی در این مکان‌ها قرار داده شد.

قبل از ثبت تصاویر استریو در محیط گلخانه، مسیر حرکت دوربین در این محیط طراحی شد. برای این منظور یک مسیر در محیط گلخانه در نظر گرفته شد و نقاطی در این مسیر مشخص شد. با استفاده از دوربین نقشه برداری توتال استیشن مدل لایکا[1] و تعیین مختصات این نقاط، مسیر حرکت دوربین استریو طراحی شد. مسیر طراحی شده شامل مسیرهای مستقیم و منحنی بوده و طول تقریبی آن ۳۲/۷ متر بود. شکل ۴ نقشه شماتیک گلخانه و همچنین مسیر طراحی شده جهت حرکت دوربین استریو را با خطوط قرمز نمایش می‌دهد. در نهایت مسیر طراحی شده در گلخانه جهت حرکت دوربین استریو در مسیرهای مستقیم با گام ۱۰ سانتی‌متر و در مسیرهای منحنی با گام ۶ درجه پیاده‌سازی شد. بعد از فرآیند کالیبراسیون، سیستم تصویربرداری در مسیر طراحی شده در گلخانه در گام‌های مشخص به‌صورت دستی جابه‌جا شده و بعد از هر جابه‌جایی در حالی که پایه دوربین در موقعیت خود ثابت بود تصاویر استریو تهیه شدند.

1- Leica, TC-805

شکل ۳– گلخانه مورد پژوهش
Fig.3. Greenhouse research



شکل ٤– نقشه شماتیک کل گلخانه و مسیر طراحی شده جهت حرکت سیستم تصویربرداری در قسمت مشخص شده
Fig.4. Greenhouse schematic map and the path of the image acquisition system in the specific section

انتشار و هم‌زمان‌سازی تصاویر استریو

جهت استفاده تصاویر به‌وسیله چارچوب راس نیاز است که تصاویر با فرمت مشخص شده در این چارچوب ارسال گردد. همچنین نیاز است که تصاویر راست و چپ گرفته شده به‌وسیله دوربین استریو بعد از انتشار هم‌زمان‌سازی شود. به همین منظور، گره‌ای جهت انتشار و هم‌زمان‌سازی تصاویر استریو در نظر گرفته شد. با استفاده از این گره می‌توان تصاویر استریو را با نرخ مشخصی به‌صورت هم‌زمان منتشر کرد. در این تحقیق، تصاویر استریو با نرخ ۱ هرتز انتشار و هم‌زمان‌سازی شدند.

تبدیل مختصات

تصاویر استریو منتشر شده دارای مختصات دوربین می‌باشند. مختصات دوربین به صورتی است که محور X به سمت راست، محور Y به سمت پایین و محور Z به سمت جلو می‌باشد (Bradski and Kaeler, 2008). جهت ایجاد نقشه از محیط نیاز است که محور مختصات تصاویر منتشر شده به محور مختصات جهانی تبدیل شود به‌طوری‌که محور X به سمت جلو، محور Y به سمت چپ و محور Z به سمت بالا باشد. به همین منظور گره‌ای جهت تبدیل محورهای مختصات تصاویر استفاده می‌شود. این گره با در نظر گرفتن نقطه شروع حرکت دوربین سمت چپ به‌عنوان مبدأ مختصات جهانی، تبدیل مختصات جهانی تصاویر منتشر شده را انجام می‌دهد.

یکسوسازی تصاویر استریو

جهت تعیین مکان تصاویر و تهیه نقشه از محیط نیاز است که تصاویر استریو یکسوسازی شود. در این تحقیق از روش ارائه شده توسط بوگت برای یکسوسازی تصاویر استفاده شده است. این الگوریتم از پارامترهای انتقال و دوران دو دوربین تنظیم شده برای یکسوسازی استفاده می‌کند (Bradski and Kaeler, 2008).

تعیین مکان تصاویر

تخمین میزان جابه‌جایی دوربین از جمله ملزومات هر سامانه دیداری متحرک به حساب می‌آید و در هر مرحله به دانستن موقعیت نسبی قاب کنونی دوربین نسبت به قاب پیشین یا قاب مرجع ثابت نیاز می‌باشد. در این تحقیق از مکان‌یابی دیداری جهت تعیین مکان دوربین استفاده شد. ایده اصلی در این روش، تخمین میزان حرکت از طریق دنبال کردن ویژگی‌های بصری مشخص در دنباله‌ای از تصاویر است (Milella *et al.*, 2009). به عبارتی می‌توان بیان کرد که هدف مکان‌یابی دیداری برآورد میزان رابطه دو تصویر متوالی و در نهایت ارتباط این رابطه با مبدأ مختصات مرجع می‌باشد. مکان‌یابی دیداری با استفاده از بینایی استریو شامل سه مرحله اصلی، استخراج و توصیف ویژگی‌های محیط، انطباق و ردیابی ویژگی‌ها در تصاویر استریو و تخمین میزان حرکت دوربین می‌باشد. روش‌های متنوعی جهت استخراج و توصیف نقاط ویژگی وجود دارد که در این تحقیق به علت پایین بودن نرخ انتشار تصاویر از روش ویژگی‌های مقاوم پر سرعت (سورف)[1] جهت استخراج و توصیف ویژگی‌های محیط استفاده شد (Bay *et al.*, 2008). همچنین به علت تصویربرداری از محیط گلخانه در شرایط نور طبیعی و تغییرات شرایط روشنایی محیط گلخانه، باید از روشی که نسبت به این تغییرات مقاوم بوده استفاده نمود. به همین علت، جهت تخمین میزان حرکت دوربین از ویژگی‌های مقاوم پر سرعت استفاده شد که مستقل از انتقال، چرخش و مقیاس هستند و تا حد امکان نسبت به تغییرات شدت روشنایی تصاویر در محیط گلخانه و نویز مقاوم می‌باشند. در مرحله بعد، انطباق تصاویر استریو با استفاده از روش تطبیق متقارن[2] انجام شد. در این روش از معیار نزدیک‌ترین همسایه[3] در دو جهت استفاده شده است (Langaniere, 2011). برای ردیابی ویژگی‌ها در تصاویر استریو متوالی نیز مشابه تطابق ویژگی‌های متناظر در جفت تصویر استریو از روش تعیین یک حد آستانه (در این تحقیق ۰/۸ انتخاب شده است) و نسبت نزدیکترین همسایه استفاده شد.

تخمین میزان حرکت (جابه‌جایی و دوران) دوربین استریو در دو مرحله تخمین میزان حرکت قاب به قاب تصاویر و تبدیل به مختصات جهانی انجام می‌شود. جهت تخمین میزان جابه‌جایی و دوران قاب به قاب تصاویر از روش 3D-2D استفاده شد (Longuet-Higgins, 1987; Nister *et al.*, 2004; Zhang, 1998). در این روش، موقعیت دوربین در قاب جدید براساس نقاط سه‌بعدی صحنه و ویژگی‌های دوبعدی ردیابی شده در تصویر جدید محاسبه می‌شود. مزیت این روش کاهش خطای بازافکنش می‌باشد که همین امر باعث افزایش دقت تخمین می‌شود (Nister, 2003). بعد از تخمین بردار جابه‌جایی و ماتریس دوران قاب به قاب، موقعیت قاب (دوربین) در لحظه جاری نسبت به مبدأ توسط رابطه (۲) تعیین می‌شود (Craig, 2005). در تحقیق جاری، نقطه شروع حرکت دوربین سمت چپ به‌عنوان مبدأ جهانی در نظر گرفته شده است.

$$
\begin{aligned}
{}^{t}_{0}frame &= {}^{t-1}_{0}frame \times {}^{t}_{t-1}frame \\
{}^{t}_{t-1}frame &= \begin{bmatrix} R_{3\times3} & T_{3\times3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{4\times4}
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

در رابطه (۲)، ${}^{t}_{0}$frame، موقعیت دوربین در لحظه جاری نسبت به مبدأ جهانی مختصات، T بردار جابه‌جایی و R ماتریس دوران فریم در لحظه t نسبت به فریم در لحظه t-1 می‌باشند که از تخمین میزان حرکت قاب به قاب تصاویر به‌دست آمده است.

به‌روزرسانی نقشه

با استفاده از الگوریتم SLAM نقشه محلی محیط در هر گام به‌دست آمده و با داشتن مکان تصاویر در هر گام، نقشه محیط به‌روزرسانی می‌شود. در این تحقیق از الگوریتم RTAB-Map جهت تحقق این عمل استفاده شده است (Labbé and Michaud, 2011; Labbé and Michaud, 2013; Labbé and Michaud, 2014). تولید نقشه محلی با استفاده از الگوریتم RTAB-Map و دست‌یابی به مختصات نقاط محیط و به‌دست آوردن مدل سه‌بعدی آن، با استفاده از انطباق تصاویر راست و چپ، به‌دست آوردن تصویر ناهم‌خوانی (نقشه تمایز[4]) و در نهایت بازیابی مدل سه‌بعدی محیط از این نقشه انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای انجام مرحله انطباق در این الگوریتم پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق از الگوریتم تطابق بلوکی[5] استفاده شد. از ویژگی‌های منحصر به فرد این روش سرعت بالای آن در انطباق تصاویر و استخراج مدل سه‌بعدی می‌باشد (Bradski and Kaeler, 2008). با در اختیار داشتن نقشه تمایز و اطلاعات مربوط به دوربین‌ها و هندسه سامانه تصویربرداری، مختصات سه‌بعدی اجزای محیط با استفاده از روش مثلثاتی تعیین می‌شود (Cyganek and Siebert, 2009).

در نهایت با در اختیار داشتن مکان تصویر در هر گام و همچنین نقشه محلی، با استفاده از الگوریتم RTAB-Map دو نوع نقشه‌ی سه‌بعدی متراکم[6] و شبکه اشغال[7] از محیط گلخانه استخراج شد. نقشه سه‌بعدی متراکم یک نقشه نقاط ابری[8] از محیط بوده که شامل اطلاعات مختصات سه‌بعدی نقاط محیط و سایر ویژگی‌های این نقاط از جمله ویژگی رنگی (RGB) آن‌ها می‌باشد (Audras *et al.*, 2011). در نقشه‌های شبکه اشغال، محیط توسط یک شبکه گسسته

1- Speeded-Up Robust Features (SURF)
2- Symmetrical matching scheme
3- K-nearest neighbor

4- Disparity map
5- Block matching
6- Dense 3D map
7- Occupancy Grid maps
8- Point cloud

نمایش داده می‌شود که در آن هر سلول (یا پیکسل در تصویر)، توسط یک مانع اشغال شده و یا این‌که خالی بوده و فضای آزاد به حساب می‌آید (Borenstein and Koren, 1991; Elfes, 1990). از مهم‌ترین امتیازات این نوع نقشه استفاده آن در طراحی مسیر و اکتشاف محیط می‌باشد که اطلاعات احتمالاتی مربوط به سلول‌ها، پیچیدگی طراحی مسیر را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، الگوریتم RTAB-Map یک روش گراف-مبنا بوده که جهت کاهش خطای مکان‌یابی و نقشه نیازمند تشخیص لوپ‌کلوزر می‌باشد. به همین دلیل مسیر طراحی شده در محیط گلخانه، یک مسیر بسته در نظر گرفته شده است تا در انتهایی مسیر لوپ‌کلوزر مورد نظر ایجاد شود (شکل ۴). جهت بهینه‌کردن گراف و کاهش خطاهای مکان‌یابی و نقشه، از روش تارو[1] (TORO) استفاده شد. این روش که براساس الگوریتم اولسان[2] توسعه پیدا کرده است با به‌کارگیری یک پارامتر درختی از گره‌ها در گراف باعث بهبود کافی در عملکرد ربات شده و آن را قادر به پیروی از توپولوژی‌های شبکه‌های نامنظم می‌نماید (Grisetti *et al.*, 2007).

به منظور ایجاد نقشه از محیط گلخانه، تصاویر استریو با گام‌های ۳۰ سانتی‌متر برای مسیرهای مستقیم و ۶ درجه برای مسیرهای منحنی ثبت شد. برای محاسبه خطا در تخمین موقعیت دوربین، مکان‌های دوربین استریو که در هر گام به‌صورت دستی اندازه‌گیری شده بود با مکان‌های تخمین زده شده توسط الگوریتم با محاسبه فاصله اقلیدسی مقایسه شد (Nasiri *et al.*, 2016; Shalal *et al.*, 2015; Nasiri, 2017). با توجه به ثابت بودن ارتفاع دوربین استریو، خطای مکان‌ها با محاسبه فاصله اقلیدسی (D_E) بین نقاط تخمین زده شده (X_m, Y_m) و نقاط واقعی (X_a, Y_a) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Shalal *et al.*, 2015):

$$D_E = \sqrt{(x_a - x_m)^2 + (Y_a - Y_m)^2} \qquad (۳)$$

همچنین میزان خطای دوران دوربین استریو حول سه محور X، Y و Z با محاسبه میزان انحراف بین دوران‌های واقعی و دوران‌های تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم طراحی شده محاسبه شد (Nasiri, 2017).

نتایج و بحث

نتیجه حاصل از دقت فرآیند کالیبراسیون در شکل ۵ نمایش داده شده است. ستون سمت راست شکل ۵ دقت اندازه‌گیری را نمایش می‌دهد. به عبارتی، میزان خطای اپیپولار مهم‌ترین شاخص جهت تشخیص یک فرآیند کالیبراسیون موفق می‌باشد. با توجه به شکل ۵، میزان خطای اپیپولار در سمت راست تصویر نمایش داده شده که برابر ۰/۱۵ پیکسل می‌باشد. خطای اپیپولار زیر ۰/۲۵ پیکسل نشان‌دهنده دقت بالای نتیجه کالیبراسیون است (Camera-calibration_ros software package). همچنین نتایج حاصل از فرآیند کالیبراسیون در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج پارامترهای داخلی و خارجی دوربین استریو را دربرمی‌گیرند. با توجه به جدول ۱، ماتریس دوربین در برگیرنده پارامترهای داخلی دوربین که شامل فاصله کانونی، نقطه اساسی هستند، می‌باشد. دوربین‌های استفاده شده در بینایی استریو باید دارای فاصله کانونی و نقطه اساسی یکسانی باشند (Bradski and Kaeler, 2008). با توجه به جدول ۱، مقادیر فاصله کانونی دوربین‌ها، (۷۱۸/۹، ۷۲۳/۱۷) برای دوربین سمت چپ و (۷۱۵/۹۲، ۷۱۹/۴۲) برای دوربین سمت راست، و همچنین مقادیر نقطه اساسی، (۳۰۰/۹۷، ۴۸۸/۷۴) برای دوربین سمت چپ و (۲۹۲/۲۸، ۴۹۰/۵۶) برای دوربین سمت راست می‌باشند. با توجه به نزدیکی این مقادیر به یکدیگر، نتیجه می‌شود که دوربین‌های انتخاب شده برای توسعه دوربین استریو مناسب می‌باشند.

ماتریس اعوجاج، اعوجاج‌های شعاعی و مماسی دوربین را در برمی‌گیرد (Bradski and Kaeler, 2008). طبق جدول ۱، اعوجاج شعاعی دارای مقادیر ۰/۰۰۱۰۹۶، ۰/۰۰۷۹۵۹- و ۰ برای دوربین سمت چپ و ۰/۰۰۵۴۲۰، ۰/۰۳۸۲۲۶- و۰ برای دوربین سمت راست می‌باشد. همچنین اعوجاج مماسی دارای مقادیر ۰/۰۰۸۲۶۹ و ۰/۰۰۳۷۷۹ برای دوربین سمت چپ و ۰/۰۰۶۰۶۵ و ۰/۰۰۰۵۲۷ برای دوربین سمت راست می‌باشد.

پارامترهای خارجی که شامل ماتریس دوران تصویر دوربین سمت راست نسبت به تصویر دوربین سمت چپ می‌باشند در ماتریس یکسوسازی نمایش داده شده است. به‌عبارتی، ماتریس یکسوسازی میزان دوران‌های لازم در راستای محورهای X، Y و Z، جهت هم‌صفحه شده تصاویر چپ و راست می‌باشند (Bradski and Kaeler, 2008).

ماتریس افکنش که دربرگیرنده پارامترهای داخلی و خارجی دوربین می‌باشد، میزان جابه‌جایی دوربین سمت راست نسبت به دوربین سمت چپ را نمایش می‌دهد (Bradski and Kaeler, 2008). با توجه به این‌که خط‌مبنای دو دوربین در این تحقیق ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، بردار جابه‌جایی باید برای دوربین سمت راست میزان تقریبی ۱۰ سانتی‌متر در راستای محور X و مقدار صفر در راستای محورهای Y و Z را داشته باشد و همچنین برای دوربین چپ مقدار صفر در راستای سه محور مختصات را نشان دهد. طبق جدول ۱، میزان جابه‌جایی برای دوربین سمت چپ در راستای محورهای X، Y و Z را صفر و برای دوربین سمت راست در راستای محور X مقدار تقریبی ۹/۷۵ و برای محورهای Y و Z مقدار صفر را دربردارد که این نشان‌دهنده دقت کالیبراسیون می‌باشد (Camera-calibration_ros software package).

1- Tree-based network Optimizer
2- Olson

شکل ۵- نتیجه کالیبراسیون دوربین استریو

Fig. 5. Result of stereo camera calibration

جدول ۱- نتایج کالیبراسیون دوربین استریو

Table 1- Result of the stereo camera calibration

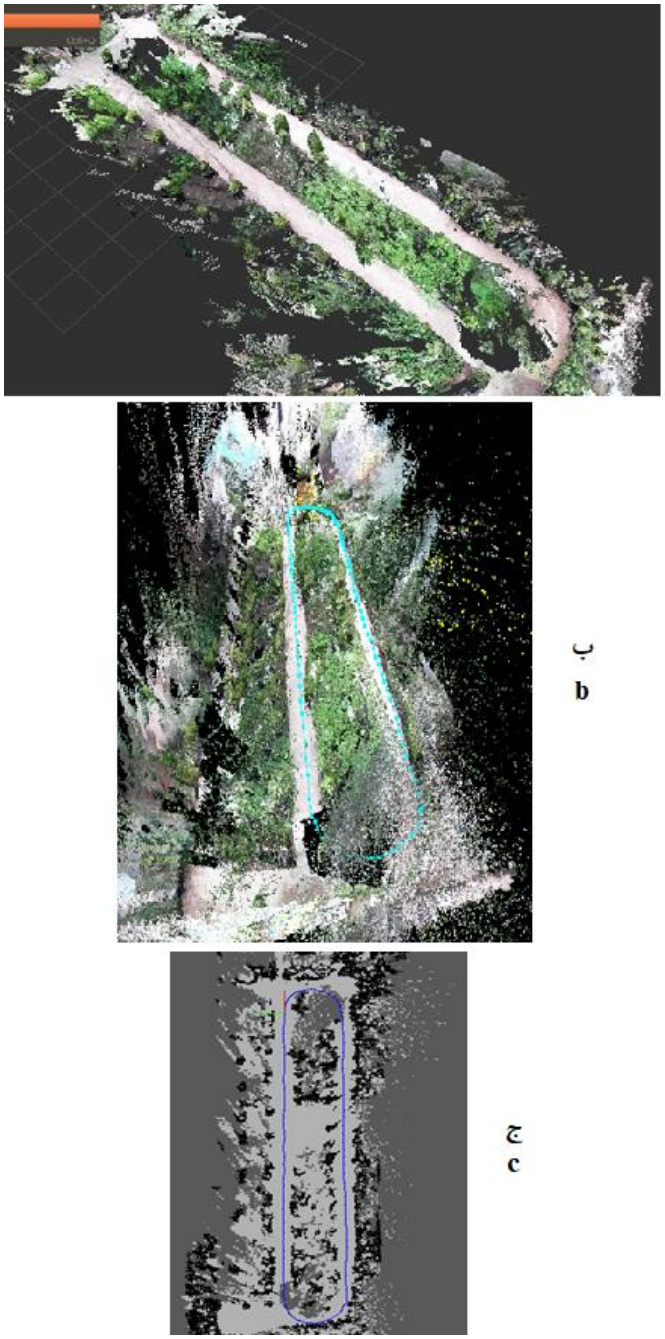
	دوربین چپ **Left camera**	دوربین راست **Right camera**
ماتریس-دوربین Camera_matrix	[723.174020, 0, 488.740816, 0, 718.920051, 300.977549, 0, 0, 1]	[719.429436, 0, 490.562927, 0, 715.922235, 292.287665, 0, 0, 1]
ماتریس- اعوجاج Distortion_coefficients	[0.001096, -0.007959, 0.008296, 0.003779, 0.000000]	[0.005420, -0.038226, 0.006065, 0.000527, 0.000000]
ماتریس-یکسوسازی Rectification_matrix	[0.999944, -0.010030, 0.003299, 0.010017, 0.999943, 0.003811, -0.003337, -0.003778, 0.999987]	[0.999948, -0.009683, -0.003222, 0.009671, 0.999946, -0.003810, 0.003259, 0.003779, 0.999988]
ماتریس-افکنش Projection_matrix	[733.239376, 0, 491.911057, 0.000000, 0, 733.239376, 301.681948, 0, 0, 0, 1, 0]	[733.239376, 0, 491.911057, -70.163608, 0, 733.239376, 301.681948, 0, 0, 0, 1, 0]

تعداد تصاویر گرفته شده از محیط گلخانه ۱۵۰ جفت تصویر و مسافت طی شده تقریبی ۳۲/۷ متر می‌باشد. نقشه سه‌بعدی ایجاد شده با استفاده از تصاویر استریو تهیه شده، نقشه سه‌بعدی همراه با مسیر تخمین زده شده حرکت دوربین (ترسیم شده با گراف آبی) و همچنین نقشه شبکه اشغال ایجاد شده برای این تصاویر در شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۶-ج)، رنگ سیاه نشان‌دهنده موانع (گلدان‌ها و گیاهان کشت شده در بستر کشت)، رنگ خاکستری روشن نشان‌دهنده مکان‌های شناخته شده، رنگ خاکستری تیره نشان‌دهنده مکان‌های ناشناخته و خطوط آبی مسیر تخمین زده شده دوربین استریو می‌باشند.

شکل ۷ مکان‌های واقعی و تخمین زده شده دوربین استریو را نمایش می‌دهد. همچنین جدول ۲ میزان خطای مکان‌یابی دوربین استریو را ارائه می‌دهد. با توجه به جدول ۲، میانگین خطای مکان‌یابی دوربین در مسافت ۳۲/۷ متر، ۰/۰۶۷۹۴۱۲ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۵۶۴۳۱ متر و ریشه میانگین مربع خطای ۰/۰۰۷۵۵۶۹ متر می‌باشند. همچنین در جدول ۳ میزان خطای دوران دوربین استریو ارائه داده شده است. با توجه به جدول ۳، میزان خطای دوران دوربین استریو حول محور X، محور Y و محور Z به‌ترتیب دارای مقادیر ۰/۰۲۶۳۸۷، ۰/۲۷۷۲۷۱ و ۰/۰۲۶۳۸۷ بوده که می‌تواند در اثر خطای انسانی و یا تراز نبودن مسیرهای حرکت در محیط گلخانه رخ داده باشند (Nasiri, 2017). در پژوهشی با به‌کارگیری دوربین استریو، میانگین درصد خطا برای مسافت طی شده به مقدار تقریبی ۰/۱۵ متر و میزان دوران در محدوده {۵ ۵-} درجه، ۰/۰۱۲۵ متر و ۰/۸۷۷۳ درجه به‌ترتیب برای جابه‌جایی و دوران حاصل شد (Yu *et al.*, 2008). در مقایسه با پژوهش ذکر شده، الگوریتم طراحی شده با در نظر گرفتن مسافت پیموده شده ۳۲/۷ متری دارای دقت مطلوبی می‌باشد.

مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط‌های کشاورزی، خصوصاً در گلخانه، زمینه تحقیقاتی نسبتاً جدیدی است که توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از یک دوربین استریو، به مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان (SLAM) در محیط گلخانه پرداخته شد حال آن‌که محققان دیگر از حس‌گرهای ترکیبی جهت برآورد این هدف استفاده نموده‌اند (Auat Cheein *et al.*, 2011; Lepej and Rakun, 2016). در پژوهشی با استفاده از یک دوربین و لیزر اسکنر، مکان‌یابی و ایجاد نقشه هم‌زمان در محیط کشاورزی در مسیر پیموده شده ۱۹۲ متری دارای میانگین خطای ۰/۴۵ متر بود (Lepej and Rakun, 2016). نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از دوربین استریو نتایج بهتری را نسبت به

حسگرهای ترکیبی به‌دست می‌آورد. همچنین استفاده از دوربین استریو نسبت به سایر حس‌گرها، نمایش دقیق‌تری از واقعیت محیط ایجاد می‌کند (Bhatti, 2011). با استفاده از این مزیت می‌توان به اطلاعاتی از قبیل پیگیری توسعه پوشش‌های گیاهی، اندازه‌گیری پارامترهای مهم فیزیکی محصول از قبیل اندازه و حجم و اطلاعات رشد آن دست یافت (Rovira-Mas *et al.*, 2008). همچنین یکی از مزیت‌های این الگوریتم تشخیص لوپ‌کلوزر می‌باشد. لوپ‌کلوزر مسیرهای تکراری حرکت را مشخص کرده که با استفاده از این ویژگی می‌توان به کاهش تعداد عملیات مزرعه، افزایش بازده، به حداقل رساندن فشردگی و در نتیجه افزایش سود و بازدهی دست یافت (Nasiri, 2017).



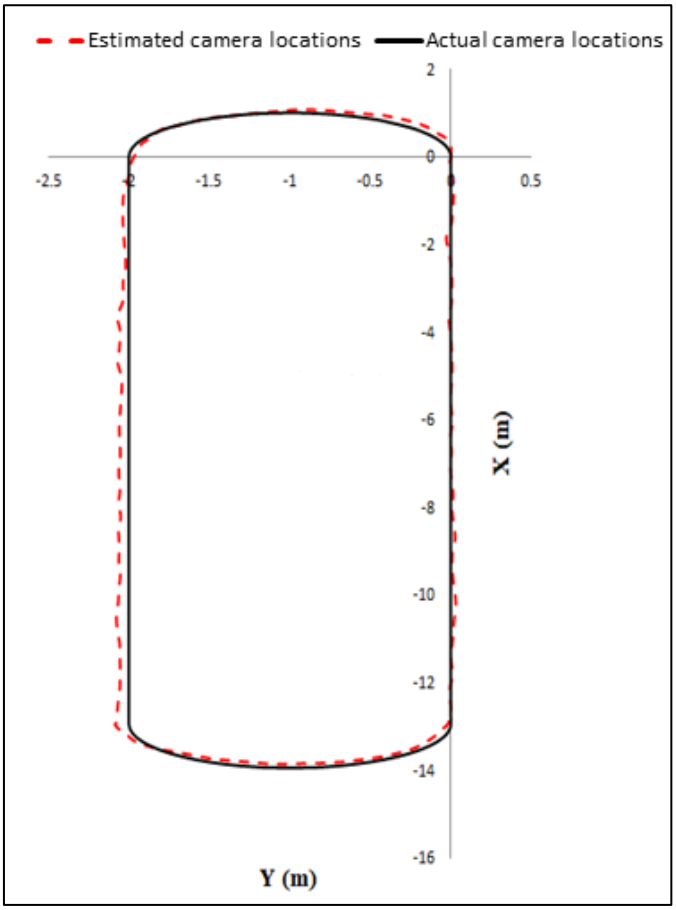
الف
a

ب
b

ج
c

شکل ٦– الف) نقشه سه‌بعدی، ب) نقشه سه‌بعدی همراه با مسیر تخمین زده شده دوربین و ج) نقشه دوبعدی محیط گلخانه

Fig.6. a) 3D map, b) 3D map with estimated camera path and c) 2D map of greenhouse



شکل ۷- مکان‌های واقعی و تخمین زده شده دوربین استریو

Fig.7. Actual and estimated camera locations

جدول ۲- مقادیر خطا در تخمین مکان دوربین استریو

Table 2- Error values to estimate the position of the stereo camera

طول مسیر Length of path (m)	خطای کمینه Min error (m)	خطای بیشینه Max error (m)	میانگین خطا Mean error (m)	انحراف معیار استاندارد Standard deviation(m)	ریشه میانگین مربع خطا RMSE (m)
32.7	0.0071809	0.221712	0.0679412	0.0456431	0.0075569

جدول ۳- مقادیر میانگین خطا در تخمین دوران دوربین استریو

Table 3- Average error values in the estimation of stereo camera rotation angles

چرخش در راستای Z Rotate in the Z direction (rad)	چرخش در راستای Y Rotate in the Y direction (rad)	چرخش در راستای X Rotate in the X direction (rad)
0.026387	0.277271	0.026387

نتیجه‌گیری

به علت خطرپذیر بودن بسیاری از عملیات‌های کشاورزی، خودکار نمودن آن‌ها غیر قابل‌اجتناب است. مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان (SLAM) گامی ضروری در خودکار کردن عملیات‌های کشاورزی می‌باشد. روش ارائه شده در این تحقیق جهت مکان‌یابی و ایجاد نقشه همزمان در محیط گلخانه، بر مبنای استفاده از مختصات سه‌بعدی اجزای محیط، که از سامانه بینایی استریو به‌دست می‌آیند، استوار است. جهت برآورد این هدف از چارچوب راس استفاده شد. جهت

برآورد دقت الگوریتم، فاصله اقلیدسی بین مکان‌های تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم و نقاط واقعی محاسبه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم معرفی شده دارای میانگین خطای ۰/۰۶۷۹۴۱۲ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۵۶۴۳۱ متر و ریشه میانگین مربع خطای ۰/۰۰۷۵۵۶۹ متر برای مسافت ۳۲/۷ متری پیموده شده توسط دوربین استریو می‌باشد.

References

1. Audras, C., A. Comport, M. Meilland, and P. Rives. 2011. Real-time dense appearance-based slam for rgb-d sensors. In: Australasian Conf. on Robotics and Automation.
2. Auta Cheein, F. A., G. Steiner, G. P. Paina, and R. Carelli. 2011. Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection. Computers and Electronics in Agriculture 78: 195-207.
3. Barth, R., J. Hemming, and E. J. V. Henten. 2016. Design of an eye-in-hand sensing and servo control framework for harvesting robotics in dense vegetation. Biosystems Engineering 146: 71-84.
4. Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. 2008. Speeded-up robust features (SURF). Computer Vision and Image Understanding 110: 346-359.
5. Bhatti, A. 2011. Global 3D Terrain Maps for Agricultural Applications. Pages 227-242 in Rovira-Más F, ed. Advances in theory and applications of stereo vision. InTech. Croatia.
6. Borenstein, J., and Y. Koren. 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (3): 278-288.
7. Bradski, G., and A. Kaehler. 2008. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. O'Reilly Media, Inc. Sebastopol, CA.
8. Craig, J. J. 2005. Introduction to robotics: mechanics and control. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
9. Cyganek, B., and J. P. Siebert. 2009. An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms. John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom.
10. Diebel, J., K. Reutersward, S. Thrun, J. Davis, and R. Gupta. 2004. Simultaneous Localization and Mapping with Active Stereo Vision. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems pp: 3437-3443.
11. Elfes, A. 1990. Occupancy grids: Astochastic spatial representation for active robot perception. In: Proceedings of the Sixth Conference on Uncertainty in AI.
12. Eliazar, A. 2003. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks. International Joint Conference on Artificial Intelligence.
13. Eliazar, A. I., and R. Parr. 2004. DP-SLAM 2.0. Robotics and Automation. Proceedings. ICRA ’04. 2004 IEEE International Conference.
14. Estrada, C., J. Neira, and J. D. Tardos. 2005. Hierarchical SLAM: Real-Time Accurate Mapping of Large Environments. Robotics, IEEE Transactionson 21 (4): 588-596.
15. Grisetti, G., C. Stachniss, and W. Burgard. 2005. Improving grid based SLAM with Rao blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling. In Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation pp: 2432-2437.
16. Grisetti, G., C. Stachniss, and W. Burgard. 2007. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. IEEE Transactions in Robotics 23: 34-46.
17. Grisetti, G., R. Kuemerle, C. Stachniss, and W. Burgard. 2010. A tutorial on graph-based SLAM. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2: 31-43.
18. Kim, G. H., J. S. Kim, and K. S. Hong. 2005. Vision-based Simultaneous Localization and Mapping with Two Cameras. IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems.
19. Kitt, B., A. Geiger, and H. Lategahn. 2010. Visual odometry based on stereo image sequences with RANSAC-based outlier rejection scheme. In Intelligent Vehicles Symposium. University of California, San Diego, CA, USA.
20. Kohlbrecher, S., J. Meyer, O. von Stryk, and U. Klingauf. 2011. A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation. In Proceedings of the 2011 IEEE international symposium on safety, security and rescue robotics. Japan, pp: 155-160.
21. Kohlbrecher, S., J. Meyer, T. Graber, K. Petersen, U. Klingauf, and O. Stryk. 2013. Hector open source modules for autonomous mapping and navigation with rescue robots. TU Darmstadt, Germany, Department of Computer Science.
22. Labbé, M., and F. Michau. 2014. Online Global Loop Closure Detection for Large-Scale Multi-Session Graph-Based SLAM. in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
23. Labbé, M., and F. Michaud. 2011. Memory management for real-time appearance-based loop closure detection. in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
24. Labbé, M., and F. Michaud. 2013. Appearance-Based Loop Closure Detection for Online Large-Scale and Long-Term Operation. IEEE Transactions on Robotics 29: 734-745.
25. Langaniere, R. 2011. OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook.

26. Leonard, J., and H. Durrant-Whyte. 1991. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7: 376-382.
27. Lepej, P., and J. Rakun. 2016. Localization and mapping in a complex field environment. Biosystems engineering 150: 160-169.
28. Li, M. H., B. R. Hong, Z. S. Cai, S. H. Piao, and Q. C. Huang. 2008. Novel indoor mobile robot navigation using monocular vision. Engineering Applications of Artificial Intelligence 21: 485-497.
29. Longuet-Higgins, H. 1987. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms, MA Fischler and O. Firschein, eds pp: 61-62.
30. Milella, A., B. Nardelli, D. Di Paola, and G. Cicirelli. 2009. Robust Feature Detection and Matching for Vehicle Localization in Uncharted Environments. In Proceedings of the IEEE/RSJ IROS Workshop Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles. Saint Louis, USA.
31. Montemerlo, M., S. Thrun, D. Koller, and B. Wegbreit. 2002. FastSLAM: a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In AAAI National Conference on Artificial Intelligence
32. Mousazadeh, H. and S. Javan bakht. 2015**.** Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road Vehicles. University of Tehran (1th ed.). (In Farsi).
33. Nasiri, A. 2017. Creation of pathway map in a greenhouse environment using localization of cultivation platform based on stereo machine vision. Ph. D. dissertation. University of Tehran. (In Farsi).
34. Nasiri, A., H. Mobli, S. Hosseinpour, and Sh. Rafiee. 2016. Creation greenhouse environment map using localization of edge of cultivation platforms based on stereo vision. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 336-349. (In Farsi).
35. Nister, D. 2003. An efficient solution to the five-point relative pose problem. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2: II-195.
36. Nister, D., O. Naroditsky, and J. Bergen. 2004. Visual odometry. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 1: I-652.
37. Pierzchała, M., P. Giguère, and R. Astrupa. 2018. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM. Computers and Electronics in Agriculture 145: 217-225.
38. ROS camera_calibration_ros software stack. Retrieved from: http://wiki.ros.org/ camera_calibration_ros.
39. Rovira-Más, F., Q. Zhang, and J. F. Reid. 2008. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 60: 133-143.
40. Shalal, N., T. Low, Ch. McCarthy, and N. Hancock. 2015. Orchard mapping and mobile robot localization using on-board camera and laser scanner data fusion – Part B: Mapping and localization. Computers and Electronics in Agriculture xxx: xxx–xxx.
41. Thrun, S., W. Burgard, and D. Fox. 1998. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots. Autonomous Robots 3: 18.
42. Thrun, S., W. Burgard, and D. Fox. 2005. Probabilistic robotics. Cambridge, USA: The MIT Press.
43. Vázquez-Arellano, M., D. Reiser, D. S. Paraforos, M. Garrido-Izard, Me. C. Burce, and H. W. Griepentrog. 2018. 3-D reconstruction of maize plants using a time-of-flight camera. Computers and Electronics in Agriculture 145: 235-247.
44. Zhang, Z. 1998.A flexible new technique for camera calibration. Available at: http://citeseer. IST. Psu. Edu/316762. Html.
45. Zhang, Z. 1999. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In Computer Vision. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on. Kerkyra, Greece.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 141-153

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۵۳-۱۴۱

Simultaneous Localization and Mapping in Greenhouse with Stereo Vision

Z. Khosrobeygi[1], Sh. Rafiee[2*], S. S. Mohtasebi[3], A. Nasiri[4]

Received: 03-01-2019
Accepted: 06-03-2019

Introduction

Increasing the production efficiency is an important goal in precision farming. The use of precision farming requires a lot of labor work. Also, due to the risk of agricultural operations, it is not recommended to do it directly by humans. Therefore, it is necessary for agricultural operations to be carried out automatically. For this reason, the application of robotics in agricultural environments, especially in the greenhouse, is increasing. The first step in automatic farming is autonomous navigation. For autonomous navigation, a robot must be the ability to understand its environment and recognize its position. In other words, a robot must be able to create a map of an unknown environment, locate itself on this map and finally plane for the path. This problem is solvable by Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). The SLAM problem is a recursive estimation process. In the other words, when a robot moves in an unknown environment, mapping and localization errors increase incrementally. To reduce these two errors, a recursive estimation process is used to solve the SLAM problem.

Materials and Methods

In this research, two webcams, made by Microsoft Corporation with the resolution of 960×544, are connected to the computer via USB2 in order to produce a stereo parallel camera. For this study, we used a greenhouse that was located the Arak, Iran. Before taking stereo images, a camera path was designed in the greenhouse. This path may be either straight or curved. The designed path was implemented in the greenhouse. The entire path traversed by a stereo camera was 32.7 m and 150 stereo images were taken. Graph-SLAM algorithm was used for Simultaneous Localization and Mapping in the greenhouse. Using the ROS framework, the SLAM algorithm was designed with nodes and network for connecting the nodes.

Results and Discussion

For evaluation, the stereo camera locations, every step was measured manually and compared with the stereo camera locations that were estimated in the graph-SLAM algorithm. The position error was calculated through the Euclidean distance (D_E) between the estimated points and the actual points. The results of this study showed that, the proposed algorithm has an average of error 0.0679412, standard deviation of 0.0456431 and root mean square error (RMSE) of 0.0075569 for camera localization.

In this research, only a stereo camera was used to prepare a map of the environment, but other researches have used multiple sensor combinations. Another advantage of this research related to others was created a 3D map (point cloud) of the environment and loop closer detection. In the 3D map, in addition to determining the exact location of the plant, the height of the plant can also be estimated. Plant height estimate is important in some agricultural operations such as spot spray, harvesting and pruning.

Conclusions

Due to the risk of agricultural activities, the use of robotics is essential. Autonomous navigation is one of the branches of the robotics. For autonomous navigation, a map of environment and localization in this map is need. The purpose of our research was to provide simultaneous localization and mapping (SLAM) in agricultural environments. ROS is a strong framework for solving the SLAM problem. So that, this problem can be solved by combining different nodes in ROS. The method depended only on the information from the stereo camera because stereo camera provided exact distance information. We believe that this study will contribute to the field of autonomous robot applications in agriculture. In future studies, it is possible to use an actual robot in the greenhouse with various sensors for SLAM and path planning.

Keywords: Greenhouse, ROS, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Stereo vision

1- PhD student, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Professor, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Professor, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4- Former Ph.D. student, Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: Shahinrafiee@ut.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 155-167

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۶۷-۱۵۵

استفاده از روش بینایی استریو به‌منظور طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی

افشین عزیزی[۱]، یوسف عباسپور گیلانده[۲*]، ترحم مصری گندشمین[۳]، حمید ابریشمی مقدم[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

سطح یک خاک خاک‌ورزی شده مملو از خاک‌دانه‌ها و کلوخه‌هایی است که دارای اندازه‌های مختلف می‌باشند به گونه‌ای‌که اندازه آن‌ها از نظر کیفیت خاک‌ورزی و میزان مصرف انرژی در آماده‌سازی بستر بذر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این پژوهش طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از خاک‌ورزی از طریق بینایی استریو بر اساس طول، عرض و ارتفاع آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. از بین این ابعاد، محاسبه ارتفاع (ضخامت) کلوخه‌ها همواره با چالش روبه‌رو بوده است؛ چرا که محاسبه آن که در اصطلاح پردازش تصویر به عمق تصویر معروف است، با یک تصویر تکی غیرممکن و یا بسیار سخت می‌باشد که برای این به سه‌بعدی‌سازی تصویر نیاز است. در این مطالعه یک مجموعه داده تصاویر استریو از سطح خاک در زمین زراعی تهیه گردید. تعداد این زوج تصاویر استریو برابر ۳۱۲ جفت بود که برای بازسازی سه‌بعدی آن‌ها به‌ترتیب عملیات کالیبراسیون، استخراج نقاط کلیدی از زوج تصاویر استریو، تطابق نقاط یافته شده و محاسبه مدل ابر نقطه‌ای روی آن‌ها انجام پذیرفت و تصاویر به شکل سه‌بعدی درآمدند. با به‌دست آمدن تصویر سه‌بعدی ارتفاع کلوخه‌ها محاسبه شدند و نهایتاً با در اختیار داشتن این اطلاعات و نیز استفاده از مدل تحلیل تمییزی به‌عنوان یک دسته‌بند خطی، کلوخه‌ها با اندازه‌های گوناگون طبقه‌بندی شدند. بالاترین دقت طبقه‌بندی ۹۶/۲٪ و نیز دقت کلی طبقه‌بندی برابر ۸۳/۷٪ به‌دست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد رویکرد بینایی استریو می‌تواند با تعیین ابعاد کلوخه‌ها به‌ویژه ارتفاع آن‌ها در کیفیت‌سنجی عملیات خاکورزی به‌صورت رضایت‌بخشی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بینایی استریو، خاک‌ورزی، قطر متوسط وزنی، کلوخه

مقدمه

بدون شک یکی از موثرترین ابزار بشر در درک جهان و شناخت آن، حس بینایی است. درک خصوصیات سه‌بعدی یک منظره و یافتن اطلاعات هندسی اجسام موجود در آن، از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در بینایی ماشین و کامپیوتر به‌شمار می‌آید (Faraji-Mahyari and Rafiee, 2016).

در بخش کشاورزی تمرکز بر روش‌های بهبود وضعیت فیزیکی، ساختاری و شیمیایی و نیز روش‌های کنترل و پایش وضعیت خاک از زمان آماده‌سازی بستر بذر تا برداشت محصول، همواره از عمده‌ترین اهداف و جهت‌گیری‌ها در ارتقاء راندمان تولید بوده و در صدر اولویت‌های تحقیقاتی با هدف افزایش عملکرد قرار داشته‌است (Piers *et al.*, 2011; Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016).

به‌طور کلی پیاده‌سازی عملیات خاک‌ورزی همواره با صرف انرژی زیادی همراه است که در اغلب موارد این میزان از پنجاه درصد کل انرژی صرف شده برای آماده‌سازی زمین نیز فراتر می‌رود، پرداختن به موضوع خاک‌ورزی مورد توجه کشاورزان، کارشناسان و دست‌اندرکاران این بخش قرار گرفته است (Bogrekci and Godwin, 2007). چنانچه خاکی که تحت عملیات خاک‌ورزی قرار گرفته و به شکل دانه‌ای درآمده است از نظر اندازه کلوخه‌ها در وضعیت خوبی قرار داشته باشد، مزیت‌هایی از قبیل نفوذپذیری کافی آب و هوا، مقاومت در برابر فرسایش آبی و بادی و نهایتاً رشد مناسب گیاه و رسیدن به عملکرد قابل قبول را به دنبال خواهد داشت (Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016). بنابراین اندازه کلوخه‌ها (خاک‌دانه‌های بزرگ) بایستی در یک رنج استاندارد بوده و کوچکتر و یا بزرگتر از حد قابل قبول نباشند، زیرا در غیر این صورت با پایین آمدن کیفیت شخم، دوباره‌کاری و اتلاف انرژی را در پی خواهد داشت. راه حل این چالش، پایش بلادرنگ عملیات شخم‌زنی به‌ویژه از نظر اندازه‌ی کلوخه‌ها می‌باشد به‌طوری‌که اپراتور بتواند با داشتن اطلاعات دقیق از وضعیت خاک‌دانه‌ها اقدام مناسب را در زمان نیاز مانند تغییر پارامترهای خاک‌ورزی، انجام دهد.

یکی از روش‌های متداول در اندازه‌گیری اندازه کلوخه‌ها شاخص میانگین وزنی قطر[۵] است. در روش‌های رایج اصول کلی بر الک

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۴- استاد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: abbaspour@uma.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.82853

5- Mean weight diameter

کردن نمونه‌های خاک استوار است به گونه‌ای که نمونه‌های جمع‌آوری شده بر روی یک سری الک‌هایی با سایز مش متفاوت قرار می‌گیرند و بر اساس میزان عبور خاک از هر الک و وزن باقیمانده روی آن، شاخص میانگین وزنی قطر برای آن نمونه تعیین می‌شود که مطالعات زیادی در این زمینه توسط محققان انجام گرفته است (Chepil and Bisal, 1943; Van Bavel, 1949; Cemper and Chepil, 1965; Lyles *et al.*, 1970; Kemper *et al.*, 1985; Nasr and Selles, 1995). روشن است که در مقیاس‌های بزرگتر و کاربردهای عملی، اندازه‌گیری قطر کلوخه‌ها از طریق الک‌های واقعی راندمان کافی را نداشته و مقرون به صرفه نیست. این تنها محدودیت روش الک نیست بلکه کندی و زمان‌بر بودن آن، احتمال متلاشی شدن نمونه‌ها قبل از قرارگیری بر روی الک‌ها، نیاز به نمونه‌برداری‌های متعدد و نیز چسبیدن خاک به ابزار مورد استفاده از دیگر چالش‌های روش مذکور است (Czachor and Lipiec, 2004). گذشته از این موارد، پیاده‌سازی روش الک با دقت و ظرافت خاص، نیازمند صرف زمان و انرژی زیاد و همچین سختی کار می‌شود (Stafford and Amber, 1990). دلیل این امر آن است که روش الک وابستگی بیش از اندازه‌ای به شرایط نمونه‌ها، نوع ابزار و عوامل دیگر دارد به‌طوری‌که نمی‌تواند به‌صورت مقاوم و مستقل از عوامل یاد شده عمل نماید و این چیزی نیست که به‌راحتی آن را نادیده گرفت. بنابراین محققان به توسعه‌ی روش‌های جایگزین مانند الک مجازی که غیرتماسی هستند روی آورده‌اند (Sandri *et al.*, 1998; Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016).

در سال‌های اخیر با گسترش ادوات الکترونیکی و افزایش سرعت و حافظه کامپیوترها شاهد استفاده هرچه بیشتر از تصاویر دیجیتال و نیز شاخه‌های مختلف علم هوش مصنوعی به نام هوش محاسباتی در عرصه‌های مختلف مانند پزشکی، صنایع دفاعی و هوا و فضا، سنجش از دور، کشاورزی و غیره هستیم (Zhang and Dahu, 2019). یک تصویر دیجیتال در حقیقت یک سیگنال دو بعدی از مکان می‌باشد که عناصر سازنده آن به نام پیکسل، شدت روشنایی صحنه‌ای که از آن عکس گرفته شده است را نشان می‌دهند.

در تمامی روش‌های مبتنی بر پردازش تصاویر تکی، یک سری ویژگی‌ها از تصاویر دیجیتال اخذ شده استخراج می‌گردند و سپس بر اساس تحلیل آن‌ها، اندازه خاک‌دانه‌های مختلف تخمین زده می‌شود. چنین روش‌هایی همواره دو مشکل اساسی دارند. یکی این است که از نقطه نظر ریاضی امکان بازسازی یک صحنه فقط از یک زاویه دید وجود ندارد بلکه برای بازسازی کامل یک شئ در یک صحنه بایستی ۳۶۰ تصویر به‌ازای هر یک درجه وجود داشته باشد که فراهم آوردن این تعداد تصویر از یک صحنه کاری بس سخت و البته غیرهوشمندانه است. با این وجود، توسعه‌دهندگان بینایی استریو با دو تصویر اقدام به تخمین و بازسازی می‌کنند (Hartley and Zisserman, 2003). مشکل دوم به محدودیت ذاتی ادوات تصویربرداری برمی‌گردد و آن این است که اساساً در هنگام اخذ تصویر عملاً بعد سوم که همان ارتفاع یا عمق تصویر باشد، در فرآیند تصویربرداری از دست می‌رود. زیرا یک تصویر ماهیتاً یک سیگنال دو بعدی (شامل بعد طول و عرض) می‌باشد و در نتیجه امکان تخصیص عنصر تصویر (پیکسل) به این بعد سوم وجود ندارد. به همین دلیل بایستی با تکنیک‌های خاص این بعد از دست رفته را بازیابی نمود.

یکی دیگر از روش‌های رایانه‌ای که برای آشکارسازی و تعیین اندازه خاک‌دانه‌ها استفاده می‌شود، تکنیک مدل دیجیتالی ارتفاع[1] است. در این روش محققان از این تصاویر که معمولاً به‌صورت اسکن شده با ابزار مخصوص از سطح خاک گرفته شده‌اند استفاده کرده و ویژگی‌هایی از قبیل موقعیت و مرز کلوخه‌ها را بدون محاسبه پارامترهای متداول پردازش تصویر مانند شاخصه‌های رنگی، شکلی و بافتی استخراج می‌نمایند (Taconet and Ciarletti, 2007; Vannier *et al.*, 2009; Chimi-Chiadjeu *et al.*, 2011, 2014). شاخصه اصلی این نوع تصاویر این است که پیکسل‌های تصویر در زمان عکس‌برداری در راستای ارتفاع نیز دارای مقدار هستند؛ بدین معنی که مقادیر هر پیکسل علاوه بر دو مؤلفه افقی و عمودی، میزان ارتفاع را نیز نشان می‌دهد (Taconet *et al.*, 2013). با استفاده از این خصوصیت ضمن آشکارسازی موقعیت کلوخه‌ها و مرز آن‌ها، تخمینی از میکروتوپوگرافی خاک نیز به‌دست می‌آید که پارامتر بسیار مهمی در خاک‌ورزی از نظر فرسایش، رابطه آب و خاک، نفوذپذیری و بسیاری از فرآیندهای سطح خاک که در مقیاس میلی‌متر روی می‌دهند می‌باشد. می‌توان گفت حسن اصلی این روش دقت زیاد و نیز بازسازی سه‌بعدی کلوخه‌ها می‌باشد اما نیاز به امکانات سطح بالا و محدودیت در کاربردهای بلادرنگ از مشکلات این روش می‌باشند.

دسته دیگری از روش‌ها برای تحلیل کیفیت شخم و تعیین رنج استاندارد خاک‌دانه‌ها از تکنیک‌های هوش محاسباتی استفاده می‌کنند. به‌عنوان نمونه طی یک مطالعه پیش‌بینی خردشدگی خاک با استفاده از روش منطق فازی مورد بررسی قرار گرفت. محققان این در این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل مختلف در فرآیند خردشدگی، تعداد ۵۰ قانون برای ایجاد مدل فازی نوشتند و توانستند توزیع خاک‌دانه‌ها را با دقت نسبتاً مناسبی مدل‌سازی نمایند (Abbaspour and Sedghi, 2015). ولی در عین حال سیستم پیشنهاد شده دارای محدودیت‌هایی از جمله عدم به‌کارگیری در شرایط زمان–واقعی بود.

برای غلبه بر چالش‌های فوق، می‌توان از بینایی استریو کمک گرفت که در آن با استفاده از الگوریتم‌های استخراج‌کننده ویژگی از هر تصویر و تطابق آن‌ها با یکدیگر و ادغام زوج تصویر، اشیاء به‌صورت سه‌بعدی بازسازی می‌شوند (Nasiri *et al.*, 2017). از این

1- Digital Elevation Model

رو می‌توان ضمن تعیین موقعیت سه‌بعدی کلوخه‌ها ابعاد کامل آن‌ها را به‌درستی در مختصات (x, y, z) سنجید. می‌توان گفت بینایی استریو روشی نو ظهور است که از سیستم بینایی انسان الهام گرفته شده است و مختصات سه‌بعدی اجسام را با استفاده از تصاویر دوربین‌های چپ و راست و معادلات زیر استریو محاسبه می‌کند. در کاربردهای رباتیک، استفاده از این روش سبب می‌شود تا ربات اطلاعاتی از ساختار و شکل هندسی اجسام و مکان آن‌ها، هم نسبت به ربات و هم نسبت به اجسام دیگر، به‌دست آورد (Faraji-Mahyari and Rafiee, 2016).

هدف از بینایی استریو[1] بازیابی اطلاعات عمق صحنه از روی دو و یا چند تصویر دریافت شده از آن توسط دوربین‌هایی با پارامترهای معلوم (کالیبره) می‌باشد به‌طوری‌که استفاه از این رویکرد در حوزه‌های مختلف روز به روز در حال افزایش یافتن است (Sankowski *et al.*, 2017). در ادامه به چند نمونه از کاربردهای بینایی استریو در بخش کشاورزی اشاره می‌شود.

طی یک مطالعه‌ی میدانی (Kise *et al.*, 2005) از تکنیک بینایی استریو برای آشکارسازی ردیف‌های کشت استفاده کردند. این پژوهش با هدف هدایت خودکار تراکتور انجام گرفت که در آن ضمن به‌دست آوردن نقشه سه‌بعدی ارتفاع، نقطه بهینه ناوبری در مرکز ردیف‌های کشت یافته شد و هدایت وسیله نقلیه نیز بر این اساس صورت پذیرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که پردازش تصاویر استریو یک روش مطمئن برای هدایت خودکار تراکتور در ردیف‌های کشت توأم با علف‌های هرز می‌باشد. در یکی از مطالعات، پژوهش‌گران یک سیستم مبتنی بر بینایی استریو برای تولید نقشه ناهمخوانی[2] درخت به‌منظور تحلیل مشخصات هندسی درختان توسعه دادند. در این مطالعه اشکال هندسی و نیز تراکم شاخ و برگ با استفاده از الگوریتم‌های سراسری و محلی در راستای تطابق زوج تصاویر استریو مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آن‌ها حاکی از مفید و مقاوم بودن الگوریتم ارائه شده برای درختان واقعی در شرایط طبیعی بود (Jafari-Malekabadi, 2019). در تحقیق دیگری نیز، محققان با روش مشابهی به تحلیل محصولات کشاورزی از حیث پایش محصول در طول مدت رشد، برداشت، طبقه‌بندی و سایر عملیاتی که در بخش کشاورزی برای محصولات زراعی و باغی انجام می‌شود پرداختند. آن‌ها ضمن اشاره به محدودیت‌های روش‌های دوبعدی، قابلیت‌های روش بینایی استریو را تشریح کرده و در این راستا بر روی کاربرد این روش در بازسازی سه‌بعدی بافت چند گیاه با وضوح بسیار بالا و نیز اندازه‌گیری و درجه‌بندی محصول سیب‌زمینی به تحقیق پرداختند و گزارش نمودند که تصاویر سه‌بعدی اطلاعات غنی برای بیشتر کاربردها در بخش کشاورزی در اختیار کارشناسان و کشاورزان قرار می‌دهد (Neal-Smith *et al.*, 2018).

در یک مطالعه در زمینه خاک‌ورزی، محققان با استفاده از روش بینایی استریو اقدام به تولید نقشه‌های سه‌بعدی از سطح خاک نمودند و توانستند شیب سطح خاک و نیز تغییرات حجم پروفیل خاک را قبل و بعد از خاک‌ورزی مورد سنجش و ارزیابی قرار دهند (Riegler *et al.*, 2014). این محققان با ارتباط دادن این دو پارامتر به کیفیت عملیات خاک‌ورزی، گزارشی از پتانسیل بالقوه تکنیک‌های مبتنی بر بینایی استریو در اندازه‌گیری سایر پدیده‌های فیزیکی به‌وجود آمده در سطح خاک‌های زراعی دادند. در مطالعه‌ای دیگر از یک نوع حسگر به نام Xtion Pro برای اندازه‌گیری میزان پستی و بلندی سطح خاک استفاده استفاده شد (Thomsen *et al.*, 2015). پژوهش‌گران این مطالعه از روش استریو فتوگرامتری در ساخت این حسگر استفاده کردند. سادگی و هزینه نسبتاً کم این روش از جمله مزایای آن گزارش شده است اما در عین حال دقت به اندازه روش‌های مبتنی بر بینایی استریو و اسکنر لیزری نمی‌باشد. روش دیگر برای ساخت مدل سه‌بعدی رویکرد فتوگرامتری می‌باشد که در آن از تصاویر فتوگرافیک[3] برای تعیین شکل و موقعیت اشیاء استفاده می‌شود. از این روش برای تخمین میزان پستی و بلندی سطح خاک ناشی از عملیات خاک‌ورزی نیز استفاده شده است (Gilliot *et al.*, 2017). با توجه موارد ذکر شده و محدودیت‌های روش‌های قبلی از نقطه نظر دقت، سرعت و سهولت پیاده‌سازی هدف از این مطالعه، ارائه یک تکنیک مبتنی بر بینایی استریو به‌منظور تعیین ابعاد کلوخه‌های حاصل از شخم و ارزیابی کیفیت شخم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت زمین شخم‌خورده

عملیات شخم و نمونه‌برداری از خاک در مزرعه آموزشی- تحقیقاتی بابلان دانشگاه محقق اردبیلی واقع در ۱۰ کیلومتری شهر اردبیل در تابستان سال ۱۳۹۷ انجام شد. میزان رطوبت خاک در زمان شخم برابر ۸٪ در زمینی با بقایای گندم بود. خاک این مزرعه دارای بافت لومی- شنی شامل به‌ترتیب ۵۴٪ شن، ۳۲٪ سیلت و ۱۴٪ رس بود. به منظور حفظ یکنواختی مزرعه و این‌که شرایط فیزیکی یکسانی برای تمامی کلوخه‌های به‌وجود آمده در سطح مزرعه وجود داشته باشد، کل مزرعه توسط گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد و در ادامه با تقسیم‌بندی زمین به کرت‌هایی با ابعاد مشخص، برای دستیابی به دامنه مناسب کلوخه‌ها از دو نوع ادوات خاک‌ورز شامل روتیواتو و دیسک بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی[4]، استفاده شد تا

1- Stereo vision
2- Disparity map
3- Photographic images
4- Randomized Complete Block Design

تلفیقی از ماشین‌های مورد استفاده در خاک‌ورزی اولیه و ثانویه به‌کار رفته باشد. هدف از انتخاب طرح بلوک‌های کامل تصادفی کنترل تغییرات در آزمایشات مزرعه‌ای و همچنین رعایت اسلوب استاندارد در پیاده‌سازی عملیات کشاورزی بود تا کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی در چارچوب شناخته‌شده‌ای به‌دست آیند. پارامترهای تأثیرگذار در عملیات خاک‌ورزی سرعت پیشروی، موقعیت درپوش روتیواتور و تعداد دفعات استفاده از ماشین انتخاب شدند. تنظیم این پارامترها به این صورت بود که برای سرعت پیشروی سه سطح سرعت شامل دنده یک سنگین، دنده دو سبک و دنده سه سبک به‌ترتیب برابر ۲/۳، ۳/۳ و ۵/۲ کیلومتر بر ساعت، برای درپوش روتیواتور دو حالت بالا و پایین و برای پارامتر آخر تعداد دفعات استفاده بین یک تا سه بار در نظر گرفته شد. تعداد کلاس‌های مورد نیز نظر از نظر اندازه کلوخه برابر ۶ در نظر گرفته شد که اندازه هر کدام از آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- رنج میانگین وزنی قطر کلوخه‌های مختلف پس از عملیات شخم (مقادیر به میلی‌متر هستند)

Table 1- The mean range of different clod MWD obtained from standard mechanical sieves (mm)

کلاس ۱ Class 1	کلاس ۲ Class 2	کلاس ۳ Class 3	کلاس ٤ Class 4	کلاس ٥ Class 5	کلاس ٦ Class 6
$d \leq 7$	$9 < d < 33.2$	$28.4 < d < 64.5$	$61.8 < d < 81.2$	$70.4 < d < 104$	$d \geq 100$

اخذ تصاویر

در آماده کردن مجموعه داده هدف این بود که این کار در شرایط واقعی و نه در محیط ایزوله و تحت کنترل آزمایشگاه انجام گیرد، لذا برای حصول این هدف از تصاویر استریو استفاده شد. به‌طور کلی تصاویر دوربین‌های استریو دو مزیت را دارا هستند که یکی عدم وابستگی زوج تصاویر استریو به تغییرات نور محیط می‌باشد به‌طوری‌که تصویربرداری ما در شرایط واقعی مزرعه و بدون نورپردازی خاصی در روزهای آفتابی و ابری انجام گرفت که این یک مزیت بسیار مهم می‌باشد. این ویژگی مثبت حداقل از ۳۰٪ پردازش اضافی در پروسه‌ی بینایی ماشین جلوگیری به عمل می‌آورد. ویژگی مثبت دوم این است که دوربین‌های استریو به دلیل داشتن میدان دید[1] زیادتر، تصاویری که تولید می‌کنند دارای انسداد[2] پایین‌تری می‌باشند که این امر در اخذ تصاویر با اطلاعات بیشتر مؤثر است. شایان ذکر است که شرایط تصویربرداری برای هر دو تصویر استریو یکسان می‌باشد. در این پژوهش از دوربین استریو ساخت شرکت Fujifilm مدل W3 مجهز به دو حسگر CCD با رزولوشن ۱۰ مگاپیکسل برای هر دو لنز چپ و راست، فاصله خط مبنا ۷/۵ سانتی‌متر و فاصله کانونی ۱۲ میلی‌متر استفاده گردید. فاصله لنزهای دوربین از سطح زمین برابر ۶۰ سانتی‌متر تعیین شد (Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016). شکل ۱ نمایش ساده‌ای از مکانیزم اخذ تصویر توسط دوربین استریو را نشان می‌دهد که در آن خطوط گذرنده از مرکز دو دوربین موازی هم هستند. تعداد کل تصاویر برابر ۳۱۲ زوج تصویر استریو با وضوح تصویر 2736×3648 بود که نمونه‌ای از این داده‌های تصویری در شکل ۲ نشان داده شده است.

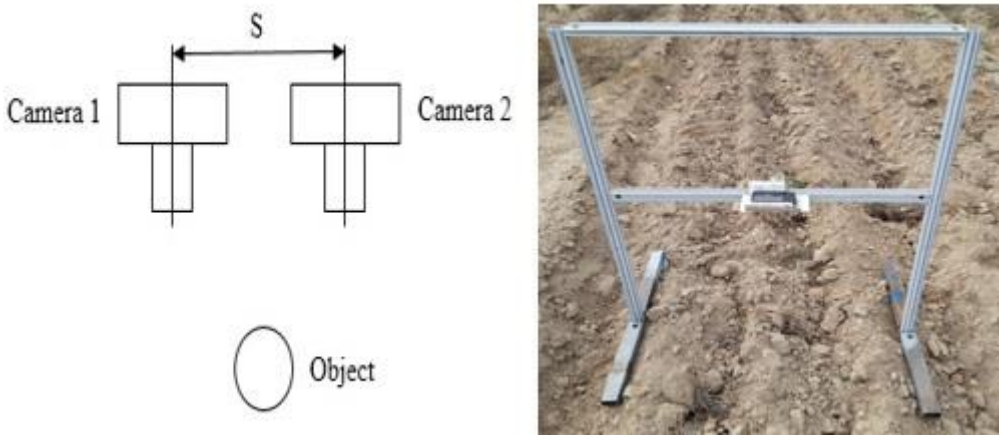
کالیبره کردن و یک‌سوسازی تصاویر

الگوریتم استریو شامل چهار مرحله اصلی کالیبراسیون، یکسوسازی، تناظریابی و مثلث‌سازی است. در این بین دقت سه‌بعدی‌سازی تا حد زیادی به کالیبراسیون و تناظریابی وابسته است. کالیبراسیون، فرآیند مدل‌سازی پارامترهای دوربین و تناظریابی، فرآیند جفت‌سازی نقاط بر اساس شباهت آن‌ها است. مثلث‌سازی نیز متداول‌ترین روش برای عمق‌یابی در صورت داشتن نقاط متناظر است (Faraji-Mahyari and Rafiee, 2016). به منظور کاهش زمان کالیبراسیون و نیز پردازش‌های بعدی، اندازه تمامی تصاویر به ۹۱۲× ۶۸۴ پیکسل به‌عنوان تنها عملیات پیش‌پردازش تغییر یافت. بدین منظور، زوج تصاویر استریو با استفاده از الگوی منظم صفحه شطرنجی و با استفاده از جعبه ابزار Stereo Camera Calibrator نرم‌افزار متلب کالیبره گردیدند (Stereo Calibrator Toolbox, MATLAB, R2018a). پس از کالیبراسیون نوبت به یک‌سوسازی[3] زوج تصاویر رسید که در آن هر دو تصویر در یک راستا قرار گرفتند تا ویژگی‌های استخراجی در مرحله بعد کمترین انحراف را در بین دو تصویر چپ و راست باهم داشته باشند (Loop and Zhang, 1999).

استخراج نقاط کلیدی

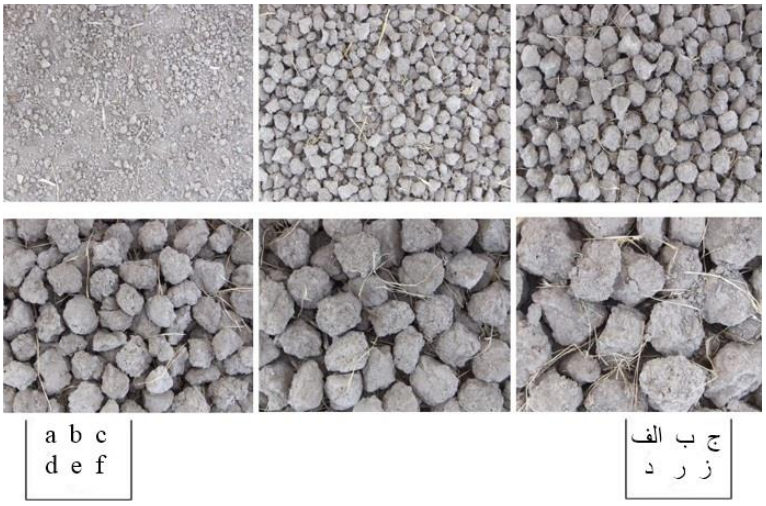
به‌منظور استخراج نقاط کلیدی به‌عنوان ویژگی‌های تأثیرگذار در زوج تصاویر استریو از الگوریتم SIFT استفاده شد. این الگوریتم به دنبال استخراج نقاط کلیدی به‌عنوان ویژگی‌های تکرارپذیر و قابل قبول بر اساس فضای مقیاس می‌گردد (Lindeberg, 1994). ویژگی بارز این الگوریتم عدم وابستگی آن به چرخش و مقیاس و نیز مقاومت در برابر اعوجاجات همگر[4]، نویز و تغییرات روشنایی می‌باشد (Lowe, 2004).

1- Field of view
2- Occlusion
3- Rectification
4. Affine



شکل ۱– شکل شماتیک به همراه تجهیزات تصویربرداری استریو

Fig.1. Schematic of the stereo imaging with its setup



شکل ۲– نمونه‌ای از تصویر لنز چپ دوربین استریو از شش کلاس موجود: تصاویر به‌ترتیب از کوچک‌ترین خاک‌دانه (الف؛ ردیف بالا گوشه چپ) تا درشت‌ترین آن‌ها (ز؛ ردیف پایین گوشه راست) نمایش داده شده‌اند.

Fig.2. The aggregates after tillage operation: The aggregate size distribution is increased from Class a to class f.

الگوریتم SIFT در چهار مرحله اقدام به استخراج ویژگی می‌نماید که عبارتند از: مقیاس تشخیص فضای اکسترمم[1]، تعیین دقیق نقطه کلیدی[2]، واگذاری گرایش نقطه کلیدی[3] و توصیف‌گرهای نقطه کلیدی[4]. پیاده‌سازی الگوریتم SIFT و استخراج نقاط کلیدی و نیز تطابق آن‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه Numpy انجام گرفت.

مقیاس تشخیص فضای اکسترمم

الگوریتم SIFT کار خود را با یافتن نواحی بالقوه نقاط کلیدی که نسبت به مشخصات هندسی و تغییرات در مقیاس تصویر ثابت می‌مانند شروع می‌کند. بدین منظور تصویر باید به‌صورت هم‌زمان در چند مقیاس در نظر گرفته شده و سپس اکسترمم (بیشینه یا کمینه) در درون این تصاویر مقیاس داده شده پیدا شوند. به عبارت دیگر، جستجو در یک فضای مقیاس تفاضل گاوسی[5] که حاوی تمامی مقیاس‌های ممکن تصویر است انجام می‌گیرد. برای به‌دست آوردن فضای مقیاس، تصویر مورد نظر با یک فیلتر نرم‌کننده گوسی به‌صورت رابطه‌ی (۱) در هم آمیخته می‌شود:

$$L(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) * I(x,y) \qquad (۱)$$

که در آن $G(x,y,\sigma)$ تابع گوسین است که به‌صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

1- Scale-space extrema detection
2- Keypoint localization
3- Orientation assignment
4- Keypoint descriptor
5- Difference of Gaussian

$$G(x,y,\sigma)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\left(x^2+y^2\right)/2\sigma^2} \quad (۲)$$

برای یافتن مکان‌های بالقوه و باثبات نقطه کلیدی به توابع تفاضل گاوسی میان فضاهای مختلف مقیاس از رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود.

$$D(x,y,\sigma)=L(x,y,k\sigma)-L(x,y,\sigma) \quad (۳)$$

برای آشکارسازی نقاط کلیدی یا اکسترمم، تصاویر تفاضل گاوسی بررسی شده و نقاطی انتخاب می‌شوند که بزرگ‌تر (و یا کمتر) از تمام همسایه‌ها در زمینه مقیاس جاری و مقیاس همسایگی (اکتاوهای) بالا و پایین هستند. این همسایگی‌ها به همسایگی سه طبقه Moore neighborhood موسوم هستند (Gardel-Kurka and Diaz-Salazar, 2019).

در عمل تعیین موقعیت و مقیاس نقطه کلیدی از روی نقطه مرکزی به نتیجه چندان دقیقی منتهی نمی‌شود و باید نقاط با کنتراست پایین و نقاط لبه غیر دقیق کنار گذاشته شوند. برای این کار محل نقطه کلیدی توسط بسط تیلور درجه دوم تابع تفاضل گاوسی و درون‌یابی بیشینه/کمینه مدل‌سازی می‌شوند که برای یک نقطه نمونه با مختصات $x^T=[x,y,\sigma]$ بسط به‌صورت رابطه (۴) است:

$$D(x)=D+\left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)^T x+\frac{1}{2}x^T\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}x \quad (۴)$$

که مقدار بهینه انحراف این نقطه با کمینه‌سازی رابطه (۴) به شکل رابطه (۵) به‌دست می‌آید:

$$\hat{x}=-\left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}\right)^{-1}\frac{\partial D}{\partial x} \quad (۵)$$

واگذاری گرایش نقطه کلیدی

علاوه بر داشتن ویژگی‌های با مقیاس ثابت، نیاز به در اختیار داشتن ویژگی‌های با دوران ثابت نیز وجود دارد. برای این منظور، اقدام به واگذاری یا تخصیص هر ویژگی به یک گرایش[1] خاص می‌نماییم. گرایش هر نقطه کلیدی از طریق گرادیان‌های محلی تصویر هموار شده L در همان مقیاس اولیه محاسبه می‌شود. گرادیان‌های محلی و نیز مقدار گرایش برای هر تصویر نمونه از طریق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند:

$$M(x,y)=\sqrt{(L(x+1,y)-L(x-1,y))^2+(L(x,y+1)-L(x,y-1))^2} \quad (۶)$$

$$\theta(x,y)=arctan\left(\frac{L(x,y+1)-L(x,y-1)}{L(x+1,y)-L(x-1,y)}\right) \quad (۷)$$

با جمع‌آوری هیستوگرام‌های گرایشی که یک بردار حاوی ۳۶ مؤلفه که هر کدام متناظر ۱۰° هستند و محاسبه بالاترین پیک برای هر نقطه، گرایش نهایی نقطه کلیدی به‌دست می‌آید (Gardel-Kurka and Diaz-Salazar, 2019).

1- Orientation

توصیف‌گرهای نقطه کلیدی

آخرین گام در استخراج یک نقطه کلیدی، توصیف ناحیه حول نقطه کلیدی است به‌گونه‌ای‌که بتوان آن را با نقطه‌های کلیدی دیگر مقایسه نمود. به عبارت بهتر، توصیف‌گر نقطه کلیدی، نواحی محلی را تعریف می‌کند که نسبت به مقیاس، دوران و تغییرات روشنایی ثابت باشند. برای این کار از تصویر مات شده در نزدیک‌ترین مقیاس استفاده شده و از نقاط حول نقطه کلیدی نمونه‌برداری کرده و گرادیان و گرایش آن‌ها را مقایسه می‌کنیم. سپس تصویر را در گرایش نقطه کلیدی دوران می‌دهیم به‌طوری‌که گرایش‌ها با توجه به گرایش نقطه کلیدی نرمال شوند. توصیف‌گر به‌دست آمده در اصل، یک ماتریس مربعی (با چهار زیرناحیه) می‌باشد که المان‌های آن اندازه هشت هیستوگرام وزن‌دار هستند.

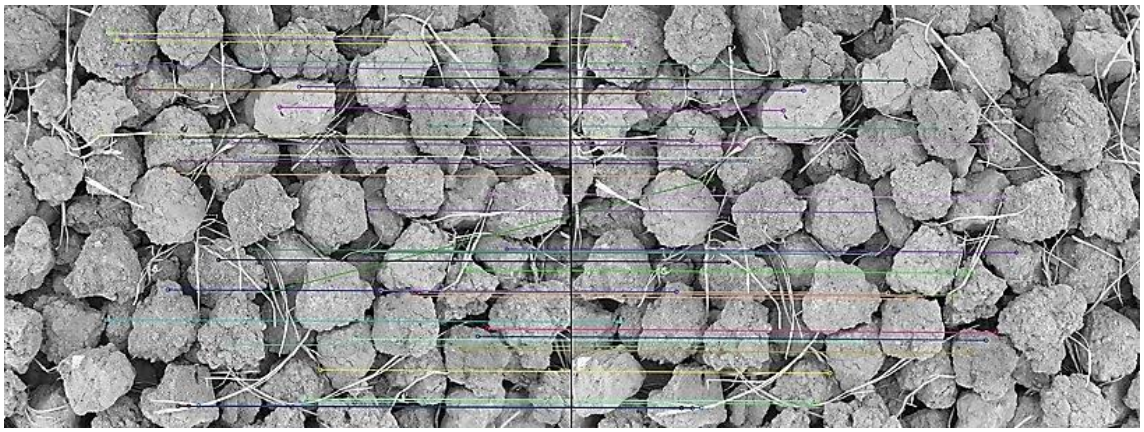
تطابق ویژگی‌های یافت‌شده

در سامانه‌های بینایی استریو برای تخمین مختصات نقاط اجسام لازم است که تصاویر چپ و راست با یکدیگر تطبیق داده شوند به‌طوری‌که این تطبیق‌دهی از گام‌های مهم در الگوریتم‌های مبتنی بر بینایی استریو است و مستقیماً دقت بازسازی مدل سه‌بعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Trucco and Verri, 1998). تطبیق‌دهی عبارت از تعیین نقاط کلیدی متناظر در زوج تصویر استریو می‌باشد که این نقاط متناظر در بازسازی سه‌بعدی اجسام مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه از الگوریتم Brute Force به‌منظور تطبیق‌دهی توصیف‌گرهای متناظر آشکارشده در بین زوج تصویر استریو استفاده شد. این الگوریتم معیار تطبیق‌دهی را فاصله اقلیدسی در نظر می‌گیرد؛ بدین‌گونه که کمترین فاصله بین توصیف‌گرها بهترین تطبیق‌ها را نتیجه می‌دهد. نتایج بصری تطبیق در شکل ۳ نشان داده شده است که در آن ۵۰ توصیف‌گر تطبیق داده شده توسط خطوطی متناظر شده‌اند.

مدل ابر نقطه‌ای

پس از به‌دست آمدن موقعیت سه‌بعدی کلوخه‌ها در تصویر، مدل ابر نقطه‌ای به‌عنوان یک نمایش سه‌بعدی از صحنه می‌باشد به‌دست می‌آید. مدل ابر نقطه‌ای مجموعه‌ای سه‌بعدی از نقاط است که خصوصیات سطح خارجی شئ را توصیف کرده و برای بازسازی مدل سه‌بعدی نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل مختصات سه‌گانه (x,y,z) تمامی کلوخه‌ها در یک فضای سه‌بعدی مشخص هستند به‌طوری‌که تمامی نقاط در این مدل حاوی اطلاعات سه‌بعدی از موقعیت کلوخه‌ها می‌باشند. در مدل ابر نقطه‌ای به‌دست آمده، میانگین مؤلفه ارتفاع تمامی نقاط (که تعدادشان برای هر مدل مشخص است) در راستای محور z به‌عنوان ضخامت کلوخه‌ها در هر شش کلاس مورد نظر در نظر گرفته شد. از آن‌جایی‌که در هر تصویر تمامی کلوخه‌ها با توجه به اندازه آن‌ها پس از الک کردن در کلاس

مشخص خود قرار داشتند لذا میزان ارتفاع (بالاآمدگی) همه نمونه‌ها در یک کلاس معین تقریباً در یک سطح بود؛ به‌طوری‌که این میزان برای یک کلاس با بقیه کلاس‌ها تفاوت داشت. مبنای این محاسبه نیز سطح صاف عاری از هر گونه کلوخه بود در نظر گرفته شد تا شرایط برای محاسبه ارتفاع نمونه‌ها از روی مدل ابر نقطه‌ای یکسان باشد. مسأله هم‌پوشانی کلوخه‌ها تأثیری در محاسبه مقدار ضخامت (ارتفاع) کلوخه‌ها نداشت اما در اندازه‌گیری طول و عرض آن‌ها به‌دلیل تورفتگی نمونه‌ها، تأثیرگذار بود. دلیل استفاده از رویکرد بینایی استریو در این مطالعه دقیقاً به همین موضوع برمی‌گردد. برای نمایش مدل ابر نقطه‌ای به شکل سه‌بعدی از نرم‌افزار Agisoft Metashape Professional استفاده شد.



شکل ۳- نمایش توصیف‌گرهای تطبیقی توسط الگوریتم Brute Force

Fig.3. Illustration of adaptive descriptors using Brute Force algorithm

طبقه‌بند با آنالیز تفکیک خطی

پس از به‌دست آمدن مقادیر ارتفاع کلوخه‌ها در هر شش دسته از مدل آنالیز تفکیک خطی[1] که یک جداساز خطی می‌باشد به منظور طبقه‌بندی تصاویر استفاده گردید. ورودی این مدل بردارهای حاوی مقادیر ارتفاع بودند که این مدل با یافتن تابع خطی مناسب احتمال تخصیص هر کدام از مشاهدات را به گروه یا دسته مربوطه حداکثر می‌کند. این کار با یافتن معادلات رگرسیونی متناسب برای هر گروه که ضرایب آن از طریق مقادیر استاندارد شده توابع مربوطه از روی ویژگی‌ها استخراج می‌شود، انجام می‌گیرد. برای جداسازی تعداد پنج تابع در نظر گرفته شد. ویژگی بارز مدل آنالیز تفکیک، سادگی و خطی بودن آن می‌باشد. پیاده‌سازی طبقه‌بند آنالیز تفکیک توسط نرم‌افزار SPSS18 انجام شد.

در این مطالعه به‌منظور در اختیار داشتن معیاری از عملکرد طبقه‌بندی توسط مدل سه‌بعدی ارائه شده از ماتریس درهم ریختگی استفاده شد. ماتریس درهم ریختگی یک ماتریس مربعی N×N می‌باشد که N نشان‌دهنده تعداد دسته‌ها است و عناصر روی قطر اصلی نمونه‌های درست را نشان می‌دهند. از این دیدگاه برای به‌دست آوردن کارآیی یک دسته‌بند کافی است مجموع درایه‌های قطر اصلی این ماتریس را بر مجموع کل درایه‌های آن تقسیم نمود (Stehman, 1997). همین معیار در ارزیابی عملکرد در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج کالیبراسیون تصاویر استریو به‌کار رفته در این مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است که شامل پارامترهای داخلی و خارجی دوربین استریو می‌باشند. شاخص مهم در بین پارامترهای داخلی دوربین، میانگین خطای پس‌افکنش[2] است که مقدار آن برای دوربین اول و دوم به‌ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۵۹ پیکسل به‌دست آمد که کمتر از یک پیکسل می‌باشد. این میزان از خطا برای برآورد پارمترهای مربوط به دوربین استریو قابل قبول بوده و برای ایجاد مدل ابر نقطه‌ای و بازسازی سه‌بعدی تصویر مناسب است که با گزارش (Hartley and Zisserman, 2003) نیز همخوانی دارد. پارامترهای خارجی دوربین نیز بردار دوران و انتقال می‌باشند که برای محاسبه ماتریس بنیانی[3] و تعیین موقعیت دوربین و نهایتاً ایجاد مدل ابر نقطه‌ای لازم می‌باشند. برای این، دوربین سمت چپ به‌عنوان شاخص مبنا در نظر گرفته شده و مقادیر این بردارها برای دوربین دوم (سمت راست) نسبت به دوربین اول سنجیده شده‌اند.

شکل ۴ مدل سه‌بعدی متناظر یک زوج تصویر استریو (شکل ۳) را پس از اعمال بافت طبیعی خود تصویر اولیه (محیط خاک) را نشان

1- Linear discriminant analysis model

2- Reprojection error

3- Fundamental matrix

می‌دهد. در این مدل تمامی المآن‌های تصویر در سه راستای طول، عرض و ارتفاع دارای مقدار هستند.

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون و تخمین پارامترهای داخلی دوربین استریو

Table 2- Results of calibration and estimation of intrinsic parameters of the stereo camera.

	پارامترهای داخلی **Intrinsic parameters**	
	دوربین ۱ **Camera 1**	**دوربین ۲** **Camera 2**
فاصله کانونی Focal length (pixels)	$[8.5297, 8.8535]$	$[8.5284, 8.8532]$
نقطه اساسی Principle point (pixels)	$[7.5779, 10.4512]$	$[7.5795, 10.4479]$
میزان انحراف Skew value	$[0.9078]$	$[0.9016]$
اعوجاج شعاعی Radial distortion	$[0.0167, 0.4256]$	$[0.0167, 0.4282\ ]$
اعوجاج مماسی Tangential distortion	$[6.8429e-04, 5.8236e-04]$	$[6.8319e-04, 5.8092e-04]$

جدول ۳- پارامترهای خارجی دوربین استریو

Table 3- Extrinsic parameters of the stereo camera

بردار انتقال و دوران دوربین سمت راست نسبت به دوربین چپ **Translation and rotation vector of camera 2 in relation to camera 1.**	
بردار دوران Rotation vector	$[0.0030, 0.0022, 1.6701e-04]$
بردار انتقال Translation vector (mm)	$[0.0948, 0.0861, 0.9228]$

شکل ٤- یک نمونه از مدل سه‌بعدی حاصل از تصویر استریو از کلوخه‌های حاصل از شخم

Fig.4. A sample of 3D model obtained from stereo image of clods of a tilled soil

به‌منظور سنجش میزان دقت طبقه‌بندی کلوخه‌ها با روش بینایی استریو از ماتریس درهم ریختگی[1] استفاده شد. جدول ۴ نتایج طبقه‌بندی شش کلاس مختلف از کلوخه‌ها را نشان می‌دهد. دقت کلی طبقه‌بندی کلوخه‌ها برابر ٪۸۳/۷ به‌دست آمد. چنانچه مشاهده می‌شود بالاترین میزان دقت طبقه‌بندی مربوط به کلاس ششم (بزرگ‌ترین کلوخه‌ها) و برابر ٪۹۶/۲ و نیز کمترین دقت مربوط به کلاس اول با ٪۶۳/۵ (کوچک‌ترین کلوخه‌ها) به‌دست آمد. می‌توان این‌گونه استنباط نمود که با توجه به اندازه بسیار کوچک کلوخه‌های مربوط به کلاس اول (و تا حدودی کلاس دوم)، مؤلفه سوم یعنی

1- Confusion matrix

ارتفاع آن‌ها در تصویر ناچیز بوده و از تمایز معنی‌داری نسبت به بقیه کلاس‌ها در فرآیند طبقه‌بندی برخوردار نیستند. به عبارت دیگر مقدار اختلاف ارتفاع کلوخه‌های کلاس اول و دوم از سطح زمین ناچیز بوده و به همین جهت میزان دقت برای این دو کلاس در مقایسه با کلوخه‌های بزرگ‌تر سایر کلاس‌ها کمتر می‌باشد و این با نتایج مطالعات مشابه در این زمینه همخوانی دارد (Vannier *et al.*, 2009). دلیل این رویداد به این برمی‌گردد که مقدار ناهموخوانی (اختلاف فاصله افقی نقاط متناظر در دو تصویر چپ و راست) که از روی آن و فاصله بین دوربین‌ها میزان عمق یا فاصله اجسام از دوربین سنجیده می‌شود با خود عمق رابطه عکس دارد؛ بنابراین در کلاس‌های اول و دوم که میزان ناهمخوانی به دلیل ریز بودن اندازه کلوخه‌ها ناچیز می‌باشد عمق چندان تغییر نکرده است. در نتیجه در سیستم بینایی استریو وضوح و دقت بالای عمق فقط برای کلاس‌هایی که اشیاء آن به لنز دوربین نزدیک‌تر هستند، به‌دست می‌آید (Bradski and Kaehler, 2008). از طرف دیگر بالاترین دقت طبقه‌بندی به بزرگترین کلوخه‌ها یعنی کلاس شش تعلق یافت. به دلیل مشابه، از آنجایی‌که اندازه کلوخه‌های این کلاس برای هر سه مؤلفه طول، عرض و ضخامت دارای مقادیر بزرگ‌تری هستند لذا در حالت تصویر سه‌بعدی نیز کلوخه‌ها با دقت و وضوح بیشتری بازسازی شدند. که این با درک بصری انسان از محیط و طبق این قاعده که اجسام بزرگ‌تر بهتر و رساتر دیده و تحلیل می‌شوند، نیز سازگاری دارد.

جدول ٤– مقادیر ماتریس درهم ریختگی برای طبقه‌بندی شش کلاس از کلوخه‌های حاصل از شخم به همراه دقت طبقه‌بندی برای هر کلاس

Table 4- Confusion matrix values for classification of soil clods obtained from tilth with precision values per each class

	کلاس‌های واقعی Actual classes						
تخمین زده شده Estimated classes	1	2	3	4	5	6	دقت Precision (٪)
1	33	18	1	0	0	0	63.5
2	8	41	3	0	0	0	78.8
3	0	3	44	4	1	0	84.6
4	0	0	1	46	5	0	88.5
5	0	0	0	4	47	1	90.4
6	0	0	0	0	2	50	96.2

نتیجه مهم دیگری که بسیار حائز اهمیت است این است که تعداد ویژگی که دسته‌بند مورد نظر از آن‌ها برای عمل دسته‌بندی استفاده می‌کند برابر ۳ که همان مقادیر طول، عرض و ارتفاع تمامی تصاویر در شش دسته می‌باشد، است و ویژگی‌ها یا نقاط کلیدی استخراج شده توسط الگوریتم SIFT صرفاً به منظور سه‌بعدی‌سازی تصویر استفاده گردیدند. به عبارت بهتر فضای دسته‌بندی یک فضای سه‌بعدی می‌باشد که بسیار ساده‌تر از فضاهای با ابعاد بسیار بالاتر رایج است، به‌طوری‌که کار کردن در یک فضای سه‌بعدی به مراتب ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از فضاهای چندبعدی است. برای چنین فضاهای پیچیده‌ای مدل‌های پیچیده‌ای نیز برای دسته‌بندی نیاز است. تأثیر این مورد که قابل مقایسه با مطالعه حاضر است، تحقیقی است که در این راستا انجام شده است (Rahimi-Ajdadi *et al.*, 20016) انجام دادند؛ جایی‌که برای طبقه‌بندی کلوخه‌ها از ۱۹ ویژگی انتخابی (ولو ویژگی‌های مناسب) استفاده شده بود. برای مدل‌سازی و طبقه‌بندی این فضای نوزده‌بعدی یک طبقه‌بند قدرتمند مانند شبکه عصبی کانولوشن که یک مدل عمیق می‌باشد نیاز است. این در حالی است که در پژوهش حاضر فقط از یک طبقه‌بندی خطی به‌منظور عمل طبقه‌بندی این شش کلاس موجود استفاده گردید.

با توجه به مطالعات قبلی که در آن‌ها مشکل هم‌پوشانی کلوخه‌ها یک چالش اساسی بود (Itoh *et al.*, 2008; Bogrekci and Godwin, 2007) که اغلب به محاسبه و تخمین توأم با انحراف اندازه کلوخه‌ها می‌شود، روش ارائه‌شده با بهبود دقت طبقه‌بندی حداقل به میزان ۱۰٪ این چالش را از میان برداشته است. زیرا مشکل هم‌پوشانی، امکان استفاده از دو شاخص طول و عرض اشیاء (در اینجا کلوخه‌ها) را تحت تأثیر قرار داده و عملکرد مدل‌های ارائه‌شده را پایین می‌آورد. اما با این حال، رهایی از وابستگی به این دو شاخص و استفاده از شاخص هندسی ارتفاع توانسته بر چالش فوق غلبه نموده و کارایی مدل ارائه شده را بهبود بخشد که این از جمله یافته‌های مهم این پژوهش می‌باشد. شایان ذکر است که یکی از چالش‌های تحقیق حاضر، انجام کالیبراسیون می‌باشد زیرا کالیبراسیون نامناسب منجر به نتایج غیر دقیقی می‌شود که از قابلیت اعتماد آن به‌طور معنی‌داری می‌کاهد. مضاف بر این کالیبراسیون تصاویر استریو زمان کل پردازش

را بالا می‌برد که بهتر است برای این چالش نیز راه‌کاری اندیشیده شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی از پایه‌ای‌ترین ویژگی‌های هندسی شامل طول، عرض و ارتفاع مستخرج از مدل سه‌بعدی استفاده شد. این هدف از طریق بازسازی سه‌بعدی صحنه با روش بینایی دنبال شد. دقت کلی طبقه‌بندی با طبقه‌بند آنالیز تفکیک برابر ۸۳/۷٪ به‌دست آمد که حاکی از عملکرد قابل قبول این روش می‌باشد. یکی از نتایجی که از این پژوهش به‌دست آمد این بود که از بین سه مؤلفه (x, y, z) مربوط به تک‌تک کلوخه‌ها، بعد سوم یعنی ارتفاع (ضخامت) تأثیر معنی‌داری در تفکیک بین کلاس‌های مختلف کلوخه‌ها دارد زیرا دو مؤلفه اول (طول و عرض) کلوخه به دلیل همپوشانی بسیار زیاد کلوخه در تمامی دسته‌ها عملاً تأثیر چندانی در جداسازی دسته‌های مختلف ندارد؛ این بدین معنی است که دقت بازسازی سه‌بعدی تصاویر کلوخه‌ها اثر مستقیم در دقت مدل طبقه‌بند دارد. بنابراین، اهمیت سه‌بعدی‌سازی تصویر از طریق بینایی استریو بیش از پیش مشهود است. به‌طور کلی نتایج شاخص به‌دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

۱- بهبود دقت طبقه‌بندی به میزان حداقل ۱۰٪ نسبت به مطالعات مشابه در دسته‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی.

۲- تخمین ارتفاع کلوخه‌ها و استفاده از آن در جداسازی دسته‌های مختلف از یکدیگر.

۳- در اختیار داشتن ابعاد کامل کلوخه‌ها در دستگاه مختصات کارتزین.

۴- حل چالش هم‌پوشانی کلوخه‌ها از طریق تأکید بر محاسبه بعد سوم یعنی ارتفاع به جای طول و عرض که اغلب به دلیل اتصال کلوخه‌ها به همدیگر اندازه کلوخه‌ها به‌صورت غیرواقعی و بزرگ‌تر از مقدار درست آن‌ها تخمین زده می‌شود.

References

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., and R. Sedghi. 2015. Predicting soil fragmentation during tillage operation using fuzzy logic approach. Journal of Terramechanics 57: 61-69.
2. Bogrekci, I., and R. J. Godwin. 2007. Development of an image processing technique for soil tilth sensing. Biosystems Engineering 97: 323-331.
3. Bradski, G., and A. Kaehler. 2008. Learning OPenCV: computer vision with the OpenCV library. O'Reilly Media, Inc. USA.
4. Chepil, W. S., and F. Bisal. 1943. A rotary sieve method for determining the size distribution of soil clods. Soil Science 56: 95-100.
5. Chimi-Chiadjeu, O., E. Vannier, R. Dusseaux, and O. Taconet. 2011. Influence of Gradient Estimation on Clod Identification on a Seedbed Digital Elevation Model. Environmental & Engineering Geoscience 4: 337-352.
6. Chimi-Chiadjeu, O., S. Le Hégarat-Mascle, E. Vannier, O. Taconet, and R. Dusséaux. 2014. Automatic clod detection and boundary estimation from Digital Elevation Model images using different approaches. Catena 118: 73-83.
7. Czachor, H., and J. Lipiec. 2004. Quantification of soil macroporosity with image analysis. Int. Agrophys 18: 217-223.
8. Faraji-Mahyari, Z., and Sh. Rafiee. 2016. Principles of stereo vision and its applications in automated farming operations. National Conference on Research Findings in Natural and Agricultural Ecosystems Tehran, Iran. (In Farsi).
9. Gardel_Kurka, P. R., and A. A. Diaz-Salazar. 2019. Applications of image processing in robotics and instrumentation. Mechanical Systems and Signal Processing 124: 142-169.
10. Gilliot, J. M., E. Vaudour, and J. Michelin. 2017. Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. Computers and Electronics in Agriculture 134: 63-78.
11. Hartley, R., and A. Zisserman. 2003. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press. New York, USA.
12. Itoh, H., K. Matsuo, A. Oida, H. Nakashima, J. Miyasaka, and T. Izumi. 2008. Aggregate size measurement by machine vision. Journal of Terramechanics 45:137-145.
13. Jafari-Malekabadi, A., M. Khojastehpour, and B. Emadi. 2019. Disparity map computation of tree stereo vision system and effect of canopy shapes and foliage density. Computers and Electronics in Agriculture 156: 627-644.
14. Kemper, W. D., and W. S. Chepil. 1965. Size distribution of aggregates. In C. A. Black et al. (ed). Methods of soil analysis, Part 1. Agronomy 9: 499- 510.
15. Kemper, W. D., T. J. Trout, M. J. Brown, and R. C. Rosenau. 1985b. Furrow erosion and water and soil management. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering 28: 1564- 1572.
16. Kise, M., Q. Zhang, and F. Rovira Mas. 2005. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. Biosystems Engineering 90 (4): 357-367.

17. Lindeberg, T. 1994. Scale-space theory: a basic tool for analyzing structures at different scales. Journal of Applied Statistics 21 (2): 224-270.
18. Loop, C., and Z. Zhang. 1999. Computing rectifying homographies for stereo vision. IEEE, CVPR 125-131.
19. Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision 60 (2): 91-110.
20. Lyles, L., J. D. Dickerson, and L. A. Disrud. 1970. Modified rotary sieve for improved accuracy. Soil Science 109: 207-210.
21. Nasr, H. M., and F. Selles. 1995. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. Soil & Tillage research 34: 61-76.
22. Nasiri, A., H. Mobli, S. Hosseinpour, and Sh. Rafiee. 2017. Creation greenhouse environment map using localization of edge of cultivation platforms based on stereo vision. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 336-349. (In Farsi).
23. Neal-Smith, L., W. Zhang, F. M. Hansen, I. John-Hales, and M. Lionel-Smith. 2018. Innovative 3D and 2D machine vision methods for analysis of plants and crops in the field. Computers in Industry 97: 122-131.
24. Piers, L. F., J. A. Rosa, and L. C. Timm. 2011. Comparison of methods to evaluate soil bulk density. Acta Science. Agron 33 (1): 161-170.
25. Rahimi-Ajdadi, F., Y. Abbaspour-Gilandeh, K. Mollazade, and R. Hasanzadeh-Pakrezaie. 2016. Application of machine vision for classification of soil aggregate size. Soil & Tillage Research 162: 8-17.
26. Riegler, T., C. Rechberger, F. Handler, and H. Prankl. 2014. Image processing system for evaluation of tillage quality. Landtechnik 69: 125-131.
27. Sandri, R., T. Anken, T. Hilfiker, L. Sartori, and H. Bollhalder. 1998. Comparison of methods for determining cloddiness in seedbed preparation. Soil & Tillage Research 45: 75-90.
28. Sankowski, W., M. Wlodarczyk, D. Kacperski, and K. Grabowski. 2017. Estimation of measurement uncertainty in stereo vision system. Image and Vision Computing 61: 70-81.
29. Stafford, J. V., and B. Amber. 1990. Computer vision as a sensing system for soil cultivator control. Proceedings of ImecE, C419/0441 123-129.
30. Stehman, S. V. 1997. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. Remote Sensing of Environment 62: 77- 89.
31. Taconet, O., and V. Ciarletti. 2007. Estimating soil roughness indices on a ridge-and furrow surface using stereo photogrammetry. Soil & Tillage Research 93: 64-76.
32. Taconet, O., R. Dusséaux, E. Vannier, and O. Chimi-Chiadjeu. 2013. Statistical description of seedbed cloddiness by structuring objects using digital elevation models. Computers & Geosciences 60:117-125.
33. Thmosen, L. M., J. E. M. Baartman, R. J. Barneveld, T. Starkloff, and J. Stolte. 2015. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. Soil Journal 1: 399-410.
34. Trucco, E., and A. Verri.1998. Introductory techniques for 3-D computer vision. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
35. Van Bavel, C. H. M. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Science Society of America Journal 14: 20-23.
36. Vannier, E., V. Ciarletti, and F. Darboux. 2009. Wavelet-based detection of clods on a soil surface. Computers & Geosciences 35: 2259-2267.
37. Vannier, E., O. Taconet, R. Dusséaux, and F. Darboux. 2018. A study of clod evolution in simulated rain on the basis of digital elevation models. Catena 160: 212-221.
38. Zhang, X., and W. Dahu. 2019. Application of artificial intelligence algorithms in image processing. Journal of Visual Communication and Image Representation 61: 42-49.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 155-167

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۶۷-۱۵۵

A Modern Approach for Classification of Soil Aggregates based on Stereo Vision

A. Azizi[1], Y. Abbaspour-Gilandeh[2*], T. Mesri Gundoshmian[3], H. Abrishami Moghaddam[4]

Received: 11-09-2019
Accepted: 29-12-2019

Introduction

Stereo vision is an approach to 3D information from multiple 2D views of a scene. The 3D information can be extracted from a pair image, as known stereo pair by estimating the relative depth of points in the scene.

Soil aggregate size distribution is one of the most important issues in the agriculture sector which highly affects energy consumed for preparing the field before planting. Mean weight diameter of clods is a standard metric for determining clod (big aggregates) size. Conventional methods are based on sieving soil samples to calculate the MWD. However, they are faced with several challenges in larger scales and practical applications. Furthermore, due to inherent limitations of soil environment and also being a tedious work, traditional methods would beuse to estimate the metric higher or lower than actual value.

As new methods, researchers are using computer vision techniques as virtual sieve so that the size of clods can be determined via processing digital images which have been taken from soil surface. Although, image-based methods have solved many of previous problems, their accuracy is not so high due to the complexity of soil environment and overlapping colds, and needs to be improved. In order to overcome the mentioned challenges, in the current study stereo vision method was developed so that it is possible to extract the third dimension information as height of clods which helps us to categorize clods into their own class.

Materials and Methods

In this study, the W3-Fujifilm stereo camera equipped with two 10-megapixel CCD sensors for both left and right lenses, and baseline spacing of 7.5 cm was used. The distance between the camera lens and the ground was also set to 60 cm.

In order to get three components of soil clods including (x, y, z), point cloud was investigated. For this, local features were extracted using a SIFT feature detector. The SIFT algorithm is robust against scale, rotation and illumination changes, so that these specifications have made it as a strong tool in the field of stereo vision. Then, the extracted features (keypoints) were matched between two stereo pair images by means of Brute Force algorithm and the location of all corresponding points were determined and point cloud was obtained.

At the final stage, three features including length, width and height of all six classes of soil clods were entered into a linear classifier entitled discriminant analysis. This classifier as a linear separator classified these six classes based on appropriate functions in a 5 dimensional space.

Results and Discussion

Results of classification model showed that the height (thickness) of clods have more distinguishing different soil clods. The reason for this refers to the event of overlapping, because most of clods were touched each other after sieving. Consequently, the length and width of clods had not significant effect in soil aggregates classification.

In order to analysis the result of soil aggregate classification, confusion matrix was calculated and the overall classification accuracy was achieved 83.7%. The lowest and highest accuracy were obtained for class 1 (the littlest class) and class 6 (the biggest class), respectively due to their low and high height from the soil surface.

Conclusions

In this research, the basic geometrical features including length, width and height were extracted from stereo pair digital images via stereo vision techniques to classify six classes of soil clods. This aim was reached by 3-D reconstruction of image data, so that the height of each image as the third component of (x,y,z) was obtained as well as the length and width. The results of classification indicated that the stereo vision technique had the

1- PhD Candidate, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
4- Professor, Department of Biomedical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: abbaspour@uma.ac.ir)

satisfactory performance in determining the aggregate size distribution which is one of the most important indices for tilled soil quality.

Keywords: Mean Weight Diameter, Soil clod, Stereo vision, Tillage

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 169-185

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۸۵-۱۶۹

مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار با استفاده از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی

محمد رحمتیان[۱]، رضا یگانه[۲*]، محمد امین نعمت اللهی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱

چکیده

در این پژوهش، نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار، به دلیل اهمیت و تأثیرگذاری در برخی موارد همچون انتخاب تراکتور و به‌دست آوردن مدلی دقیق برای پیش‌بینی این نیروها، مورد بررسی قرار گرفتند. اثرات عمق خاک‌ورزی در پنج سطح (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) و نیز سرعت پیشروی در پنج سطح (۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه) بر نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار (کششی، عمودی و جانبی) به‌صورت شبیه‌سازی شده به روش المان محدود به‌دست آمده و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروها به‌کار گرفته شدند. نتایج مقایسه این دو روش نشان داد که این دو روش به خوبی می‌توانند نیروهای مورد نظر را پیش‌بینی کنند، اما روش شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به روش دیگر برای پیش‌بینی نیروها داشت. نتایج داده‌های به‌دست آمده حاکی از آن است که افزایش عمق خاک‌ورزی از ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ متر بر ثانیه، منجر به افزایش غیر خطی نیروهای کششی، عمودی و جانبی به‌ترتیب به میزان ۶۶/۵۵٪، ۶۸/۴۷٪ و ۶۴/۷۶٪ می‌شود. با استفاده ازمدل‌هایی که توسط شبکه عصبی مصنوعی به‌دست آمده که دقت نسبتاً خوبی دارند، می‌توان قبل از ورود به مزرعه با توجه به عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی مد نظر با توجه به بازه‌های تعریف شده برای هر کدام در این پژوهش، مقادیر نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار را بررسی و به‌دست آورد. سپس با استفاده از این نیروها می‌توان به‌طور مثال تراکتوری را انتخاب نمود که توان کشش این گاوآهن را در شرایط تعریف شده (عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی) مورد نظر داشته باشد. به همین خاطر توصیه می‌گردد که از مدل شبکه عصبی توسعه داده شده در این پژوهش، استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی، شبیه‌سازی، گاوآهن برگرداندار، مدل‌سازی

مقدمه

خاک‌ورزی یک عملیات بسیار مهم و تأثیرگذار در میزان رشد و بهره‌وری محصولات کشاورزی می‌باشد. لازم است برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، هوادهی بهتر، نفوذپذیری و توسعه ریشه در عملیات خاک‌ورزی شرایطی را فراهم نمود. با این‌حال در خاک‌ورزی اولیه، به‌خصوص زمان استفاده از گاوآهن برگردان‌دار، نیاز به انرژی و زمان زیادی دارد که ممکن است استفاده از آن برای پژوهشگران در پژوهش‌های خود، زمان‌بر و پُرهزینه باشد (Ibrahmi *et al*., 2015b). برخی از پژوهشگران برای آزمایش بر روی شرایط کار از آزمایش‌های فیزیکی بهره می‌برند (Sahu and Raheman, 2006; Al-Suhaibani and Ghaly, 2010)، که در چنین پژوهش‌هایی صحت نتایج به‌دست آمده وابسته به دقت ابزار اندازه‌گیری دارد. در صورتی که برخی دیگر از پژوهشگران، به منظور کاهش زمان تحقیق و به دنبال آن کم کردن هزینه‌ها و بالا بردن دقت نسبی نتایج پژوهش، از شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌کنند (Shmulevich *et al*., 2007; Ibrahmi *et al*., 2015a). همچنین مطالعه‌های زیادی نشان می‌دهند که مدل‌سازی نیروهای وارد بر خاک‌ورز، راهکاری مناسب برای برآورد عملکرد ابزارهای مختلف خاک‌ورزی و بهبود هندسه‌ی این ابزار می‌باشد (Durairaj and Balasubramanian, 1997; Chen *et al*., 2013). با این‌حال، کلید موفقیت در شبیه‌سازی عددی عملیات خاک‌ورزی، شبیه‌سازی دقیق ابزار مورد نظر بر اساس مفروضات درست و همچنین روش‌های مرتبط است. پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورز نقش مؤثری در طراحی ابزار خاک‌ورزی دارد. جمع‌آوری داده‌های مربوط به نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورزی تحت شرایط مزرعه‌ای متفاوت، یک کار زمان‌بر و پر هزینه می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی نیروهای ابزار خاک‌ورزی به‌منظور دستیابی به عملکرد بهتر ابزار برای طراح و کاربر بسیار مهم می‌باشد. نیروهای وارد بر ابزار خاک‌ورز تابعی از ویژگی‌های خاک، عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی ابزار می‌باشد (Arvidsson *et al*., 2004). تحقیق‌های زیادی در زمینه پیش‌بینی شرایط عملیاتی ابزار خاک‌ورز به روش‌های تجربی (مزرعه و انباره خاک) و ریاضی (شبیه‌سازی و مدل‌سازی) انجام گرفته است. به‌طور

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام
۳- استادیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email: r.yeganeh@ilam.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.75672

مثال در پژوهش‌هایی که به روش تجربی انجام گرفته‌اند تیمارهایی نظیر عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر نیروهای وارد بر گاوآهن‌ها، بیان کرده‌اند و نشان داده‌اند که با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، نیروهای وارد بر گاوآهن نیز افزایش می‌یابد (Sahu and Raheman, 2006; Al-Suhaibani and Ghaly, 2010; Akbarnia *et al*., 2014). همچنین تعدادی از پژوهشگران نیز برهم‌کنش خاک و تیغه را با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزارهای مورد نظر شبیه‌سازی کرده و تیمارهای عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی را در نظر گرفته و دقت روش‌های شبیه‌سازی را بررسی نمودند (Abo-Elnor *et al*., 2004; Hosseini *et al*., 2016; Salar and Karparvarfard, 2017; Rahmatian *et al*., 2018). در پژوهشی برهم‌کنش خاک و تیغه با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی و رفتار خاک، الاستیک در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد المان‌ها و عرض جعبه خاک مدل شده، بسیار مؤثر در نیروهای خروجی از نرم‌افزار می‌باشد (Abo-Elnor *et al*., 2004). در پژوهشی دیگر نشان داده شد که سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری بر مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز مرکب مؤثر بوده و با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، مقاومت کششی نیز افزایش یافت. افزایش حجم خاک جابه‌جا شده و شتاب وارده به خاک، دلیل افزایش مقاومت کششی گزارش شد (Sahu and Raheman, 2006). همچنین در پژوهش دیگری، تأثیر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر نیروی کششی و عمودی یک ابزار خاک‌ورز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عمق خاک‌ورزی و یا سرعت پیشروی، مقاومت کششی و نیروی عمودی نیز افزایش یافت (Al-Suhaibani and Ghaly, 2010). در پژوهشی نیز اثر زوایای گاوآهن برگردان‌دار بر مقاومت کششی آن به روش ریاضی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus و روش تجربی در انباره خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش ریاضی مطابقت خوبی با روش تجربی داشت و روش المان محدود به خوبی توانست مقاومت کششی گاوآهن برگردان‌دار را پیش‌بینی کند (Bentaher *et al*., 2013). در پژوهش دیگری، اثر عمق کار و سرعت پیشروی بر مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز باریک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش گزارش شد که اثر عمق کار و سرعت پیشروی بر مقاومت کششی معنادار بوده و با افزایش آن‌ها، مقاومت کششی خاک‌ورز نیز افزایش یافت (Akbarnia *et al*., 2014). پژوهش‌های فراوانی وجود دارد که از روش مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی مقادیر مورد نظر بهره گرفته شده است. در پژوهشی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مربوط به مقاومت مکانیکی خاک از روش‌های رگرسیون چند متغیره، الگوریتم ژنتیکی و پتانسیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شد و این سه روش از نظر دقت و کارآیی با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که سه روش مذکور به خوبی می‌توانند پارامترهای مربوط به مکانیک خاک را پیش‌بینی کنند، اما روش پتانسیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) دقت و کارآیی مناسب‌تری نسبت به دو روش دیگر داشت (Hosseini *et al*., 2016). همچنین در پژوهش دیگری از روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی اثر هندسه بال بر نیروی کششی و عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار استفاده شد. در این پژوهش تیمارهای مورد نظر شامل عمق خاک‌ورزی، زاویه تمایل و زاویه حمله بال بود. مقادیر بهینه برای این تیمارها به‌ترتیب ۵ سانتی‌متر، ۱۱/۱۰ درجه و ۱۹/۴۶ درجه گزارش گردید (Salar and Karparvarfard, 2017). در پژوهشی نیز برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط تیغه قلمی فولادی با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره، مدل‌هایی به‌دست آمد و نشان داده شد که مقادیر بهینه‌ی سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت خاک به‌ترتیب ۵ کیلومتر بر ساعت، ۳۶ درجه و ۱۴/۸ درصد رطوبت وزن خشک بودند (Rahmatian *et al*., 2018). در تحقیق‌هایی که ذکر شد به‌راحتی می‌توان اهمیت بالای شرایط کاری ابزارهای خاک‌ورز و نیروهایی که به این ابزارها وارد می‌گردد را درک نمود. همچنین نزدیک بودن نتایج روش‌های تجربی با نتایجی که از روش‌های عددی به‌دست آمده، نشان از بالا بودن دقت برخی از روش‌های عددی برای استفاده در پژوهش‌ها و طراحی ادوات خاک‌ورز می‌باشد. با توجه به استفاده‌ی فراوان از گاوآهن برگردان‌دار در خاک‌ورزی مرسوم و بالا بودن هزینه‌ی تحقیق‌های تجربی و زمان‌بر بودن آن‌ها و همچنین با استفاده از نتایجی که از پژوهش‌های گذشته به‌دست آمد، لزوم به‌کار بردن روش‌های عددی در این امور نمایان است. به علاوه با توجه به این‌که روش‌های عددی، کمتر برای گاوآهن برگرداندار مورد استفاده قرار گرفته است، به همین دلیل، هدف از این پژوهش ارائه راه‌حلی برای طراحی گاوآهن برگرداندار در نرم‌افزارهای طراحی، به‌دست آوردن معادلاتی به روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار اعم از مقاومت کششی، نیروی عمودی و نیروی جانبی با استفاده از تیمارهای عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی و مقایسه و انتخاب بهترین روش از بین دو روش مورد نظر در این پژوهش می‌باشد.

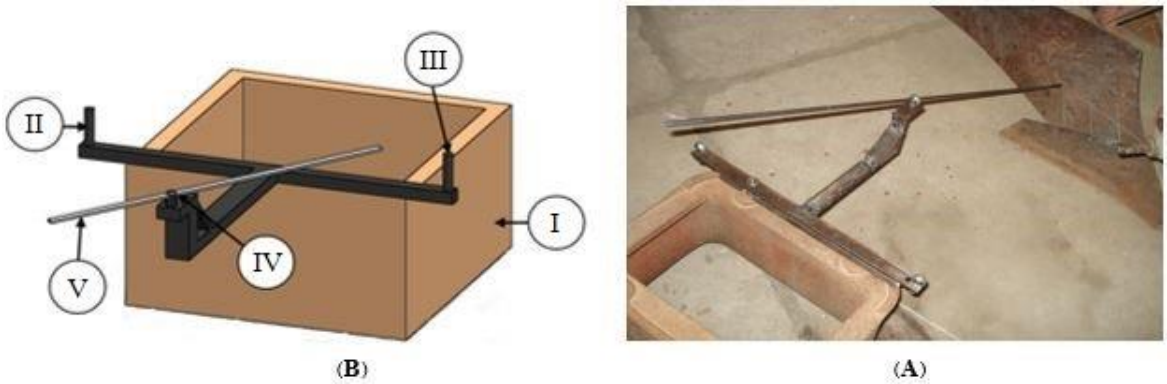
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، متغیرهای مستقل که به‌عنوان تیمارهای آزمایش در نظر گرفته شدند عبارت از پنج سطح سرعت پیشروی (۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه) و پنج سطح عمق خاک‌ورزی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) و همچنین متغیرهای وابسته نیز عبارت از نیروی کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی وارد بر تیغه بر حسب کیلونیوتن بودند.

شبیه‌سازی صفحه برگردان گاوآهن برگرداندار

مدل‌های گوناگونی برای صفحه برگردان از جمله مدل‌های استوانه‌ای، نیمه استوانه‌ای، پیچیده و نیمه پیچیده وجود دارد. در بین این صفحه برگردان‌ها، صفحه برگردان استوانه‌ای به دلیل این‌که دارای انحنای متوسطی در طول خود می‌باشد، خاک راحت‌تر بر روی آن حرکت کرده و نیروی کمتری از طرف خاک به صفحه برگردان وارد می‌گردد که موجب حرکت راحت‌تر تراکتور در مزرعه و همچنین انجام بهتر برگردان شدن خاک می‌شود (Srivastava, 2006). همچنین صفحه برگردان‌های استوانه نیز می‌توانند در عمق بیشتری نسبت به دیگر مدل‌های صفحه برگردان، عملیات خاک‌ورزی را انجام دهند (McKyes, 1985; Srivastava, 2006). به همین دلیل این نوع صفحه برگردان در بین کشاورزان از محبوبیت بالایی برخوردار بوده و از آن در بیشتر عملیات‌های خاک‌ورزی مرسوم استفاده می‌شود (Ucgul *et al*., 2017). به همین خاطر، ابتدا برای انجام شبیه‌سازی صفحه برگردان، گاوآهن برگرداندار با صفحه برگردان استوانه‌ای ساخت شرکت آلپلر[1] کشور ترکیه انتخاب شد. این گاوآهن دارای سه خیش با جنس صفحه برگردان St37-2، شاسی ثابت، اتصال از نوع سوار و وزن کل ۵۲۰ kg بود.

برای شبیه‌سازی صفحه برگردان از مختصات هندسی نقاط گوناگونی از آن و نیز ترسیم آن در نرم‌افزار طراحی Solidworks2016 استفاده گردید. به‌منظور به‌دست آوردن مختصات هندسی نقاط مد نظر، یک دستگاه اندازه‌گیری طراحی و ساخته شد (شکل ۱ –A). نحوه‌ی کار دستگاه بر این اصل استوار بود که مختصات هندسی یک نقطه را می‌توان با توجه به فاصله‌ی آن از سه نقطه‌ی معین در فضا که یکی از آن‌ها به‌عنوان مبداء در نظر گرفته می‌شود، به‌دست آورد که البته باید مختصات هندسی آن سه نقطه نیز معلوم باشند (Miron *et al*., 2002). دستگاهی که به این منظور طراحی و ساخته شد، سه رأس ثابت داشت که این سه رأس همان سه نقطه‌ی فضایی معلوم بودند. یک خط‌کش مدرج نیز بر روی دستگاه تعبیه شده بود که با توجه به طرح خاص خود قابلیت اندازه‌گیری فاصله‌ی هر نقطه مجهول مورد نیاز نسبت به هرکدام از سه نقطه‌ی معلوم را داشت (شکل ۱–B).

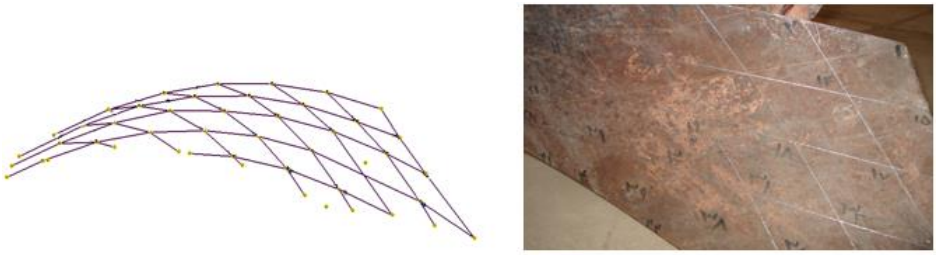


شکل ۱– A– اندازه‌گیری مختصات هندسی فضایی، B– شماتیک دستگاه اندازه‌گیری مختصات هندسی فضایی (I: پایه ثابت. II، III و IV: نقاط فضایی معلوم. V: خط‌کش مدرج)

Fig.1. A- Spatial geometric coordinate device, B- Schematic of spatial geometric coordinate measuring device (I: Fixed base. II, III and IV: Known spatial points. V: Graded ruler)

با توجه به روش پیش گرفته شده، هر تعداد نقطه‌ی تصادفی را می‌توان برای ترسیم رویه صفحه برگردان مورد استفاده قرار داد. اما با توجه به نوع نرم‌افزار مورد استفاده، برای ساده‌تر کردن مراحل شبیه‌سازی لازم است نقاط به نحوی انتخاب شوند که منحنی‌های حاصل از این نقاط، درنهایت متشکل از چند مقطع عرضی[2] و چند مسیرگذرا[3] از این مقاطع باشند. به همین منظور، ابتدا در خیش مورد نظر، یک دسته خط موازی با لبه‌ی پیشانی به‌عنوان مقطع‌های عرضی و دسته‌ی دیگر هم موازی با لبه‌ی بالایی صفحه برگردان به‌عنوان مسیرهای گذرا، به‌صورت شطرنجی رسم شد. محل تقاطع این خط‌ها با هم، همان نقاط مجهول مورد استفاده در ترسیم صفحه برگردان شدند (شکل ۲–A). برای به‌دست آوردن مختصات نقاط مجهول، دستگاه اندازه‌گیری بر روی یک پایه‌ی سنگین ثابت شد (شکل ۱–B,A) و فاصله‌ی هر نقطه‌ی مجهول از صفحه برگردان به‌طور جداگانه از هر کدام از سه نقطه‌ی ثابت بر روی دستگاه اندازه‌گیری به‌دست آمد. با توجه به این‌که مختصات خود سه نقطه‌ی ثابت بر روی دستگاه معلوم بود، با داشتن فاصله‌ی نقاط از سه نقطه‌ی ثابت، مختصات هندسی نقاط مجهول قابل محاسبه شد.

1- Alpler company
2- Section
3- Rail



(B) (A)

شکل ۲- A- مشخص کردن نقاط مجهول بر روی صفحه برگردان، B- صفحه شطرنجی به‌دست آمده در نرم‌افزار طراحی

Fig.2. A- Specify the passive points on the moldboard, B- The grid plate obtained in the design software

نقطه‌های به‌دست آمده از صفحه برگردان در قسمت سه‌بعدی نرم‌افزار طراحی وارد شدند. با توجه به این‌که در زمان انتخاب نقاط نماینده‌ی صفحه، روند خاصی در پیش گرفته شده بود، هر تعداد از آن‌ها بر روی یک منحنی قرار داشتند. زمانی‌که منحنی‌ها به‌طور کامل رسم شدند، یک صفحه‌ی شطرنجی شکل نیز در نرم‌افزار به‌وجود آمد (شکل ۲-B). در نرم‌افزار طراحی مورد استفاده در این پژوهش، خطوط موازی پیشانی که به‌عنوان مقطع عرضی بودند، حرکت داده شدند و ضمن عبور از بقیه‌ی خطوط دسته‌ی خود، از مسیرهای گذرا که موازی با لبه بالایی صفحه برگردان بودند، به‌عنوان راهنما استفاده کرده و یک صفحه‌ی سه‌بعدی که همان صفحه برگردان مورد نظر بود، رسم شد (شکل ۳-A).

شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی

یکی از دلایلی که از فرآیند شبیه‌سازی در این پژوهش استفاده شد، عدم وجود امکاناتی بود که هم‌زمان بتوان نیروی کششی، عمودی و جانبی وارد بر گاوآهن برگرداندار را به‌دست آورد و همچنین دلیل دیگر این‌که، طبق پژوهش‌های گذشته، نتایجی که از شبیه‌سازی عددی به‌دست می‌آید با درصد اختلاف ناچیزی، نزدیک به نتایج آزمایش‌های تجربی در مزرعه یا انباره خاک می‌باشند که این کار مستلزم شبیه‌سازی دقیق ابزارها و عوامل تأثیرگذار بر عوامل در نظر گرفته شده می‌باشد (Abo-Elnor *et al*., 2004; Bentaher *et al*., 2013; Ibrahmi *et al*., 2015a; Ucgal *et al*., 2017). بر اساس این دلایل، در این تحقیق برای شبیه‌سازی برهم‌کنش گاوآهن برگرداندار و خاک از روش اجزای محدود[1] در نرم‌افزار ABAQUS CAE 2016 استفاده شد. برای شروع کار، تیغه‌ی شبیه‌سازی شده وارد نرم‌افزار Abaqus گردید و برای کم کردن محاسبات به آن قید صلب داده شد تا از تغییر حالت‌های گاوآهن در هنگام حرکت در داخل خاک صرف‌نظر شود. نوک تیغه نیز نوان نقطه مرجع در نظر گرفته شد. برای معرفی مواد به‌کار رفته در صفحه برگردان گاوآهن برگرداندار شبیه‌سازی شده در این پژوهش، از استاندارد مورد نظر، خواص مکانیکی جنس صفحه برگردان گاوآهن مورد نظر که از جنس St37-2 بود، استخراج و استفاده گردید (AISI Standard, 2011). برای به‌دست آوردن چگالی ظاهری گاوآهن مورد نظر، وزن آن با استفاده از ترازوی باسکولی مدل اعتماد ۳۰۱ ساخت ایران و حجم گاوآهن نیز با استفاده از نرم‌افزار Solidworks2016 که برای شبیه‌سازی گاوآهن از آن بهره گرفته شده بود، اندازه‌گیری گردیدند. ویژگی‌های مکانیکی گاوآهن مورد استفاده در این پژوهش شامل چگالی ظاهری ($kg.cm^{-3}$)، تنش نهایی (MPa)، تنش تسلیم (MPa)، مدول کشسانی (GPa) و نسبت پواسون به‌ترتیب ۷۸۶۰، ۲۳۵، ۱۹۸، ۲۰۰ و ۰/۳۰ بود.

جعبه‌ی خاک در نرم‌افزار، به طول ۵ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۱ متر شبیه‌سازی شد. خاک با مدل کشسان خمیری[2] دراکر-پراگر، با معیار برش خطی تعریف شد (Shmulevich *et al*., 2007; Li *et al*., 2013). این مدل را می‌توان به‌صورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$F = t - p\tan\xi - d \quad (۱)$$

که در آن F (kPa)، t (kPa)، p (kPa)، ξ (°) و d (kPa) به‌ترتیب تابع تسلیم، تنش انحرافی، تنش نرمال، زاویه اصطکاک داخلی و هم‌چسبی ذرات ماده می‌باشند. همچنین تنش‌های نرمال (p) و انحرافی (t) به‌صورت رابطه‌های زیر بیان می‌شوند (Ibrahmi *et al*., 2015a; Jafari and TavakoliHashjin, 2016).

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (۲)$$

$$t = \frac{1}{2}q\left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K}\right)\left(\frac{r}{q}\right)^3\right] \quad (۳)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (۴)$$

$$r^3 = -(\sigma_1 - \sigma_3)^3 = -q^3 \quad (۵)$$

که در رابطه (۳)، K عبارت از نسبت تنش تسلیم فشاری به تنش تسلیم در آزمون تست سه محوری می‌باشد (۰/۷۷۸≤K≤۱) (ABAQUS, 2016). همچنین در روابط (۳)، (۴) و (۵)، q تنش معادل وون مایسز و r^3 نیز عکس تنش انحرافی می‌باشند.

1- Finite element method (FEM)

2- Elasto-plastic

پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی خاک در این پژوهش که توسط Ibrahmi *et al*., (2015a) ارائه شده بودند، در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی به‌کار برده شده در شبیه‌سازی خاک
Table 3- Physical and mechanical properties used in soil simulation

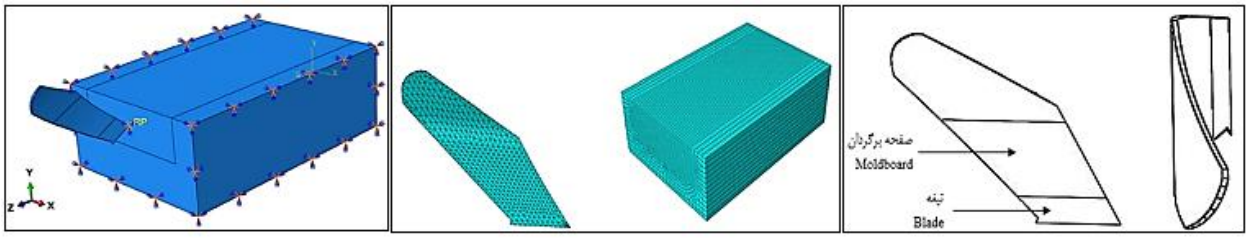
ویژگی‌ها **Properties**	واحد **Unit**	مقدار **Value**
مدول کشسانی Young modulus	MPa	7.50
تنش پیش تراکمی Precompression stress	MPa	0.14
نسبت پواسون Poison's ratio	——	0.30
چگالی ظاهری Density	$kg.m^{-3}$	1.60
زاویه اصطکاک داخلی Internal friction angle	degree	44
هم‌چسبی ذرات خاک Cohesion	kPa	4.08
زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر Internal friction angle Drucker-Prager	degree	30.25
نسبت تنش جریان Flow stress ratio	——	1
زاویه اتساع Dilatation angle	degree	0

با توجه به گسیخته شدن خاک هنگام عبور گاوآهن و جهت جلوگیری از انباشته شدن المان‌ها در جلوی گاوآهن و پیغام خطا از نرم‌افزار، از آسیب برشی[1] در تعریف خصوصیات خاک استفاده گردید. در این بخش، آستانه جابه‌جایی در شکست تعریف شد که نرم‌افزار با رسیدن کرنش شکست المان‌های خاک به مقدار بیشینه، آن‌ها را به‌صورت خودکار از تحلیل حذف می‌نمود. به‌منظور المان‌بندی خاک و گاوآهن برگرداندار، به‌دلیل منظم بودن شکل جعبه خاک از المان C3D8R که یک المان مکعبی سه‌بعدی می‌باشد، برای المان‌بندی آن استفاده گردید (شکل ۳-B). در بخش‌هایی از خاک که پیش‌بینی می‌شد در اثر تماس با ابزار خاک‌ورز در معرض گسیختگی قرار گیرند، شبکه‌بندی ریزتر[2] نیز انجام شد. همچنین برای المان‌بندی گاوآهن برگرداندار به‌دلیل نامنظم بودن شکل آن، از المان C3D10 که یک المان هرمی سه‌بعدی می‌باشد، استفاده گردید (شکل ۳-B). برای خاک ۶۹۰۷۵ اِلمان و برای تیغه ۲۶۷۱ اِلمان به‌وجود آمد. پس از المان‌بندی، مونتاژ ابزار و خاک انجام شد و موقعیت آن‌ها طوری انتخاب گردید که گاوآهن برگرداندار در ابتدای جعبه خاک و در عمق مورد نظر قرار گرفت (شکل ۳-C).

به‌دلیل این‌که گاوآهن در حال حرکت درون خاک است و تنش‌های بین خاک و گاوآهن در هر زمان از جابه‌جایی می‌تواند متفاوت باشند، از حل‌کننده دینامیکی[3] برای استفاده از اثر زمان بر نیروها و تنش‌ها استفاده گردید (Jafari and TavakoliHashjin, 2016) و زمان آن ۶ ثانیه در نظر گرفته شد. اصطکاک بین خاک و ابزار خاک‌ورز نیز با رفتار مماسی و نوع تماس عمومی با ضریب اصطکاک[4] ۰/۳۸ تعریف شد (Ibrahmi *et al*., 2015a). زمانی که اصطکاک بین یک جسم صلب و یک جسم تغییر شکل‌پذیر تعریف می‌شود، جسم صلب به‌عنوان سطح پایه و جسم تغییر شکل‌پذیر به‌عنوان هدف انتخاب می‌گردد (Abo-Elnor, 2004; Ibrahmi *et al*., 2015a; Jafari and TavakoliHashjin, 2016). به همین دلیل چون هدف، فرو رفتن ابزار در خاک بود، لذا برای سطوحی از ابزار که در تماس مداوم با خاک قرار داشتند، اصطکاک سطح به سطح[5] استفاده شد. به نحوی که سطوحی از گاوآهن به‌عنوان سطح پایه و بخشی از خاک که در تماس با گاوآهن قرار داشت، به‌عنوان هدف انتخاب گردید. شرایط مرزی[1] در این مسئله به این صورت

1- Shear damage
2- Node region
3- Dynamic Explicit
4- Friction coefficient
5- Surface to surface

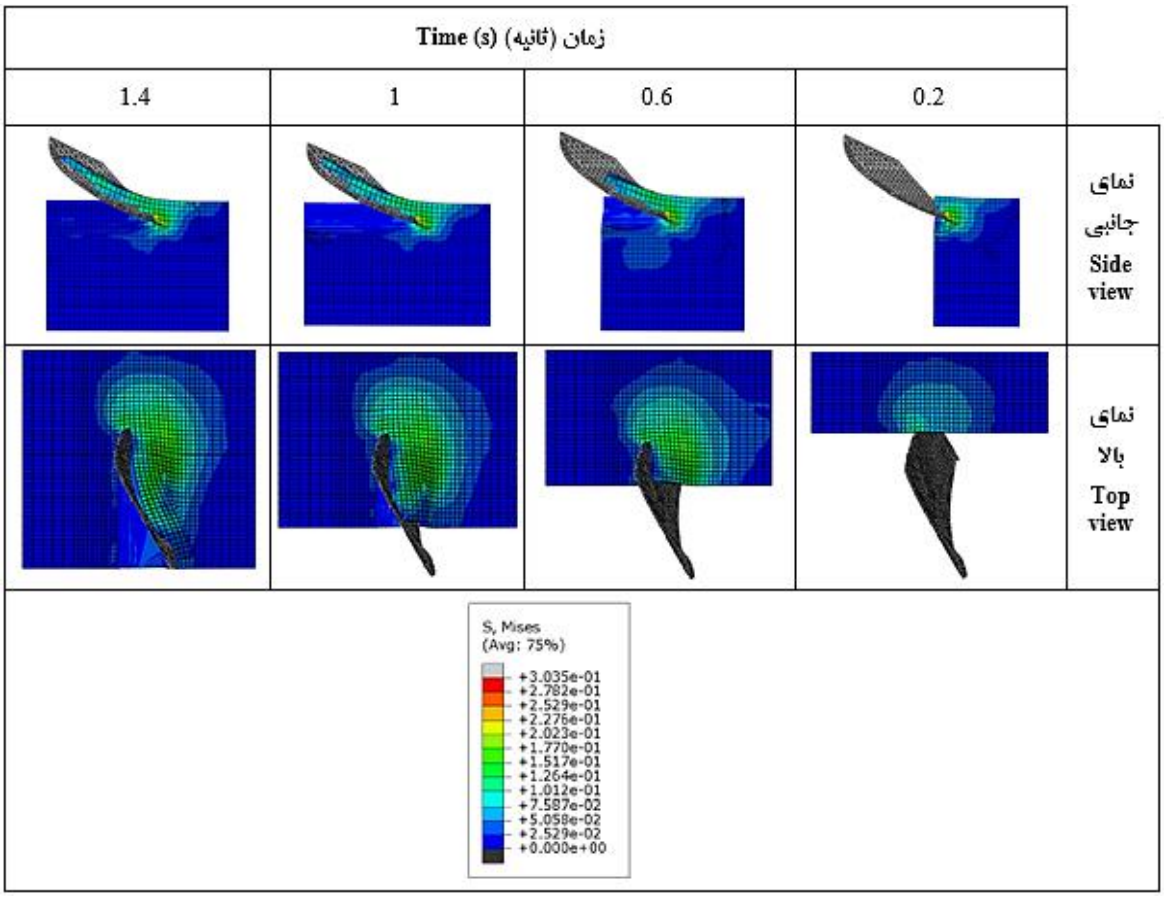
اعمال شدند که وجه پایینی و وجوه جانبی خاک در تمامی جهت‌ها ثابت گردید. نقطه مرجع ابزار خاک‌ورز در تمامی جهت‌ها به غیر از جهت z که جهت حرکت ابزار بود، نیز ثابت شد (شکل ۳-C). پس از انجام تمام مراحل ذکر شده، برنامه مورد نظر اجرا گردید (شکل ۴) و پس از طی عملیات شبیه‌سازی برهم‌کنش گاوآهن برگرداندار و خاک، نتایج نیروهای پیش‌بینی شده وارد بر گاوآهن برگرداندار در حین انجام عملیات خاک‌ورزی استخراج گردید.



(C) (B) (A)

شکل ۳- A- صفحه برگردان به‌دست آمده در نرم‌افزار طراحی، B- المان‌بندی خاک و گاوآهن برگردان‌دار، C- مونتاژ گاوآهن برگردان‌دار و خاک و قیدهای ایجاد شده

Fig.3. A- Moldboard obtained in the design software, B- Element of soil and moldboard plough, C- Assembly of moldboard plough and soil and constraints created



شکل ٤- اجرای عملیات شبیه‌سازی برهم‌کنش گاوآهن برگرداندار و خاک و همچنین نمایش ترازهای تنش

Fig.4. Simulation of moldboard plough and soil interaction, as well as display of stress levels

1- Boundary conditions

پارامترهای توصیفی آماری

برای بررسی آماری داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی گاوآهن برگرداندار تحت تأثیر تیمارهای مورد نظر در این پژوهش، از برخی پارامترهای توصیفی آماری نظیر میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب غیر یکنواختی استفاده شد. این پارامترها دیدی کلی از داده‌های به‌دست آمده و همچنین صحت و دقت آن‌ها را از نظر آماری بیان می‌کنند. پارامترهای آماری میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب غیر یکنواختی در روابط (۶) تا (۹) بیان شده‌اند (Shafaei and Kamgar, 2017).

$$M = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N} F_i \qquad (۶)$$

$$SD = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N}\left(F_i - M\right)} \qquad (۷)$$

$$CV = \frac{SD}{M}\times 100 \qquad (۸)$$

$$CNU = \left[\frac{1}{M}\left(F_{max} - F_{min}\right)\right]\times 100 \qquad (۹)$$

در روابط (۶) تا (۹)، M، N، F_i، SD، CV، CNU، F_{min} و F_{max} به‌ترتیب میانگین داده‌ها، تعداد داده‌ها، نیروی به‌دست آمده (نیروی کششی، نیروی عمودی یا نیروی جانبی)، انحراف معیار، ضریب تغییرات، ضریب غیر یکنواختی[1]، کمترین مقدار نیرو و بیشترین مقدار نیرو می‌باشند.

مدل‌سازی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار

در این قسمت برای مدل‌سازی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار، از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. به دلیل این‌که این دو روش، توانایی بالایی برای پیش‌بینی روابط خطی و غیر خطی در بین متغیرهای مورد نظر دارند، می‌توان آن‌ها را از نظر کاربردی با یکدیگر مقایسه نمود (Maran and Priya, 2015). به همین دلیل، توانایی دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار سنجیده و سپس با یکدیگر مقایسه شدند و در آخر مناسب‌ترین روش از نظر بیشترین توانایی برای پیش‌بینی متغیرها، انتخاب گردید.

مدل‌سازی به روش سطح پاسخ

یکی از روش‌هایی که برای مدل‌سازی متغیرهای آزمایشی در این پژوهش استفاده شد، روش سطح پاسخ[2] بود. این روش یکی از روش‌های طراحی آزمایش می‌باشد (Mostafaei *et al*., 2016). برای بهره‌گیری از این روش از نرم‌افزار Design-Expert 7.0.0 در این پژوهش استفاده شد. به دلیل این‌که عملیات خاک‌ورزی به‌صورت شبیه‌سازی شده انجام گرفته بود، عملاً تکراری برای آزمایش‌های مد نظر وجود نخواهد داشت. بنابراین می‌بایست تمام داده‌های موجود برای مدل‌سازی به‌کار گرفته می‌شدند. به همین خاطر در روش سطح پاسخ از طرح Historical Data استفاده گردید. با توجه به این‌که در روش سطح پاسخ برای مدل کردن هر یک از متغیرهای آزمایشی سه سطح و یا بیشتر از آن متغیر نیاز است (Mostafaei *et al*., 2016)، در این پژوهش نیز از ابتدا برای هر متغیر آزمایشی، پنج سطح در نظر گرفته شد. پس از وارد کردن سطوح و متغیرهای آزمایشی، داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی گاوآهن برگرداندار به‌ترتیب در نرم‌افزار وارد شدند. بر اساس شاخص‌های آماری نظیر ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین معادل[3] (R^2a) و ضریب تعیین جزئی[4] (R^2p) که از داده‌های وارد شده در نرم‌افزار به‌دست آمدند، بهترین مدل از بین مدل‌های خطی، دوفاکتوره و درجه دوم برای مدل‌سازی نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار به روش سطح پاسخ انتخاب گردید. سپس به‌صورت کلی معادله‌ای که از طرح مورد نظر برای هر یک از نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار به‌دست آمد به‌صورت رابطه (۱۰) بود.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3}\beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3}\beta_i X_{ii}^2 + \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=i+1}^{3}\beta_{ij} X_i X_j \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، y پاسخ پیش‌بینی شده (متغیرهای وابسته)، β_0 ضریب ثابت، β_i ضریب خطی برای تیمارهای آزمایش، β_{ii} ضریب تأثیر درجه دوم، β_{ij} ضریب تأثیر متقابل و X_i و X_j متغیرهای مستقل می‌باشند (Mostafaei *et al*., 2016). رابطه‌ی بین متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آن‌ها در مدل با متغیرهای وابسته به کمک آنالیز واریانس به‌طور جداگانه برای هر متغیر وابسته، مورد بررسی قرار گرفتند و صفاتی که معنی‌دار نشده بودند، از روند مدل‌سازی حذف و بقیه صفات معنی‌دار شده برای مدل‌سازی نیروهای مورد نظر، در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. پس از انجام تمام مراحل، مدل‌ها برای نیروهای کششی، عمودی و جانبی به‌طور مجزا به‌دست آمدند.

مدل‌سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی

روش دیگری که برای مدل‌سازی در این پژوهش به‌کار گرفته شد، روش شبکه عصبی مصنوعی بود. جهت مدل‌سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی، پارامترهای ورودی (عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی) و خروجی (نیروی‌های کششی، عمودی و جانبی) در این پژوهش، از یک شبکه عصبی چند لایه[5] به نام شبکه عصبی انتشار برگشتی[6] استفاده شد. پس از انجام محاسبات با ساختارهای

1- Ccoefficient of non-uniformity
2- Response surface methodology (RSM)
3- Adjusted determination of coefficient
4- Partial determination of coefficient
5- Multi layer perceptron
6- Neural network of back propagation

مختلف شبکه عصبی و محاسبه خطا، آموزش شبکه عصبی انتشار برگشتی با دو لایه پنهان که تابع انتقال و الگوریتم بهینه‌سازی آن به‌ترتیب سیگموئیدی[1] و لونبرگ-مارکوارت[2] بودند، انجام شد. در لایه پنهان اول و دوم به‌ترتیب ۶ و ۸ نورون به‌کار برده شد. ساختار کلی شبکه انتشار برگشتی به‌کار گرفته شده در این پژوهش به‌صورت طرح‌واره در شکل ۵ نشان داده شده است.

شبکه بر اساس دو لایه پنهان با دو متغیر ورودی و سه پارامتر خروجی توسعه داده شد. داده‌های ورودی به‌صورت یکپارچه به شبکه ارائه شدند و به منظور کاهش خطای کلی، شبکه انتشار برگشتی چند بار تکرار شد (Bishop, 2006). چندین پارامتر وجود دارد که می‌تواند کارآیی شبکه را برای پیش‌بینی، تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین برای دستیابی به بهترین ساختار شبکه با بیشترین توان پیش‌بینی، ترکیبی از پارامترها (ورودی و خروجی توابع انتقال، تعداد نورون‌ها در لایه پنهان و تعداد دوره‌های آموزش شبکه) با استفاده از روش آزمون و خطا تنظیم شد (Shafaei *et al*., 2018). جهت اعتبارسنجی مدل از روش اعتبارسنجی متقابل[3] (ضربدری) چند لایه‌ای (k=5) استفاده گردید.

ارزیابی عملکرد مدل‌های به‌دست آمده و انتخاب بهترین مدل

مدل‌هایی که در این پژوهش برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار به‌دست آمد، با استفاده از معیارهای عملکردی آماری مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تعیین دقت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل رگرسیونی از ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده، استفاده شد (رابطه ۱۱). همچنین برای تعیین میانگین مطلق و نسبی خطای مدل‌سازی از ریشه میانگین مربعات خطای تخمین زده شده (RMSE[4]) و میانگین خطای تخمین زده شده (MRDM[5]) استفاده گردید (روابط (۱۲) و (۱۳)) (Hosseini *et al*., 2016; Mostafaei *et al*., 2016; Shafaei *et al*., 2018).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=N}(F_{act,i} - \bar{F}) - \sum_{i=1}^{i=N}(F_{act,i} - F_{pre,i})}{\sum_{i=1}^{i=N}(F_{act,i} - \bar{F})} \quad (۱۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N}(F_{pre,i} - F_{act,i})^2} \quad (۱۲)$$

$$MRDM = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N}\left(\frac{\left|F_{pre,i} - F_{act,i}\right|}{F_{act,i}}\right)\right] \times 100 \quad (۱۳)$$

در این روابط $F_{act,i}$، $F_{pre,i}$، $\bar{F}$ به‌ترتیب نیروی واقعی وارد بر گاوآهن برگرداندار، نیروی پیش‌بینی شده وارد بر گاوآهن برگرداندار و میانگین نیروهای مورد نظر می‌باشند. برای انتخاب بهترین روش از بین روش‌های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نیروهای کششی، عمودی و جانبی وارد بر گاوآهن برگرداندار، مقایسه‌هایی بین معیارهای عملکردی آماری که برای تمام مدل‌ها به‌دست آمده بود، انجام گرفت. بهترین مدل با بالاترین توانایی در بین مدل‌های به‌دست آمده در این پژوهش برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار بر اساس بالاترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین مقدار RMSE و MRDM یافت شد.

نتایج و بحث

توصیف‌های آماری

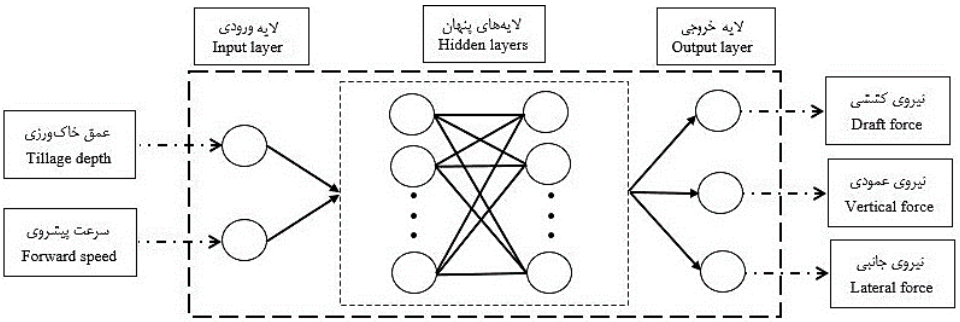
در جدول ۴، پارامترهای توصیفی آماری برای نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار به‌دست آمده در شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی نشان داده شده‌اند که در آن، حداقل و حداکثر مقدار نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار به‌ترتیب در پایین‌ترین سطح (عمق خاک‌ورزی ۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۱ متر بر ثانیه) و بالاترین سطح (عمق خاک‌ورزی ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۳ متر بر ثانیه) از متغیرهای آزمایشی اعمال شده، به‌دست آمدند. مقادیر ضریب تغییرات و ضریب غیر یکنواختی نشان می‌دهند که داده‌ها پراکندگی زیادی از متوسط خود نداشته و نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار، تحت تأثیر سطوح مرتبط با عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی قرار داشته‌اند.

مدل‌های به‌دست آمده به روش سطح پاسخ

در جدول ۵، شاخص‌های آماری که برای انتخاب بهترین مدل رگرسیونی به‌کار گرفته شد، نشان داده شده‌اند. بر طبق این جدول، سه نوع مدل خطی، دو فاکتوره و درجه دوم تعریف شده است که بر اساس شاخص‌های آماری R^2، R^2a و R^2p با هم مقایسه گردیده‌اند. بر اساس نتایجی که از شاخص‌های آماری به‌دست آمد، تمام این شاخص‌ها برای مدل درجه دوم در بین دیگر مدل‌های موجود در جدول ۵، دارای مقدار حداکثر بودند. به همین دلیل مدل درجه دوم برای مدل‌سازی و همچنین پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار طبق شاخص‌های آماری، از عملکردی بهتری برخوردار بود که در بین دیگر مدل‌ها برای مدل‌سازی انتخاب گردید.

در جدول ۶، تجزیه واریانس تمام متغیرهای مورد استفاده در مدل درجه دوم با نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار نمایش داده شده است. طبق این جدول، برای نیروی کششی، اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی و برای نیروی جانبی نیز مجذور سرعت پیشروی معنی‌دار نشده است که از روند مدل‌سازی برای نیروهای مذکور به‌دلیل معنی‌دار نبودن، حذف گردیدند.

1- Sigmoid function
2- Levenberg-Marquardt
3- K-fold cross validation
4- Root mean square error
5- Mean relative deviation modulus



شکل ۵- طرح‌واره کلی از ساختار شبکه عصبی مصنوعی به‌کار رفته در این پژوهش

Fig.5. The general scheme of the artificial neural network structure used in this research

جدول ٤- پارامترهای توصیفی آماری به‌دست آمده از داده‌های شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی

Table 4- Descriptive statistics parameters obtained from simulation data of tillage operations

نیروها Forces	میانگین داده‌ها Mean of used data (kN)	انحراف معیار Standard deviation (kN)	کمترین مقدار Minimum value (kN)	بیشترین مقدار Maximum value (kN)	ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	ضریب غیر یکنواختی Coefficient of non-uniformity (%)
نیروی کششی Draft force	9.13	3.21	4.89	14.62	4.09	106.57
نیروی عمودی Vertical force	6.89	2.47	4.02	12.75	2.19	126.71
نیروی جانبی Lateral force	4.36	1.32	2.59	7.35	3.20	109.17

جدول ۵- نتایج شاخص‌های آماری برای انتخاب بهترین مدل در بین مدل‌های روش سطح پاسخ

Table 5- Statistical index results for choice best model between response surface methodology models

مدل‌ها Models	نیروی کششی Draft force			نیروی عمودی Vertical force			نیروی جانبی Lateral force		
	R^2	R^2a	R^2p	R^2	R^2a	R^2p	R^2	R^2a	R^2p
خطی Linear	0.90	0.89	0.67	0.94	0.93	0.89	0.89	0.87	0.78
دوفاکتوره 2FI	0.91	0.88	0.77	0.94	0.92	0.75	0.89	0.86	0.51
درجه دوم Quadratic	0.97	0.95	0.83	0.99	0.98	0.94	0.98	0.97	0.84

برای مدل‌سازی نیروی کششی گاوآهن برگرداندار از متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1)، سرعت پیشروی (X_2) و مجذور متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1^2) و سرعت پیشروی (X_2^2) به دلیل معنی‌دار بودن در رابطه با نیروی کششی (جدول ۶)، استفاده گردید. مدل به‌دست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی نیروی کششی گاوآهن برگرداندار در رابطه (۱۴) نشان داده شده است. معیارهای عملکردی آماری برای مدل نیروی کششی R^2 =۰/۹۸۷، RMSE =۰/۳۲۵ kN و MRDM =۲/۳۵۲ ٪ به‌دست آمد. رابطه (۱۵)، مدل به‌دست آمده از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی مقادیر نیروی عمودی وارد بر گاوآهن برگرداندار می‌باشد. در این مدل متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1)، سرعت پیشروی (X_2)، اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی (X_1X_2) و همچنین مجذور متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1^2) و سرعت پیشروی (X_2^2) به دلیل معنی‌دار بودن در رابطه با نیروی عمودی (جدول ۶)، در این مدل گنجانده شدند. معیارهای عملکردی آماری R^2، RMSE و MRDM برای مدل نیروی عمودی به‌ترتیب ۰/۹۸۳، ۰/۳۱۹ kN و ٪ ۴/۲۴۵ به‌دست آمدند. مدلی که از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی نیروی جانبی وارد بر گاوآهن برگرداندار به‌دست آمد، در رابطه (۱۶) نشان داده شده است.

جدول ٦- تجزیه واریانس نیروی‌های وارد بر گاوآهن برگرداندار

Table 6- Analysis of variance (ANOVA) of forces on moldboard plough

متغیرهای مدل Model treatments	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of square		
		نیروی کششی Draft force	نیروی عمودی Vertical force	نیروی جانبی Lateral force
مدل Model	5	51.63^{**}	25.26^{**}	11.03^{**}
X_1	1	43.85^{**}	21.55^{**}	8.50^{**}
X_2	1	4.32^{**}	2.47^{**}	1.53^{**}
X_1X_2	1	0.15^{ns}	0.81^{*}	0.051^{*}
X_1^2	1	1.37^{*}	0.34^{*}	0.63^{**}
X_2^2	1	0.71^{*}	0.42^{**}	0.049^{ns}
عدم برازش Lack of fit	3	1.24^{ns}	0.14^{ns}	0.17^{ns}
مانده‌ها Residuals	7	1.41	0.20	0.19
خطا Error	12	53.03	25.46	11.21

** = $P \leq 0.01$, * = $P \leq 0.05$, ns = non-significant.

بر اساس جدول ۶، عمق خاک‌ورزی (X_1)، سرعت پیشروی (X_2)، اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی (X_1X_2) و همچنین مجذور متغیر عمق خاک‌ورزی (X_1^2) بر نیروی جانبی معنی‌دار شده‌اند. به همین دلیل از این متغیرهای معنی‌دار برای مدل‌سازی نیروی جانبی استفاده شد. معیارهای عملکردی آماری که برای مدل نیروی جانبی به‌دست آمد، R^2=۰/۹۷۱، RMSE=۰/۱۳۵ kN و MRDM=۲/۶۸۹٪ بودند.

$$\text{Draft force} = 3.71320 + 0.14357\,X_1 - 0.31423\,X_2 + 0.00992\,X_1^2 + 0.25886\,X_2^2 \quad (۱۴)$$

$$\text{Vertical force} = 6.14160 - 0.27614\,X_1 - 1.23100\,X_2 + 0.0.047480\,X_1X_2 + 0.016789\,X_1^2 + 0.29200\,X_2^2 \quad (۱۵)$$

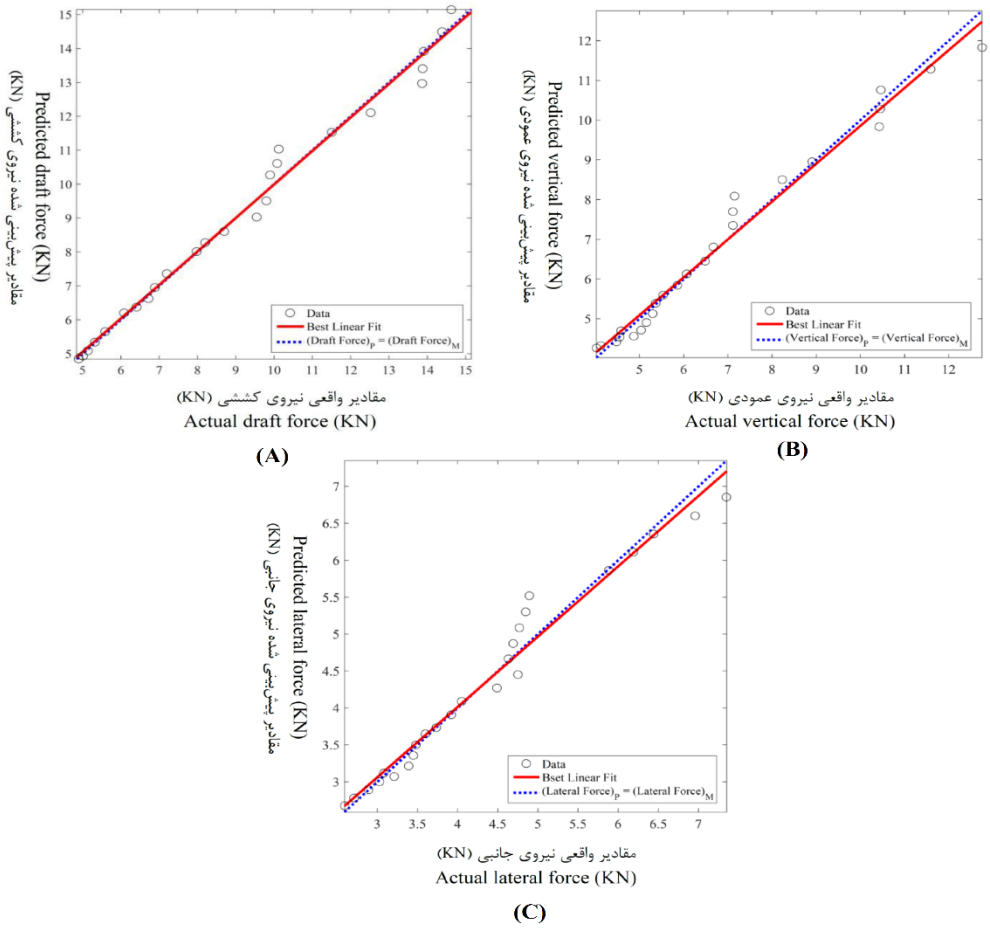
$$\text{Lateral force} = 2.69840 - 0.057509\,X_1 + 0.089000\,X_2 + 0.018520\,X_1X_2 + 0.006515\,X_1^2 \quad (۱۶)$$

شکل‌های (۶-A)، (۶-B) و (۶-C)، به‌ترتیب نشان‌دهنده مطاقبت خوب بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده نیروهای کششی، عمودی و جانبی توسط مدل می‌باشد. براساس دلایلی همچون مطابقت مناسب بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده‌ی نیروی‌های کششی، عمودی و جانبی، مقادیر خوب معیارهای عملکردی آماری مربوط به این مدل‌ها و همچنین معنی‌دار نشدن عدم برازش مدل‌های مورد نظر (جدول ۶)، می‌توان گفت که رابطه‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به‌خوبی و با دقت نسبتاً بالا و مناسبی می‌توانند مقادیر نیروی‌های وارد بر گاوآهن برگرداندار را پیش‌بینی کنند. دلیل این دقت نسبتاً بالا را می‌توان استفاده از طرح Historical data بیان نمود، چرا که در این طرح از درصد بالایی از مقادیر داده‌ها برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. با همین دلیل دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی مقادیر مد نظر بالا می‌رود. همچنین برخی از پژوهشگران نیز در پژوهش‌های خود دقت نسبتاً بالای روش سطح پاسخ را تأیید کرده‌اند (Maran and Priya., 2015; Mostafaei *et al*., 2016).

مدل‌های به‌دست آمده به روش شبکه عصبی مصنوعی

معیارهای عملکردی آماری R^2، RMSE و MRDM برای مدل نیروی کششی که توسط شبکه عصبی مصنوعی به‌دست آمد به‌ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۱۸۹ kN و ۱/۷۵۲٪ بودند. همچنین این معیارها برای نیروی عمودی به‌ترتیب ۰/۹۹۶، ۰/۱۴۱ kN و ۳/۷۶۹٪ و برای نیروی جانبی به‌ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۱۲۲ kN و ۱/۹۵۶٪ بودند. همچنین با توجه به نمودارهای برازش نیروهای واقعی و پیش‌بینی شده که برای نیروهای کششی، عمودی و جانبی به‌دست آمد، می‌توان مطابقت و همبستگی مناسب را در بین داده‌ها مشاهده نمود (شکل‌های ۷-A، ۷-B، ۷-C). با توجه به مقادیر مناسب معیارهای عملکردی آماری و همچنین مطابقت مناسب بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده،

می‌توان گفت که شبکه عصبی مصنوعی به‌خوبی و با دقت بالایی توانست نیروهای کششی، عمودی و جانبی وارد بر گاوآهن برگردان‌دار را پیش‌بینی کند. دلیل این پیش‌بینی با دقت بالا، ماهیت شبکه عصبی است که می‌تواند به خوبی رابطه‌های غیر خطی را پیش‌بینی کند (Mostafaei *et al*., 2016). نتایجی که در این بخش به‌دست آمد، با نتایج سایر پژوهشگران که بیان نمودند شبکه عصبی به خوبی قادر به پیش‌بینی مقادیر مورد نظر است، مطابقت دارد (Taghavifar and Mardani, 2014a; Taghavifar and Mardani, 2014b; Shafaei *et al*., 2018).



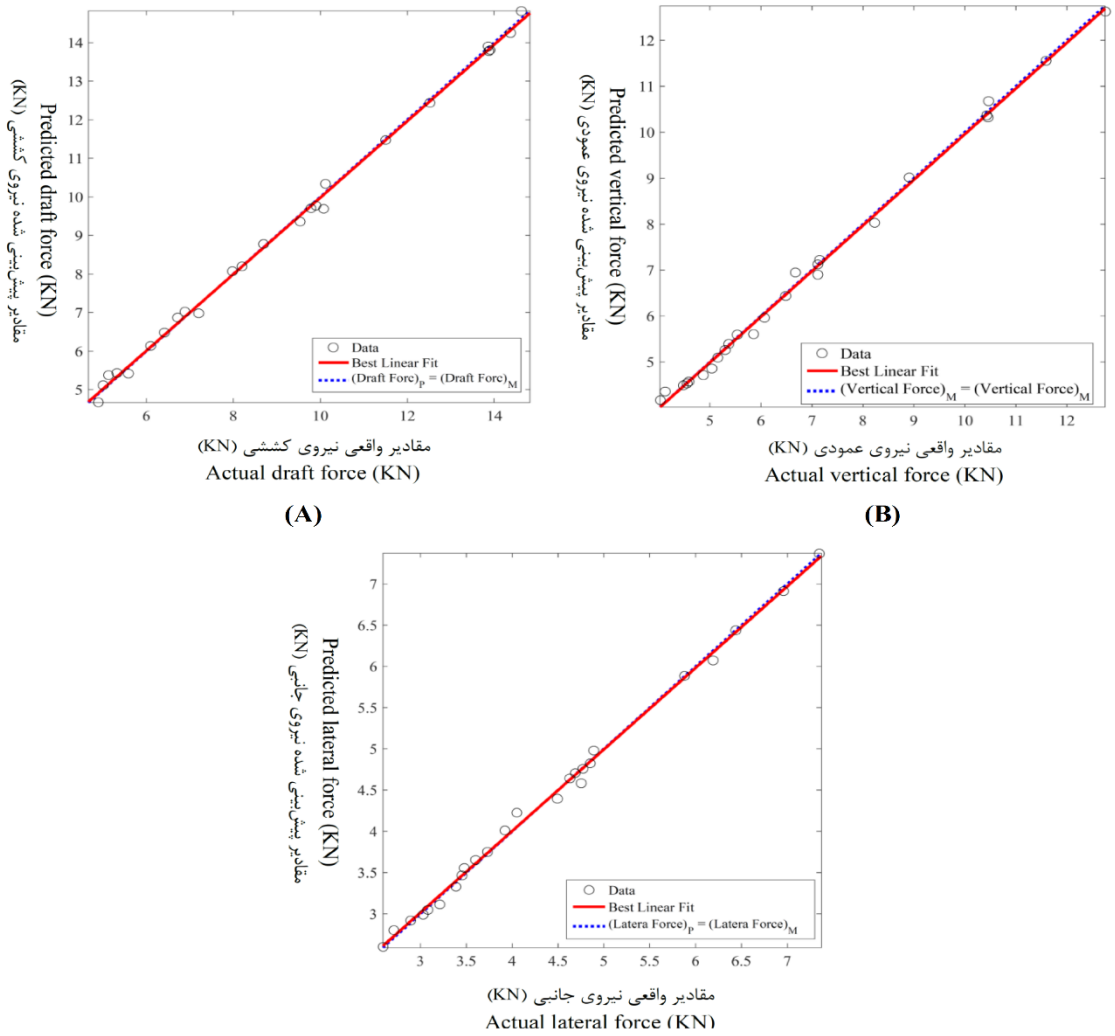
شکل ٦– نمودار مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ: A– نیروی کششی، B– نیروی عمودی و C– نیروی جانبی

Fig.6. Mapping between predicted and actual values by Response surface methodology: A- Draft force, B- Vertical force, C- Lateral force

مقایسه مدل‌های به‌دست آمده به کمک روش‌های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی

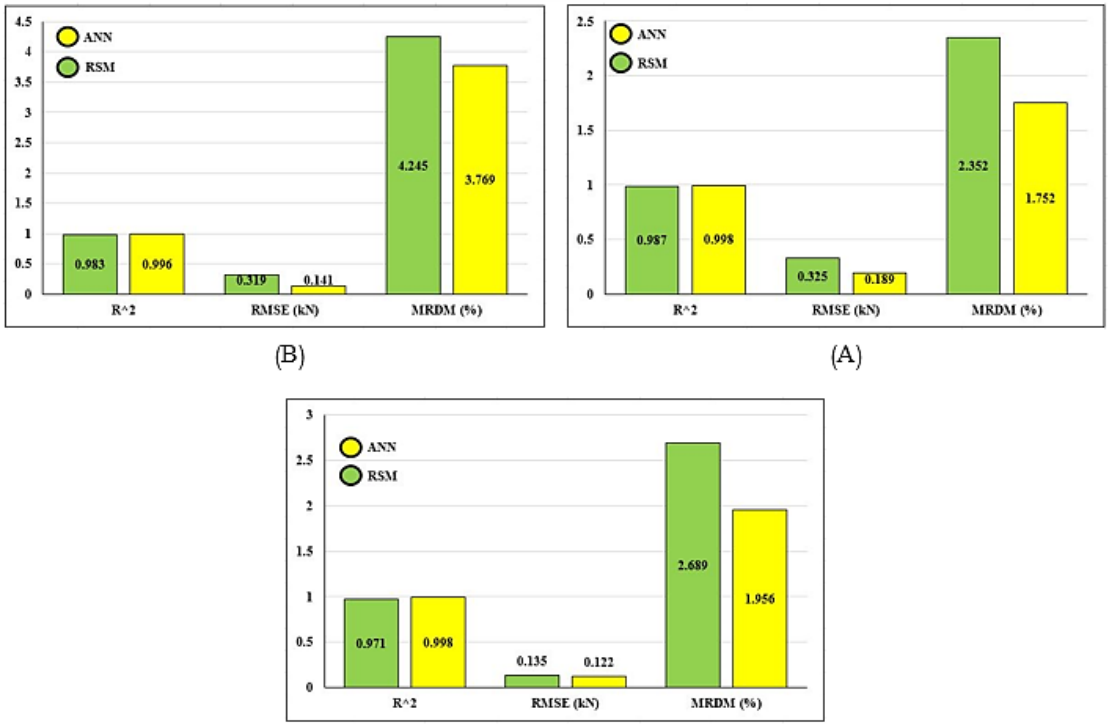
معیارهای عملکردی آماری به‌دست آمده برای روش‌های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای نیروهای کششی، عمودی و جانبی در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مقادیر معیارهای عملکردی آماری به‌دست آمده، نشان‌دهنده‌ی توانایی دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نیروهای مورد نظر می‌باشند. اما با مقایسه‌ی معیارهای عملکردی در بین دو روش مذکور، مشاهده می‌شود که ضریب تعیین مدل‌های به‌دست آمده برای تمام نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار به روش شبکه عصبی مصنوعی بالاتر از روش سطح پاسخ بود. همچنین دیگر معیارهای عملکردی آماری مانند RMSE و MRDM نیز برای روش شبکه عصبی مصنوعی کمتر از روش سطح پاسخ بود. با این تفاسیر می‌توان گفت که روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش سطح پاسخ در پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار از دقت نسبتاً بالاتری برخوردار می‌باشد (Mostafaei *et al*., 2016). یکی از دلایل بهتر بودن شبکه عصبی مصنوعی، قابلیت یادگیری آن (مبتی بر هوش مصنوعی) برای تخمین رابطه‌ی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها هنگامی که ذات مسأله

غیرخطی می‌باشد. در صورتی که روش سطح پاسخ محدود به چند جمله‌ای‌های مرتبه دوم است (Maran and Priya, 2015; Sarve *et al*., 2015; Mostafaei *et al*., 2016). دیگر پژوهشگران نیز که از شبکه عصبی مصنوعی در پژوهش‌های خود استفاده نموده و یا آن را با مدل‌های ریاضی دیگری مقایسه نموده‌اند، بیان کرده‌اند که شبکه عصبی به‌خوبی قادر به پیش‌بینی مقادیر بوده و از دیگر روش‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته است (Roul *et al*., 2009; Taghavifar *et al*., 2013; Taghavifar and Mardani, 2014a; Taghavifar and Mardani, 2014b; Shafaei *et al*., 2018).



شکل ۷- نمودار مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی: A- نیروی کششی، B- نیروی عمودی و C- نیروی جانبی

Fig.7. Mapping between predicted and actual values by Artificial Neural Network: A- Draft force, B- Vertical force, C- Lateral force

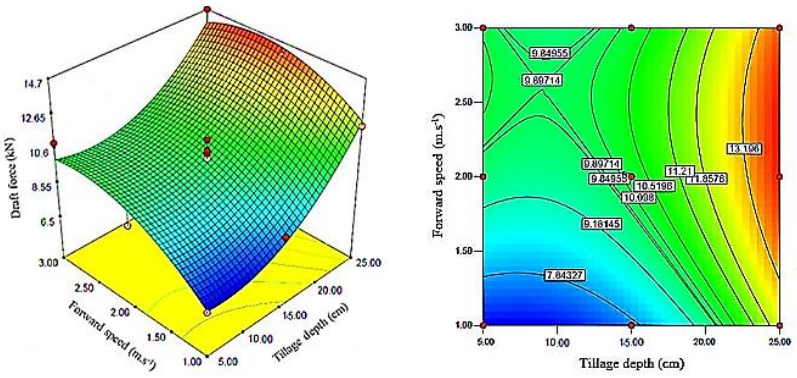


شکل ۸- پارامترهای عملکردی آماری به‌دست آمده برای مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ برای: A- نیروی کششی، B- نیروی عمودی، C- نیروی جانبی. (ANN: شبکه عصبی مصنوعی؛ RSM: روش سطح پاسخ)

Fig.8. Statistical performance criteria obtained for the ANN and RSM models for the: A- Draft force, B- Vertical force, C- Lateral force. (ANN: Artificial neural network; RSM: Response surface methodology)

بررسی نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار

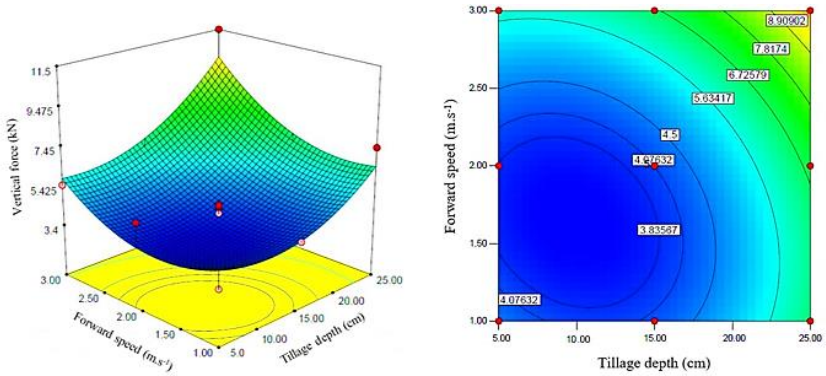
اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروهای کششی، عمودی و جانبی گاوآهن برگرداندار به‌ترتیب در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱)، نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌ها، با افزایش عمق خاک‌ورزی، افزایش سرعت پیشروی و یا افزایش همزمان عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، به‌صورت غیر خطی نیروهای مورد نظر وارد بر گاوآهن برگرداندار نیز افزایش یافته‌اند. به همین منظور، با افزایش عمق خاک‌ورزی از ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ متر بر ثانیه، مقادیر نیروهای کششی، عمودی و جانبی از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار به‌ترتیب ۶۶/۵۵٪، ۶۸/۴۷٪ و ۶۴/۷۶٪ افزایش داشته‌اند. با افزایش عمق خاک‌ورزی، حجم خاکی که باید توسط گاوآهن برش داده و برگردان شود، افزایش می‌یابد. به همین دلیل مقاومت خاک در برابر حرکت گاوآهن بیشتر شده که باعث افزایش نیروی کششی، عمودی و جانبی گاوآهن برگرداندار می‌گردد. این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران که اثر عمق بر نیرو را بررسی کرده بودند، مطابقت دارد (Sahu and Raheman, 2006; Al-Suhaibani and Ghaly, 2010; Ibrahmi *et al*., 2015a; Ibrahmi *et al*., 2015b; Ucgul *et al*., 2017). همچنین با افزایش سرعت پیشروی، شتاب و سرعتی که از طرف گاوآهن به خاک وارد می‌گردد، افزایش یافته و خاک را با شتاب و سرعت بیشتری جابه‌جا و برگردان می‌کند. ذرات خاک در برابر این شتاب و جابه‌جایی سریع، واکنش نشان داده و مقاومت می‌کنند، به همین دلیل گاوآهن باید نیروی بیشتری برای غلبه بر مقاومت ذرات خاک اعمال کند که باعث افزایش نیروهای کششی، عمودی و جانبی می‌گردد. دیگر پژوهشگران نیز بیان کرده‌اند که با افزایش سرعت پیشروی، نیروهای وارد بر گاوآهن افزایش می‌یابد که نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با نتایج این پژوهشگران مطابقت دارد (Sahu and Raheman, 2006; Godwin *et al*., 2007; Al-suhaibani and Ghaly, 2010; Akbarnia *et al*., 2014; Ibrahmi *et al*., 2015a; Ibrahmi *et al*., 2015b; Ucgul *et al*., 2017).



(B) (A)

شکل ۹– (A) کانتور اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی کششی، (B) اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی کششی

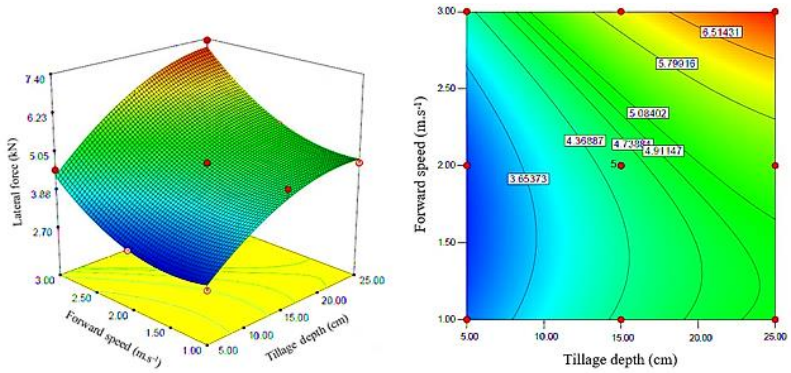
Fig.9. (A) Contour plat of the effect of interaction between the tillage depth and forward speed on draft force, (B) The effect of interaction between the tillage depth and forward speed on draft force



(B) (A)

شکل ۱۰– (A) کانتور اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی عمودی، (B) اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی عمودی

Fig.10. (A) Contour plat of the effect of interaction between the tillage depth and forward speed on vertical force, (B) The effect of interaction between the tillage depth and forward speed on vertical force



(B) (A)

شکل ۱۱– (A) کانتور اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی جانبی، (B) اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی جانبی

Fig.11. (A) Contour plat of the effect of interaction between the tillage depth and forward speed on lateral force, (B) The effect of interaction between the tillage depth and forward speed on lateral force

نتیجه‌گیری

با توجه به شاخص‌های آماری نظیر R^2، RMSE و MRDM که برای هر یک از مدل‌های به‌دست آمده توسط روش سطح پاسخ و روش شبکه عصبی مصنوعی به‌دست آمد، نتیجه نشان می‌دهد که این دو روش می‌توانند به خوبی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار را پیش‌بینی کنند. اما با مقایسه شاخص‌های آماری در بین این دو روش، نتیجه نشان می‌دهد که روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش دیگر عملکرد مناسب‌تری برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار دارد. نتایج داده‌های به‌دست آمده حاکی از آن است که با افزایش عمق خاک‌ورزی از ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ متر بر ثانیه، منجر به افزایش غیر خطی نیروهای کششی، عمودی و جانبی به‌ترتیب ٪۶۶/۵۵، ٪۶۸/۴۷ و ٪۶۴/۷۶ می‌شود. با توجه به تمام نتایجی که از پژوهش حاضر به‌دست آمد، می‌توان گفت که مدل‌های توسعه‌یافته به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی در این پژوهش یک ابزار خوب و قدرتمند برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار چه در عملیات مزرعه‌ای و چه در پژوهش‌های مرتبط به عملیات خاک‌ورزی با گاوآهن برگرداندار، می‌باشند. همچنین توصیه می‌گردد که از مدل‌های توسعه‌یافته در این پژوهش برای مدیریت عملیات خاک‌ورزی مانند انتخاب تراکتور مناسب، استفاده شود. با این حال نیز توصیه می‌گردد که سایر عوامل تأثیرگذار بر نیروها مانند زاویه‌های گاوآهن برگرداندار در مدل‌های آینده گنجانده شود تا توانایی مدل برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار افزایش یابد.

References

1. ABAQUS. 2016. ABAQUS User's Manuals Version 6.12.1. ABAQUS Inc. Providence, RI.
2. Abo-Elnor, M., R. Hamilton, and J. Boyle. 2004. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis. Soil and Tillage Research 75 (1): 61-73.
3. AISI Standard. 2011. S905-08: Test methods for mechanically fastened cold-formed steel connections.
4. Akbarnia, A., A. Mohammadi, R. Alimardani, and F. Farhani. 2014. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 16 (4): 57-65.
5. Al-Suhaibani, S., 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 Science.
6. Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafson. 2004. Specific draught for moldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. Soil and Tillage Research 79: 221-231.
7. Bentaher, H., A. Ibrahmi, E. Hamza, M. Hbaieb, G. Kantchev, A. Maalej, and W. Arnold. 2013. Finite element simulation of moldboard–soil interaction. Soil and Tillage Research 134: 11-16.
8. Bishop, C. 2006. Pattern recognition and machine learning. USA: Springer.
9. Chen, Y., L. J. Munkholm, and T. Nyord. 2013. A discrete element model for soil–sweep interaction in three different soils. Soil and Tillage Research 126: 34-41.
10. Durairaj, C., and M. Balasubramanian. 1997. A method for dynamic measurement of soil failure patterns caused by tillage tools. Soil and Tillage Research 41: 115-121.
11. Godwin, R. J., M. J. O'Dogherty, C. Saunders, and A. T. Balafoutis. 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. Biosystems Engineering 97 (1): 117-129.
12. Hosseini, M., S. A. Movahedi Naeini, A. A. Dehghani, and Y. Khaledian. 2016. Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regression methods. Soil and Tillage Research 157: 32-42.
13. Ibrahmi, A., H. Bentaher, M. Hbaieb, A. Maalej, and A. Mouazen. 2015a. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. Computers and Electronics in Agriculture 117: 258-267.
14. Ibrahmi, A., H. Bentaher, E. Hamza, A. Maalej, and A. Mouazen. 2015b. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. Computers and Electronics in Agriculture 117: 268-275.
15. Jafari, R., and T. TavakoliHashjin. 2016. Performance evaluation of modified Bentleg plow using finite element approach. Iran Agricultural Research 35 (1): 63-72.
16. Li, B., Y. Chen, and J. Chen. 2016. Modeling of soil–claw interaction using the discrete element method (DEM). Soil and Tillage Research 158: 177-185.
17. Maran, J. P., and B. Priya. 2015. Comparison of response surface methodology and artificial neural network approach towards efficient ultrasound-assisted biodiesel production from muskmelon oil. Ultrason Sonochem 23: 192-200.
18. Mckyes, E. 1985. Soil Cutting and Tillage. Elsevier Science Publishing Company Inc., 52 Vanderbilt Avenue, New York, NY 10017, USA.

19. Miron, R., D. Hrimiuc, H. Shimada, and S. V. Sabau. 2002. The geometry of Hamilton and Lagrange spaces. Kluwer academic publishers.
20. Mostafaei, M., H. Javadikia, and L. Naderloo. 2016. Modeling the effects of ultrasound power and reactor dimension on the biodiesel production yield: Comparison of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Energy 115: 626-636.
21. Rahmatian, M., S. H. Karparvarfard, and M. A. Nematollahi. 2018. Prediction for optimizing performance of chisel blade used in combined tillage to obtain suitable effectiveness. Iranian Journal of Biosystem Engineering, 49 (1): 73-82. (In Farsi).
22. Roul, A. K., H. Raheman, M. S. Pansare, and R. Machavaram. 2009. Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. Biosystems Engineering 104: 476-485.
23. Salar, M. R., and S. H. Karparvarfard. 2017. Modeling and optimization of wing geometry effect on draft and vertical forces of winged chisel plow. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 468-479. (In Farsi).
24. Sahu, R. K., and H. Raheman. 2006. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. Biosystems Engineering 94 (2): 275-284.
25. Sarve, A., S. S. Sonawane, and M. N. Varma. 2015. Ultrasound assisted biodiesel production from sesame (*Sesamum indicum* L.) oil using barium hydroxide as a heterogeneous catalyst: comparative assessment of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). Ultrason Sonochem 26: 218-28.
26. Shafaei, S. M., M. Loghavi, and S. A. Kamgar. 2018. Comparative study between mathematical models and the ANN data mining technique in draft force prediction of disk plow implement in clay loam soil. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. (In press).
27. Shafaei, S. M., and S. Kamgar, 2017. Comprehensive investigation on static and dynamic friction coefficients of wheat grain with the adoption of statistical analysis. Journal of Advanced Research 8 (1): 51-61.
28. Shmulevich, I., Z. Asaf, and D. Rubinstein. 2007. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. Soil and Tillage Research 97 (1): 37-50.
29. Srivastava, A. K., C. E. Goering, R. P. Rohrbach, and D. R. Buckmaster. 2006. Soil tillage. Chapter 8 in Engineering Principles of Agricultural Machines, 2nd ed., 169-230. St. Joseph, Michigan: ASABE.
30. Taghavifar, H., A. Mardani, H. Karim-Maslak, and H. Kalbkhani. 2013. Artificial Neural Network estimation of wheel rolling resistance in clay loam soil. Applied Soft Computing 13 (8): 35-51.
31. Taghavifar, H., and A. Mardani. 2014a. Application of artificial neural networks for the prediction of traction performance parameters. Journal of the Saudi Society of Agricultural Science 13 (1): 35-43.
32. Taghavifar, H., and A. Mardani. 2014b. Wavelet neural network applied for prognostication of contact pressure between soil and driving wheel. Information Processing in Agriculture 1 (1): 51-60.
33. Ucgul, M., C. Saunders, and J. M. Fielke. 2017. Discrete element modeling of tillage forces and soil movement of a one-third scale moldboard plough. Biosystems Engineering 155: 44-54.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 169-185

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۸۵-۱۶۹

Modeling and Predicting the Forces on Moldboard Plough by using Response Surface and Artificial Neural Network

M. Rahmatian[1], R. Yeganeh[2*], M. A. Nematollahi[3]

Received: 01-10-2018
Accepted: 21-01-2019

Introduction: Tillage is a very important operation that influences the growth and productivity of agricultural products. It is necessary to introduce some conditions to improve soil physical properties, aeration, permeability and root development in tillage operations. However, in primary tillage, especially when moldboard ploughs are used, this may be time consuming and costly for researchers to use it in their research. Some researchers use physical experiments to perform the work, which the accuracy of the results is dependent on the measuring instruments precision. However, some other researchers use simulation and mathematical modeling to reduce the time and costs and increase the relative accuracy of the research results. Many studies have also shown that modeling the forces involved in tillage is a good way to estimate the performance of different tillage tools and improve their geometry. However, the key to success in numerical simulation of tillage operations is to simulate the exact instrumentation, based on the correct assumptions as well as the proper methods. The prediction of the forces involved in tillage tools has an important role in their design. Collecting data on the forces involved in tillage tool under different farm conditions is a time consuming and costly task. Therefore, the prediction of a tillage tool forces is very important for the designer and the user in order to achieve better performance of the tool.

Materials and Methods: In this study, a cylindrical moldboard made by Alpler Company in Turkey was used to simulate the moldboard. A measuring device was designed and constructed to measure the various points of the desired moldboard. Then, the spatial points obtained by the measuring device were presented to the SolidWorks 2016 software and the desired moldboard was modeled. The finite element method by Abacus 2016 was then used to simulate the interaction between soil and moldboard. Treatments used in simulated tillage operations included tillage depths (5, 10, 15, 20 and 25 cm) and forward speed (1, 1.5, 2, 2.5 and 3 millimeters per second). The independent variables were considered as tensile, vertical and lateral forces (Kilo newton). After simulating the tillage operations, tensile, vertical and lateral forces were obtained. These forces were modeled using response surface and artificial neural networks techniques. Then, the obtained models were compared using R^2, RMSE and MRDM statistical indices and the best model was selected.

Results and Discussion: When using the response surface method, the quadratic model was selected by using the maximum value of the statistical indices R^2, R^2a and R^2p, among the linear, two-factor and quadratic models. Then, the significance of model variables was evaluated by using variance analysis. The forces were also modeled by using the neural network method. According to the fitting curves and statistical indices of R^2, RMSE and MRDM for the tensile, vertical and lateral forces, it is revealed that both methods could well predict the forces but artificial neural network was more suitable than the response surface method. Moreover, by investigating the interactions of tillage treatments and forward speed on the forces in this research, it was observed that by increasing the depth of tillage and velocity, tensile, vertical and lateral forces were increased nonlinearly by 66.55%, 68.47%, and 64.76%, respectively.

Conclusions: Regarding all the results obtained from this study, it can be concluded that the developed models using the artificial neural network in this research was a good and powerful tool for predicting the forces involved in moldboard ploughs both in the field operations and in related studies. It is also recommended that the developed models in this study can be used to manage the tillage operations, such as selecting the proper tractor. However, it is also suggested that other affecting factors, such as moldboard angles, should be included in future models to increase the ability of the model to predict the forces involved in moldboard plows.

Keywords: Artificial neural network, Modeling, Moldboard plough, Response surface, Simulation

1- PhD student, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.yeganeh@ilam.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 187-200

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۰۰-۱۸۷

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند آسیاب کردن غلات برای تولید خوراک طیور در آسیاب چکشی با استفاده از روش سطح پاسخ

زانیار زیباهوش[۱]، جلال خدائی[۲*]، سمیرا زارعی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۳

چکیده

از آنجا که خوراک طیور بخش بزرگی از هزینه‌های صنعت پرورش طیور را به خود اختصاص می‌دهد، می‌تواند عامل بسیار مهمی در میزان سود و زیان مرغداری‌ها باشد. بهینه‌سازی عملکرد دستگاه آسیاب چکشی برای کاهش اندازه مواد مختلف برای تولید خوراک طیور، می‌تواند در به‌کارگیری راه‌های مناسب و بهینه و در نهایت حصول مواد خوراکی با حداقل هزینه، حداکثر کیفیت و ظرفیت بسیار حائز اهمیت باشد. برای ارزیابی عملکرد دستگاه از نظر میزان درجه‌ی ریزی خوراک و ظرفیت کاری آسیاب، چهار محصول گندم، ذرت، سویا و جو در سه سطح اندازه سوراخ غربال (۲، ۳/۲ و ۴/۴ mm)، رطوبت دانه (۱۰، ۱۴و ۱۸ درصد)، نرخ تغذیه (یک سوم، دو سوم و باز بودن کامل دریچه مخزن) و تعداد چکش (۱۲، ۱۸ و ۲۴ عدد) به‌وسیله آسیاب خرد شد و در هر مورد درجه‌ی ریزی و ظرفیت کاری به‌صورت مجزا دسته‌بندی شد. روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی به‌منظور تعیین نقاط بهینه‌ی دستگاه در فرآیند آسیاب کردن برای دست‌یابی به بیشترین میزان خردشدگی محصول و بیشترین ظرفیت کاری آسیاب استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نقاط بهینه‌ی ۳/۲ mm برای قطر سوراخ غربال، رطوبت دانه ۱۰ درصد، نرخ تغذیه $۳۴۳/۸\ g\ s^{-1}$ و تعداد ۱۸ عدد چکش برای گندم، حداقل درجه‌ی ریزی (بیشتر خرد شدن) به مقدار ۳/۴۲ mm را در بین محصولات داشته است. هم‌چنین بیشترین ظرفیت کاری آسیاب ($۴۵/۱۲\ g\ s^{-1}$) برای ذرت در نقاط بهینه‌ی ۲ mm سوراخ غربال، رطوبت ۱۰درصد دانه، نرخ تغذیه $۴۳۳/۸\ g\ s^{-1}$ و تعداد چکش ۲۴ عدد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آسیاب چکشی، آسیاب کردن، بهینه‌سازی، درجه‌ی ریزی، ظرفیت کاری

مقدمه

با توجه به آمارهای مصرف خوراک دام خرد و مخلوط شده از قبیل ذرت، یولاف، جو، گندم و چاودار می‌توان به ضرورت و اهمیت بررسی روش‌های مختلف تهیه خوراک دام پی برد. امروزه باتوجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در بخش‌های کشاورزی و دامپروری، روش‌های قدیمی در این بخش‌ها منسوخ شده و لزوم استفاده از روش‌های مکانیزه و جدید جهت کاهش تلفات، افزایش بازده، کاهش زمان و هزینه در هریک از این بخش‌ها امری مهم و ضروری به‌شمار می‌رود. یکی از راه‌های فرآوری غلات جهت استفاده به‌عنوان خوراک دام و طیور، کاهش اندازه ذرات است که علاوه بر بهبود راندمان مخلوط کردن، ارزش تغذیه‌ی خوراک و کیفیت خوراک پلت شده را بهبود خواهد داد (Kiani, 2006). از جمله راه‌کارهای کاهش اندازه ذرات، استفاده از انواع آسیاب‌ها است. نرم شدن بیش از حد مواد، علاوه بر هدر رفت انرژی الکتریکی، موجب ساییدگی دستگاه و مشکلات گوارشی در دام و طیور می‌گردد. آسیاب کردن و نرم نمودن مواد خوراکی، توسط آسیاب صورت می‌گیرد. آشنایی با ساختمان و نحوه کار با آنها می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید (به جهت انجام کار صحیح با آنها) در اعمال مدیریت خوب در گاوداری‌ها و مرغداری‌ها که بخشی از آن شامل تولید جیره متعادل، یکنواخت و ارزان قیمت می‌باشد، کمک به‌سزایی نماید. بسیاری از روش‌های عمل‌آوری، مانند آسیاب کردن و یا غلتک زدن، ارزش غذایی[۳] را بین ۵ تا ۱۵درصد و یا بیشتر افزایش می‌دهند (Pishkar, 2000).

فاکتورهایی مانند میزان رطوبت دانه غلات، وضعیت چکش‌ها یا توری‌ها یا وضعیت شیار غلتک‌ها به‌طور عمده از عوامل ایجاد اختلاف در اندازه‌ی نهایی مواد آسیاب شده می‌باشند. بنابراین می‌توان با بررسی پارامترهای قابل تنظیم در دستگاه‌های تولید خوراک و تعیین مقادیر بهینه هر پارامتر، گامی در بهبود عملکرد، پیش‌بینی کار دستگاه و کنترل کیفیت دانه خرد شده برداشت. بهترین مقیاس اندازه‌گیری خوراک تولید شده با استفاده از آنالیز الک سنجیده می‌شود که به صورت میانگین اندازه ذرات یا درصد آن یا با استفاده از تست عبور مواد از الک‌های مختلف به‌دست می‌آید. آنالیز کامل الک نه تنها میانگین اندازه ذرات را مشخص می‌کند، بلکه چگونگی توزیع، مانند

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: j.khodaei@uok.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.72568

3- Nutritional value

مواد بیش از اندازه ریز یا بیش از حد درشت را نشان می‌دهد (Kermanshahi *et al.*, 2014). میزان ریزی مواد توسط دو فاکتور مدول ریزی[1] (قدرمطلق ریزی) که معرف ریزی مواد آسیاب شده است و مدول یکنواختی[2] (ضریب یکنواختی) که معرف بخش مواد درشت، متوسط و ریز خوراک می‌باشند (به‌صورت یک نسبت از کل مواد خرد شده)، مشخص می‌شود (Pourazarang and Ziaulhagh, 2002).

Islam (1988) یک آسیاب چکشی کوچک تجاری را برای آزمایش‌های آسیاب کردن در شرایط مختلف سرعت‌های آسیاب، اندازه غربال و محتوای رطوبت دانه، به‌منظور بررسی اثر پارامترهای ماشین و دانه، روی توزیع اندازه و انرژی مورد نیاز آسیاب کردن، مورد استفاده قرار داد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که توزیع اندازه ذرات به شدت تحت تاثیر اندازه غربال آسیاب چکشی بود، اما رطوبت دانه و بار آسیاب اثر کمی داشتند. انرژی ویژه مورد نیاز با کاهش اندازه غربال آسیاب چکشی و افزایش رطوبت دانه افزایش یافت. Ghorbani *et al.* (2010) طی پژوهش خود انرژی مصرفی برای آسیاب کردن یونجه در اندازه‌های ۱۲، ۱۵ و ۱۸ mm را از چهار اندازه الک و آسیاب چکشی با قدرت ۱/۱ kW به‌دست آوردند، که نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که یونجه با اندازه‌های ۱۸ و ۱۲ mm به‌ترتیب بالاترین (۳۰/۹۶kJ kg^{-1}) و کمترین (۵/۰۶kJ kg^{-1}) انرژی مصرفی لازم را داشتند. Al-Rabadi (2013) تاثیر دو سطح اندازه غربال آسیاب چکشی را روی پردازش پارامترها از جمله تولید خروجی، انرژی مصرفی، میانگین اندازه ذرات، انحراف معیار هندسی[3] مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق او نشان داد که افزایش اندازه غربال آسیاب چکشی اثر معنی‌داری بر تولید خروجی، انرژی مصرفی و میانگین اندازه ذرات داشته اما هیچ تاثیری روی انحراف معیار ندارد. Dabbour *et al.* (2015) با به‌کارگیری دو پارامتر رطوبت دانه و اندازه قطر سوراخ غربال، به بهینه‌سازی پارامترهای آسیاب چکشی ازجمله عملکرد آسیاب کردن، انرژی مصرفی، انرژی تراکم و شاخص آسیاب کردن بر روی کیفیت ذرت برای پردازش کردن خوراک پرداختند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که عملکرد آسیاب کردن، انرژی مصرفی، انرژی تراکم و شاخص آسیاب کردن به‌ترتیب بین دامنه‌های (۶/۸۳–۰/۷ g h^{-1})، (۳۲/۷۲–۳/۳۸ kJ kg^{-1})، (J m^{-3}) ۱۸/۸۲–۱/۹۹ و (۹۱/۲۸–۱۲/۳۵ kJ mm kg^{-1}) متغیر بوده است. El Shal *et al.* (2010) در تحقیق خود، به بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد آسیاب چکشی مانند سرعت دورانی، رطوبت دانه، ضخامت چکش و سوراخ غربال و هم‌چنین بهینه‌سازی کار دستگاه پرداختند. نتایج به‌دست آمده منجر به این پیشنهاد گردید که از آسیاب چکشی در سرعت دورانی ۲۲۵۰ rpm (۳۳/۵۶ m s^{-1})، رطوبت دانه ۱۰ درصد، سوراخ غربال و ضخامت چکش ۵ mm برای تولید خوراک پلت شده با هدف افزایش مقدار ذرت ریز آسیاب شده و کاهش ذرت درشت آسیاب شده استفاده شود. Tumuluru *et al.* (2014) انرژی لازم برای آسیاب‌کردن و خواص فیزیکی گندم، کلزا، یولاف و کلش جو خرد شده را در دو مرحله خردکننده بدون غربال (تکه تکه شده) و استفاده از آسیاب چکشی با سه اندازه غربال محاسبه نمودند. بیشترین میانگین قطر متوسط برای گندم خرد شده و کمترین مقدار برای کلزای آسیاب شده به‌دست آمد. Bitra *et al.* (2009b) انرژی مکانیکی برای کاهش اندازه ذرات را به‌صورت مستقیم برای یونجه، کاه گندم و ذرت در یک آسیاب چکشی اندازه‌گیری کردند. این محققین انرژی مصرفی ورودی را برای سرعت‌های عملیاتی مختلف آسیاب چکشی از ۲۰۰۰ تا ۳۶۰۰ rpm، اندازه غربال ۳/۲ mm و مقدار ورودی توده ۲/۵ kg min^{-1} با لبه چکش‌های ۳۰ و ۹۰ درجه مشخص کردند. آن‌ها دریافتند که انرژی ویژه کل برای آسیاب کردن یونجه، کاه گندم و ذرت برای هر دو چکش ۳۰ و ۹۰ درجه افزایش می‌یابد.

در این پژوهش به دلیل محدودیت روش‌های تحلیل آماری مرسوم، در بحث انتخاب بهینه ورودی‌های مدل، روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار داده شده است. در واقع روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است، که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه‌ی ضرایب الگوی رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل شاخص‌ها، قابل برآورد هستند (Ghasemi *et al.*, 2015). طرح مرکب مرکزی[4] (CCD)، باکس بنکن[5] و دهلرت[6] سه روش اصلی طراحی سطح پاسخ می‌باشند که در این بین روش مرکب مرکزی از اعتبار بیشتری برخوردار است (Giri and Prasad, 2007). مزیت استفاده از روش مرکب مرکزی نسبت به آزمایش فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش می‌باشد که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند، همچنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007).

هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند آسیاب کردن محصولات گندم، ذرت، سویا و جو برای تولید خوراک طیور به روش سطح پاسخ از طریق بررسی تاثیرات پارامترهای قابل تنظیم در آسیاب چکشی مانند اندازه سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش بر میزان درجه‌ی ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی می‌باشد. تفاوت

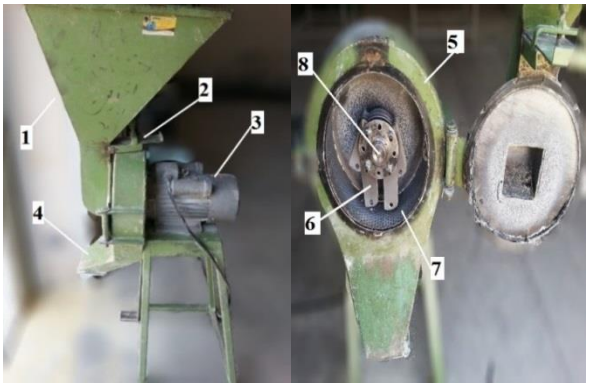
1- Fineness moduls
2- Uniformity moduls
3- Geometric standard deviation
4- Central composite design
5- Box-Behnken
6- Doehlert

عمده آسیاب چکشی مورد بررسی در مطالعه حاضر با موارد بررسی شده در مطالعات قبلی در شکل چکش‌ها و الگوی قرارگیری آن‌ها است. همچنین روش آماری مورد استفاده در مطالعه حاضر یعنی روش سطح پاسخ، قابلیت مدل‌سازی دقیق پارامترها و نیز ارائه مقادیر بهینه پارامترها را نسبت به سایر روش‌های متداول آماری دارد.

مواد و روش‌ها

نحوه انجام آزمایشات

دانه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها عبارتند از: گندم (رقم آذر۲)، ذرت (رقم برزیلی)، سویا (دان پارس) و جو (رقم ارس). در این پژوهش، برای انجام آزمایش‌ها از یک آسیاب چکشی آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ استفاده شد. ابعاد کلی دستگاه و مشخصات فنی مربوط به آن در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱– دستگاه آسیاب چکشی شامل: ۱. مخزن بذر (تغذیه‌کننده[1])، ۲. دریچه زیر مخزن، ۳. موتور الکتریکی، ۴. خروجی آسیاب، ۵. محفظه آسیاب، ۶. چکش[2]ها، ۷. الک[3] (غربال) و ۸. محور اصلی آسیاب

Fig. 1. Hammer mill machine including 1. Feeder tank, 2. Gate under the feeder, 3. Electrical motor, 4. The outlet of the mill, 5. Mill compartment, 6. Hammer, 7. Sieve and 8. Main shaft of the mill

تیمارهای اندازه قطر سوراخ‌های غربال (۲، ۳/۲ و ۴/۴ mm)، میزان رطوبت دانه (۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد) ، میزان ورودی دانه به محفظه آسیاب (یک سوم، دو سوم و کاملاً باز بودن دریچه مخزن) و تعداد چکش‌ها (۱۲، ۱۸ و ۲۴) برای اندازه‌گیری و ثبت خروجی‌ها (میزان درجه‌ی ریزی و ظرفیت کاری) مورد بررسی قرار داده شدند. برای اندازه‌گیری رطوبت دانه، از دستگاه رطوبت‌سنج غلات مدل MC-7821 استفاده شد. در زیر مخزن آسیاب چکشی یک دریچه کشویی برای تنظیم میزان ریزش بذر وجود دارد که در سه حالت یک سوم، دو سوم و کاملاً باز بودن مورد بررسی قرار گرفت. با قرار دادن دریچه در هریک از این سه وضعیت، مقدار خروجی دانه در واحد زمان به داخل محفظه آسیاب ثبت شد و با انجام سه تکرار در هر وضعیت و با میانگین‌گیری، به کالیبره کردن دستگاه برای هر محصول پرداخته شد. نرخ تغذیه در سه حالت باز بودن دریچه‌ی زیر مخزن برای محصولات گندم، ذرت، سویا و جو در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱– ابعاد و مشخصات آسیاب چکشی

Table 1- Dimensions and specifications of hammer mill

مشخصات آسیاب **Mill properties**	مقدار عددی **Quantity**
تعداد صفحات حامل چکش‌ها Number of hammers plates	4-8
ابعاد چکش‌ها Dimensions of hammers	40×100 mm
ضخامت چکش‌ها Thickness of hammers	3 mm
تعداد چکش‌ها روی هر صفحه Number of hammers on each plate	3-6
فاصله‌ی متوالی چکش‌ها روی صفحه Distance between two consecutive hammers	75 mm
سرعت گردش محور آسیاب Rotational speed of mill shaft	2900 rpm
فاصله‌ی متوسط غربال تا نوک چکش‌ها Average distance between sieve and hammer tip	15 mm

اندازه‌گیری ظرفیت کاری آسیاب چکشی

به‌منظور اندازه‌گیری ظرفیت کاری آسیاب چکشی، طبق نقشه آزمایش‌ها با تعیین مقدار پارامترهای مستقل بر روی دستگاه برای هر آزمایش، زمان لازم جهت آسیاب محصولات ثبت گردید. مقدار محصول نهایی خرد شده در هر آزمایش را نیز وزن نموده و بر مدت زمان لازم برای آسیاب کردن تقسیم شد. مقدار دانه خرد شده (g) M_{xP} طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Pourazarang and Ziaulhagh, 2002).

$$M_{xp}=q.t \qquad (۱)$$

که در آن: q ظرفیت کاری ماشین خردکن بر حسب $g\ s^{-1}$ و t مدت زمان خرد شدن بر حسب s است.

اندازه‌گیری درجه‌ی ریزی ذرات خرد شده

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها برای سنجش و ارزیابی کیفیت کار آسیاب، اندازه‌گیری درجه‌ی ریزی مواد خرد شده خروجی از آن هستند. برای تعیین ریزی مواد آسیاب شده استفاده از آنالیز الک مطرح می‌شود که برای آنالیزکردن خوراک، با مجموعه الک و دستگاه لرزاننده[4] مطابق جدول ۳ (استاندارد ASTM E-11-70 Part 41) ابعاد ذرات خروجی اندازه‌گیری شدند (Anonymous, 2004).

1- Feeder
2- Hammer
3- Screen
4- Shaker

جدول ۲- نرخ تغذیه در حالات مختلف دریچه مخزن

Table 2- Feed rate in different modes of tank valve

محصول Crop	نرخ تغذیه Feed rate (g s^{-1})		
	یک سوم باز بودن دریچه 1/3 openness of gate	دو سوم باز بودن دریچه 2/3 openness of gate	کاملاً باز Full openness of gate
گندم Wheat	270.4	343.8	374.3
جو Barley	276.2	350.6	385.1
ذرت Corn	224.5	358.7	433.8
سویا Soybean	263.8	337.2	367.3

جدول ۳- مشخصات الک‌های مورد استفاده در آنالیز الک بر اساس استاندارد (ASTM E-11-70 Part 41) (Anonymous, 2004)

Table 3- Characteristics of the sieves used in sieve analysis according to standard (ASTM E-11-70 Part 41) (Anonymous, 2004)

شماره الک‌های استاندارد Standard sieves number	قطر سوراخ Diameter of sieve hole (mm)
3.8	8
4	4.75
8	3.35
14	1
28	0.5
48	0.3
100	0.106

برای تعیین میزان ریزی مواد خرد شده، g ۵۰۰ از نمونه‌ها را برداشته و در سری هفت‌تایی الک‌های مزبور ریخته شد و در ماشین لرزاننده به مدت ۳ دقیقه الک گردید. برای تعیین درجه ریزی بر اساس مدول ریزی، مواد خرد شده باقی‌مانده در هر الک توزین شده و درصد آنها مشخص شد. برای مجموعه هفت‌تایی الک‌ها به همراه تشتک، اعداد صفر تا ۷ به‌ترتیب برای تشتک تا بزرگ‌ترین اندازه الک تعیین شد. درصد مانده در هر الک در شماره اختصاصی الک (از صفر تا ۷) ضرب شد. مدول ریزی نمونه مواد خرد شده از تقسیم مجموع حاصل‌ضرب‌های به‌دست آمده الک‌های موجود، بر عدد ۱۰۰ مشخص شد (ASTM E-11-70 Part 41) (Anonymous, 2004).

استفاده از روش سطح پاسخ

در این پژوهش اثر متغیرهای مستقل شامل اندازه قطر سوراخ غربال (A)، رطوبت دانه (B)، نرخ تغذیه (C) و تعداد چکش (D) در سه سطح با استفاده از روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی با بیشترین تکرار در نقاط مرکزی طرح (۶ تکرار) به‌منظور بررسی تاثیر شرایط کاهش میزان درجه‌ی ریزی (بیشتر شدن خردشدگی) و افزایش ظرفیت کاری آسیاب و بهینه‌سازی فرآیند مذکور استفاده شد. در جدول ۴ متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر آن‌ها نشان داده شده است.

پس از وارد کردن محدوده متغیرهای مورد بررسی در محیط نرم‌افزار Design Expert 8.0.6 طرح آزمایش‌ها شامل ۳۰ آزمون برای هر محصول به‌دست آمد.

جدول ٤- مقادیر متغیرهای مستقل در سطوح مختلف آزمایش (طرح مرکب مرکزی، تعداد ۳۰ آزمایش)

Table 4- The values of independent variables at different test levels (central composite design, 30 experiments)

متغیرها Variables	سطح ۱- Level -1	سطح ۰ Level 0	سطح ۱ Level +1
سوراخ غربال Diameter of sieve hole	2	3.2	4.4
رطوبت دانه Grain moisture content	10	14	18
تعداد چکش Number of hammer	12	18	24
باز بودن موقعیت دریچه Openness situation of gate	1/3	2/3	1

مدل مورد استفاده در روش سطح پاسخ، عموماً رابطه‌ی درجه دوم می‌باشد (Myers and Montgomery, 1995). در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را روی هر متغیر جداگانه بیان می‌کند. مدل‌سازی‌های ریاضی هر پاسخ به‌وسیله تجزیه‌ی رگرسیون خطی چندگانه، ارزیابی می‌شود. شروع مدل‌سازی با الگوی درجه دوم دربرگیرنده‌ی جملات اثر متقابل است. معادله کلی سطح پاسخ را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) نوشت.

$$y= \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i<j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۲)$$

که در آن: β_0، عرض از مبداء و β_i، β_{ii} و β_{ij} ضرایب رگرسیونی به‌ترتیب خطی، درجه دوم و اثر متقابل و X_i و X_j متغیرهای مستقل کدبندی شده و ε باقیمانده یا خطا هستند.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز آماری

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر متغیرهای مستقل بر درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای محصولات گندم، ذرت و جو در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به دانه گندم نشان داد که دو فاکتور اندازه سوراخ غربال و تعداد چکش تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی درجه ریزی گندم دارند. به‌علاوه اثر درجه دو متغیرهای مستقل سوراخ غربال و رطوبت دانه بر روی درجه ریزی گندم نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد؛ اما فاکتورهای رطوبت دانه، نرخ تغذیه و کلیه‌ی اثرات متقابل معنی‌دار نشدند. برای ظرفیت کاری، هر چهار فاکتور سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر ظرفیت کاری دارند. هم‌چنین اثر متقابل اندازه سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و تعداد چکش در سطح یک درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل اندازه سوراخ غربال، رطوبت و نرخ تغذیه و هم‌چنین اثر متقابل اندازه سوراخ غربال، نرخ تغذیه و تعداد چکش در سطح ۵ درصد نیز معنی‌دار شد. مقادیر عدم تناسب (LOF) برای مدل‌های برازش شده درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای تمامی محصولات مورد مطالعه غیرمعنی‌دار شد. این پارامتر، مقدار پراکندگی داده‌ها حول مدل برازش شده را نشان می‌دهد؛ که در صورت غیرمعنی‌دار شدن آن می‌توان نتیجه گرفت که مدل برازش شده به‌خوبی با داده‌های آزمایش متناسب است و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل انطباق خوبی با داده‌های آزمایش خواهند داشت.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر تعداد چکش، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و اندازه سوراخ غربال بر روی درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای گندم، ذرت و جو

Table 5- Fineness degree and mill capacity at different setting of hammer mill for wheat, corn and barley

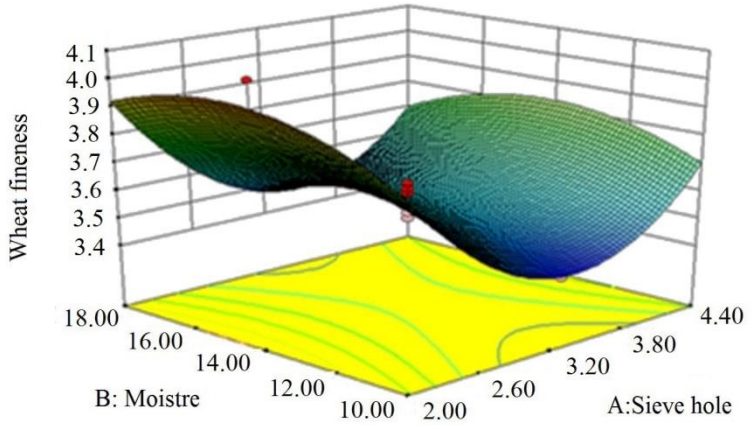
منابع تغییرات Source of variance	میانگین مربعات برای گندم Mean squares for wheat		میانگین مربعات برای ذرت Mean squares for corn		میانگین مربعات برای جو Mean squares for barley	
	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree
مدل Model	26.69**	0.034**	21.61**	0.056**	16.38*	0.077*
(سوراخ غربال) A (sieve hole)	25.752**	0.12**	21.69**	0.14**	20.06*	0.021 ns
(رطوبت دانه) B (grain moisture)	37.50**	0.013 ns	201.13**	0.48**	144.84**	0.77**
(نرخ تغذیه) C (feed rate)	23.23**	0.0043 ns	26.23**	0.00027 ns	6.76 ns	0.00045 ns
(تعداد چکش) D (number of hammer)	231.41**	0.042**	3.08 ns	0.0061 ns	0.29 ns	0.022 ns
A^2	5.60 ns	0.29**	4.38 ns	0.064**	47.11**	0.074*
B^2	4.83 ns	0.044**	0.74 ns	0.00086 ns	0.69 ns	0.031 ns
D^2	2.31 ns	0.014 ns	5.56 ns	0.012 ns	27.13*	0.0011 ns
AB	85.75**	0.012 ns	20.98**	0.086**	23.96*	0.080*
BC	0.036 ns	0.0085 ns	30.75**	0.00075 ns	7.37 ns	0.00051 ns
BD	40.77**	0.0045 ns	6.33 ns	0.020*	0.081 ns	0.000056 ns
CD	4.60 ns	0.0045 ns	9.99*	0.0014 ns	0.090 ns	0.0000062 ns
ABC	18.282*	0.0022 ns	0.27 ns	0.00015 ns	5.50 ns	0.00051 ns
ACD	12.74*	0.0062 ns	0.046 ns	0.006 ns	6.25 ns	0.00031 ns
BCD	1.17 ns	0.0075 ns	12.92*	0.0018 ns	0.0042 ns	0.00075 ns
عدم تناسب Lack of fit (LOF)	1.20 ns	0.034 ns	1.04 ns	0.0008 ns	0.74 ns	0.0059 ns
خطا Error	1.90	0.047	1.43	0.0028	3.31	0.0087

**: Significant at level 1% , *: Significant at level 5% , ns: Nonsignificant

ns: عدم معنی‌داری، * و **: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح ۵٪ و ۱٪

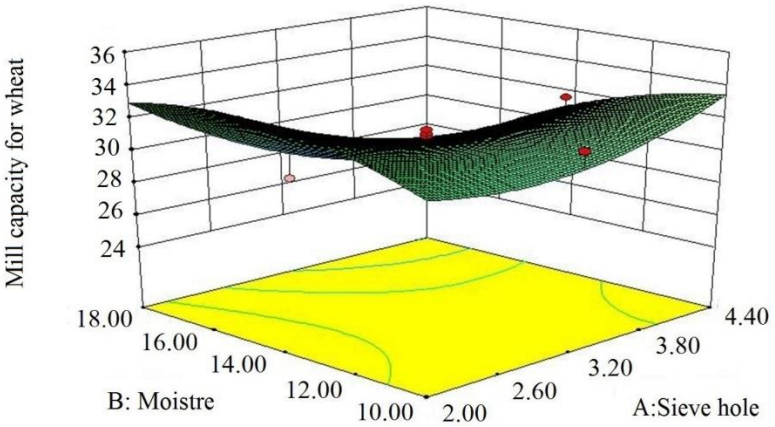
با توجه به نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای ذرت، می‌توان این‌گونه بیان کرد که دو فاکتور اندازه سوراخ غربال و رطوبت دانه تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی درجه ریزی ذرت دارند (جدول ۵). هم‌چنین از بین اثرات متقابل نیز، اثر متقابل سوراخ غربال و رطوبت در سطح یک درصد و اثر متقابل رطوبت دانه و تعداد چکش در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. به‌علاوه اثر درجه دو متغیر مستقل سوراخ غربال بر روی درجه ریزی ذرت نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین می‌توان دریافت که سه فاکتور سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر ظرفیت کاری دارند. به‌علاوه اثرات متقابل سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و نرخ تغذیه در سطح یک درصد و اثر متقابل نرخ تغذیه و تعداد چکش و هم‌چنین اثر متقابل رطوبت و نرخ تغذیه و تعداد چکش در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تنها فاکتور رطوبت دانه تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی درجه ریزی جو دارد. اثر متقابل سوراخ غربال و رطوبت دانه و همچنین اثر درجه دوم سوراخ غربال نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. فاکتورهای رطوبت دانه در سطح یک درصد و سوراخ غربال در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر ظرفیت کاری دستگاه دارد. هم‌چنین اثر درجه دوم سوراخ غربال در سطح یک درصد، اثر درجه دوم تعداد چکش و اثر متقابل اندازه سوراخ غربال و رطوبت دانه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد.

به‌منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل بر درجه ریزی و ظرفیت کاری برای محصولات مختلف، می‌توان از نمودارهای رویه سطح تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر روی متغیر وابسته استفاده کرد. در شکل ۲ شیب بیشتر تغییرات عامل اندازه سوراخ غربال بیان‌گر اثر بیشتر این عامل بر درجه ریزی گندم است. این یافته با نتایج تعدادی از محققین از جمله Murphy *et al.* (2009) که در تحقیق خود افزایش بازده خوراک برای دانه‌های گندم و سورگوم را در اثر استفاده از اندازه غربال کوچک‌تر در کیفیت بالای رژیم‌های غذایی گزارش نمودند، هم‌خوانی دارد. همچنین با توجه به شکل ۲، با افزایش اندازه سوراخ غربال، درجه ریزی گندم روند یکنواختی ندارد. افزایش درجه ریزی گندم با افزایش اندازه سوراخ غربال از سطح دوم به سوم را می‌توان ناشی از فرصت بیشتر دانه‌های سالم برای عبور از اندازه سوراخ غربال‌های درشت دانست که با نتایج تحقیق سایر محققان از جمله Adapa *et al.* (2010) و Tavakoli *et al.* (2009) مطابقت دارد. بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سوراخ غربال، ظرفیت کاری دستگاه کاهش پیدا کرده است که بیشترین ظرفیت کاری در سطح اول سوراخ غربال (۲ mm) و کمترین مقدار آن در سطح سوم سوراخ غربال (۴/۴ mm) رخ داده است. این نتایج به‌دست آمده با یافته‌های Mani *et al.* (2006) و Rezvani *et al.* (2013) مطابقت دارد.



شکل ۲– تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی دانه گندم در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 2. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the wheat fineness degree in the second level of feed rate and 18 hammers

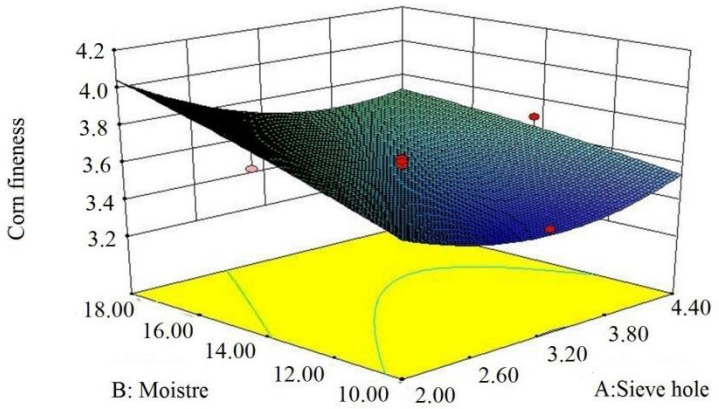


شکل ۳- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه گندم در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 3. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the mill working capacity for wheat in the second level of feed rate and 18 hammers

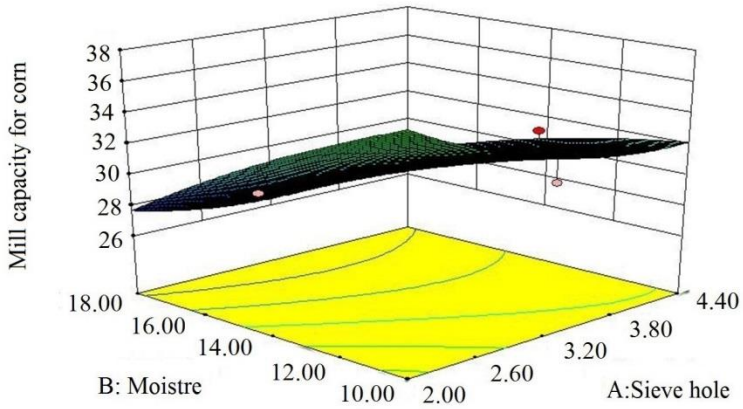
بررسی شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت دانه، درجه ریزی گندم حالت یکنواختی ندارد. کمترین درجه ریزی مربوط به شطح اول رطوبت (۱۰ درصد) است و بیشترین مقدار در سطح دوم رطوبت (۱۴ درصد) اتفاق افتاده است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از بیشتر شدن نیروی چسبندگی و کششی با افزایش رطوبت در دانه دانست که نسبت به حالت رطوبت کمتر، تردی و شکنندگی کمتری دارد. این یافته را می‌توان مطابق نتایج تحقیق Vaezizadeh and Ghaznfari-Moghaddam (2008) دانست که نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد کاهش رطوبت با افزایش میزان خرد شدگی همراه بود. اما برای ظرفیت کاری، با توجه به شکل ۳ می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش درصد رطوبت دانه گندم، ظرفیت کاری دستگاه کاهش خواهد یافت به‌طوری‌که در سطح سوم رطوبت (۱۸ درصد) پایین‌ترین ظرفیت کاری دستگاه رخ داده است. چراکه دانه با درصد رطوبت بیشتر، فرصت تخلیه کمتری را نسبت حالت خشک دارد و رطوبت مانع از خزش و روان بودن جریان دانه به داخل محفظه آسیاب است. گاهی اوقات در هنگام آزمایش جمع‌شدگی مقدار زیادی دانه سالم در داخل دهانه مخزن مشاهده می‌شد. این یافته با نتایج تحقیق Miao *et al.* (2011) هم‌خوانی دارد.

مطابق شکل‌های ۴ و ۵، اثر رطوبت دانه بر درجه ریزی و ظرفیت کاری ذرت نسبت به بقیه پارامترها بیشتر است. تاثیر سایر متغیرها بر درجه ریزی ذرت همانند نتایج درجه ریزی گندم گزارش شد. تنها اختلاف در عامل رطوبت نسبت به نتیجه گندم مشاهده شد؛ به این صورت که با افزایش رطوبت دانه، درجه ریزی ذرت روند خطی دارد؛ یعنی با افزایش رطوبت، درجه ریزی نیز بیشتر شده است به‌طوری‌که سطوح اول و سوم رطوبت (۱۰ و ۱۸ درصد) به‌ترتیب پایین‌ترین و بالاترین درجه ریزی را دارند. دلیل این امر را می‌توان ناشی از بیشتر شدن حالت خمیری محصول با افزایش رطوبت در دانه دانست که نسبت به حالت خشک، تردی و شکنندگی کمتری داردکه این نتیجه با یافته‌های Jindal and Austin (1976) هم‌خوانی دارد. هم‌چنین نتایج بیشتر تحقیقات نشان داده‌اند که برای تولید خوراک پلت شده با هدف افزایش ریزی ذرت آسیاب شده، از رطوبت ۱۰ درصد دانه استفاده شود (El Shal *et al.*, 2010). مطابق شکل ۵، نتایج به‌دست آمده از اثر متغیرها بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه ذرت همانند نتایج مربوط به ظرفیت کاری برای گندم گزارش شد. نتایج حاضر در مورد عامل اندازه سوراخ غربال برای ظرفیت کاری ذرت با یافته‌های Reece *et al.* (1986) و Martin (1985) مطابقت دارد.



شکل ٤- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی ذرت در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 4. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the corn fineness degree in the second level of feed rate and 18 hammers

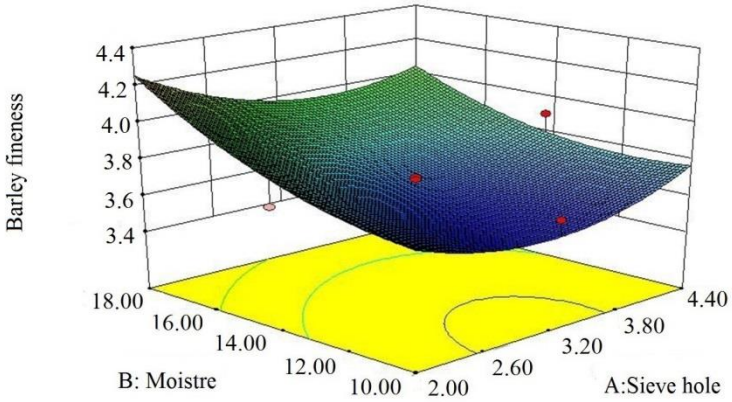


شکل ٥- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه ذرت در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 5. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the mill working capacity for corn in the second level of feed rate and 18 hammers

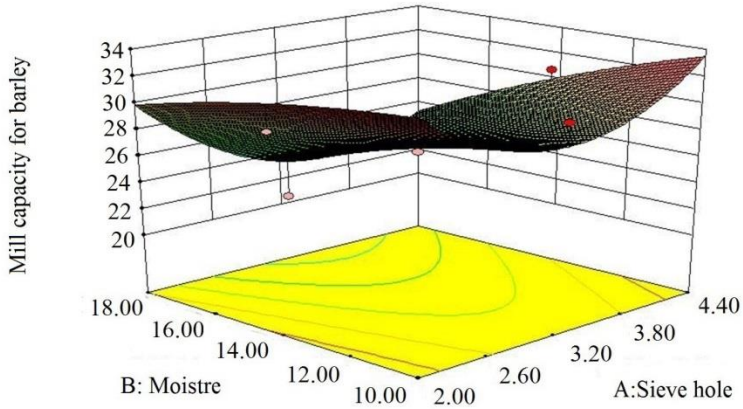
نتایج تاثیر متغیرهای اندازه سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی جو شبیه به نتایج درجه ریزی گندم و ذرت گزارش شد (شکل ۶). نتایج حاضر با یافته‌های Al-Rabadi (2013) بر روی پردازش پارامترها از جمله تولید خروجی، انرژی مصرفی و میانگین اندازه ذرات جو خرد شده تحت تاثیر دو سطح اندازه غربال آسیاب چکشی مطابقت دارد.

طبق شکل ۶ نتایج مربوط به عامل رطوبت شبیه به نتایج مربوط به پارامترهای گندم و ذرت به‌دست آمد. تفاوت در پارامتر اندازه سوراخ غربال نسبت به نتایج محصولات قبلی مشاهده شد. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که با افزایش اندازه سوراخ غربال، ظرفیت کاری دستگاه روند صعودی-نزولی پیدا کرده است که این یافته را می‌توان با نتایج تحقیق Manlu *et al.* (2006) مطابق دانست.



شکل ٦- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی جو در نرخ تغذیه سطح ۲ و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 6. Interaction between the moisture content and sieve hole diameter on the barley fineness degree in the second level of feed rate and 18 hammers



شکل ۷- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه جو در نرخ تغذیه سطح ۲ و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 7. Interaction between the moisture content and sieve hole diameter on the working capacity of the mill for barley in the second level of feed rate and 18 hammers

سهم تأثیر هر متغیر در پارامترهای مورد بررسی، که از نسبت مجموع مربعات تصحیح شده هر متغیر به مجموع مربعات تصحیح شده کل منابع تغییر حاصل می‌شود، به تفکیک هر محصول در جدول ۶ ارائه شد. لازم به ذکر است چون عوامل دیگری همچون اثرات متقابل متغیرها و نیز توان دوم متغیرهای مستقل در مدل وجود دارند، مجموع سهم تأثیر متغیرها برابر با ۱۰۰٪ نمی‌شود. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تعداد چکش بیشترین تأثیر را در ظرفیت کاری آسیاب چکشی در محصول گندم دارد و سایر عوامل مورد بررسی با اختلاف زیاد از این پارامتر قرار دارند. اندازه سوراخ غربال نیز مؤثرترین عامل بر درجه ریزی گندم نیز می‌باشد و سایر عوامل مورد مطالعه تأثیر به مراتب کمتری را نشان می‌دهند. در مورد محصولات ذرت و جو مؤثرترین عامل در ظرفیت کاری آسیاب چکشی و نیز درجه ریزی ذرات، رطوبت دانه است که سهم تاثیر آن اختلاف زیادی با سایر عوامل مورد بررسی دارد که این نتیجه خود نشان‌دهنده اهمیت بالای انتخاب صحیح رطوبت محصول در عملکرد آسیاب چکشی است.

مدل‌های رگرسیونی برای بیان رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته برای پیش‌بینی درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای محصولات گندم، ذرت و جو به همراه ضرایب تبیین آنها در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ٦- سهم تاثیر متغیرهای مستقل در پارامترهای مورد بررسی در آزمایش‌ها برای محصولات گندم، ذرت و جو

Table 6- Percentage of contribution of independent variables on investigated parameters for wheat, corn and barley

متغیر مستقل Independent variable	سهم تأثیر برای گندم (٪) Mean squares for wheat (%)		سهم تأثیر برای ذرت (٪) Mean squares for corn (%)		سهم تأثیر برای جو (٪) Mean squares for barley (%)	
	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree
A (سوراخ غربال) A (sieve hole)	4.89	17.64	5.10	12.84	5.82	1.35
B (رطوبت دانه) B (grain moisture)	7.12	1.91	47.34	44.03	42.07	49.67
C (نرخ تغذیه) C (feed rate)	4.41	0.63	6.17	0.02	1.96	0.03
D (تعداد چکش) D (number of hammer)	43.99	6.17	0.72	0.56	0.08	1.42

جدول ۷- مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای محصولات گندم، ذرت و جو

Table 7- Regression models to predict the fineness degree and mill capacity for wheat, corn and barley

پارامتر Parameter	مدل رگرسیونی Regression model	ضریب تبیین R-Squared	ضریب تبیین تصحیح شده Adjusted R-Squared
درجه ریزی گندم Fineness degree of wheat	$F.d_{wheat} = +3.58 - 0.083A - 0.048D + 0.32A^2 - 0.15B^2$	0.9230	0.8511
ظرفیت کاری برای گندم Working capacity for wheat	$Ca_{wheat} = +31.03 - 1.20A - 1.44B + 1.14C + 3.59D - 2.31AB - 1.60BD - 1.07ABC - 0.89ACD$	0.9372	0.8699
درجه ریزی ذرت Fineness degree of corn	$F.d_{Corn} = +3.59 - 0.088A + 0.16B - 0.073AB + 0.036BD + 0.20A^2$	0.9866	0.9818
ظرفیت کاری برای ذرت Working capacity for corn	$Ca_{Corn} = +32.39 - 1.10A - 3.34B + 1.21C + 1.15AB - 1.39BC + 0.79CD - 0.90BCD$	0.9289	0.8625
درجه ریزی جو Fineness degree of barley	$F.d_{Barley} = +3.95 + 0.026B - 0.026AB - 0.18 A^2$	0.8565	0.8047
ظرفیت کاری برای جو Working capacity for barley	$Ca_{Barley} = +26.45 + 1.29A - 0.71B + 1.19AB + 0.33BD - 0.87 A^2 + 2.70D^2$	0.9740	0.9246

در جدول ۷، A- اندازه سوراخ غربال (mm)، B- رطوبت دانه (%)، C- نرخ تغذیه ($g\ s^{-1}$)، D- تعداد چکش، $F.d_{wheat}$- درجه ریزی گندم (mm)، Ca_{wheat}- ظرفیت کاری دستگاه برای دانه گندم ($g\ s^{-1}$)، $F.d_{Corn}$ درجه ریزی ذرت (mm)، Ca_{Corn} ظرفیت کاری دستگاه برای دانه ذرت ($g\ s^{-1}$)، $F.d_{Barley}$ درجه ریزی جو (mm) و Ca_{Barley} ظرفیت کاری دستگاه برای دانه جو ($g\ s^{-1}$) می‌باشد.

علاوه بر محصولات فوق‌الذکر آزمایش‌ها در مورد محصول سویا نیز انجام شد ولی بر اساس تجزیه و تحلیل صورت گرفته مربوط به درجه ریزی و ظرفیت‌کاری دستگاه برای دانه سویا مشخص شد که ضریب تبیین تصحیح شده ($R_{adj}{}^2$) محاسبه شده برای دو صفت مذکور بسیار پایین بوده که مقدار آن‌ها به‌ترتیب برابر ۰/۲۰ و ۰/۲۶ است که این ارقام از نظر آماری نشان‌گر دقت پایین بوده و نتایج حاصل از آن قابل اعتماد نمی‌باشد. ضریب تبیین نشان‌دهنده قدرت توصیف تغییرات هرکدام از متغیرهای وابسته به‌وسیله متغیر مستقل است. ضریب تبیین بالا در معادلات نشان‌دهنده‌ی برازش خوب مدل محاسباتی است به طوری که مدلی که دارای بیشترین مقادیر ضریب تبیین باشد دارای قدرت پیش‌بینی بالا و دقت بیشتری خواهد بود (Badwaik *et al.*, 2012). در توجیه پایین بودن ضریب تبیین تصحیح شده ($R_{adj}{}^2$) برای دانه سویا می‌توان این‌گونه عنوان کرد که در حالت عادی (بدون داشتن رطوبت) انعطاف‌پذیری و نرمی بالایی نسبت به دانه‌های گندم، ذرت و جو دارد؛ یعنی با برخورد کمترین ضربه، سویا حالت آردی شکل به خود گرفته و آسیاب خواهد شد. در طول عملیات مرطوب کردن سویا در آزمایش‌های صورت گرفته، مشاهده شد که عمل مرطوب کردن سویا، آن را به راحتی و حتی قبل

از تغذیه و برخورد ضربه‌های چکش، به شکل آرد و حالت گلوله‌ای درآورده است. این امر هنگام تغذیه محصول به داخل مخزن آسیاب عملاً مشاهده می‌شد.

بهینه‌سازی مقادیر پارامترها

مقادیر بهینه اندازه سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش در محدوده‌ی تعریف شده، برای درجه ریزی و ظرفیت کاری دستگاه آسیاب چکشی، برای دانه‌های گندم، ذرت و جو مشخص شد. با توجه به شرایط تعیین شده، بهترین جواب‌ها مطابق جدول ۸ به‌دست آمد.

جدول ۸- شرایط بهینه برای به حداقل رساندن درجه ریزی محصولات و حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب چکشی

Table 8 - Optimal conditions for minimizing fineness degree of crops and maximizing mill working capacity

شرط بهینه‌سازی Optimization term	قطر سوراخ غربال Diameter of sieve hole	رطوبت دانه Moisture content	تعداد چکش Number of hammers	نرخ تغذیه Feed rate	خروجی بهینه Optimal output
حداقل‌سازی درجه ریزی گندم Minimizing fineness degree of wheat	3.2	10	18	343.8	3.42
حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب برای گندم Maximizing mill capacity for wheat	4.4	10	24	374.3	41.27
حداقل‌سازی درجه ریزی ذرت Minimizing fineness degree of corn	3.2	10	18	358.7	3.43
حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب برای ذرت Maximizing mill capacity for corn	2	10	24	433.8	45.12
حداقل‌سازی درجه ریزی جو Minimizing fineness degree of barley	3.2	14	24	350.6	3.60
حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب برای جو Maximizing mill capacity for barley	4.4	10	18	385.1	32.43

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی به‌منظور تعیین شرایط بهینه‌ی چهار متغیر (اندازه سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش) در سه سطح در فرآیند آسیاب کردن به‌وسیله آسیاب چکشی برای تولید خوراک طیور با هدف دستیابی به حداقل درجه‌ی ریزی (بیشتر خرد شدن مواد) و حداکثر ظرفیت کاری آسیاب به‌کار گرفته شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از این بود که به‌طور کلی با افزایش رطوبت، ظرفیت دستگاه و درجه ریزی محصولات کاهش پیدا کرده و به حداقل مقدار خود در بالاترین سطح درصد رطوبت می‌رسد. به‌طور کلی با افزایش قطر سوراخ غربال، ظرفیت کاری آسیاب و درجه ریزی گندم و ذرت آسیاب شده افزایش می‌یابند. با افزایش نرخ تغذیه و افزایش تعداد چکش، به‌ترتیب ظرفیت کاری آسیاب افزایش و درجه ریزی محصول کاهش می‌یابد. برای ظرفیت کاری آسیاب گندم، اثر متقابل سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و تعداد چکش در سطح یک درصد معنی‌دار بود. برای ذرت به‌ترتیب برای درجه ریزی، سوراخ غربال و رطوبت و برای ظرفیت کاری، سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و نرخ تغذیه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. برای درجه ریزی جو، سوراخ غربال و رطوبت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. دانه سویا به دلیل داشتن ساختار ضعیف و بافت نرم، به سرعت نسبت به افزایش رطوبت عکس‌العمل نشان داده و سریعاً به آرد تبدیل می‌شد. این عامل باعث شد تا ضریب تعیین بسیار پایین در نتیجه آزمایش‌ها از خود نشان داده و نتایج قابل قبولی به‌دست ندهد. مدل‌های رگرسیونی درجه دوم به‌دست آمده به‌خوبی توانستند با ضریب اطمینان بالای ۹۰٪ رابطه‌ی بین خروجی‌های مورد نظر و متغیرهای مستقل را محاسبه کنند. شرایط عملیاتی بهینه‌سازی کار آسیاب چکشی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی بررسی شد و تعیین سطوح بهینه متغیرهای مستقل در فرآیند آسیاب کردن و تخمین نقطه عملکرد بهینه درجه ریزی و ظرفیت کاری در بخش حل به‌دست آمد. مدل ارائه شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های آزمایشی به‌دست آمده دارد. با توجه به تأثیر زیاد رطوبت بر خروجی، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی محتوای رطوبتی محصولات به‌صورت بازه‌ای در نظر گرفته شود. هم‌چنین ارزیابی مقایسه‌ای بین انواع آسیاب‌های متداول تولید خوراک صورت گیرد تا از نظر اقتصادی و کارایی بهترین آسیاب مشخص شود و نتایج این تحقیق به‌صورت کاربردی در اختیار تولیدکنندگان خوراک طیور قرار گیرد.

References

1. Adapa, P. H., L. Tabil, and G. Schoenau. 2010. Physical and frictional properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw grinds. Powder Technology 201: 230-241.

2. Al-Rabadi, G. J. 2013. The effect of hammer mill screen size on processing parameters and starch enrichment in milled barley. Jordan Journal of Agricultural Sciences 2: 162-169.
3. Anonymous. 2004. ASTM E-11-70, US-American Standard Specification (sieve No.).
4. Aslan, N. 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator for chromite concentration. Powder Technology 86: 769-776.
5. Badwaik, L. S., K. Prasad, and S. C. Deka. 2012. Optimization of extraction conditions by response surface methodology for preparing partially defatted peanut. International Food Research Journal 19 (1): 341-346.
6. Bitra, V. S. P., A. R.Womac, N. Chevanan, P. I. Miu, C. Igathinathane, S. Sokhansanj, and D. R. Smith. 2009a. Mathematical model parameters for describing the particle size spectra of knife-milled corn stover. Biosystem Engineering 104 (3): 369-383.
7. Bitra, V. S. P., A. R.Womac, N. Chevanan, P. I. Miu, C. Igathinathane, S. Sokhansanj, and D. R. Smith. 2009b. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. Powder Technology 193: 32-45.
8. Dabbour, M. I., A. Bahnasawy, S. Ali, and Z. El-Haddad. 2015. Grinding parameters and their effects on the quality of corn for feed processing. Food Processing and Technology 6 (9): 1-7.
9. El Shal, M. S., M. A. Tawfik, A. M. El Shal, and K. A. Metwally. 2010. Study the effect of some operational factors on hammer mill. Farm Machinery and Power 27 (1): 54-74.
10. Endoh, H. 1993. Estimation of motor power output for crushing by screen hammer mills. Powder Technology 40: 71-77.
11. Ghasemi, Y., M. H. Kianmehr, and B. Azadegan. 2015. Effect of compost fertilizer granulation parameters using response surface method. Journal of Agricultural Machinery 5 (1): 191-198. (In Farsi).
12. Ghorbani, Z., A. A. Masoumi, and A. Hemmat. 2010. Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill. Biosystems Engineering 105: 34-40.
13. Giri, S. K., and S. Prasad. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. Journal of Food Engineering 78 (2): 512-521.
14. Islam, M. N. 1988. Size distribution analysis of ground wheat by hammer mill. Powder Technology 54 (4): 235-241.
15. Jindal, V. K., and L. G. Austin. 1976. The kinetics of hammer milling maize. Powder Technology 14 (1): 35-39.
16. Kermanshahi, H., A. Attar, A. Abbassipour, and A. Bayat. 2014. A Comprehensive Guide to the Technology and Processing of Animal, Poultry and Aquatic Feed. Scientific Research Department of Hezareh Novin Co., pp. 276, Mashhad. (In Farsi).
17. Kiani, S. 2006. Animal Husbandry. 2nd Edition, Daneshvaran Publication, pp. 295, Tehran. (In Farsi).
18. Mani, S., L. G. Tabil, and S. Sokhansang. 2006. Specific energy requirement for compaction corn stover. Bioresource Technology 97: 1420-1426.
19. Manlu, Y. U., A. R. Womac, P. I. Miu, C. Igathinathance, I. Sokhansanj, and S. Narayan. 2006. Direct energy measurement system for rotary biomass grinder-hammer mill. ASABE Annual International Meeting. Convention Center Portland, Oregon. Paper No: 066217.
20. Martin, S. A. 1985. Comparison of hammermill and roller mill grinding and the effect of grain particle size on mixing and pelleting master's thesis. Department of Grain Science and Industry, Kansas State University.
21. Miao, Z., T. E. Grift, A. C. Hansen, and K. C. Ting. 2011. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. Industrial Crops and Products 33: 504-513.
22. Murphy, A., C. Collins, A. Philpotts, A. Bunyan, and D. Henman. 2009. Influence of hammer mill screen size and grain source (wheat or sorghum) on the growth performance of male grower pigs. Report prepared for the Co-operative Research Centre for an Internationally Competitive Pork Industry. Established and supported. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download.
23. Pishkar, J. 2000. Application and Service of Dairy Machines. Institute for Applied Higher Education in Tehran, pp. 152, Tehran. (In Farsi).
24. Pourazarang, H., and H. R. Ziaulhagh. 2002. Units Operation in Agricultural Products Processing. 1st Edition, Ferdowsi University Press, pp. 532, Mashhad. (In Farsi).
25. Reece, F. N., B. D. Lott, and J. W. Deaton. 1986. Effects of hammer mill screen size on ground corn particle size, pellet durability, and broiler performance. Poultry Science 65 (7): 1257-1261.
26. Rezvani, Z., Gh. Chegini, A. Arabhosseini, M. H. Kianmehr, and M. R. Asadi. 2013. Determining the specific energy consumption for grinding rice straw with a hammer mill. Journal of Automotive and Applied Mechnics 1 (1): 10-14.
27. Rouissi, T., A. Mahmoudi, R. D. Tyagi, S. K. Brar, D. Vost, and R. Y. Surampalli. 2007. Optimisation of spray drying by response surface methodology for the production of Sinorhizobium meliloti powder formulation by using starch industry wastewater. Biosystems Engineering 114 (3): 334-343.

28. Tavakoli, H., S. S. Mohtasebi, A. Jafari, and D. Mahdavinejad. 2009. Power requirement for particle size reduction of wheat straw as a function of straw threshing unit parameters. Australian Journal of Crop Science 3 (4): 231-236.
29. Tumuluru, J. S., L. G. Tabil, Y. Song, K. L. Iroba, and V. Meda. 2014. Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws. Biomass and Bioenergy 60: 58-67.
30. Vaezizadeh, M., and A. Ghaznfari-Moghaddam. 2008. Effect of adding moisture and storage time on the size of milled wheat particles. 5th National Congress on Agricultural Machinery and Mechanization, Mashhad, Iran. (In Farsi).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 187-200

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۰۰-۱۸۷

Modeling and Optimization of the Grinding Cereals to Produce Poultry Feed in the Hammer Mill using Response Surface Method (RSM)

Z. Zibahoosh[1], J. Khodaei[2*], S. Zareei[2]

Received: 08-05-2018
Accepted: 25-08-2018

Introduction: The most costly part of poultry breeding is feeding. Due to the noticeable developments in animal husbandry and agricultural sectors, it is necessary to use the mechanized methods to reduce the casualties, increase the productivity as well as reduce the time and cost in each of these sectors. Reducing the particle size is one of the ways to process cereals which improves the mixing and also the nutritional value of the feed and the quality of the pellet feed. Optimizing the performance of hammer mill with the aim of reducing the size of different materials for poultry feed, would be very beneficial for obtaining the minimum cost of food, maximum quality and capacity. The main objective of this research was to optimize the operational variables, including sieve size, grain moisture content, feed rate and the number of hammers, each of them at three levels, on a hammer mill during the process of poultry food production from wheat, corn, barley and soybean grains.

Materials and Methods: The seeds used in experiments were wheat (Azar2 variety), corn (Brazilian variety), soybean (Danpars variety) and barley (Aras variety). A laboratory hammer mill was used to perform experiments. The treatments including sieve diameter (2, 2.3and 4.4 mm), grain moisture content (10, 14 and 18%), seed input rate to milling compartments (one-third, two-thirds and fully openness of tank gate) and the number of hammer (12, 18 and 24) were investigated. In order to measure the working capacity of the hammer mill, the required time for milling was recorded. The amount of final milled crop in each experiment was weighed and divided into the needed time for milling. Sieve analysis was used to determine the distribution and dispersion of the milled material which works according to the standard of ASTM E-11-70 Part 41 (Anonymous, 2004). In this study, the effects of input variables were investigated using the response surface method focusing on the central composite design approach to optimize the fineness degree and working capacity of the mill. The Design Expert 8.0.6 software was applied for statistical analysis, modeling and optimization.

Results and Discussion: The results indicated that sieve size and the number of hammers have been affected by the fineness degree of wheat grains, significantly. In addition, all four factors and interaction effects between sieve size and moisture content and also moisture content and number of hammers influential working capacity at the significant level of 1%. In the case of corn, the influence of moisture content and its interaction with sieve size on grain fineness, and the effect of sieve size, moisture content, feed rate and interactions between sieve size and moisture content and moisture content and feed rate of working capacity were significant at the level of 1%. For barley, moisture content at the level of 1% and interaction between sieve size and moisture content at the probability level of 5% were effective on barley fineness degree. Meanwhile, the moisture content at the level of 1% and sieve size and its interaction with moisture content at the level of 5% influenced working capacity, significantly. Soybeans were not able to respond the required moisture level for the experiments due to their soft and brittle texture, whereas unreliable results were obtained by changing its moisture levels. The best size of sieve holes, grain moisture content, feed rate and the number of hammers were determined to minimize the fineness degree and maximize the working capacity of the hammer mill.

Conclusions: In this research, the response surface method considering a central composite design was used to optimize the operational variables of a hammer mill, including sieve hole size, grain moisture, feed rate and the number of hammer to produce poultry feed with the aim of achieving a minimum fineness degree (more grain crushing) and maximum milling capacity. The results of variance analysis were presented for wheat, corn, barley and soybean. Regression models could represent the relationship between the independent variables and the outputs with high confidence coefficient, and the best values of input variables were determined to optimize grinding operation.

Keywords: Fineness, Hammer mill, Milling, Optimization, Work capacity

1- MSc. Graduated Student, Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: j.khodaei@uok.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 201-212

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۱۲-۲۰۱

بهینه‌سازی خشک‌کردن پاششی عصاره گیاه بادرشبو با استفاده از روش سطح پاسخ و تاپسیس

ادریس رحمتی[۱]، فاروق شریفیان[۲*]، محمد فتاحی[۳]، غلامحسن نجفی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶

چکیده

خشک‌کردن پاششی به‌طور متداول در تولید پودر گیاهان دارویی به‌کار می‌رود، کیفیت پودر به‌دست آمده وابسته به شرایط خشک‌کردن و ماده کمکی به‌کار برده شده است. هدف از این تحقیق بهینه کردن متغیرهای فرآیند همچون دمای هوای ورودی، نرخ جریان هوای فشرده و غلظت ماده کمکی بر روی محتوای رطوبتی، عملکرد خشک کردن، محتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی پودر عصاره گیاه بادرشبو می‌باشد. بدین منظور از دو روش سطح پاسخ و تاپسیس برای بهینه‌سازی و رتبه‌بندی هر یک از متغیرها استفاده شد. نتایج نشان داد که دمای هوای ورودی و نرخ جریان هوای فشرده بیشترین تاثیر را روی محتوای رطوبتی و عملکرد خشک‌کردن نمونه‌ها داشتند، در حالی‌که غلظت ماده کمکی اثر معنی‌داری بر محتوای فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها داشت. بهترین تیمار در روش تاپسیس در دمای هوای ورودی ۱۵۰ °C، نرخ جریان هوای فشرده ۷/۵ Lit min^{-1} و غلظت ماده کمکی ۲۰ درصد به‌دست آمد. همچنین شرایط بهینه در روش سطح پاسخ در دمای هوای ورودی ۱۵۲/۵، نرخ جریان هوای فشرده ۸/۰۴۶ و غلظت ماده کمکی ۲۰ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، خشک‌کردن پاششی، روش تاپسیس، روش سطح پاسخ، شرایط خشک‌کردن، گیاه بادرشبو

مقدمه

کاربرد گیاهان دارویی از زمان‌های قدیم جهت مصارف دارویی، بهبود طعم مواد غذایی و درمان بسیاری از بیماری‌ها شناخته شده است. امروزه گیاهان دارویی نقش مهمی در مراقبت از سلامتی حدود ۸۰ درصد از جمعیت جهان را بر عهده دارند و تقریباً نیمی از داروهایی که در بیمارستان‌ها به‌کار گرفته می‌شود از گیاهان دارویی تهیه می‌گردد. این گیاهان معمولاً حاوی خواص آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌میکروبی هستند که بدن انسان را در مقابل اکسیداسیون سلولی و میکروارگانیسم‌های پاتوژنیک محافظت می‌کنند (Cordeiro and Oliveira, 2005). بادرشبو با نام علمی *Dracocephalum moldavica* L. یک گیاه یک‌ساله با گل‌های سفید و آبی و برگ‌های معطر، متعلق به خانواده نعناعیان است که تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری رشد می‌کند. این گیاه بومی آسیای مرکزی و پذیرفته شده در مرکز و شرق اروپاست (Dastmalchi *et al.*, 2007a). همچنین در چین، مصر، مغولستان و هیمالیا یافت می‌شود. در ایران عمدتاً در بخش‌های شمال کشور و کوه‌های البرز رشد می‌کند. استان آذربایجان‌غربی از نظر سطح زیر کشت گیاه بادرشبو بیشترین مقدار را در کشور به خود اختصاص داده است. طبق آمار سال ۱۳۹۵ بالغ بر ۱۶۰ هکتار از اراضی استان آذربایجان‌غربی به کشت بادرشبو اختصاص داشته که از این مقدار حدود سه هزار و سیصد و چهل تن محصول برداشت گردیده است. از فرآورده‌های گیاه بادرشبو می‌توان به عرقیات، اسانس و عصاره اشاره کرد. عصاره این گیاه به‌طور عمده در صنایع دارویی، آرایشی و بهداشتی، طعم‌دهنده‌ها و همچنین به‌عنوان افزودنی در چای، نوشیدنی‌ها، انواع شیرینی‌ها و محصولات دیگر به‌کار گرفته می‌شود. با توجه به مزایای عصاره گیاه بادرشبو و فصلی بودن آن از یک سو و تحت تأثیر قرار گرفتن ترکیبات فعال عصاره به‌واسطه دما، اکسیژن، نور و آنزیم‌ها از سوی دیگر خشک‌کردن عصاره این گیاه امری ضروری است.

خشک‌کن‌های متعددی همچون خشک‌کن پاششی، خشک‌کن انجمادی و خشک‌کن فواره‌ای جهت خشک‌شدن عصاره گیاهان دارویی استفاده می‌شود. انتخاب روش، مقدار دما و زمان مناسب خشک‌کردن با توجه به نوع ماده مؤثره متفاوت می‌باشد (Oztekin and Martinov, 2014). خشک‌کردن توسط خشک‌کن پاششی تبدیل مایع به ذرات خشک‌شده پودر، به‌وسیله اسپری کردن مایع به درون محفظه‌ی خشک‌کردن است که با فراهم کردن حجم کافی از هوای گرم باعث تبخیر قطرات مایع و خشک‌کردن ذرات محبوس شده در محفظه‌ی خشک‌کن می‌گردد. مایع می‌تواند محلول، سوسپانسیون، امولسیون یا ژل باشد. در خشک‌کن‌های پاششی علی‌رغم دمای بالای استفاده‌شده برای خشک‌کردن، ذرات اسپری شده به‌واسطه‌ی از دست دادن رطوبت، در دمای بسیار پایین‌تری و برای زمان بسیار کوتاهی باقی می‌مانند، از این رو این روش خشک‌کردن به‌عنوان خشک‌کردن با دمای پایین نیز شناخته می‌شود.

۱ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- دانشیار، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: f.sharifian@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.78344

در زمینه خشک‌شدن گیاهان دارویی با خشک‌کن‌ها، تحقیقات متعددی انجام شده است، از جمله می‌توان به خشک‌شدن گیاه نعناع با خشک‌کن خورشیدی و خلائی-مادون قرمز (Bahmanpour *et al.*, 2017)، خشک‌کردن شوید جهت ارزیابی عملکرد خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه کنترل هوای خشک‌کننده (Razmipour *et al.*, 2015)، خشک‌کردن پاششی عصاره آبی خربزه تلخ (Tan *et al.*, 2015) خشک‌کردن پاششی عصاره رزماری (Chaul *et al.*, 2017) و خشک‌کردن عصاره کنگر فرنگی (Namavar *et al.*, 2018) با خشک‌کن خلایی پاششی اشاره کرد. همچنین پژوهش‌های متعددی در مورد گیاه بادرشبو و شناسایی ترکیبات آن انجام شده است. از جمله می‌توان به بررسی ترکیبات شیمیایی و خواص آنتی‌اکسیدانی گیاه بادرشبو (Dastmalchi *et al.*, 2007b)، تاثیر کود آلی بر روی ترکیبات شیمیایی اسانس روغنی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه بادرشبو (Fallah *et al.*, 2018) ، بررسی خواص مورفولوژیکی، اسانس روغنی و ترکیبات شیمیایی گیاه بادرشبو در پنج منطقه مختلف (Yousefzadeh *et al.*, 2018) و خشک‌کردن گیاه بادرشبو (Rahmati *et al.*, 2018) اشاره کرد.

در خشک‌کردن پاششی خواص فیزیکی و شیمایی پودر به‌دست آمده به‌وسیله فاکتورهایی همچون دمای هوای خشک‌کردن، نرخ جریان هوای فشرده، غلظت ماده کمکی و نرخ جریان عصاره تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Tonon *et al.*, 2008). بنابراین جهت دستیابی به پودر با کیفیت بالا، کنترل شرایط خشک کردن و در نتیجه بهینه‌سازی فرآیند امری ضروری است. روش‌های مختلفی همچون روش سطح پاسخ و شبکه‌های عصبی به‌طور موفقیت‌آمیزی جهت بهینه‌سازی شرایط خشک‌کردن پاششی به‌کار گرفته شده است. ولی تاکنون هیچ مطالعه‌ای در ارتباط با دو روش سطح پاسخ و روش تاپسیس جهت بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن عصاره گیاه بادرشبو گزارش نشده است. از این رو هدف از این تحقیق بررسی تأثیر فاکتورهای دمای هوای ورودی، نرخ جریان هوای فشرده و غلظت ماده کمکی بر روی محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنول کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای فلاونوئید کل می‌باشد. در نهایت نقطه بهینه فرآیند خشک‌کردن با هر دو روش بررسی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه و عصاره گیری

اندام‌های هوایی گیاه بادرشبو در تابستان سال ۱۳۹۵ از یکی از کشتزارهای ارومیه برداشت شد. پس از تهیه گیاه قسمت‌های اضافی و زائد گیاه جدا شد و در نهایت جهت خشک‌کردن به آزمایشگاه انتقال یافت. خشک کردن گیاه در شرایط سایه (۲۳±۳ °C) و به‌صورت لایه نازک انجام شد.

جهت عصاره‌گیری گیاه بادرشبو از روش خیساندن (Maceration) استفاده شد. بدین منظور از حلال‌های اتانول: آب به نسبت ۵۰:۵۰ (v/v) و نسبت گیاه به حلال ۱:۱۰ (w/v) در دمای ۲۵ °C استفاده شد. بعد از گذشت ۴۸ ساعت عصاره به‌دست آمده با اسفاده از کاغذ صافی فیلتر و در نهایت جهت تغلیظ عصاره و حذف اتانول از دستگاه روتاری (Buchi Rotavapor R-205, Switzerland) استفاده شد.

خشک‌کن پاششی

قبل از استفاده از خشک‌کن پاششی، یک ماده تحت عنوان ماده کمکی به عصاره اضافه می‌گردد. ماده کمکی بازده و کیفیت نهایی پودر را بهبود و در شکل یک پوسته یا ماتریس از اجزای فعال محافظت می‌کند (Domian *et al.*, 2015). از ماده کمکی‌های متداول در فرآیند خشک‌کن پاششی می‌توان به کربوهیدرات‌ها، صمغ‌ها، مشتقات سلولز و پلیمرهای مصنوعی اشاره کرد (Chiu *et al.*, 2007; Ersus and Yurdagel, 2007; Tuyen *et al.*, 2010). هر یک از این مواد دارای مزایا و معایبی در خواص، هزینه و بازده انکپسولاسیون دارند. مالتودکسترین به‌تنهایی یا در ترکیب با مواد دیگر در صنایع غذایی و صنایع دارویی، عصاره‌های گیاهی، مواد معطر و ویتامین‌ها استفاده می‌شود (Sadeghi *et al.*, 2008; Pierucci *et al.*, 2007; Bae and Lee, 2008). در این تحقیق مالتودکسترین و پکتین سیب به علت خوراکی بودن ، هزینه مناسب و حلالیت بالا به عنوان ماده کمکی استفاده شدند. نسبت‌های مختلف ماده کمکی (۳۰-۱۰درصد پکتین به مالتودکسترین) تهیه شد و سپس در داخل آب مقطر حل شدند. در نهایت با عصاره تغلیظ شده که حاوی ۰/۶ درصد وزنی ماده خشک در عصاره تغلیظ شده بود، مخلوط شدند.

در این پژوهش از یک خشک‌کن پاششی (Model-DSD-02) ساخت شرکت درسا به ساز، البرز، ایران با مشخصات (220VAC-14A-3000W) و با الگوی جریان هم‌جهت واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه ارومیه استفاده شد (شکل ۱). محفظه خشک‌کن به‌صورت استوانه‌ای با قسمت پایینی مخروطی شکل و ابعاد ۷۰×۵۳×۹۵ (طول×عرض×ارتفاع) سانتی‌متر بود. فرآیند پاشش عصاره به داخل محفظه خشک‌کن توسط یک نازل دو جریانی با قطر ۰/۷ میلی‌متر تحت تأثیر هوای فشرده کمپرسور انجام می‌شود. نرخ جریان هوای فشرده توسط فلومتر هوا که روی دستگاه تعبیه شده، قابل تنظیم است. هوای محیط پس از عبور از یک گرم‌کن الکتریکی همسو با جریان عصاره وارد محفظه‌ی خشک‌کن می‌شود. در نهایت ذرات خشک‌شده در پایین سیکلون جمع‌آوری و از هوای خروجی جدا می‌گردند. پودر به‌دست آمده تا زمان شروع آزمایش‌ها در یخچال نگهداری شد. در همه نمونه‌های خشک‌شده با خشک‌کن پاششی

دمای محیط (آزمایشگاه) و دبی خوراک به‌ترتیب °C ۲۵ و ۱۶ میلی‌لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

شکل ۱- خشک‌کن پاششی مورد استفاده در این تحقیق
Fig.1. The spray dryer used in this research

طرح آزمایشی تحقیق

در بیشتر مطالعات بر مبنای آزمایش فاکتوریل، با توجه به افزایش تعداد تیمارها هزینه‌های آزمایش افزایش می‌یابد. باتوجه به این مهم، در این پژوهش از روش سطح پاسخ و استفاده از طرح باکس- بنکن با سه تکرار در نقطه مرکزی استفاده شد. مزیت اصلی روش سطح پاسخ، کاهش تعداد آزمایش‌های لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهم‌کنش بین آن‌ها است. مراحل تحلیل در روش سطح پاسخ شامل چهار مرحله اصلی: تعیین تعداد متغیرهای مستقل و وابسته، تشکیل جدول طرح آزمایش، مشخص کردن مدل آماری مناسب جهت تجزیه واریانس داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند می‌باشد. در این پژوهش سه متغیر مستقل دمای هوای ورودی (°C ۱۸۰-۱۲۰)، غلظت ماده کمکی (۳۰-۱۰ درصد) و نرخ جریان هوای فشرده ($5-10 Lit\ min^{-1}$) در سه سطح مورد بررسی قرار گرفت. همچنین محتوای رطوبتی، عملکرد خشک کردن، محتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به‌عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شدند. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (Design-Expert® Software Version 10) مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت دقت مدل آماری و معنی‌داری ضرایب رگرسیونی با استفاده از آنالیز واریانس انجام شد. پس از آنالیز واریانس درجه اهمیت هر یک از متغیرهای وابسته مشخص و بر مبنای آن بهینه‌سازی فرآیند صورت گرفت.

آنالیز خواص فیزیکی و شیمیایی پودر

محتوای رطوبتی: جهت اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از روش (AOAC) با اندکی تغییرات استفاده شد (Fazaeli *et al.*, 2012). بدین منظور یک گرم پودر از هر یک از نمونه‌ها با سه تکرار در یک پلیت شیشه‌ای ریخته شد. سپس پلیت حاوی پودرها در داخل آون خلا در دمای ۷۰ درجه‌سیلسیوس قرار گرفتند. در نهایت وقتی که نمونه‌ها به وزن ثابت رسیدند، آن‌ها را از داخل آون بیرون آورده و جرم نهایی اندازه‌گیری شد. سپس با توجه به رطوبت از دست رفته، رطوبت نمونه‌ها بر پایه تر محاسبه شد.

عملکرد خشک‌کردن: عملکرد خشک‌کن یکی از اصلی‌ترین شاخص‌ها و بیانگر میزان اقتصادی بودن، کارایی و همچنین درصد موفقیت‌آمیز بودن فرآیند در طی خشک‌کردن پاششی است. عملکرد خشک‌کن پاششی از نسبت وزن پودر به وزن اجزای جامد خوراک و از رابطه (۱) به‌دست آمد (Gallo *et al.*, 2011).

$$\text{عملکرد خشک کن} = \frac{\text{(وزن نهایی پودر)}}{\text{(وزن ماده جامد موجود در عصاره)}} \qquad (۱)$$

محتوای فنول کل: محتوای فنل کل نمونه‌ها بر اساس روش رنگ‌سنجی فولین سیوکالتیو و با استفاده از گالیک اسید به‌عنوان استاندارد اندازه‌گیری شد (Marinova *et al.*, 2005). بدین منظور ۰/۱ گرم پودر را در ۲۰ میلی‌لیتر اتانول ۵۰٪ حل کرده و از آن به مقدار ۵ میکرولیتر برداشته شد. سپس به هر یک از نمونه‌ها ۱۸۰ میکرولیتر آب مقطر و ۱۲۰۰ میکرولیتر معرف فولین‌سیوکالتیو اضافه شد. بعد از ۵ دقیقه، سدیم کربنات ۷/۵ درصد به مخلوط اضافه شد. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۹۰ دقیقه در تاریکی و در دمای اتاق (°C ۳±۲۵) قرار داده شدند. در نهایت جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر به‌وسیله اسپکتروفتومتر (UV2100 PC) تعیین و مقدار فنل کل بر حسب mg GAE/g DW به‌دست آمد.

محتوای فلاونوئید کل: مقدار فلاونوئید کل بر اساس روش رنگ‌سنجی آلومینیوم کلرید و استفاده از کوئرستین به‌عنوان استاندارد اندازه‌گیری شد (Beketov *et al.*, 2005). ۰/۱ گرم پودر را در ۲۰ میلی‌لیتر اتانول ۵۰ درصد حل کرده و از آن به مقدار ۵ میکرولیتر برداشته شد. سپس به هر یک از نمونه‌ها ۳۰۰ میکرولیتر محلول آلومینیوم کلرید ۱۰ درصد، ۱۵۰ میکرولیتر نیتریت سدیم، ۱۰۰۰ میکرولیتر محلول استات سود ۱ مولار و در نهایت با آب مقطر به حجم ۵ میلی‌لیتر رسانده شد. جذب مخلوط در طول موج ۳۸۰ نانومتر نسبت به شاهد تعیین و مقدار فلاونوئید کل بر اساس میلی‌گرم معادل کوئرستین بر گرم وزن خشک گیاه تعیین شد (Chang *et al.*, 2002).

فعالیت آنتی‌اکسیدانی: جهت اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی ۰/۱ گرم پودر را در ۲۰ میلی‌لیتر اتانول ۵۰ درصد حل کرده و از آن به مقدار ۱۰ میکرولیتر برداشته شد. سپس مقدار مشخصی از آن را در یک لوله آزمایش ریخته و به آن ۲۰۰۰ میکرولیتر محلول DPPH اضافه شد. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه نگهداری و جذب آن‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر به‌وسیله اسپکتروفتومتر تعیین شد. در نهایت با استفاده از رابطه (۲) میزان به

دام‌اندازی رادیکال‌های آزاد اندازه‌گیری شد (Akowuah *et al.*, 2005).

$$DPPH = \frac{A_{blank}-A_{sample}}{A_{blank}} \times 100 \quad (۲)$$

A_{blank}: میزان جذب بلانک، A_{sample}: میزان جذب نمونه و DPPH: درصد مهار رادیکال‌های آزاد را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد جهت مقایسه شرایط مختلف خشک‌کردن، تعیین فاصله بین گزینه‌ها، انتخاب بهترین گزینه و رتبه‌بندی آن‌ها از روش تاپسیس استفاده شد. این روش در هفت مرحله به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری با m گزینه (متغیر مستقل) و n معیار (متغیر وابسته)

۲- نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری $r_{ij} = X_{ij} / \sqrt{\sum (X_{ij})^2}$, $i = 1,2, \ldots, m$, j=1, 2……n

۳- به‌دست آوردن وزن هر یک از معیارها و ایجاد ماتریس وزنی نرمال شده $Vij = Wij * ri_j$

وزن هر یک از معیارها با استفاده از روش وزن‌دهی آنتروپی شانون تعیین گردید (Li *et al.*, 2011). اصول این روش به شرح زیر می‌باشد:

۳-۱- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

۳-۲- ایجاد ماتریس نرمال شده $P_{ij} = \frac{Xij}{\sum_{i=1}^{m} Xij}$ j= 1…n,

۳-۳- محاسبه آنتروپی هر شاخص:

$Ej = -K \sum_{i=1}^{m} (Pij * LNPij)$ $K= 1/\ln m, 0 \le Ej \le 1$

۳-۴- محاسبه فاصله هر شاخص از آنتروپی $dj = 1 - E_j$

۳-۵- محاسبه وزن هر یک از معیارها $Wj = dj / \sum_{k=1}^{n} dj$

۴- تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی:

$A^+=\{(\max Vij \mid j \in J), (\min Vij \mid j \in J')\}$,
$A^-=\{(\min Vij \mid j \in J), (\max Vij \mid j \in J')\}$

۵- تعیین فاصله گزینه های ماتریس نرمال وزن‌دار از نقاط ایده‌آل مثبت و منفی:

$Si^+ = \sqrt{\sum (V_{ij} - Vi^+)^2}$, $Si^- = \sqrt{\sum (V_{ij} - Vi^-)^2}$

۶- محاسبه نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل: $Ci^+=Si^-/(Si^++Si^-)$

۷-رتبه‌بندی گزینه‌ها

نتایج و بحث

محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی هر یک از داده‌های آزمایشی در جدول ۱ نشان داده شده است. آنالیز واریانس برای هر یک از متغیرهای وابسته به همراه ضرایب رگرسیونی در جدول ۲ گزارش شده است. باتوجه به نتایج جدول ۲، مشاهده می‌شود که طرح باکس-بنکن با یک مدل درجه دوم سبب معنی‌دار شدن مدل رگرسیونی، غیر معنی‌دار شدن نقاط پرت و ضرایب همبستگی مناسب برای هر یک از پاسخ‌ها شده است. مقادیر ضریب تبیین برای محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنل کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به‌ترتیب ۰/۹۹۳۷، ۰/۹۹۳۳، ۰/۹۸۵۸، ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۷ به‌دست آمد.

محتوای رطوبتی

اثر پارامترهای دمای هوای ورودی، نرخ جریان هوای فشرده و غلظت ماده کمکی بر محتوای رطوبتی نمونه‌های پودر در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با افزایش دمای هوای ورودی و نرخ جریان هوای فشرده محتوای رطوبتی نمونه‌های پودر به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) از مقدار ۱۱/۳ درصد به ۶/۲ درصد کاهش یافت (شکل ۲). می‌توان چنین نتیجه گرفت که با کاهش اندازه ذرات و افزایش دمای هوای خشک‌کردن، گرادیان دمایی بین ذرات اتمیزه شده و جریان هوا افزایش می‌یابد، در نتیجه نرخ تبخیر سریع‌تر و محتوای رطوبت نمونه‌ها، کاهش می‌یابد. مظفر و کومار (Muzaffar and Kumar, 2015) در تحقیقی که بر روی تمبر هندی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که افزایش دمای هوای ورودی سبب کاهش محتوای رطوبتی نمونه‌های پودر می‌شود.

مقدار افزایش غلظت ماده کمکی از ۱۰ تا ۲۵ درصد به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) سبب کاهش محتوای رطوبتی نمونه‌های پودر از ۹ درصد به ۷/۹ درصد شد (شکل ۲). این نتیجه منطبق بر یافته‌های واتسون و همکاران (Watson *et al.*, 2017) است، چرا که با افزایش غلظت ماده کمکی مقدار محتوای جامد در عصاره افزایش و در نتیجه نرخ تبخیر رطوبتی کاهش می‌یابد، بنابراین رطوبت نهایی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. تأثیر افزایش ماده کمکی پکتین سیب بر میزان محتوای رطوبت تا ۲۵ درصد سبب کاهش محتوای رطوبتی و در غلظت‌های بالا باعث افزایش محتوای رطوبت نمونه‌های پودر تا حدود ۸/۵ شد. در غلظت‌های بالا ویسکوزیته خوراک بیشتر و رطوبت به آسانی از محصول خارج نمی‌گردد در نتیجه محتوای رطوبتی نهایی پودر افزایش می‌یابد.

عملکرد خشک کردن

عملکرد خشک‌کردن یک ویژگی کلیدی در تولید پودر با خشک‌کن پاششی است که به‌وسیله اندازه ذرات پودر به‌دست آمده تحت تأثیر قرار می‌گیرد. رنج اندازه ذرات خشک شده در این تحقیق در محدوده‌ی ۲ الی ۵۰ میکرومتر بود. عملکرد خشک‌کردن نمونه‌های پودر در محدوده ۷۳-۱۶ درصد متغیر بود (جدول ۱). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده تمامی متغیرهای آزمایشی تأثیر معنی‌داری بر مقدار عملکرد خشک‌کردن نمونه‌های پودر بادرشبو داشته است. باتوجه به شکل ۲ مشاهده می‌گردد که با افزایش دمای هوای ورودی و نرخ جریان هوای فشرده، عملکرد خشک‌کردن به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) از ۲۰ درصد به ۷۰ درصد افزایش پیدا کرد. باتوجه به نتایج فوق، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش

نرخ جریان هوای فشرده قطر قطرات و اندازه ذرات کاهش می‌یابد. ذرات کوچک چگال‌تر و احتمال بازیافت آن بیشتر از ذرات دیگر است، از سوی دیگر در دماهای بالاتر انتقال هم‌زمان حرارت و جرم بیشتر می‌باشد در نتیجه ذرات سریع‌تر خشک شده و فرصت برخورد و چسپیدن به دیواره محفظه خشک‌کن را نخواهند داشت.

فضائلی و همکاران، شیشر و همکاران (Fazaeli *et al.*, 2012; Shishir *et al.*, 2014) به‌ترتیب نتایج مشابهی را در مورد زیتون محلی و آبمیوه توت سیاه گزارش کردند. افزایش مقدار ماده کمکی سبب افزایش عملکرد خشک‌کردن از ۵۰ درصد به ۶۰ درصد شد (شکل ۲). این افزایش بازده ناشی از نقش و عملکرد پکتین سیب به‌عنوان ماده کمکی و ایجاد یک لایه و فیلم نازک غیرچسپنده اطراف ذرات در حین خشک‌کردن می‌باشد.

جدول ۱- داده‌های آزمایشی مورد استفاده در روش سطح پاسخ و تاپسیس

Table 1- The experimental data for response surface methodology and TOPSIS method

گزینه‌ها Run	IAT[1] (°C)	CAF[2] (lit.min^{-1})	C[3] (%)	معیارها Criteria				
				M.C[4] (%)	DP[5] (%)	TPC[6]	TFC[7]	AA[8] (%)
1	120	5	0.2	11.3	16	4.36	0.23	32.56
2	150	10	0.1	7.8	65	5.31	0.26	36.5
3	150	7.5	0.2	7.9	61	6.4	0.4	58
4	180	7.5	0.3	6.36	69	4.5	0.23	34.11
5	150	7.5	0.2	7.9	59	6.4	0.4	58
6	120	10	0.2	8	55	5.24	0.3	36
7	180	10	0.2	6.2	73	3.75	0.21	22.09
8	180	5	0.2	7.86	65	5.42	0.28	21.42
9	150	7.5	0.2	7.9	60	6.4	0.4	58
10	150	10	0.3	6.84	68	4.7	0.26	34.72
11	150	5	0.3	10	38	5.06	0.24	35.33
12	120	7.5	0.3	9.5	40	3	0.2	42.41
13	120	7.5	0.1	10.3	30	5.83	0.32	43.21
14	150	5	0.1	10.1	35	5.35	0.27	39.98
15	180	7.5	0.1	7.66	67	3.8	0.21	28.29

۱- دمای هوای ورودی، ۲- نرخ جریان هوای فشرده، ۳- غلظت ماده کمکی، ۴- محتوای رطوبتی، ۵- عملکرد خشک‌کردن، ۶- محتوای فنول کل، ۷- محتوای فلاونوئیدکل، ۸- فعالیت آنتی‌اکسیدانی

1- Inlet air temperature, 2- Compressed air flow, 3- Concentration of carrier, 4- Moisture content, 5- Drying performance, 6- Total phenol content, 7- Total flavonoid content, 8- Antioxidants activity

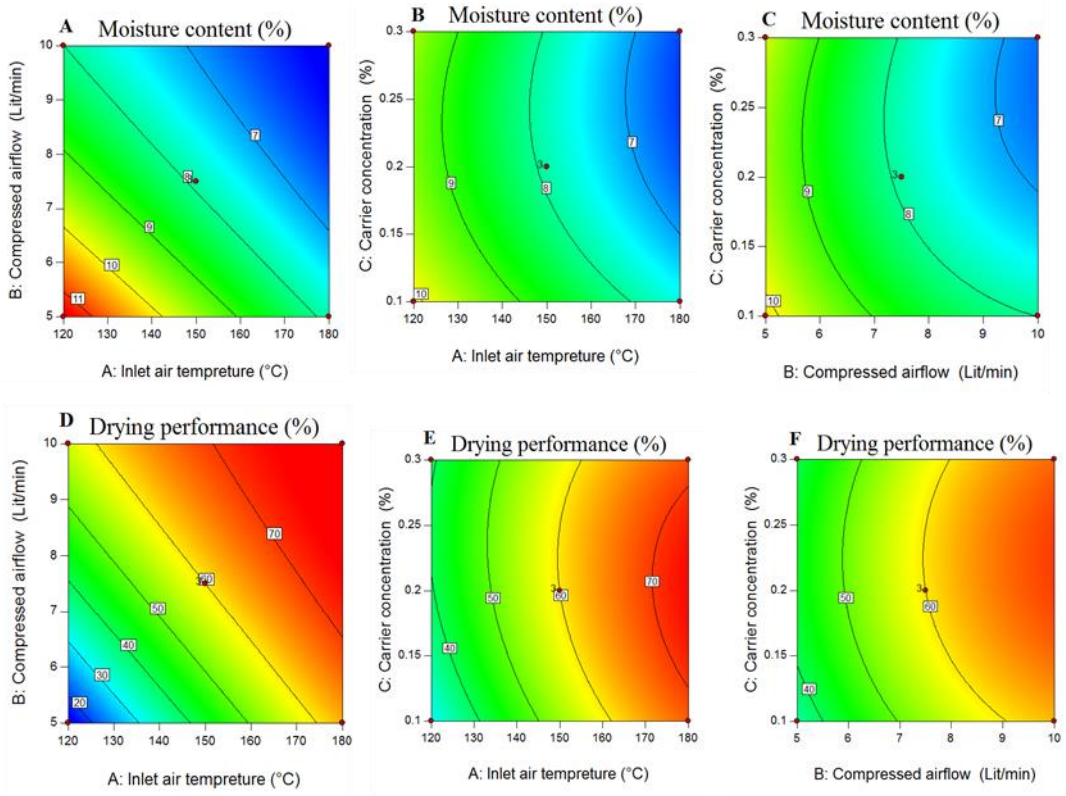
جدول ۲- تجزیه واریانس هر یک از پاسخ‌ها در نمونه‌های پودر خشک‌شده

Table 2- Analysis of variance each response of the spray dried powder

منابع تغییرات Source of variations	پاسخ‌ها Responses				
	MC (%)	DP (%)	TPC (mg GAE.gr DW^{-1})	TFC (mg QUE.gr DW^{-1})	AA (%)
Model	<0.0001	<0.0001	0.0004	0.0003	0.0003
X_1	<0.0001	<0.0001	0.1581	0.0214	0.0006
X_2	<0.0001	<0.0001	0.0949	0.7941	0.9976
X_3	0.0026	0.0427	0.0034	0.0159	0.8331
$X_1 X_2$	0.0096	0.0012	0.0016	0.0028	0.5644
$X_1 X_3$	0.2696	0.1503	0.0003	0.0028	0.2005
$X_2 X_3$	0.0859	1.0000	0.4697	0.2956	0.5509
X_1^2	0.3625	0.0251	<0.0001	<0.0001	<0.0001
X_2^2	0.0241	0.0251	0.0089	0.0002	<0.0001
X_3^2	0.0078	0.0130	0.0005	<0.0001	0.0032
Lack of fit	-	0.1061	-	-	-
R^2	0.9937	0.9933	0.9858	0.9880	0.987
CV	2.41	4.41	4.06	4.58	5.8

X_1، X_2 و X_3 به‌ترتیب بیانگر دمای هوای ورودی، نرخ جریان هوای فشرده و غلظت ماده کمکی می‌باشد.

X_1, X_2, and X_3 denotes the Inlet air temperature (°C), Compressed airflow (Lit.min^{-1}) and Concentration of carrier (%) respectively.



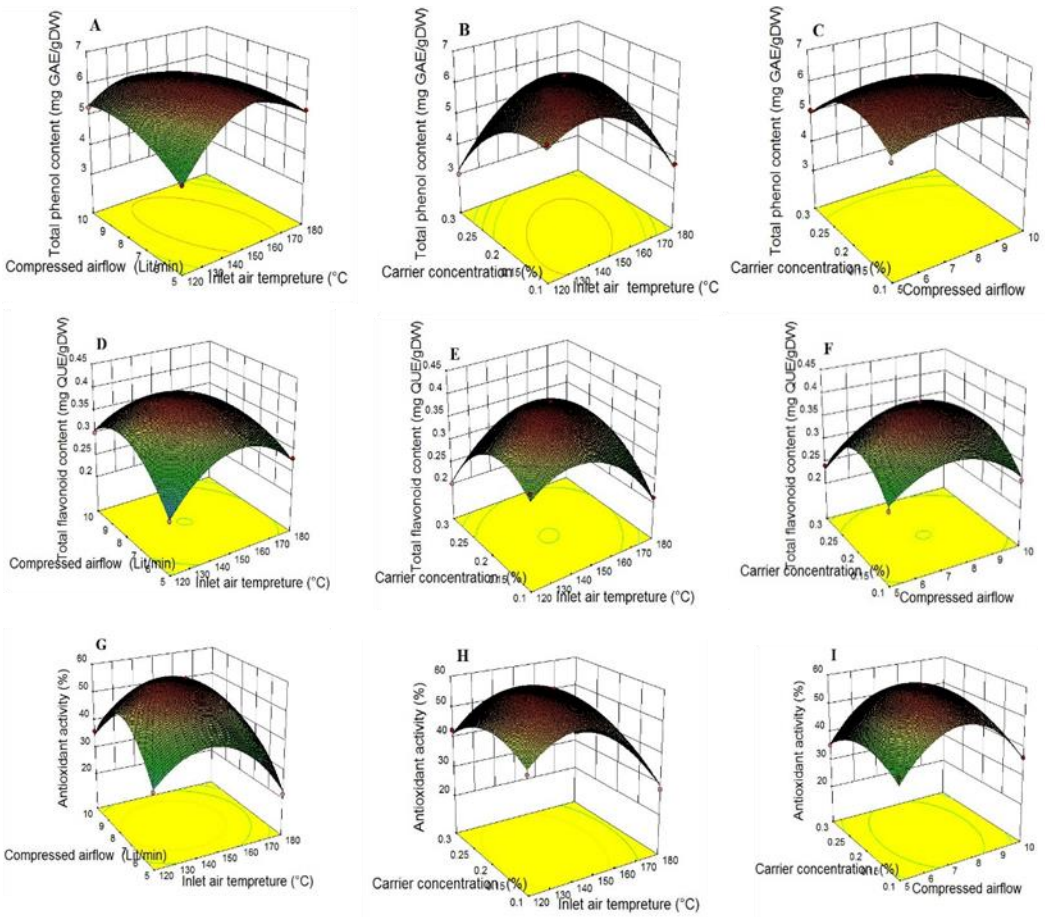
شکل ۲- نمودار کانتور برای محتوای رطوبتی (A-C) و عملکرد خشک‌کردن (D-F) پودر بادرشبو در طی خشک‌کردن پاششی

Fig.2. Contour plots for Moisture content (A-C), Drying performance (D-F) of the powders produced by spray drying of Moldavian Balm plant extract

محتوای فنل کل

محتوای فنل کل نمونه‌های پودر در محدوده‌ی ۴/۶-۳ میلی‌گرم در گرم برگ گیاه متغیر بود (جدول ۱). از جدول ۲ مشاهده می‌گردد که اثر متقابل دما- نرخ جریان هوای فشرده و اثر متقابل دما- ماده کمکی تأثیر معنی‌دار بر محتوای فنل کل داشته است ($p<۰/۰۱$). از شکل‌های سه‌بعدی (شکل ۳) مشاهده می‌گردد اثر تغییرات دمای هوای ورودی بر مقدار فنل کل وابسته به غلظت ماده کمکی است. در غلظت پایین ماده کمکی، با افزایش دمای هوای ورودی مقدار فنول کل از ۴/۵ تا ۵/۵ میلی‌گرم در گرم افزایش یافت. در دماهای پایین مدت زمان لازم برای خشک‌شدن زیاد است، لذا رطوبت داخل محصول می‌تواند باعث انجام واکنش‌های شیمیایی ناخواسته و تغییر ماهیت ترکیبات شود، بنابراین مقدار فنول کل تا حدود ۳/۸ میلی‌گرم در گرم کم شده است. افزایش دما تا ۱۵۰ درجه سلسیوس تأثیر مثبتی بر مقدار فنل‌کل داشت در حالی‌که در دماهای بالا کاهش یافت. می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد بعد از گذر از نقطه ماکزیمم، دمای بالا سبب تغییر ماهیت محصول و آسیب‌های حرارتی می‌شود و رطوبت داخل محصول نقشی در کاهش مقدار فنول کل نداشته است. سابلانیا و بوسکو (Sablania and Bosco, 2018) نتایج مشابهی را در مورد خشک‌کردن پاششی عصاره برگ کاری (Curry leaf) گزارش کردند.

افزایش نرخ جریان هوای فشرده و دمای خشک کردن به‌ترتیب از ۷/۵ Lit min^{-1} و ۱۵۰ °C به ۱۰ Lit min^{-1} و ۱۸۰ °C، سبب کاهش محتوای فنل کل از ۶/۴ به ۳/۷۵ میلی‌گرم در گرم شد (شکل ۳). با افزایش نرخ جریان هوای فشرده اندازه ذرات کاهش می‌یابد، ذرات کوچک‌تر حاوی رطوبت پایین‌تری هستند و علی‌رغم مدت زمان حرارتی کمتر دچار تخریب حرارتی خواهند شد. بنابراین محتوای فنل کاهش می‌یابد.



شکل ۳- اثر پارامترهای فرآیند بر محتوای فنل کل (A-C)، فلاونوئید کل (D-F) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (G-I) پودر گیاه بادرشبو

Fig.3. Response surface plots (3D) showing the effects of process parameters on Total Phenol Content (mg GAE.g DW^{-1}) (A-C), Total flavonoid content (mgQUE.gDE^{-1}) (D-F), Antioxidant activity (%) (G-I) of Moldavian Balm plant powder

محتوای فلاونوئید کل

محتوای فلاونوئید نمونه‌های پودر در محدوده‌ی ۰/۴-۰/۲ میلی‌گرم در گرم برگ گیاه متغیر بود (جدول ۱). نتایج تجزیه واریانس نمونه‌های پودر بادرشبو نشان داد، اثرات ساده متغیرهای ماده کمکی و دما هوای ورودی تأثیر معنی‌دار بر محتوای فلاونوئید کل به‌ترتیب در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد گذاشته‌اند (جدول ۲). افزایش دمای هوای ورودی تا دمای ۱۵۵درجه سلسیوس اثر مثبتی بر مقدار ترکیبات فلاونوئیدی موجود در پودر بادرشبو داشت، ولی در دماهای بالا محتوای فلاونوئید کل کاهش یافت (شکل ۲). این نتیجه منطبق بر یافته (Lim and Murtijaya, 2007) است؛ چرا که دماهای بالا سبب تخریب زنجیره‌های فنلی و همچنین دیواره‌های سلولی و از بین رفتن ترکیبات فلاونوئیدی می‌شود. بنابراین محتوای فلاونوئید کل کاهش می‌یابد. همچنین افزایش غلظت ماده کمکی تا مقدار ۲۰ درصد سبب افزایش محتوای فلاونوئید کل در نمونه‌ها پودر شد (شکل ۳). این افزایش ناشی از اثر حفاظتی ماده کمکی به‌عنوان یک پوسته از اجزای فعال عصاره می‌باشد. در غلظت‌های بالا (بیشتر از ۲۰ درصد) مقدار فلاونوئید کل از ۰/۴ به ۰/۳ میلی‌گرم در گرم کاهش یافت، چنین استنباط می‌شود که در غلظت‌های بالا رطوبت بر اثر حفاظتی ماده کمکی غالب شده است.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های پودر در محدوده‌ی ۶۰-۲۱/۴۲ درصد در گیاه متغیر بود (جدول ۱). نتایج تجزیه واریانس نمونه‌های پودر بادرشبو نشان داد، متغیر دما تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی در سطح احتمال یک درصد گذاشته است (جدول ۲). افزایش دمای هوای ورودی تا ۱۵۰ درجه اثر مثبتی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها داشت، به‌طوری‌که فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها از ۴۵ درصد به ۶۰ درصد رسیده است، اما در دماهای بالا فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها کاهش یافت (شکل ۳). خاصیت آنتی‌اکسیدانی گیاه بادرشبو بیشتر مرتبط به ترکیبات فنولی و فلاونوئید کل موجود در عصاره است، به عبارتی نسبت‌های انتخاب

شده در اتانول و آب روش مناسبی در استخراج ترکیبات هدف می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به حساسیت این ترکیبات به دماهای بالا نمونه‌ها دچار تخریب حرارتی و واکنش اکسیداتیو خواهند شد، بنابراین فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. توین و همکاران (Tuyen *et al.*, 2010) نتایج مشابهی را در مورد کدو خاردار (Momordica cochinchinensis) گزارش کردند. افزایش مقدار ماده کمکی و افزایش نرخ جریان هوای فشرده تأثیر معناداری بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های پودر بادرشبو نداشت.

بهینه‌سازی فرآیند به‌وسیله تاپسیس و روش سطح پاسخ

روش تاپسیس برای انتخاب بهترین شرایط خشک‌کردن پاششی عصاره گیاه بادرشبو استفاده شد. بدین منظور ابتدا گزینه‌ها و معیارهای مورد نظر جهت تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری شناسایی شدند. محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنول کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به‌عنوان معیارها و متغیرهای دمای هوای ورودی، نرخ جریان هوای فشرده و غلظت ماده کمکی به‌عنوان گزینه‌ها انتخاب شدند (جدول ۱). در مرحله بعد داده‌ها با استفاده از معادله ذکر شده در اصول هفت‌گانه تاپسیس نرمال‌سازی شدند. سپس وزن هر یک از معیارها با روش آنتروپی شانون مشخص شد. وزن هر یک از معیارهای محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای فنول کل و محتوای فلاونوئید کل در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر محتوای رطوبتی و عملکرد خشک‌کردن به‌ترتیب کمترین و بیشترین وزن را با مقادیر ۰/۰۹۲۹ و ۰/۳۴۵۵ گرفته‌اند. در مرحله بعد نقاط ایده‌آل مثبت و منفی برای هر یک از معیارها محاسبه شد. در نهایت پس از تعیین فاصله گزینه‌های ماتریس نرمال وزن‌دار از نقاط ایده‌آل مثبت و منفی و محاسبه نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل، رتبه‌بندی گزینه‌ها جهت انتخاب بهترین شرایط خشک‌کردن پاششی به‌دست آمد. بر طبق نتایج به‌دست آمده تیمار با بیشترین مقدار در Cl[1] بهترین گزینه برای شرایط بهینه خشک‌کردن می‌باشد (شکل ۳). بر این اساس تیمار با دمای هوای ۱۵۰ درجه سلسیوس، نرخ جریان هوای فشرده ۷/۵ لیتر بر دقیقه و غلظت ماده کمکی ۲۰ درصد رتبه اول (جدول ۴) و تیمار با دمای هوای ۱۲۰ درجه سلسیوس، نرخ جریان هوای فشرده ۵ لیتر بر دقیقه و غلظت ماده کمکی ۲۰ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داد. همچنین بهینه کردن پارامترهای فرآیند خشک‌کردن پاششی برای دستیابی به سطوح بهینه محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. درجه اهمیت و ضریب وزنی هر یک از متغیرها در جدول ۳ آورده شده است. خواص شیمیایی و عملکرد خشک کردن جزو اصلی‌ترین شاخص‌های پودر در ارزیابی‌های اقتصادی می‌باشند. درجه اهمیت هر یک از شاخص‌ها بر همین مبنا به‌دست آمد. می‌توان بر مبنای نیاز بازار و تولید صنعتی پودر ارزش متغیرها را تغییر داد و بهینه‌سازی فرآیند را انجام داد. با توجه به درجه اهمیت هر یک از متغیرهای وابسته محدوده تغییرات تابع مطلوبیت از ۱–۰ تغییر می‌کند، معادله تابع مطلوبیت میانگین هندسی کل متغیرهای وابسته می‌باشد.

جدول ۳– وزن‌دهی هر یک از پاسخ‌ها در پودر بادرشبو با استفاده از روش تاپسیس و سطح پاسخ

Table 3- Weights of the responses for Moldavian balm powder using TOPSIS and RSM method

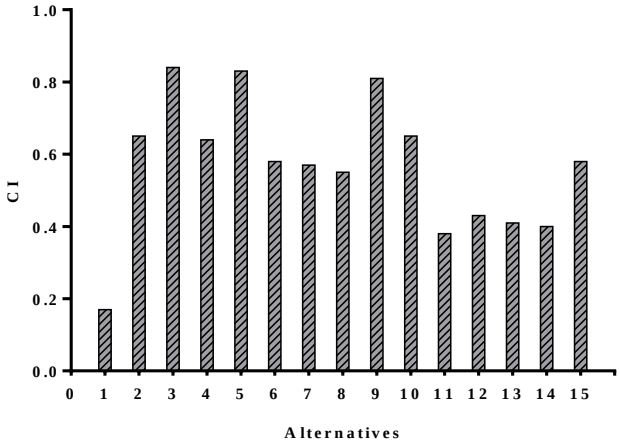
متغیرها Variables	درجه اهمیت Importance	بیشترین مقدار Upper limit	کمترین مقدار Lower limit	هدف Goal	وزن‌ها Weights
IAT[1]	3	180	120	in range	-
CAF[2]	3	10	5	in range	-
C[3]	3	0.3	0.1	in range	-
MC[4] (%)	1	11.3	6.2	Minimize	0.0929
DP[5] (%)	5	73	16	Maximize	0.3455
TPC[6] (mg GAE.gr DW^{-1})	2	6.4	3	Maximize	0.1245
TFC[7] (mg QUE.gr DW^{-1})	3	0.4	0.2	Maximize	0.173
AA[8] (%)	4	58	21.42	Maximize	0.264

۱– دمای هوای ورودی، ۲– نرخ جریان هوای فشرده، ۳– غلظت ماده کمکی، ۴– محتوای رطوبتی، ۵– عملکرد خشک‌کردن، ۶– محتوای فنول کل، ۷– محتوای فلاونوئید کل، ۸– فعالیت آنتی‌اکسیدانی

1- Inlet air temperature, 2- Compressed air flow, 3- Concentration of carrier, 4- Moisture content, 5- Drying performance, 6- Total phenol content, 7- Total flavonoid content, 8- Antioxidants activity.

نتایج بهینه‌سازی برای تحلیل هم‌زمان کل شاخص‌ها در جدول ۴ آورده شده است. بهترین نتیجه در دمای هوای ۱۵۲/۵ °C، نرخ جریان هوای فشرده ۸/۰۴۶ $Lit\ min^{-1}$ و غلظت ماده کمکی ۲۰ درصد به‌دست آمد. در این شرایط مقدار محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنل کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به‌ترتیب ۷/۵۳ درصد، ۶۳/۹۳ درصد، ۶/۳۲ میلی‌گرم در گرم، ۰/۳۹۴ میلی‌گرم در گرم و ۵۶/۶۷ درصد، با ارزش مطلوبیت ۰/۹۰۸ به‌دست آمد.

1- Closeness



شکل ۳- رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس شاخص Cl
Fig.3. Ranking of alternative based on Cl index

جدول ٤- نقاط بهینه پیشنهادی با استفاده از دو روش سطح پاسخ و تاپسیس
Table 4- The response value of optimum condition using RSM and TOPSIS method

روش Method	IAT[1]	CAF[2]	C[3]	M.C[4]	DP[5]	TPC[6]	TFC[7]	AA[8]
تاپسیس TOPSIS	150	7.5	0.2	7.9	61	6.4	0.4	58
سطح پاسخ RSM	152.5	8.046	0.2	7.53	63.93	6.32	0.394	56.67

۱- دمای هوای ورودی، ۲- نرخ جریان هوای فشرده، ۳- غلظت ماده کمکی، ۴- محتوای رطوبتی، ۵- عملکرد خشک‌کردن، ۶- محتوای فنول کل، ۷- محتوای فلاونوئید کل، ۸- فعالیت آنتی‌اکسیدانی

1-Inlet air temperature, 2- Compressed air flow, 3- Concentration of carrier, 4-Moisture content, 5- Drying performance, 6- Total phenol content, 7- Total flavonoid content, 8- Antioxidants activity

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بهینه کردن پارامترهای خشک‌کردن پاششی با استفاده از دو روش سطح پاسخ و تاپسیس انجام شد. در مجموع ۱۵ آزمایش برای بررسی اثر متغیرهای دمای هوای ورودی، نرخ جریان هوای فشرده و غلظت ماده کمکی بر روی محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی انجام شد و نتایج زیر حاصل شد:

– اثرات ساده دمای هوای ورودی و نرخ جریان هوای فشرده اثر معنی‌داری بر روی محتوای رطوبتی و عملکرد خشک‌کردن نمونه‌ها گذاشت، در حالی‌که غلظت ماده کمکی بر روی خواص شیمیایی نمونه‌ها اثر معنی‌داری داشت.

– افزایش دمای هوای ورودی منجر به کاهش محتوای رطوبتی، مجتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها شد، در حالی‌که عملکرد خشک‌کردن افزایش یافت. اگرچه افزایش دما اثر مثبتی بر محتوای رطوبتی و عملکرد خشک‌کردن نمونه‌ها داشت ولی خواص شیمیایی پودر به درجه حرارت‌های بالا حساس بوده و دچار تخریب حرارتی شدند.

– افزایش غلظت ماده کمکی منجر به کاهش محتوای رطوبتی نمونه‌ها شد، در حالی‌که محتوای فنول کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها افزایش یافت.

– افزایش نرخ جریان هوای فشرده سبب کاهش محتوای رطوبتی شد در حالی‌که عملکرد خشک‌کردن افزایش یافت. همچنین اثر ساده نرخ جریان هوای فشرده تأثیر معنی‌داری بر خواص شیمیایی نمونه‌های پودر نداشت.

در پایان لازم است از بین پودرهای تولید شده، یک پودر به‌عنوان پودر ایده‌آل انتخاب شود. بر همین اساس بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از دو روش سطح پاسخ و تاپسیس انجام شد. محتوای رطوبتی، عملکرد خشک‌کردن، محتوای فنل کل، محتوای فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی از خصوصیات با ارزش در تعیین کیفیت پودر هستند، بنابراین به‌عنوان شاخص‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. نقطه بهینه در روش سطح پاسخ در دمای هوای ورودی °C ۱۵۲/۵، نرخ جریان هوای فشرده $Lit\ min^{-1}$ ۸/۰۴۶ و ماده کمکی ۲۰ درصد

به‌دست آمد. همچنین در روش تاپسیس بعد از رتبه‌بندی گزینه‌ها، بهترین شرایط در دمای هوای ۱۵۰ °C، نرخ جریان هوای فشرده ۷/۵ Lit min^{-1} و غلظت ماده کمکی ۲۰ درصد به‌دست آمد. با مقایسه دو روش می‌توان نتیجه گرفت، علی‌رغم این که هر دو روش به نقاط بهینه یکسانی دست یافتند ولی روش سطح پاسخ کارآمدتر است، چرا که این روش علاوه بر بهینه‌سازی فرآیند یک مدل ریاضی ارائه می‌دهد و روند فرآیند را پیش‌بینی می‌کند، در حالی‌که روش تاپسیس فقط یک رتبه‌بندی از گزینه‌ها را ارائه می‌دهد، و قادر به پیش‌بینی روند فرآیند نمی‌باشد.

References

1. Aghkhani, M., M. Abasspour-Fard, M. Bayati, H. Mortezapour, S. 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: 92-103. (In Farsi).
2. Akowuah, G., Z. Ismail, I. Norhayati, and A. Sadikun. 2005. The effects of different extraction solvents of varying polarities on polyphenols of Orthosiphon stamineus and evaluation of the free radical-scavenging activity. Food Chemistry 93: 311-317.
3. Bae, E. K., and S. J. Lee, 2008. Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein and maltodextrin. Journal of Microencapsulation 25: 549-560.
4. Bahmanpour, H., S. Sajadiye, M. Sheikhdavoodi, and M. Zolfaghari. 2017. The Effect of Temperature and Drying Method on Drying Time and Color Quality of Mint. Journal of Agricultural Machinery 7: 415-426. (In Farsi).
5. Beketov, E., V. Pakhomov, and O. Nesterova. 2005. Improved method of flavonoid extraction from bird cherry fruits. Pharmaceutical Chemistry Journal 39: 316-318.
6. Bonjar, S. 2004. Evaluation of antibacterial properties of some medicinal plants used in Iran. Journal of Ethnopharmacology 94: 301-305.
7. Chang, C. C., M. H. Yang, H. M. Wen, and J. C. Chern. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. Journal of Food and Drug Analysis 10.
8. Chaul, L. T., E. C. Conceição, M. T. F. Bara, J. R. Paula, and R. O. Couto. 2017. Engineering spray-dried rosemary extracts with improved physicomechanical properties: a design of experiments issue. Revista Brasileira de Farmacognosia 27: 236-244.
9. Chiu, Y. T., C. P. Chiu, J. T. Chien, G. H. Ho, J. Yang, and B. H. Chen. 2007. Encapsulation of lycopene extract from tomato pulp waste with gelatin and poly (γ-glutamic acid) as carrier. Journal of Agricultural and Food Chemistry 55 (13): 5123-5130.
10. Cordeiro, D. S., and W. P. Oliveira. 2005. Technical aspects of the production of dried extract of Maytenus ilicifolia leaves by jet spouted bed drying. International Journal of Pharmaceutics 299: 115-126.
11. Dastmalchi, K., H. D. Dorman, M. Koşar, and R. Hiltunen. 2007a. Chemical composition and in vitro antioxidant evaluation of a water-soluble Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) extract. LWT-Food Science and Technology 40: 239-248.
12. Dastmalchi, K., H. D. Dorman, I. Laakso, and R. Hiltunen. 2007b. Chemical composition and antioxidative activity of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) extracts. LWT-Food Science and Technology 40: 1655-1663.
13. Domian, E., A. Brynda-Kopytowska, J. Cenkier, and E. Świrydow. 2015. Selected properties of microencapsulated oil powders with commercial preparations of maize OSA starch and trehalose. Journal of Food Engineering 152: 72-84.
14. Eren, I., and F. Kaymak-Ertekin. 2007. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. Journal of Food Engineering 79: 344-352
15. Ersus, S., and U. Yurdagel. 2007. Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (*Daucus carota* L.) by spray drier. Journal of Food Engineering 80: 805-812.
16. Fallah, S., M. Rostaei, Z. Lorigooini, and A. A. Surki. 2018. Chemical compositions of essential oil and antioxidant activity of dragonhead (*Dracocephalum moldavica*) in sole crop and dragonhead-soybean (*Glycine max*) intercropping system under organic manure and chemical fertilizers. Industrial Crops and Products 115: 158-165.
17. Fazaeli, M., Z. Emam-Djomeh, A. K. Ashtari, and M. Omid. 2012. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. Food and Bioproducts Processing 90: 667-675.
18. Gallo, L., J. M. Llabot, D. Allemandi, V. Bucalá, and J. Piña. 2011. Influence of spray-drying operating conditions on Rhamnus purshiana (*Cáscara sagrada*) extract powder physical properties. Powder Technology 208: 205-214.
19. Lim, Y. Y., and J. Murtijaya. 2007. Antioxidant properties of Phyllanthus amarus extracts as affected by different drying methods. LWT-Food Science and Technology 40: 1664-1669.
20. Li, X., K. Wang, L. Liu, J. Xin, H. Yang, and C. Gao. 2011. Application of the entropy weight and TOPSIS method in safety evaluation of coal mines. Procedia Engineering 26: 2085-2091.

21. Marinova, D., F. Ribarova, and M. Atanassova. 2005. Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy 40: 255-260.
22. Martínez-Vázquez, M., R. Estrada-Reyes, A. Martínez-Laurrabaquio, C. López-Rubalcava, and G. Heinze. 2012. Neuropharmacological study of *Dracocephalum moldavica* L. (Lamiaceae) in mice: sedative effect and chemical analysis of an aqueous extract. Journal of Ethnopharmacology 141: 908-917.
23. Mestry, A., A. Mujumdar, and B. Thorat. 2011. Optimization of spray drying of an innovative functional food: Fermented mixed juice of carrot and watermelon. Drying Technology 29: 1121-1131.
24. Muzaffar, K., and P. Kumar. 2015. Parameter optimization for spray drying of tamarind pulp using response surface methodology. Powder Technology 279: 179-184.
25. Namavar, S. S., J. A. Parian, and R. A. Chayjan. 2018. Analysis of Microscopic Image Textural Features of Artichoke Leaf Extract Powder Produced from Vacuum Spray Drying. Journal of Agricultural Machinery 8: 295-308. (In Farsi).
26. Oztekin, S., and M. Martinov, 2014. Medicinal and aromatic crops: harvesting, drying, and processing: CRC Press.
27. Pierucci, A. P. T., L. R. Andrade, M. Farina, C. Pedrosa, and M. H. M. Rocha-Leão. 2007. Comparison of α-tocopherol microparticles produced with different wall materials: pea protein a new interesting alternative. Journal of Microencapsulation 24: 201-213.
28. Rahmati, E., F. Sharifian, and M. Fattahi. 2018. Effects of different drying methods and additives on the physicochemical properties of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) extract. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants 5: 781-793. (In Farsi).
29. Razmipour, M., N. A. Naeini, H. Mortezapour, and A. G. Moghaddam. 2015. Performance Evaluation of a Solar Dryer with Finny, Perforated Absorber Plate Collector Equipped with an Air Temperature Control System for Dill Drying. Journal of Agricultural Machinery 5: 134-142. (In Farsi).
30. Sablania, V., and Bosco, S. J. D. 2018. Optimization of spray drying parameters for Murraya koenigii (Linn) leaves extract using response surface methodology. Powder Technology 335: 35-41.
31. Sadeghi, A., F. Shahidi, S. A. Mortazavi, and M. N. Mahalati, 2008. Evaluation of different parameters effect on maltodextrin production by–amylase Termamyl 2-x. World Applied Sciences Journal 3: 34-9.
32. Shishir, M. R. I., F. S. Taip, N. A. Aziz, and R. A. Talib. 2014. Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder. Agriculture and Agricultural Science Procedia 2: 74-81.
33. Tan, S. P., C. K. Tuyen, S. E. Parks, C. E. Stathopoulos, and P. D. Roach. 2015. Effects of the spray-drying temperatures on the physiochemical properties of an encapsulated bitter melon aqueous extract powder. Powder Technology 281: 65-75.
34. Tonon, R. V., C. Brabet, and M. D. Hubinger. 2008. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. Journal of Food Engineering 88: 411-418.
35. Tuyen, C. K., M. H. Nguyen, and P. D. Roach. 2010. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. Journal of Food Engineering 98: 385-392.
36. Watson, M. A., J. M. Lea, and K. L. Bett-Garber. 2017. Spray drying of pomegranate juice using maltodextrin/cyclodextrin blends as the wall material. Food Science & Nutrition 5: 820-826.
37. Yousefzadeh, S., F. Daryai, A. Mokhtassi-Bidgoli, S. Hazrati, T. Yousefzadeh, and K. Mohammadi. 2018. Morphological, essential oil and biochemical variation of *Dracocephalum moldavica* L. populations. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants 10: 59-66.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 201-212

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۱۲-۲۰۱

Optimization the Spray-Drying Process of Moldavian Balm Plant Extract using Response Surface Methodology and TOPSIS Method

E. Rahmati[1], F. Sharifian[2*], M. Fattahi[3], G. Najafi[4]

Received: 06-01-2019
Accepted: 15-04-2019

Introduction

Dracocephalum moldavica L. is an annual plant with blue or white flowers and fragrant leaves which belongs to the family of Lamiaceae with the height of up to 80 cm. This plant is native to Central Asia and is accepted in Central and Eastern Europe. In Iran, it is mainly grown in the province of West Azarbaijan and the Alborz Mountains. The essential oils and extracts derived from the secondary metabolisms which are mainly used in the pharmaceutical industry, dietary, cosmetic, flavoring and also as tea and beverage with sugar or honey. The liquid extract of the herb contains a high percentage of water, which should evaporate to increase shelf-life, easy transport, handling and storage, the ease of standardization and preservation of the product quality. On the other hand, the active compounds of the extracts are affected by temperature, oxygen, light and enzymes. Therefore, because of the uses and benefits of herbal extracts, they need to be dried by a practical and effective method like spray drying. In literature still there are no studies taking into account to the comparisons between RSM and TOPSIS as two important optimization methods. So, as the main objective of the present work, the effects of moisture content, drying performance, total phenol content, total flavonoid content and antioxidant activity have been surveyed. Finally, the optimal point of each process variable was presented by two optimization methods.

Materials and Methods

Aerial parts of Moldavian balm plant were cleaned and drying of plant was carried out under shade and thin layer conditions. The extraction of Moldavian balm was obtained by maceration method using ethanol 50 % (v/v), plant to solvent ratio of 1/10 (w/v). After 48h, the extract was concentrated in a rotary evaporator (Buchi Rotavapor R-205, Switzerland) to obtain a solid concentration of 6%. The used carrier was: Maltodextrin and apple pectin. Different ratios of carrier were prepared, then the ratio was added to distilled water and stirred by a magnetic stirrer. Finally, the solution was mixed with extract. The drying of Moldavian Balm plant extract was performed using a spray-dryer (Büchi B-191, Switzerland) with co-current flow regime. The powders provided by the spray drying were stored in refrigerator until they were needed for the experiment.

Results and Discussion

The results of variance analysis showed that the Box-Behnken design with the second-order model has led to the meaningfulness of the model, insignificant of the Lack of Fit and the appropriate correlation coefficient for each of the responses. A total number of 15 experiments were conducted to investigate the effect of process variables such as inlet air temperature, compressed air flow rate and concentration of carriers on moisture content, drying performance, total phenolic content, total flavonoid content and antioxidant activity of Moldavian balm powder. Inlet air temperature and compressed air flow rate had the most significant effect on moisture content and drying performance, while Chemical properties of the powder affected by changing the concentration of carriers.

Optimization parameters of the spray drying process was performed using surface response and TOPSIS methods. The optimum predicted conditions in the response surface method and TOPSIS method were obtained at inlet air temperature, compressed air flow rate and concentration of carrier (152.5-150°C), (8.046-7.5 lit min^{-1}) and 20%, respectively.

Conclusions

By comparing two methods, it can be concluded that although they could provide the same optimum points, the RSM is more efficient. Because RSM offers a mathematical model that can be used at any desired point of variables to predict the output quantities as well as describing the process trend, while TOPSIS method is unable to predict the process trend and only provides the ranking of alternatives.

Keywords: Drying conditions, Moldavian Balm powder, Optimization, RSM method, Spray-drying, TOPSIS method

1 and 4- PhD Student and Associate Professor, respectively, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
3- Associate Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: f.sharifian@urmia.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 213-227

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۲۷-۲۱۳

پیش‌بینی متغیرهای داخلی یک گلخانه دوطرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی (MLP و RBF)

مکیه حمدانی[۱]، مرتضی تاکی[۲]، مجید رهنما[۲*]، عباس روحانی[۳]، مصطفی رحمتی جنیدآباد[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۳

چکیده

یکی از مهم‌ترین اقدامات به‌منظور ایجاد محیطی مناسب برای رشد بهینه گیاه گلخانه‌ای، کنترل دقیق متغیرهای داخلی گلخانه به‌منظور بهینه‌سازی میزان تبادلات انرژی بین گلخانه با محیط بیرون است. در این راستا یکی از ایده‌های جدید، هوشمندسازی گلخانه است. اولین قدم در این مسیر، پیش‌بینی تمامی متغیرهای تاثیرگذار یک گلخانه به حساب می‌آید. از این رو در این تحقیق از دو مدل شبکه عصبی (MLP-RBF) برای تخمین چهار متغیر تأثیرگذار (شامل دمای هوا، گیاه، سقف و رطوبت هوای داخل گلخانه) یک گلخانه دوطرفه شیشه‌ای با ساختار ویژه واقع در شهر ملاثانی اهواز استفاده شد. بدین منظور از متغیرهای محیطی بیرونی شامل دما و رطوبت هوای بیرون و همچنین تابش روی سطح افق به‌عنوان فاکتورهای ورودی مدل‌ها، استفاده شد. داده‌برداری توسط حسگرهای مربوطه در گلخانه‌ای به مساحت (۱۲ مترمربع) و حجم هوای (۴۰ مترمکعب) انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل RBF از دقتی حدود ۵۰٪ بیش‌تر نسبت به مدل MLP برخوردار است. در این تحقیق قابلیت تعمیم‌پذیری هر دو مدل با ۸۰ و ۴۰ درصد از کل داده‌های آموزشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل RBF قادر است با مجموعه داده‌های کم‌تر نسبت به مدل MLP، نتایج را بهتر و دقیق‌تر برآورد کند. دقت بالاتر و قابلیت کار با مجموعه داده‌های کم‌تر از مزایای شناخته شده مدل RBF در این تحقیق بود که می‌تواند در هوشمند کردن گلخانه‌های نسل جدید و کنترل آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی، گلخانه دوطرفه، گلخانه‌های هوشمند، مدل‌سازی

مقدمه

مصرف بی‌رویه انرژی در اکثر گلخانه‌های ایران، باعث افزایش قیمت تمام شده‌ی محصول، آلودگی محیط‌زیست و هدررفت منابع با ارزش فسیلی طی دهه‌های گذشته شده است. از طرفی، توسعه چشم‌گیر انواع گلخانه‌ها در کشور در حالی به‌وقوع پیوسته که به‌علت ضعف در فناوری‌های موجود، مصرف انرژی به‌ازای تولید هر واحد محصول، تا چندین برابر بیش‌تر از میانگین‌های جهانی است (Vadiee and Martin, 2013; Taki *et al.*, 2016). یکی از دلایل اصلی بالا بودن مصرف انرژی در گلخانه‌های ایران، پوشش و اسکلت نامناسب و غیرعلمی در انواع گلخانه‌های مرسوم است. ابتدایی‌ترین اصول مهندسی در 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 (Taki *et al.*, 2018a). عامل دیگر که در اکثر تحقیقات مربوط به این حوزه کم‌تر به آن توجه می‌شود بحث مدیریت بهینه شرایط داخلی گلخانه است. در گلخانه‌های سنتی معمولاً از دماسنج و رطوبت‌سنج در وسط گلخانه به‌عنوان نماینده‌ای از کل حجم گلخانه استفاده می‌شود. این موضوع در گلخانه‌های پیشرفته از طریق جایگزینی حسگرها با انواع دماسنج‌ها و رطوبت‌سنج‌ها و همچنین افزایش تعداد آن‌ها تا حدی اصلاح شده است (Sethi and Dubey, 2008; Sethi, 2009). استفاده بیش‌تر از حسگرها سبب افزایش هزینه اولیه گلخانه و نهایتاً قیمت نهایی محصول برداشت شده می‌شود. در این راستا تحقیقات مختلفی از اوایل قرن بیستم به‌منظور هوشمند کردن گلخانه‌های کشاورزی و توجه بیش‌تر به مدیریت متغیرهای داخلی گلخانه (دما، رطوبت، شدت نور، CO_2 و غیره) انجام شده است که مبنای عمل‌گرا شدن تمامی این تحقیقات، مدل‌سازی اولیه شرایط گلخانه با توجه به متغیرهای خارجی از جمله دما، رطوبت، سرعت باد، میزان تابش و غیره است (Gupta *et al.*, 2012; Van Straten *et al.*, 2011; Van Ooteghem *et al.*, 2007). مدل‌سازی‌های اولیه علاوه بر فراهم کردن شرایط بهتر مدیریتی در گلخانه، یکی از موارد اساسی به‌منظور استفاده از سایر تجهیزات پیشرفته و همچنین انرژی‌های تجدیدپذیر در گلخانه است. در این بین، از سال ۱۹۹۰ استفاده از

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۲- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴- استادیار گروه باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
(*- نویسنده مسئول: Email: rahnamam2002@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.72346

شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی‌های داخلی گلخانه‌ها رونق گرفت و مطالعات متنوعی در این زمینه انجام شد. مطالعات اولیه به‌منظور معرفی این ابزار و روش کارکرد آن بود ولی به مرور تحقیقات متنوعی شامل کنترل شرایط محیطی داخل گلخانه (Hill, 2006)، مدل‌سازی فیزیکی گلخانه (Bot, 1983) و تخمین یا پیش‌بینی برخی از پارامترهای داخلی گلخانه انجام گرفت (Boaventura *et al.*, 2000; Coelho *et al.*, 2002; Manuel *et al.*, 2005; Linker and Seginer, 2004; Taki *et al.*, 2018b). در تحقیقی از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌منظور ابزاری برای جایگزین کردن انواع سنسورها در گلخانه استفاده شد (Ferreira *et al.*, 2002). در این مطالعه به‌منظور تخمین دمای هوای داخل گلخانه از پارامترهایی همچون میزان تابش ورودی گلخانه، دمای هوای بیرون و همچنین میزان رطوبت هوای داخل گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از این ابزار به‌درستی قادر است میزان تغییرات دمای هوای داخل گلخانه‌ای با کشت هیدروپونیک را تخمین بزند ولی به‌منظور افزایش میزان دقت و همچنین جلوگیری از ریسک زیاد، وجود سنسورهایی با دقت متوسط و به تعداد کم در گلخانه توصیه شد. در تحقیقی به بررسی و مقایسه بین نتایج مدل‌های حرارتی، شبکه عصبی مصنوعی (MLP) و رگرسیون چندگانه به منظور پیش‌بینی دمای هوا، دمای پوشش گلخانه و میزان انرژی تلف شده در گلخانه‌ای نیمه‌خورشیدی، پرداخته شد (Taki *et al.*, 2016). نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی قادر است مقادیر دمای هوا و پوشش گلخانه را با دقتی بالاتر از دو مدل دیگر تخمین بزند. در تحقیق دیگری، Dariouchy *et al.* (2009)، از مدل شبکه عصبی و مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی درصد رطوبت و دمای هوای داخلی گلخانه‌ای در مراکش استفاده شد. در این تحقیق، رطوبت نسبی هوای بیرون گلخانه، شدت تابش خورشید روی سطح افق، جهت و سرعت باد و همچنین دمای هوای بیرون گلخانه به‌عنوان متغیرهای ورودی و دما و درصد رطوبت داخلی گلخانه به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی قادر است نتایج بهتری نسبت به انواع مدل‌های کلاسیک رگرسیونی نشان دهد. میزان خطا در پیش‌بینی دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه در این تحقیق ۴/۲۳ و ۳/۸۵ درصد گزارش شد. نتایج سایر تحقیقات در این زمینه نیز برتری مدل‌های شبکه عصبی را تأیید می‌کنند (Taki *et al.*, 2017; Taki *et al.*, 2018b; Ben Ali *et al.*, 2016; Feng *et al.*, 2016; Lachouri *et al.*, 2016).

با توجه به نتایج تحقیقات فوق، هدف از این مطالعه، مقایسه بین دو مدل شبکه عصبی (MLP-RBF) به‌منظور تخمین پارامترهای موثر یک گلخانه دوطرفه شیشه‌ای واقع در شهرستان اهواز است. ساختار این نوع گلخانه به دلیل واقع شدن در محیطی گرم و مرطوب به گونه‌ای است که در منابع داخلی و خارجی به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق همراه با روش‌های مرسوم از نسبت‌های مختلف داده‌های آموزشی به‌منظور یافتن بهینه مقدار داده‌های آموزش مدل و همچنین از روش K-fold به منظور افزایش قابلیت اطمینان به نتایج شبکه عصبی نیز استفاده می‌شود که استفاده از این روش در این زمینه تحقیقاتی تقریباً نادر است. مقایسه بین این دو نوع مدل می‌تواند به‌درستی میزان خطا در هردو نوع مدل را مشخص کرده و در آینده برای کنترل هوشمند گلخانه‌های کشاورزی در ایران با توجه به شرایط محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

ساختار گلخانه و محل اجرای تحقیق

این پژوهش با هدف مطالعه و بررسی روشی ارزان‌قیمت و مناسب برای تخمین متغیرهای داخلی یک گلخانه شیشه‌ای دوطرفه و هوشمندسازی آن باتوجه به شرایط آب و هوایی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در شهرستان ملاثانی در ۳۵ کیلومتری شمال اهواز انجام شد. گلخانه مورد بررسی از نوع دوطرفه شیشه‌ای و جهت قرارگیری آن شرقی- غربی است. این گلخانه دارای ساختاری ویژه است که به دلیل قرارگیری در عمق ۱ متری سطح زمین در مناطق بسیار گرم یا بسیار سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. گلخانه مورد نظر دارای مساحت ۱۲ مترمربع و حجم هوای ۴۰ مترمکعب است. بدین منظور، داده‌های دما و رطوبت از داخل و بیرون گلخانه مورد نظر توسط حسگرهای دما (مدل SHT 11 ساخت شرکت CMOS آمریکا با دقت ۰/۴± درجه سانتی‌گراد و ۳± درصد برای دما و رطوبت) برداشت شد. داده‌های تابش در داخل گلخانه، در یک سطح تراز شده زمین، توسط تابش‌سنج مدل TES132 برداشت شد. این نوع تابش‌سنج قادر است داده‌های تابش در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر را با دقتی در حدود ۵٪ برداشت کند. داده‌های سرعت باد توسط بادسنج مدل DT186 با قابلیت ذخیره ۳۲۰۰۰ داده در بازه ۱/۱ تا ۲۰ متربرثانیه، برداشت شد. شکل ۱ نمایی از گلخانه مربوطه همراه با انواع حسگرهای مورد استفاده را نشان می‌دهد. شکل ۲ محل نصب حسگرهای فوق را در نقاط مختلف گلخانه شیشه‌ای مورد نظر نشان می‌دهد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (MLP و RBF)

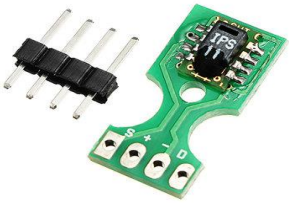
شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه[1](MLP) در این تحقیق از لایه‌ی ورودی (متغیرهای محیطی خارج از گلخانه شامل دما و رطوبت هوا و همچنین تابش)، لایه مخفی و لایه خروجی (شامل چهار متغیر داخلی گلخانه) تشکیل شده است. شبکه MLP با دریافت بردار ورودی، بردار خروجی تولید خواهد کرد. هدف، اتخاذ

1- Multilayer Perceptron

پارامترهای صحیح شبکه به‌منظور دست‌یابی به کم‌ترین خطای پیش‌بینی است (Rohani *et al.*, 2011).

بادسنج
Anemometer

گلخانه شیشه‌ای دوطرفه
Uneven glass greenhouse

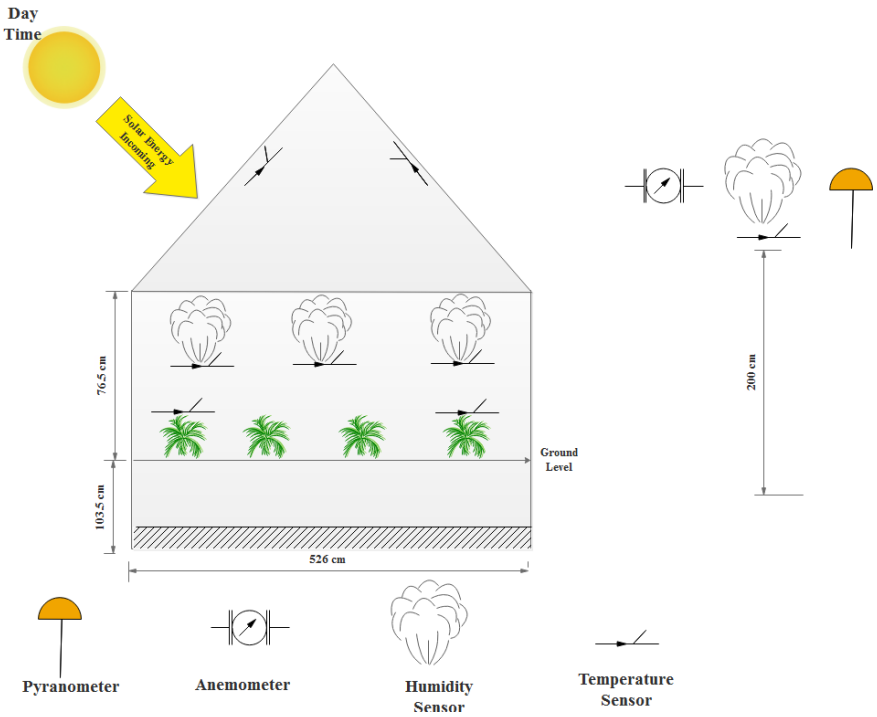


سنسور SHT11
SHT11 Sensor

تابش‌سنج
Solar meter

شکل ۱– نمایی از گلخانه مورد نظر همراه با حسگرهای مورد استفاده

Fig.1. Case study with all the used sensors



شکل ۲– محل نصب حسگرهای دما، رطوبت، تابش و باد در داخل و خارج گلخانه

Fig.2. The location of temperature, humidity, solar and wind sensors inside and outside of greenhouse

قبل از به‌کارگیری داده‌های خام اولیه ، باید عمل نرمال‌سازی داده‌ها انجام شود تا همگرایی شبکه تضمین شود. زمانی که از تابع فعال سیگموئیدی استفاده می‌شود، بهترین دامنه تبدیل داده‌ها [۰/۹-۰/۱] می‌باشد (Rohani *et al.*, 2018). در این مطالعه از دو الگوریتم آموزش بایاس پس‌انتشار خطا (Bayesian regulation backpropagation or Trainbr) و لونبرگ ماکوارت پس‌انتشار خطا (Levenberg-Marquardt or Trainlm backpropagation) استفاده شد. بر اساس یک قانون جهانی، معمولاً بهترین شبکه‌ها با تعداد یک لایه پنهان مشخص می‌شوند (Taki *et al.*, 2012). به همین دلیل در این تحقیق تمامی داده‌ها با شبکه‌های تک لایه مورد آزمایش قرار گرفتند. تعداد نرون‌های هر شبکه تا زمانی که نتایج رو به بهبودی میل می‌کند افزایش داده شد و پس از افزایش خطا، ثابت در نظر گرفته شد.

در کم‌تر پژوهشی از شبکه عصبی RBF[1] در تخمین متغیرهای داخلی گلخانه‌های کشاورزی استفاده شده است. RBF مانند سایر شبکه‌های عصبی قادر به یادگیری رابطه بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل از روی مثال‌های مختلف از مجموعه داده‌های موجود می‌باشد. RBF تنها از یک لایه مخفی با تعدادی از نرون تشکیل شده است. در لایه ورودی، متغیرهای مستقل به شبکه داده می‌شود. در لایه مخفی، نرون‌ها، محاسباتی را روی مجموعه متغیرهای ورودی به‌منظور رسیدن به خروجی مطلوب انجام می‌دهند (شکل ۲).

در صورتی‌که شبکه RBF از تعداد کافی نرون برخوردار باشد، قادر به تخمین هر تابع پیچیده با هر دقت مورد نیاز است. RBF یک نوع شبکه عصبی با معلم است. هر نرون در لایه مخفی بر اساس یک تابع فعال‌ساز غیرخطی (ϕ) عمل می‌کند. وجود عامل بایاس به همگرا شدن شبکه عصبی RBF در طول مرحله آموزش و رسیدن به کمینه عمومی کمک می‌کند. خروجی شبکه عصبی RBF برای هر بردار ورودی x مطابق رابطه (۱) قابل محاسبه است (Rohani *et al.*, 2018):

$$Y = W^T\Phi = \sum_{j=1}^{L_2} w_{ij}\phi(\|x - c_i\|) \qquad (۱)$$

که در آن، wij بردار وزن اتصالات بین لایه مخفی و خروجی، L_2 تعداد نرون‌ها در لایه مخفی، ci مرکز نرون‌ها در لایه مخفی وϕ تابع گوسین می‌باشد. مقدار (ϕ) نیز از رابطه (۲) قابل محاسبه است (Rohani *et al.*, 2018):

$$\phi_i(x) = exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{\sigma_i^2}\right) \qquad (۲)$$

1- Radial Bias Function

که در آن، σ پارامتر توزیع[2] است.

در این تحقیق به‌منظور افزایش اعتماد به خروجی شبکه عصبی از یک روش جدید و ابتکاری به نام اعتبارسنجی دسته‌ای[3] استفاده شد (شکل ۳). در این روش، داده‌های بخش اعتبارسنجی بسته به نوع و تعداد آن‌ها به K دسته مختلف تقسیم می‌شوند و با هر الگوریتم، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در واقع، در این نوع اعتبارسنجی، داده‌ها به K زیرمجموعه افراز می‌شوند. از این K زیرمجموعه، هر بار یکی برای اعتبارسنجی و K-1 تای دیگر برای آموزش به‌کار می‌روند. این روال، K بار تکرار می‌شود و همه داده‌ها دقیقاً یک بار برای آموزش و یک بار برای اعتبارسنجی به‌کار می‌روند. در نهایت میانگین نتیجه این K بار اعتبارسنجی به‌عنوان یک تخمین نهایی برگزیده می‌شود (Rodriguez *et al.*, 2010). مزیت استفاده از زیرمجموعه‌سازی تصادفی داده‌ها در این روش، تأثیر نحوه توزیع داده‌ها بر فرآیند مدل‌سازی است و باعث می‌شود که شبکه عصبی در حالت عادی به‌عنوان یک روش کاربردی با نتایج قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد.

به‌منظور ارزیابی قابلیت مدل‌های مورد بررسی (شبکه عصبی) در پیش‌بینی متغیرهای داخلی گلخانه، از معیارهای درصد میانگین مطلق خطا[4] (MAPE)، ریشه متوسط مربعات خطا[5] (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و مقادیر واقعی آن‌ها استفاده شد (Taki *et al.*, 2018a). از بین مدل‌های برازش شده، مدلی بهترین است که دارای کم‌ترین مقدار RMSE و MAPE و بیش‌ترین مقدار R^2 باشد. به‌منظور تحلیل روش شبکه عصبی در این تحقیق، از نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۷ استفاده شد.

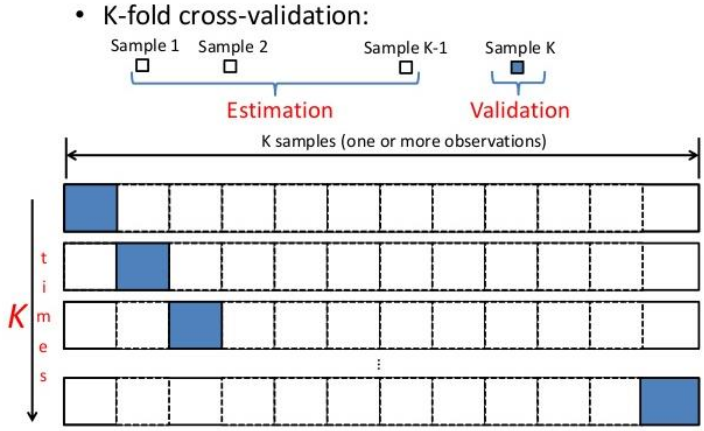
نتایج و بحث

انتخاب بهترین الگوریتم آموزش، تعداد نرون و فاکتور پخش در دو مدل MLP و RBF

در این تحقیق، به دلیل سرعت کم باد و صفر بودن آن در اکثر موارد و در نتیجه اثر غیرقابل محسوس انتقال حرارت همرفتی آن بر میزان انتقال انرژی از جداره گلخانه، در آنالیز نهایی و مدل‌سازی، از اثر این فاکتور بر تغییرات متغیرهای داخلی گلخانه، چشم‌پوشی شد. داده‌های برداشت شده به دلیل تعداد زیاد، به‌صورت میانگین دقیقه‌ای برای هر مدل، مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور تخمین دمای هوای داخل گلخانه (T_a)، دمای سقف گلخانه (T_{ri})، دمای گیاه (T_p) و رطوبت هوای داخل گلخانه (Rh_a) از دو مدل شبکه عصبی (MLP-RBF) استفاده شد. نتایج مقایسه بین دو الگوریتم آموزش Trainlm

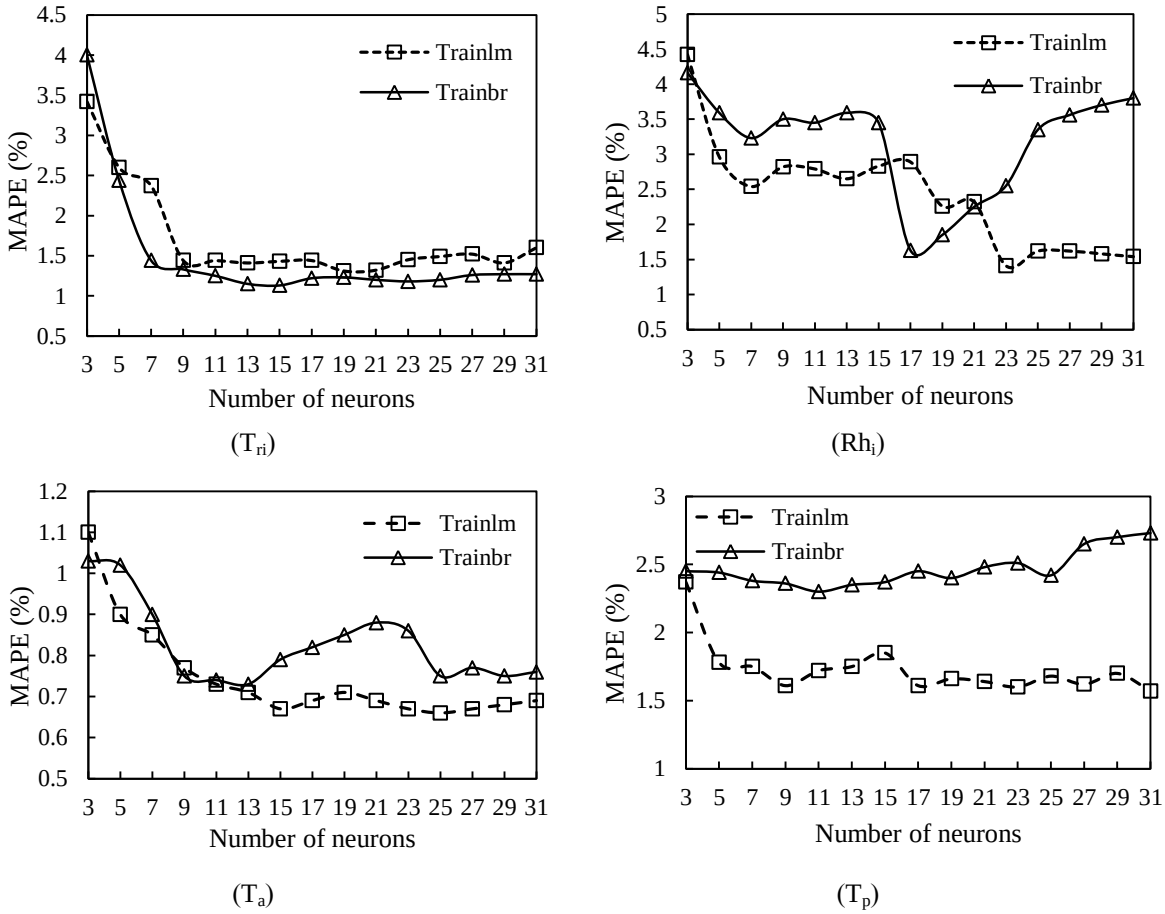
2- Spread parameter
3- K-fold cross validation
4- Mean Absolute Percentage Error
5- Root Mean Squared Error

و Trainbr با توجه به تعداد نرون‌های مختلف در لایه پنهان بر اساس آماره MAPE برای تخمین ۴ متغیر مورد بررسی در گلخانه شیشه‌ای دوطرفه با مدل MLP در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳- روش اعتبارسنجی دسته‌ای (K-fold)

Fig.3. K-fold crosses validation method

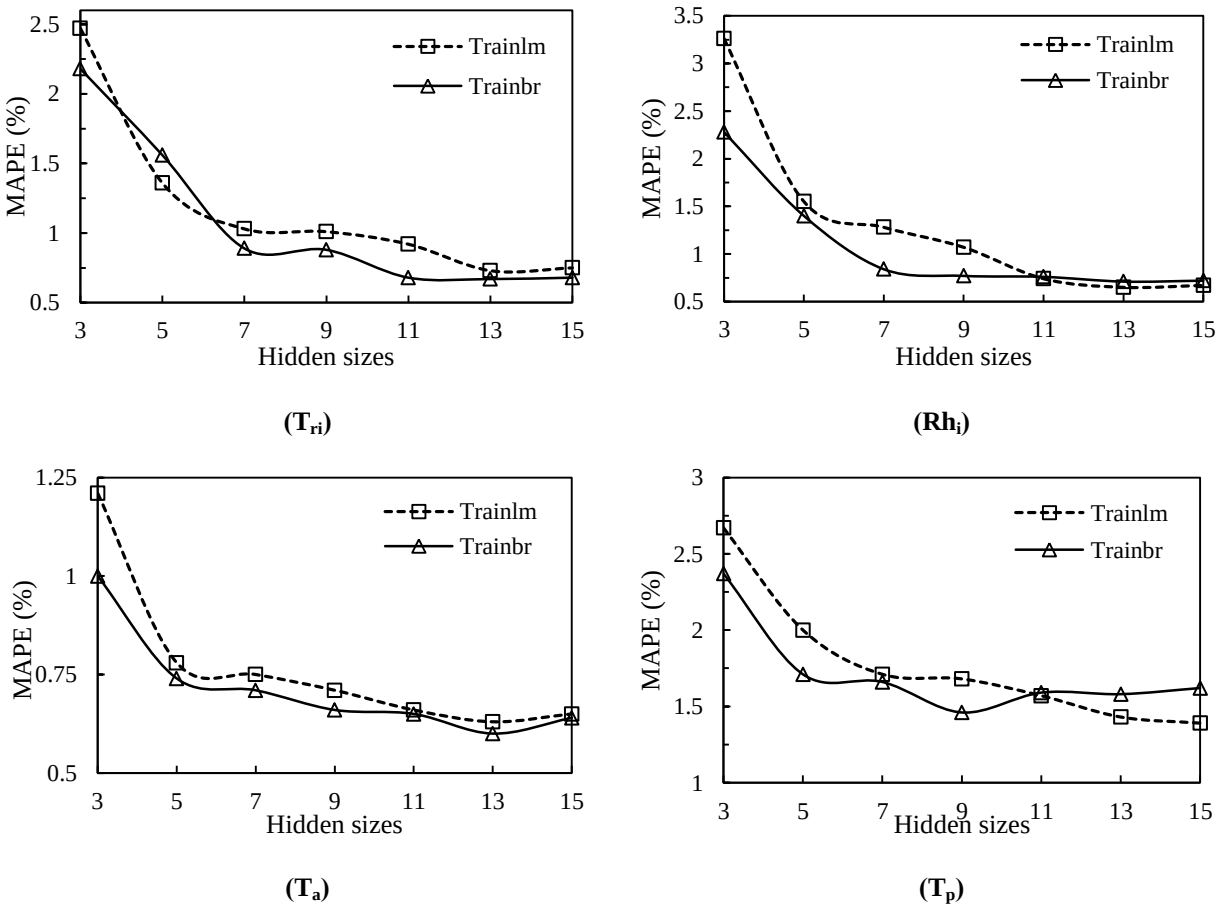


شکل ٤- نتایج حاصل از تخمین ۴ متغیر داخلی گلخانه شیشه‌ای با مدل MLP و دو نوع الگوریتم آموزش Trainlm و Trainbr

Fig.4. The results of 4 inside variables estimation by MLP model with two different training algorithms (Trainlm and Trainbr)

شکل ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم Trainbr فقط در تخمین دمای سقف گلخانه، دقتی بیش‌تر از الگوریتم Trainlm داشته است (۱/۱۳ در مقابل ۱/۳۱ درصد). در بقیه موارد، الگوریتم Trainlm با دقت بیش‌تر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به شکل ۴، بهترین توپولوژی مدل MLP در تخمین دمای سقف، رطوبت هوای داخل، دمای هوای داخل و دمای گیاه عبارتند از: (۳-۱۵-۱)، (۳-۲۳-۱)، (۳-۱۵-۱) و (۳-۲۳-۱). یعنی برای تخمین دمای سقف و دمای هوای داخل گلخانه، ۲۳ نرون و برای تخمین رطوبت هوای داخل گلخانه و دمای گیاه به ۱۵ نرون در لایه مخفی شبکه MLP نیاز است.

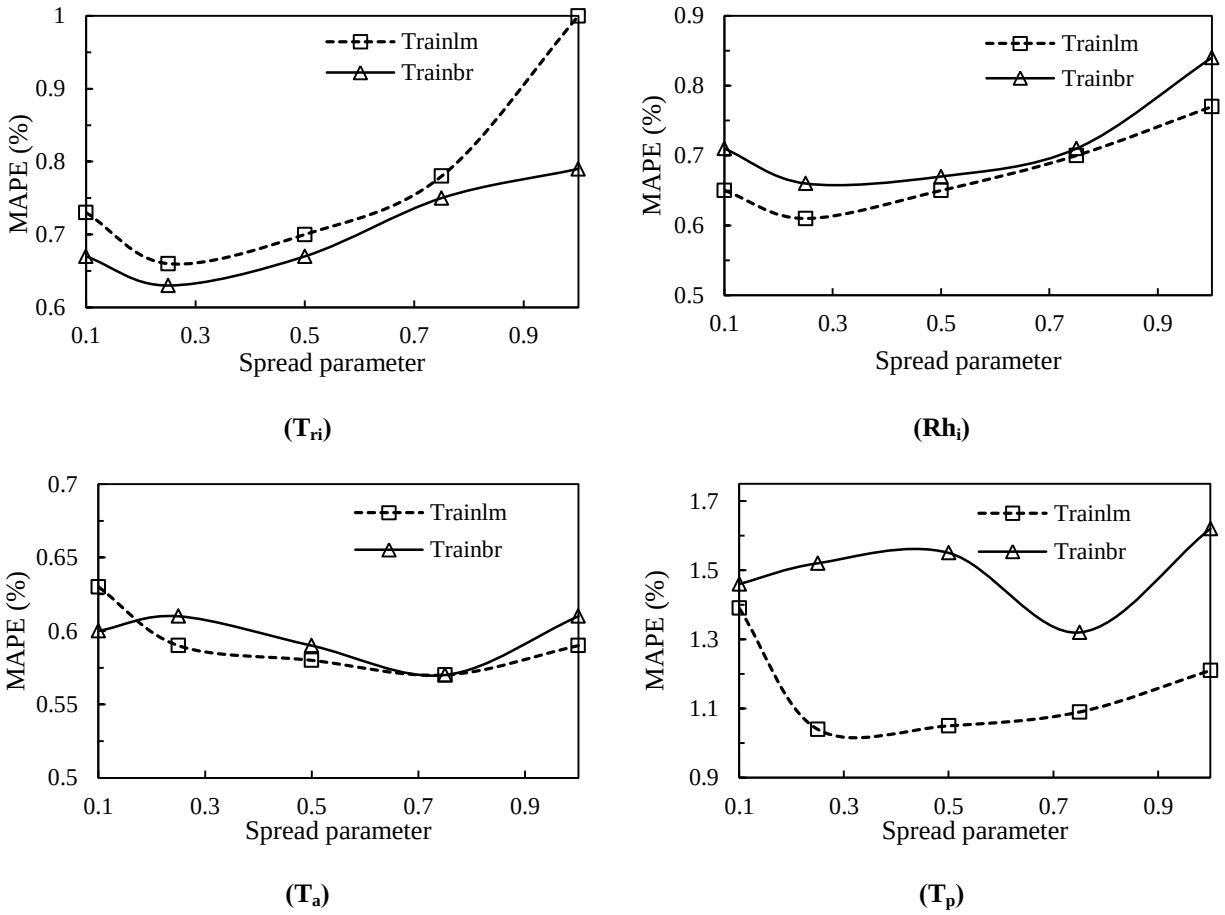
شکل ۵ به بررسی بهترین الگوریتم آموزش در مدل RBF و همچنین تعیین بهترین تعداد نرون در لایه پنهان می‌پردازد. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که الگوریتم Trainbr در تخمین دمای سقف و هوای گلخانه (T_{ri} و T_a) خطایی کم‌تر از الگوریتم Trainlm دارد (به‌ترتیب با مقدار MAPE معادل ۰/۶۷ و ۰/۶۰ درصد در مقابل ۰/۷۳ و ۰/۶۳ درصد). در مقابل، الگوریتم Trainlm در تخمین رطوبت هوای داخل گلخانه و دمای گیاه (Rh_i و T_p) خطایی کم‌تر از Trainbr از خود نشان داده است (به‌ترتیب با مقدار MAPE معادل ۰/۶۵ و ۱/۳۹ درصد در مقابل ۰/۷۱ و ۱/۴۶ درصد). در تمامی مدل‌های بالا، بهترین تعداد نرون در لایه پنهان معادل ۱۳ به‌دست آمده است. یکی از فاکتورهایی که در شبکه RBF بسیار موثر و مورد توجه است، پارامتر پخش (Spread parameter) است. در این تحقیق میزان این پارامتر برای تخمین ۴ متغیر مورد بررسی با توجه به دو نوع الگوریتم (Trainlm و Trainbr)، مشخص شد. شکل ۶ میزان این پارامتر را برای تمامی متغیرها و الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.



شکل ۵- نتایج حاصل از تخمین ۴ متغیر داخلی گلخانه شیشه‌ای با مدل RBF و دو نوع الگوریتم آموزش Trainlm و Trainbr

Fig.5. The results of 4 inside variables estimation by RBF model with two different training algorithms (Trainlm and Trainbr)

همان‌طور که نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد، نتایج مقایسه فاکتور پخش در دو الگوریتم Trainlm و Trainbr فقط برای تخمین دمای گیاه (T_p) با هم متفاوت است (۱/۰۴ در مقابل ۱/۳۲) ولی برای تخمین بقیه متغیرها (T_{ri}، Rh_i و T_a) این فاکتور برای هر دو نوع الگوریتم آموزش، تقریباً یکسان است (به‌ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۷۵).



شکل ٦– تغییرات میزان پارامتر پخش (Spread parameter) در مدل RBF با توجه به نوع الگوریتم آموزش (Trainlm و Trainbr)

Fig.6. Changes in spread parameter in RBF model based on training algorithm (Trainlm and Trainbr)

بهترین برازش داده‌های پیش‌بینی شده توسط دو مدل MLP و RBF با مجموعه داده‌های متفاوت

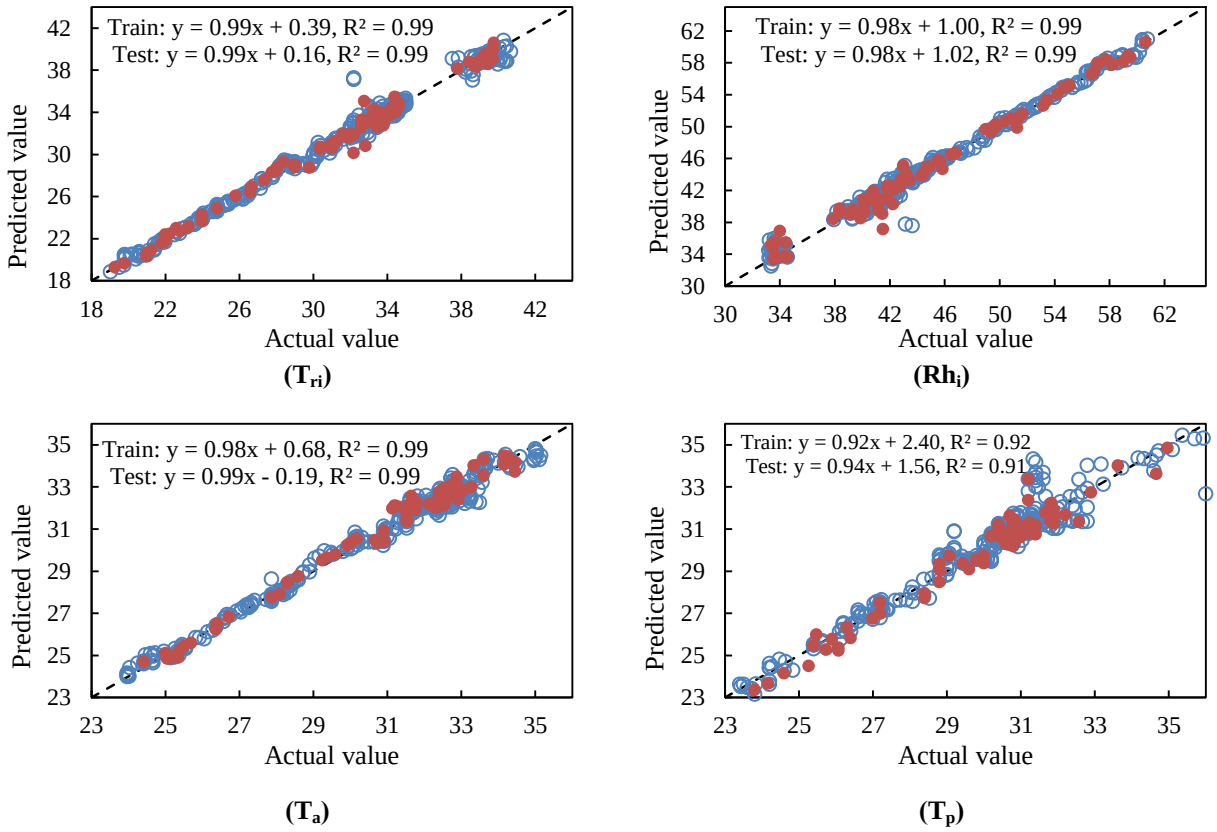
پس از تعیین بهترین الگوریتم آموزش و تعداد نرون برای هر دو مدل MLP و RBF، امکان وجود بهترین برازش ممکن، برای تخمین چهار متغیر داخلی گلخانه شیشه‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۷ و ۸ نتیجه این برازش‌ها را نشان می‌دهند. همان‌طور که نتایج این شکل‌ها نشان می‌دهند، هر دو مدل MLP و RBF توانسته‌اند با دقت نسبتاً زیادی متغیرهای داخلی گلخانه را به‌درستی تخمین بزنند. با مقایسه بین نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۷ و ۸ با تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی و تخمین دما در نقاط مختلف گلخانه توسط روابط ریاضی انتقال حرارت و جرم، می‌توان دریافت که کارایی شبکه عصبی در پیش‌بینی، بسیار بهتر، با دقت بیش‌تر و خطای کم‌تر است. مثلاً در تحقیقی به بررسی مدل‌سازی انتقال حرارت در گلخانه‌ای مجهز به صفحه حرارتی[1] و آبخوان زیرزمینی[2] پرداخته شد (Shukla *et al.*, 2006). نتایج نشان داد که مدل ریاضی قادر به پیش‌بینی دمای داخل گلخانه با دقتی بسیار کم‌تر از نتایج شبکه عصبی است (MAPE=۱۰/۲٪ و R=۰/۸۱).

در تحقیق دیگری از مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم برای تعیین میزان تلفات حرارتی و انتقال انرژی بین اجزای مختلف یک گلخانه مرسوم در کشور هند استفاده شد (Singh and Tiwari, 2010). نتایج نشان داد مدل ریاضی استفاده شده قادر است دمای داخل گلخانه را با دقت قابل‌قبولی تخمین بزند (MAPE=۱۱/۳۲٪ و RMSE=۶/۰۶°C). توجه به این نتایج لزوم استفاده بیش‌تر از ابزار شبکه عصبی به‌جای مدل‌های کلاسیک ریاضی در معادلات گلخانه‌ای را نشان می‌دهد. در روشی ترکیبی می‌توان ابتدا برای تخمین پارامترهای داخلی گلخانه از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرد و سپس نتایج به‌دست آمده را در معادلات ریاضی قرار داد و میزان انتقال حرارت بین اجزای گلخانه و همچنین دریافت انرژی و

1- Thermal screen

2- Underground aquifer

تلفات کلی گلخانه را به‌دست آورد. لزوم آمادگی یک گلخانه هوشمند نسبت به تغییرات محیطی پیش‌روی می‌تواند بهترین دلیل برای توسعه مدل‌های هوش مصنوعی برای تخمین شرایط داخلی گلخانه‌ها با توجه به تغییرات محیطی پیرامون خود باشد. گلخانه‌های هوشمند نسل آینده حتماً از ترکیب روش‌های مختلف شبکه عصبی و کلاسیک به‌منظور تخمین شرایط داخلی خود و فراهم کردن شرایط مطلوب گیاه برای رشد و نمو استفاده خواهند کرد (Taki *et al.*, 2018b).



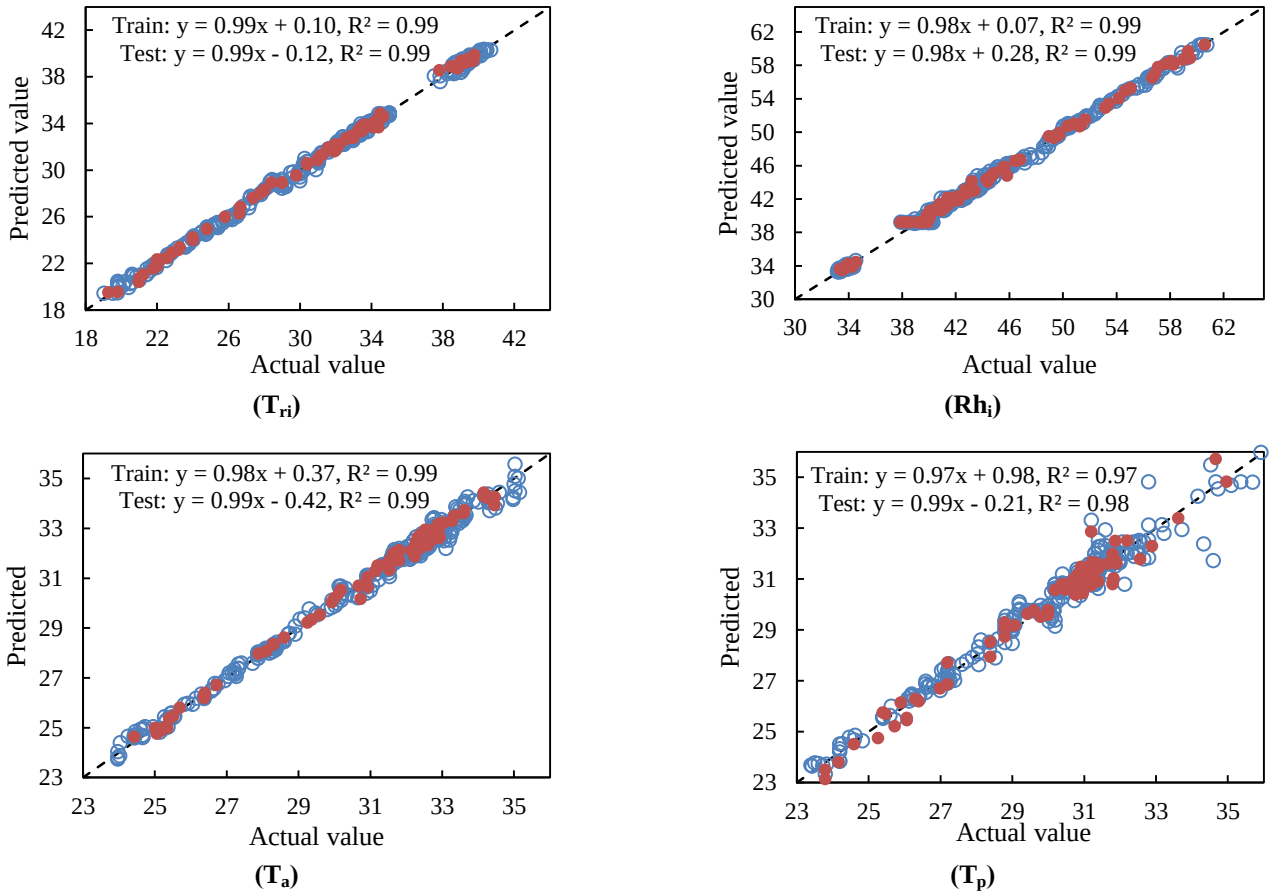
شکل ۷– مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ۴ متغیر داخلی گلخانه توسط مدل MLP

Fig.7. Comparison between actual and predicted values of 4 inside variables in the greenhouse by MLP model

به‌منظور بررسی قابلیت کارکرد شبکه‌های MLP و RBF مورد نظر با مجموعه داده‌های متفاوت و همچنین انتخاب بهترین مدل برای پیش‌بینی چهار متغیر داخلی گلخانه در این تحقیق، بررسی این دو نوع مدل با دو ترکیب متفاوت از مجموعه‌ی داده‌ها انجام گرفت. بدین منظور، دو مدل فوق با الگوریتم‌های نهایی موجود، با ۴۰ و ۸۰٪ از کل مجموعه‌ی داده‌ها مورد آموزش قرار گرفتند. نتایج این آزمون، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در اکثر موارد برای هر دو مدل MLP و RBF، الگوریتم آموزشی Trainlm نتایجی با دقت بیش‌تر ارائه کرده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در مدل MLP، هنگامی که از مجموعه داده‌های بیش‌تر (یعنی ۸۰٪ داده‌ها) برای آموزش شبکه استفاده شود، نتیجه نهایی مدل و دقت نهایی بیش‌تر از زمانی است که از داده‌های کم‌تر (یعنی ۴۰٪ داده‌ها) برای آموزش شبکه استفاده شود. این حالت برای پیش‌بینی دمای هوای داخل گلخانه، دمای داخلی سقف گلخانه و گیاه با توجه به نتیجه نهایی آماره MAPE و RMSE قابل مشاهده است. این ادعا فقط برای پیش‌بینی رطوبت هوای داخل گلخانه صادق نیست. در مورد این متغیر، هنگامی که از داده‌های کم‌تری برای آموزش شبکه استفاده می‌شود، نتیجه نهایی مدل‌سازی دقت بیش‌تری را نشان می‌دهد. آماره MAPE در این حالت نسبت به حالت ۸۰٪ داده‌ها، ۰/۰۳ درصد کم‌تر است. دلیل وجود این حالت می‌تواند نوسانات رطوبتی زیاد ناشی از فرار هوای داخل گلخانه و یا باز و بسته شدن درب ورودی و در مواری آبیاری گیاهان داخل گلخانه باشد. در این حالت داده‌های رطوبت با نوسانات زیادی روبه‌رو می‌شوند و در نهایت دقت نهایی مدل‌سازی با داده‌های بیش‌تر، کم‌تر خواهد شد.

جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل RBF با الگوریتم آموزشی Trainlm در تمامی حالات مختلف مجموعه داده، نتایج بهتری

نسبت به الگوریتم آموزشی Trainbr کسب می‌کند. نتایج این جدول نشان می‌دهد که مدل RBF حساسیت زیادی نسبت به اندازه مجموعه داده‌های آموزشی ندارد و نتایج نهایی مدل‌سازی در حالت ۸۰٪ و ۴۰٪ مجموعه داده‌های آموزشی، اختلاف نسبتاً اندکی با هم دارند ولی در کل هرچه‌قدر میزان آموزش شبکه با داده‌های بیش‌تری باشد، نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهد. این حالت یکی از مزایای مدل RBF نسبت به MLP است چون در برخی موارد به دلیل اشتباهات انسانی یا عدم وجود وسایل دقیق اندازه‌گیری، امکان برداشت داده‌های زیاد برای مدل‌سازی شبکه وجود ندارد و لزوم استفاده از داده‌های کم‌تر در این موارد می‌تواند به انتخاب مدل RBF نسبت به MLP منجر شود.



شکل ۸– مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ۴ متغیر داخلی گلخانه توسط مدل RBF

Fig.8. Comparison between actual and predicted values of 4 inside variables in the greenhouse by RBF model

انتخاب بهترین مدل و آنالیز حساسیت دو مدل MLP و RBF نسبت به داده‌های ورودی

در این قسمت با توجه به اطلاعات کلی مرحله قبل و بر اساس نتایج جدول ۲ مدل RBF با دقت بیش‌تری به‌عنوان بهترین مدل برای تخمین تمامی متغیرهای داخلی گلخانه شیشه‌ای مورد بررسی انتخاب می‌شود. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در اکثر موارد دقت مدل RBF دو برابر مدل MLP است (پارامتر MAPE مدل RBF تقریباً ۲ برابر مدل MLP است). دقت بیش‌تر مدل RBF و امکان استفاده از این مدل با داده‌های نه چندان زیاد، دو دلیل بزرگ برای استفاده از این مدل در هوشمند کردن گلخانه‌های نسل جدید محسوب می‌شود. در تحقیقی از مدل شبکه عصبی MLP و همچنین مدل رگرسیون چندگانه به‌منظور تخمین دما و رطوبت نسبی هوای داخلی گلخانه‌ای مرسوم در کشور مراکش استفاده شد. نتایج نشان داد شبکه عصبی هم در فاز آموزش و هم آزمایش نتایج بهتری نسبت به مدل رگرسیونی دارد.

جدول ۱- نتایج استفاده از دو مجموعه داده با اندازه متفاوت بر میزان دقت دو مدل MLP و RBF

Table 1- The results of MLP and RBF model with two different data set for training and two training algorithms

اندازه داده (٪) Size of data (%)	متغیر Variable	مدل Model*	آموزش Train		آزمایش Test		مجموع Total	
			RMSE	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
80	T_{ri}	MLP	**MLP1**	**0.83±0.25**	**1.62±0.46**	**0.88±0.30**	**1.73±0.48**	**0.85±0.24**	**1.65±0.45**
			MLP2	1.42±0.44	2.89±0.93	1.49±0.40	2.96±0.87	1.44±0.42	2.91±0.92
	Rh_i		**MLP1**	**1.00±0.34**	**1.59±0.60**	**1.11±0.38**	**1.75±0.64**	**1.04±0.31**	**1.62±0.60**
			MLP2	1.90±0.51	3.32±0.99	1.93±0.58	3.38±1.06	1.91±0.52	3.33±1.00
	T_a		**MLP1**	**0.31±0.04**	**0.74±0.09**	**0.35±0.05**	**0.83±0.11**	**0.32±0.03**	**0.76±0.75**
			MLP2	0.37±0.08	0.92±0.21	0.39±0.08	0.94±0.19	0.38±0.07	0.92±0.20
	T_p		**MLP1**	**0.87±0.05**	**1.61±0.05**	**0.96±0.13**	**1.80±0.19**	**0.89±0.04**	**1.65±0.15**
			MLP2	1.07±0.07	2.35±0.20	1.06±0.15	2.35±0.23	1.07±0.05	2.35±0.19
40	T_{ri}		MLP1	0.76±0.39	1.54±0.85	1.05±0.31	2.03±0.76	0.95±0.33	1.83±0.78
			MLP2	**0.79±0.29**	**1.60±0.65**	**1.04±0.25**	**1.97±0.62**	**0.95±0.24**	**1.83±0.62**
	Rh_i		**MLP1**	**0.77±0.22**	**1.23±0.30**	**1.21±0.16**	**1.81±0.24**	**1.06±0.14**	**1.57±0.24**
			MLP2	0.98±0.27	1.55±0.42	1.36±0.23	1.98±0.37	1.81±0.37	1.23±0.20
	T_a		**MLP1**	**0.29±0.03**	**0.69±0.07**	**0.38±0.05**	**0.87±0.08**	**0.35±0.03**	**0.79±0.06**
			MLP2	0.35±0.05	0.85±0.13	0.39±0.04	0.95±0.11	0.37±0.04	0.92±0.12
	T_p		**MLP1**	**0.89±0.09**	**1.71±0.23**	**1.03±0.14**	**2.07±0.21**	**0.98±0.09**	**1.92±0.18**
			MLP2	1.03±0.12	2.19±0.33	1.05±0.07	2.32±0.87	1.05±0.06	2.27±0.25
80	T_{ri}	RBF	**RBF1**	**0.26±0.01**	**0.66±0.03**	**0.26±0.03**	**0.64±0.06**	**0.26±0.01**	**0.66±0.03**
			RBF2	0.26±0.01	0.67±0.03	0.26±0.02	0.68±0.06	0.26±0.01	0.68±0.03
	Rh_i		**RBF1**	**0.38±0.01**	**0.64±0.03**	**0.38±0.02**	**0.65±0.03**	**0.38±0.01**	**0.65±0.02**
			RBF2	0.38±0.02	0.66±0.03	0.38±0.03	0.66±0.05	0.38±0.01	0.66±0.02
	T_a		**RBF1**	**0.25±0.01**	**0.59±0.02**	**0.25±0.03**	**0.60±0.05**	**0.25±0.01**	**0.60±0.02**
			RBF2	0.26±0.02	0.61±0.03	0.26±0.03	0.63±0.06	0.26±0.01	0.62±0.01
	T_p		**RBF1**	**0.59±0.09**	**1.09±0.14**	**0.60±0.15**	**1.14±0.16**	**0.59±0.08**	**1.10±0.08**
			RBF2	0.68±0.08	1.28±0.10	0.69±0.14	1.31±0.18	0.69±0.07	1.29±0.10
40	T_{ri}		**RBF1**	**0.27±0.03**	**0.67±0.04**	**0.27±0.02**	**0.67±0.04**	**0.27±0.02**	**0.67±0.03**
			RBF2	0.27±0.02	0.69±0.04	0.27±0.01	0.69±0.04	0.27±0.01	0.69±0.02
	Rh_i		**RBF1**	**0.38±0.02**	**0.65±0.04**	**0.38±0.02**	**0.65±0.03**	**0.38±0.01**	**0.65±0.03**
			RBF2	0.37±0.02	0.65±0.03	0.38±0.03	0.65±0.04	0.38±0.01	0.65±0.02
	T_a		**RBF1**	**0.25±0.02**	**0.59±0.05**	**0.25±0.01**	**0.59±0.02**	**0.25±0.01**	**0.59±0.01**
			RBF2	0.26±0.01	0.61±0.04	0.26±0.02	0.64±0.05	0.25±0.02	0.62±0.02
	T_p		**RBF1**	**0.62±0.13**	**1.13±0.14**	**0.57±0.08**	**1.08±0.09**	**0.59±0.08**	**1.10±0.08**
			RBF2	0.73±0.12	1.32±0.16	0.69±0.13	1.31±0.19	0.71±0.11	1.32±0.16

* اعداد ۱ و ۲ در کنار دو مدل RBF و MLP، نشان‌دهنده دو نوع الگوریتم Trainlm و Trainbr است. همچنین ردیف‌های بولد شده حاوی بهترین نتایج هستند.

Number 1 and 2 next to RBF and MLP models show the Trainlm and Trainbr, respectively. Also the bold rows have (the best results.*

ضریب تبیین مدل شبکه عصبی و رگرسیون به‌منظور پیش‌بینی دمای داخل گلخانه در فاز آزمایش به‌ترتیب ۰/۹۷۲ و ۰/۹۳۲ گزارش شد. این پارامتر برای رطوبت نسبی هوای داخل گلخانه به‌ترتیب معادل ۰/۹۸۹ و ۰/۹۵۸ به‌دست آمد. (Dariouchy *et al.*, 2009). در تحقیقی مشابه در کشور چین، میزان رطوبت نسبی هوای داخل گلخانه‌ای پلاستیکی توسط شبکه عصبی مصنوعی و مدل رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبکه عصبی در تخمین این پارامتر دقت بیش‌تری دارد. ضریب تبیین بین داده‌های واقعی با نتایج شبکه عصبی و مدل رگرسیونی به‌ترتیب معادل ۰/۸۸۴۲ و ۰/۷۵۴۸ گزارش شد (He and Ma, 2010). در تحقیق دیگری، از سه مدل MLP، RBF و SVM به‌منظور تخمین دمای هوا، خاک و گیاه در یک گلخانه‌ی پلاستیکی مرسوم استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل RBF به دلیل خطای کم‌تر، قابل اعتمادتر است (Taki *et al.*, 2018a).

جدول ۲- مقایسه مدل RBF و MLP برای تخمین متغیرهای داخلی گلخانه شیشه‌ای

Table 2- Comparison between RBF and MLP for prediction the inside variables in glass greenhouse

مدل Model		متغیر Variable			
		T_{ri}	Rh_i	T_a	T_p
MLP	MAPE	1.65±0.45	1.57±0.24	0.76±0.75	1.65±0.15
	RMSE	0.85±0.24	1.06±0.14	0.32±0.03	0.89±0.04
RBF	MAPE	0.66±0.03	0.65±0.02	0.60±0.02	1.10±0.08
	RMSE	0.26±0.01	0.38±0.01	0.25±0.01	0.59±0.08

در پایان، به منظور تعیین اثر هر یک از متغیرهای ورودی (I_o، T_o و Rh_o) بر تخمین پارامترهای داخلی گلخانه، آنالیز حساسیت برای هر دو مدل MLP و RBF انجام گرفت. نتایج این آنالیز حساسیت در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- آنالیز حساسیت مدل MLP و RBF نسبت به سه متغیر ورودی

Table 3- Sensitivity analysis for MLP and RBF models relative to the 3 variables

متغیر Variable	مدل* Model	MLP RMSE	MLP MAPE	MLP R^2	RBF RMSE	RBF MAPE	RBF R^2
T_{ri}	**All**	**0.62**	**1.23**	**0.99**	**0.25**	**0.66**	**0.99**
	All exclude x1	1.02	1.84	0.97	0.75	1.25	0.98
	All exclude x2	0.87	1.69	0.98	0.56	1.01	0.99
	All exclude x3	0.84	1.65	0.98	0.56	1.18	0.99
Rh_i	**All**	**0.81**	**1.24**	**0.99**	**0.36**	**0.61**	**0.99**
	All exclude x1	1.66	2.72	0.95	0.84	1.07	0.99
	All exclude x2	0.90	1.29	0.98	0.67	0.89	0.99
	All exclude x3	1.39	2.19	0.96	0.56	0.99	0.99
T_a	**All**	**0.34**	**0.83**	**0.99**	**0.24**	**0.59**	**0.99**
	All exclude x1	0.34	0.85	0.99	0.32	0.77	0.99
	All exclude x2	0.32	0.76	0.99	0.29	0.70	0.99
	All exclude x3	0.37	0.91	0.98	0.32	0.76	0.99
T_p	**All**	**0.87**	**1.59**	**0.92**	**0.48**	**1.04**	**0.97**
	All exclude x1	0.89	1.68	0.92	0.79	1.31	0.93
	All exclude x2	1.06	1.99	0.88	0.63	1.27	0.96
	All exclude x3	1.03	1.64	0.89	0.60	1.26	0.96

* در مدل‌های فوق x_1، x_2 و x_3 به‌ترتیب عبارتند از: I_o، T_o و Rh_o

(In above models, x_1, x_2 and x_3 are: I_o, T_o and Rh_o, respectively)

نتایج این جدول نشان می‌دهد که برای تخمین هر چهار متغیر داخلی گلخانه، بهترین مدل با بیش‌ترین دقت بر اساس سه فاکتور RMSE، MAPE و R^2، مدلی است که از هر سه پارامتر بیرونی (I_o، Rh_o و T_o) استفاده کند. بر این اساس، در تمام مدل‌سازی‌های مراحل بعدی از هر سه پارامتر بیرونی به‌عنوان نهاده‌های ورودی دو مدل MLP و RBF استفاده می‌شود. استفاده از آنالیز حساسیت در مدل‌سازی به محقق اجازه می‌دهد که از دخالت فاکتورهای بی‌اثر یا کم‌اثر در نتیجه‌گیری نهایی جلوگیری کند و مدلی با کم‌ترین تعداد نهاده ورودی و بیش‌ترین دقت ایجاد کند. از این روش در پژوهش‌های دیگری نیز استفاده شده است (Rohani *et al.*, 2018; Taki *et al.*, 2018b).

از شبکه‌های عصبی مصنوعی علاوه بر تخمین پارامترهای داخلی گلخانه، می‌توان برای پیش‌بینی سایر متغیرها از جمله میزان CO_2، عملکرد گیاه گلخانه‌ای و یا حتی میزان تبخیر و تعرق گیاه در گلخانه نیز استفاده کرد. به‌عنوان نمونه از شبکه عصبی MLP به‌منظور پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق گیاه گلخانه‌ای در کشور استرالیا استفاده شد (Falamarzi *et al.*, 2014). متغیرهای ورودی شامل بیشینه و کمینه دمای بیرون و همچنین سرعت باد خارج از گلخانه بود. این مقادیر طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ توسط مرکز هواشناسی استرالیا جمع‌آوری شده بودند. میزان تبخیر و تعرق گیاه گلخانه‌ای طبق فرمول معروف روش پنمن مانتیث (PM56) محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از شبکه عصبی به‌عنوان ابزاری مفید برای تخمین میزان تبخیر و تعرق گیاه گلخانه‌ای استفاده کرد.

ساختار بهترین شبکه به‌صورت ۱-۲-۶ با مقدار R=0.89 و RMSE=1.03mm/day به‌دست آمد. در تحقیق دیگری از ابزار شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور تخمین میزان عملکرد، رشد و همچنین مقدار آب مصرفی در کشت گوجه‌فرنگی در کشور کانادا استفاده شد (Ehret *et al.*, 2011). داده‌های دما و میزان تابش روزانه و هفتگی از گلخانه‌ای خودکار و توسط سنسورهای حساس برداشت شد. نتایج این کار نیز حاکی از توانمندی این روش در تخمین روابط غیرخطی بین متغیرهاست.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی (MLP و RBF) به‌منظور پیش‌بینی ۴ متغیر مهم (T_a, T_p, T_{ri}, Rh_a) یک گلخانه‌ی شیشه‌ای دوطرفه با ساختار ویژه در شهر ملاثانی استفاده شد. داده‌های اولیه توسط سنسورهای دما، رطوبت و تابش‌سنج به‌دست آمد. از دو الگوریتم آموزش Trainlm و Trainbr با یک لایه مخفی و تعداد نرون‌های مختلف با سه متغیر ورودی مشخص (I_o، Rh_o و T_o) استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم آموزشی Trainlm در اکثر موارد در هر دو مدل MLP و RBF دقت بیش‌تری نسبت به الگوریتم Trainbr دارد. در این تحقیق هر دو مدل شبکه عصبی با دو مجموعه متفاوت از داده‌ها (۴۰٪ و ۸۰٪ از کل داده‌ها) مورد آموزش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حساسیت مدل RBF نسبت به تغییر اندازه مجموعه داده‌های آموزشی بسیار کم است. به‌عبارتی عملکرد مدل RBF با تغییر اندازه مجموعه داده‌های آموزشی تغییر چندانی نمی‌کند. نتایج کلی این تحقیق با توجه به دو آماره MAPE و RMSE نشان داد که مدل RBF قادر است با دقت بالایی هر چهار متغیر داخلی گلخانه مورد نظر را پیش‌بینی کند. پیشنهاد می‌شود نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی با رگرسیون چندگانه و مدل‌های ریاضی انتقال حرارت و جرم در گلخانه مورد نظر، مقایسه شود. استفاده از این نوع ابزار قادر است بسیاری از هزینه‌های مربوط به خرید و نصب انواع ابزارهای اندازه‌گیری در گلخانه‌ها را کاهش دهد و گلخانه را به سمت هوشمندشدن و عملکری مستقل از اوپراتور سوق دهد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به دلیل مساعدت‌های مالی در اجرای این تحقیق که بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیزاسیون کشاورزی است، کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Ben Ali, R. E., M. Aridhi, and A. Mami. 2016. Fuzzy Logic Controller of temperature and humidity inside an agricultural greenhouse. IEEE Journals & Magazines.
2. Boaventura, L., C. Couto, and A. E. B. Ruano. 2000. A greenhouse climate multivariable predictive controller, Acta Horticulturae, ISHS 534: 269-276.
3. Bot G. P. A. 1983. Greenhouse Climate: From Physical Processes to a Dynamic Model. Ph.D. dissertation, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 240 pp.
4. Coelho, J. P., J. Boaventura, and P. B. Moura Oliveira. 2002. Solar radiation prediction methods applied to improve greenhouse climate control, in: World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 13-15 March. pp. 154-161.
5. 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.
6. Ehret, D., L. Hill, B. D. T. Helmer, and D. R. Edward. 2011. Neural network modeling of greenhouse tomato yield, growth and water use from automated crop monitoring data. Computers and Electronics in Agriculture 79: 82-89.
7. Falamarzi, Y., N. Palizdan, Y. F. Huang, and T. S. Lee. 2014. Estimating evapotranspiration from temperature and wind speed data using artificial and wavelet neural networks (WNNs). Agricultural Water Management 140: 26-36.
8. Feng, L. X., Q. L. Lin, M. G. Qi, and W. Gang. 2016. Modeling Greenhouse Temperature by Means of PLSR and BPNN. 35th Chinese Control Conference. July 27-29, Chengdu, China.
9. 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.
10. Gupta, R., G. N. Tiwari, G. N. Kumar, and Y. Gupta. 2012. Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD. Energy and Buildings 47: 27-34.
11. 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 (2010): S19-S23.
12. Hill, J. 2006. Dynamic modeling and energy use in a nursery greenhouse. MSc thesis.
13. Lachouri, C. E., K. H. Mansouri, M. M. Lafifi, and A. Belmeguenai. 2016. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Modeling Greenhouse Climate. International Journal of Advanced Computer Science and Applications 7: 12-18.

14. 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.
15. Manuel, A., R. Francisco, R. Armando, and B. Manuel. 2005. Discrete-time nonlinear FIR models with integrated variables for greenhouse indoor temperature simulation, in: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, CDC-ECC'05, pp. 4158-4162.
16. Rodriguez, J. D., A. Perez, and J. A. Lozano. 2010. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: Proceeding of the international joint conference on artificial intelligence, 32: 569-575.
17. Rohani, A., M. Taki, and M. Abdollahpour. 2018. A novel soft computing model (Gaussian process regression with K-fold cross validation) for daily and monthly solar radiation forecasting (Part: I). Renewable Energy 115: 411-422
18. Rohani, A., M. H. Abbaspour-Fard, and Sh. Abdolahpour. 2011. Prediction of tractor repair and maintenance costs using artificial neural network. Expert Sys. Applications 38: 8999-9007.
19. Sethi, V. P. 2009. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: thermal modeling and experimental validation. Solar Energy 83: 21-38.
20. Sethi, V. P., and R. K. Dubey. 2008. Optimal space utilization of a greenhouse using multi-rack tray system: Thermal modeling and experimental validation. Energy Conversion and Management 49: 2890-2899.
21. 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.
22. Singh, R. D., and G. N. Tiwari. 2010. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis. Energy 35: 2367-2373.
23. Taki, M., A. Rohani, M. Rahmati-Joneidabad. 2018b. Solar thermal simulation and applications in greenhouse. Information Processing in Agriculture 5: 83-113.
24. Taki, M., S. Abdanan Mehdizadeh, A. Rohani, M. Rahnama, and M. Rahmati-Joneidabad. 2018a. Applied machine learning in greenhouse simulation; new application and analysis. Information Processing in Agriculture, https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.01.003.
25. Taki, M., Y. Ajabshirchi, and A. Mahmoudi. 2012. Prediction of output energy for wheat production using artificial neural networks in Esfahan province of Iran. Journal of Agricultural Technology 8 (4): 1229-1242.
26. Taki, M., Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, A. Rohani, and M. Matloobi. 2017. Evaluation of heat transfer mathematical models and multiple linear regression to predict the inside variables in semi-solar greenhouse. Journal of Agricultural Machinery 7 (1): 2014-220. (In Farsi).
27. 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.
28. Vadiee, A., and V. Martin. 2013. Energy analysis and thermo economic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building. Applied Energy http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy. 2013.06.051.
29. Van Ooteghem, R. J. C. 2007. Optimal Control Design for a Solar Greenhouse, Systems and Control. Wageningen: Wageningen University.
30. 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.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 213-227

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۲۷-۲۱۳

Prediction the inside Variables of Even-span Glass Greenhouse with Special Structure by Artificial Neural Network (MLP-RBF) Models

M. Hamdani[1], M. Taki[2], M. Rahnama[2*], A. Rohani[3], M. Rahmati-Joneidabad[4]

Received: 27-04-2018
Accepted: 25-08-2018

Introduction

Controlling greenhouse microclimate not only influences the growth of plants, but is also critical in the spread of diseases inside the greenhouse. The microclimate parameters are inside air, roof, crop and soil temperature, relative humidity, light intensity, and carbon dioxide concentration. 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 and also artificial neural networks (ANNs) are used for this purpose as a function of the metrological conditions and the parameters of the greenhouse components. Usually thermal simulation has a lot of problems to predict the inside climate of greenhouse and the error of simulation is higher in literature. So the main objective of this paper is comparison between two types of artificial neural networks (MLP and RBF) for prediction 4 inside variables in an even-span glass greenhouse and help the development of simulation science in estimating the inside variables of intelligent greenhouses.

Materials and Methods

In this research, different sensors were used for collecting the temperature, radiation, humidity and wind data. These sensors were used in different positions inside the greenhouse. After collecting the data, two types of ANNs were used with LM and Br training algorithms for predicting the inside variables in an even-span glass greenhouse in Mollasani, Ahvaz. MLP is a feed-forward layered network with one input layer, one output layer, and some hidden layers. Every node computes a weighted sum of its inputs and passes the sum through a soft nonlinearity. The soft nonlinearity or activity function of neurons should be non-decreasing and differentiable. One type of ANN is the radial basis function (RBF) neural network which uses radial basis functions as activation functions. An RBF has a single hidden layer. Each node of the hidden layer has a parameter vector called center. This center is used to compare with the network input vector to produce a radially symmetrical response. Responses of the hidden layer are scaled by the connection weights of the output layer and then combined to produce the network output. There are many types of cross-validation, such as repeated random sub-sampling validation, K-fold cross-validation, K×2 cross-validation, leave-one-out cross-validation and so on. In this study, we pick up K-fold cross- validation for selecting parameters of model. The K-fold cross-validation is a technique of dividing the original sample randomly into K sub-samples. Different performance criteria have been used in the literature to assess model's predictive ability. The mean absolute percentage error (MAPE), root means square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) are selected to evaluate the forecast accuracy of the models in this study.

Results and Discussion

The results of neural network optimization models with different networks, dependent on the initial random values of the synaptic weights. Thus, the results in general will not be the same in two different trials, even if the same training data have been used. Therefore, in this research K-fold cross validation was used and different data samples were made for train and test of ANN models. The results showed that Trainlm for both of MLP and RBF models has the lower error than Trainbr. Also MLP and RBF were trained with 40 and 80% of total data and results indicated that RBF has the lowest sensitivity to the size data. Comparison between RBF and MLP model showed that, RBF has the lowest error for prediction all the inside variables in the greenhouse (Ta, Tp, Tri, Rha). In this paper, we tried to indicate the fact that innovative methods are simpler and more accurate than physical heat and mass transfer method to predict the environment changes. Moreover, this method can use to predict other changes in greenhouse such as final yield, evapotranspiration, humidity, cracking on the fruit, CO2 emission and so on. So the future research will focus on the other soft computing models such as ANFIS, GPR,

1- MSc student, Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
2- Assistant Prof., Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
3- Associate Prof., Department of Biosystems, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4- Assistant Prof., Department of Horticulture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
(*- Corresponding Author Email: rahnamam2002@yahoo.com)

Time Series and select the best one for modeling and finally online control of greenhouse in all climate and different environment.

Conclusions

This research presents a comparison between two models of Artificial Neural Network (RBF-MLP) to predict 4 inside variables (Ta, Tp, Tri, Rha) in an even-span glass greenhouse. Comparison of the models indicated that RBF has lower error. The range of RMSE and MAPE factors for RBF model to predict all inside variables were between 0.25-0.55 and 0.60-1.10, respectively. Besides the results showed that RBF model can estimate all the inside variables with small size of data for training. Such forecasts can be used by farmers as an appropriate advanced notice for changes in temperatures. Thus, they can apply preventative measures to avoid damage caused by extreme temperatures. More specifically, predicting a greenhouse temperature can not only provide a basis for greenhouse environmental management decisions that can reduce the planting risks, but also could be as a basic research for the feedback-feed-forward type of climate control strategy.

Keywords: Even-span greenhouse, Intelligent greenhouses, Modeling, Neural network

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 229-240

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۴۰-۲۲۹

اثر زمان برداشت بر تلفات ذرت و پیش‌بینی آن با منطق فازی در منطقه مغان

مهدی عباسقلی پور[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸

چکیده

در این تحقیق تلفات برداشت ذرت با کمباین جاندیر مدل ۱۱۶۵ در منطقه مغان در شرایط آب و هوایی مختلف در قالب طرح کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار مورد مطالعه قرار گرفت. تلفات واحد فرآوری و واحد جمع‌آوری کمباین در تاریخ‌های ۱۴، ۱۷ و ۲۰ آبان ماه ۱۳۹۶ و در سه زمان برداشت در طول روز ساعت ۱۰-۸، ۱۳-۱۱ و ۱۶-۱۴ با سه تکرار اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه واریانس اختلاف معنی‌داری را بین تاریخ‌ها و زمان‌های برداشت در سطح احتمال ۵٪ نشان داد. با توجه به مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن، کمترین تلفات در تاریخ ۱۷ آبان ماه ساعت ۱۶-۱۴ به مقدار ۱۰/۰۵٪ بود و بیشترین آن مربوط به ۲۰ آبان ساعت ۱۰-۸ به مقدار ۱۲/۷۸٪ اندازه‌گیری شد. رطوبت بالای هوا و پایین بودن دمای هوا از دلایل افزایش تلفات بود. در ادامه تحقیق با توجه به تاثیر زمان برداشت در میزان تلفات، برای پیش‌بینی مناسب‌ترین زمان برداشت اقدام به طراحی یک سیستم خبره فازی گردید که در آن تلفات واحد فرآوری، واحد جمع‌آوری و رطوبت هوا به‌عنوان ورودی‌های سیستم و زمان برداشت به‌عنوان خروجی آن در نظر گرفته شد. برای ایجاد سیستم خبره فازی از موتور استنتاج ممدانی با فازی‌ساز منفرد و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز استفاده شد. ضریب تبیین ۰/۹۸ نشان‌دهنده همبستگی زیاد نتایج پیش‌بینی بهترین زمان برداشت با مقادیر اندازه‌گیری شده بود. بنابراین سیستم فازی طراحی شده با دقت بالایی زمان برداشت ذرت را پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تلفات برداشت، زمان برداشت، سیستم خبره فازی

مقدمه

محصول ذرت دارای مواد قندی و نشاسته‌ای زیادی است و از این رو یکی از بهترین نباتات علوفه‌ای برای مصرف به‌صورت تازه یا سیلویی به‌شمار می‌رود. بعد از رسیدن فیزیولوژیک ذرت (تشکیل لایه سیاه در محل اتصال دانه به خوشه) آب گیاه قطع می‌گردد. سپس زمانی که رطوبت دانه بین ۲۵-۲۰ درصد رسید برداشت ذرت دانه‌ای انجام می‌شود (Price, 1997). برداشت مکانیزه غلات و جداسازی آنها از قسمت‌های دیگر محصول با کمترین میزان تلفات و حداکثر کیفیت، از اهداف اصلی محققین در این زمینه بوده است. برداشت ذرت با کمباین و میزان تلفات و ریزش آن به عواملی چون زمان برداشت، رطوبت دانه، درجه حرارت محیط، وضعیت مزرعه (خوابیدگی)، وضعیت کمباین (نو یا فرسوده بودن آن) و تجربه راننده بستگی دارد. باتوجه به افزایش روزافزون سطح زیرکشت ذرت در منطقه مغان و برداشت زودهنگام نسبت به سایر محصولات مانند سویا، جهت کشت محصولات پاییزه، اهمیت بررسی زمان مناسب برداشت و ارائه راهکارهای مناسب در این زمینه جهت افزایش عملکرد و کاهش تلفات ضروری می‌باشد. تلفات محصول را نمی‌توان به صفر کاهش داد ولی با استفاده از زمان مناسب و رطوبت صحیح محصول، امکان کاهش آن به سطح قابل‌قبول وجود دارد. بر این اساس جهت کاهش تلفات ریزش و توجیه فنی و اقتصادی، این تحقیق انجام گردید. طبق گزارش‌های ارائه شده توسط دفتر طرح ذرت، میزان تلفات کمباین‌های موجود کشور حداقل ۱۰ درصد می‌باشد (Mostofi Sarkari, 2011; Mostofi Sarkari *et al.*, 2014) که با توجه به میزان تولید ذرت دانه‌ای در کشور در سال ۲۰۱۵ حداقل ۱۱۶۸۶۳ تن تلفات وجود دارد (FAO statistics, 2015) و براساس قیمت تضمینی خرید در این سال (۱۰۳۶۸ ریال به‌ازای هر کیلو ذرت دانه‌ای) مبلغی بالغ بر ۱/۲۱۲ میلیارد ریال به ضرر کشور می‌باشد. تاکنون تحقیقات متعددی درخصوص بررسی تلفات کمباین ذرت ناشی از عوامل مختلف صورت گرفته است. تیمارهای رطوبت محصول در زمان برداشت، سرعت پیشروی کمباین و سرعت سیلندر کوبنده پارامترهای اساسی در اندازه‌گیری تلفات می‌باشند (Shay *et al.*, 1999; Shauck and Smeda, 2011; Paulsen *et al.*, 2014; Prochnow *et al.*, 2015; Humburg, 2016). تحقیقی که در منطقه قزوین انجام شده بود نشان داد که مناسب‌ترین رطوبت دانه برای برداشت ۲۳ درصد، مناسب‌ترین سرعت کوبنده ۴۰۰ دور در دقیقه و مناسب‌ترین سرعت پیشروی ۴/۲ کیلومتر در ساعت بود. در این صورت تلفات کل دانه به کمترین مقدار خود رسید (Mostofi Sarkari, 2011). با توجه به این‌که رطوبت دانه ذرت تاثیر به‌سزایی در میزان تلفات برداشت دارد بر این اساس تحقیقات متعددی در این زمینه انجام گرفته است. به طوری‌که در تحقیقی اثر سه سطح رطوبت ۳۰-۲۸، ۲۳-۲۰ و ۱۲-۱۰ درصد بر

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Abbasgholipour@bonabiau.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.73290

روی عملکرد و کیفیت ذرت دانه‌ای و کاه ذرت بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در میزان رطوبت ۱۲-۱۰ درصد عملکرد دانه نسبت به سطوح دیگر مقدار بیشتری را نشان می‌دهد در حالی‌که مقدار وزنی چوب بلال، کاه ذرت، کل بقایای گیاهی و عملکرد کل ماده خشک کاهش یافته است (Tolera *et al.*, 1998). محققین برزیلی طبق تحقیقی که انجام دادند مناسب‌ترین رطوبت دانه ذرت در هنگام برداشت را ۱۴ درصد اعلام کردند. عملکرد ذرت در این رطوبت از ۶۹۳۷ تا ۱۱۰۴۴ کیلوگرم به‌ازای هر هکتار گزارش شد. تلفات کل کمباین ذرت از ۳۶/۲ تا ۳۲۰/۶ کیلوگرم به‌ازای هر هکتار اندازه‌گیری شد. به عبارتی تلفات از ۰/۳ تا ۳/۶ درصد به‌دست آمد (Paulsen *et al.*, 2014). در تحقیق دیگری محققین نشان دادند که تلفات دانه با روند مطلوب برداشت، کاهش یافت و به حدود ۴ تا ۶ درصد و تقریباً میانگین ۵ درصد رسید. در این تحقیق از پایشگر تلفات دانه برای کنترل تلفات فرآوری (تلفات کوبنده و تمیزکننده) استفاده شد (Spengler *et al.*, 2003). با بررسی منابع می‌توان به این نتیجه دست یافت که در زمینه پیش‌بینی زمان برداشت محصول تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های تحلیلی و رگرسیونی در کاربردهای پیش‌بینی، استفاده از داده‌های پارامترهای مختلف برداشت ذرت ازجمله تلفات واحدهای فرآوری و جمع‌آوری و رطوبت به‌منظور پیش‌بینی مناسب‌ترین زمان برداشت، مجموعه داده خوبی را برای کار در هوش مصنوعی فراهم می‌کند. در حال حاضر، روش‌های مختلف در نرم‌افزارهای محاسباتی مبتنی بر آمار، شبکه عصبی (network Neural) و فازی (Fuzzy) برای تحلیل داده‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ross, 1995). رویکرد مبتنی بر منطق فازی به‌عنوان یک جایگزین برای دانش تخصصی، در نظر گرفته می‌شود که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و به‌درستی مقادیر مجهول داده‌های مدل را تخمین می‌زند و تا سطح بالایی توانایی بیان نزدیک به واقعیات را دارد (Karatalopoulos, 2000). هدف از سیستم‌های فازی، قرار دادن دانش بشری در سیستم‌های مهندسی به شکل سیستماتیک، قابل تجزیه، تحلیل و مؤثر می‌باشد. استنتاج فازی فرآیند واقعی نگاشت داده‌ها از مجموعه متغیرهای ورودی به خروجی براساس مجموعه‌ای از قواعد فازی است. چهار واحد اساسی و لازم برای استفاده موفق از هر رویکرد مدل‌سازی فازی وجود دارد که عبارتند از: پایگاه قواعد فازی (Fuzzy rule base)، موتور استنتاج فازی (Fuzzy inference motor)، فازی‌ساز (Fuzzification)، غیر فازی‌ساز (Defuzzification) (Wang, 1997). تاکنون از سیستم فازی برای پیش‌بینی بهترین زمان برداشت ذرت استفاده نشده است. اما در تحقیقاتی از این سیستم برای دستیابی به تلفات قابل‌قبول در قسمت فرآوری کمباین استفاده شده است. سیستم کنترل فازی مذکور دانش اپراتورهای ماهر را با داده‌های موجود ترکیب نموده است تا مقدار تلفات واحد فرآوری بهینه شود و به‌ازای نرخ تغذیه مشخص سطح مطلوبی از مواد غیردانه‌ای در مخزن دانه حاصل گردد. نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای در برداشت گندم حاکی از سودمند بودن این سیستم کنترلی در شرایط متغیر محیطی بود (Craessaerts *et al.*, 2010). در مطالعه دیگری سیستم کنترل‌کننده فازی به‌دست آمده از دانش شخص خبره را برای کنترل و تنظیم خودکار کمباین جهت دستیابی به حداقل تلفات دانه‌ای به‌ویژه در غربال و الک بالایی استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای در شرایط زراعی آبی و دیم، تأثیر نصب سیستم کنترلی فوق بر روی کمباین را در کاهش تلفات، مثبت ارزیابی کردند (Omid *et al.*, 2010). با بررسی تحقیقات مذکور برروی تلفات برداشت، مشخص شد که در اکثر تحقیقات درخصوص تنظیمات کمباین و رطوبت بحث شده است و لیکن تحقیقی در رابطه با بررسی تاثیر زمان برداشت در تلفات کمباین صورت نگرفته است. به غیر از اینکه در تحقیقی تـأثیر زمـان برداشت بر خصوصیات فیزیکی دانه ذرت مورد بررسـی قـرار گرفـته ولی درخصوص تلفات برداشت بحثی انجام نگرفته است، نتایج این تحقیق نشان داد که تأخیر در برداشت باعث افزایش چگالی توده، وزن دانه و چگالی حقیقی در هیبریدهای ذرت می‌شود (Kordi, 2012). بر همین اساس کشاورزان در زمینه زمان برداشت در شرایط متفاوت و جلوگیری از تلفات اضافی، اطلاعات کافی در دسترس نداشتند. در منطقه مغان کشت محصول ذرت در یک کشت وصنعت واحد در سطح وسیعی انجام می‌گیرد و رطوبت محصول قابل برداشت در مزرعه‌های مختلف در آن کشت صنعت متغیر می‌باشد. به عبارت دیگر رطوبت در زمان برداشت در منطقه مغان در محدوده بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می‌باشد. به‌علاوه این‌که بازه زمانی لازم برای برداشت ذرت هم‌زمان با بارش‌های پاییزه است. لذا برای جلوگیری از تاخیر در برداشت، از دست ندادن کشت بعدی و انتخاب ترتیب برداشت مزرعه‌ها در یک کشت و صنعت، برآورد زمان مناسب برای برداشت ذرت امری ضروری می‌باشد. این موضوع هدف اصلی تحقیق حاضر می‌باشد. بر همین اساس در این تحقیق اثر زمان برداشت در طول ماه و در طول روز بر مقدار تلفات برداشت ذرت در منطقه مغان مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای به‌دست آمده اقدام به طراحی سیستم فازی برای پیش‌بینی بهترین زمان برداشت ذرت گردید. در ادامه به نحوه پیاده‌سازی سیستم فازی و اندازه‌گیری تلفات کمباین و نقش آنها در انتخاب زمان مناسب برداشت پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

تاریخ‌های کاشت ذرت دانه‌ای رقم متداول منطقه (سینگل کراس ۷۰۴) در منطقه مغان معمولاً از ۱۰ تا ۲۰ اردیبهشت ماه می‌باشد که عملیات کاشت در این طرح در تاریخ ۹۶/۰۲/۱۰ آغاز گردید. جهت

کاشت بذر از ردیف‌کار پنوماتیکی ذرت مدل SP (۴ ردیفه با عرض کار ۳ متر و ۵ واحد کارنده) شرکت ماشین بذرسازان به مقدار ۲۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد. با توجه به این‌که برداشت ذرت در منطقه مغان در فصل پاییز انجام می‌شود. بنابراین اطلاع دقیق از شرایط آب و هوایی برای انجام این تحقیق امری ضروری می‌باشد بر این اساس در جدول ۱ گزارش اداره هواشناسی در روزهای برداشت محصول آورده شده است. در این تحقیق از مقادیر رطوبت هوا در این جدول استفاده شده است.

جدول ۱- گزارش اداره تحقیقات هواشناسی جهاد کشاورزی اردبیل (مغان) در روزهای برداشت محصول

Table 1- Report of Meteorological Researches Center of Ardabil Agriculture Jahad (Moghan) on harvesting days

گزارش هواشناسی در ۱۴ آبان ۱۳۹۶ Report of Meteorological on Nov. 5, 2017		
رطوبت نسبی هوا در طول روز Air relative humidity during the day (%)	دمای هوا در بازه برداشت Harvesting temperature during the day (˚C)	ساعات برداشت در طول روز Harvesting times during the day
80-93	12-15	T_1: (8-10)
67-78	17-20	T_2: (11-13)
43-61	18-21	T_3: (14-16)
گزارش هواشناسی در ۱۷ آبان ۱۳۹۶ Report of Meteorological on Nov. 8, 2017		
رطوبت نسبی هوا در طول روز Air relative humidity during the day (%)	دمای هوا در بازه برداشت Harvesting temperature during the day (˚C)	ساعات برداشت در طول روز Time of harvesting during the day
79-92	9-12	T_1: (8-10)
57-69	17-21	T_2: (11-13)
44-53	21-24	T_3: (14-16)
گزارش هواشناسی در ۲۰ آبان ۱۳۹۶ Report of Meteorological on Nov. 11, 2017		
رطوبت نسبی هوا در طول روز Air relative humidity during the day (%)	دمای هوا در بازه برداشت Harvesting temperature during the day (˚C)	ساعات برداشت در طول روز Time of harvesting during the day
84-93	12-14	T_1: (8-10)
69-76	16-17	T_2: (11-13)
67-70	15-19	T_3: (14-16)

به‌منظور تعیین مناسب ترین زمان برداشت، تلفات کمباین غلات مدل جاندیر ۱۱۶۵ مجهز به هد برداشت ذرت در سه زمان مختلف برداشت در طول روز [T_1 (زمان اول) از ساعت ۱۰- ۸، T_2 (زمان دوم) از ساعت ۱۳- ۱۱ و T_3 (زمان سوم) از ساعت ۱۶-۱۴] و در تاریخ‌های ۱۴، ۱۷ و ۲۰ آبان ماه سال ۱۳۹۶ با سه تکرار اندازه‌گیری شد. تحقیق حاضر در قالب طرح کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک-های کامل تصادفی و در سه تکرار اجرا گردید. با توجه به این‌که زمان برداشت برای محدوده‌های صبح، ظهر و بعدازظهر در نظر گرفته شده بود این بازه‌ها به‌عنوان نماینده صبح، ظهر و بعد از ظهر در طول روز تعیین شدند. به‌عنوان مثال در بازه زمانی صبح قبل از ساعت ۸ امکان برداشت به‌دلیل وجود رطوبت شبنم روی محصول میسر نیست. از ۸ الی ۱۱ را می‌توان به‌عنوان بازه صبح در نظر گرفت اما در بازه ۱۰ تا ۱۱ هم‌پوشانی بسیار زیادی بین تلفات اندازه‌گیری شده در مقاطع زمانی صبح و ظهر مشاهده شد. بنابراین این فاصله زمانی در مقاطع صبح و ظهر صرف‌نظر شد. همین‌طور از بازه زمانی ۱۳ الی ۱۴ بین ظهر و بعدازظهر نیز بدین منوال صرف‌نظر گردید. در ضمن برای شروع برداشت در مزرعه ضروری است که رطوبت محصول در بازه بین ۲۰ الی ۳۰ درصد باشد. اندازه کرت‌ها متناسب با عرض کمباین (۴/۵متر) در طول ۱۲ متر معادل با ۵۴ مترمربع و فاصله بین کرت‌ها دو متر بود. تلفات دانه در هر کرت با استفاده از دستورالعمل اندازه‌گیری تلفات در قسمت‌های مختلف کمباین اندازه‌گیری شد که این دستورالعمل توسط موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج برگرفته از روش اندازه‌گیری پرایس (Price, 1997) توصیه شده است. در این اندازه‌گیری‌ها سرعت پیشروی کمباین بین ۴/۱-۴ کیلومتر بر ساعت، دور کوبنده حین برداشت محصول بین ۴۵۰ -۴۰۰ دور در دقیقه تنظیم شد. تراکم محصول ۷۵ هزار بوته در هکتار و عملکرد مزرعه‌ای محصول بعد از اتمام عملیات برداشت کل مزرعه توسط کمباین، ۶/۸۷ تن در هکتار اندازه‌گیری شد. تلفات قبل از برداشت (تلفات طبیعی) شامل دانه‌ها و بلال‌هایی است که از بوته‌های ایستاده جدا شده و روی زمین افتاده‌اند. با جمع‌آوری این بلال‌ها و

دانه‌ها در سه کرت به‌صورت تصادفی و توزین آنها، مقدار این تلفات در مزرعه مورد مطالعه محاسبه شد. تلفات واحد جمع‌آوری (تلفات سکوی برش) شامل تمام دانه‌ها و بلال‌های است که در اثر عملکرد هد کمباین در طی برداشت روی زمین ریخته شده و از دسترس خارج می‌شود که در اثر عواملی چون سرعت، عملکرد غلتک‌های کشنده، رطوبت بوته، ارتفاع برش و سرعت پیشروی پیش می‌آید. برای اندازه‌گیری آن تمام دانه‌ها و بلال‌های هر کرت را بعد از اتمام برداشت جمع‌آوری کرده و توزین می‌کنند. تلفات واحد فرآوری شامل بلال‌های کوبیده نشده و نیم‌کوب می‌باشد که در قاب چوبی به ابعاد ۷۵×۵۰ سانتی‌متر مربع در زیر کمباین مابین دو چرخ عقب ریخته شده است بر این اساس کل تلفات در برداشت مستقیم با کمباین به‌صورت رابطه (۱) محاسبه خواهد شد.

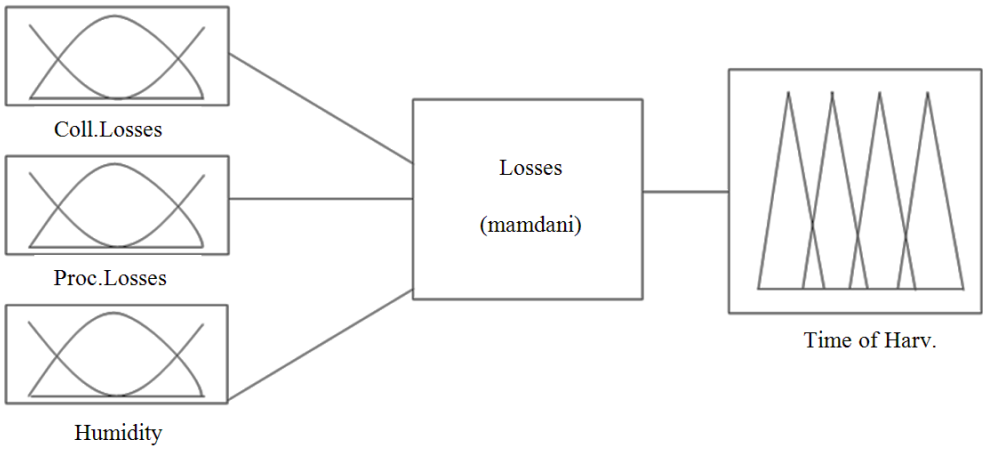
درصد تلفات کل کمباین = درصد تلفات واحد فرآوری + درصد تلفات واحد جمع‌آوری (۱)

بعد از اندازه‌گیری درصد تلفات در واحدهای جمع‌آوری و فرآوری تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطوح احتمال معنی‌دار توسط نرم‌افزار (SAS) و رسم نمودارها با نرم‌افزار EXCEL انجام گرفت.

پیاده‌سازی سیستم فازی

اکثر تحقیقات در مورد زمان برداشت براساس اطلاعات هواشناسی و رطوبت محصول انجام گرفته است در حالی‌که در مدل پیشنهادی علاوه بر این‌که اطلاعات هواشناسی و رطوبت محصول در زمان برداشت لحاظ شده است از داده‌های اولیه کمباین ذرت (تلفات واحدهای فرآوری و جمع‌آوری) نیز استفاده می‌شود. روند کار به این صورت است که ابتدا مجوز لازم برای حضور کمباین در مزرعه با توجه به داده‌های هواشناسی و رطوبت محصول صادر می‌شود و سپس کمباین در یک سطح کوچکی از مزرعه عملیات برداشت را انجام می‌دهد در نهایت با توجه به خروجی سیستم فازی طراحی شده مجوز ادامه برداشت را اخذ می‌کند و یا از ادامه برداشت ممانعت به‌عمل می‌آید. در صورت ممانعت از برداشت، کمباین به مزرعه مجاور منتقل می‌شود و در صورت کسب مجوز لازم به برداشت محصول مبادرت می‌ورزد.

در این تحقیق با توجه به تاثیر تاریخ برداشت، زمان برداشت در طول روز و در نهایت رطوبت هوا در میزان تلفات کمباین ذرت، اقدام به پیاده‌سازی یک سیستم فازی برای پیش‌بینی بهترین زمان برداشت براساس میزان تلفات واحد فرآوری، واحد جمع‌آوری و درصد رطوبت هوا گردید. در این سیستم سه پارامتر درصد تلفات واحد فرآوری، درصد تلفات واحد جمع‌آوری و درصد رطوبت هوا به‌عنوان ورودی سیستم و مناسب‌ترین زمان برداشت ذرت به‌عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته شدند. برای تعیین زمان برداشت ذرت از ابزار FIS (Fuzzy Inference System) در نرم‌افزار متلب ورژن R2013a استفاده شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم شامل سه ورودی و یک خروجی می‌باشد.

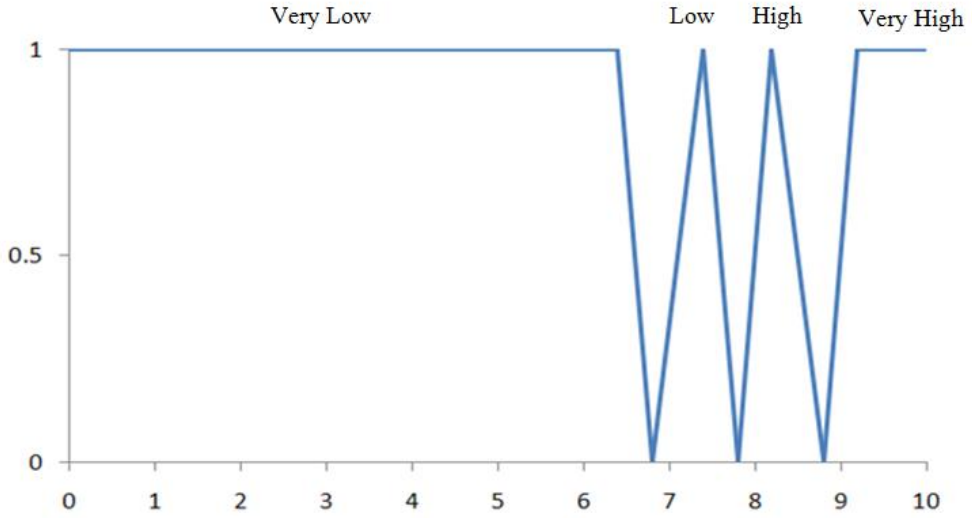


شکل ۱– مدل ایجاد شده توسط سیستم فازی خبره برای تعیین زمان برداشت ذرت

Fig.1. Generic model of expert fuzzy system to determine corn harvesting time

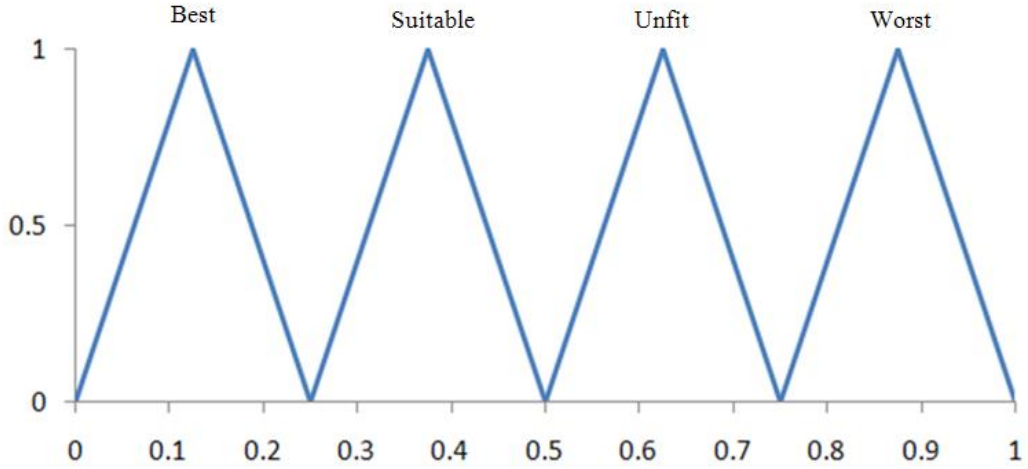
چهار گروه متغیر زبانی به هرکدام از پارامترهای ورودی (Very low, Low, High and Very high) و چهار گروه متغیر زبانی به خروجی (Best, Suitable, Unfit and Worst) اختصاص داده شد. برای متغیرهای زبانی ورودی و خروجی، توابع تعلق مثلثی و ذوزنقه‌ای به‌کار گرفته شدند (شکل‌های ۲ و ۳). در این تحقیق مقادیر ورودی نرمال‌سازی نشده است و از مقادیر تلفات و رطوبت محیط به‌صورت درصد استفاده شده است. دلیل این کار استفاده از مقادیر واقعی کمینه و بیشینه تلفات واحدهای جمع‌آوری و فرآوری از طریق داده‌های

تجربی و آماری ذکر شده در بخش‌های بعدی این تحقیق می‌باشد. در خروجی سیستم فازی (زمان برداشت) بازه بین صفر و یک به متغیرهای زبانی اختصاص یافت و این بازه به چهار قسمت مساوی با پله‌های ۰/۲۵ تقسیم شد. به عبارتی دیگر بازه بین صفر و ۰/۲۵ برای بهترین زمان برداشت (Best) و مابقی به همین ترتیب به متغیرهای بعدی اختصاص یافت. در ورودی‌ها برای متغیرهای Very low و Very high از توابع تعلق ذوزنقه‌ای و برای مابقی از توابع مثلثی استفاده شد (شکل ۲). در خروجی از توابع مثلثی استفاده شده است (شکل ۳).



شکل ۲- تابع عضویت برای ورودی تلفات واحد جمع‌آوری

Fig.2. Membership function for collecting unit losses input



شکل ۳- تابع عضویت برای خروجی زمان برداشت

Fig.3. Membership function for harvesting time output

با توجه به این‌که میانگین مقدار کمینه تلفات واحد جمع‌آوری ۶/۸۷ درصد و بیشینه آن ۸/۴۷ درصد محاسبه شده است (جدول ۳). بر این اساس تلفات کمتر از مقدار کمینه به‌عنوان تلفات خیلی کم (Very low) و تلفات بیشتر از مقدار بیشینه به‌عنوان تلفات خیلی زیاد (Very high) برای سیستم فازی طراحی شده اختصاص یافته است. بازه بین این دو مقدار نیز به دو فاصله مساوی تقسیم شده و برای متغیرهای زبانی تلفات کم (Low) و تلفات زیاد (High) اختصاص می‌یابند. مطابق با این روش، بازه‌های عددی مربوط به متغیرهای زبانی تلفات واحد فرآوری (میانگین مقدار کمینه تلفات واحد فرآوری ۳/۱۸ درصد و بیشینه آن ۴/۸۷ درصد) و درصد رطوبت هوا نیز مطابق

جدول ۱ (کمینه رطوبت هوا ۴۳ درصد و بیشینه آن ۹۲ درصد) اختصاص پیدا می‌کنند (شکل ۲). برای ایجاد سیستم فازی از موتور استنتاج ضرب با فازی‌ساز منفرد (singleton) و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز (Center Average Defuzzifier) استفاده شده است. در موتور استنتاج ضرب از استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با ترکیب اجتماع، استلزام حاصل‌ضرب ممدانی استفاده شده است. براین اساس موتور استنتاج می‌تواند به‌صورت رابطه (۲) نمایش داده شود (Laviolette and Seaman, 1994).

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^{M}\left[\sup\left(\mu_{A'}(x)\right)\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^l}(x_i)\mu_{B^l}(y)\right] \quad (۲)$$

که در آن M تعداد ترکیب‌های خروجی جداگانه مجموعه فازی، $\mu_{A'}$ ورودی موتور استنتاج ضرب و $\mu_{B'}$ به‌عنوان خروجی می‌باشد. در این پژوهش از غیرفازی‌ساز میانگین مراکز که به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود، استفاده شده است

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^{M} y^{-1} w_l}{\sum_{l=1}^{M} w_l} \quad (۳)$$

در این رابطه y مرکز مجموعه فازی و w_l درجه ارتفاع آن می‌باشد (Laviolette and Seaman, 1994). در نهایت خروجی سیستم فازی از رابطه (۴) قابل تعیین است :

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^{M} y^{-l}\left(\prod_{i=1}^{l}\mu_{A_i^l}(x_i)\right)}{\sum_{l=1}^{M}\left(\prod_{i=1}^{l}\mu_{A_i^l}(x_i)\right)} \quad (۴)$$

که $X \in U$ ورودی سیستم فازی و $f(x) \in V$ خروجی سیستم فازی می‌باشد. سیستم استنتاج فازی بر اساس قواعد اگر- آن‌گاه بنا نهاده شده است، به طوری‌که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان ارتباط بین ورودی و خروجی را به‌دست آورد. براساس این روابط شصت و چهار قانون فازی با عملگر منطقی AND، به خدمت گرفته شدند تا یک سیستم خبره موثر فازی برای تصمیم‌گیری در مورد زمان برداشت ذرت ایجاد گردد. قوانین فازی به کمک افراد خبره و باتجربه از کشاورزان و کمباین‌داران در منطقه مغان تنظیم و در سیستم فازی طراحی شده وارد شدند. تعداد پنج مورد از این قوانین در ادامه آورده شده است.

1. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is VeryLow) and (Humidity is VeryLow) then (TimeofHarv. is Best)
2. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is VeryLow) and (Humidity is Low) then (TimeofHarv. is Best)
3. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is VeryLow) and (Humidity is High) then (TimeofHarv. is Suitable)
4. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is VeryLow) and (Humidity is VeryHigh) then (TimeofHarv. is Unfit)
5. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is Low) and (Humidity is VeryLow) then (TimeofHarv. is Best)
6. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is Low) and (Humidity is Low) then (TimeofHarv. is Suitable)
7. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is Low) and (Humidity is High) then (TimeofHarv. is Unfit)
8. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is Low) and (Humidity is VeryHigh) then (TimeofHarv. is Unfit)
9. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is High) and (Humidity is VeryLow) then (TimeofHarv. is Suitable)
10. If (Coll.Losses is VeryLow) and (Proc.Losses is High) and (Humidity is Low) then (TimeofHarv. is Suitable)

که در آن‌ها Coll.Losses تلفات جمع‌آوری، Proc.Losses تلفات فرآوری، Humidity درصد رطوبت و TimeofHarv زمان برداشت را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در قانون اول اگر تلفات جمع‌آوری و فرآوری و درصد رطوبت بسیار پایین باشند آن‌گاه زمان مورد نظر بهترین زمان برداشت خواهد بود.

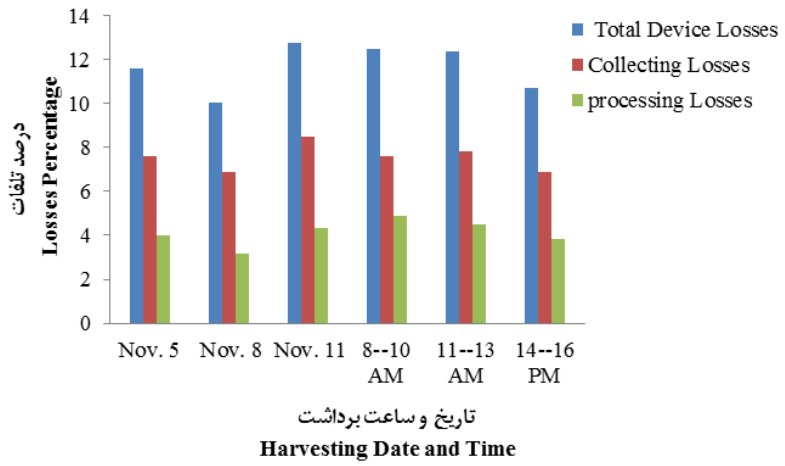
نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری تلفات ناشی از اثر زمان برداشت ذرت

با اندازه‌گیری پارامترهای مذکور (تلفات جمع‌آوری و تلفات فرآوری)، داده‌های آزمایش برای تجزیه و تحلیل به‌دست آمد. نمودار میله‌ای داده‌های اندازه‌گیری شده به عبارتی میانگین درصد تلفات اندازه‌گیری شده در سه تکرار در تاریخ‌های برداشت و ساعات برداشت در طول روز در شکل ۴ آورده شده است.

نتایج تجزیه واریانس تاریخ‌های برداشت و ساعات برداشت در طول روز بر تلفات واحد جمع‌آوری و واحد فرآوری کمباین در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که بین تاریخ‌های برداشت اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد و بین ساعات برداشت در طول روز اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ وجود دارد. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که تاریخ‌های برداشت و ساعات برداشت در طول روز در میزان تلفات کمباین ذرت تاثیرگذار می‌باشند اما اثر متقابل آنها بر میزان تلفات معنی‌دار نیست. بر این اساس مقایسه میانگین تلفات واحدهای فرآوری و جمع‌آوری با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است



شکل ٤– نمودار میانگین درصد تلفات در تاریخ‌های برداشت و ساعات برداشت در طول روز

Fig.4. Means diagram of losses percentage at harvesting dates and times during the day

جدول ۲– تجزیه واریانس تاریخ‌های برداشت و ساعات برداشت در طول روز بر تلفات واحد جمع‌آوری و واحد فرآوری کمباین

Table 2- Variance analysis of harvesting dates and times on collecting and processing device losses

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean Squares) تلفات واحد جمع‌آوری Collecting losses	 تلفات واحد فرآوری Processing losses
تاریخ‌های برداشت Harvesting dates (A)	2	18.25*	11.22*
ساعات برداشت در طول روز Harvesting times (B)	2	58.88**	121.61**
اثر متقابل Interaction (AB)	4	7.05ns	5.63ns
خطای A (Error A)	4	3.13	1.81
خطای کل (Total Error)	12		

ns عدم تفاوت معنی‌دار * تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ ** تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪

** Significant at 1% of probability level, * Significant at 5% of probability level, ns: not Significant

جدول ۳– مقایسه میانگین تلفات واحدهای فرآوری و جمع‌آوری با آزمون دانکن

Table 3- Compare means of collecting and processing losses by Duncan test

تیمارها Treatments		درصد تلفات واحد فرآوری Collecting losses (%)	درصد تلفات واحد جمع‌آوری Processing losses (%)	درصد تلفات کل کمباین Total losses (%)
تاریخ‌های برداشت Harvesting dates	Nov. 5	4.02 b	7.58 b	11.6 b
	Nov. 8	3.18 a	6.87 a	10.05 a
	Nov. 11	4.31 bc	8.47 c	12.78 c
ساعات برداشت در طول روز Harvesting times during the day	8–10	4.87 c	7.59 b	12.46 c
	11–13	4.52 bc	7.84 bc	12.36 bc
	14–16	3.82 a	6.88 a	10.7 a

حروف متفاوت در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.

Different letters within the same column indicate significant difference (P< 0.05)

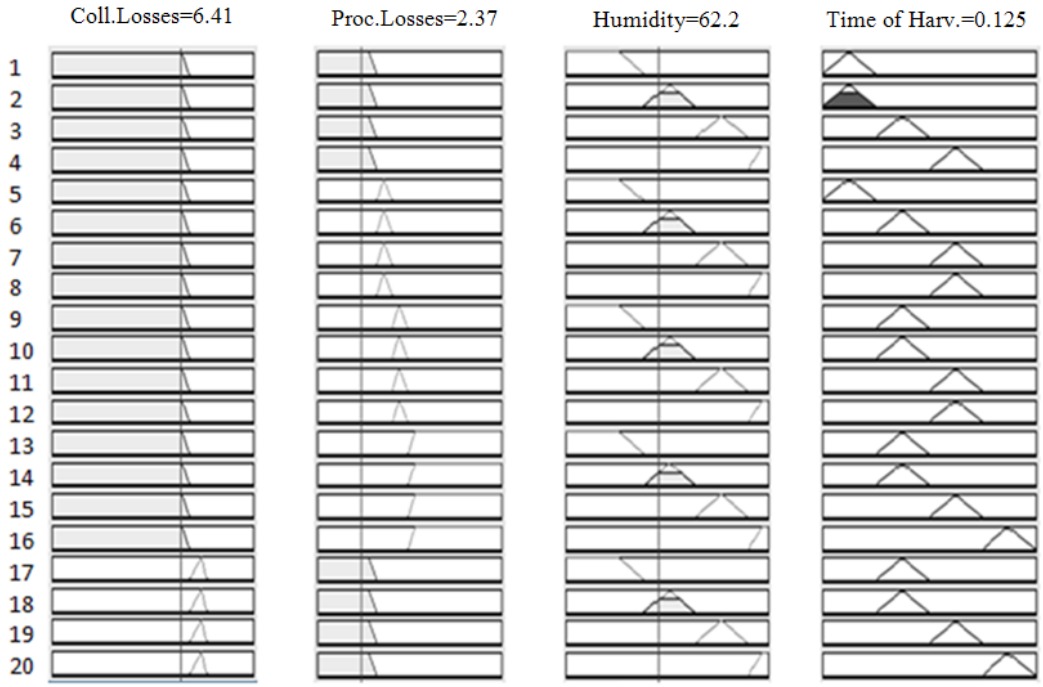
طبق این جدول در بین تاریخ‌های برداشت کمترین تلفات کل کمباین در تاریخ ۱۷ آبان ماه ۱۰/۰۵٪ (۶۹۰/۴ کیلوگرم در هکتار) می‌باشد که از این مقدار ۶/۸۷٪ (۴۷۲ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد جمع‌آوری (هد) و ۳/۱۸٪ (۲۱۸/۵ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد فرآوری می‌باشد. که با گزارش‌های دفتر طرح ذرت مطابقت دارد (حداقل تلفات کمباین‌های کشور ۱۰ درصد می‌باشد) (Mostofi Sarkari, 2011). بیشترین تلفات مربوط به ۲۰ آبان به مقدار ۱۲/۷۸٪ (۸۷۸ کیلوگرم در هکتار) بوده که از این مقدار ۸/۴۷٪ (۵۸۲ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد جمع‌آوری (هد) و ۴/۳۱٪ (۲۹۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد فرآوری است. در بررسی تاثیر سه زمان مختلف برداشت در طول روز بر مقدار تلفات ماشین اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بین زمان‌های برداشت در طول روز در T_1، T_2 و T_3 مشاهده گردید و با توجه به داده‌های به‌دست آمده، بیشترین تلفات مربوط به T_1 (۸–۱۲) به مقدار ۱۲/۴۶٪ (۸۵۶ کیلوگرم درهکتار) که از این مقدار ۷/۵۹٪ (۵۲۱ کیلوگرم درهکتار) مربوط به تلفات واحد جمع‌آوری (هد) و ۴/۸۷٪ (۳۳۵ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد فرآوری است. از دلایل افزایش تلفات در این بازه بالا بودن درصد رطوبت نسبی هوا و کاهش دمای هوا طبق گزارش ایستگاه هواشناسی مرکز تحقیقات کشاورزی مغان می‌باشد (جدول ۱). این موضوع باعث افزایش رطوبت محصول حین برداشت می‌شود و مشاهده شد که ساقه‌ها به دلیل ترد بودن به‌صورت ناگهانی قطع شده و بلال به بیرون از دماغه پرتاب می‌شود و در نتیجه تلفات محصول افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج تحقیقی که توسط راهاما و همکاران انجام گرفت مطابقت دارد به‌طوری‌که آن‌ها پارامترهای سرعت پیشروی، سرعت محیطی کوبنده، فاصله سیلندر و زیر سیلندری، اندازهٔ روزنهٔ الک‌ها، سرعت پروانه باد و رطوبت را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها هم‌چنین تلفات پلاتفرم، تلفات خرمن‌کوب، جداکننده و تمیزکننده را اندازه‌گیری نموده و میانگین تلفات را ۱۲ درصد گزارش کرده‌اند (Rahama *et al.*, 1997).

تلفات برداشت در T_3 (۱۴–۱۶) کمترین مقدار (۱۰/۷٪ (۷۳۵ کیلوگرم در هکتار)) را نشان می‌دهد به‌طوری‌که از این مقدار ۶/۸۸٪ (۴۷۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد جمع‌آوری (هد) و ۳/۸۲٪ (۲۶۲ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تلفات واحد فرآوری است. از دلایل کاهش تلفات در این بازه زمانی از طول روز می‌توان به افزایش دمای هوا و کاهش رطوبت هوا اشاره کرد (جدول ۱). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که تلفات برداشت به شدت متاثر از شرایط آب و هوایی است (DeToro *et al.*, 2012; Nazmi *et al.*, 2010). با وجود این در منطقه مغان کشت ذرت در کشت و صنعت‌های مختلف در سطح وسیعی انجام می‌گیرد و رطوبت محصول قابل برداشت در نواحی مختلف در یک کشت صنعت واحد متغیر می‌باشد. بر این اساس در این تحقیق برای انتخاب محل مناسب برداشت از پارامترهای درصد رطوبت هوا و میزان تلفات کمباین در سطح کوچکی از مزرعه استفاده می‌شود. به عبارت دیگر ابتدا کمباین مجوز لازم برای حضور در مزرعه را از روی داده‌های هواشناسی دریافت می‌کند سپس کمباین در یک سطح کوچکی از مزرعه عملیات برداشت را انجام می‌دهد و تلفات مورد نظر در آن سطح اندازه‌گیری می‌شوند. این میزان تلفات در سیستم فازی وارد شده و مجوز برداشت صادر می‌گردد. این کار دو مزیت را در پی خواهد داشت اولاً ترتیب برداشت مزرعه‌های مختلف در یک کشت و صنعت واحد (با شرایط آب و هوایی و کاشت یکسان) تعیین می‌شود ثانیاً تلفات کمباین‌های فرسوده موجود در کشت و صنعت‌های مغان بعلت برداشت در زمان مناسب به حداقل مقدار ممکن می‌رسد زیرا به‌طور عمومی اکثر کمباین‌ها در این منطقه تلفاتی بیش از ۱۰ درصد دارند (Mostofi Sarkari, 2011). در حالی‌که در تحقیق انجام گرفته در کشور برزیل حداکثر تلفات کمباین ذرت ۳/۶ درصد گزارش شده است (Paulsen *et al.*, 2014). دلیل اصلی این تناقض فرسودگی اکثر کمباین‌های موجود در منطقه مغان می‌باشد به‌طوری‌که در کشور برزیل از کمباین‌های پیشرفته و مجهز به سیستم‌های کنترل اتوماتیک برای جلوگیری از تلفات دانه در واحد جمع‌آوری و واحد فرآوری آنها استفاده می‌شود.

تحلیل نتایج سیستم فازی طراحی شده

بعد از پیاده‌سازی سیستم فازی مطابق موارد ذکر شده در بخش‌های بالایی، می‌توان از این سیستم برای پیش‌بینی بهترین زمان برداشت ذرت استفاده نمود. در این بخش ابتدا مدل شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس سیستم فازی طراحی شده با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

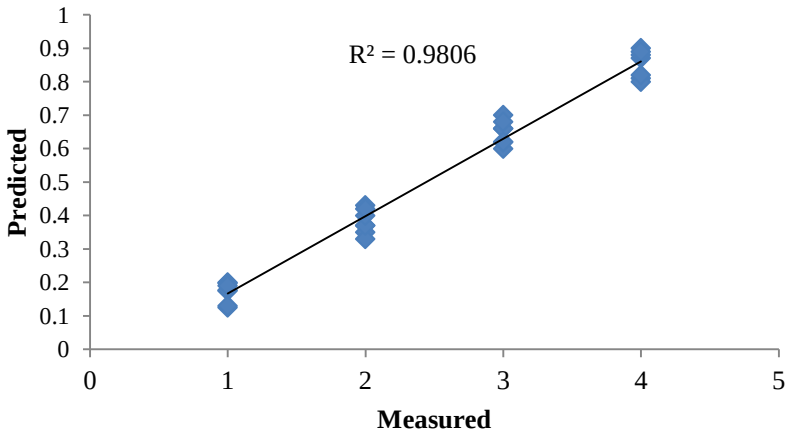
به‌طوری‌که در مدل شبیه‌سازی فازی مشاهده می‌شود (شکل ۵) می‌توان با وارد کردن مقادیر تلفات واحد فرآوری و واحد جمع‌آوری و درصد رطوبت محیط، مناسب بودن یا عدم مناسب بودن زمان برداشت ذرت را پیش‌بینی نمود. این شکل بهترین زمان برداشت (Time of harv.=0.125) را مطابق با داده‌های وارد شده برای تلفات و رطوبت هوا نشان می‌دهد به عبارت دیگر بازه بین صفر و ۰/۲۵ در خروجی به بهترین زمان برداشت (Best) اختصاص یافته است.



شکل ۵– مدل شبیه‌سازی سیستم فازی طراحی شده

Fig.5. Simulation model of the fuzzy system designed

نتایج پیش‌بینی با استفاده از سیستم خبره فازی مقادیر بسیار نزدیکی را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد. ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده زمان برداشت ذرت در شرایط کاری مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. ضریب تبیین مدل بین زمان برداشت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط سیستم فازی ۰/۹۸ به‌دست آمد. مقدار بسیار نزدیک به ۱ برای این ضریب نشانگر همبستگی زیاد بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده است و این موضوع را بیان می‌کند که سیستم فازی طراحی شده با دقت بالایی زمان برداشت ذرت پیش‌بینی می‌کند. در محور افقی این نمودار عدد یک بهترین زمان برداشت (Best)، عدد دو مناسب بودن زمان برداشت (Suitable)، عدد سه نامناسب بودن زمان برداشت (Unfit) و عدد چهار بدترین زمان برداشت (Worst) را نشان می‌دهند که توسط داده‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده‌اند. در محور عمودی بازه بین ۰–۰/۲۵ بهترین زمان برداشت، بازه بین ۰/۲۵–۰/۵ مناسب بودن زمان برداشت، بازه بین ۰/۵–۰/۷۵ نامناسب بودن زمان برداشت و ۰/۷۵–۱ بدترین زمان برداشت را نشان می‌دهند که توسط سیستم فازی پیش‌بینی شده اند.



شکل ٦– رابطه بین زمان برداشت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط سیستم فازی

Fig.6. Relationship between measured and predicted harvesting time by fuzzy logic system

برای تست و ارزیابی سیستم فازی طراحی شده از همان داده‌های مزرعه‌ای در تاریخ‌ها و زمان‌های مشخص در بخش قبلی این تحقیق (تلفات اندازه‌گیری شده) استفاده شد و خروجی سیستم فازی به‌عنوان مقادیر پیش‌بینی شده در نظر گرفته شد. که نمونه‌ای از این داده‌ها در جدول ۴ آورده شده است. بدین صورت که با وارد کردن درصد تلفات فرآوری و جمع‌آوری محاسبه شده در مزرعه و نیز رطوبت هوا خروجی سیستم فازی مطابق با جدول ۴ مناسب و یا نامناسب بودن زمان برداشت را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در این جدول بخشی از خروجی سیستم فازی نشان داده شده است. به‌عبارتی دیگر می‌توان هر مقدار تلفات واحدهای فرآوری و جمع‌آوری را به همراه درصد رطوبت هوا در سیستم فازی طراحی شده وارد نمود و زمان برداشت ذرت را پیش‌بینی کرد.

جدول ٤- پیش‌بینی زمان برداشت ذرت با استفاده از سیستم فازی طراحی شده

Table 4- Prediction of corn harvesting time using the fuzzy system designed

زمان برداشت (Harvesting time) تاریخ برداشت (Harvesting date)	8-10 AM	11-13 AM	14-16 PM
۱۴ آبان Nov. 5	Worst	Unfit	Suitable
۱۷ آبان Nov. 8	Worst	Suitable	Best
۲۰ آبان Nov. 11	Worst	Unfit	Suitable

این جدول بیانگر این موضوع می‌باشد که بهترین زمان برداشت محصول در روز ۱۷ آبان در ساعت ۱۴ الی ۱۶ می‌باشد. به عبارتی در زمانی‌که تلفات واحد فرآوری کمتر از ۳/۱۸ و تلفات واحد جمع‌آوری کمتر از ۶/۸۷ درصد و رطوبت بین ۴۴ الی ۵۳ درصد باشد بهترین زمان برداشت محصول (Best) خواهد بود. همچنین این جدول نشان می‌دهد که تاریخ ۱۷ آبان و ساعات ۱۳-۱۱ و تاریخ‌های ۱۴ و ۲۰ آبان و ساعات ۱۴ الی ۱۶ زمان مناسب برداشت (Suitable) می‌باشند. در کلیه روزهای برداشت، ساعت ۸ الی ۱۰ بدترین زمان برداشت پیش‌بینی شده است. این موضوع به دلیل بالا بودن درصد رطوبت نسبی هوا و کاهش دمای هوا در این بازه زمانی (مطابق جدول ۱) می‌باشد که باعث افزایش رطوبت محصول حین برداشت شده و موجب قطع ناگهانی ساقه و پرتاب بلال به بیرون از دماغه می‌شود. بنابراین تلفات برداشت افزایش می‌یابد. این نتیجه‌گیری با نتایج تجزیه و تحلیل آماری در بخش‌های بالا نیز مطابقت کامل دارد. در ضمن قابل ذکر است که در اوایل فصل برداشت بهتر است برداشت در ساعات اولیه صبح صورت نگیرد ولی در اواخر دوره به دلیل خشک شدن بیش از حد محصول برداشت در این ساعات توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی مشاهدات میدانی و تجربی طرح، می‌توان نتیجه گرفت که در برداشت ذرت در منطقه مغان میزان رطوبت، تاریخ و ساعت برداشت در روز از جمله عواملی هستند که در میزان تلفات محصول هنگام برداشت تاثیرگذار هستند. جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که بین تاریخ‌های برداشت اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد و بین ساعات برداشت در طول روز اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ وجود دارد. با توجه به مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن، بهترین تاریخ برداشت ذرت در منطقه مغان، ۱۷ آبان ماه و بهترین زمان برداشت، بین ساعات ۱۶- ۱۴ بعدازظهر با دمای ۲۴-۲۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی۵۳٪-۴۴٪ می‌باشد. میزان تلفات در زمان مذکور ۱۰/۰۵ درصد اندازه‌گیری شد به‌طوری‌که با حداقل تلفات گزارش شده توسط دفتر طرح ذرت (۱۰ درصد) مطابقت دارد.

در ادامه تحقیق با توجه به تاثیر تاریخ برداشت، زمان برداشت در طول روز و در نهایت رطوبت هوا در میزان تلفات برداشت، برای پیش‌بینی بهترین زمان برداشت براساس میزان تلفات واحد فرآوری، واحد جمع‌آوری و درصد رطوبت هوا اقدام به پیاده‌سازی یک سیستم فازی گردید. به‌طوری‌که با اندازه‌گیری تلفات مذکور در یک سطح کوچکی از مزرعه و رطوبت هوا به‌عنوان ورودی سیستم فازی می‌توان زمان مناسب برداشت ذرت را پیش‌بینی نمود. نتایج پیش‌بینی با استفاده از سیستم خبره فازی مقادیر بسیار نزدیکی را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد. به طوری‌که ضریب تبیین مدل برای پیش‌بینی زمان برداشت ذرت ۰/۹۸ به‌دست آمد. این ضریب نشانگر همبستگی زیاد بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده است و این موضوع را بیان می‌کند که سیستم فازی طراحی شده با دقت بالایی زمان برداشت ذرت را پیش‌بینی می‌کند.

References

1. Craessaerts, G., J. De Baerdemaeker, B. Missotten, and W. Saeys. 2009. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester. Biosystems Engineering 106: 103-111.
2. FAO statistics. 2015. The Food and Agriculture Organization statistics: Corp, Maize, production quantity, Available at: http://www.fao.org/faostat/en/#data/ QC.
3. Humburg, D. 2016. Combine Adjustments to Reduce Harvest Losses. Chapter 37 in Clay, D.E., C.G. Carlson, S.A. Clay, and E. Byamukama eds. Best Management Practices. South Dakota State University.
4. DeToro, A., G. Gunnarsson, G. Lundin, and N. Jonsson. 2012. Cereal harvesting strategies and costs under variable weather conditions. Biosystem Engineering 3: 429-439.
5. Karatalopoulos, S. V. 2000. Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic- Basic Concepts and Applications. Prentice Hall, New-Delhi, India.
6. Kordi, S. 2012. Effects of urea foliar application, harvesting time and seed drying methods on agronomical traits and seed quality of corn in Khorramabad conditions. Faculty of agriculture. Ilam University, Ilam, Iran. (In Farsi).
7. Laviolette, M. and J. W. Seaman. 1994. The efficiency of fuzzy representations of uncertainty. IEEE Trans. Fuzzy Systems 2: 4-15.
8. Mostofi Sarkari M. R. 2011. Investigation & determination of corn combine harvester losses to introduce an appropriate methods to reduce losses. Journal of Agricultural Machinery Engineering 1(1): 10-16. (In Farsi).
9. Mostofi Sarkari M. R., M. S Valiahdi, and I. Ranjbar. 2014. Field Evaluation of Cereal Combine Harvesters Processing Losses on JD-955 and JD-1165 Combines Equipped with Grain Loss Monitor. Journal of Agricultural Machinery 4 (2): 335-343. (In Farsi).
10. Nazmi, M.W., G. Chen, and D. Zare. 2010. The effect of different climatic conditions on wheat harvesting strategy and return. Biosystems Engineering 106: 493-502.
11. Omid, M., M. Lashgari, H. Mobli, R. Alimardani, S. Mohtasebi, and R. Hesamifard. 2010. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester. Expert Systems with Applications 37: 7080-7085.
12. Paulsen, M. R., F. D. A. D. C. Pinto, D. G. De Sena, R. S. Zandonadi, S. Ruffato, A. G. Costa, and M. G. C. Danao. 2014. Measurement of combine losses for corn and soybeans in Brazil. Applied Engineering in Agriculture 30 (6): 841-855.
13. Price, T. 1997. Growing dryland maize, Agricultural Extention Office, Northern Territory, Australia.
14. Prochnow, A., H. Risius, T. Hoffmann, and F. M. Chmielewski. 2015. Does climate change affect period, available field time and required capacities for grain harvesting in Brandenburg, Germany? Agricultural and Forest Meteorology 203 (0): 43e53
15. Rahama A. M., M. E. Ali, and M. I. Dawel Beit. 1997. On-farm evaluation of combine harvester losses in the Gezira Scheme in Sudan. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 28 (2): 23-26.
16. Ross, J. T. 1995. Fuzzy Logic with engineering applications. New York: McGraw Hill Inc.
17. Shauck, T. C., and R. J. Smeda. 2011. Factors Influencing Corn Harvest Losses in Missouri. Crop Management. Online. 10.1094/CM-2011-0926-01-RS. Available at: www.plantmanagementnetwork.org/cm/
18. Shay C., L.V. Ellis, and W. Hires. 1999. Measuring and Reducing Corn Harvesting Losses, Department of Agricultural Engineering, University of Missouri-Columbia.
19. Spengler A., S. Memleben. 2003. Combine harvesting at large scale enterprises in Europe. Proceedings of the international conference on crop harvesting and processing. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). Pub. # 701P1103e. Louisville, Kentucky, USA.
20. Suleiman, A. R. 2015. Current Maize Production, Post-harvest Losses and the Risk of Mycotoxins Contamination in Tanzania. An ASABE Meeting Presentation, 26e29, 2015. Paper No. 152189434. ABSAE, St. Joseph MO, USA.
21. Tolera, A., F. Sundstøl, and A. N. Said. 1998. The effect of stage of maturity on yield and quality of maize grain and stover. Animal Feed Science and Technology 75 (2): 157-168.
22. Wang, L. X. 1997. A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 229-240

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۴۰-۲۲۹

The Effect of Harvesting Time in Moghan on Corn Losses and its Prediction using Fuzzy Logic

M. Abbasgholipour[1*]

Received: 05-06-2018
Accepted: 08-01-2019

Introduction

Corn harvest losses are imposed by several factors, the most important of which is harvesting-time. Since the harvesting-time is coincident with the rainy season, it is necessary to appropriately estimate the corn harvest time to avoid harvesting losses and losing the next cultivation. Accordingly, in the current research, the effect of harvesting-time on corn losses during the month and the day has been into consideration. An expert fuzzy system was designed to predict the best harvest time as it operates based on the losses amounts which are measured in processing and collection units into the combine, and losses due to the humidity percentage.

Materials and Methods

In this paper, corn harvest losses in a John Deere Combine, Model 1165, was studied in a different climatic circumstance in Moghan region. Moreover, a split plot experiment in a completely randomized block design was conducted with three replications. The losses data were collected from the processing and collection units of the combine harvester on the November 5th, 8th and 11th, 2017, in three different daily times of 8-10, 11-13 and 14-16 with three replications. The Mamdani fuzzy inference system with singleton fuzzifire and center average defuzzifire was used to develop a fuzzy expert system. In the designed expert system, the losses percentage in the processing and collection units and the humidity percentage were considered as system inputs and optimal harvesting time was used as the system output. "Low, Very low, high and very high" and "Best, Suitable, Unfit, and Worst" were four groups of linguistic variables for input and output parameters, respectively. These variables follow the triangular and trapezoidal membership functions. The number of 64 fuzzy rules were considered and introduced into the fuzzy system by experts, experienced farmers, and combiners. Furthermore, the same field data (measured data) were applied to evaluate the designed system, so that the predicted value was accounted as the system output.

Results and Discussion

Analysis of variance showed that there was a significant difference between the harvesting dates at the 0.05 probability level and significant difference between the harvesting times of a day at the 0.01 probability level. It can be concluded that the harvest dates and harvest times of a day were very effective in the number of corn losses, but the interaction effects were not significant. The results appeared that the lowest losses were 10.05% on November 8th, 2017, at 14-16 p.m., and the highest losses were 12.88% on November 11th, 2017, at 8-10 a.m. The amount of losses was increased due to the higher air humidity and lower temperature. In the fuzzy simulation model, the suitable harvesting-time can be predicted based on the losses quantities in the processing and collection units and the humidity percentage. The results showed that the predicted values for harvesting-times, by a designed fuzzy system, were completely matched with measured values in this study. The coefficient of determination (R^2) was 0.980 between measured and predicted harvesting times. This coefficient demonstrated that the developed fuzzy logic system was suitable for prediction of harvesting time in the studied area.

Conclusions

The experimental observations in the field and data analysis showed that in the corn harvesting in the Moghan region, the humidity level, date, and harvesting-time were the most effective factors in the harvesting losses. In this paper, based on measured data from a small farm and implementation of the expert fuzzy system, the most suitable harvest date was set on November 8th at 14-16 p.m, at 21-24°C and relative humidity of 44%-53% to have 10.5% losses which has been confirmed by the lowest losses observed in the corn plan (10%). Moreover, the high value of the determination coefficient demonstrates a high correlation between measured and predicted data.

Keywords: Fuzzy expert system, Harvest losses, Harvesting time

1- Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran
(*- Corresponding Author Email: Abbasgholipour@bonabiau.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 241-253

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۵۳-۲۴۱

مطالعه ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در خط تولید شکر به روش دینامیک سیالات محاسباتی

عادل رضوانی وند فنائی[۱]، علی حسن پور[۲*]، علی محمد نیکبخت[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۲

چکیده

ترموکمپرسور به‌وسیله قسمت همگرا- واگرا عمل فشرده‌سازی سیال ثانویه را انجام می‌دهد. سادگی و نداشتن بخش متحرک، از جمله مزیت‌های آن نسبت به کمپرسورهای مکانیکی است. فهم جامع از چگونگی عملکرد در داخل ترموکمپرسور، برای استفاده عملی از آن فوق‌العاده مفید خواهد بود. ویژگی‌های ترمودینامیکی جریان‌های ورودی و تغییرات آن‌ها در خروجی، مانند فشار، دما و سرعت نیازمند انجام شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در این مطالعه از دینامیک سیالات محاسباتی و کدهای تجاری انسیس فلوئنت برای نمایش جریان داخل ترموکمپرسور در جهت استفاده در کارخانه تولید شکر استفاده شده است. حلگر بر مبنای چگالی به‌عنوان حلگر جریان انتخاب شد و شرط مرزی نوع "فشار ورودی" برای هر دو جریان اولیه و ثانویه در ورودی و شرط مرزی "فشار خروجی" برای مرز خروجی جریان اختلاطی اعمال گردید. از تابع دیواره‌ی استاندارد در نزدیکی دیواره استفاده شد. نتایج نشان داد که در بخش تخلیه ترموکمپرسور، فشار از ۰/۱ بار به ۰/۳۲ بار تقویت شد و دما افزایشی در حدود ۲۵ درجه نسبت به جریان ثانویه داشت. همچنین عدد ماخ به حدود ۰/۱۵ کاهش یافت. برای درک بهتر پدیده اتفاق افتاده در داخل ترموکمپرسور تصاویر گرافیکی آورده شد. در کانتور مربوط به عدد ماخ ابتدا جریان به‌صورت فراصوت ایجاد شد، سپس با گذر از بخش سطح ثابت یک شوک اتفاق افتاد و جریان در دیفیوزر به‌صورت فروصوت درآمد. در انتها، نتیجه‌گیری شد که دینامیک سیالات محاسباتی از پتانسیل خوبی برای پیش‌بینی عملکرد یک ترموکمپرسور به‌منظور استفاده در یک کارخانه تولید شکر برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: انرژی مصرفی، ترموکمپرسور، دینامیک سیالات محاسباتی، روش حجم محدود

مقدمه

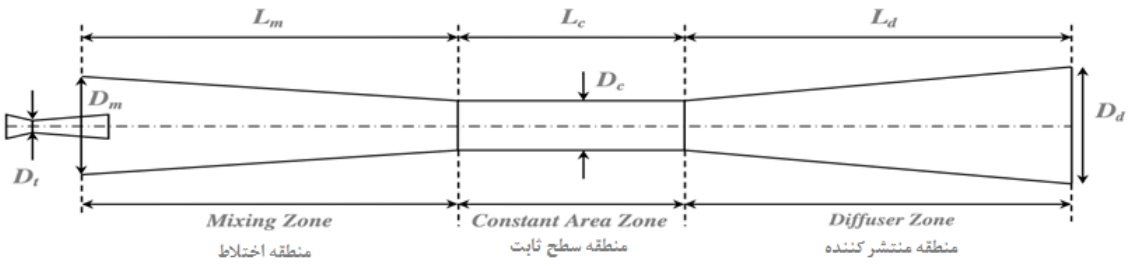
کارخانه‌های صنعتی بزرگ اغلب مقادیر قابل‌توجهی از بخار با فشار پایین (بخار مرده) را به اتمسفر تخلیه می‌کنند، که این اقدام سبب هدررفت انرژی می‌گردد. بازیابی محتوای گرمای نهان بخار با فشار پایین، بار بویلر را کاهش می‌دهد، که نتیجه آن در قالب صرفه‌جویی در انرژی و کاهش هزینه برای سوخت مصرفی (به‌عنوان مثال، فیش گاز مصرفی یک کارخانه) قابل مشاهده است. از پتانسیل‌های بخار کم‌فشار در فرآیندهایی چون تقطیر، تولید آب گرم، گرمایش فضا یا تولید خلاء استفاده می‌شود. اگر فشار بخار برای کاربرد مدنظر، کم باشد، یک ترموکمپرسور بخار قادر است، فشار و دما را به سطح موردنیاز افزایش دهد. ترموکمپرسورها، نوع ویژه‌ای از کمپرسورهای گازی هستند (شکل ۱) که از جریان محرک برای فشرده‌سازی سیال ثانویه استفاده می‌کنند و فاقد هرگونه تیغه و همچنین بخش متحرک هستند. اساس این روش شتاب‌دهی به جریان اولیه به بالای سرعت صوت با یک نازل همگرا- واگرا و کاهش فشار استاتیکی برای مکش و تراکم سیال دیگر به‌عنوان جریان ثانویه است (Sharifi *et al.*, 2012). مطابق با آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است، اثر تراکم بعد از شوک نرمال در داخل گلویی ترموکمپرسور اتفاق می‌افتد و به‌وسیله بخش منتشرکننده (دیفیوزر) در انتهای ترموکمپرسور تقویت می‌شود. محل ورود جریان‌های مکشی و برانگیخته به همراه مکانیزم اختلاط در شکل ۲ ارائه شده است. فرآیند اختلاط، با توجه به جت فراصوت بالا در تعامل با یک جریان فروصوت با اغتشاش در محفظه همگرایی، ذاتاً فرآیندی پیچیده است. در نتیجه، این پدیده به سختی می‌تواند به‌وسیله یک رابطه خطی بین پارامترهای هندسی و پارامترهای مشخصه توضیح داده شود.

پیش‌بینی دقیق عملکرد ترموکمپرسور باعث افزایش قابلیت اطمینان این فرآیند و افزایش بازده آن می‌شود. در بهبود عملکرد یک سیستم ترموکمپرسور، بررسی جریان داخلی مورد نیاز است. روش‌های نمایش‌دهنده‌ی جریان برای تعیین الگوهای مختلف جریان در جریان محرک ترموکمپرسورها مفید هستند (Myoungkuk *et al.*, 2010).

به‌طور کلی سه جریان مجزا در داخل ترموکمپرسور حضور دارند؛ (۱) جریان محرک یا جریان اولیه: جریانی با فشار و دمای بالاست که

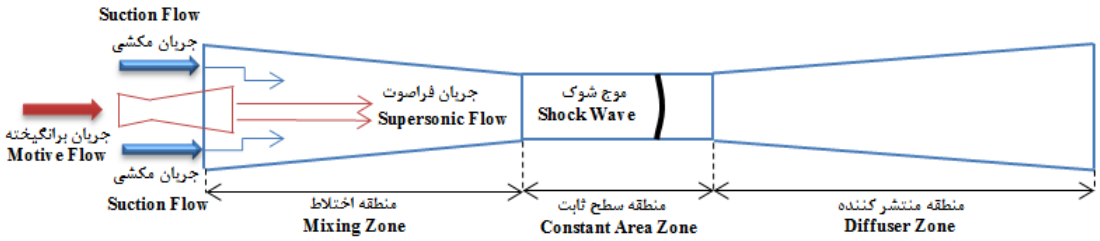
۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه ارومیه
۲- استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه
۳- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: a.hasanpour@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.76872

از طریق نازل اولیه وارد ترموکمپرسور می‌گردد. (۲) جریان مکشی یا جریان ثانویه: جریانی با فشار و دمای پایین است که به محفظه اختلاط وارد می‌گردد. این جریان با استفاده از انرژی جنبشی سیال محرک فشرده می‌شود. (۳) جریان تخلیه‌شده یا جریان خروجی: جریان مخلوط شده قبلی بوده و در خروجی با فشار بالاتر از فشار جریان مکشی خارج می‌شود. در انتهای بخش ثابت محفظه جریان مخلوط شده از طریق یک شوک قوی به حالت فروصوت درآمده و انرژی جنبشی به فشار تبدیل می‌شود.



شکل ۱– طرح‌واره‌ی سطح مقطع ترموکمپرسور در طول محور اصلی به‌همراه پارامترهای مهم

Fig.1. Schematic of thermo-compressor cross section along main axis with along main parameters



شکل ۲– مکانیزم عملکرد یک ترموکمپرسور با حضور جریان‌های موثر بر عملکرد آن

Fig.2. Performance mechanism of a thermo-compressor along with effective flow on performance

ویژگی‌های ترموکمپرسور و منحنی عملکردی

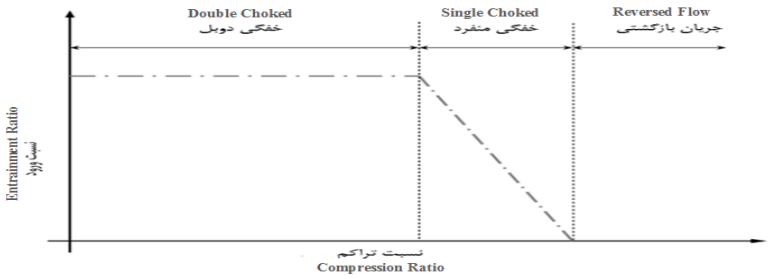
دو ویژگی مهم برای ترموکمپرسورهای رایج، پارامترهای نسبت ورودی[1] (ER) و نسبت تراکم[2] (CR) هستند. اولی نرخ جریان جرمی بی‌بعد و دومی فشار بی‌بعد است. تعریف دقیق برای این پارامترها در رابطه‌های (۱) و (۲) آورده شده است:

$$ER = \frac{\dot{m}_{suc}}{\dot{m}_{mot}} \quad (۱)$$

$$CR = \frac{P_{dis}}{P_{suc}} \quad (۲)$$

که $\dot{m}_{suc}$ نرخ جریان جرمی مکشی ($kg.s^{-1}$)، $\dot{m}_{mot}$ نرخ جریان جرمی برانگیخته ($kg.s^{-1}$)، P_{dis} فشار تخلیه از بخش دیفیوزر (Pa) و P_{suc} فشار مکشی (Pa) است. مقادیر بالای دو پارامتر (ER و CR)، نشان‌دهنده عملکرد بهتر ترموکمپرسور است. منحنی عملکردی ترموکمپرسور که به‌وسیله پارامترهای حاصل شده از روابط (۱) و (۲) به‌دست می‌آید، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، ER به‌عنوان تابعی از CR نشان داده شده است. طبق این پروفایل عملکردی، رفتار جریان در داخل ترموکمپرسور به سه قسمت، شامل جریان خفه‌شده دوبل[3]، جریان خفه‌شده منفرد[4] و جریان بازگشتی[5] تقسیم می‌شود. در جریان خفه‌شده دوبل فشار خروجی کمتر از بیشترین فشار خروجی است و هر دو نازل در حالت خفگی قرار دارند. به بیان دیگر آن، باعث می‌شود که نرخ جریان برای جریان‌های اولیه و ثانویه ثابت بماند (ER ثابت، مطابق با شکل ۳). در جریان خفه‌شده منفرد، زمانی که فشار خروجی افزایش می‌یابد، حالت خفگی منطقه سطح ثابت از بین می‌رود و شوک به سمت بالاسوی منطقه اختلاط حرکت می‌کند. در جریان بازگشتی، افزایش بیشتر فشار خروجی باعث بازگشت جریان به داخل محفظه مکش می‌شود و در نتیجه ترموکمپرسور کارایی مطلوب خود را از دست می‌دهد.

1- Entrainment Ratio
2- Compression Ratio
3- Double choked
4- Single chocked
5- Reverse



شکل ۳- منحنی عملکردی یک ترموکمپرسور با حالت‌های عملکردی مختلف

Fig.3. Performance curve of a thermo-compressor with different operational mode

دینامیک سیالات محاسباتی با توانمندی بالای خود می‌تواند برای دستیابی به نمایشی از کیفیت جریان در داخل ترموکمپرسور با هزینه معقول مورد استفاده قرار گیرد. اولین مطالعات CFD به‌صورت نسبتاً جامع بر روی ترموکمپرسورها و اجکتورهای فراصوت به حدود سال ۲۰۰۵ برمی‌گردد (Rusly and Aye, 2005; Kim *et al.*, 2007). در تعدادی از مطالعات قبلی، قابلیت تراکم یا آشفتگی در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نشده است (Chen *et al.*, 1994; Riffat *et al.*, 1996). از کدهای تجاری فلوئنت برای تفسیر پدیده جریان در داخل ترموکمپرسورها و اجکتورها استفاده شده است (Pianthong *et al.*, 2007). با این وجود، هنوز مطالعه جامعی در خصوص استفاده از این ابزار به‌عنوان رابطی بین بخش تبخیر[1] و بلورسازی[2] و مطالعه تأثیر آن در کاهش مصرف انرژی به‌منظور تولید شکر انجام نگرفته است. یک مطالعه تجربی روی یک روش جدید برای بهبود عملکرد ترموکمپرسور برای سیستم‌های چند اثر[3] تقطیری نمک‌زدایی توسط گرمایش بخار ورودی انجام شد و نتیجه گرفته شد که پیش‌گرمایش بخار ورودی می‌تواند تا حد زیادی نسبت ورودی (ER) ترموکمپرسور را افزایش دهد (Han *et al.*, 2014). تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و طراحی بهینه از جت پمپ‌ها در قالب یک مطالعه پارامتریک انجام پذیرفت و بیان شد که می‌توان بازده این پمپ‌ها را با جایگزینی‌ها تا حدود ۲۹ درصد افزایش داد (Fan *et al.*, 2001). یک تفسیر تجربی بر روی تأثیر موقعیت نازل برای طراحی ترموکمپرسورهای با عملکرد بالا انجام شد که نشان‌دهنده‌ی تطابقی با کمتر از ۵ درصد خطا بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده بود که از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و سیال عملگر R600a برای انجام مطالعات استفاده شد. یک مطالعه مقایسه‌ای نشان‌دهنده این بود که پارامترهای عملکردی ترموکمپرسور می‌توانند به‌خوبی از حالت متقارن محوری که در آن هزینه و زمان کاهش یافته است، به دست آیند (Sharifi and Boroomand, 2013). فرصت اصلی برای فن‌آوری مربوط به ترموکمپرسورها در آینده، چگونگی ترکیب چرخه اجکتوری در سیستم‌های واقعی است (Giacomelli *et al.*, 2016). در ادامه یک مدل تئوری با استفاده از ویژگی گاز کامل برای پیش‌بینی عملکرد اجکتور تحت تمامی حالت‌ها پیشنهاد شده است (Khalid *et al.*, 2018). همچنین از دینامیک سیالات محاسباتی در زمینه‌های دیگر مرتبط با کشاورزی استفاده شده است (Nadi *et al.*, 2017; Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015).

1- Evaporation
2- Crystallization
3- Multi effect

تئوری بخار مرطوب

تئوری بخار مرطوب، یک تئوری کلاسیک است که توسط وولمر-فرنکل- زلدوویچ[4] برای محاسبه تعداد ذرات مایع استفاده شد (McDonald, 1962; Kantrowitz, 1951)

$$J_{classic} = \frac{q_c}{1+\eta}\left(\frac{2\sigma}{\pi M_{molc}^3}\right)^{0.5}\left(\frac{\rho_g^2}{\rho_l}\right)\exp\left(-\frac{4\pi r_{crit}^2\sigma}{3K_BT}\right) \quad (۳)$$

q_c ضریب چگالش است که معمولاً واحد در نظر گرفته می‌شود، K_B ثابت بولتزمان بوده و η فاکتور تصحیح غیر هم‌دما است که توسط رابطه (۴) بیان می‌گردد (Simpson, 2005).

$$\eta = 2\left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)\left[\frac{h_{lg}}{RT}\left(\frac{h_{lg}}{RT}-\frac{1}{2}\right)\right] \quad (۴)$$

h_{lg} گرمای نهان معادل (J)، γ نسبت ظرفیت گرمای ویژه و R ثابت گازها است. شعاع بحرانی هسته توسط فرمول کلوین- هلمهولتز[5] به‌صورت رابطه (۵) بیان می‌شود (Young, 1992).

$$r_{crit} = \frac{2\sigma}{\rho_1 RT\ln(S)} \quad (۵)$$

فرض می‌شود که تشکیل قطرات تنها در این اندازه بحرانی برای قطر کره کوچک اتفاق بیفتد. S نشان‌دهنده، نسبت مافوق اشباع است که به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد:

$$S = \frac{P}{P_{sat}} \quad (۶)$$

4- Volmer-Frenkel-Zeldovich
5- Kelvin-Helmholtz

در رابطه (۶)، P_{sat} فشار اشباع (Pa) در دمای مربوط به مخلوط است. نرخ رشد قطرات از رابطهٔ (۷) به دست می‌آید (Young, 1992).

$$G=\frac{dr}{dt}=\frac{k_g\Delta T(1-r_{crit}/r)}{\rho_l(h_g-h_l)[r+1.89(1-\nu)l_g/P_{rg}]} \quad (۷)$$

مسیر آزاد متوسط مولکول‌های بخار l_g به‌صورت رابطهٔ (۸) بیان می‌گردد:

$$l_g=\frac{3\mu_g\sqrt{RT}}{2P} \quad (۸)$$

ν فاکتور تصحیح نیمه‌تجربی و ویسکوزیته دینامیکی فاز گاز (Pas.s) است که برای به دست آوردن توافقات دقیق با داده‌های تجربی معرفی می‌گردد (Young, 1982):

$$\nu=\frac{RT_{sat}(p)}{h_{lg}}\left[\zeta-\frac{1}{2}-\left(\frac{2-q_c}{4q_c}\right)\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)\right]\left(\frac{RT_{sat}(p)}{h_{lg}}\right) \quad (۹)$$

اختلاف دمای موردنیاز در معادله نرخ رشد می‌تواند به‌وسیله اثرات مویینگی مربوطه به قطرات کوچک تعیین گردد (Gyarmathy, 1963).

$$T_l=T_{sat}(p)-T_{sub}\frac{r_{crit}}{r} \quad (۱۰)$$

که r شعاع قطرات و r_{crit} شعاع قطارت بحرانی، $T_{sat}(p)$ دمای اشباع در فشار استاتیکی (°K) و T_l دمای فاز مایع (°K) است.

اثر مادون سرد نتیجه شده از وضعیت غیرتعادلی مخلوط به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Gyarmathy, 1976):

$$T_{sub}=T_{sat}(p)-T_g \quad (۱۱)$$

که T_{sub} دمای زیرخنک (خنک کردن مبرد تا زیر دمای اشباع) (°K) و T_g دمای فاز بخار (°K) است.

از این رو طراحی یک ترموکمپرسور بخار برای استفاده از بخار مرده که دارای آنتالپی پایینی است و بالابردن سطح فشار و دمای آن در جهت کاهش مقدار انرژی مورد نیاز در کارخانه‌های تبدیلی مانند شکر و آبمیوه به‌عنوان هدف این مطالعه انتخاب شده است.

مواد و روش‌ها

طراحی ترموکمپرسور

برای طراحی ترموکمپرسور از روش طراحی پیشنهاد شده توسط شریفی و برومند استفاده شده است (Sharifi and Boroomand, 2013). بخار محرک کل مورد نیاز برای فرآیند تبخیر توسط (D_{th}) تعیین می‌گردد و قطر سطح ثابت (D_c)، تعیین‌کننده نرخ جریان جرمی کلی برای بخار فشرده شده ورودی به تبخیرکننده‌ها در این سیستم است. در این شرایط $\dot{m}_{mot}$ نرخ مصرف کل بخار نفوذکننده ورودی به نازل اولیه است که برای نشان دادن شرایط سیال ورودی استفاده می‌شود و $\dot{m}_{product}$ نرخ کل بخار خروجی از ترموکمپرسور می‌باشد که سطح کلی حرارتی مورد نیاز برای چگالش بخار ورودی داخل تبخیرکننده‌ها را تعیین می‌کند. نرخ جریان جرمی داخل یک نازل را می‌توان از رابطه (۱۲) تعیین نمود.

$$\dot{m}=\left(\frac{P_0A}{\sqrt{RT_0}}\right)\left[M\sqrt{\gamma}\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2-2\gamma}}\right] \quad (۱۲)$$

که $\dot{m}_{mot}$ نرخ مصرف کل بخار نفوذکننده ورودی به نازل اولیه، A مساحت سطح، T_0 دمای اولیه و γ نسبت ظرفیت گرمای ویژه و M عدد ماخ است.

با فرض شرایط سرعت صوتی در گلوئی و نسبت ظرفیت گرمایی ویژه ثابت ($\gamma=1.3$) برای بخار آب، رابطهٔ (۱۲) را می‌توان برای تخمین دو پارامتر ناشناخته مربوط به سطح (A_c و A_{th}) استفاده نمود. زمانی که سطح گلوئی نازل اولیه (A_{th}) مورد نیاز است، مقادیر از ویژگی‌های بخار محرک مانند فشار کل (P_0)، دمای کل (T_0) و نرخ مصرف بخار ($\dot{m}$) می‌تواند در رابطه استفاده شود.

پارامترهای شکلی بی‌بعد

به‌منظور طراحی یک روند منطقی برای تغییرات هندسی، اندازه‌های شکل به‌صورت پارامترهای بی‌بعد بیان می‌گردند. شکل منطقه اختلاط، یک مخروط ناقص ساده است که از سه اندازه مستقل شامل طول منطقه اختلاط (L_m)، قطر ورودی منطقه اختلاط (D_m) و قطر محفظه ثابت (D_c) تشکیل شده است. حجم این مخروط می‌تواند توسط رابطه (۱۳) ارزیابی شود:

$$V_{\min}=\frac{\pi}{12}L_m(D_c^2+D_cD_m+D_m^2) \quad (۱۳)$$

همچنین برای مقایسه هندسه‌های مختلف پس از آن با معیار قابل قبول، دو پارامترهای بی‌بعد اضافی تعریف می‌شوند.

طول اختلاط بی‌بعد (L/D) نسبت طول منطقه اختلاط (L_m) به قطر منطقه ثابت (D_c) است.

$$L/D=\frac{L_m}{D_c} \quad (۱۴)$$

در ادامه، حجم اختلاط بی‌بعد (V')، نسبت حجم منطقه اختلاط (V_{min}) به توان سوم قطر منطقه ثابت می‌باشد.

$$V'=\frac{V_{\min}}{D_c^3} \quad (۱۵)$$

با توجه به شرایط مرزی در نظر گرفته برای محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی، مقادیر D_{th} و D_c ثابت هستند.

روند گام به گام تغییرات هندسه

به‌منظور انتخاب بهترین هندسه برای ترموکمپرسور باید موردی که دارای پارامترهای مشخصه در ارتباط با مقادیر هدف می‌باشد، انتخاب گردد. معمولاً چند سطح برای V' انتخاب می‌شود و برای هر مقدار D_m فرض شده، چند سطح متمایز به‌دست آمده و در آخر

هندسه‌های مرتبط به‌صورت عددی تحلیل می‌شوند. روند زیر برای تغییر ابعاد هندسی اولیه و ارزیابی برای هر مدل ترموکمپرسور استفاده می‌شود:

(۱) ارزیابی یک مقدار منحصر به‌فرد برای گلوئی ترموکمپرسور (D_c) با استفاده از معادله (۱۲)

(۲) انتخاب یک مقدار ویژه برای حجم منطقه اختلاط برای حجم بی‌بعد (V')

(۳) ارزیابی حجم منطقه اختلاط ($V_{\min}$) به‌وسیله رابطه (۱۵)

(۴) فرض یک مقدار دلخواه برای قطر داخلی منطقه اختلاط (D_m)

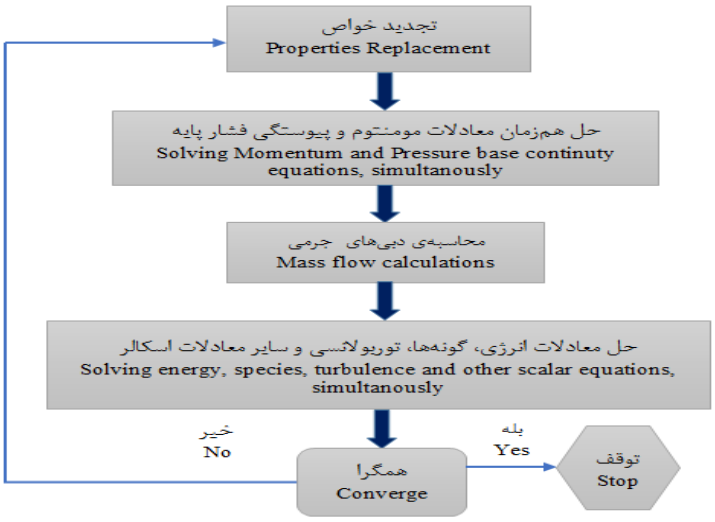
(۵) ارزیابی مقدار طول منطقه اختلاط (L_m) به‌وسیله رابطهٔ (۱۳)

(۶) ایجاد هندسه ترموکمپرسور بر اساس پارامترهای شکل ۱

(۷) تولید یک شبکه محاسباتی مقرون به‌صرفه برای تخمین صحت پدیده جریان داخل ترموکمپرسور

(۸) اعمال حلگر جریان برای منطقهٔ محاسباتی تحت شرایط مرزی مشخص شده

(۹) به دست آوردن یک حل همگرا شده با یک صحت قابل‌قبول



شکل ٤– روند حل مسئله در حلگر بر مبنای چگالی

Fig.4. Problem solving procedure in density base solver

اسکیم[1] عددی

نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۵ که بر اساس روش حجم محدود دینامیک سیالات محاسباتی عمل می‌کند، برای شبیه‌سازی و مشاهده رفتار جریان در داخل ترموکمپرسور مورد استفاده قرار گرفت. معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم[2]، به‌صورت ضمنی با استفاده از حلگر بر پایه چگالی[3] حل گردید. عبارت‌های انتقال حرارت جابه‌جایی بر اساس اسکیم پیشروی مرتبه دوم گسسته‌سازی شدند.

گام زمانی به‌وسیله شرط عدد کورانت- فردریش- لوی (CFL) تنظیم شد. به دلیل این‌که حل در ابتدا به‌شدت غیرخطی است، عدد کورانت (CFL) روی ۰/۵ تنظیم شده و در انتهای تکرارها با توجه به معیار همگرایی تا ۲۰ افزایش یافت. به‌منظور داشتن نتایج دقیق، باقی‌مانده‌ها روی 10^{-4} تنظیم شدند. سیال، بخار آب است که به‌صورت گاز ایده‌آل فرض می‌شود، حل مسئله در حلگر بر مبنای چگالی در شکل ۴ نشان داده شده است.

1- Scheme
2- Governing PDE (Partial Differential Equations)
3- Density Base (DB)

معادلات حاکم

حالت عمومی معادلات بقا در سیال تراکم‌پذیر برای شبیه‌سازی الگوی داخلی جریان مورد استفاده قرار گرفت. با در نظر گرفتن جریان ناپایای سه‌بعدی برای بخار، معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی به‌صورت روابط (۱۶) تا (۱۸) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \qquad (۱۶)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (۱۷)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E+u_i p)=\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i})+\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \tau_{ij}) \qquad (۱۸)$$

که در رابطه‌های فوق ρ چگالی ($kg.m^{-3}$)، u اجزای سرعت ($m.s^{-1}$)، τ تانسور تنش، E انرژی کل (J)، k انرژی جنبشی آشفته ($m^2.s^{-2}$)، T دمای استاتیک (°K) و P فشار استاتیک (Pa) می‌باشند.

جدول ۱- ویژگی‌های بخار مورد استفاده

Table 1- Properties of used steam

ویژگی **Property**	مقدار **Value**
مدل گاز ایده‌آل Ideal gas model	چگالی Density
$2024\ J.(kg.k)^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه Specific heat capacity
$0.00261\ W.(mk)^{-1}$	ضریب انتقال حرارت رسانش Conduction coefficient
$1.34*10^{-5}\ kg.(ms)^{-1}$	ویسکوزیته Viscosity
$18.015\ Kg.(kgmol)^{-1}$	وزن مولکولی Molecular weight

جدول ۲- اندازه بخش‌های مختلف ترموکمپرسور

Table 2- Values of various parts of thermos-compressor

شرح **Description**	اندازه **Value (mm)**	شرح **Description**	اندازه **Value (mm)**
قطر منطقه ثابت Constant area diameter (D_c)	650	قطر گلویی نازل Throat diameter (D_t)	48
قطر خروجی دیفیوزر Diffuser outlet diameter (D_d)	950	قطر ورودی منطقه اختلاط Mixing inlet Diameter (D_m)	1220
طول دیفیوزر Diffuser length (L_d)	3350	طول منطقه اختلاط Mixing area length (L_m)	2850
طول کل Overall length (L)	8100	طول منطقه ثابت Constant area length (L_c)	1900

مدل‌سازی آشفتگی

در نظر گرفتن مدل آشفتگی مناسب از آن جهت مهم است که پدیده‌ی اختلاط دو جریان در شرایط ویسکوز اتفاق می‌افتد و از این رو، به‌صورت چشم‌گیری الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای شبیه‌سازی جریان آشفته، با مطالعه منابع علمی و مقالات از حالت تحقق‌پذیر[1] مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است. دلیل اصلی استفاده از این روش، علاوه بر بررسی منابع قبلی، پیش‌بینی ویژگی‌های جت ظاهر شده در رژیم‌های جریانی هم‌جهت متقارن محوری است. دو معادله‌ی حاکم اساسی این مدل به‌صورت روابط (۱۹) و (۲۰) بیان می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+S_k \qquad (۱۹)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t/\sigma_\varepsilon)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+S_\varepsilon \qquad (۲۰)$$

که عبارت‌های S_k و S_ε عبارت‌های منبع با توجه به انرژی جنبشی آشفته (k) ($m^2.s^{-2}$)، و نرخ (ε) ($m^2.s^{-3}$)، هستند. این مدل آشفته با رفتارهای نزدیک به دیواره مانند "تابع دیواره استاندارد" سازگار است.

1- Realizable

به‌منظور داشتن رفتار سازگار با فرض تابع دیواره استاندارد، دقت ویژه‌ای باید برای مش‌های نزدیک به دیواره‌ها در نظر گرفته شود.

شرایط مرزی

برای حل صحیح مسئله و استخراج میدان‌های حل، تعریف بهترین نوع شرط مرزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در شرایط مسئله، دو جریان ورودی متمایز در کنار یک جریان خروجی منفرد وجود دارد. شرط مرزی نوع "فشار ورودی" و "فشار خروجی" برای هر دو جریان اولیه و ثانویه در مرزهای ورودی و خروجی اعمال می‌گردد.

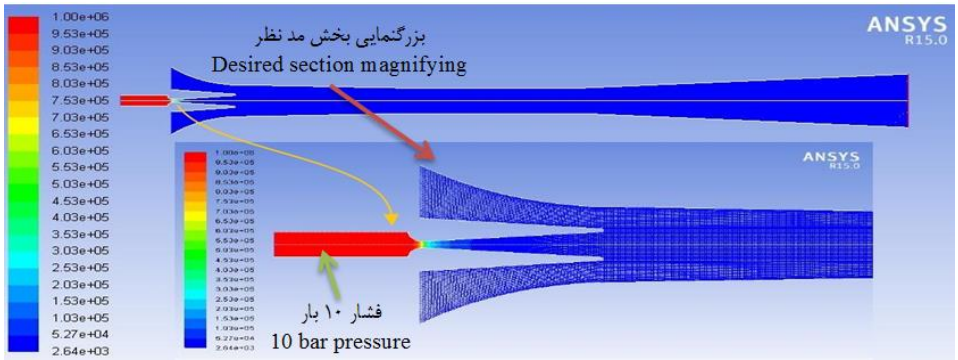
نتایج و بحث

خلاصه‌ای از نتایج در قالب نتایج فشار، سرعت، عدد ماخ و دما ارائه شده است. درک کلی در مورد این خصوصیات برای یک ترموکمپرسور بخار در جهت شناخت رفتار سیال داخل آن فوق‌العاده حائز اهمیت بوده و از نظر استفاده در شرایط عملی بسیار سودمند می‌باشد.

فشار

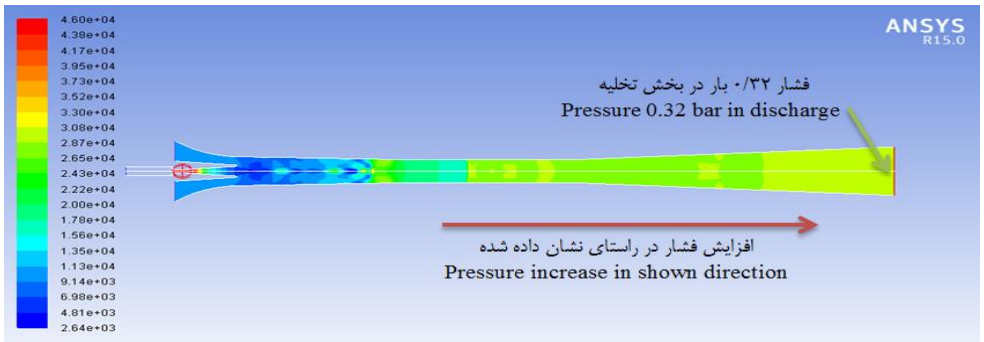
فشار به‌عنوان مهم‌ترین عامل خروجی یک ترموکمپرسور مطرح است. افزایش فشار بخار خروجی در ترموکمپرسور بخار مرده را تقویت

کرده و باعث افزایش کارایی آن بخار می‌شود. بخاری که تقویت شده به سبب دارا بودن محتوای حرارتی بالا، می‌تواند در بخش‌های دیگر به کار گرفته شود. همان‌طوری‌که از کانتور فشار استاتیکی (شکل ۵) مربوط به خروجی ترموکمپرسور مشخص است، بخار محرک با مقدار فشار ورودی ۱۰ بار از طریق نازل اولیه وارد سیستم ترموکمپرسور می‌گردد. در نازل اولیه سرعت افزایش و در نتیجه فشار کاهش می‌یابد. کاهش فشار در محفظه اختلاط باعث تولید یک منطقه کم فشار می‌شود. این کاهش فشار دلیلی برای مکش جریان ثانویه که دارای فشار پایینی است (حدود ۰/۱ بار) به داخل ترموکمپرسور است. سپس در ادامه مومنتوم دو جریان با یکدیگر ترکیب شده و جریان یکسانی را تشکیل می‌دهند. در ادامه در بخش سطح ثابت شوک‌های فشاری اتفاق می‌افتد که احتمالاً به علت ترکیب دو جبهه فشاری مختلف باشد. در ادامه با ورود به بخش دیفیوزر با توجه به کاهش سرعت ناشی از هندسه ترموکمپرسور، فشار افزایش می‌یابد و در خروجی به مقدار مورد نظر می‌رسد که در حدود ۰/۳۲ بار است (شکل ۶) و این فشار قابلیت استفاده در بخش‌های دیگر کارخانه را خواهد داشت. برای درک بهتر تغییرات نمودار دو بعدی تغییرات فشار در خط تقارن طولی به‌ازای موقعیت ترموکمپرسور در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۵– کانتور فشار مربوط به کل هندسه ترموکمپرسور به‌همراه بزرگنمایی بخش مربوط به نازل اولیه

Fig.5. Pressure contour related to thermos-compressor geometry with magnify the primary nozzle section

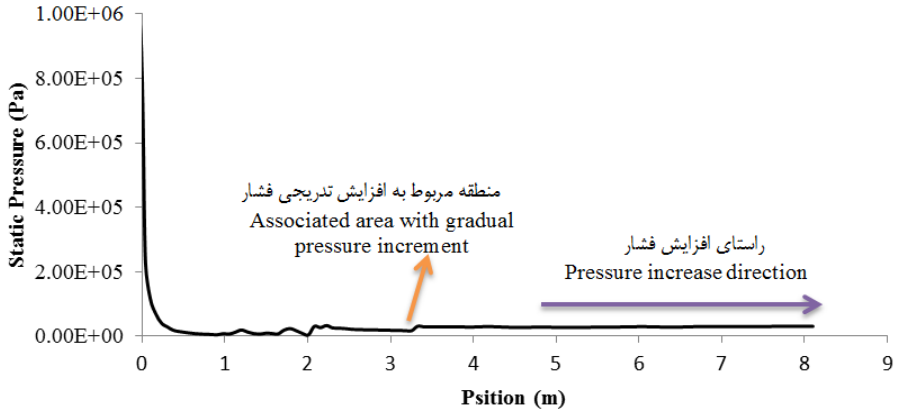


شکل ٦– کانتور فشار مربوط به کل هندسه ترموکمپرسور به‌جز بخش نازل اولیه برای مشاهده دقیق تغییرات

Fig.6. Pressure contour related to thermos-compressor geometry except primary nozzle section to accurate understanding

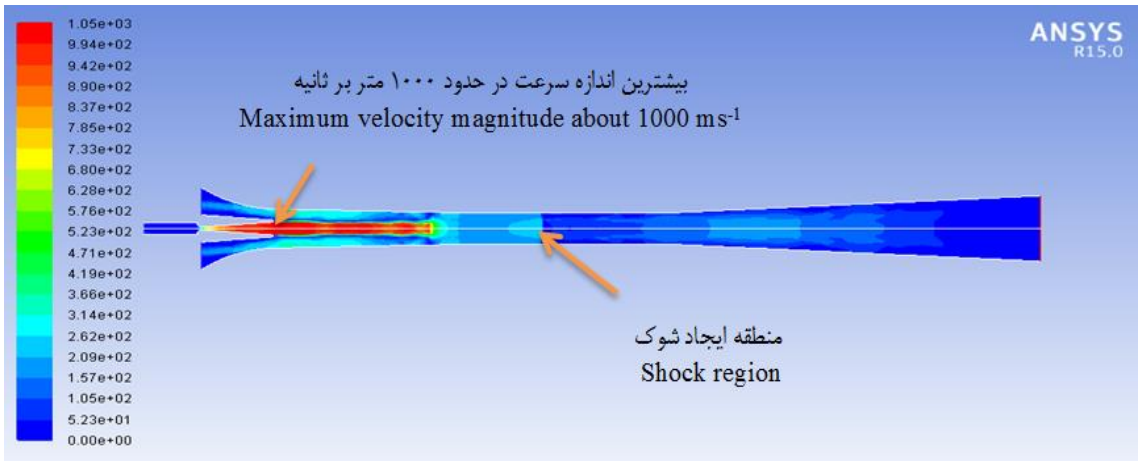
اندازه سرعت و عدد ماخ

از عوامل مهم دیگر در مطالعه رفتار جریان در داخل ترموکمپرسور، سرعت است. این کمیت که ارتباط بسیار نزدیکی با مفهوم مومنتوم در داخل ترموکمپرسور دارد از سرعت‌های بالای ناشی از فشار بالای ورودی و هم‌چنین از هندسه ترموکمپرسور تأثیر می‌پذیرد. طبق انتظار بیشترین مقدار اندازه سرعت بعد از نازل اولیه روی می‌دهد و مقادیر بسیار بالایی (۱۰۰۰ متر بر ثانیه) را تجربه می‌کند که مشخصاً از نظر مومنتوم هم مقدار بسیار بالایی دارد. تغییرات اندازه سرعت از ابتدای بخش سطح ثابت رفته رفته کاهش می‌یابد و نسبتاً یکنواخت‌تر می‌شود. تغییرات به‌ازای کل سطح ترموکمپرسور و همچنین و به‌ازای خط تقارن طولی در قالب یک نمودار دوبعدی با محور موقعیت به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. آن چیزی که مشهود است، عمده تغییرات ناگهانی در این کمیت مربوط به خروجی نازل اولیه تا قبل از بخش سطح ثابت است.



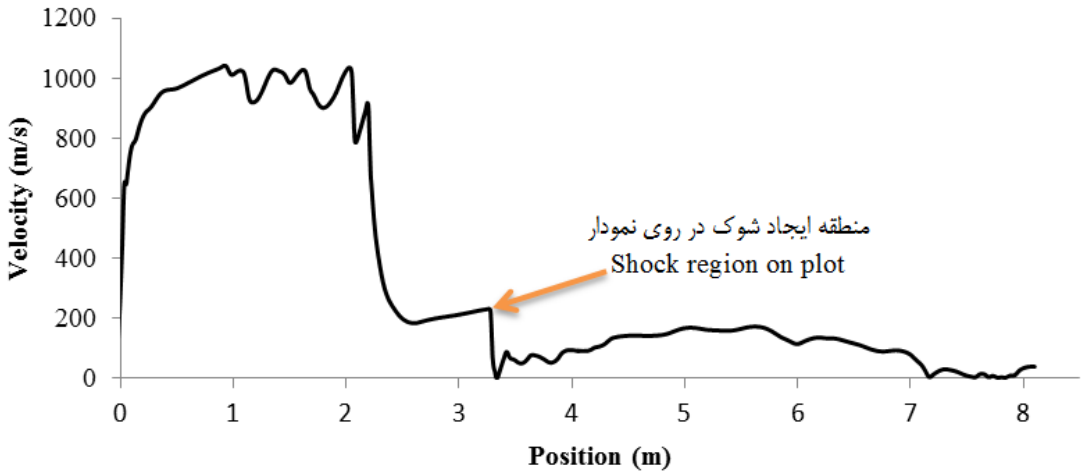
شکل ۷– نمودار فشار در برابر موقعیت روی خط تقارن طولی در داخل ترموکمپرسور

Fig.7. Pressure plot versus position on longitudinal symmetry line inside the thermos-compressor



شکل ۸– کانتور اندازه سرعت در داخل در ترموکمپرسور

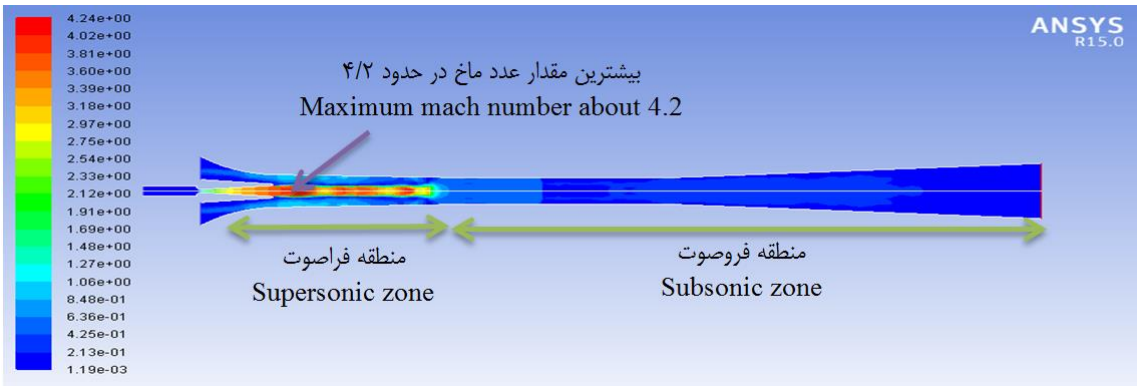
Fig.8. Velocity magnitude contour inside the thermos-compressor



شکل ۹– نمودار اندازه سرعت در برابر موقعیت روی خط تقارن طولی در داخل در ترموکمپرسور

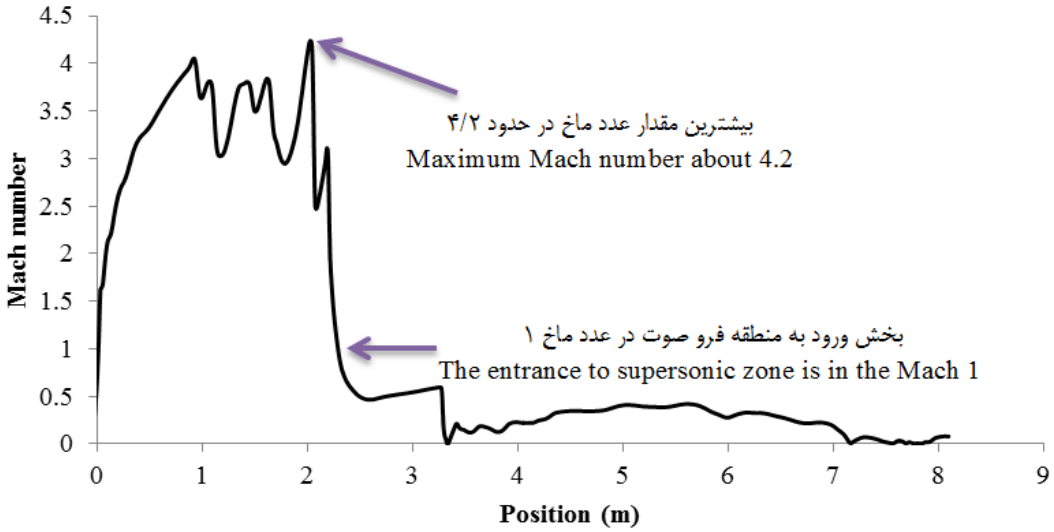
Fig.9. Velocity magnitude plot versus position on longitudinal symmetry line inside the thermos-compressor

در ادامه برای نشان دادن مناطق از نظر صوتی شامل مناطق فروصوت، محدوده صوتی و فراصوت، کانتور مربوط به عدد ماخ در شکل ۱۰ داخل ترموکمپرسور آورده شده است. طبق شاخص، اعداد زیر ۱ نشان‌دهنده مناطق با ویژگی فروصوت، مناطق نزدیک به ۱ مربوط به شرایط محدوده صوتی و اعداد بیشتر از ۱ نشان‌دهنده مناطق فراصوت در حوزه مورد مطالعه است. شکل ۱۱ نیز نمودار مربوط به عدد ماخ در راستای طولی خط تقارن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که بالاترین مقادیر عدد ماخ تا قبل از بخش سطح ثابت اتفاق می‌افتد، چرا که در این منطقه بیشترین مقدار سرعت را شاهد هستیم.



شکل ۱۰– کانتور عدد ماخ در داخل در ترموکمپرسور

Fig.10. Mach number contour inside the thermos-compressor

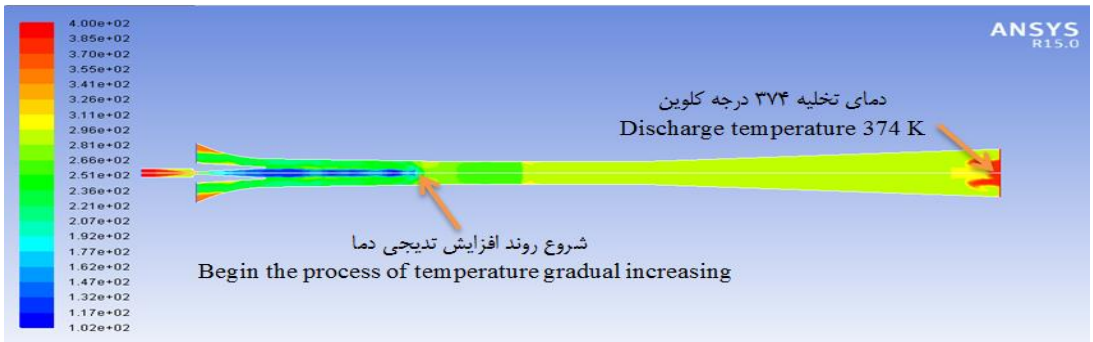


شکل ۱۱– نمودار عدد ماخ در برابر موقعیت روی خط تقارن طولی در داخل در ترموکمپرسور

Fig. 11. Much number plot versus position on longitudinal symmetry line inside the thermos-compressor

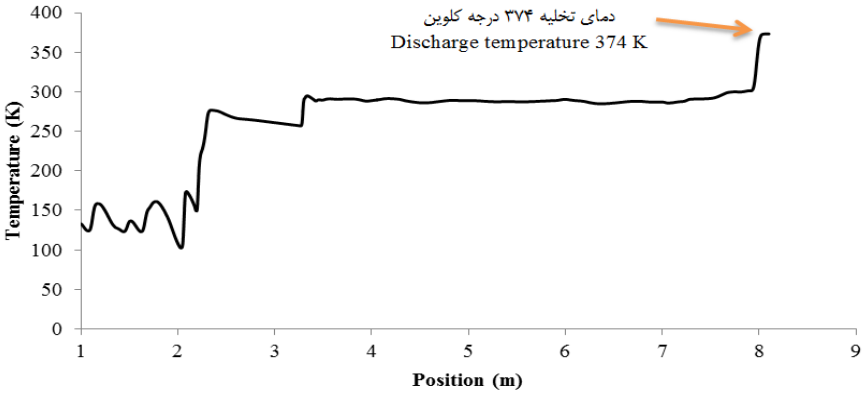
دما

از دیگر ویژگی‌های مهم یک جریان، دمای آن جریان است. توزیع دمایی داخل ترموکمپرسور به‌صورت کانتور در شکل ۱۲ آورده شده است. مقدار بالای دمای ورودی مربوط به بخار محرک در خروجی نازل اولیه به شدت کاهش می‌یابد و حتی در بخش‌هایی به حدود ۱۱۰ کلوین می‌رسد. به دلیل مومنتوم بسیار بالای جریان در این بخش، همچنان فاز سیال به‌صورت گاز باقی می‌ماند و از نقطه نظر دینامیک سیالات قابل توجیه است. در ادامه و در بخش سطح ثابت، دما تقریباً ثابت است تا این‌که در داخل بخش دیفیوزر دوباره رفته رفته دما افزایش یافته و در خروجی این افزایش سرعت بیشتری به خود می‌گیرد. دمای بالای جریان خروجی ترموکمپرسور سبب افزایش کارایی بخار خروجی به جهت افزایش در آنتالپی آن می‌شود. نمودار دوبعدی تغییرات دما در راستای خط تقارن طولی در مقابل موقعیت در داخل ترموکمپرسور در شکل ۱۳ ارائه شده است که برای افزایش درک شهودی فرآیند داخل ترموکمپرسور می‌تواند بسیار مفید باشد.



شکل ۱۲– کانتور توزیع دما در داخل در ترموکمپرسور

Fig.12. Temperature distribution contour inside the thermos-compressor



شکل ۱۳– نمودار توزیع دما در برابر موقعیت روی خط تقارن طولی در داخل در ترموکمپرسور

Fig.13. Temperature distribution plot versus position on longitudinal symmetry line inside the thermos-compressor

جدول ۳– فشار و دمای مرزهای مختلف ترموکمپرسور

Table 3- Pressure and temperature of different boundaries of thermos-compressor

نوع جریان Flow type	دما Temperature (°K)	فشار Pressure (bar)
جریان اولیه Primary Flow	413	10
جریان ثانویه Secondary Flow	353	0.1
جریان تخلیه Discharge Flow	374	0.32

از نقطه‌نظر انطباق نتایج، نتایج به‌دست آمده از روند بسیار خوبی از نظر الگو با کارهای انجام گرفته مشابه در بخش‌های صنعتی و مطالعات انجام شده را دارد (Sharifi *et al.*, 2012; Sharifi and Boroomand, 2013).

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که نشان داده شد نتایج مربوط به فشار، سرعت، عدد ماخ و هم‌چنین دما در طول یک ترموکمپرسور و با اهمیت بیشتر در خروجی آن مورد مطالعه قرار گرفت. با مد نظر قرار دادن اهمیت خصوصیات ترمودینامیکی بخار در کارخانه‌های تبدیلی و همچنین صنعتی شناخت کامل از فعل و انفعالات داخل ترموکمپرسور فوق‌العاده سودمند خواهد بود. اهمیت خصوصیات مورد بحث زمانی مشخص‌تر می‌گردد که ارتباط تنگاتنگی بین هرکدام از این عوامل و مصرف انرژی در یک کارخانه و یا هر واحد تولید صنعتی وجود دارد.

مشاهده گردید که ترموکمپرسور طراحی شده قادر به افزایش سرعت و دما در محدوده مطلوب برای تبدیل بخار مرده غیرقابل

مصرف به بخار با سطح فشار و دمای مدنظر است که با این عمل، از انرژی دوباره مصرفی در بویلر برای تولید دوباره بخار زنده از بخار مرده برگشتی جلوگیری کرده و سبب کاهش مصرف انرژی و در کنار آن کاهش هزینه‌های مربوط به سوخت در کارخانه خواهد شد. بخار تولیدشده با دارا بودن فشار و دمای بالاتر می‌تواند در بخش‌های مختلف کارخانه از جمله بخش بلورسازی مورد استفاده قرار گیرد.

از نقطه‌نظر مدل اغتشاشی مورداستفاده در شبیه‌سازی‌های عددی نتیجه گرفته شد که حالت تحقق‌پذیر مدل $k-\varepsilon$ به دلیل پیش‌بینی ویژگی‌های جت ظاهرشده در رژیم‌های جریانی هم‌جهت متقارن محوری از قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال در داخل ترموکمپرسور برخوردار است.

References

1. Chen, F., C. F. Liu, and J. Y. Yang. 1994. Supersonic flow in the second-throat ejector–diffuser system. Journal of Spacecraft and Rockets 31 (1): 123-129.
2. Fan, J., J. Eves, H. M. Thompson, V. V. Toropov, N. Kapur, and D. Copley. 2011. Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps. Computers & Fluids 46: 212- 217.
3. Giacomelli, F., G. Biferi, F. Mazzelli, and A. Milazzo. 2016. CFD Modeling of the Supersonic Condensation inside a Steam Ejector. Energy Procedia 101: 1224-1231.
4. Gyarmathy, G. 1963. On the growth rate of droplets in a supersaturated atmosphere. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik 14 (13): 280-293.
5. Gyarmathy, G. 1976 .Condensation in flowing steam, a von-Karman institute book on two-phase steam flow in turbines and separators. Hemisphere 127-89.
6. Han, B., Z. Liu, H. Wu, and Y. Li. 2014. Experimental study on a new method for improving the performance of thermal vapor compressors for multi-effect distillation systems. Desalination 344: 391-3955.
7. Kantrowitz, A. 1951. Nucleation in very rapid vapor expansions. The Journal of Chemical Physics 19:1097-1100.
8. Khalid, K. A., M. A. Antar, A. Khalifa, O. A. Hamed. 2018. Allocation of thermal vapor compressor in multi effect desalination systems with different feed configurations. Desalination 426: 164-173.
9. Kim, S. D., I. S. Jeong, and D. J. Song. 2007. A computational analysis of unsteady transonic/ supersonic flows over backward facing step in air jet nozzle. Journal of Mechanical Science and Technology 21 (2): 336-348.
10. McDonald, J. E. 1962. Homogeneous nucleation of water vapor condensation: I. Thermodynamic aspects. American Journal of Physics 30: 870-877.
11. MyoungKuk, J., T. Utomo, J. Woo, Y. H. Lee, H. M. Jeong, and H. S. Chung. 2010. CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor. Energy 35: 2694-2702.
12. Naddi, F., S. A. Mehdizadeh, and U. N. Zonuz. 2017. Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network. Journal of Agricultural Machinery 7 (1): 298-311. (In Farsi).
13. Pianthong, K., W. Seehanam, M. Behnia, T. Sriveerakul, and S. Aphornratana. 2007. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. Energy Conversion and Management 48: 2556-2564.
14. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator. International Journal of Food Engineering 11: 71-77.
15. Riffat, S. B., G. Gan, and S. Smith. 1996. Computational fluid dynamics applied to ejector heat pumps. Applied Thermal Engineering 16: 291-297.
16. Rusly, E., and L. Aye. 2005. CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system. International Journal of Refrigeration 28: 1092-1100.
17. Shari, N., M. Boroomand, and R. Kouhikamali. 2012. Wet steam flow energy analysis within thermo-compressors. Energy 47: 609-619.
18. Sharifi, N., and M. Boroomand. 2013. An investigation of thermo-compressor design by analysis and experiment. Part 2. Development of design method by using comprehensive characteristic curves. Energy Conversion and Management 69: 228-237.
19. Simpson, D. A., and A. J. White. 2005. Viscous and unsteady flow calculations of condensing steam in nozzles. International Journal of Heat and Fluid Flow 26: 71-79
20. Young, J. B. 1982. The spontaneous condensation of steam in supersonic nozzles. Physicochemical Hydrodynamics 3 (1): 57-82.
21. Young, J. B. 1992. Two-dimensional non-equilibrium wet-steam calculations for nozzles and turbine cascades. Journal of Turbomachinery 114: 569-578.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 241-253

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۵۳-۲۴۱

Study of The Vapor Thermo-Compressor to Reduce Energy Consumption in the Sugar Production Line using Computational Fluid Dynamics

A. Rezvanivand fanaei[1], A. Hasanpour[2*], A. M. Nikbakht[3]

Received: 02-12-2018
Accepted: 22-01-2019

Introduction

Large industrial factories often discharge significant quantities of low-pressure steam (dead steam) into the atmosphere, which causes energy losses. Retaining low-pressure steam content reduces boiler load, resulting in energy savings and lower costs for the fuel consumption (for example, gas consumption bill in a factory). The boosted-pressure steam is used in processes such as distillation, hot water production, space heating or vacuum generation. If the vapor pressure for the intended application is low, a thermo-compressor is able to increase the pressure and temperature to the required level. Thermo-compressors are a special type of gas compressor that uses an actuator to compress secondary fluid and does not have any blades or moving parts. The accurate prediction of the thermo-compressor performance improves the reliability of this process and increases its efficiency.

Materials and Methods

Two important characteristics for the current thermo-compressors are entrainment ratio (ER) and compression ratio (CR). The first is the dimensionless mass flow rate, and the second is the dimensionless pressure. The wet steam theory as a classic theory is used by Wolmer-Frankel-Zeldovich to calculate the amount of liquid particles. In order to select the best geometry for the thermo-compressor among all possible geometries, the performance of each model must be compared with other models. In following, the case that includes characteristic parameters associated with the target values has been selected.

The commercial Ansys Fluent Versions 15, based on the finite volume method (FVM) was used to simulate and monitoring the flow behavior inside the thermo-compressor. The governing partial differential equations (PDE) were solved implicitly using a density-based solution. The convective heat transfer terms were discriminated based on the second-order upwind scheme. The non-linear governing equations were solved using the implicit coupling solver and the standard wall function was used near the wall. Given the three-dimensional flow for steam, the equations of mass conservation, momentum, and energy were written. The Realizable k - ε model was used to simulate turbulences in the flow.

Results and Discussion

A summary of the results is presented in terms of the results of pressure, velocity magnitude, Mach number and temperature. A general understanding of this characteristic for a thermo-compressor is extremely important for recognizing the fluid flow inside it, and it is very useful for practical use. Pressure is the most important factor in the recharge section of a thermo-compressor. Increasing the recharge vapor pressure in a thermos-compressor revival the dead steam and increases the steam efficiency. The revival steam can be used in other parts because of their high thermal content. Another important factor in the study of flow behavior inside the thermocouple is velocity magnitude. This quantity, which is closely related to the concept of momentum inside the thermocouple, had high influences from high pressure inputs as well as the thermo-compressor geometry. The highest amount of velocity occurs after the initial nozzle and had a very high magnitude (1000 ms^{-1}), which was also remarkably high in Monnet's terms. Another important characteristic of a flow is the temperature of the stream. The high input temperature associated with motive vapor at the outlet of the primary nozzle was sharply reduced, even in some section reached to 110 °Kelvin. Due to the very high flow momentum in this section, the fluid phase remained gas and it can be justified from the point of view of the fluid dynamics.

Conclusions

Considering the importance of thermodynamic properties of steam in conversion and industries, it would be extremely beneficial to fully understand the interactions inside the thermocouple compressor. The importance of the discussed characteristics is more specific when there is a close relationship between each of these factors and energy consumption in a factory or in any industrial production unit. It was observed that the designed thermos-compressor was able to increase the velocity and temperature in a desirable range for the conversion of non-

1- Ph.D. student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
2- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
3- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.hassanpour@urmia.ac.ir)

consumable vapor to the pressure and temperature. It was concluded that the Realizable $k-\varepsilon$ model due to the prediction of the jet characteristics appearing in the flow regimes for axial symmetry had a high ability to simulate fluid flows inside the thermos-compressor.

Keywords: Computational fluid dynamics, Consumption energy, Control volume method, Thermo-compressor

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 255-264

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۶۴-۲۵۵

مطالعه آیروآکوستیکی پروانه محوری موتور تراکتور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

بهروز صبر علیلو[۱]، آرش محبی[۲*]، عیوض اکبریان[۳]، عادل رضوانی وند فنائی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵

چکیده

پیش‌بینی صدای تولید شده از جریان سیال علی‌رغم دشوار بودن، می‌تواند با کمک تکنیک‌های عددی مدرن و دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی گردد. تحقیق حاضر به بررسی شبیه‌سازی آیروآکوستیکی پروانه موتور تراکتور با استفاده از مدل تعیین نویز جریان نویز پهن باند می‌پردازد. نویز در ادوات کشاورزی از آن جهت که هم با آسایش انسان و هم حیوانات ارتباط دارد، حائز اهمیت ویژه‌ای است. پیش‌بینی نویز با توجه شرایط حالت پایا با استفاده از مدل نویز پهن باند بر روی پروانه‌ی ۶ پره موتور تراکتور ITM399 ساخت شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز صورت پذیرفت. طبق نتایج بیشتر مقدار نویز در نوک پره‌ها تحت تاثیر سرعت و فشار دینامیکی بالا در این ناحیه شکل گرفت. هم‌چنین تطابق خوبی بین داده‌های عددی و تجربی به‌دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل نویز پهن باند پیش‌بینی مناسبی از شرایط عملکردی سر و صدای پروانه را دارا می‌باشد و منابع ایجاد سر و صدا را می‌تواند به‌خوبی شناسایی نماید.

واژه‌های کلیدی: آلودگی صوتی، پروانه رادیاتور، دینامیک سیالات محاسباتی، نویز پهن باند

مقدمه

بحث آلودگی صوتی از نگرانی‌های اکثر جوامع و صنایع است و از طرفی آیرودینامیک و نویز جریان به‌طور خاص‌تر، به دلیل ارتباط آن‌ها با سطح آسایش محیطی زندگی یا کار مردم و همچنین ایجاد استرس و ترس در حیوانات در محیط مزارع که ادوات کشاورزی در آن کار می‌کنند، مورد توجه می‌باشد. آیروآکوستیک نه تنها به دلیل مقررات دولت‌ها در انتشار سر و صدا، بلکه به دلیل افزایش تقاضای مردم از استانداردهای زندگی و ایجاد محیطی امن برای حیوانات مزارع، مورد توجه قرار گرفته است. در عین حال محصولاتی با عملکرد آیروآکوستیکی بالا، مشتریان زیادی را جذب خواهد کرد که این خود به سود اقتصاد جهانی است (Hubbard, 1991). هم‌چنین کاهش نویز جریان اغلب با کاهش هزینه انرژی همراه است و باعث دوام ساختارها و بهبود کیفیت محصولات می‌شود. در حالی‌که پیشرفت‌های بزرگی در پیش‌بینی نویز باند باریک به‌دست آمده است، نویز باند عریض می‌تواند در فن‌های محوری خیلی موثر باشد. استفاده از روش‌های محاسبات دقیق آیرودینامیکی مانند شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS[۱]) و یا شبیه‌سازی چرخشی بزرگ (LES[۲]) به پیش‌بینی بهتر نویز باند عریض کمک می‌کند (Fedala *et al.*, 2007). با این حال در پیش‌بینی نویز باند باریک با توجه به این‌که علاوه بر نیاز به دقت عددی بالا، برای دریافت مناسب در گیرنده‌های صوتی، شبکه‌بندی باید از کیفیت بالا برخوردار باشد و فقط زمانی که گیرنده‌ها داخل میدان حل و در نزدیکی منبع تولید نویز باشند، استفاده عملی از این روش امکان‌پذیر است و همچنین به حل معادلات تراکم‌پذیر نیاز دارد، استفاده صنعتی از آن مقرون به‌صرفه نیست.

مدل جایگزین ارائه شده در بخش‌های بعدی بر مبنای تکنیک‌های تحلیلی است. به‌طور عمده، نویز باند عریض یک جزء مهمی در فن‌های فروصوت[۷] است (Smagorinsky, 1963). مکانیزم تولید نویز به دلیل جریان آشفته، پدیده‌ی پیچیده‌ای است. مکانیزم‌های مختلفی به خاطر مشارکت قابل توجه آنها شناخته شده است. با این حال، نمی‌توان آن‌ها را از یکدیگر جدا کرد. اهمیت مکانیزم تولید نویز به ویژگی‌های آیرودینامیکی جریان، شدت تلاطم، زاویه برش و مقیاس طول آشفتگی بستگی دارد که در این زمینه کارهایی (Roshko, 1961; Majander and Siikonen, 2002; De Villiers, 2007; Wang *et al.*, 2012) انجام گرفته است. هم‌چنین از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در سایر زمینه‌های کشاورزی مانند شبیه‌سازی سیکلون‌ها استفاده شده است (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015). هم‌چنین مقایسه پیش‌بینی دمای خروجی جمع‌کننده خورشیدی تخت با نتایج تجربی به‌وسیله دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی از کارهای نوین انجام شده در این زمینه است (Nadi *et al.*, 2017).

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه
۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه
۳- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی
۴- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: a.mohebbi@urmia.ac.ir)

5- Direct Numerical Simulation
6- Large Eddy Simulation
7- Subsonic

DOI: 10.22067/jam.v10i2.74963

این مطالعات نشان می‌دهند که نویز تولید شده توسط تیغه فن به دلیل ترکیب چندین منبع نسبتاً متمایز است:

- اثر متقابل تیغه فن با برخورد جریان توربولانس و لایه‌های مرزی غلاف
- سر و صدای پس تیغه به علت توسعه و جداسازی لایه‌های مرزی آشفته
- سر و صدای گردابه مرتبط به Von Karman vortex streets (انتشار گردابی)
- نویز تولید شده توسط جریان انتشاری و گردابه‌های نوک
- گرفتگی، گرد و غبار، تنظیم سرعت حداکثر و جنس تیغه

در این تحقیق به شبیه‌سازی آکوستیکی پروانه‌ی موتور تراکتور ITM 399 با استفاده از روش حجم محدود پرداخته شده است. اصول اساسی پیش‌بینی نویز آیرودینامیکی در جریان نامحدود با استفاده از قیاس‌های آکوستیکی، در ابتدا توسط لایتهیل به‌دست آمده است. کرل آن را با در نظر گرفتن وجود مرزهای جامد در جریان گسترش داد. سپس، برای پیش‌بینی نویز آیرودینامیکی از جسم در حال حرکت، فاکس ویلیام هاوکینگز روشی را برای تاثیر یک سطح متحرک در تولید صدا داخل جریان ارائه داد. از اواخر دهه ۱۹۹۰، آیروآکوستیک محاسباتی به‌عنوان یک شاخه جداگانه در روش‌های عددی، برای پیش‌بینی نویز انعکاسی از یک منبع ایروآکوستیکی یا انتشار امواج صوتی در یک میدان جریان ناهمگن مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های عددی آیروآکوستیکی مانند روش فاکس ویلیام هاوکینگز در سال ۱۹۶۹، یا روش سطح کیرشهف توسط فاراست و مایرس در سال ۱۹۸۸، مشکلات روش مستقیم را ندارند. این روش‌ها به‌طور گسترده برای پیش‌بینی نویز جت و نویز حاصل از دوران روتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرمول فاکس ویلیام هاوکینگز به‌دست آمده از عمومی‌ترین شکل قیاس آکوستیکی لایت هیل است و قادر به محاسبه صدای تولید شده توسط چندین منبع آکوستیکی می‌باشد. با توجه به وقت‌گیر بودن روش محاسبه مستقیم نویز و روش آکوستیک آنالوگ و همچنین برای اهداف طراحی بدون نیاز به دقت بالا در نرم‌افزار فلوئنت مدل نویز پهن باند[1] نیز اضافه گردیده است (de Jong and Golliard, 2013; Horváth and Vad, 2009). مطالعات محدودی در مورد بررسی آزمایشگاهی آکوستیک و عددی جریان بر روی پروانه‌های محوری انجام پذیرفته است و با بررسی منابع علمی مشخص گردید که کار جامعی بر روی مطالعه آیروآکوستیکی پروانه محوری موتور تراکتور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام نپذیرفته است و درک عمیقی در این حوزه وجود ندارد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدت صوت پروانه محوری تراکتور در تونل باد و مقایسه آن با نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی است.

مواد و روش‌ها

آزمایش تجربی

اندازه‌گیری صوت در تونل باد موجود در شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز صورت پذیرفت (شکل ۱). با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام یافته توسط ابزار صوت‌سنج (شکل ۲) مقادیر تراز صوتی در دورهای مختلف پروانه برای مشخص کردن تاثیر بار و گشتاور، اندازه گرفته شد. تراز صوتی اندازه گرفته شده به شرح جدول ۱ می‌باشد.

شکل ۱- تونل باد

Fig. 1. Wind tunnel

شکل ۲- صوت‌سنج

Fig. 2. Acoustic meter

1- Broadband noise

جدول ۱- تراز صوتی اندازه‌گیری شده در دورهای مختلف در تونل باد

Table 1- Sound balance measured in different periods in the wind tunnel

دور بر دقیقه (rpm) Round per minute	تراز صوتی (db) Sound level
1500	85
1300	81
1000	79

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

در شبیه‌سازی به‌وسیله دینامیک سیالات محاسباتی، ابتدا مدل فیزیکی مرتبط با هندسه و شرایط حاکم بر مسئله ذکر می‌شود. سپس با گسترش مدل ریاضی، معادلات بقا شامل سه قانون بقای جرم (پیوستگی)، بقای مومنتوم (اندازه حرکت) و بقای انرژی استخراج می‌گردد. سپس در ادامه با استفاده از گسسته‌سازی معادلات حل می‌گردند و میدان‌های فشار، دما، سرعت و غیره حاصل می‌شوند.

قوانین حاکم بر نوع جریان و نوع هندسه که در CFD در نظر گرفته شده عبارتند از:

قانون بقای جرم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m)+\nabla.(\rho_m \overrightarrow{v_m})=\dot{m} \qquad (۱)$$

$\vec{v}_m$ سرعت میانگین‌گیری شده جرمی ($m.s^{-1}$) و ρ_m چگالی مخلوط ($kg.m^{-3}$) می‌باشند.

قانون بقای مومنتم

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{\upsilon}_m)+\nabla.(\rho_m \vec{\upsilon}_m \vec{\upsilon}_m)=-\nabla p+\nabla.\left[\mu_m\left(\nabla \vec{\upsilon}_m+\nabla \vec{\upsilon}_m^T\right)\right]+ \rho_m \vec{g}+\vec{F}+\nabla.\left(\sum_{k=1}^{n}\alpha_k \rho_k \vec{\upsilon}_{dr,k}\vec{\upsilon}_{dr,k}\right) \qquad (۲)$$

n تعداد فاز، $\vec{F}$ نیروی حجمی (N) و μ_m لزجت مخلوط (Pas.s) می‌باشد.

قانون بقای انرژی

$$P_A \approx \frac{1}{\rho_0 \alpha_0}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\overline{p'^2}r^2 \sin\theta d\theta d\Psi=\int_S I(\vec{y})ds(\vec{y}) \qquad (۳)$$

k_{eff} رسانایی موثر ($W.\ K^{-1}.m^{-1}$)، $\nabla.\left(k_{eff}\nabla T\right)$ انتقال انرژی به سبب هدایت (J). S_E دیگر منابع حرارت (J) (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013).

اهمیت در نظر گرفتن مدل آشفتگی مناسب از آن جهت مهم می‌باشد که الگوی جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با مطالعه منابع مختلف و مقالات پیرامون این موضوع از حالت تحقق‌پذیر از مدل k-ε استفاده شده است. دو رابطه‌ی حاکم اساسی این مدل به‌صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_i/\sigma_k\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+S_k \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_i/\sigma_\varepsilon\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+S_\varepsilon \qquad (۵)$$

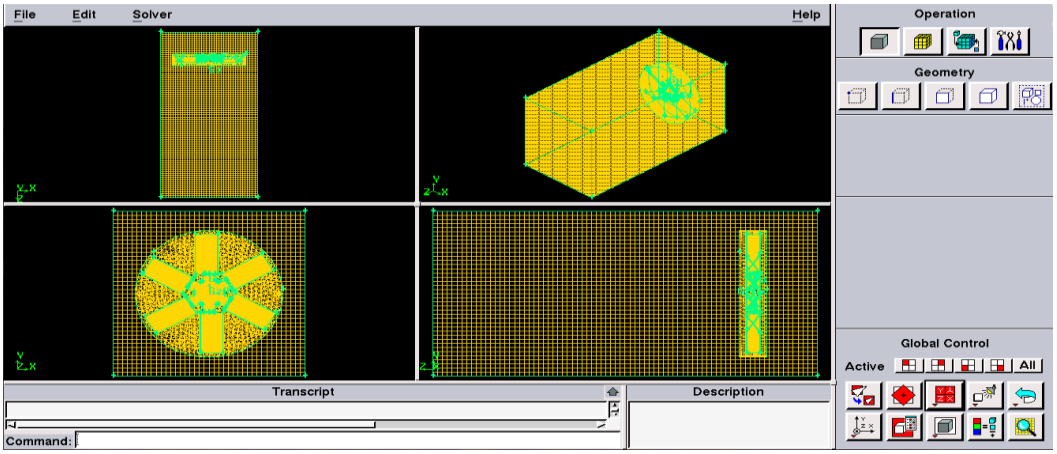
که عبارت‌های S_k و S_ε عبارت‌های منبع با توجه به انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ (ε) هستند (ANSYS Fluent Theory Guide, 2013).

این مدل آشفته با رفتارهای نزدیک به دیواره مانند "تابع دیواره استاندارد" سازگار است. به‌منظور داشتن رفتار سازگار با فرض تابع دیواره استاندارد، دقت ویژه‌ای باید برای مش‌های نزدیک به دیواره‌ها در نظر گرفته شود.

شماتیکی از پروانه رادیاتور مورد نظر در شکل ۳ آمده است. هم‌چنین مراحل کاری انجام گرفته برای ایجاد فایل نهایی با پسوند msh در نرم‌افزار گمبیت به‌طور خلاصه در شکل ۴ آورده شده است. به‌دلیل این‌که نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۵ فاقد محیط پیش‌پردازش برای رسم هندسه شکل است، ابتدا باید هندسه مورد نظر در نرم‌افزار گمبیت ترسیم گردیده و سپس بعد از مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی به نرم‌افزار فلوئنت انتقال یابد.

شکل ۳- شماتیکی از پروانه رادیاتور

Fig. 3. A schematic of radiator fan



شکل ٤– هندسه مش‌بندی شده در نرم‌افزار گمبیت

Fig. 4. Meshed geometry in Gambit software

شبیه‌سازی بر اساس حالت پایدار، تک فاز، حلگر بر پایه فشار و مدل انتقال مومنتوم ۳ بعدی از فن ۶ پره می‌باشد.

شبیه‌سازی آیروآکوستیکی

در بسیاری از کاربردهای عملی که شامل جریان آشفته هستند، نویز هیچ تن مشخصی ندارد و انرژی صدا به‌طور مداوم در طیف وسیعی از فرکانس‌ها توزیع می‌شود. برای حل و توصیف اثرات نوسانات آشفته‌ی سرعت و کمیت‌های اسکالر جریان، مدل‌های مختلف آشفتگی وجود دارد. مدل آشفتگی‌ای که بتواند برای تمام حالات و مسائل مختلف به‌کار رود وجود ندارد. انتخاب مدل آشفتگی به ملاحظاتی مانند فیزیک جریان، تجربه‌ی شبیه‌سازی، میزان دقت مورد نیاز، قدرت منابع محاسباتی و زمان موجود برای انجام محاسبات، وابسته است. در مواردی که دارای نویز پهن باند هستند، مقادیر آشفتگی آماری که به‌راحتی قابل محاسبه از معادلات RANS[1] می‌باشند، می‌توانند در ارتباط با همبستگی‌های نیمه‌تجربی و هماهنگی‌های صوتی مورد استفاده قرار گیرند تا برخی از منابع نویز پهن باند را آشکار سازد.

مدل‌های منبع نویز پهن باند نیازی به راه‌حل‌های گذرا برای معادلات دینامیک سیال حاکم ندارند. همه مدل‌های منبع نیازمند مدل‌های معمول RANS می‌باشند، مانند میدان متوسط سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال (ε). بنابراین استفاده از مدل منبع نویز پهن باند نیاز به منابع محاسباتی بالا ندارد. به‌عنوان مثال Hambric و همکاران و Khondge از شبیه‌سازی RANS برای آیروآکوستیک پهن باند استفاده کرده‌اند.

صدای خارج از میدان که توسط جریان لایه مرزی آشفته بر روی یک جسم جامد در اعداد ماخ پایین تولید می‌شوند، اغلب دارای پتانسیل مطالعات کاربردی است.

انتگرال کرل بر اساس قیاس صوتی می‌تواند برای تقریب سهم محلی از سطح بدنه به کل قدرت صوتی استفاده شود. به این ترتیب، می‌توان با انتگرال کرل شروع کرد:

$$p'^{(\vec{x},t)} = \frac{1}{4\pi\alpha_0}\int \frac{(x_i - y_i)}{r^2}\frac{\partial p}{\partial t}(\vec{y},\tau)dS(\vec{y}) \qquad (۶)$$

در اینجا τ نشان‌دهنده زمان انتشار (τ = t-r / a0)، و S یک سطح ادغام است. با استفاده از این، شدت صدا در میدان دور می‌تواند توسط رابطه (۷) تقریب شود.

$$I(\vec{y}) \equiv \frac{A_c(\vec{y})}{\rho_0\pi\alpha_0^3}\overline{\left[\frac{\partial p}{\partial t}\right]^2} \qquad (۷)$$

جایی که Ac یک منطقه همبستگی است، $r \equiv |\vec{x}-\vec{y}|$ و cosθ زاویه‌ی بین $|\vec{x}-\vec{y}|$ و جهت نرمال دیواره است.

کل توان صوتی منتشر شده از سطح کل بدنه را می‌توان از رابطه (۸) به‌دست آورد.

$$P_A \approx \frac{1}{\rho_0\alpha_0}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\overline{p'^2}r^2\sin\theta d\theta d\Psi = \int_S I(\vec{y})ds(\vec{y}) \qquad (۸)$$

که در آن:

$$I(\vec{y}) \equiv \frac{A_c(\vec{y})}{\rho_0\pi\alpha_0^3}\overline{\left[\frac{\partial p}{\partial t}\right]^2} \qquad (۹)$$

که می‌تواند به‌عنوان سهم محلی در هر واحد سطح از سطح بدنه به کل توان صوتی تفسیر شود. مشتق مربع میانگین زمانی فشار سطح و منطقه‌ی همبستگی بیشتر از تقریب در مقادیر آشفتگی ترم‌ها مانند انرژی جنبشی توربولانس، نرخ اضمحلال و برش دیواره است. انسیس فلوئنت توان سطح صوتی را در واحدهای فیزیکی ($W.m^{-2}$) و dB گزارش می‌دهد.

1 -Reynolds Averaged Navier Stocks

شرایط مرزی

در شرایط مسئله، شرط مرزی نوع "سرعت ورودی" برای ورودی و "فشار خروجی" برای خروجی اعمال می‌گردد. هم‌چنین از قاب مرجع چندگانه[1] برای اعمال حرکت چرخشی پروانه بهره گرفته شد. شرایط ترمودینامیکی در این مرزها باید در نظر گرفته شود (با توجه به مقادیر در نظر گرفته شود). مقادیر برای فشارها، مقادیر کل برای سیال‌های ورودی و مقادیر استاتیک برای مقدار خروجی می‌باشد. دیواره‌های نازل و پوسته لوله به‌صورت سطوح غیرقابل نفوذ و بی‌دررو و بدون لزجت تعریف می‌شوند.

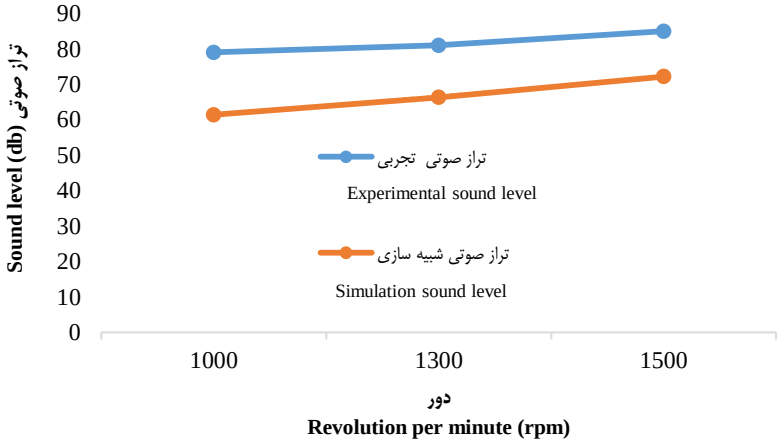
استقلال از شبکه

سه سطح مش‌بندی با تعداد ۲۱۷۸۵۶ در سطح ۱، ۴۵۳۲۸۴ در سطح ۲ و ۷۸۴۲۵۰ در سطح ۳ انجام گردید؛ با توجه به اختلاف بسیار کم مش سطح ۲ و ۳، مش سطح ۲ با ۴۵۳۲۸۴ مش به‌عنوان مش مورد نظر برای تحلیل انتخاب شد. معیار همگرایی برای تمامی مقادیر، 10^{-4} اتخاذ گردید.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی

صحت داده‌ها نتایج شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری شده بررسی گردید. در نتایج آزمایشگاهی تراز صوتی به همراه صوت محیط و اینورتور و تسمه پولی می‌باشد که در حدود db ۱۵ می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع نتایج شبیه‌سازی توافق خوبی با نتایج تجربی داشت (شکل ۵).



شکل ۵- اعتبارسنجی داده‌های تجربی و شبیه‌سازی

Fig. 5. Validation experimental and simulation data

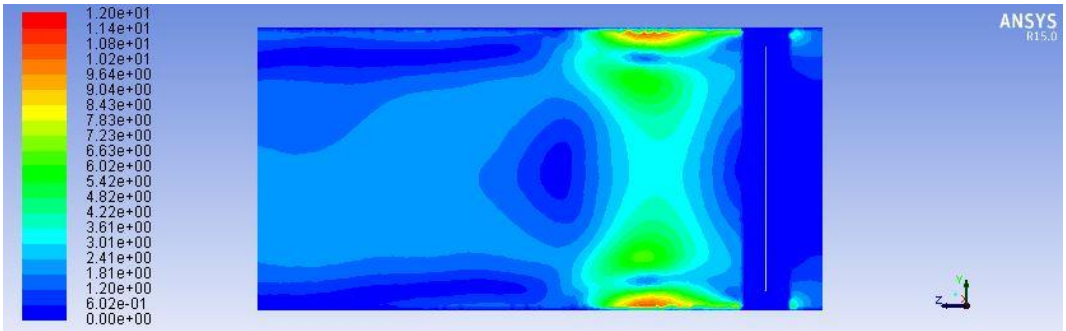
اندازه سرعت

اندازه سرعت یک پارامتر حیاتی در بحث‌های مربوط به فن است که به‌صورت جذری از مربع سرعت در سه جهت x، y و z تعریف می‌شود. اندازه سرعت همان‌طور که در شکل ۶ مشخص گردیده به سه بخش بالا دست، اطراف پروانه و پایین دست تقسیم شده است. در بخش بالا دست پروانه، با توجه به مکش پروانه سرعت هوا افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به پروانه این سرعت بیشتر خواهد شد. در بخش دوم که شامل پروانه می‌باشد، برای اجسامی که در حال دوران هستند، با افزایش شعاع (با توجه به سرعت چرخشی ثابت) اندازه سرعت نیز بیشتر خواهد شد؛ لذا بیشترین سرعت مروبط به نوک پره‌ها است. در بخش پایین دست پروانه با توجه به کاهش تاثیر پروانه بر روی مولکول‌های هوا و همچنین رفتار لایه‌ی مرزی در نزدیکی دیواره‌ها، سرعت کاهش خواهد یافت (شکل ۶).

فشار

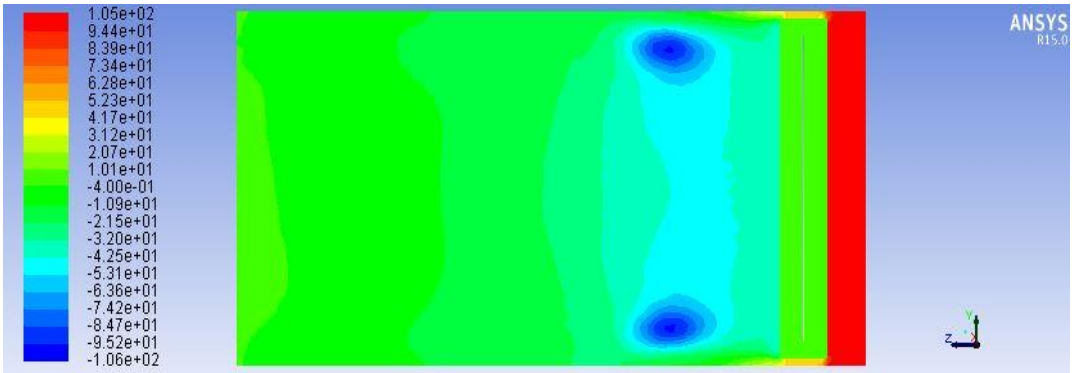
فشار کل به‌صورت مجموع فشار استاتیکی و فشار دینامیکی بیان می‌گردد. فشار دینامیکی به‌عنوان یکی از عامل‌های فشار کل طبق رابطه‌ی $p = \frac{1}{2}\rho v^2$ با سرعت محوری در ارتباط است و در نزدیکی دیواره‌ها این مقادیر تحت تاثیر لایه‌ی مرزی قرار گرفته و کاهش می‌یابند. شایان ذکر است که یکی از عوامل ایجاد نویز وجود اختلاف فشار زیاد می‌باشد. شکل ۷، کانتور دینامیکی سیستم را نشان می‌دهد.

1- Multi Refrence Frame (MRF)



شکل ٦- کانتور اندازه سرعت

Fig. 6. Contour of velocity magnitude

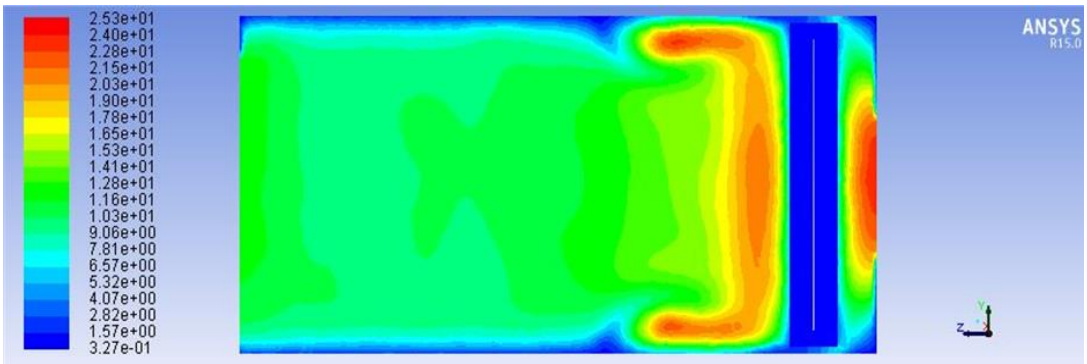


شکل ۷- کانتور فشار دینامیکی

Fig. 7. Contour of dynamic pressure

انرژی جنبشی و شدت توربولانس

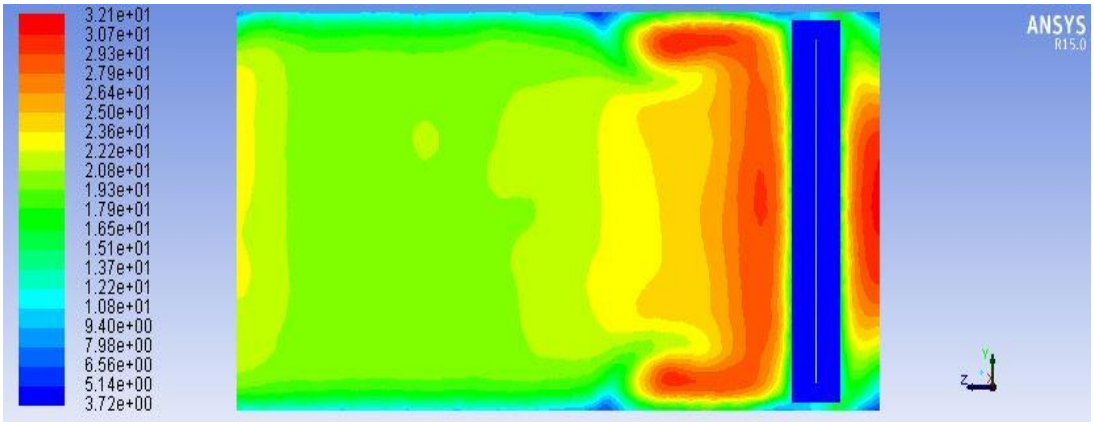
نویز می‌تواند از طریق حرکت سیال مغشوش یا از برخورد نیروهای آیرودینامیکی که با سطوح برخورد می‌کنند، به‌وجود آید. از آن‌جایی‌که انرژی جنبشی با سرعت متوسط جریان و شدت آشفتگی رابطه‌ی مستقیم دارد؛ می‌توان نتیجه گرفت که چون سرعت و شدت توربولانس در نوک پره‌ها بیشتر می‌باشد، در نتیجه باید در این مناطق انرژی جنبشی نیز بیشتر باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد که انرژی جنبشی توربولانس در مناطق مذکور دارای بیشترین مقدار می‌باشد. در پایین دست پروانه نیز مشاهده می‌گردد که انرژی جنبشی توربولانس نسبتاً بالایی ایجاد شده است که این امر به دلیل وجود گردابه‌های جریان که در اثر دوران پروانه و وجود فشار مثبت و منفی (فشار منفی در اثر مکش مرکز پروانه) پدیدار گشته است، می‌باشد. اختلاف فشار بالا در دو طرف ذرات سیال باعث ایجاد جریان چرخشی در ذرات شده که این حرکت چرخشی بر ذرات مجاور تاثیر گذاشته و باعث تشکیل گردابه می‌شود. گردابه باعث ایجاد جریان آشفته در آن منطقه شده و شدت آشفتگی و سرعت سیال افزایش خواهد یافت، در نتیجه‌ی این تاثیرها، بر انرژی جنبشی توربولانس در این مناطق نیز افزوده خواهد شد.



شکل ۸- کانتور انرژی جنبشی توبولانس

Fig. 8. Contour of tubulence kinetic energy

شدت توربولانس متاثر از سرعت می‌باشد و در مناطقی با سرعت زیاد شدت توربولانس افزایش می‌یابد. طبق شکل ۹، بیشترین شدت آشفتگی در نزدیکی لبه‌های پره با توجه به‌وجود سرعت‌های بالاتر می‌باشد. در نزدیکی دیواره‌ها به سبب وجود لایه‌ی مرزی سرعت کاهش یافته و بالطبع آن شدت توربولانس کاهش می‌یابد.

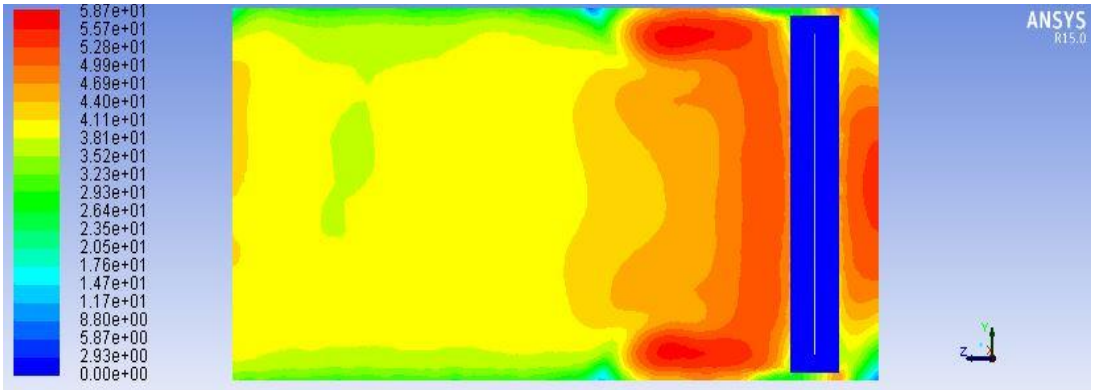


شکل ۹- کانتور شدت توربولانس

Fig. 9. Contour of turbulence intensity

تراز توان صوتی

در ایجاد نویز عوامل متعددی دخیل هستند؛ چنان‌چه که در بالا نیز ذکر گردید اختلاف فشار بالا در محدوده‌ای مشخص، سیال آشفته و گردابه باعث ایجاد نویز می‌گردند. شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد که بیشترین نویز در مناطقی ایجاد شده که این عوامل نیز بیشترین مقدار خود را دارا هستند. ماکزیمم نویز تولید شده در مناطق نوک پره‌ها به علت سرعت زیاد آن که باعث انرژی جنبشی و شدت توربولانس بیشینه خواهد شد، در مناطق پایین دست نیز به دلیل وجود اختلاف فشار زیاد و وجود گردابه و همچنین انرژی جنبشی و شدت توربولانس زیاد در این مناطق می‌باشد.



شکل ۱۰- کانتور تراز توان صوتی

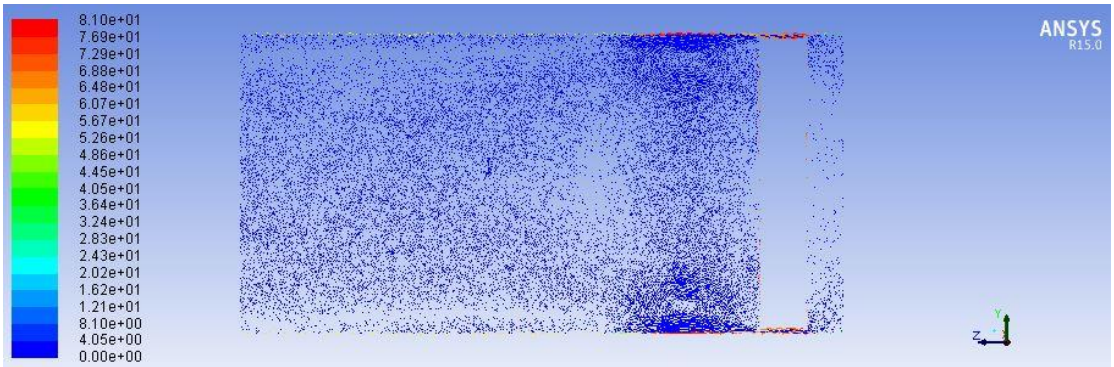
Fig. 10. Contour of sound power level

توان صوت سطح

توان صوتی سطح بر حسب وات بر متر مربع بیانگر سهم محلی در هر واحد سطح از سطح بدنه به کل توان صوتی است. شکل ۱۱ جزییات بیشتری از توزیع توان صوتی سطح را ارائه می‌دهد. هم‌چنین بردارهای جهت‌دار تراز توان صوت سطح و تراز توان صوتی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

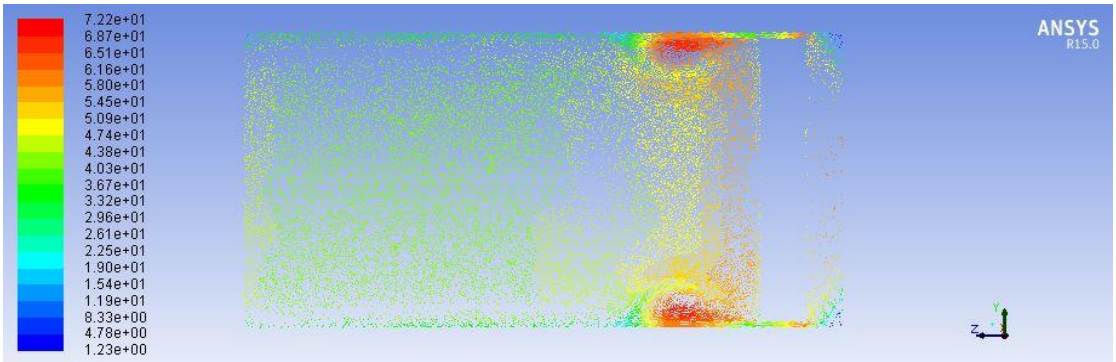
شکل ۱۱- کانتور توان صوت سطح

Fig. 11. Contour of surface sound power



شکل ۱۲- بردارهای جهت‌دار تراز توان صوت سطح

Fig. 12. Velocity vector of surface sound power level



شکل ۱۳- بردارهای جهت‌دار تراز توان صوتی

Fig. 13. Velocity vector of sound power level

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که ارزیابی عددی آکوستیکی با استفاده از نویز پهن باند عملکرد فن را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند و نتایج آن توافق خوبی با تاثیرات جریان بر نویز دارد. افزایش شناخت از عوامل و تاثیرات آن‌ها بر روی سطح سر و صدای پروانه می‌تواند برای کاهش تاثیرات نویز در توربوماشین‌ها کمک کند. استفاده از شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی و کاهش نویز علاوه بر صرفه‌جویی زمان باعث کاهش چشمگیری در هزینه‌ها نسبت به استفاده از روش‌های مستقیم و طراحی‌های مکانیکی به‌صورت فیزیکی می‌گردد. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی عددی آکوستیک و مدل نویز پهن باند توانایی خوبی برای تحلیل نویز در ماشین‌های دوار و فن‌ها برخوردار می‌باشد.

References

1. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November 2013
2. de Jong, A., and J., Golliard. 2013. Towards a universal scaling for broadband turbulent noise in internal flow devices. In ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp.V014T15A019-V014T15A019). American Society of Mechanical Engineers.
3. De Villiers, E. 2007. The potential of large eddy simulation for the modelling of wall bounded flows (Doctoral dissertation, University of London).
4. Fedala, D., S. Kouidri, F. Bakir, and R. Rey. 2007. Modelling of broadband noise radiated by an airfoil-application to an axial fan. International Journal of Vehicle Noise and Vibration 3: 106-117.
5. Horváth, C., and J. Vad. 2009. Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan rotor cascades. In Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09), Budapest, Hungary, 682-689.
6. Hubbard, H. H. 1991. Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and practice. volume 1. noise sources (No. NASA-L-16926-VOL-1). National Aeronautics And Space Admin Langley Research Center Hampton Va.
7. Majander, P., and T. Siikonen. 2002. Evaluation of Smagorinsky-based subgrid-scale models in a finite-volume computation. International Journal for Numerical Methods in Fluids 40: 735-774.
8. Nadi, F., S. A. Mehdizadeh, and U. N. Zonuz. 2017. Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network. Journal of Agricultural Machinery 7 (1): 298-311. (In Farsi).
9. Rezvanivandefanayi, A., and A. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator, International Journal of Food Engineering 11: 71-77.
10. Roshko, A. 1961. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. Journal of Fluid Mechanics 10: 345-356.
11. Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. Monthly Weather Review 91: 99-164.
12. Wang, Y. P., J. Chen, H. C. Lee, and K. M. Li. 2012. Accurate simulations of surface pressure fluctuations and flow-induced noise near bluff body at low mach numbers. In The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 255-264

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۶۴-۲۵۵

Aero-acoustical Study of Axial Fan using Computational Fluid Dynamics

B. Sabralilou[1], A. Mohebbi[2*], E. Akbarian[3], A. Rezvanivand fanaei[4]

Received: 26-08-2018
Accepted: 05-01-2019

Introduction

The issue of noise pollution is one of the concerns of most societies and industries because of their relationship to the environmental comfort of life or work of people are paying attention. The Aero-acoustics not only because of government regulations on the noise pollution, but also due to the increasing demand of the people's living standards and create a safe environment for farm animals is considered important. At the same time, products with high aero-acoustic performance will attract a lot of customers, which is in the interest of the global economy. Reducing current noise is often accompanied by a reduction in energy costs, resulting in durability of structures and improved product quality.

Materials and Methods

Sound measurements were carried out at the wind tunnel in Tabriz Tractor Engineers Company. Using the measurements performed by the instrument, the sound levels were measured at different periods of the fan. In many practical applications that include turbulent flow, no noise has any specific tone and the sound energy is continuously distributed over a wide range of frequencies. In cases where broadband noise is present, statistical disturbance values easily calculated from the RANS equations can be used in conjunction with semi-experimental correlations and audio coordination to reveal some broadband noise sources.

Based on the problem, the boundary condition is the type of "input velocity" for the input and "output pressure" for the output. It was also used to move the mesh to apply the rotary motion of the fan. The thermodynamic conditions at these boundaries should be considered.

Results and Discussion

The accuracy of the simulation results data was verified with the measured data. In the laboratory results, the audio level is accompanied by an audio environment and an inverter and a belt that is about 15 db. With this in mind, the simulation results had a good agreement with experimental results.

The velocity is a critical parameter in fan-related discussions. In the upper part of the fan, the speed of the air increases as the fan sucks, and this speed will increase as the fan approaches. In the second part, which includes the fan, for speeding objects, the speed will increase as the radius increases (due to the constant rotational speed), so the maximum speed will be at the tip of the blades. In the lower part of the fan, the speed will decrease as the fan impact decreases on the air molecules as well as the boundary layer behavior near the walls.

As the speed and intensity of the turbulence are higher at the tip of the blades, hence the kinetic energy of these regions must also be higher. The kinetic energy of the turbulence in these areas is the highest. At the bottom of the fan, it is also observed that the kinetic energy of the turbulence has been relatively high, due to the existence of flow vortices that emerge from the fan period and the presence of positive and negative pressure (negative pressure due to suction of the fan center). The high pressure difference on both sides of the fluid particles causes a rotating flow in the particles, which affects the adjacent particles and causes vortex formation.

Conclusions

The results showed that the numerical acoustic evaluation simulates the performance of the broadband band with good results and has good agreement with the effects of the current on the noise. Increasing the recognition of the factors and their effects on the fan noise level can help to reduce the noise effects of turbo-machines. Using numerical simulations in predicting and reducing noise, in addition to time saving, dramatically reduces costs by using direct methods and mechanical design physically. With regard to all aspects and calculations, it can be concluded that acoustic numerical simulation and broadband noise model have a good ability to analyze noise in fans and rotary machines.

Keywords: Broadband noise, Computational Fluid Dynamics, Noise, Radiator fan

1- MSc. student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
2- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
3- PhD. student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
4- PhD. student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.mohebbi@urmia.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 265-271

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۷۱-۲۶۵

پردازش سیگنال‌های صوتی خروس به‌منظور تشخیص بلوغ جنسی و پیوبرتی

محمد یاوری[۱]، احمد بناکار[۲*]، محسن شرفی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱

چکیده

پرندگان نابالغ با گذر از دوران پیوبرتی به بلوغ جنسی می‌رسند که با تغییرات صوتی صدا همراه است و بعد از دوران بلوغ، ساختار صوتی تکامل می‌یابد. هدف اصلی این پژوهش تشخیص پیوبرتی و بلوغ جنسی خروس‌های مادر از روی سیگنال‌های صوتی می‌باشد. برای انجام این کار خروس‌ها به سه دسته خروس‌های نابالغ، خروس‌های در دوران پیوبرتی و خروس‌های بالغ تقسیم شدند. معیارهای نخستین انزال و غلظت اسپرم به‌ترتیب برای پیوبرتی و بلوغ جنسی استفاده شدند. پس از ضبط سیگنال‌های صوتی، ضرایب کد پیش‌بینی خطی (LPC) از حوزه فرکانس به‌عنوان ویژگی‌های صوتی استخراج شدند. این ویژگی‌های صوتی به‌عنوان ورودی‌های طبقه‌بند k نزدیک‌ترین همسایه (K-NN) استفاده شدند و خروجی طبقه‌بند سه دسته‌ی خروس‌های نابالغ، خروس‌های در دوران پیوبرتی و خروس‌های بالغ می‌باشد. نتایج مقادیر درستی، حساسیت و دقت به‌ترتیب ۹۸/۷٪، ۹۸/۳٪ و ۹۸/۸٪ را برای طبقه‌بندی خروس‌ها نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بلوغ جنسی، پیوبرتی، کد پیش‌بینی خطی (LPC)، k- نزدیک‌ترین همسایه (K-NN)، ویژگی‌های صوتی

مقدمه

بلوغ جنسی، خلاصه‌ای از تغییرات مرفولوژیکی و فیزیولوژیکی است که در خروس از سن ۱۶ تا ۲۴ هفتگی به اوج خود می‌رسد. در پرندگان ماده شروع اولین تخم‌گذاری را به‌عنوان بلوغ جنسی در نظر می‌گیرند، این در حالی است که نمی‌توان زمان دقیق بلوغ جنسی در پرنده نر را تعیین کرد (Sturkie, 2012). مرحله‌ی بین مشاهده اولین علائم تولیدمثلی تا رسیدن به بلوغ، پیوبرتی[۴] نام دارد. واژه پیوبرتی به‌معنای سنی است که در آن برای نخستین بار، امکان تولیدمثل فراهم می‌شود، اما فرآیندهای تولید مثل هنوز به تکامل نرسیده‌اند؛ بنابراین شانس آبستنی در این سن بسیار اندک است و باروری بهینه نخواهد بود. پیوبرتی را می‌توان به دوره نوجوانی در انسان تشبیه کرد. با گذشت زمان دستگاه تولیدمثل به تکامل می‌رسد تا این‌که باروری بهینه شود؛ این سن را بنا به تعریف فیزیولوژیک، بلوغ جنسی[۵] می‌گویند. در واقع بلوغ جنسی زمانی است که حیوان در ظرفیت تولیدمثلی کامل خود قرار دارد.

پرندگان نابالغ دارای شباهت صوتی در صداهای تولید شده هستند (Yoneda and Okanoya, 1991) . این در حالی است که بعد از بلوغ جنسی ساختار صوتی صداهای پرندگان تغییر می‌کند و در گونه‌های نر و ماده متفاوت است (Okanoya and Kimura, 1993). پیدایش صفات ثانویه جنسی، در زمان بلوغ جنسی ناشی از ترشحات هورمونی بیضه‌ها است. تولید هورمون در بیضه در هر مرحله از بلوغ جنسی، به اثر متقابل محور هیپوتالاموس، هیپوفیز و بیضه وابسته است (Sturkie, 2012) با شروع پیوبرتی، تراوش گنادتروپ‌های[۶] LH[۷] و FSH[۸] از بخش هیپوفیز مغز به جریان خون افزایش می‌یابد. افزایش تراوش LH در نر، افزایش تراوش تستوسترون[۹] از لایدیگ[۱۰] بیضه را به همراه خواهد داشت که موجب بروز صفات ثانویه جنسی و پیدایش کامل ویژگی‌های صدای خروس و دیگر پرندگان اهلی می‌شود (Beani *et al.*, 2000; Beani *et al.*, 1995).

تغییرات در صدای حیوانات و پرندگان و همچنین کیفیت‌های صوتی می‌تواند سرنخ‌هایی برای چگونگی استفاده از صدای حیوانات باشد. تحقیقات سیگنال‌های زیستی به‌شدت به توانایی این تغییرات بستگی دارد. مشخص کردن صدا معمولاً نه‌تنها توصیف خواص آن‌هاست، بلکه شرح خواص آن‌ها نسبت به صداهای دیگر نیز است. این فرآیند می‌تواند شامل مرتب‌سازی صدا بر اساس نحوه و زمان تولید، شباهت‌های ادراکی یا صوتی، تفاوت‌های بین صداها و زمینه‌های کاربردی باشد که به‌وسیله پردازش سیگنال‌های زیستی و طبقه‌بندی خودکار سیگنال‌ها صورت می‌گیرد. لی و همکاران (۲۰۱۵)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار، گروه پرورش و مدیریت طیور، دانشگاه تربیت مدرس
(*- نویسنده مسئول: Email: ah_banakar@modares.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.75264

4- Puberty
5- Sexual maturity
6- Gonadotropins
7- Luteinizing Hormone
8- Follicle Stimulating Hormone
9- Testosterone
10- Leydig cells

با استفاده از ویژگی‌های صوتی و ماشین بردار پشتیبان به تشخیص بیماری خوک پرداختند (Lee *et al.*, 2015). وندرمولن و همکاران (۲۰۱۶) پژوهشی در قالب تشخیص زودرس بیماری‌های تنفسی گوساله با استفاده از طبقه‌بندی خودکار صدای سرفه انجام دادند (Vandermeulen *et al.*, 2016). سرشماری خودکار صوتی پرندگان یکی دیگر از تکنولوژی‌های کارآمد بر اساس پردازش سیگنال‌های زیستی و تکنیک‌های طبقه‌بندی خودکار است. گونه‌های بسیار زیادی وجود دارد که بسیاری از آن‌ها در معرض خطر هستند و سرشماری دقیق آن‌ها با استفاده از روش‌های سنتی دشوار و یا غیرممکن است. آدی و همکاران (۲۰۱۰) الگوریتمی مبتنی بر خوشه‌بندی با استفاده از مدل‌های پنهان مارکوف (HMM[1]) و مدل‌های مخلوط گاوس (GMM[2]) ارائه کردند که دقت برآورد تخمینی جمعیت را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Adi *et al.*, 2010). دسته‌بندی صدای پرندگان به‌وسیله شبکه عصبی مصنوعی MLP[3] به‌منظور بررسی‌های رفتاری، از دیگر کاربردهای طبقه‌بندی سیگنال‌های زیستی به‌شمار می‌آید (Dawson *et al.*, 2006). بناکار و همکاران (۲۰۱۶) به روشی هوشمند به‌منظور تشخیص توأم بیماری‌های نیوکاسل، آنفولانزا و برونشیت جوجه مرغ از روی سیگنال‌های صوتی به‌وسیله طبقه‌بندی خودکار سیگنال‌های صوتی پرداختند (Banakar *et al.*, 2016). ایشان در ادامه، امکان تشخیص این بیماری‌ها را با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی قلب نیز بررسی کردند (Sadeghi *et al.*, 2017).

K نزدیک‌ترین همسایه (K-NN) (Peterson *et al.*, 2005) یک روش طبقه‌بندی غیر پارامتری است. K-NN در مشکلات مختلف تحلیل صدا مورد استفاده قرارگرفته است و با توجه به مجموعه‌ای از پارامترها، نزدیک‌ترین همسایه در میان داده‌های آموزشی را پیدا می‌کند. بدین منظور از دسته‌هایی از همسایه‌ها برای تعیین کلاس ورودی مشخص استفاده می‌کند. طبقه‌بند K-NN یک روش ساده و مؤثر برای طبقه‌بندی در زمینه‌های تشخیص الگو، یادگیری ماشین، استخراج داده‌ها و بازیابی اطلاعات است. این موفقیت در بسیاری از برنامه‌های دنیای واقعی مورد استفاده قرارگرفته است و ازجمله در طبقه‌بندی سیگنال‌های صوتی پرنده و قورباغه دقت بالایی داشته است (Jaafar *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2011).

صداهای پرنده به‌طور عمده توسط جعبه صوتی تولید می‌شوند (Brackenbury, 1978) این در حالی‌است که انسان‌ها با برانگیختن تارهای صوتی صحبت می‌کنند. صدای تولیدشده توسط پرنده شبیه نحوه تولید گفتار انسان است؛ بنابراین، تکنیک‌هایی که برای تشخیص گفتار انسان مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتمالاً برای طبقه‌بندی صدای پرندگان نیز مفید واقع شوند. برای گفتار انسان، کد پیش‌بینی خطی (LPC[4]) تقریب خوبی از پاکت طیفی یا فرکانسی آهنگ صوتی فراهم می‌کند. LPC نشان‌دهنده یک تکنیک پردازش سیگنال کاربردی در فشرده‌سازی سیگنال و ترکیب گفتار است (Tremain, 1982). ضرایب LPC برای تشخیص گفتار (RabinerJuang, 1993) و نیز برای تمایز بین واج‌های صوتی استفاده می‌شوند. ضرایب LPC به‌عنوان ویژگی صوتی در کاربردهای مختلف سیگنال‌های زیستی به‌منظور ورودی طبقه‌بند استفاده شده است و نتایج قابل‌قبولی را از خود نشان داده است (Juang and Chen, 2007; Lee *et al.*, 2006; Mitrovic *et al.*, 2006).

دوره پیوبرتی یکی از مهم‌ترین دوره‌ها در واحدهای پرورش مرغ مادر می‌باشد. چراکه چگونگی تغذیه خروس‌ها در این سن، موجب تأخیر و یا تسریع زمان بلوغ جنسی می‌شود (Nutrition, 1984; Sturkie, 2012). در واحدهای پرورش مرغ مادر انتخاب خروس‌های بالغ برای اضافه شدن به گله‌های مرغ مادر به‌صورت تجربی و بر اساس صفات فیزیکی بدن از قبیل اندازه تاج، رنگ تاج، وزن بدن و غیره است که این کار فرآیندی با دقت و راندمان پایین و همچنین نیازمند فرد آموزش‌دیده و خبره می‌باشد. در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت دوره پیوبرتی و بلوغ جنسی به تشخیص این دو دوره از روی سیگنال‌های صوتی پرداخته شد. بدین منظور یک طبقه‌بند سه کلاسه تعریف و بر اساس ضرایب LPC خروس‌ها به سه دسته‌ی نابالغ، در دوره‌ی پیوبرتی و بالغ تقسیم شدند.

مواد و روش‌ها

مواد و ماده آزمایش

در طی این پژوهش تعداد ۵۰ قطعه خروس مادر نژاد راس[5] از سن ۱۰ تا ۲۴ هفتگی در مرکز تحقیقات پرورش طیور دانشگاه تربیت مدرس نگه‌داری شدند. خروس‌ها در سیستم پن نگهداری شدند و تحت برنامه نوری ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی قرار گرفتند. دمای سالن‌ها در حدود ۲۱ درجه سلسیوس با رطوبت نسبی تقریباً ۶۰ درصد حفظ شد (Sturkie, 2012).

به‌منظور تعیین معیار بلوغ جنسی و پیوبرتی از خروس‌ها به طریق مالش پشتی- شکمی اسپرم‌گیری شد (Lake, 1957). در کلیه مراحل جمع‌آوری و ارزیابی منی، دمای محیط و وسایلی که با منی در تماس بودند در حدود ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس که دمای بهینه برای فعالیت اسپرم پرندگان هست، حفظ شد (Sturkie, 2012). از نقطه نظر فیزیولوژیکی، زمانی‌که اسپرم در لوله‌های اسپرم‌ساز دیده می‌شود آغاز

1- Hidden Markov Models
2- Gaussian Mixture Models
3- Multi-Layer Perceptron
4- Linear predictive coding
5- Ross

پیوبرتی در پرنده نر خواهد بود (Laron *et al.*, 1980). در این پژوهش نخستین انزال مایع منی از خروس به‌عنوان معیار پیوبرتی تعیین شد؛ اما باید توجه داشت که نخستین انزال تعداد کافی اسپرم برای این‌که بتواند به باروری بینجامد ندارد. معیار بلوغ جنسی با غلظت اسپرم تعیین شد که توسط دستگاه آنالیز اسپرم CASA[1] اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱). نهایتاً سیگنال‌های صوتی با معیار نخستین انزال و غلظت ۲ million sperm/ml به سه گروه سیگنال‌های خروس‌های نابالغ، خروس‌های در دوره پیوبرتی و بالغ برچسب گذاری شدند.

ضبط و تجزیه‌وتحلیل صوتی

سیگنال‌های صوتی خروس‌ها هر هفته یکبار توسط یک میکروفن با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱ در یک باکس شیشه‌ای دوجداره (۵۰ × ۵۰ × ۶۰ سانتی‌متر) ضبط شد (شکل ۲). هدف اصلی استفاده از باکس جلوگیری از اثرگذاری نویز موجود در محیط بر روی سیگنال‌های صوتی است چراکه در غیر این صورت با توجه به مشخصه‌های صدای نرمال خروس، سیگنال صوتی ضبط شده غیرقابل اعتماد است. شیشه‌ای بودن باکس علی‌رغم کاهش استرس در خروس‌ها باعث فراهم‌سازی نور مورد نیاز در داخل باکس شد؛ زیرا پرندگان در تاریکی و شدت نور کم تمایلی به تولید صدا ندارند. پس از نصب میکروفن در فاصله ۶۰ سانتی‌متری از کف باکس و قرار دادن هر یک از خروس‌ها در داخل باکس سیگنال‌های صوتی ضبط و به‌صورت فایل wav ذخیره گردید. کلیه مراحل پیش‌پردازش، پردازش و طبقه‌بندی سیگنال‌های صوتی خروس‌ها توسط نرم‌افزار Matlab® 2017a انجام شد.

شکل ۱– دستگاه آنالیز اسپرم

Fig. 1: Computer-Assisted Sperm Analysis (CASA)

استخراج ویژگی

ویژگی‌های صوتی مختلفی در کاربردهای متفاوت استفاده شده‌اند. ضرایب LPC که از ویژگی‌های حوزه فرکانس است، به‌عنوان یکی از ویژگی‌های صوتی در پردازش گفتار انسان، تجزیه و تحلیل موزیک و تشخیص صداهای محیط استفاده شده است (Khoshnam *et al.*, 2017; Zamani *et al.*, 2016). ایده اصلی مدل LPC این است که یک نمونه گفتار داده شده در زمان n، S(n)، می‌تواند به‌عنوان تقریبی از ترکیب خطی نمونه‌های گفتاری قبلی p، باشد، به‌طوری‌که:

$$S(n) = \sum_{i=1}^{P} a_i s(n-i) + Gu(n) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $u(n)$ یک تحریک[2] نرمال شده است و G ضریب تحریک است. پارامترهای $a_1 \dots a_P$ ضرایب LPC و P سفارش پیش‌بینی[3] نامیده می‌شوند. ضرایب LPC را می‌توان با تجزیه و تحلیل autocorrelation و روش Durbin یافت (RabinerJuang, 1993). از ضرایب LPC به‌طور مستقیم به‌عنوان ویژگی‌های تشخیص بلوغ جنسی استفاده شد.

طبقه‌بندی

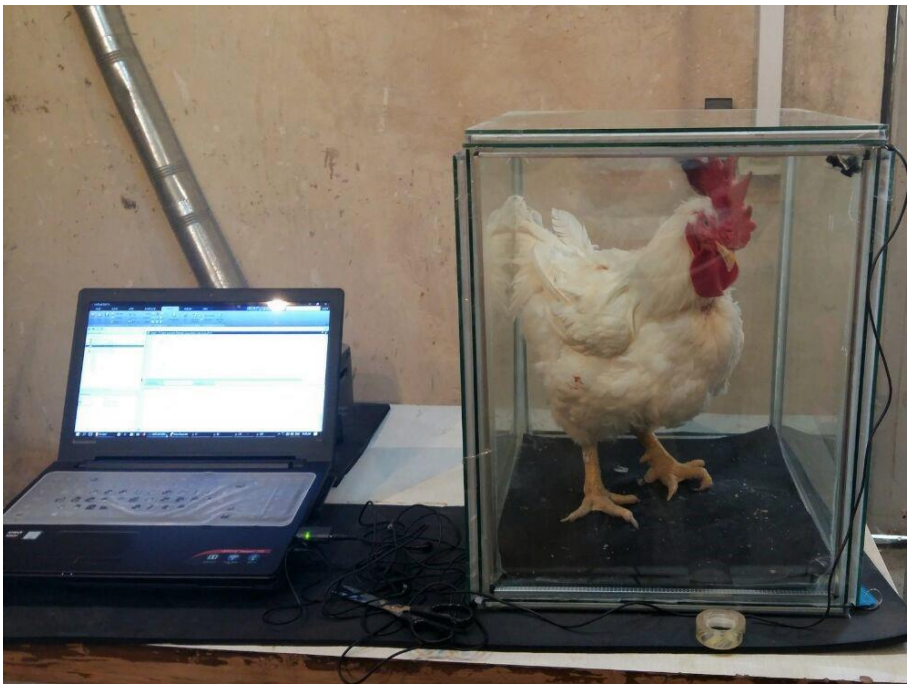
طبقه‌بندی K-NN یک روش ساده و مؤثر برای طبقه‌بندی در زمینه‌های تشخیص الگو، یادگیری ماشین، استخراج داده‌ها و بازیابی اطلاعات است. عملکرد K-NN بدین شکل است که به نمونه‌های ناشناخته با توجه به فاصله‌شان تا طبقه شناخته‌شده وزن‌دهی می‌کند و به نمونه‌های نزدیک‌تر وزن بیشتری می‌دهد. فاصله یا شباهت بین نمونه‌ها معمولاً توسط فاصله اقلیدسی[4] تعیین می‌شود. فاصله اقلیدسی

1- Computer-Assisted Sperm Analysis (CASA)
2- Excitation
3- Prediction order
4- Euclidean distance

اختلاف یا فاصله $d(i,j)$ بین نمونه‌های i و j است که از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$d(i,j)=\sqrt{\left(\frac{|x_{i1-j1}|}{R_1}\right)^2+\left(\frac{|x_{i2-j2}|}{R_2}\right)^2+\cdots+\left(\frac{|x_{iP-jP}|}{R_P}\right)^2} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $R_f=max_h x_{hf}-min_h x_{hf}$ که f ویژگی‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد. x_i سیگنال صوتی iام و P سیگنال ناشناخته می‌باشد.



شکل ۲- نحوه ضبط صدای خروس

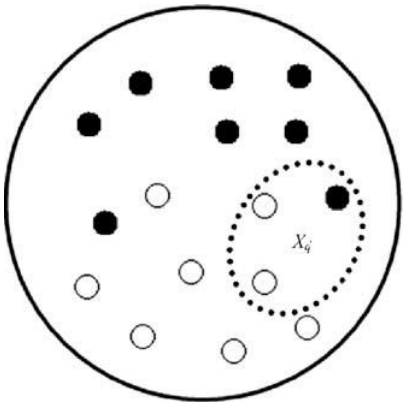
Fig. 2. Recording the rooster sound

جدول ۱- مشخصات میکروفن

Table 1- Microphone specifications

Diameter	9.7 × 6.7 mm
Impedance	کمتر از 2.2 kΩ
Frequency range	100–16 kHz
Sensitivity	−58 dB ± 3 dB
Sampling rate	44100 Hz

مرحله آموزش الگوریتم K-NN شامل ذخیره‌سازی بردارهای ویژگی و برچسب‌های کلاس نمونه‌های آموزشی می‌باشد. در مرحله طبقه‌بندی، همان ویژگی‌های نمونه‌های آزمون که کلاس آن‌ها شناخته نشده است، محاسبه می‌شوند. فاصله‌ی بردار جدید از تمام بردارهای ذخیره شده محاسبه شده و نزدیک‌ترین نمونه‌ها انتخاب می‌شوند. شکل ۳ الگوریتم K-NN را نشان می‌دهد. در اینجا نقاط آموزش توسط دایره توخالی و نقاط شناخته‌شده توسط الگوریتم با دایره توپر نمایش داده شده‌اند. هنگامی‌که یک نقطه جدید x_p مورد پرسش قرار می‌گیرد، نزدیک‌ترین سه‌نقطه با استفاده از اندازه‌گیری فاصله شهر- بلوک[1] پیدا می‌شود. دونقطه از نزدیک‌ترین نقاط، دایره توخالی است و تنها یک دایره توپر وجود دارد بنابراین x_p به‌عنوان دایره توخالی طبقه‌بندی می‌شود.



شکل ۳- یک مثال از الگوریتم K-NN

Fig. 3. An example of K-NN algorithm

1- City-block distance

صحت طبقه‌بندی را می‌توان با محاسبه تعداد نمونه‌های کلاس درست شناخته‌شده (مثبت‌های درست tp)، تعداد نمونه‌های به‌درستی شناخته‌شده که متعلق به کلاس نیستند (منفی‌های درست fp) و نمونه‌هایی که هر دو به کلاس اشتباه اختصاص داده‌شده (مثبت‌های نادرست tn) یا به‌عنوان نمونه‌های کلاس شناخته‌شده نیستند (منفی‌های نادرست fn) پس از طبقه‌بندی ارزیابی کرد. در طبقه‌بندی چند کلاسه[1]، دقت[2]، حساسیت[3] و درستی[4] به‌صورت روابط (۳) تا (۵) تعریف می‌شوند (Sokolova *et al.*, 2009):

$$\text{Precision} = \frac{tp}{\text{tp} + \text{tn}} \quad (۳)$$

$$\text{Recall} = \frac{tp}{\text{tp} + \text{fn}} \quad (۴)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{tp + tn}{tp + tn + fn + fp} \quad (۵)$$

نتایج و بحث

شکل ۴ نتایج ضرایب LPC را برای پانزده سفارش پیش‌بینی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل عملکرد مشابهی با بیش از دوازده سفارش مشاهده می‌شود، بنابراین دوازده سفارش برای کاهش ابعاد ورودی انتخاب شد.

شکل ٤- نتایج تحلیل LPC
Fig.4. LPC analysis results

جدول ۲ نتایج طبقه‌بند K-NN را با ورودی ضرایب LPC نشان می‌دهد. مقادیر درستی، حساسیت و دقت به‌ترتیب ۹۸/۷٪، ۹۸/۳٪ و ۹۸/۸٪ به‌دست آمده‌اند که دقت‌های به‌مراتب بالایی نشان می‌دهند. ضرایب LPC نشان‌دهنده‌ی سازه‌های[5] یک سیگنال گفتار است (Tremain, 1982). سازه‌ها، دستگاه صوتی (دهان، گلو) صحبت‌کننده را با رزونانس‌ها توصیف می‌کنند؛ بنابراین با توجه به تغییر و تکامل جعبه صوتی خروس در طی دوران بلوغ (Sturkie, 2012) و تغییر در سازه‌های صوتی صدای خروس ضرایب LPC به‌عنوان ورودی‌های طبقه‌بند دقت بالایی از خود نشان می‌دهند.

جدول ۲- مقادیر دقت و حساسیت و درستی برای طبقه‌بند K-NN
Table 2- Precision, Accuracy and Recall values for K-NN classification

K-NN		
Precision	**Recall**	**Accuracy**
98.8%	98.3%	98.7%

K-NN با درستی ۹۸/۷ دقت بالایی از خود نشان داده است که می‌تواند ناشی از ساختار صوتی پرنده در طی دوران بلوغ باشد. دقت بالای K-NN می‌تواند ناشی از اختلاف شدید صدای خروس قبل و بعد از بلوغ جنسی باشد، چراکه این الگوریتم به ساختار محلی داده‌ها حساس است. خروس‌های نابالغ دارای ساختار صوتی مشابهی هستند که با شروع پیوبرتی و تراوش هورمون تستوسترون (Beani *et al.*, 1995) جعبه صوتی خروس، که بخشی از صفات ثانویه جنسی محسوب می‌شود نیز شروع به تغییر می‌کند. بعد از بلوغ جنسی، جعبه صوتی به تکامل رشدی رسیده است که این تکامل نیز باعث می‌شود ساختار صوتی خروس‌های بالغ شباهت زیادی به خود بگیرد. بنابراین با توجه به تشابه‌های صوتی خروس‌های بالغ با یکدیگر و نابالغ با یکدیگر و همچنین تغییرات مداوم و پی‌درپی جعبه صوتی در دوران پیوبرتی K-NN به‌وسیله ضرایب LPC قادر است دقت بالایی را در طبقه‌بندی خروس‌ها نشان دهد. در طبقه‌بندی K-NN، خروجی یک کلاس عضویت است و یک موضوع به‌وسیله رأی اکثریت از همسایگانش طبقه‌بندی می‌شود. طبقه‌بند K-NN در طبقه‌بندی و تشخیص سیلاب‌های صوتی قورباغه نیز دقت بالایی داشته است. که این ناشی از اختلاف قابل لمس سیلاب‌های صوتی صدای قورباغه است (Huang *et al.*, 2009). طبقه‌بند K-NN همچنین قادر است گونه‌های مختلف قورباغه را از روی ساختار صوتی با دقت بالایی طبقه‌بندی کند (Jaafar *et al.*, 2013) که خود ناشی از تفاوت ساختار صوتی در بین گونه‌های مختلف قورباغه می‌باشد. قدرت طبقه‌بند K-NN و همچنین دقت بالای آن به‌منظور طبقه‌بندی و تشخیص صدای قورباغه تنها ناشی از عملکرد طبقه‌بند نبوده و به انتخاب ویژگی‌های کارآمد نیز وابسته است (Han *et al.*, 2011) و انتخاب ویژگی‌هایی که بتواند تفاوت بین کلاس‌های طبقه‌بند را بیان کند تاثیر به‌سزایی در دقت طبقه‌بند دارد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر تشخیص بلوغ جنسی و پیوبرتی خروس‌ها با استفاده از سیگنال‌های صوتی آوازخوانی خروس بود. طبقه‌بند K-NN با ورودی ضرایب LPC، مقادیر درستی، حساسیت و

1- Multi-class classification
2- Precision
3- Recall
4- Accuracy
5- Formants

دقت به‌ترتیب ۹۸/۷٪، ۹۸/۳٪ و ۹۸/۸٪ توانست به‌خوبی خروس‌های نابالغ را از بلوغ‌های بالغ جدا کند. این نتایج حاکی از کارآیی استفاده از سیگنال‌های صوتی خروس برای جدا کردن خروس‌های نابالغ، خروس‌های در دوران پیوبرتی و خروس‌های بالغ می‌باشد.

References

1. Adi, K., M. T. Johnson, and T. S. Osiejuk. 2010. Acoustic censusing using automatic vocalization classification and identity recognition. The Journal of the Acoustical Society of America 127 (2): 874-883.
2. Banakar, A., M. Sadeghi, and A. Shushtari. 2016. An intelligent device for diagnosing avian diseases: Newcastle, infectious bronchitis, avian influenza. Computers and Electronics in Agriculture 127: 744-753.
3. Beani, L., G. Panzica, F. Briganti, P. Persichella, and F. Dessì-Fulgheri. 1995. Testosterone-induced changes of call structure, midbrain and syrinx anatomy in partridges. Physiology & Behavior 58 (6): 1149-1157.
4. Beani, L., F. Briganti, G. Campanella, C. Lupo, and F. Dessi-Fulgheri. 2000. Effect of androgens on structure and rate of crowing in the Japanese quail (Coturnix japonica). Behaviour 137 (4): 417-435.
5. Brackenbury, J. 1978. Respiratory mechanics of sound production in chickens and geese. Journal of Experimental Biology 72: 229-250.
6. Dawson, M. R., I. Charrier, and C. B. Sturdy. 2006. Using an artificial neural network to classify black-capped chickadee (Poecile atricapillus) call note types. The Journal of the Acoustical Society of America 119 (5): 3161-3172.
7. Han, N. C., S. V. Muniandy, and J. Dayou. 2011. Acoustic classification of Australian anurans based on hybrid spectral-entropy approach. 72 (9): 639-645.
8. Huang, C.J., Y.J. Yang, D.X. Yang, and Y. J. Chen. 2009. Frog classification using machine learning techniques. 36 (2): 3737-3743.
9. Jaafar, H., D. A. Ramli, and S. Shahrudin. 2013. MFCC based frog identification system in noisy environment. IEEE International conference on Signal and image processing applications (ICSIPA).
10. Juang, C.-F. and T.-M. Chen. 2007. Birdsong recognition using prediction-based recurrent neural fuzzy networks. Neurocomputing 71: 121-130.
11. Khoshnam, F., S. H. B. Bidgoly, M. Namjoo, and M. Doroozi. 2017. The effect of acoustic system variables on sound signals of Melon varieties. 7 (1): 126-139.
12. Lake, P. 1957. The male reproductive tract of the fowl. Journal of Anatomy 91 (1): 116.
13. Laron, Z., J. Arad, R. Gurewitz, M. Grunebaum, and Z. Dickerman. 1980. Age at first conscious ejaculation: a milestone in male puberty. Helvetica Paediatrica Acta 35: 13-20.
14. Lee, C. H., Y. K. Lee, and R. Z. Huang. 2006. Automatic recognition of bird songs using cepstral coefficients. Journal of Information Technology and Applications 1 (1): 17-23.
15. Lee, J., L. Jin, D. Park, Y. Chung, and H. H. Chang. 2015. Acoustic features for pig wasting disease detection. International Journal of Information Processing and Management 6 (1): 37.
16. Mitrovic, D., M. Zeppelzauer, and C. Breiteneder. 2006. Discrimination and retrieval of animal sounds. 12th International Multi-Media Modelling Conference .
17. National Research Council. 1984. Nutrient requirements of poultry. National Academies.
18. Okanoya, K., and T. Kimura. 1993. Acoustical and perceptual structures of sexually dimorphic distance calls in Bengalese finches (Lonchura striata domestica). Journal of Comparative Psychology 107 (4): 386.
19. Peterson, M. R., T. E. Doom, and M. L. Raymer. 2005. Ga-facilitated knn classifier optimization with varying similarity measures. IEEE Congress on Evolutionary Computation.
20. Rabiner, L. R., and B.-H .Juang. 1993. Fundamentals of speech recognition. PTR Prentice Hall Englewood Cliffs.
21. Sadeghi, M., A. Banakar, and A. J. C. Shushtari. 2017. Diagnosing avian Newcastle, Bronchitis and Influenza Diseases using heart sound signal and Support Vector Machine. Iranian Journal of Biosystems Engineering. 47: 587-601.
22. Sokolova, M., and G. Lapalme. 2009. A systematic analysis of performance measures for classification tasks. Information Processing & Management 45 (4): 427-437.
23. Sturkie, P. D. 2012. Avian physiology. Springer Science & Business Media.
24. Tremain, T. E. 1982. The Government Standard Linear Predictive Coding Algorithm: LPC-10. Speech Technology 40-49.
25. Vandermeulen, J., C. Bahr, D. Johnston, B. Earley, E. Tullo, I. Fontana, M. Guarino, V. Exadaktylos, and D. Berckmans. 2016. Early recognition of bovine respiratory disease in calves using automated continuous monitoring of cough sounds. Computers and Electronics in Agriculture 129: 15-26.
26. Yoneda, T., and K. Okanoya. 1991. Ontogeny of sexually dimorphic distance calls in Bengalese finches (Lonchura domestica). Journal of Ethology 9 (2): 41-46.
27. Zamani, M., M. Aboonajmi, and S. R. Hassan-Beygi. 2016. Design, development and test of the gearbox condition monitoring system using sound signal processing. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 322-335.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 265-271

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۷۱-۲۶۵

Sound Signals Processing of Roosters for Sexual Maturity and Puberty Diagnosis

M. Yavari[1], A. Banakar[2*], M. Sharafi[3]

Received: 10-09-2018
Accepted: 21-01-2019

Introduction

Immature birds, like humans and many animals, pass through the puberty period to sexual maturity that is accompanied by sound changes and after the sexual maturity, the sound structure evolves. The puberty period is one of the most important periods in the breeder chicken farms. Because the feeding of roosters at this age can delay or accelerate the time of sexual maturity. On the other hand, the diagnosis of mature roosters to mating with chickens increases egg production in early adulthood. Sexual maturity is a summary of the morphological and physiological changes its peak in the roosters from the age of 16 to 24 weeks. In female birds, the beginning of the first laying is considered to be sexual maturity, while the exact timing of sexual maturity in a male bird cannot be determined. The puberty term means the age at which reproduction is possible for the first time, but reproductive processes have not yet evolved. Therefore, the chance of pregnancy at this age is very low and fertility will not be optimal. Puberty can be likened to teenage years in humans. Bird sounds are generated mainly by the syrinx and humans speak with the stimulation of the vocal cords. The sound produced by the bird is similar to how human speech is produced. Therefore, techniques used to recognize human speech are also likely to be useful for classifying bird sounds.

Material and Methods

Variation in an animal's vocalizations can provide clues about how the animal uses sound, as well as qualities of the individual that is vocalizing. Bioacoustics research depends heavily on the ability to characterize these variations. The main goal of this study is to diagnosis puberty and the sexual maturity in bred roosters based on sound signals. To do this, the number of roosters with the first ejaculation for puberty and sperm concentration criterion for sexual maturity was divided into three groups of immature males, roosters during the puberty period and adult roosters and the rooster's acoustic signals were recorded by a microphone in a double-sided glass box (50x50x60 cm). The main purpose of using the box is to prevent the effects of noise in the environment on acoustic signals because otherwise, the sound signal of the rooster is unreliable due to the characteristics of the normal sound. Linear predictive coding (LPC) coefficients from the frequency domain were extracted as sound features. The sound features were used to classify k- nearest neighbors (K-NN) inputs for network training.

Results and Discussion

The results of accuracy, recall and precision values are, respectively, 97.7%, 98.3%, and 98.8% for the classification of roosters. Immature roosters had similar sound structures that with start the puberty and Leakage testosterone hormone, the rooster's syrinx, which is part of the secondary sexual feature, also begins to change. After sexual maturity, the syrinx has grown and this evolution also makes the sound structure of the mature rooster very similar. Therefore, according to the similarity of the sound of the mature rooster and immature one, as well as the syrinx continuous changes during the puberty period, the K-NN classifier with the LPC coefficients can show a high degree of accuracy in the classification of roosters. Because a feature of the k-NN algorithm is that it is sensitive to the data local structure.

Conclusions

The main objective of the present study is to detect sexual and puberty of roosters using acoustic signals. The LPC coefficients as K-NN classification inputs show accuracy, recall, and precision values of 98.7%, 98.3%, and 98.8%, respectively. These results indicate high accuracy of K-NN classification to identify and categorize immature roosters, rooster during puberty period, and mature roosters.

Keywords: K-nearest neighbors (K-NN), Linear predictive coding (LPC), Puberty, Rooster

1- MSc Graduated, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3- Assistance Professor, Department of Poultry Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: ah_banakar@modares.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 273-287

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۸۷-۲۷۳

بهینه‌سازی و ارزیابی شرایط کاری تیغه خاک‌ورز جدید به‌منظور استفاده در خاک‌ورز مرکب

مجتبی محمدی[۱]، سید حسین کار پرورفرد[۲*]، سعادت کامگار[۳]، محمد رحمتیان[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۰۷

چکیده

نوعی تیغه خاک‌ورز جدید با زوایای تمایل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق تیغه‌های باله‌دار و بدون باله ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. تیمارهای آزمایش که به‌عنوان عوامل وابسته در نظر گرفته شدند عبارت از دو سطح عمق خاک‌ورزی (۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر)، پنج زاویه تمایل (صفر، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه) و سه سطح سرعت پیشروی (۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت) بودند. همچنین شش عامل مستقل اندازه‌گیری شده شامل مقاومت کششی، مصرف سوخت تراکتور، لغزش چرخ محرک، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک، سطح مقطع بالاآمدگی خاک و مقاومت ویژه بودند. برای انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای از طرح آماری کرت‌های دو بار خرد شده بر پایه‌ی طرح کامل تصادفی و در سه تکرار استفاده گردید. طبق نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی، مقادیر بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی برای تیغه‌های باله‌دار و بدون باله، ۲۰ سانتی‌متر به‌دست آمد. همچنین مقادیر بهینه‌ی زاویه تمایل و سرعت پیشروی در هر دو حالت باله‌دار و بدون باله به‌ترتیب ۲۵ و ۲۴/۸ درجه و ۳/۳ و ۳/۵ کیلومتر بر ساعت به‌دست آمد. ضمناً راندمان کششی تراکتور ۸۲ درصد و میزان کاهش مصرف سوخت تراکتور ۳۴ درصد بر اساس شرایط موجود در این پژوهش گزارش گردید.

واژه‌های کلیدی: راندمان کششی، زاویه تمایل بهینه تیغه، سرعت پیشروی بهینه، عمق بهینه خاک‌ورزی

مقدمه

در بخش کشاورزی، یکی از مهم‌ترین عملیاتی که اهمیت بالایی برای کشاورزان دارد، عملیات خاک‌ورزی می‌باشد. با توجه به وجود مشکلاتی نظیر محدودیت منابع آب، فقیر بودن خاک‌های مناطق مرکزی و جنوبی کشور از مواد آلی و آسیب‌پذیر بودن ساختمان آن‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک و وجود مشکلاتی در استفاده از روش خاک‌ورزی مرسوم، به اجبار بایستی ادوات خاک‌ورزی حفاظتی مورد توجه کشاورزان قرار گیرد (Rahmatian *et al*., 2018). با توسعه‌ی مشکلات خاک‌ورزی مرسوم، توجه بیشتر به خاک‌ورزی حفاظتی معطوف گردید. بدین ترتیب طراحی و ساخت خاک‌ورزهای مرکب مورد توجه بیشتر قرار گرفت (Melero *et al*., 2009). امروزه طراحان و تولیدکنندگان ماشین‌های کشاورزی به دنبال پیدا کردن راه‌حل‌هایی برای غلبه بر کمبود منابع آبی و خاکی و همچنین کاهش منابع سوخت در سرتاسر دنیا هستند. یکی از این راه‌حل‌ها، بهینه‌سازی ادوات و ماشین‌های مورد استفاده در عملیات کشاورزی می‌باشد. تیغه از مهمترین اجزای هر خاک‌ورز مرکب است که چگونگی تنظیم آن و همچنین تأثیر آن بر عوامل مختلفی همچون نیروی کششی و میزان سوخت مصرفی تراکتور بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Rahmatian *et al*., 2018).

در پدیده‌های طبیعی و مسائل تجربی روش‌های متعددی برای تخمین یک پارامتر از روی چند پارامتر و بهینه‌سازی آن وجود دارد. یکی از روش‌های پیش‌بینی رفتار و بهینه‌سازی یک متغیر نسبت به متغیرهای مستقل، مدل رگرسیون خطی چند متغیره است (Bilgili and Sahin, 2010; Kotu and Deshpande, 2015). روش رگرسیون چند متغیره نه تنها یکی از قدیمی‌ترین روش‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی است بلکه ساده‌ترین روش تشریح شده برای برازش تابع نیز می‌باشد که از مدل‌های مختلفی همچون مدل خطی، مدل مربعی، مدل دو فاکتوره و غیره می‌توان بهره برد (Bilgili and Sahin, 2010; Kotu and Deshpande, 2015).

در پژوهشی با استفاده از یک گاوآهن کج ساق منفرد راست‌گرد با زاویه تمایل ۳۰ درجه، گزارش شد که مقاومت کششی در زاویه حمله ۷/۵ درجه حداقل بود و با افزایش عمق خاک‌ورزی، نرخ تغییرات مقاومت کششی گاوآهن کج ساق در مقایسه با گاوآهن برگردان‌دار بیشتر شد اما مقاومت ویژه آن به‌طور محسوسی کمتر بود به علاوه سطح مقطع به هم خورده خاک در زاویه حمله ۱۵ درجه حداکثر شد (Majidi-Iraj and Raoufat, 1997).

در پژوهشی اثرات عمق کار و لغزش چرخ محرک تراکتور بر مصرف سوخت در هنگام شخم با دو گاوآهن مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق کار، مقاومت کششی افزایش یافته و به همین دلیل مصرف سوخت نیز افزایش یافت. همچنین با افزایش

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شیراز
۲- دانشیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز
۳- استادیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز
۴- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه صنعتی اصفهان
(*- نویسنده مسئول: Email: karparvr@shirazu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.73914

لغزش چرخ محرک تراکتور در عمق‌های مختلف نیز مصرف سوخت افزایش یافت (Moitzi *et al*., 2014).

در پژوهشی اثر زاویه‌های حمله مختلف بر نیروی اعمالی به یک تیغه باریک بررسی شد و بیان گردید که هرچه زاویه‌ی حمله بزرگ‌تر در نظر گرفته شود، به‌هم‌خوردن خاک افزایش می‌یابد و لایه‌های عمیق خاک سست می‌گردند ولی نیروی اعمالی به تیغه بیشتر خواهد شد و نیروی کشش افزایش می‌یابد. درنتیجه محققان با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، زاویه‌ی حمله بهینه برای تیغه مورد نظر را ۳۵ درجه اعلام کردند (Solhjou *et al*., 2012).

در پژوهش دیگری، برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مربوط به مقاومت مکانیکی خاک از روش‌های رگرسیون چند متغیره، الگوریتم ژنتیکی و پتانسیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شد و این سه روش از نظر دقت و کارآیی با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که سه روش مذکور به‌خوبی می‌توانند پارامترهای مربوط به مکانیک خاک را پیش‌بینی کنند، اما در این بین روش پتانسیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) نسبت به دو روش دیگر پیش‌بینی نزدیک‌تری ارائه داد (Hosseini *et al*., 2016).

در پژوهشی اثر هندسه بال بر نیروی کششی و عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره بهینه‌سازی شد. در این پژوهش تیمارهای مورد نظر عمق خاک‌ورزی، زاویه تمایل و زاویه حمله بال بود. مقادیر بهینه برای عمق خاک‌ورزی، زاویه تمایل و زاویه حمله بال به‌ترتیب ۵ سانتی‌متر، ۱۱/۱۰ درجه و ۱۹/۴۶ درجه به‌دست آمد (Salar and Karparvarfard, 2017).

در پژوهشی برای بهینه‌سازی شرایط تیغه قلمی فولادی با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره نشان داده شد که مقادیر بهینه‌ی سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت خاک که تیمارهای اصلی این تحقیق بودند به‌ترتیب ۵ کیلومتر بر ساعت، ۳۶ درجه و ۰/۸۱ حد پلاستیک (معادل ۱۴/۸ درصد رطوبت وزن خشک) به‌دست آمدند. در این تحقیق عوامل اندازه‌گیری شده عبارت از مقاومت کششی، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک، سطح مقطع بالاآمدگی خاک، لغزش چرخ تراکتور، مصرف سوخت، شاخص مخروطی، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ای و مقاومت ویژه بودند و همچنین تأثیر لغزش و مصرف سوخت بر روی مقادیر بهینه بررسی گردید. نتایج حاصل بیانگر تأثیر زاویه حمله بر روی مقاومت کششی، لغزش چرخ و مصرف سوخت بود. رطوبت بهینه نیز نقش مهمی در تراکم‌پذیری خاک داشت به نحوی که حداقل لغزش چرخ و به دنبال آن کمترین مقدار شاخص مخروطی را در پی داشت. حداقل مصرف سوخت به همراه حداقل میزان لغزش چرخ‌های محرک نیز در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت گزارش شد (Rahmatian *et al*., 2018).

در پژوهشی برای بهینه‌سازی عوامل مؤثر بر انرژی مصرفی گاوآهن برگردان‌دار از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد. در این پژوهش تیمارهای مورد نظر عمق خاک‌ورزی، رطوبت خاک و سرعت پیشروی بود. عوامل اندازه‌گیری شامل مصرف سوخت و مقاومت کششی در نظر گرفته شد. مقادیر بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی، رطوبت خاک و سرعت پیشروی به‌ترتیب ۲۰ سانتی‌متر، ۱۶/۴۱درصد و ۵/۸ کیلومتر بر ساعت گزارش گردید (Mehrijani *et al*., 2018).

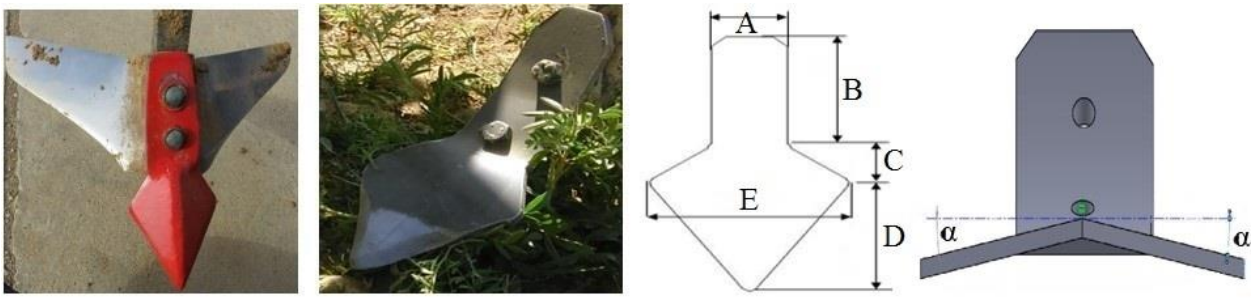
با توجه به پژوهش‌های فوق‌الذکر و همچنین پی بردن به اهمیت بهینه‌سازی ادوات خاک‌ورزی، این پژوهش با هدف بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای خاک‌ورز مرکب با تیغه باریک جدید مجهز به زاویه تمایل با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره و همچنین مقایسه عملکرد این تیغه‌ها در حالات در نظر گرفته شده، انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه شماره ۱۰ دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در شمال شرقی (NE) شهر شیراز انجام شد. طبق آزمایش‌های اولیه‌ای که بر روی خاک مزرعه انجام گرفت، با توجه به ۳۹ درصد رس، ۲۹ درصد شن و ۳۲ درصد سیلت، بافت خاک لومی رسی تشخیص داده شد. همچنین رطوبت اولیه خاک بر حسب وزن خشک ۱۰/۹۲ درصد و چگالی ظاهری خاک نیز $g.cm^{-3}$ ۱/۶ به‌دست آمد.

برای انجام آزمایش‌ها از یک گاوآهن قلمی سوار تک ساق ساخت شرکت سازه کشت ایران استفاده شد که در طرفین آن دو چرخ برای تنظیم عمق قرار داشت. همچنین تیغه‌ای فولادی با نسبت رعنایی[1] (نسبت عمق کار به پهنای تیغه) ۱/۱۱ و ۱/۴۸ به‌ترتیب برای عمق‌های ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر (عمق‌های مد نظر در این پژوهش) ساخته شده و بر روی گاوآهن نصب گردید (شکل ۱– C). تیغه مورد نظر با زوایای تمایل مختلف و به دو صورت باله‌دار و بدون باله در کارگاه ساخته شده بود (شکل‌های ۱–A و ۱–B). جنس مورد استفاده برای ساخت تیغه‌ها از جنس فولاد CK 45 بود. همچنین تیغه با زاویه تمایل صفر درجه که اساس ساخت دیگر تیغه‌ها قرار داشت، ساخت شرکت بلوتا[2] اسپانیا بود. زاویه حمله تیغه‌ها در تمام مراحل کار ثابت و ۳۰ درجه بود. مشخصات کامل تیغه‌ها شامل ابعاد و اندازه‌ها در جدول ۱ توضیح داده شده است. تنظیمات تراز طولی و عرضی گاوآهن برای هر آزمون به‌طور دقیق انجام می‌گرفت.

1- Aspect ratio
2- Bellota



(A) (B) (C) (D)

شکل ۱– A– تیغه باریک جدید باله‌دار، B– تیغه باریک جدید بدون باله، C– طرحواره تیغه باریک جدید، D– نمایش زاویه تمایل (α)

Fig.1. A- Winged new narrow blade, B- non-winged new narrow blade, C- Schematic new narrow blade, D- Show the tilt angle (α)

جدول ۱– ابعاد تیغه‌های ساخته شده در این آزمایش (حروف بر روی شکل‌های ۱–C و ۱– D موجود می‌باشد)

Table 1- The dimensions of the blades made in this test (letters are shown in Figures 1-C and 1-D)

تیغه Blade	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	زاویه تمایل (α) Tilt angle (α)
1	50	110	35	115	135	0
2	50	110	35	115	135	10
3	50	110	35	115	135	15
4	50	110	35	115	135	20
5	50	110	35	115	135	25

شکل ۲– آزمون دو تراکتوری و نیروسنج متصل شده بین دو تراکتور

Fig.2. RNAM test code and Load cell connected between two tractors

در این پژوهش، تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح عمق خاک‌ورزی ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر، پنج سطح زاویه‌ی تمایل صفر، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه و سه سطح سرعت پیشروی ۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت بودند که به‌عنوان عوامل وابسته در نظر گرفته شدند. همچنین عوامل اندازه‌گیری شده مقاومت کششی (D)، مصرف سوخت تراکتور (F)، لغزش چرخ محرک تراکتور (S)، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک (SDA)، سطح مقطع بالاآمدگی خاک (SUA) و مقاومت ویژه (SR) بودند که به‌عنوان عوامل مستقل در معادله‌ها مدنظر بودند. مزرعه آزمایشی براساس آزمایش کرت‌های دو بار خرد شده بر پایه‌ی طرح کامل تصادفی و در سه تکرار، کرت‌بندی گردید.

داده‌برداری در این پژوهش به کمک یک سامانه جمع‌آوری داده که توسط Rahmanian-Koushkaki *et al*. (2015) ساخته شده،

مورد استفاده قرار گرفت. این سامانه داده‌های مربوط به دبی‌سنج‌ها، نیروسنج و دورسنج‌ها را با نرخ داده برداری ۱۰۰ میلی‌ثانیه از طریق ورودی‌های مربوطه دریافت می‌کرد و از طریق کابل RS232 به رایانه قابل حمل منتقل می‌کرد. بر روی رایانه، نرم‌افزاری نصب شده بود که مقادیر دریافتی از سامانه داده‌برداری را نمایش و ذخیره می‌نمود.

برای اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک‌ورز مورد نظر در این پژوهش از روش آزمون دو تراکتوری استفاده گردید (شکل ۲). بدین منظور، دستگاه نیروسنج که از نوع S شکل و ساخت شرکت کلی[1] کشور چین بود، توسط اتصالاتی بین دو تراکتور نصب گردید. تراکتور ITM-۳۹۹ وظیفه کشش را بر عهده داشت و تراکتور دوم پشت تراکتور کشنده قرار داشته و گاوآهن به آن متصل شده بود. برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی تراکتور، از دو دورسنج ۵۰۰ پالس ساخت شرکت اُتونیکس[2] کشور کره جنوبی و چرخ پنجم که در کنار تراکتور بر روی شاسی نصب گردید استفاده شد. دورسنج‌ها با اتصالات انعطاف‌پذیری به چرخ پنجم و چرخ عقب تراکتور متصل شدند. سپس با استفاده از رابطه (۱)، مقدار لغزش چرخ محرک تراکتور به‌دست آمد (Rahmatian *et al*., 2018).

$$slip = \frac{d_2 - d_1}{d_2} \qquad (۱)$$

در این رابطه d_1 برابر مسافت طی شده توسط چرخ پنجم و d_2 برابر با مسافت طی شده توسط چرخ محرک عقب تراکتور می‌باشد.

برای اندازه‌گیری دبی حجمی سوخت مصرفی از دو حسگر دبی‌سنج توربینی VISION-1000 ساخت شرکت ریمگ[3] کشور سوئیس استفاده گردید. چون در موتورهای دیزلی سوخت اضافی مصرف نشده از پمپ انژکتور، انژکتورها و فیلترها به مخزن سوخت بر می‌گردد، علاوه بر دبی‌سنجی که در مسیر رفت سوخت به پمپ انژکتور قرار داده شده بود، یک دبی‌سنج نیز در مسیر برگشت سوخت به مخزن قرار گرفت و میزان دبی مصرفی موتور از طریق تفاضل جریان عبوری از دو دبی‌سنج محاسبه شد.

برای تعیین سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک و سطح مقطع بالاآمدگی خاک ابتدا در هر تیمار، پس از عبور خاک‌ورز، یک برش عرضی به عمق به‌هم خورده توسط خاک‌ورزی در خاک ایجاد شد. پس از تخلیه خاک در برش ایجاد شده، پروفیل‌متر بر روی سطح آن قرار داده شد و میله‌های آن که هرکدام دو سانتی‌متر با هم فاصله داشتند تا برخورد با خاک پایین آورده شدند. بدین ترتیب تعدادی از نقاط سطح گسیختگی خاک و همچنین نقاطی از خاک برآمده به‌دست آمد. برای به‌دست آوردن مساحت سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک از قانون سیمپسون[4] (رابطه ۲) استفاده شد، که در نرم‌افزار متلب (Matlab R2013b) نوشته و اجرا گردید (Rahmatian *et al*., 2018).

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3}\left[f(x_0) + 2\sum_{j=1}^{n/2-1} f(x_{2j}) + 4\sum_{j=1}^{n/2} f(x_{2j-1})) + f(x_n) \right] \qquad (۲)$$

در این رابطه $X_0 = a$، $X_n = b$، f بیانگر مقادیر سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و سطح مقطع بالاآمدگی خاک، n تعداد نقاطی که از پروفیل‌متر به‌دست آمد و h نیز $\frac{b-a}{n}$ می‌باشد.

مقاومت ویژه، نسبت مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز به سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک می‌باشد. لذا در این پژوهش با تقسیم مقادیر میانگین مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز مورد نظر بر مقادیر میانگین سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک در هر کرت و در هر تیمار، مقادیر مقاومت ویژه ابزار خاک‌ورز به‌دست آمد.

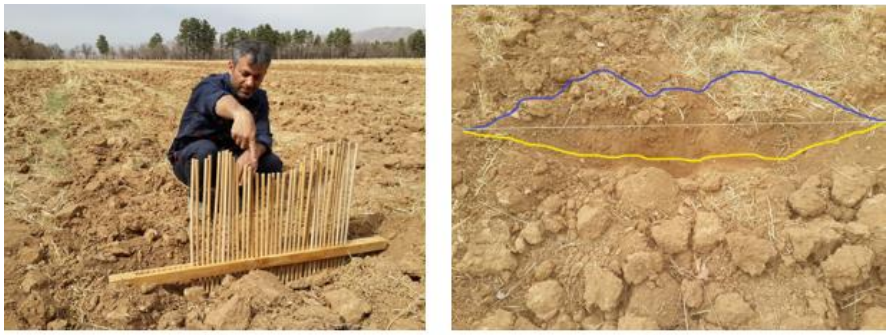
برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS نسخه‌ی ۹/۴ استفاده گردید. برای مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌داری[5] استفاده شد. معنی‌دار بودن اثر هر عامل آزمایش، در سطح احتمال ۵ درصد در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی شرایط کاری تیغه باریک جدید به دو صورت باله‌دار و بدون باله از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد.

در رابطه‌ی (۳) عوامل وابسته با حرف Y و عوامل مستقل با حرف X نمایش داده شده است. b نیز به‌عنوان ضریب رگرسیونی می‌باشد.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \ldots + b_n X_n \qquad (۳)$$

در معادلاتی که از طریق رگرسیون چند متغیره در این پژوهش به‌دست آمد، طبق آزمایش‌های انجام گرفته، تیمارهای آزمایشی را به‌عنوان عوامل وابسته و عوامل اندازه‌گیری شده به‌عنوان عوامل مستقل در نظر گرفته شدند. عوامل وابسته عبارت از سرعت پیشروی (FS)، زاویه تمایل (TA) و عمق خاک‌ورزی (TD) بودند. همچنین عوامل مستقل X_1 تا X_6 به‌ترتیب مقاومت کششی (D)، لغزش چرخ محرک تراکتور (S)، مصرف سوخت تراکتور (F)، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک (SDA)، سطح مقطع بالاآمدگی خاک (SUA) و مقاومت ویژه (SR) در نظر گرفته شدند.

1- Kelly
2- Autonics
3- Remag
4- Simpson’s rule
5- Least significant difference test (LSD)



(A) (B)

شکل ۳– A– نحوه استفاده از پروفیل‌متر، B– سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک

Fig.3. A- How to use profilometer, B- Disturbance and upheaving area of the soil

نتایج و بحث

با توجه به این‌که تیغه به‌کار برده در این پژوهش با دو طرح باله‌دار و بدون باله مورد ارزیابی قرار گرفته شدند، به همین دلیل برای بهینه‌سازی هریک از تیمارهای سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و زاویه تمایل تیغه، دو معادله رگرسیونی برای حالت‌های باله‌دار و بدون باله به‌دست آمد.

جدول ۲، آنالیز واریانس داده‌های موجود برای تیغه باریک جدید در حالت باله‌دار می‌باشد. طبق این جدول، تمام عوامل اندازه‌گیری شده در این پژوهش برای تیمارهای مد نظر معنی‌دار شده است. به همین دلیل از تمام عوامل اندازه‌گیری شده می‌توان در معادله‌های رگرسیونی چند متغیره برای حالت باله‌دار استفاده نمود. همچنین جدول ۳ نیز آنالیز واریانس مربوط به داده‌های تیغه بدون باله را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول تمام عوامل اندازه‌گیری شده به غیر از مصرف سوخت برای تیمارهای مد نظر معنی‌دار شده است. به همین دلیل از تمامی عوامل به‌جز عامل مصرف سوخت به دلیل معنی‌دار نشدن اثر آن در معادلات تیغه باریک جدید بدون باله، استفاده گردید.

جدول ۲– آنالیز واریانس عوامل اندازه‌گیری شده برای تیغه باریک جدید باله‌دار

Table 2- Analysis of variance of measured variables for winged new narrow blade

منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	Mean square میانگین مربعات					
		مقاومت کششی Draft	سطح مقطع بالاآمدگی خاک Soil upheaving area	سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک Soil disturbance area	مصرف سوخت Fuel consumption	لغزش Slippage	مقاومت ویژه Special draft
زاویه تمایل (A) Tilt angle (A)	4	0.00301**	48881.9414**	25366.5107**	0.00127**	3.76992**	1.81320**
عمق خاک‌ورزی (D) Tillage depth (D)	1	0.21904**	5931.1732**	609263.6533**	0.00961**	5.49081**	30.02134**
سرعت پیشروی (V) Forward speed (V)	2	0.11212**	25178.3779**	15668.6908**	0.09465**	2.20079**	0.37201**
A×D	4	0.00488**	571.2864**	299.6703**	0.00006ns	0.41787**	0.13337**
A×V	8	0.00172**	436.6447**	334.2634**	0.00041**	0.31345**	0.03697**
D×V	2	0.02166**	1644.1545**	961.3607**	0.00094**	0.84414**	0.07075**
A×D×V	8	0.00077**	94.2579**	113.0169**	0.00006ns	0.08753*	0.00698**
خطا Error	40	0.00019	7.0625	14.1592	0.00004	0.03650	0.00161
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		0.49	0.64	0.64	1.49	4.25	0.84

**= $p \leq 0.01$, * = $p \leq 0.05$, ns = non-significant

جدول ۳- آنالیز واریانس عوامل اندازه‌گیری شده برای تیغه باریک جدید بدون باله

Table 3- Analysis of variance of measured variables for non-winged new narrow blade

منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square					
		مقاومت کششی Draft	سطح مقطع بالاآمدگی خاک Soil upheaving area	سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک Soil disturbance area	مصرف سوخت Fuel consumption	لغزش Slippage	مقاومت ویژه Special draft
زاویه تمایل (A) Tilt angle (A)	4	0.1435**	11807.86**	11832.93**	0.16595ns	0.76517**	2.76201**
عمق خاک‌ورزی (D) Tillage depth (D)	1	0.12996**	65215.85**	651154.71**	0.19044ns	7.11211**	80.29667**
سرعت پیشروی (V) Forward speed (V)	2	0.01776**	8584.2**	13101.27**	0.16891ns	1.74211**	1.78481**
A×D	4	0.01065**	69.14**	72.02**	0.15039ns	0.19517**	0.66807**
A×V	8	0.00075**	25.12**	37.86**	0.14823ns	0.14392**	0.00967**
D×V	2	0.00149**	151.36**	899.64**	0.14608ns	0.20344**	0.83407**
A×D×V	8	0.00032**	20.63**	37.43**	0.14060ns	0.58583*	0.01172**
خطا Error	40	0.00006	6.40	4.27	0.14174	0.02472	0.00302
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		0.32	0.95	0.44	84.46	3.99	0.98

**= $p \leq 0.01$, *= $p \leq 0.05$, ns = non-significant

تعیین مقدار بهینه زاویه تمایل خاک‌ورز قلمی

داده‌های مربوط به عوامل وابسته و مستقل با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره کنار هم قرار داده شد. روابط (۴) و (۵) برای بهینه‌سازی زوایای تمایل به‌ترتیب برای حالت‌های باله‌دار و بدون باله به‌دست آمد.

$$\left[TA_{opt}\right]_1 = 43.275854 - 12.461974D - 36.818546F - 2.394773S + 0.142786SUA - 0.01836SDA - 3.601287SR \quad (۴)$$

$$\left[TA_{opt}\right]_2 = -22.309931 + 19.208268D + 0.803759S + 0.033074SUA - 0.046402SDA - 2.232632SR \quad (۵)$$

در این روابط، $\left[TA_{opt}\right]_1$ و $\left[TA_{opt}\right]_2$ به‌ترتیب زاویه تمایل بهینه برای حالت باله‌دار و بدون باله‌ی تیغه باریک جدید می‌باشند. جدول ۴ نشان‌دهنده مقایسه میانگین داده‌های مربوط به حالت‌های باله‌دار و بدون باله برای تیغه باریک جدید می‌باشد. مقادیری که در این جدول با نشان ستاره (*) مشخص شده به‌عنوان بهترین مقدار در هریک از عوامل اندازه‌گیری شده در تیمار زاویه تمایل می‌باشد که در روابط (۴) و (۵) برای به‌دست آوردن مقدار بهینه جای‌گذاری شدند. با توجه به جدول‌های ۵ و ۶، می‌توان مشاهده نمود که ضرایب رگرسیونی به‌دست آمده در روابط (۴) و (۵) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است. با توجه به روابط (۴) و (۵) و همچنین جدول ۴، مقدار بهینه زاویه تمایل تیغه باریک جدید در دو حالت باله‌دار و بدون باله به‌ترتیب ۲۵ و ۲۴/۸ درجه با ضریب همبستگی به‌ترتیب ۰/۸۹۰۵ و ۰/۹۰۲۹ به‌دست آمد. بنابراین مقاومت تنش برشی خاک با افزایش این سطح رو به کاهش نهاده و نهایتاً از مقدار مقاومت کششی خاک‌ورز کم می‌گردد. باتوجه به جدول ۲ تأثیر این متغیر بر مصرف سوخت در وضعیت تیغه‌ی جدید باله‌دار دارای اختلاف معنی‌داری بود. نتایج مندرج در خصوص مقاومت کششی و مصرف سوخت در جدول ۴ برای دو وضعیت تیغه باله‌دار و بدون باله تحت زاویه تمایل ۱۰ درجه مطابق با نتایج حاصله از پژوهش Azimi Zadeh, (2017) می‌باشد. لازم به ذکر است با مقایسه نتایج حاصله در این تحقیق با پژوهش مذکور سایر صفات اندازه‌گیری شده از برتری نسبی برخوردار شده است.

جدول ٤- مقایسه‌ی میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و حالت بهینه براساس زاویه تمایل در دو حالت باله‌دار و بدون باله

Table 4- Average comparison of measured values and optimal mode based on tilt angle in two modes in two modes winged and non-winged

	زاویه تمایل Tilt angle (Degree)	مقاومت کششی Draft (kN)	سطح مقطع بالاآمدگی خاک Soil upheaving area (cm^2)	سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک Soil disturbance area (cm^2)	مصرف سوخت Fuel consumption ($L\ min^{-1}$)	لغزش Slippage (%)	مقاومت ویژه Special draft ($N\ cm^{-2}$)
باله‌دار Winged	0	2.754	348.889	544.889	0.432	4.865	5.161
	10	2.722*	377.332	562.445	0.409*	4.739	4.924
	15	2.727	411.772	590.594	0.422	4.872	4.702
	20	2.737	446.297	605.834	0.415	4.106	4.613
	25	2.727	479.111*	640.963*	0.422	3.905*	4.322*
بدون باله Non-winged	0	2.583	232.887	438.111	0.617	4.183	6.158
	10	2.527	250.963	455.853	0.394*	3.700*	5.743
	15	2.515*	267.777	427.591	0.401	4.117	5.490
	20	2.522	282.297	487.628	0.408	3.911	5.316
	25	2.518	298.148*	503.258*	0.408	3.794	5.161*

*= مقادیر بهینه‌ی هریک از عوامل اندازه‌گیری شده در تیمار زاویه تمایل تیغه

*= Optimal values of each of the factors measured in the tilt angle blade treatment

جدول ٥- آنالیز واریانس برای ضرایب رگرسیونی معادله مربوط به بهینه‌سازی زاویه تمایل تیغه باریک جدید باله‌دار

Table 5- Analysis of variance for regression coefficients of the equation related to the optimization of the tilt angle of the winged new narrow blade

	df	SS	MS	F	P Value
Regression	6	5930.97	988.49	112.54	**
Residual	83	729.03	8.78		
Total	89	6660			

**= $p \leq 0.01$

جدول ٦- آنالیز واریانس برای ضرایب رگرسیونی معادله مربوط به بهینه‌سازی زاویه تمایل تیغه باریک جدید بدون باله

Table 6- Analysis of variance for regression coefficients of the equation related to the optimization of the tilt angle of the non-winged new narrow blade

	df	SS	MS	F	P Value
Regression	5	6013.67	1202.73	156.31	**
Residual	84	646.33	7.69		
Total	89	6660			

** = $p \leq 0.01$

با توجه به این‌که تأمین زاویه تمایل بر روی سطح برش تیغه به‌عنوان نوآوری در این پژوهش مد نظر می‌باشد، بنابراین از نتایج حاصله می‌توان مشاهده نمود که غالباً با افزایش زاویه تمایل، مقادیر مقاومت کششی خاک‌ورز کاهش پیدا کرده است (جدول ۴). یکی از دلایل این امر می‌تواند کاهش تصویر سطح تماس تیغه در مواجهه با خاک باشد، که منجر به کاهش اصطکاک بین تیغه و خاک و به دنبال آن حرکت روان‌تر خاک بر روی تیغه می‌شود. همچنین با افزایش زاویه تمایل تیغه، خاک کمتری جابه‌جا می‌شود که این خود باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد (Salar *et al.*, 2013). همچنین افزایش مقاومت کششی متناسب با عکس کسینوس زاویه تمایل در سطح اولیه‌ی تیغه نیز می‌باشد (Mckyes, 1985). نتایج به‌دست آمده از این تحقیق در مورد رابطه‌ی بین زاویه تمایل و مقاومت کششی با نتایج دیگر پژوهش‌ها که نشان دادند با افزایش زاویه تمایل، مقاومت کششی کاهش می‌یابد، مطابق دارد (Harrison and Licsko, 1989). با افزایش زاویه تمایل تیغه، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک نیز افزایش یافت (جدول ۴). با توجه به اینکه با افزایش زاویه تمایل، روان‌روی خاک بر روی سطح تیغه افزایش یافته و ذرات خاک به‌راحتی بر روی سطح تیغه جابه‌جا می‌شوند، به همین خاطر سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک نیز افزایش می‌یابد. برخی از پژوهشگران گزارش نموده‌اند که با افزایش زاویه

تمایل، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک نیز افزایش یافت (Raheman and Chen, 2001; Sahu and Raheman, 2006; Manuwa, 2009; Salar *et al*., 2013) که با نتایج این تحقیق نیز هم‌خوانی دارد. همچنین با افزایش زاویه تمایل تیغه و به‌تبع آن کاهش مقاومت کششی به‌وجود آمده، مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور در حالت کلی کاهش می‌یابد. دلیل افزایش این دو فاکتور ارتباط مستقیم آن‌ها با مقاومت کششی می‌باشد، که با افزایش یا کاهش مقاومت کششی و تأثیر آن بر روی عملکرد تراکتور، این دو فاکتور افزایش یا کاهش می‌یابند (Shafaei *et al*., 2018). طبق جدول ۴، مقادیر متغیرهای مقاومت کششی، مصرف سوخت، لغزش چرخ تراکتور و سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک در حالت کلی برای تیغه باله‌دار بیشتر از تیغه بدون باله است. دلیل این امر وجود باله می‌باشد که این باله سطح بیشتری را در هنگام برخورد با خاک ایجاد می‌کند و خاک بیشتری را در معرض گسیختگی قرار می‌دهد (Salar and Karparvarfard, 2017). به همین دلیل نیروی بیشتری از طرف خاک به تیغه وارد شده و باعث افزایش مقاومت کششی در تیغه باله‌دار می‌گردد. همچنین به دلیل برخورد سطح بیشتری با خاک، گسیختگی و جابه‌جایی خاک افزایش یافته، به همین دلیل مقادیر سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک نیز برای حالت باله‌دار افزایش می‌یابد. به همین دلیل و به‌تبع افزایش مقاومت کششی و سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک در حالت باله‌دار نسبت به بدون باله، مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور در حالت کلی برای حالت باله‌دار بیشتر از حالت بدون باله می‌باشد.

تعیین مقدار بهینه سرعت پیشروی خاک‌ورز

برای به‌دست آوردن سرعت پیشروی بهینه نیز از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد. با توجه به عوامل وابسته و مستقل و روش رگرسیون چند متغیره روابط (۶) و (۷) به‌دست آمد.

$$\left[FS_{opt}\right]_1 = -6.825139 + 3.842054D + 10.791583F + 0.2723S + 0.005212SUA - 0.008558SDA - 0.536467SR \quad (۶)$$

$$\left[FS_{opt}\right]_2 = -22.309931 + 19.208268D + 0.80376S + 0.033074SUA - 0.046402SDA - 2.232632SR \quad (۷)$$

$\left[FS_{opt}\right]_1$ و $\left[FS_{opt}\right]_2$ به‌ترتیب بهینه‌ی سرعت پیشروی در حالت‌های باله‌دار و بدون باله برای تیغه باریک جدید می‌باشند. مقایسه میانگین داده‌های مربوط به حالت‌های باله‌دار و بدون باله در سرعت‌های مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است. در این جدول برای هریک از عوامل اندازه‌گیری شده بهترین مقدار انتخاب شد و با نشان ستاره (*) مشخص گردید. این مقادیر مشخص شده برای به‌دست آوردن سرعت پیشروی بهینه در رابطه‌های (۶) و (۷) جای‌گذاری شدند. جدول‌های ۸ و ۹، نشان‌دهنده آنالیز واریانس ضرایب رگرسیونی در رابطه‌های (۶) و (۷) می‌باشند. طبق این جدول‌ها تمامی ضرایب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است. با توجه به رابطه‌های (۶) و (۷) و جدول ۷، مقدار سرعت پیشروی بهینه در دو حالت باله‌دار و بدون باله به‌ترتیب ۳/۳ و ۳/۵ کیلومتر بر ساعت با ضریب همبستگی به‌ترتیب ۰/۸۹۸۱ و ۰/۷۹۳۸ به‌دست آمد. باتوجه به جدول ۲ این متغیر نیز بر مصرف سوخت در وضعیت تیغه‌ی جدید باله‌دار دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد.

جدول ۷- مقایسه‌ی میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و حالت بهینه براساس سرعت پیشروی در دوحالت باله‌دار و بدون باله

Table 7. Average comparison of measured values and optimal mode based on forward speed in two modes in two modes winged and non-winged

	سرعت پیشروی Forward speed ($km.h^{-1}$)	مقاومت کششی Draft (kN)	سطح مقطع بالاآمدگی خاک Soil upheaving area (cm^2)	سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک Soil disturbance area (cm^2)	مصرف سوخت Fuel consumption ($L\ min^{-1}$)	لغزش Slippage (%)	مقاومت ویژه Special draft ($N\ cm^{-2}$)
باله‌دار Winged	3	2.676*	383.200	562.612	0.374*	4.219*	4.855
	4	2.726	413.733	600.623	0.404	4.513	4.632*
	5	2.798	441.112*	603.600*	0.483	4.760	4.747
بدون باله Non-winged	3	2.509*	249.733	451.133	0.363*	3.723*	5.814
	4	2.533	265.955	470.444	0.509	3.900	5.581
	5	2.557	283.555*	492.889*	0.465	4.200	5.326*

*= مقادیر بهینه‌ی هریک از صفت‌های اندازه‌گیری شده در تیمار سرعت پیشروی

*= Optimal values of each of the factors measured in the forward speed treatment

جدول ۸- آنالیز واریانس برای ضرایب رگرسیونی معادله مربوط به بهینه‌سازی سرعت پیشروی تیغه باریک جدید باله‌دار

Table 8- Analysis of variance for regression coefficients of the equation related to the optimization of the forward speed of the winged new narrow blade

	df	SS	MS	F	P Value
Regression	6	53.88	8.98	121.84	**
Residual	83	6.12	0.07		
Total	89	60			

** = $p \leq 0.01$

جدول ۹- آنالیز واریانس برای ضرایب رگرسیونی معادله مربوط به بهینه‌سازی سرعت پیشروی تیغه باریک جدید بدون باله

Table 9- Analysis of variance for regression coefficients of the equation related to the optimization of the forward speed of the non-winged new narrow blade

	df	SS	MS	F	P Value
Regression	5	47.63	9.53	64.71	**
Residual	84	12.37	0.15		
Total	89	60			

** = $p \leq 0.01$

با توجه به جدول ۷، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، مقاومت کششی نیز افزایش پیدا کرده است. دلیل این افزایش می‌تواند افزایش مقاومت برشی خاک در سرعت‌های بالا باشد (Row and Barnes, 1961). همچنین با افزایش سرعت پیشروی، شتاب بیشتری به خاک وارد شده و موجب مقاومت بیشتر ذرات خاک در مقابل تیغه می‌گردد که این مقاومت ذرات خاک نیز موجب افزایش مقاومت کششی می‌شود. نتایج به‌دست آمده با نتایج دیگر پژوهش‌ها که نشان دادند با افزایش سرعت پیشروی، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد (Al-suhaibani and Ghaly, 2010; Akbarnia *et al.*, 2014; Ibrahmi *et al.*, 2015)، مطابقت دارد. با افزایش سرعت پیشروی، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک افزایش داشته است (جدول ۷). با افزایش سرعت پیشروی، سرعت و شتابی که به ذرات خاک وارد می‌گردد نیز افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت و شتاب ذرات خاک نیز، خود باعث جابه‌جایی بیشتر ذرات خاک و همچنین تحت تأثیر قرار دادن ذرات خاک اطراف می‌شود. به همین دلیل ذرات خاک جابه‌جایی زیادی داشته و گسیختگی خاک و حرکت خاک افزایش می‌یابد که موجب افزایش سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک می‌شود. همچنین دیگر پژوهشگران بیان داشته‌اند که با افزایش سرعت پیشروی، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک نیز افزایش می‌یابد (Manuwa, 2009; Jafari *et al.*, 2011) که نتایج این تحقیق نیز بیانگر همین امر می‌باشد. با افزایش سرعت پیشروی نیز مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور افزایش یافت (جدول ۷). همانطور که بیان گردید با افزایش سرعت پیشروی مقاومت کششی و سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک افزایش می‌یابد و از طرف خاک نیروهایی که به تراکتور وارد می‌گردد افزایش می‌یابد. تراکتور نیز بر آن است تا بر این نیروها غلبه کرده و به حرکت رو به جلوی خود ادامه دهد که این غلبه کردن بر نیروها، باعث افزایش مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور می‌شود. همچنین می‌توان گفت که در هنگام افزایش سرعت پیشروی، تراکتور در مدت زمان کمتری سطح مزرعه را طی می‌کند، در نتیجه مقدار سوخت مصرفی در واحد سطح کاهش می‌یابد (Shafaei *et al.*, 2018). نتایج سایر پژوهشگران نیز افزایش مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور را در هنگام افزایش سرعت پیشروی بیان می‌کند (Ismail *et al.*, 1993; Shafaei *et al.*, 2018) که با نتایج به‌دست آمده از این تحقیق هم‌خوانی دارد. در جدول ۷ نیز قابل مشاهده است که مقدار متغیرهای اندازه‌گیری شده برای تیغه باله‌دار بیشتر از تیغه‌ی بدون باله می‌باشد. دلیل این امر وجود باله می‌باشد. باله‌ها سطح برخورد با خاک را افزایش داده و تیغه باله‌دار خاک بیشتری را جابه‌جا می‌کند که موجب افزایش مقاومت کششی و سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک می‌شود (Spoor and Godwin, 1978). همچنین با افزایش مقاومت کششی و سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک به هنگام وجود باله نیز مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور افزایش می‌یابد.

تعیین مقدار بهینه عمق خاک‌ورزی

برای به‌دست آوردن بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی در بازه ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر نیز مانند حالت‌های قبل از رگرسیون چند متغیره استفاده شد و در این معادله بهترین مقادیر شش صفت اندازه‌گیری شده که با نشان ستاره در جدول ۱۰ نشان داده شده، در رابطه‌های (۸) و (۹) جای‌گذاری شد و در نهایت بهینه‌ی عمق خاک‌ورزی برای دو حالت باله‌دار و بدون باله‌ی تیغه باریک جدید به‌دست آمد.

$$\left[TD_{opt}\right]_1 = 16.55728 - 5.062823D + 5.101697F + 0.179773S - 0.022713SUA + 0.034645SDA - 0.1683SR \quad (۸)$$

$$\left[TD_{opt}\right]_2 = +8.526534 - 4.704671D - 0.19298S - 0.044862SUA + 0.058294SDA + 1.097584SR \quad (۹)$$

در این رابطه $\left[TD_{opt}\right]_1$ و $\left[TD_{opt}\right]_2$ عمق خاک‌ورزی بهینه به‌ترتیب برای دو حالت باله‌دار و بدون باله می‌باشند. جدول ۱۰ نشان‌دهنده مقایسه میانگین داده‌های مربوط به حالت‌های باله‌دار و بدون باله در عمق‌های مختلف می‌باشد. مقادیری که با نشان ستاره (*) در این جدول مشخص شده‌اند، بهترین مقدار عوامل اندازه‌گیری شده در عمق‌های مختلف است که با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه‌های (۸) و (۹) مقدار بهینه عمق خاک‌ورزی برای هر حالت باله‌دار و بدون باله به‌دست آمد. با توجه به رابطه‌های (۸) و (۹) و جدول ۱۰، مقدار بهینه عمق خاک‌ورزی در دو حالت باله‌دار و بدون باله ۲۰ سانتی‌متر با ضریب همبستگی به‌ترتیب ۰/۹۶۶۵ و ۰/۹۹۲۴ به‌دست آمد. جدول‌های ۱۱ و ۱۲، آنالیز واریانس ضرایب رگرسیونی در رابطه‌های (۸) و (۹) می‌باشند که براساس این جدول‌ها تمامی ضرایب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. باتوجه به جدول ۲ مجدداً این متغیر بر مصرف سوخت در وضعیت تیغه‌ی جدید باله‌دار دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد.

جدول ۱۰– مقایسه‌ی میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و حالت بهینه براساس عمق خاک‌ورزی در دو حالت باله‌دار و بدون باله

Table 10- Average comparison of measured values and optimal mode based on tillage depth in two modes winged and non-winged

	عمق خاک‌ورزی Tillage depth (cm)	مقاومت کششی Draft (kN)	سطح مقطع بالاآمدگی خاک Soil upheaving area (cm^2)	سطح مقطع به‌هم‌خوردگی خاک Soil disturbance area (cm^2)	مصرف سوخت Fuel consumption ($L\ min^{-1}$)	لغزش Slippage (%)	مقاومت ویژه Special draft ($N\ cm^{-2}$)
باله‌دار Winged	15	2.684*	404.563	506.668	0.410*	4.251*	5.322
	20	2.783	420.799*	671.223*	0.431	4.740	4.167*
بدون باله Non-winged	15	2.495*	239.496	386.429	0.399*	3.660*	6.518
	20	2.571	293.333*	556.548*	0.492	4.220	4.629*

* = مقادیر بهینه‌ی هریک از صفت‌های اندازه‌گیری شده در تیمار عمق خاک‌ورزی

* = Optimal values of each of the factors measured in the depth tillage treatment

جدول ۱۱– آنالیز واریانس برای ضرایب رگرسیونی معادله مربوط به بهینه‌سازی عمق خاک‌ورزی برای تیغه باریک جدید باله‌دار

Table 11- Analysis of variance for regression coefficients of the equation related to the optimization of the tillage depth for winged new narrow blade

	df	SS	MS	F	P Value
Regression	6	543.66	90.61	399.25	**
Residual	83	18.84	0.23		
Total	89	562.5			

** = $p \leq 0.01$

جدول ۱۲– آنالیز واریانس برای ضرایب رگرسیونی معادله مربوط به بهینه‌سازی عمق خاک‌ورزی برای تیغه باریک جدید بدون باله

Table 12- Analysis of variance for regression coefficients of the equation related to the optimization of the tillage depth for non-winged new narrow blade

	df	SS	MS	F	P Value
Regression	5	558.24	111.65	2199.62	**
Residual	84	4.26	0.05		
Total	89	562.5			

** = $p \leq 0.01$

همانطور که در جدول ۱۰ قابل مشاهده است، با افزایش عمق خاک‌ورزی، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است. دلیلی این امر وجود خاک بیشتر در هنگام افزایش عمق در جلوی تیغه می‌باشد، به همین دلیل مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد. که این نتیجه با نتایج دیگر پژوهشگران که بیان داشته‌اند با افزایش عمق خاک‌ورزی، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد (Wolf *et al*., 1981; Garner *et al*., 1987; Moitzi *et al*., 2014)، مطابقت دارد. همچنین با افزایش عمق خاک‌ورزی، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک نیز افزایش داشت (جدول ۱۰). با افزایش عمق خاک‌ورزی، تیغه خاک‌ورز با حجم بیشتری از خاک مواجه هست که باید برای انجام عملیات خاک‌ورزی، این حجم از خاک را جابه‌جا کند. به همین خاطر با افزایش عمق خاک‌ورزی، تیغه خاک‌ورز خاک بیشتری را جابه‌جا خواهد نمود که باعث افزایش سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک می‌گردد. همچنین برخی از پژوهشگران بیان داشته‌اند که با افزایش عمق خاک‌ورزی، سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک افزایش می‌یابد (Spoor and Fry, 1983; Liu and Kushwaha, 2006) که با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد. با توجه به دلایل گفته شده با افزایش مقاومت کششی و سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک در هنگام افزایش عمق خاک‌ورزی، مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور نیز افزایش می‌یابند که این نتیجه در جدول ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. زیرا در این بین با افزایش عمق خاک‌ورزی، نیروها وارد شده از طرف خاک به تراکتور افزایش یافته که باعث افزایش مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور می‌گردد. طبق نتایجی که از پژوهش‌های گذشته نیز به‌دست آمده، با افزایش عمق خاک‌ورزی، مصرف سوخت و لغزش چرخ تراکتور نیز افزایش می‌یابد (Kheiralla *et al*., 2004) که نتایج پژوهش حاضر نیز بیانگر این مهم می‌باشد. طبق جدول ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که مقدار متغیرهای اندازه‌گیری شده در این پژوهش برای تیغه باله‌دار هنگام افزایش عمق خاک‌ورزی، بیشتر از تیغه بدون باله بود. همان‌طور که قبلاً گفته شد این امر به دلیل وجود باله می‌باشد (Salar *et al*., 2013).

لازم به ذکر است که گرچه طبق جداول ۲ و ۳ شاهد معنی‌دار بودن اثرات متقابل دوتایی و سه‌تایی می‌باشیم، لیکن به دلیل اینکه رگرسیون چند متغیره یک رابطه خطی ساده می‌باشد، این‌گونه اثرات متقابل را در نظر نمی‌گیرد. همچنین مدل‌های مربوط به اثرات متقابل دوتایی و سه‌تایی که معنی‌دار شده‌اند با ضریب همبستگی بالایی نیز استخراج گردید که با جایگزینی مقادیر متناسب از جداول ۴، ۷ و ۱۰ در روابط به‌دست آمده، مجدداً شاهد همان نتایج مرتبط با رگرسیون چند متغیره ساده می‌باشیم که نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌ها برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی متغیرهای مد نظر می‌باشد.

هرچند اثرات متقابل متغیرهای مذکور بر مصرف سوخت برای وضعیت تیغه جدید بدون باله از اختلاف معنی‌داری برخوردار نبوده است اما مجدداً حداقل مصرف سوخت برای تیغه‌ی بدون باله نیز همانند تیغه‌ی جدید باله‌دار به‌ازای زاویه‌ی تمایل ۱۰ درجه حاصل شده است. در یک نگاه کلی و با توجه به جمیع عوامل، زاویه تمایل ۲۵ درجه برای هر دو وضعیت باله‌دار و بدون باله پیشنهاد شده است. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که بر روی تیغه جدید با اعمال زاویه تمایل و حذف باله، به‌طور قابل‌قبولی از میزان مقاومت کششی، مقاومت ویژه و مصرف سوخت کاسته می‌شود و بر مقادیر سطح مقطع به‌هم‌خوردگی و بالاآمدگی خاک افزوده می‌گردد. اثر متقابل این عامل بر روی میزان لغزش چرخ محرک نیز معنی‌دار می‌باشد. با توجه به این‌که اثر زاویه تمایل برای هر دو تیغه باله‌دار و بدون باله بر مقدار لغزش چرخ محرک معنی‌دار بوده است، به نحوی که افزایش زاویه تمایل غالباً موجب کاهش در مقدار لغزش چرخ محرک شده است. حال چنان‌چه مقدار لغزش چرخ محرک تراکتور به‌ازای زاویه‌ی بهینه ۲۵ درجه مد نظر قرار گیرد، براساس نمودار بیان‌کننده ارتباط بین راندمان کشش[1] در مقابل لغزش چرخ[2] (Wismer and Luth, 1974) و به‌ازای C_n = ۵۰[3] که از طریق محاسبه به‌دست آمده است، ملاحظه می‌گردد که مقدار راندمان کششی تراکتور ۸۲ ٪ حاصل خواهد شد. این مقدار بیانگر تأثیر زاویه تمایل بر مقدار توان خروجی کشش تراکتور با توجه به تعریف راندمان کششی تراکتور می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به رشد فزاینده‌ی استفاده از خاک‌ورز مرکب و با توجه به خشکی خاک و درصد پایین رطوبت آن و با توجه به لزوم جایگزینی تیغه‌های جدید خاک‌ورز مقاوم در برابر نیروهای عکس‌العمل وارده بر آن‌ها از جانب خاک خشک، تیغه‌های بدون باله با زاویه تمایل حدود ۲۵ درجه برای خاک‌ورزی در عمق ۲۰ سانتی‌متر و با سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت می‌تواند راندمان کششی تراکتور را تا ٪ ۸۲ افزایش دهد. از طرفی با مراجعه به جدول ۴ میزان مصرف سوخت تراکتور برای وضعیت تیغه‌ی بدون باله نیز به میزان ٪ ۳۴ در مقایسه با تیغه‌های خاک‌ورز وارداتی بدون زاویه تمایل کاهش یافته است.

1- Tractive efficiency
2- Wheel slippage
3- Wheel numeric (Wismer and Luth, 1974)

References

1. Akbarnia, A., A. Mohammadi, R. Alimardani, and F. Farhani. 2014. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 16 (4): 57-65.
2. Al-Suhaibani, S., 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 Science.
3. Azimi Zadeh, Z. 2017. Development and evaluation of a narrow blade for improving combined tillage tool performance. School of Agriculture. Shiraz University, Shiraz. Iran. (In Farsi).
4. Bilgili, M., and B. Sahin. 2010. Comparative analysis of regression and artificial neural network models for wind speed prediction. Meteorology and Atmospheric Physics 109 (1): 61-72.
5. Garner, T., W. Reynolds, H. Musen, G. Miles, J. Davis, D. Wolf, and U. Peiper. 1987. Energy requirement for subsoiling coastal plain soils. Transactions of the ASAE, 30 (2): 343-0349.
6. Harrison, H. P., and Z. J. Licsko. 1989. Soil reacting forces for models of three bent-leg plows. Soil and Tillage Research 15 (2): 125-135.
7. Hosseini, M., S. A. Movahedi Naeini, A. A. Dehghani, and Y. Khaledian. 2016. Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regressions. Soil and Tillage Research 157: 32-42.
8. Ibrahmi, A., H. Bentaher, E. Hamza, A. Maalej, and A. Mouazen. 2015. Study the effect of tool geometry and operational conditions on moldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. Computers and Electronics in Agriculture 117: 268-275.
9. Ismail, W., W. Ishak, and T. Burkhardt. 1993. Draft and fuel requirements measurement using tractor on-board data acquisition system. Pertanika Journal of Science & Technology 1 (1): 51-64.
10. Jafari, R., S. H. Karparvarfard, and S. A. Hosseini. 2011. The Effect of Geometry and Motion Characteristics of Narrow Tillage Tool on Soil Disturbance Efficiency. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi 7 (3).
11. 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 in Malaysia. Soil and Tillage Research 78: 21-34.
12. Kotu, V., and B. Deshpande. 2015. Concepts and Practice with Rapid miner. PP 165-193 in M. Kaufmann. Eds. Predictive Analytics and Data Mining. E-Publishing Inc., San Francisco.
13. Liu, J., and R. Kushwaha. 2006. Modeling of soil profile produced by a single sweep tool. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal 7 (1): 1-13.
14. Manuwa, S. 2009. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. Soil and Tillage Research 103 (2): 399-405.
15. Majidi-Iraj, H., and M. H. Raoufat. 1997. Power requirement of a bent leg plow and its effects on soil physical conditions. Iran Agricultural Research 16 (1): 1-16.
16. Mckyes, E. 1985. Soil cutting and tillage. Development in agricultural engineering. vol. 7. Elsevier. Amsterdam.
17. Melero, S., R. López-Garrido, J. M. Murillo, and F. Moreno. 2009. Conservation tillage: Short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. Soil and Tillage Research 104 (2): 292-298.
18. Mehrijani, M., J. Khodaei, and S. Zareei. 2018. Modeling and optimizing of the energy consumption of moldboard plow using Response Surface Methodology (RSM). Journal of Agricultural Machinery 9 (1): 167-176. (In Farsi).
19. Moitzi, G., H. Wagentristl, K. Refenner, H. Weingartmann, G. Piringer, J. Boxberger, and A. Gronauer. 2014. Effects of working depth and wheel slip on fuel consumption of selected tillage implements. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal 16(1): 182-190.
20. Raheman, S., and Y. Chen. 2001. Laboratory investigation of cutting forces and soil disturbance resulting from different manure incorporation tools in a loamy sand soil. Soil and Tillage Research 58 (1): 19-29.
21. Rahmanian-Koushkaki, H., S. H. Karparvarfard, and A. Mortezaei. 2015. The effect of the operational characteristics of the tractor composite electronic measurement system by the standards of emotion on the performance of chisel plows in a clay loam soil. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal. 17 (1): 44-49.
22. Rahmatian, M., S. H. Karparvarfard, and M. A. Nematollahi. 2018. Prediction for optimizing performance of chisel blade used in combined tillage to obtain suitable effectiveness. Iranian Journal of Biosystem Engineering 49 (1): 73-82. (In Farsi).
23. Rowe, R., and K. Barnes. 1961. Influence of speed on elements of draft of a tillage tool.
24. Salar, M. R., A. Esehaghbeygi, and A. Hemmat. 2013. Soil loosening characteristics of a dual bent blade subsurface tillage implement. Soil and Tillage Research 134: 17-24.
25. Salar, M. R., and S. H. Karparvarfard. 2017. Modeling and optimization of wing geometry effect on draft and vertical forces of winged chisel plow. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 468-479. (In Farsi).
26. Sahu, R. K., and H. Raheman. 2006. An approach for draft prediction of combination tillage implements in sandy clay loam soil. Soil and Tillage Research 90 (1): 145-155.

27. Solhjou, A., J. M. Fielke, and J. M. Desbiolles. 2012. Soil translocation by narrow openers with various rake angles. Biosystems Engineering 112 (1): 65-73.
28. Shafaei, S. M., M. Loghavi, and S. Kamgar. 2018. On the neurocomputing based intelligent simulation of tractor fuel efficiency parameters. Information Processing in Agriculture 5 (2): 205-223.
29. Spoor, G., and R. J. Godwin. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. Agricultural Engineering Research 23: 243-258.
30. Spoor, G., and R. K. Fry. 1983. Soil disturbance generated by deep working low rake angle narrow tines. Agricultural Engineering Research 28: 217-234.
31. Wismer, R. D., and H. J. Luth. 1974. Off-Road traction prediction for wheeled vehicles. Transactions of the ASAE, Presented as ASAE Paper No. 72-619. pp. 8-14.
32. Wolf, D., T. H. Garner, and J. W. Davis. 1981. Tillage mechanical energy input and soil crop response. Transactions of the ASAE, 24 (6): 1412-1419.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 273-287

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۸۷-۲۷۳

Optimization and Evaluation of Working Conditions of New Tillage Blade for Use in Tillage Tools

M. Mohammadi[1], S. H. Karparvarfard[1*], S. Kamgar[1], M. Rahmatian[2]

Received: 04-07-2018
Accepted: 29-10-2018

Introduction

Due to problems such as water resources constraints, poor soil and soil organic matter, and the problems related conventional tillage, the attention paid to protective tillage equipment should be taken into consideration by farmers. Today, agricultural machinery designers and manufacturers are looking for ways to resolve the problems due to the lack of water and soil resources and the reduction in fuel resources. One of these solutions is the optimization of agricultural machinery. The blade is one of the most important consumed components of tillage tools, which is very important for how it is adjusted and its effect on soil. According to research conducted on the importance of optimizing tillage implements, this study was carried out with the aim of optimizing the operating conditions for combined tillage with a new narrow blade.

Materials and Methods

The tests were taken place in the 10th section of farms in Agriculture school (Bajgah zone) of Shiraz University. Those tests were arranged as the split-split plot based on a completely randomized design. The treatments included the tillage depth, tilt angle and forward speed. The levels for the tillage depth, tilt angle and forward speed were 15, 20 cm and 0, 10, 15, 20, 25 degree and 3, 4, 5 km h^{-1} respectively. The experiments were performed in three replications. The test variables were draft, soil upheaving and disturbance areas, specific draft, fuel consumption and tractor wheel slippage. The CK 45 steel was used to make blades. The blades were made of the same dimensions and the difference between the blades was only at their tilt angle. Before starting the field tests, some properties of soil such as soil moisture content, soil texture and soil bulk density were measured. The RNAM test code was then used for measuring the draft force. The encoder and the fifth wheel were also employed to measure the slippage. For measuring the fuel consumption, two flow meters were used in the round way. The profilometer was applied for measuring the soil upheaving and disturbance areas. The specific draft was also computed. The data analysis was performed by SAS software (9.4 edition). Multiple regression method was used for modeling the desired treatments.

Results and Discussion

The results of multivariate regression method for optimizing forward speed, tillage depth and tilt angle for the blades including winged were 3.3 km h^{-1}, 20 cm and 25°, respectively, and for the non-winged, 3.5 km h^{-1}, 20 cm and 24.8°. Providing the tilt angle on the blade surface is considered as an innovation in this research, therefore, it can be seen from the results that with increasing this angle, the draft of the tillage was decreased. This could be due to the increased surface of the blade in the face of the soil on the diagonal surface. This increase was proportional to the cosine tilt angle at the initial surface of the blade. Therefore, the shear strength of the soil was decreased with increasing of this surface and ultimately decreased the amount of draft of the tillage. This variable had a significant difference with the depth of tillage and the forward speed of tractor and fuel consumption for the winged new narrow blade. Although the interactions of the above mentioned variables on the fuel consumption for the new blade condition were not significantly different, the minimum fuel consumption for the non-winged blade condition was also obtained at the same tilt angle as the winged new blade. In general, considering all of factors, the 25 degree inclination angle was proposed for both conditions. The interaction of this factor (tilt angle) on the wheel slip rate was also significant. The effect of the angle of inclination for both blades was significant on the slip of the wheel drive, so that the increase in the tilt angle reduced the amount of wheel slip. However, if the amount of slip of the tractor's wheel for an optimum angle of 25° was considered, according to the graph which representing the relationship between tractive efficiency vs. wheel slip and for C_n = 50, the tractive efficiency will be determined by calculation. It should be noted that the tractor's tractive efficiency was equivalent to 82%. This value reflects the effect of the tilt angle on the amount of tractor output power according to the definition of the tractive efficiency of the tractor.

Conclusions

Considering the increasing growth of using combined tillage tools in dry soil and its low moisture content, and considering the necessity of replacing the custom chisel blades with new blades which resistance to the soil

1- Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
(*- Corresponding Author Email: karparvr@shirazu.ac.ir)

reaction forces upon them, the non- winged blades with the tilt angle about 25° for working depth of 20 cm and forward speed of 3.5 km h^{-1} can increase the tractive efficiency of tractors to 82% and also decrease the fuel consumption by 34% compared to conventional tillage blades.

Keywords: Optimum forward speed, Optimum tilt angle blade, Optimum tillage depth, Tractive efficiency

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 289-298

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۹۸-۲۸۹

بررسی اثر آب مغناطیسی بر رشد و جوانه‌زنی بذر پنج رقم گندم

سعید زارعی[۱]، مهدی کسرایی[۲*]، محمد امین نعمت اللهی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۱

چکیده

آب مغناطیسی، روشی نو در افزایش بهره‌وری آب به‌شمار می‌آید. هدف این پژوهش بررسی اثر آب مغناطیسی بر شاخص‌های رشد و جوانه‌زنی پنج رقم گندم و تعیین بهترین رقم گندم از نظر شاخص‌های رشد بود. برای اعمال میدان مغناطیسی از دستگاهی استفاده شد که در آن، آب در میدان مغناطیسی قرار گرفت. آزمایش تعیین شاخص رشد و جوانه‌زنی به‌ترتیب در گلخانه و آزمایشگاه انجام شد. تیمارها شامل پنج رقم گندم (روشن، سرداری، شیراز، فلات و یاواروس)، سه سطح میدان (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌تسلا) و سه سطح مدت زمان (۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه) و نیز از هر رقم یک نمونه شاهد (بدون قرار گرفتن در میدان مغناطیسی) بود. عوامل مورد مطالعه شامل وزن خشک، درصد و سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه طولی و وزنی بود. آزمایش‌ها با استفاده از آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و با آزمون LSD انجام شد. نتایج نشان داد که اثر آب مغناطیسی بر کلیه شاخص‌های رشد و جوانه‌زنی با نمونه شاهد دارای اختلاف معنی‌دار بود و هر پنج رقم در میدان ۱۵۰ میلی‌تسلا و زمان ۱۲۰ دقیقه بیش‌ترین وزن خشک را داشتند. رقم روشن، بیش‌ترین میانگین درصد و سرعت جوانه‌زنی، ارقام روشن و سرداری بیش‌ترین شاخص بنیه طولی و رقم سرداری بیش‌ترین شاخص بنیه وزنی را داشت.

واژه‌های کلیدی: آب مغناطیسی، بنیه طولی و وزنی، شاخص‌های جوانه‌زنی، گندم

مقدمه

بیش از سه‌چهارم جمعیت جهان در کشورهای درحال‌توسعه زندگی می‌کنند و متأسفانه سهم عمده‌ای از افزایش جمعیت مربوط به این کشورها است که امروزه با مشکل گرسنگی و نبود تغذیه مناسب دست به‌گریبان هستند (Emam, 2007). از دیدگاه کارشناسان تنها راه‌حل مشکل گرسنگی، افزایش تولید غذا می‌باشد که در کشورهای درحال‌توسعه لازم است تا سرمایه‌گذاری بیش‌تری برای تولید غذا صورت گیرد. چنانچه قرار باشد عرضه غذا به‌صورت کنونی انجام شود، این کشورها باید طی ۳۰ سال آینده حداقل ۶۰ درصد به تولیدات کشاورزی خود بیفزایند (Rhoades *et al.*, 1992).

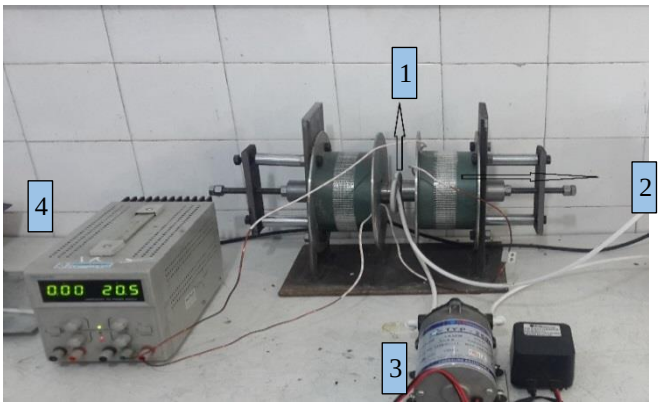
غلات، مهم‌ترین گیاهان غذایی کره‌ی زمین و تأمین‌کننده‌ی ۷۰ درصد غذای مردم می‌باشند. دو غله گندم و برنج ۶۰ درصد انرژی مورد نیاز بشر را تأمین می‌کنند. به‌طور کلی غلات تأمین‌کننده‌ی بیش از سه چهارم انرژی و نیمی از پروتئین مورد نیاز بشر به‌شمار می‌روند. بنابراین غلات نقش مهمی برای جلوگیری از گرسنگی را دارند (Emam, 2007; Eskandari *et al.*, 2016). با توجه به روند کاهش زمین‌های حاصلخیز و کمبود آب خصوصاً در بخش کشاورزی و گسترش فراگیر خشکی و خشکسالی و تقاضای رقابتی برای آب در بیش‌تر قسمت‌های جهان فشار زیادی روی منابع آب آمده است و روش‌های جدید برای حفظ کمیت و کیفیت آب و استراتژی‌های مقتضی باید ایجاد شود تا خطر تأمین آب مورد نیاز در سال‌های آینده کاهش یابد (Sadeghi, 2010). کیانی (Kiani, 2003) گزارش کرد، بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است و صرفه‌جویی آب در این بخش می‌تواند مقدار زیادی آب در اختیار ما قرار دهد بدون این‌که منابع جدید تخریب شوند. حسن اقلی (Hassan Oghli, 2008) نیز گزارش داد که در مبنای جهانی، کشاورزی ۶۹ درصد از کل برداشت‌های آبی را به خود اختصاص می‌دهد، به‌طوری‌که این رقم در ایران نزدیک به ۹۳ درصد است. لیدروود (Leather Wood, 2005) بیان کرد، یکی از روش‌هایی که می‌توان کل آب مصرفی برای آبیاری را کاهش داد، به‌کارگیری روش‌هایی است که محصول تولیدی به‌ازای هر واحد آب مصرفی، افزایش یابد. یکی از این روش‌ها، عبور دادن آب از میدان مغناطیسی می‌باشد. آب مغناطیسی کابردهای زیادی در زمینه‌های مختلف ازجمله، صنعتی، کشاورزی، بیولوژی و پزشکی دارد. در پالایش آب از طریق اعمال میدان مغناطیسی که جزء روش‌های تصفیه فیزیکی به‌شمار می‌رود، چیزی به آب کم یا زیاد نمی‌شود، بلکه فقط آرایش بارهای الکتریکی مولکول‌های آب تغییر می‌کند (Chibowski and Szcze, 2018). سلیم و همکاران (Selim *et al.*, 2019) مطالعه فیزیکی و آناتومی دو رقم گندم را تحت تأثیر آب مغناطیسی با در نظر گرفتن دو سطح تنش شوری خاک انجام دادند و اثرات مثبت آب مغناطیسی را در رشد و محصول نهایی مشاهده کردند. بعضی مطالعات نشان داده است که در اثر استفاده از آب مغناطیسی در شمار گل‌های تولید شده و

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email: kasraei@shirazu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.76707

محصول نهایی توت‌فرنگی افزایش به‌وجود می‌آید و سبب زودرسی آن می‌شود (Esitken and Turan, 2004). در گیاه گوجه‌فرنگی نیز همین افزایش در گل‌دهی و محصول نهایی و زودرسی گزارش شده است (Danilov *et al*., 1994). هم‌چنین افزایش در مقدار ماده مغذی گوجه‌فرنگی (گوشتی شدن) در اثر مغناطیسی شدن آب نیز گزارش شده است (Amaya *et al*., 1996; Podleoeny *et al*., 2004; Duarte Diaz *et al*., 1997). نتایج آزمایش‌های آبیاری با آب مغناطیسی در اورگان آمریکا بر روی مزارع یونجه نشان داد که عملکرد یونجه ۶۵ درصد افزایش و مصرف آب و هزینه پمپاژ تا ۴۲ درصد کاهش یافتند. مطالعه کنترل شده اثر آبیاری مغناطیسی بر روی درصد جوانه‌زنی گوجه‌فرنگی، کدو و خیار نشان داد که در مدت ۳ روز ۹۶ درصد بذرها جوانه زدند، در حالی‌که در تیمارهای معمولی تنها ۷۳ درصد بذور در ۱۴ روز جوانه زدند (Ghodsipour *et al*., 2016). گزارش پژوهش‌هایی در سال ۱۹۹۸ از مزارع پنبه‌کاری تگزاس آمریکا نشان می‌دهد که عملکرد پنبه در مزارع آبیاری شده با آب مغناطیسی، در حدود ۶۲۴/۱۴ کیلوگرم در هر هکتار بود، در حالی‌که در زمین‌های مشابه که با آب معمولی آبیاری شدند در حدود ۳۴۰/۱۹ کیلوگرم در هر هکتار گزارش گردید. آزمایش مزرعه‌ای با آب شور حاوی کربنات کلسیم، سولفات منیزیم و کلرید سدیم نتایج رضایت‌بخشی نشان داده است. برای نمونه، برداشت سورگوم ۴۵ درصد و ذرت ۳۰ درصد نسبت به مناطق کنترلی که آب شور و غیرمغناطیسی دریافت کردند بیشتر بود (Kiani, 2003). اثر آب مغناطیسی روی رشد بذور نخود توسط ناشر (Nasher, 2008) مورد آزمایش قرار گرفت. وی گزارش کرد که طول گیاهان بذور تیمار شده، ۲/۶۷ سانتی‌متر بلندتر بوده‌اند. اهداف این پژوهش بررسی اثر آب مغناطیسی بر وزن خشک، سرعت و درصد جوانه‌زنی، بنیه طولی و وزنی پنج رقم گندم شامل رقم‌های روشن، سرداری، شیراز، فلات و یاواروس و همچنین تعیین بهترین رقم از نظر شاخص‌های رشد جهت بهره‌وری محصول و آب مصرفی و انرژی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دستگاه‌های آب مغناطیسی بیشتر از نیم قرن است که مورد استفاده می‌باشد. نخستین سیستم مغناطیسی آب در سال ۱۹۴۵ در بلژیک ساخته شد (Fathi *et al*., 2006). به‌منظور انجام آزمایش‌ها، دستگاهی برای ایجاد میدان مغناطیسی مستقیم مشابه دستگاه واشیس و ناگاراجان (Vashisth and Nagarajan, 2010) با ظرفیت ایجاد میدان مغناطیسی ۵۰۰ میلی‌تسلا طوری ساخته شد که هم امکان قرارگیری مسیر آب و هم قرارگیری بذر در میدان مغناطیسی وجود داشته باشد (شکل ۱). این دستگاه شامل منبع تغذیه مستقیم جهت اعمال ولتاژ به سیم‌پیچ، پمپ گردش آب، سیم‌پیچ جهت ایجاد میدان مغناطیسی و مسیر حلزونی شکل می‌باشد که مسیر حلزونی شکل عبور آب در مدت زمان‌های مشخص در میدان مغناطیسی قرار گرفت (Zarei, 2017). برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی از دستگاه تسلامتر مدل MG-3002، ساخت کشور تایوان با دقت ۰/۱ میلی‌تسلا استفاده گردید. با توجه به قطر لوله مورد استفاده (۴ میلی‌متر)، دبی آب ۰/۹ لیتر بر دقیقه و سرعت متوسط چرخش آب ۱/۲ متر بر ثانیه، تعیین شد. در این پژوهش، صفات مربوط به پنج رقم گندم شامل سرعت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی، شاخص بنیه طولی و وزنی در آزمایشگاه در دمای معمولی اتاق به‌صورت کشت ۲۵ بذر در هر پتری‌دیش انجام شد. همچنین برای اندازه‌گیری صفت وزن خشک، عمل کاشت بذرها در شرایط یکسان گلخانه‌ای در گلدان‌های ۴ کیلویی، انجام شد. در ابتدا در هر گلدان ۱۰ بذر کشت شد و پس از ۲ هفته عمل تنک کردن انجام گرفت و در هر گلدان ۵ بوته که از نظر اندازه و شکل ظاهری بیشترین شباهت را به یکدیگر داشتند، حفظ شدند.



شکل ۱– دستگاه ایجاد میدان مغناطیسی با ظرفیت صفر تا ۵۰۰ میلی‌تسلا (۱– لوله مارپیچی، ۲– سیم‌پیچ میدان مغناطیسی، ۳– پمپ، ۴– منبع تغذیه مستقیم)

Fig.1. Magnetic field generating device with 0-500 mT (1- Spiral tube, 2- Magnetic field coil, 3- Pump, 4- DC Power supply)

اندازه‌گیری سرعت جوانه‌زنی

سرعت جوانه‌زنی با توجه به رابطه (۱) محاسبه گردید (Maguire, 1982).

$$GR = \sum_{D=1}^{m} \frac{n_D}{D} \quad (۱)$$

GR، n_D، D، m به‌ترتیب سرعت جوانه‌زنی، تعداد دانه‌های جوانه‌زده در هر روز، تعداد روز گذشته و تعداد روز گذشته از شروع آزمایش می‌باشند. معیار جوانه‌زنی بذرها خروج ریشه‌چه به طول کمینه ۲ میلی‌متر بود. عمل شمارش بذرها به مدت ۷ روز انجام شد.

اندازه‌گیری درصد جوانه‌زنی

جهت محاسبه درصد جوانه‌زنی، می‌توان از رابطه (۲) استفاده نمود.

$$GP_i = \frac{n_i}{S} \quad i = 1, 2, 3..., m \quad (۲)$$

که n_i تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز هفتم و S تعداد کل بذرها است و رشد ریشه‌چه به اندازه ۲ میلی‌متر به‌عنوان معیار جوانه‌زنی در نظر گرفته شد (Ellis and Roberts, 1981).

اندازه‌گیری شاخص بنیه طولی

شاخص بنیه طولی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$SLVI = \frac{(SL + RL) \times GP}{100} \quad (۳)$$

که $SLVI$، SL، RL و GP به‌ترتیب شاخص بنیه طولی بذر (سانتی‌متر)، طول ساقه‌چه (سانتی‌متر)، طول ریشه‌چه (سانتی‌متر) و درصد جوانه‌زنی می‌باشند (Abdul-Baki and Anderson, 1973). در ضمن متوسط طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاهان برای هر تیمار در پتری‌دیش اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری شاخص بنیه وزنی

شاخص بنیه وزنی ($SWVI$) با استفاده از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$SWVI = \frac{(SW + RW) \times GP}{100} \quad (۴)$$

که در آن SW و RW به‌ترتیب وزن ساقه‌چه (گرم) و وزن ریشه‌چه (گرم) می‌باشند (Abdul-Baki and Anderson, 1973).

کشت در گلخانه

عمل کاشت بذرها در گلدان‌های ۴ کیلویی انجام شد. در ابتدا در هر گلدان ۱۰ بذر کشت شد و پس از ۲ هفته عمل تنک کردن انجام گرفت و در هر گلدان ۵ بوته که از نظر اندازه و شکل ظاهری بیش‌ترین شباهت را به یکدیگر داشتند، حفظ شدند. در پایان ۶ هفته بوته‌های هر گلدان از سطح خاک بریده شدند و سپس نمونه‌ها در پاکت‌های کاغذی قرار گرفتند و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت توسط آون با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، سپس هر نمونه خارج و وزن خشک آن اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌ها به‌صورت آزمایش‌های فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، شامل فاکتور مدت زمان قرارگیری آب در میدان مغناطیسی در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه و فاکتور شدت میدان مغناطیسی یکنواخت در سه سطح ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌تسلا و پنج رقم گندم (یاواروس، فلات، شیراز، روشن، سرداری) در سه تکرار، انجام شد و از هر رقم یک تیمار بدون آن‌که در میدان مغناطیسی قرار گیرد در سه تکرار به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد که درمجموع ۱۵۰ تیمار را تشکیل دادند. آزمایش‌های مربوط به شاخص‌های رشد و جوانه‌زنی در داخل آزمایشگاه در دمای معمولی اتاق و آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری وزن خشک در محیط گلخانه و تحت شرایط کنترل شده انجام شد. در پایان هر آزمایش، داده‌ها اندازه‌گیری و ذخیره شدند. نتایج با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از آزمون F برای تعیین سطح معنی‌داری تیمارها استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

وزن خشک

جدول‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب نشان‌دهنده تجزیه واریانس و اثرات متقابل سه‌گانه عامل‌های شدت میدان مغناطیسی، مدت زمان اعمال میدان و همچنین رقم گندم بر صفت وزن خشک می‌باشند.

مطابق با نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ مشخص گردید که اثر رقم، میدان مغناطیسی و مدت زمان اعمال میدان بر صفت وزن خشک و همچنین اثر سه‌گانه عامل‌ها، بر این صفت معنی‌دار بود. همچنین مشاهده گردید که کلیه اثرات متقابل به جز اثر رقم در زمان، بر این صفت معنی‌دار بود ($p<0.01$). با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل سه‌گانه (در جدول ۱)، نتایج اثر سه‌گانه مورد بررسی قرار گرفت و در جدول ۲ آورده شد که نشان داد، سطح شاهد میدان مغناطیسی در رقم‌های فلات و شیراز دارای کمترین میانگین وزن خشک بود که با سایر میانگین‌های شاهد تفاوت معنی‌دار نداشت. در سطح میدان مغناطیسی ۱۵۰ میلی‌تسلا و در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه در رقم یاواروس، در مدت زمان ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه در رقم سرداری و همچنین مدت زمان ۱۲۰دقیقه در رقم روشن، بیش‌ترین مقدار وزن خشک مشاهده گردید. در این راستا، گیلاخمدو و همکاران (Gyulakhmedov kh *et al.*, 1991) گزارش کردند که وزن خشک گیاه پنبه در مرحله رسیدگی از ۱۵۱/۲ گرم در تیمار آب غیرمغناطیسی به ۱۶۲/۶ گرم در تیمار آب مغناطیسی افزایش یافت. به عقیده آنها این افزایش بازده محصول به دلیل از بین رفتن یون‌های سمی خاک توسط آب مغناطیسی، صورت گرفته است.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس بر وزن خشک

Table 1- Results of ANOVA on dry weight

منبع Source	درجه آزادی df	مربعات کل Total squares	میانگین مربعات Average squares	ضریب F F
Cultivar (V)	4	0.0078658	0.0019664	16.41**
Field (F)	2	0.0258939	0.0129469	108.04**
Time (T)	2	0.0046451	0.0023226	19.38**
V*F	8	0.0034712	0.0004339	3.62**
V*T	8	0.0014024	0.0001753	1.46ns
F*T	4	0.0111346	0.0027837	23.23**
V*F*T	16	0.0022979	0.0001436	1.2**
Error	90	0.0119832	16.33523	
Coefficient of variation				15.22725

** Significant at 1% of probability levels and ns Non-Significant

**معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns عدم معنی‌دار

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه رقم، میدان مغناطیسی و زمان در ارتباط با صفت وزن خشک

Table 2- Comparison of the mean of triple interaction of the cultivar of the magnetic field and time (Dry weight trait)

میدان مغناطیسی Magnetic field (mT)	زمان Time (min)	رقم یاواروس Yavarus	رقم فلات Falat	رقم شیراز Shiraz	رقم روشن Roshan	رقم سرداری Sardari
0	0	0.045 O-R	0.042 R	0.042 QR	0.045 O-R	0.053 L-R
100	30	0.055 K-R	0.045 P-R	0.051 N-R	0.074 G-L	0.064 J-Q
	60	0.083 F-J	0.055 K-R	0.065 J-P	0.083 F-J	0.1133 AB
	120	0.090 C-H	0.061 K-R	0.090 C-H	0.103 B-F	0.104 B-F
150	30	0.084 E-G	0.073 G-M	0.066 I-P	0.076 G-K	0.094 B-G
	60	0.083 F-J	0.087 D-I	0.074 G-L	0.089 C-H	0.107 A-D
	120	0.124 A	0.098 B-F	0.093 B-G	0.105 A-E	0.110 A-C
200	30	0.067 I-O	0.056 K-R	0.063 J-R	0.074 G-L	0.070 H-N
	60	0.054 K-R	0.049 N-R	0.048 N-R	0.059 K-R	0.063 J-R
	120	0.051 M-R	0.046 O-R	0.044 P-R	0.052 M-R	0.057 K-R

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD5%).

Means in each column with the same letters according to LSD test has no significant difference on probability of 5%.

سرعت جوانه‌زنی

جدول ۳ نشان‌دهنده تجزیه واریانس مربوط به صفت سرعت جوانه‌زنی می‌باشد. بر این اساس اثر رقم، اثر میدان مغناطیسی و همچنین اثر مدت زمان اعمال میدان مغناطیسی و همچنین کلیه اثرات متقابل بر این صفت معنی‌دار بود ($p<0.01$). با توجه به معنی‌دار بودن اثر متقابل سه‌گانه (در جدول ۳)، نتایج این اثر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل در جدول ۴ آورده شد. با مقایسه میانگین اثر سه‌گانه مشخص گردید که برای ارقام مختلف، تفاوت چشمگیری در مورد صفت سرعت جوانه‌زنی، وجود ندارد.

در مورد تأثیر آب مغناطیسی روی سرعت رشد، تحقیقی توسط ناشر (Nasher, 2008) روی بذر نخود مورد آزمایش قرار گرفت. وی گزارش کرد که طول گیاهان تیمار شده توسط آب مغناطیسی نسبت به حالت غیرمغناطیسی ۲/۶۷ سانتی‌متر بلندتر بوده‌اند. طبق مطالعات بیلو و همکاران (Belov *et al.*, 1988) آب مغناطیسی بسیار آسان‌تر از آب معمولی توسط غشای بذر جذب می‌شود و به قسمت‌های درونی بذر راه پیدا می‌کند و علاوه بر جذب بهتر، فرآیندهای متابولیکی که منجر به جوانه‌زنی می‌شود، شروع می گردد.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس بر سرعت جوانه‌زنی

Table 3- Results of ANOVA on germination rate

منبع Source	درجه آزادی df	مربعات کل Total squares	میانگین مربعات Average squares	ضریب F F
Cultivar (V)	4	43202.652	10800.663	661.19**
Field (F)	2	604.31704	302.15852	18.5**
Time (T)	2	400.20835	200.10417	12.25**
V*F	8	567	70.875	4.34**
V*T	8	1262.1187	157.76484	9.66**
F*T	4	236.12075	59.03019	3.61**
V*F*T	16	1047.4364	65.46478	4.01**
Error	90	1633.5228	16.33523	
Coefficient of variation				11.7953

** Significant at 1% of probability levels

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه رقم، میدان مغناطیسی و زمان در ارتباط با صفت سرعت جوانه‌زنی

Table 4- Comparison of the mean of triple interaction of the cultivar, magnetic field and time (Germination rate trait)

میدان مغناطیسی Magnetic field (mT)	زمان Time (min)	رقم یاواروس Yavarus	رقم فلات Falat	رقم شیراز Shiraz	رقم روشن Roshan	رقم سرداری Sardari
0	0	10.41 KL	20.6I J	7.8 L	57.28 A-C	46.56 D
100	30	9.35 KL	24.01 HI	9.1 KL	61.25 A	50.66 CD
	60	10.55 KL	33.97 E-G	14.03 J-L	57.17 A-C	48.12 D
	120	11.68 KL	33.70 E-G	12.93 KL	58.31 AB	47.41 D
150	30	9.81 KL	36.78 EF	11.17 KL	61.25 A	48.9 D
	60	10.23 KL	31.3 FG	15.2 J-L	57.6 A-C	47.83 D
	120	39.32 E	34.39 E-G	16.26 JK	59.6A B	49.12 D
200	30	11.45 KL	36.91 EF	12.53 KL	60.75 AB	53.24 B-D
	60	28.48 GH	38.41 EF	13.85 J-L	59.33 AB	48.65 D
	120	32.48 E-G	39.01 E	16.27 JK	60.25 AB	47.83 D

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD5%).

Means in each column with the same letters according to LSD test has no significant difference on probability of 5%.

درصد جوانه‌زنی

جدول ۵ نشان‌دهنده تجزیه واریانس صفت درصد جوانه‌زنی می‌باشد. بر این اساس اثر رقم، اثر میدان مغناطیسی و اثر زمان اعمال میدان مغناطیسی و همچنین کلیه اثرات متقابل بر این صفت معنی‌دار بود ($p<0.01$). مقایسه میانگین اثر سه‌گانه برای صفت درصد جوانه‌زنی گیاه در جدول ۶ آورده شد. بررسی اثر متقابل سه‌گانه نشان داد که سطح شاهد میدان مغناطیسی در رقم شیراز دارای کم‌ترین میانگین درصد جوانه‌زنی بود که با میانگین سایر سطوح در این رقم تفاوت معنی‌دار نداشت. کلیه سطوح رقم روشن، بیشترین میزان درصد جوانه‌زنی را نشان داد که با میانگین سایر سطوح این رقم، تفاوت معنی دار نداشت.

جدول ٥- نتایج تجزیه واریانس بر درصد جوانه‌زنی

Table 5- Results of ANOVA on germination percentage

منبع Source	درجه آزادی df	مربعات کل Total squares	میانگین مربعات Average squares	ضریب F F
Cultivar (V)	4	100858.9	25214.725	378.52**
Field (F)	2	1738.0148	869.0074	13.05**
Time (T)	2	1391.1704	695.5852	10.44**
V*F	8	1404.8	175.6	2.64*
V*T	8	2568.5333	321.0667	4.82**
F*T	4	2148.563	537.1407	8.06**
V*F*T	16	12057.956	753.6222	11.31**
Error	90	6661.3333	66.6133	
Coefficient of variation				12.24255

** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد

** and *: Significant at 1% and 5% of probability levels, respectively.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه رقم، میدان مغناطیسی و زمان در ارتباط با صفت درصد جوانه‌زنی

Table 6- Comparison of the mean of triple interaction of the cultivar, magnetic field and time (Germination percentage trait)

میدان مغناطیسی Magnetic field (mT)	زمان Time (min)	رقم یاواروس Yavarus	رقم فلات Falat	رقم شیراز Shiraz	رقم روشن Roshan	رقم سرداری Sardari
0	0	37.33 G-I	66 F	16 K	94.66 AB	82 BE
100	30	40.66 GH	52 G	18.66 JK	100 A	89.33 A-C
	60	38 G-I	66.66 EF	29.33 H-K	97.33 AB	89.33 A-C
	120	37.33 G-I	69.33 EF	22.66 I-K	97.33 AB	89.33 A-C
150	30	33.33 H-J	78.66 C-F	18.66 JK	100 A	88 A-D
	60	36.66 G-I	69.33 EF	37.33 G-I	98.66 A	93.3 A-C
	120	101.33 A	72 EF	18.66 JK	98.66 A	94.66 AB
200	30	36.55 G-I	69.33 EF	24 I-K	100 A	96 AB
	60	98.66 A	73.33 D-F	30.66 H-K	100 A	97.33 AB
	120	40 GH	81.33 B-F	22.66 I-K	100 A	90.66 A-C

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD5%).

Means in each column with the same letters according to LSD test has no significant difference on probability of 5%.

اثر فن‌آوری مغناطیسی را هیلال (Hilal, 2000) روی میزان جوانه‌زنی و سبز شدن بذور بعضی از گیاهان در شرایط خاک شور و قلیایی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که گوجه‌فرنگی در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی شده نسبت به مغناطیسی نمودن بذر واکنش بهتری نشان می‌دهد. در تیمارهای مغناطیسی شده، بذور گندم بعد از ۶ روز ۱۰۰ درصد جوانه زدند در حالی‌که در تیمار معمولی بذور بعد از ۹ روز ۸۳ درصد جوانه زدند. واشیث و ناگاراجان (Vashisth and Nagarajan, 2010) با بررسی اثر تیمار مغناطیس روی بذر در میدان‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌تسلا نشان دادند که میدان مغناطیسی بر سرعت رشد و درصد سبز شدن دانه‌های آفتاب‌گردان تأثیر مثبتی دارد. آن‌ها از ۹ تا ۵۷ درصد افزایش سرعت جوانه‌زنی را گزارش کردند.

بنیه طولی

جدول ۷ نشان‌دهنده تجزیه واریانس صفت بنیه طولی می‌باشد. بر این اساس اثر رقم، میدان مغناطیسی و مدت زمان اعمال میدان مغناطیسی و همچنین کلیه اثرات متقابل بر این صفت معنی‌دار بود ($p<0.01$). مقایسه میانگین اثر سه‌گانه رقم در میدان مغناطیسی در زمان برای صفت بنیه طولی گیاه در جدول ۸ آورده شد. بررسی اثر متقابل سه‌گانه نشان داد که سطح شاهد میدان مغناطیسی در رقم شیراز دارای کم‌ترین میانگین بنیه طولی بود که با میانگین سایر سطوح در این رقم، تفاوت معنی‌دار نداشت. سطح اعمال میدان مغناطیسی ۲۰۰ میلی‌تسلا با زمان ۶۰ دقیقه در رقم روشن بیشترین میزان بنیه طولی را داشت که با سایر میانگین‌ها اختلاف معنی‌دار آماری نشان داد. به طور کلی ارقام روشن و سرداری مقادیر بالاتری از میزان بنیه طولی را نشان دادند.

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس بر بنیه طولی

Table 7- Results of ANOVA on seed length vigor index

منبع Source	درجه آزادی df	مربعات کل Total squares	میانگین مربعات Average squares	ضریب F F
Cultivar (V)	4	1512.2043	378.05107	1811.06**
Field (F)	2	36.383066	18.191533	87.15**
Time (T)	2	19.258356	9.629178	46.13**
V*F	8	35.279014	4.409877	21.13**
V*T	8	46.16401	5.770501	27.64**
F*T	4	59.81411	14.953528	71.64**
V*F*T	16	214.19311	13.387069	64.13**
Error	90	20.874541	0.208745	
Coefficient of variation				8.368934

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

** Significant at 1% of probability levels

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه رقم، میدان مغناطیسی و زمان در ارتباط با صفت بنیه طولی

Table 8- Comparison of the mean of triple interaction of the cultivar, magnetic field and time (Seed length vigor index trait)

میدان مغناطیسی Magnetic field (mT)	زمان Time (min)	رقم یاواروس Yavarus	رقم فلات Falat	رقم شیراز Shiraz	رقم روشن Roshan	رقم سرداری Sardari
0	0	1.407^{P-S}	2.695^{MN}	0.656^{S}	9.712^{C-E}	8.128^{IJ}
100	30	1.697^{O-R}	4.390^{L}	1.028^{RS}	9.240^{E-H}	9.437^{E-G}
	60	1.514^{P-S}	4.026^{L}	1.338^{P-S}	8.452^{HI}	9.008^{E-H}
	120	1.171^{Q-S}	4.497^{L}	1.120^{Q-S}	7.602^{J}	9.110^{E-H}
150	30	1.012^{RS}	4.868^{L}	1.465^{P-S}	8.926^{E-I}	8.623^{G-I}
	60	0.846^{RS}	4.073^{L}	1.911^{N-Q}	10.466^{BC}	9.382^{E-G}
	120	8.860^{E-I}	4.412^{L}	0.740^{S}	8.793^{F-I}	9.663^{C-F}
200	30	1.440^{P-S}	2.485^{M-O}	0.953^{RS}	10.866^{B}	9.586^{D-F}
	60	10.341^{B-D}	4.195^{L}	2.168^{M-P}	12.469^{A}	9.568^{D-F}
	120	1.245^{Q-S}	5.737^{K}	2.784^{M}	9.280^{E-H}	9.561^{D-F}

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD5%).

Means in each column with the same letters according to LSD test has no significant difference on probability of 5%.

خوش روش و همکاران (Khoshravesh *et al.*, 2015) گزارش کردند که عملکرد دانه، بیوماس، شاخص برداشت و ارتفاع گیاه در تیمار آب مغناطیسی شده بیشتر از آب غیرمغناطیسی است که تیمار آب مغناطیسی باعث افزایش ۸/۰۳ درصدی ارتفاع گیاه شد و به‌طور کلی باعث افزایش ۵/۰۵ درصد در عملکرد دانه و افزایش ۵/۳۱ درصد بیوماس شده است. در تحقیقی واسیلوسکی (Vasilevski, 2003)

روی چغندرقند نشان داد که میدان مغناطیسی باعث افزایش وزن ریشه به میزان ۹۴ درصد، سطح برگ به میزان ۵۲ درصد، عملکرد به میزان ۱۳ درصد و میزان قند به نسبت ۰/۷درصد می‌شود.

بنیه وزنی

جدول ۹ نشان‌دهنده تجزیه واریانس صفت بنیه وزنی می‌باشد. بر این اساس کلیه اثرات به جز اثر متقابل رقم در میدان مغناطیسی معنی‌دار بود ($p<0.01$). مقایسه میانگین اثر سه‌گانه رقم، میدان مغناطیسی و مدت زمان اعمال میدان، برای صفت بنیه وزنی گیاه در جدول ۱۰ آورده شد. بررسی اثر متقابل سه‌گانه نشان داد که سطح شاهد میدان مغناطیسی در رقم شیراز دارای کمترین میانگین بنیه وزنی بود که با میانگین سایر سطوح در این رقم تفاوت معنی‌دار نداشت. سطح ۲۰۰ میلی‌تسلا با اعمال مدت زمان ۱۲۰ دقیقه در رقم سرداری، بیشترین بنیه وزنی را داشت که با سطح ۲۰۰ میلی‌تسلا با مدت زمان ۶۰ دقیقه در همین رقم، اختلاف معنی‌داری نشان نداد.

جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس بر بنیه وزنی

Table 9- Results of ANOVA on seed weight vigor index

منبع Source	درجه آزادی df	مربعات کل Total squares	میانگین مربعات Average squares	ضریب F F
Cultivar (V)	4	3.1870522	07967631	289.85**
Field (F)	2	0.1829764	0.0914882	33.28**
Time (T)	2	0.2330747	0.1165374	42.39**
V*F	8	0.0208523	0.0026065	0.95ns
V*T	8	0.3565774	0.0445722	16.21**
F*T	4	0.0648139	0.0162035	5.89**
V*F*T	16	0.3547011	0.0221688	8.06**
Error	90	0.2748889	0.0027489	
Coefficient of variation				14.38446

** معنی‌دار در سطح یک درصد و ns عدم معنی‌دار

** Significant at 1% of probability levels and ns Non-Significant

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه رقم، میدان مغناطیسی و زمان در ارتباط با صفت بنیه وزنی

Table 10- Comparison of the mean of triple interaction of the cultivar, magnetic field and time (Seed weight vigor index trait)

میدان مغناطیسی Magnetic field (mT)	زمان Time (min)	رقم یاواروس Yavarus	رقم فلات Falat	رقم شیراز Shiraz	رقم روشن Roshan	رقم سرداری Sardari
0	0	0.347^{J-M}	0.247^{M-P}	0.112^{S}	0.484^{E-G}	0.538^{D-F}
100	30	0.124^{RS}	0.249^{L-P}	0.106^{S}	0.363^{JK}	0.374^{JK}
	60	0.132^{Q-S}	0.443^{F-J}	0.106^{S}	0.437^{G-J}	0.545^{C-E}
	120	0.112^{S}	0.259^{L-P}	0.165^{P-S}	0.655^{AB}	0.645^{B}
150	30	0.122^{RS}	0.346^{J-M}	0.260^{L-P}	0.383^{H-K}	0.480^{E-H}
	60	0.292^{K-O}	0.482^{E-G}	0.250^{L-P}	0.576^{B-E}	0.642^{BC}
	120	0.318^{K-N}	0.260^{L-P}	0.138^{Q-S}	0.641^{BC}	0.618^{B-D}
200	30	0.218^{N-R}	0.381^{I-K}	0.205^{O-S}	0.570^{B-E}	0.434^{G-J}
	60	0.349^{J-L}	0.304^{K-O}	0.207^{O-S}	0.430^{G-J}	0.660^{AB}
	120	0.109^{S}	0.478^{E-I}	0.229^{N-Q}	0.640^{BC}	0.739^{A}

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار ندارند (LSD5%).

Means in each column with the same letters according to LSD test has no significant difference on probability of 5%.

مارتینز و همکاران (Martinez *et al.*, 2002) افزایش میزان رشد و همچنین وزن ریشه و اندام هوایی گیاه گندم را در اثر کاربرد میدان مغناطیسی مشاهده کردند. پوئیناپن و همکاران (Poinapen *et al.*, 2013) نشان دادند که کاربرد میدان مغناطیسی قویتر در آزمایش آن‌ها (حدود ۱۰۰ میلی‌تسلا) باعث افزایش میزان وزن ریشه و اندام هوایی و همچنین عملکرد نهایی گیاه گوجه‌فرنگی شد. ریشه و اندام هوایی جوانه‌های ذرت در اثر کاربرد میدان مغناطیسی یکنواخت در آزمایش فلورزو همکاران (Florz *et al.*, 2007) دارای رشد و وزن بیشتری بودند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر آب مغناطیس بر رشد و جوانه‌زنی پنج رقم گندم متداول برای کشت، بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان بهترین رقم را از لحاظ شاخص‌های بررسی شده در این پژوهش، جهت بهره‌وری محصول و آب مصرفی و انرژی انتخاب نمود. در اندازه‌گیری وزن خشک به‌ترتیب در رقم‌های یاواروس، روشن و سرداری در میدان ۱۵۰ میلی‌تسلا و مدت زمان ۱۲۰ دقیقه بیش‌ترین وزن خشک مشاهده گردید که با شاهد، تفاوت معناداری

داشت. در بررسی سرعت جوانه‌زنی نتایج نشان داد که در حالت کلی ارقام مختلف در سطوح میدان متفاوت، اختلاف معناداری ندارند. با این وجود رقم روشن در میدان‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌تسلا و در مدت زمان ۳۰ دقیقه بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی را داشت. با توجه به آن که اختلاف معناداری بین این دو سطح میدان (۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌تسلا) وجود نداشت، بهتر است که از سطح میدان پایین‌تر جهت مصرف کمتر انرژی استفاده شود. نتایج به‌دست آمده از درصد جوانی‌زنی نشان داد که اختلاف بین سطوح میدان مغناطیسی در همه ارقام، سبب تفاوت معناداری نمی‌شود. البته در رقم‌های روشن و یاواروس، نسبت به بقیه رقم‌ها درصد جوانه‌زنی بیشتری حاصل شد. بنابراین بهتر است از کم‌ترین سطح میدان و مدت زمان اعمال میدان، استفاده گردد. در بررسی صفت بنیه طولی، مشاهده شد که رقم روشن در میدان ۲۰۰ میلی‌تسلا و مدت زمان ۶۰ دقیقه، دارای بیش‌ترین درصد بنیه طولی است که با سایر میانگین‌ها اختلاف معنی‌داری نشان داد. در حالت کلی ارقام روشن و سرداری از صفت بنیه طولی بیش‌تری نسبت به بقیه ارقام برخوردار بودند و بهتر است که از این ارقام برای رسیدن به صفت بنیه طولی بیشتر استفاده شود. در اندازه‌گیری صفت بنیه وزنی، رقم سرداری با سطح میدان ۲۰۰ میلی‌تسلا و زمان ۱۲۰ دقیقه، بیش‌ترین درصد بنیه وزنی را دارا بود که با درصد بنیه وزنی در همین سطح میدان و با زمان ۶۰ دقیقه، اختلاف معناداری نداشت. بنابراین پیشنهاد می‌شود که از میدان با سطح ۲۰۰ میلی‌تسلا و زمان کم‌تر استفاده شود.

References

1. Abdul-Baki, A. A., and J. D. Anderson 1973. Vigour determination in soybean seeds by multiple criteria. Crop Science 13 (6): 630-637.
2. Amaya, J. M., M. V. Carbonell, E. Martinez, and A. Raya. 1996. Effects of stationary magnetic fields on germination and growth of seeds. Horticultural Abstracts 6: 1363.
3. Belov, G. D., N. G. Sidorevich, and V. T. Golovarev. 1988. Irrigation of farm crops with water treated with magnetic field. Soviet Agricultural Sciences, USA.
4. Chibowski, E., and A. Szczes. 2018. Magnetic water treatment- A review of the latest approaches, Chemosphere 203: 54-67.
5. Danilov, V., T. Bas, M. Eltez, and A. Rizakulyeva. 1994. Artificial magnetic field effects on yield & quality of tomatoes. Acta Horticulture 366: 279-285.
6. Duarte Diaz, C. E., J. A. Riquenes, B. Sotolongo, M. A. Portuondo, E. O. Quintana, and R. Perez. 1997. Effects of magnetic treatment of irrigation water on the tomato crop. Horticulture Abstracts 69: 494.
7. Ellis R. H., and E. H. Roberts. 1981. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. Seed Science and Technology 9: 373-409.
8. Emam, Y. 2007. Crop Growing (3th ed.). Shiraz University Publication Center. Iran, Shiraz. (In Farsi).
9. Esitken, A., M. Turan. 2004. Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (Fragaria- ananassa cv. Camarosa). Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science 54 (3): 135-139.
10. Eskandari, I., and V. Feiziasl. 2016. Influence of Conservation Tillage on some Soil Physical Properties and Crop Yield in Vetch-Wheat Rotation in Dryland Cold Region. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 451-467. (In Farsi).
11. Fathi, A., T. Mohameda, G. Claudeb, G. Maurinb, and B. A. Mohameda. 2006. Magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. Water Research 40 (10): 1941-950.
12. Florez, M., M. V. Carbonell, and E. Mart'inez. 2007. Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination & early growth. Environmental and Experimental Botany 59: 6-75.
13. Ghodsipour, S. H., S. M. Abtahi, and F. Lotfian Delouei. 2016. A Study on Modern Agricultural Irrigation Methods with the Approach to Introducing Modern Irrigation Technology. The First National Water Management Conference on Optimal Water Consumption in Agriculture. Iran, Hamadan. (In Farsi).
14. Gyulakhmedov, Kh., and N. Seiidaliev. 1991. Irrigation with magnetically treated water. CAB Abstracts Khlopok 5: 57-58.
15. Hassan Oghli, A. 2008. Applications of wastewater and recycled water. In: 1th National Seminar on Recovered Water Wastewater in Water Resources Management, Mashhad. (In Farsi).
16. Hilal, M. H., and M. M. Hilal. 2000. Application of magnetic technologies in dessert agriculture. Seed germination & seedling emergence of some crops in a saline calcareous soil. Egyptian Journal of Soil Science 40 (3): 413-422.
17. Khoshravesh, M., and F. Emamighara. 2015. Effect of Magnetic Water on Wheat yield under Irrigation Condition, Third Agricultural and Sustainable Natural Resources Conference. Iran, Tehran, Mehr-e Aravand Educational Institute, Promotion Group of Environmental Lovers. (In Farsi).
18. Kiani, A. 2003. Magnetic water New phenomena in promoting water productivity. Agricultural and Natural Resources Research Center of Golestan Province. Zaytun Magazine 183: 1-9. (In Farsi).
19. Leather Wood, W. R. 2005. Influence of salt stress on germination, root elongation and carbohydrate content of five salt tolerant and sensitive taxa. MSc. Thesis, Department of Horticultural Science, North Carolina State University, USA.

20. Maguire, I. D. 1982. Speed of germination - Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. Crop Science 2 (2):176-177.
21. Martinez, E., M. Carbonell, and M. Florez. 2002. Magnetic biostimulation of initial growth stages of wheat (*Triticum aestivum* L.). Electromagnetic Biology and Medicine 21 (1): 43-53.
22. Nasher, S. H. 2008. The Effect of Magnetic Water on Growth of Chick-Pea Seeds. Engineering and Technology 26 (9): 1125-1130.
23. Podleoeny, J., S. Pietruszewski., and A. Podleoena. 2004. Efficiency of the magnetic treatment of broad bean seeds cultivated under experimental plot Conditions. International Agrophysics 18 (1): 65-72.
24. Poinapen, D., D. C. Brown, and G. K. Beeharry. 2013. Seed orientation & magnetic field strength have more influence on tomato seed performance than relative humidity & duration of exposure to non-uniform static magnetic fields. Journal of Plant Physiology 170 (14): 1251-1258.
25. Rhoades, J., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The use of salirle waters for crop production. FAO Irrigation and Drainage paper 48. Rome, Italy.
26. Sadeghi, H. 2010. Design, construction and evaluation of magnetic water supply for agricultural use. Master's Thesis, University of Tehran, Tehran. (In Farsi).
27. Selima, Dalia Abdel-Fattah H., R. M. A. Nassar, M. S. Boghdad, and M. Bonfill. 2019. Physiological and anatomical studies of two wheat cultivars irrigated with magnetic water under drought stress conditions. Plant Physiology and Biochemistry 135: 480-488.
28. Vashisth, A., and S. Nagarajann 2010. Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. Journal of Plant Physiology 167 (2): 149-156.
29. Vasilevski, G. 2003. Perspectives of the application of biophysical methods in sustainable agriculture Bulg. Journal Plant Physiol 29 (3): 179-186.
30. Zarei, S. 2017. Impact of Magnetized Water by a New System on the Growth and Germination of Five Wheat Grain Seeds, Master's Thesis, University of Shiraz, Shiraz. (In Farsi).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 289-298

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۹۸-۲۸۹

Investigating the Impact of the Magnetized Water on the Growth and Germination of Five Wheat Grain Seeds

S. Zarei[1], M. Kasraei[2*], M. A. Nematollahi[2]

Received: 19-11-2018
Accepted: 01-05-2019

Introduction

Cereals as one of the most important sources of food plants could provide more than 70% of the food for the human population. Passing of water from the magnetic field is among approachable methods in order to reduce the total amount of water used for irrigation. Moreover, magnetized water is a new concept for increasing the water efficiency. Therefore, this study was aimed to investigate the effects of the magnetized water on some of features containing dry weight, germination velocity and percentage, length and weight vigor indices of five common wheat cultivars including Roshan, Sardari, Shiraz, Falat and Yavarus, to introduce the best cultivar considering the growth and germination indices as well as water and energy efficiency.

Materials and Methods

To perform this experiment, a device with a magnetic field of 500 millitesla was constructed to accommodate both the water path and the placement of seeds in the magnetic field. To perform the experiments, 10 seeds in 4-kg vases and 25 seeds in each Petri dish were cultivated in the greenhouse and laboratory, respectively. The experiments were carried out in the form of completely randomized factorial design. The factors are considered as the duration time of keeping the water in the magnetic field (three levels of 30, 60 and 120 minutes), the intensity of the magnetic field (three levels of 100, 150, and 200 millitesla), and five wheat cultivars (Roshan, Sardari, Shiraz, Falat and Yavarus) in three replications.

Experiments related to the both of rate and percent of germination and for dry weight were performed at room temperature in the laboratory and greenhouse under controlled conditions, respectively. The measured data were analyzed using SAS software. The F test was used to determine the significant level of treatments. The comparison of the means was evaluated using LSD test.

Results and Discussion

The obtained results, showed that the effect of magnetic water on all growth and germination indices compared to control samples was significant. Under the 150 millitesla and 120 minutes treatment, the Yavarus, Roshan and Sardari cultivar had maximum dry weight, respectively. The Roshan cultivar had the maximum germination velocity at 100 and 150 millitesla and duration time of 30 minutes. Moreover, the maximum germination percentage was found in the Roshan cultivar, which did not have a significant difference with Yavarus cultivar. The Roshan cultivar in 200 millitesla field and duration time of 60 minutes, had the maximum percentage of length vigor index, which showed a significant difference with other averages.

In general, Roshan and Sardari cultivars had more length vigor index than other cultivars. Sardari cultivar had maximum percentage of weight vigor index under 200 millitesla and 120 minutes duration time, which had no significant difference with the percentage of weight vigor index at the same field level and with duration time of 60 minutes.

Conclusions

According to the obtained results to achieve the maximum value of dry weight, it is better to use the Yavarus cultivar. It is recommended to use the Roshan cultivar with the lower level of magnetic field and duration time to attain the maximum value of the germination velocity and percentage. To get the maximum value of the length vigor index and the weight vigor index the Roshan and Sardari cultivars, and the Sardari cultivar with field of 200 milli Tesla and lower duration time are preferred.

Keywords: Germination indices, Length and weight vigor, Magnetic water, Wheat

1- MSc Graduated Student, Biosystems Engineering Dept., Shiraz University, Shiraz, Iran
2- Assistant Professor, Biosystems Engineering Dept., Shiraz University, Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: kasraei@shirazu.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 299-311

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۱۱-۲۹۹

تاثیر فشردگی و رطوبت خاک بر هدایت الکتریکی ظاهری خاک و مقاومت غلتشی لاستیک تراکتور

غزاله صفر علیزاده هریسی[۱]، علی محمد برقعی[۲]، احمد شریفی مالواجردی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

چکیده

امروزه فشردگی، یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر خاک و رشد محصولات کشاورزی است. فشردگی به معنی افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک است که باعث فشرده شدن ذرات نزدیک به هم خاک می‌شود. هدایت الکتریکی ظاهری (EC_a) در محیط‌های مثل آب یا خاک، بیانگر مقدار املاح معدنی محلول است که معیاری از میزان املاح و شوری در خاک و آب به‌شمار می‌آید. قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری محلول خاک، متناسب با غلظت یون‌ها در محلول خاک است به‌طوری‌که هرچه غلظت یون‌ها در یک محلول خاک بیشتر باشد هدایت الکتریکی ظاهری آن نیز بیشتر خواهد بود. مقاومت غلتشی چرخ‌ها با دو فرآیند تغییر شکل خاک و تغییر شکل چرخ‌ها معرفی می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر فشردگی و رطوبت خاک بر هدایت الکتریکی ظاهری خاک و مقاومت غلتشی لاستیک تراکتور پرداخته است. آزمایش‌ها در قالب آزمون فاکتوریل در سه سطح فشردگی خاک ۲، ۴ و ۶ بار عبور غلتک به‌ترتیب با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی متر مکعب و سه سطح رطوبت خاک ۱۰درصد ، ۱۲درصد و ۱۴درصد در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان رطوبت خاک، میزان مقاومت غلتشی و هدایت الکتریکی ظاهری آن افزایش یافت. همچنین با افزایش فشردگی خاک، مقاومت غلتشی آن کاهش یافت. به‌طوری‌که هدایت الکتریکی ظاهری خاک با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب ۱۲ درصد، با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب ۳۹ درصد و با وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب ۱۳ درصد افزایش یافت. همچنین با افزایش وزن مخصوص در رطوبت ۱۰درصد، ۱۲درصد و ۱۴درصد به‌ترتیب مقدار مقاومت غلتشی ۰/۶ درصد، ۲۹ درصد و ۱۸ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: آزمونگر تایر، شاخص مخروط، لاستیک تراکتور، وزن مخصوص خاک

مقدمه

فشردگی خاک، به دلیل تردد تراکتور و ادوات در مزرعه به‌وجود می‌آید. افزایش فشردگی خاک یکی از عوامل محدودکننده در رشد گیاه است بنابراین باید توجه بیشتری به فشردگی خاک داشت. تحقیقات نشان می‌دهد ریشه‌های گیاه به بیش از ۱۰ درصد تخلخلی که با هوا پر می‌شود نیاز دارد و در صورتی‌که به علت فشردگی خاک، این مقدار درصد کاهش یابد، تاثیر منفی بر رشد و عملکرد گیاه می‌گذارد. فشردگی نه تنها باعث تخریب ساختار خاک می‌شود بلکه منجر به تشکیل ساختار سنگین‌تر خاک با حفره‌های طبیعی می‌شود (Duiker, 2004). فشردگی خاک ناشی از تردد تراکتور باعث اثرات زیان‌بار بر کیفیت دانه‌بندی می‌شود. فشردگی، فضای خالی و ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک، بر عملکرد محصول تاثیرگذار است (Ahmadi and Ghaur, 2015). فشردگی خاک باعث تخریب ساختار خاک می‌شود که بر تغییرات خواص فیزیکی خاک تاثیر مستقیم دارد. فشردگی خاک بر محیط فیزیکی خاک تاثیر زیادی دارد و باعث ایجاد شرایط ناخوشایند برای رشد ریشه و محدود کردن اکسیژن، آب و مواد مغذی در خاک می‌شود (Glab and Gondek, 2013). تحقیقاتی که در آمریکای شمالی و اروپا انجام شده، نشان می‌دهد که محصولات به فشردگی خاک پاسخ می‌دهند و در یک سال خشک، ممکن است فشردگی کم باشد یا این که افزایش یابد. خاکی که فشردگی کمی دارد می‌تواند سرعت جوانه‌زنی بذر را افزایش دهد زیرا بذر در تماس مناسب با خاک است و باعث عملکرد بهتر محصول می‌شود (Dejong-Hughes, 2003).

هنگامی‌که چرخ روی خاک نرم حرکت می‌کند مقاومت غلتشی اتفاق می‌افتد و به‌عنوان برآیندی از دو فرآیند تغییر شکل خاک و تغییر شکل چرخ معرفی می‌شود. این نیروی مقاوم تحت تأثیر طراحی تایر و پارامترهای حرکتی چرخ و ویژگی‌های زمین است (Ghashlaghi and Mardani, 2016). مقاومت غلتشی ارتباط مستقیم با تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در چرخ و سطح زیر چرخ دارد. مقاومت غلتشی، مقاومتی است که تحت تأثیر دو عامل ایجاد

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۳- دانشیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.sharifi@areeo.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.75155

می‌شود که اولین عامل آن باعث تغییر شکل ماده می‌شود و شامل نیرویی است که صرف تغییر شکل لاستیک شده و باعث ایجاد پسماند حرارتی می‌شود. دومین عامل نیرویی است که صرف تغییر شکل خاک یا مسیر حرکت لاستیک می‌شود و برای نفوذ لاستیک به داخل خاک و کنار زدن توده خاک از مقابل لاستیک مصرف می‌شود (Mohammadzadeh, 2011). مقاومت غلتشی تأثیر زیادی در نشست خاک دارد که کاهش انرژی و نشست خاک دارای رابطه مستقیم با هم هستند به‌طوری‌که با افزایش مقاومت غلتشی، نشست خاک نیز افزایش می‌یابد (Elahi hesar *et al*., 2014). مطالعه و بررسی شوری خاک و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) مهم است. با توجه به غلظت کل نمک‌های محلول می‌توان این پارامتر را با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی محلول به کمک هدایت‌سنج الکتریکی مشخص کرد (Zare- Abyaneh *et al*., 2013). شوری خاک باعث کاهش رشد گیاه، کاهش تولید و عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود به همین علت کاهش پتانسیل اسمزی در اثر شوری، جذب آب توسط گیاه را مشکل می‌کند و همین طور تعادل عناصر غذایی گیاه را برهم می‌زند (Baradaran Motie *et al*., 2009). هدایت الکتریکی ظاهری خاک (EC_a) بیانگر توانایی رسانش الکتریکی جریان مستقیم در خاک می‌باشد. هدایت الکتریکی بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی از جمله میزان نمک‌های محلول موجود در خاک، شوری، ظرفیت تبادل کاتیونی، بافت خاک، محتوای مواد ارگانیک، رطوبت و ظرفیت نگهداری آب و فشردگی موثر است (Naderi Boldaji *et al*., 2016). لذا در این تحقیق، اثر فشردگی و رطوبت خاک بر مقاومت غلتشی لاستیک تراکتور و هدایت الکترکی ظاهری خاک مورد بررسی قرار گرفت. میزان هدایت الکتریکی ظاهری خاک، در فشردگی‌ها و رطوبت‌های مختلف خاک در نقاط وسط خط تردد یک لاستیک تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ و در طول مسیر حرکت آن اندازه‌گیری شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه دینامیک خاک موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج انجام شد. آزمایشات در مخزن خاک با عرض ۱/۷ متر و طول ۲۴ متر که دارای خاکی با بافت لومی رسی بود، انجام شد. خاک به‌صورت لایه‌های ۵ سانتی‌متری و تا عمق ۲۰ سانتی‌متری توسط واحد آماده‌کننده خاک (شکل ۱) تهیه گردید. روی هر لایه از خاک، آب به‌طور یکنواخت پاشیده شد و به رطوبت مورد نظر رسید. متغیرهای وابسته این آزمایش عبارتند از: مقاومت غلتشی و هدایت الکتریکی که به‌ترتیب مقادیر آن توسط دستگاه‌های تورک‌متر و ای‌سی‌متر پرتابل اندازه‌گیری گردید. متغیرهای مستقل شامل فشردگی خاک و رطوبت خاک به‌ترتیب توسط پنترولاگر و استوانه نمونه‌برداری خاک اندازه‌گیری شد.

برای انجام این پژوهش از آزمایش فاکتوریل با سطوح فشردگی خاک در سه سطح ۲، ۴ و ۶ بار عبور غلتک به‌ترتیب با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت خاک در سه سطح ۱۰درصد، ۱۲درصد و ۱۴درصد در ۳ تکرار استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده تحقیق از نرم‌افزار آماری (SPSS) استفاده شد. ابزارهایی که مورد استفاده قرار گرفتند شامل: آزمونگر تایر، لاستیک عقب تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵، واحد آماده‌کننده خاک و ابزار اندازه‌گیری شامل تورک‌متر، پنترولاگر و ای‌سی‌متر پرتابل بودند. وزن غلتک و سرعت پیشروی آن به‌ترتیب ۳۵۰ کیلوگرم و ۳ کیلومتر بر ساعت بود. مشخصات خاکی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت طبق جدول ۱ است.

جدول ۱- ترکیبات بافت خاک و مشخصه‌های مکانیکی خاک مخزن خاک

Table 1- Soil texture compositions and soil mechanical properties

ترکیبات بافت خاک Soil texture compositions	درصد Percent	مشخصه‌های مکانیکی Mechanical characteristics	درصد Percent
رس Clay	29	حد خمیری (PL) Plastic limit	22.3
سیلت Silt	33	حد روانی (LL) Liquid limit	32.3
شن Sand	38	حد انقباض (SL) Solid limit	10.8

شکل ۱– واحد آماده‌کننده خاک
Fig. 1. Soil preparation unit

آزمونگر تایر

داده‌های خام گشتاورسنج از طریق نرم‌افزار torque log برای تجزیه و تحلیل وارد اکسل شد. در این آزمایش بار عمودی ثابت ۴۰۰۰ نیوتن و فشار باد ثابت ۶۸۹۹ نیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شد. لودسل روی آزمونگر تایر توسط نرم‌افزار (ARDINO UNO) مقدار اولیه نیرو، تعداد دوران و زمان را نشان می‌دهد. از طریق این نرم‌افزار مقدار ثابت بار عمودی مورد بررسی قرار گرفت. آزمونگر لاستیک در شکل ۲ نشان داده شده است. لاستیک عقب تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ روی این آزمونگر نصب شد. در شکل ۳ گشتاورسنج پشت لاستیک مسی فرگوسن نصب و مقدار گشتاور اندازه‌گیری شد و با جای‌گذاری آن در رابطه (۱) مقاومت غلتشی، به‌دست آمد (ASABE, 2009).

$$R_c = \frac{EMT \times 104 \times GE}{R} \quad (۱)$$

که در آن:

R_c، مقاومت غلتشی (N)

EMT، گشتاور الکتروموتور (N m)

۱۰۴، نسبت کاهشی گیربکس

GE، بازده گیربکس (درصد)

R، شعاع لاستیک مورد آزمون (m)

شکل ۲– آزمونگر لاستیک
Fig. 2. Tire tester

شکل ۳– گشتاورسنج
Fig. 3. Torque meter

اندازه‌گیری شاخص مخروط خاک

شکل ۴ دستگاه پنترولاگر یا نفوذسنج مدل (Eijkelkamp) ساخت کشور هلند را نشان می‌دهد. این دستگاه مقدار مقاومت به نفوذ خاک را اندازه‌گیری می‌کند. اندازه‌گیری قبل و بعد از عبور لاستیک مسی فرگوسن ۲۸۵ تا عمق ۲۰ سانتی‌متری انجام شد. سپس داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق نرم‌افزار موجود (Pen viewer) در کامپیوتر، ذخیره و مقدار مقاومت به نفوذ خاک بر حسب مگاپاسکال به‌دست آمد. در این آزمایش با توجه به نوع بافت لومی رسی از نوک مخروطی با سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع با زاویه راس مخروط ۳۰ درجه استفاده شد (ASABE, 2006).

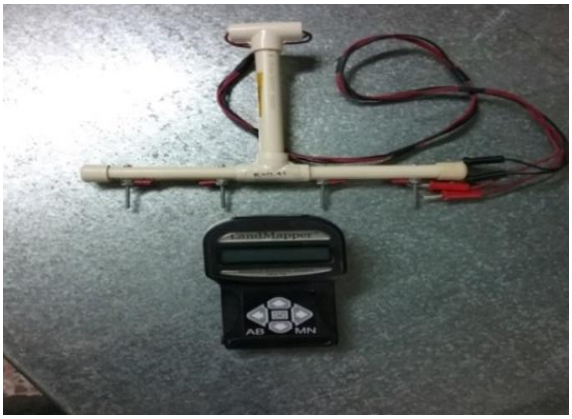
شکل ٤- پنترولاگر
Fig. 4. Penetrologger

شکل ٥- نوک مخروطی استفاده شده در اندازه‌گیری
Fig. 5. Cone tip used in measurement

طبق شکل ۵ نوک مخروطی به دستگاه پنترولاگر متصل و در داخل خاک قرار داده شد و مقدار مقاومت به نفوذ خاک اندازه‌گیری شد. پس از اتمام کار با دستگاه پنترولاگر در هر آزمایش داده‌ها توسط نرم‌افزاز (Pen viewer) تحلیل و به برنامه اکسل وارد شد و داده‌های قبل و بعد از عبور تایر، در رطوبت‌های ۱۰ درصد، ۱۲ درصد و ۱۴درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

اندازه گیری هدایت الکتریکی

شکل ۶، هدایت سنج الکتریکی ساخت کشور آمریکا با مدل Land Mapper بود. این دستگاه دارای پراب چهار الکترودی که برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی خاک استفاده می‌شود. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در نقاط مشخصی در روی خط وسط مسیر تردد لاستیک انجام شد. قبل و بعد از عبور لاستیک تفاوت هدایت الکتریکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش در ۳ تکرار انجام شد. ابتدا مقدار اولیه (K_0*R) از روی دستگاه قرائت و مقدار (EC_a) با استفاده از کسر نمودن این مقدار از میانگین تکرارها محاسبه شد. در اینجا R مقاومت الکتریکی و K_0 ضریب ثابت می‌باشند (Anonymous, 2014).



شکل ٦- هدایت‌سنج الکتریکی
Fig.6. EC meter

اندازه‌گیری وزن مخصوص خاک

اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری در سه نقطه ابتدا، وسط و انتهای مسیر آزمون در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌های خاک توسط استوانه نمونه‌گیری خاک برداشته شد و وزن آن‌ها اندازه‌گیری و در داخل دستگاه آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد، طبق رابطه (۲) مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک اندازه‌گیری شد (Blake and Hartge, 1986).

$$\rho = \frac{W_d}{V} \quad (۲)$$

که در آن:

ρ، جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

W_d، وزن خشک نمونه (گرم)

V، حجم استوانه نمونه‌گیری (سانتی‌متر مکعب)

رطوبت خاک

برای محاسبه رطوبت بر اساس وزن خشک برای ۳ تکرار در سه سطح رطوبت ۱۰درصد، ۱۲درصد و ۱۴درصد میزان وزن خاک تر و خشک در نقاط ابتدا، انتها و وسط خاک اندازه‌گیری و محاسبه شد. خاک به‌صورت لایه‌های ۵ سانتی‌متری و تا عمق ۲۰ سانتی‌متری توسط واحد آماده‌کننده خاک (Soil processor) در مخزن خاک (سویل‌بین) آماده گردید. روی هر لایه ۵ سانتی‌متری از خاک، آب به‌طور یکنواخت پاشیده می‌شد تا به رطوبت مورد نظر برسد. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در این آزمایش از دستگاه آون استفاده شد که نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در ظرف‌های مخصوص درون دستگاه آون قرار داده شد. پس از خشک شدن وزن آن اندازه‌گیری و طبق رابطه (۳) مقدار رطوبت اندازه‌گیری شد (Gardener, 1986).

$$M_c = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \qquad (۳)$$

که در آن:

M_c، مقدار رطوبت (درصد)

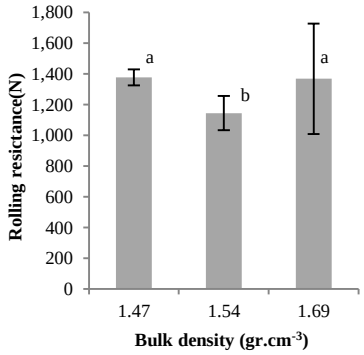
W_w، جرم تر نمونه (گرم)

W_d، جرم خشک نمونه (گرم)

نتایج و بحث

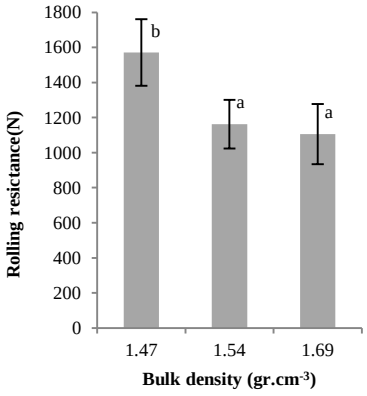
نتایج مقاومت غلتشی لاستیک

در این قسمت مقاومت غلتشی در رطوبت‌های ۱۰درصد، ۱۲درصد و ۱۴درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. طبق شکل‌های (۷)، (۸)، (۹) مقدار مقاومت غلتشی در رطوبت ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد متفاوت به‌دست آمد که مقاومت غلتشی در رطوبت ۱۴درصد با وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب با مقدار ۱۰۴۸/۵۸ نیوتن کمتر از سایر سطوح فشردگی است. مقاومت غلتشی در رطوبت ۱۲درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب با مقدار ۱۵۷۰/۷۷ نیوتن بیشتر از سایر سطوح فشردگی است. بیشترین مقدار انحراف معیار برای وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب با مقدار ۵۴۶/۲۲ نیوتن و کمترین مقدار انحراف معیار برای ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب با مقدار ۴۲/۴۶ نیوتن بود.



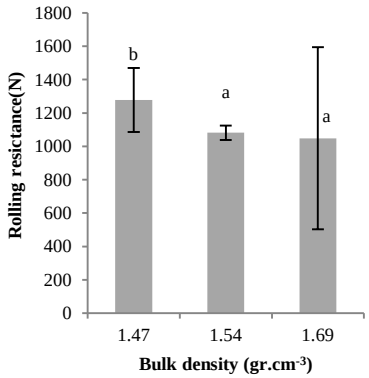
شکل ۷– مقدار میانگین مقاومت غلتشی- رطوبت ۱۰ درصد

Fig. 7. The average value of the rolling resistance-Soil moisture 10%



شکل ۸– مقدار میانگین مقاومت غلتشی- رطوبت ۱۲ درصد

Fig. 8. The average value of rolling resistance- Soil moisture 12%



شکل ۹– مقدار میانگین مقاومت غلتشی- رطوبت ۱۴درصد

Fig. 9. The average value of rolling resistance-Soil moisture 14%

جدول ۲، مقایسه میانگین مقاومت غلتشی در فشردگی‌های مختلف را نشان می‌دهد. مقدار مقاومت غلتشی در فشردگی ۲ بار عبور غلتک اختلاف معنی‌داری با فشردگی ۴ و ۶ بار عبور غلتک داشته است. مقدار مقاومت غلتشی در ۴ و ۶ بار عبور غلتک در یک گروه قرار می‌گیرند.

در جدول ۳، نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر مقاومت غلتشی لاستیک نشان داده شده است. اثر تمامی‌تیمارها بر مقاومت غلتشی در سطح احتمال ۵ درصد در نظر گرفته شده است، عددهای به‌دست آمده زیر سطح ۵ درصد معنی‌دار و بالای ۵درصد معنی‌دار نمی‌باشد که در این تجزیه و تحلیل طبق جدول، رطوبت معنی‌دار است، ولی برای فشردگی و اثر متقابل رطوبت و فشردگی معنی‌دار نمی‌باشد ($p < ۰/۰۵$).

جدول ۲- مقایسه میانگین مقاومت غلتشی در فشردگی‌های مختلف

Table 2- Comparison of the average rolling resistance at different compactions

فشردگی خاک (تعداد عبور غلتک) Soil compaction (Number of roll)	وزن مخصوص خاک Bulk density(gr.cm^{-3})	مقاومت غلتشی Rolling resistance (N)
2	1.47	1408.5[b]
4	1.54	1184[a]
6	1.69	1125.2[a]

اعداد دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

Non-significant difference between numbers with the same letter at level of 5%

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس مقاومت غلتشی

Table 3- Analysis of variance of rolling resistance

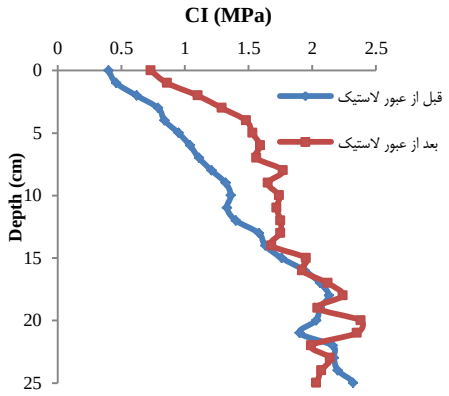
منابع تغییرات Source of variations	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares	F	Sig.
مدل Model	40976387.778	9	4552931.957	95.843	0.000
فشردگی Compaction	233083.732	2	116541.866	2.453	0.114
رطوبت Moisture	439460.823	2	246730.411	5.194	0.017
فشردگی*رطوبت Compaction*Moisture	234660.009	4	58665.002	1.235	0.133
خطا Error	855069.469	18	47503.849		
جمع Total	41831457.247	27			

نتیجه به‌دست آمده در این آزمایش نشان داد که با افزایش رطوبت، میزان فشردگی افزایش یافت و با کاهش رطوبت میزان مقاومت غلتشی خاک افزایش یافت. هرچه میزان فشردگی افزایش یافت مقدار مقاومت غلتشی خاک کاهش و هرچه میزان فشردگی کمتر شد مقدار مقاومت غلتشی خاک افزایش یافت.

مشابه نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، بدین صورت می‌باشد که مقاومت غلتشی حاصل از حرکت چرخ‌های تراکتور بر روی خاک، باعث افت بخشی از نیروی کششی می‌شود. در حرکت تایر روی سطح نرم به دلیل تغییر شکل پلاستیک خاک رد لاستیک روی خاک باقی می‌ماند. با نفوذ لاستیک به داخل خاک، خاک زیر چرخ متراکم شده و به سمت کناره‌ها و جلوی چرخ حرکت کرده و موج کمانی ایجاد می‌کند که این تغییر فرم پلاستیک خاک عامل اصلی ایجاد مقاومت غلتشی در خاک نرم می‌باشد. با بالارفتن مقاومت غلتشی نیروهای عبورداده شده از منطقه‌ی تماس نیز بیشتر شده و خاک دچار تغییر شکل بیشتری می‌شود که این عامل باعث افزایش نشست در سطح خاک می‌شود. مقاومت غلتشی به‌عنوان یک عامل هدر رفت انرژی تأثیر به‌سزایی در نشست ایجاد شده در خاک دارد این دو دارای رابطه‌ای منطقی با یکدیگر می‌باشند. به‌طوری‌که همواره با افزایش مقاومت غلتشی، نشست خاک نیز بیشتر می‌شود (Elahi-hesar *el at.*, 2013).

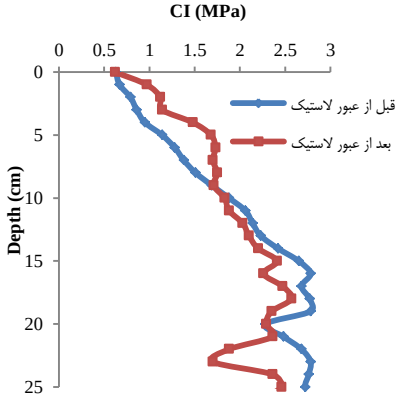
نتایج فشردگی

در این قسمت محاسبه‌هایی بر روی فشردگی در رطوبت‌های ۱۰درصد، ۱۲درصد و ۱۴درصد انجام گرفت و وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب انجام شد. تمامی فشردگی‌های اندازه‌گیری شده یک بار قبل و یک بار بعد از عبور لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. مقدار شاخص مخروط خاک قبل و بعد از عبور لاستیک که در رطوبت‌های ۱۰ درصد در نمودار (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. مقدار شاخص مخروط خاک قبل از عبور لاستیک در رطوبت ۱۰درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب با مقدار ۱/۲۱۱ مگاپاسکال کمتر از سایر وزن مخصوص‌ها به‌دست آمد ولی بعد از عبور لاستیک افزایش را با مقدار ۱/۵۶۶ مگاپاسکال داشت.



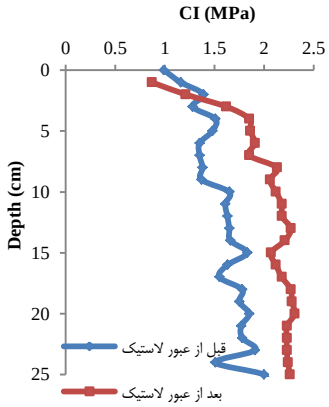
شکل ۱۰– مقدار شاخص مخروط در رطوبت ۱۰ درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب

Fig. 10. Cone index at 10% moisture content with bulk density of 1.47 g.cm^{-3}



شکل ۱۱– شاخص مخروط در رطوبت ۱۰ درصد با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب

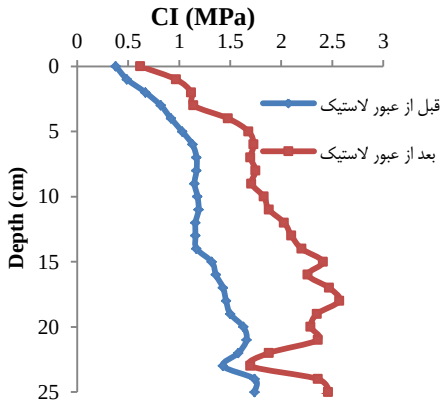
Fig. 11. Cone index at 10% moisture content with bulk density of 1.54 g.cm^{-3}



شکل ۱۲– شاخص مخروط خاک در رطوبت ۱۰ درصد با وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب

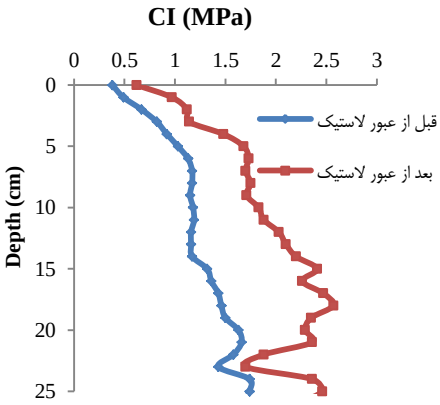
Fig. 12. Cone index at 10% moisture content with bulk density of 1.69 g.cm^{-3}

مقدار شاخص مخروط خاک قبل و بعد از عبور لاستیک در رطوبت ۱۲ درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. مقدار شاخص مخروط خاک قبل از عبور لاستیک در رطوبت ۱۲ درصد با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب را با افزایش مقدار ۱/۲۴ مگاپاسکال داشت و بعد از عبور لاستیک به مقدار ۱/۴۲ مگاپاسکال افزایش یافت.



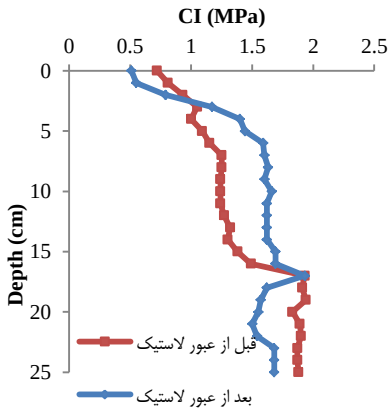
شکل ۱۳ – شاخص مخروط خاک در رطوبت ۱۲درصد و با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب

Fig. 13. Cone index at 12% moisture content with bulk density 1.47 g.cm^{-3}



شکل ۱٤– شاخص مخروط خاک در رطوبت ۱۲درصد و با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب

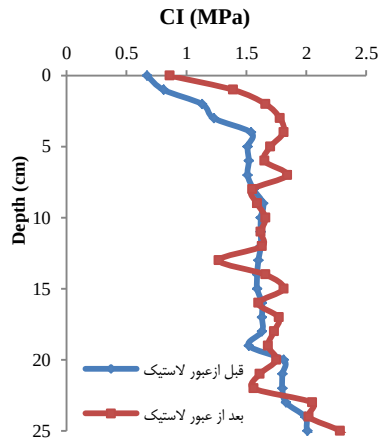
Fig. 14. Cone index at 12% moisture content with bulk density 1.54 g.cm^{-3}



شکل ۱۵– شاخص مخروط خاک در رطوبت ۱۲ درصد با وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب

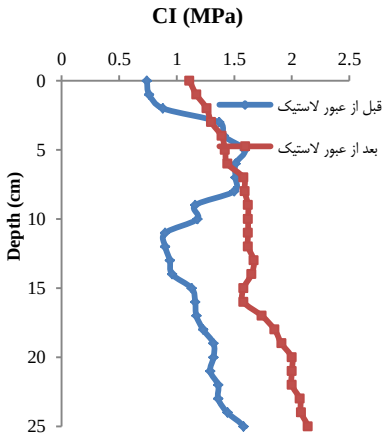
Fig. 15. Cone index at 12% moisture content with bulk density 1.69 g.cm^{-3}

مقدار شاخص مخروط خاک قبل و بعد از عبور لاستیک در رطوبت ۱۴ درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در شکل‌های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. مقدار شاخص مخروط خاک قبل از عبور لاستیک در رطوبت ۱۴درصد با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب با مقدار ۱/۲۳ مگاپاسکال افزایش زیادی داشت ولی بعد از عبور لاستیک به مقدار ۱/۳۴ مگاپاسکال افزایش یافت.



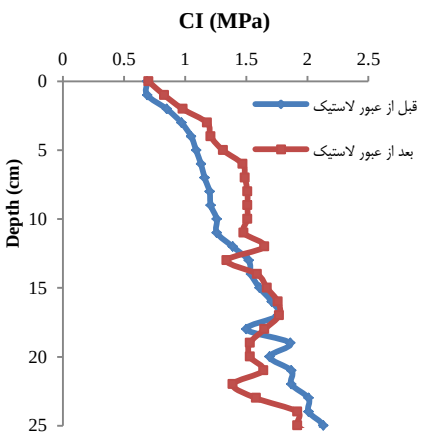
شکل ۱۶– شاخص مخروط در رطوبت ۱۴درصد و با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب

Fig. 16. Cone index at 14% moisture content with bulk density1.47 g.cm^{-3}



شکل ۱۷– شاخص مخروط در رطوبت ۱۴درصد و با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب

Fig. 17. Cone index at 14% moisture content with bulk density 1.54 g.cm^{-3}



شکل ۱۸– شاخص مخروط خاک در رطوبت ۱۴ درصد با وزن مخصوص۱/ ۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب

Fig. 18. Cone index at 14% moisture content with bulk density1.69 g.cm^{-3}

نتایج نشان داد، هرچه میزان فشردگی افزایش یابد میزان شاخص مخروطی خاک (CI) نیز افزایش می‌یابد بدین معنی که شاخص مخروطی خاک (CI) با فشردگی رابطه مستقیم دارد ولی شاخص مخروط خاک با رطوبت رابطه عکس داشت هرچه میزان رطوبت کمتر شد میزان شاخص مخروط خاک افزایش یافت.

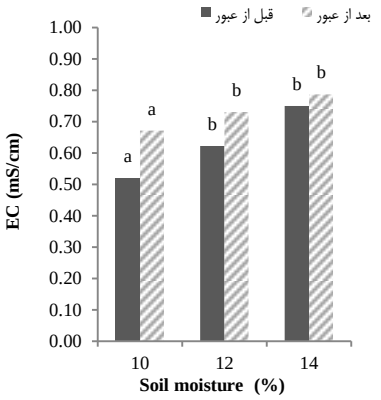
در تحقیق دیگری توسط عباسپور گیلانده و شایگان سلطانپور در سال ۲۰۱۳، مقادیر شاخص مخروط خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است، نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به اندازه‌گیری شاخص مخروط خاک و ضریب تغییرات داده‌های شاخص مخروط خاک معادل ۱۳/۳۳ درصد می‌باشد، که اثرات اصلی بافت خاک، رطوبت، تردد تراکتور و عمق به‌طور مجزا بر شاخص مخروطی خاک معنی‌دار است (Abbaspour-Gilandeh and Shaygani-Soltanpour, 2014).

طبق آزمایش مجموعه داده‌ها برای بررسی چگونگی تغییر شاخص مخروط خاک با عمق خاک، پارامترهایی از جمله بافت خاک، چگالی خاک و رطوبت مورد تحلیل قرار گرفت، نتایج نشان داد که برای خاک‌ورزی و شخم معمولی، مقادیر شاخص مخروط خاک با افزایش رس به‌وضوح کاهش می‌یابد، با افزایش شن و ماسه و درصد خاکستر خاک مقدار شاخص مخروط خاک افزایش می‌یابد. به‌طور مثال تراکم بالا در عمق خاک بیشتر می‌شود، در نتیجه مقدار شاخص مخروط خاک بالاتر می‌رود در حالی‌که رطوبت بیشتر می‌شود این مقدار کاهش می‌یابد (Kumar *et al.*, 2012).

نتایج هدایت الکتریکی

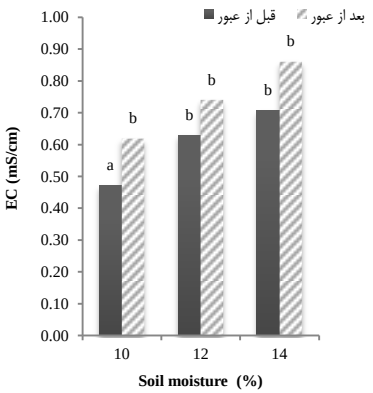
طبق نمودار (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) در رطوبت ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد آزمایش‌های انجام شده مقدار هدایت الکتریکی قبل و بعد از عبور لاستیک در رطوبت ۱۰درصد با وزن مخصوص ۱/۴۷، ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد مقایسه قرار گرفته است که هدایت الکتریکی با وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بعد از عبور لاستیک بیشترین مقدار را نشان می‌دهد با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب قبل از عبور لاستیک مقدار هدایت الکتریکی کمی متفاوت به‌دست آمد و مقدار هدایت الکتریکی در وزن مخصوص‌های مختلف بعد از عبور لاستیک بیشتر از مقدار هدایت الکتریکی قبل از عبور لاستیک می‌باشد.

طبق جدول ۵، مقایسه میانگین هدایت الکتریکی بعد از عبور لاستیک بدین صورت می‌باشد که مقدار هدایت الکتریکی با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب تفاوت معنی‌داری با مقدار هدایت الکتریکی با وزن مخصوص ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب داشته و مقدار هدایت الکتریکی با وزن مخصوص ۱/۵۴ و ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب نیز در یک گروه معنی‌داری قرار می‌گیرند. جداول ۶ و ۷، نتایج تجزیه واریانس تاثیر فشردگی و رطوبت خاک بر هدایت الکتریکی ظاهری خاک را قبل و بعد از عبور لاستیک نشان می دهد.



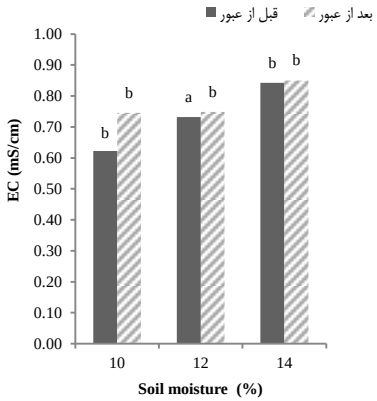
شکل ۱۹- مقایسه هدایت الکتریکی قبل و بعد از عبور لاستیک با وزن مخصوص ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در رطوبت‌های مختلف

Fig. 19. Comparison of electrical conductivity before and after passing of tire with bulk density 1.47 g.cm^{-3} at different soil moistures



شکل ۲۰- مقایسه هدایت الکتریکی قبل و بعد از عبور لاستیک با وزن مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب در رطوبت‌های مختلف

Fig. 20. Comparison of electrical conductivity before and after passing of tire with bulk density 1.54 g.cm^{-3} at different soil moistures



شکل ۲۱- مقایسه هدایت الکتریکی قبل و بعد از عبور لاستیک با وزن مخصوص ۱/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در رطوبت‌های مختلف

Fig. 21. Comparison of electrical conductivity before and after passing of tire with bulk density 1.69 g.cm^{-3} at different soil moistures

جدول ۵- مقایسه میانگین هدایت الکتریکی بعد از عبور لاستیک در فشردگی‌های مختلف

Table 5- Comparison of the average electrical conductivity after passing of tire at different compactions

فشردگی خاک (تعداد عبور غلتک) Soil compaction (Number of roll)	وزن مخصوص خاک Bulk density (gr.cm^{-3})	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (mS.cm^{-1})
2	1.47	0.81^{b}
4	1.54	0.67^{a}
6	1.69	0.73^{a}

اعداد دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

Non-significant difference between numbers with the same letter at level of 5%

جدول ٦- تجزیه واریانس هدایت الکتریکی قبل از عبور لاستیک

Table 6- Analysis of the variance of electrical conductivity before tire pass

منابع تغییرات Source of variations	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares	F	Sig.
مدل Model	0.394^{a}	8	0.049	1.084	0.093
فشردگی Compaction	0.130	2	0.065	2.751	0.091
رطوبت Moisture	0.131	2	0.065	2.771	0.089
فشردگی*رطوبت Compaction*Moisture	0.133	4	0.033	1.407	0.272
خطا Error	0.425	18	0.025		
جمع Total	11.737	27			

جدول ۷- تجزیه واریانس هدایت الکتریکی بعد از عبور لاستیک

Table 7- Analysis of the variance of electrical conductivity after tire pass

منابع تغییرات Source of variations	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares	F	Sig.
مدل Model	15.151[a]	9	1.683	190.822	0.000
فشردگی Compaction	0.20	2	0.10	1.108	0.352
رطوبت Moisture	0.89	2	0.045	5.060	0.018
فشردگی*رطوبت Compaction*Moisture	0.029	4	0.07	0.816	0.531
خطا Error	0.159	18	0.009		
جمع Total	15.310	27			

در این آزمایش نتیجه‌گیری شد که هرچه میزان فشردگی افزایش یابد مقدار هدایت الکتریکی ظاهری خاک نیز افزایش می‌یابد و هرچه میزان رطوبت کمتر باشد میزان هدایت الکتریکی خاک کاهش می‌یابد یعنی هدایت الکتریکی با فشردگی و رطوبت رابطه مستقیم دارد. نتایج به‌دست آمده در تحقیق گلب و گندک در سال ۲۰۱۲، مشابه آزمایش انجام شده، می‌باشد، این نتایج نشان می‌دهد که تراکم خاک توسط تراکتور برخی از خواص شیمیایی خاک را تغییر داد. عبور تراکتور منجر به افزایش pH و EC شد. همچنین محتوای P و Zn را افزایش داد. بیشتر این تغییرات از نظر آماری تنها در لایه خاکی در عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متر معنی‌دار بود. این اثر می‌تواند به تراکم و نفوذپذیری هوای پایین خاک مربوط باشد. لایه خاک بالا (۲۰-۰ سانتی متر) به تغییرات خواص شیمیایی مقاوم بودند (Glab and Gondek, 2013).

نتایج تحقیق دیگران نشان می‌دهد که میانگین رطوبت خاک، در خاک‌های مختلف که در تاریخ‌های مختلف نمونه‌گیری شده است، همبستگی با میانگین EC_a وجود دارد. زمان مناسب برای اندازه‌گیری EC_a زمانی اتفاق افتاد که رطوبت متوسط و محتوای آب در خاک بیشتر بود. در این شرایط، ضریب تغییرات رطوبت خاک پایین‌تر بود و بین EC_a و رطوبت خاک ارتباطی وجود نداشت و EC_a همبستگی بیشتری با ویژگی‌های دیگر خاک داشت که در این کار ارزیابی شده است. رابطه بین خاک خالص، هدایت الکتریکی و رطوبت خاک کمتر و هنگامی‌که خاک دارای رطوبت بالاتری بود در این سناریو همبستگی با خصوصیات خاک بیشتر بود. تجزیه و تحلیل همبستگی بین هدایت الکتریکی ظاهری و رطوبت خاک یک است (Costa *et al.*, 2014).

اندازه‌گیری مقدار هدایت الکتریکی خاک در عمق ۲۵- ۰ سانتی‌متر خاک انجام شد. در این تحقیق میزان هدایت الکتریکی ظاهری خاک، در فشردگی‌ها و رطوبت‌های مختلف خاک در نقاط وسط خط تردد یک لاستیک تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ و در طول مسیر حرکت آن اندازه‌گیری و نتایج آن گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی با توجه به تمامی آزمایش‌ها و مقایسه‌های انجام شده بین مقاوت غلتشی، شاخص مخروطی خاک و هدایت الکتریکی قبل و بعد از عبور لاستیک می‌توان نتیجه گرفت که هرچه میزان رطوبت افزایش یابد میزان شاخص مخروطی خاک (CI) کاهش می‌یابد. با کاهش میزان رطوبت خاک، میزان مقاومت غلتشی آن کاهش یافت و هرچه مقدار فشردگی خاک کمتر باشد، مقدار مقاومت غلتشی خاک بیشتر و هرچه مقدار فشردگی خاک بیشتر شود، مقدار مقاومت غلتشی خاک کمتر می‌شود. میزان هدایت الکتریکی قبل و بعد از عبور لاستیک بنا به عبور غلتک متفاوت می‌باشد و این که هرچه میزان رطوبت بیشتر باشد میزان هدایت الکتریکی بیشتر می‌شود چون میزان هدایت الکتریکی با رطوبت رابطه مستقیم دارد و فشردگی بر تمامی پارامترها تاثیر دارد.

References

1. Anonymous, 2014. LandMapper, Research landViser enlightening. Available at: www.Landviser.com
2. Ahmadi, I., and H. Gaur. 2015. Effects of soil moisture content and tractor wheeling intensity on traffic-induced soil compaction, Journal of Central European Agriculture 16 (4): 489-502.

3. Abbaspour-Gilandeh, Y., and A. R. Shaygani-Soltanpour. 2014. Soil cone index prediction using artificial neural networks model and its comparison with regression models. Journal of Soil Management and Sustainable Production 4 (2): 187-204.
4. ASABE, S313.3. 2006. Soil cone penetrometer. ASABE Standard. St. Joseph. MI. USA.
5. ASABE, 2009. ANSI/ASAE S296.5. DEC2003 (R2009). Standard. General terminology for traction of agricultural traction and transport devices and vehicles. ASABE, St. Joseph, MI. USA.
6. Baradaran Motie, J., M. H. Aghkhani, M. H. Abbaspourfard, and A. Lakzian. 2010. Estimation of Apparent Soil Electrical Conductivity Using Direct Contact Method. Journal of Water and Soil 24 (5): 955-965.
7. Blake, G. R., and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. In: A. Klute (editor), Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods (2th edition). ASA. Monog. No. 9. Madison, Wis., pp. 363-375.
8. Costa, M. M., D. M. de Queiroz, F. de Carvalho Pinto, E. F. dos Reis, and N. Terra Santos. 2014. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes, Acta Sci. Agronomy 100 (5): 395-401.
9. Duiker, S. 2004. Effects of Soil Compaction, Penn State College of Agricultural Sciences research, extension, and resident education programs are funded in part by Pennsylvania counties, the Commonwealth of Pennsylvania, and the U.S. Department of Agriculture.
10. DeJong –Hughes, J. 2003.Tires, Traction and Compaction. University of Minnesota Extension.
11. Elahi-hesar, I., M. A. Hadad-derafshi, and A. Mardani. 2014. Investigation of interaction effect between rolling resistance and soil sinkage inside soil bin facility using single wheel-tester, 8th National Congress on the Engineering of Agricultural Machinery (Biosystems) and Mechanization of Iran. (In Farsi).
12. Gardener, W. H. 1986. Water content. In: A. Klute (editor). Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods (2nd edition). ASA. Monog. No. 9. Madison, Wis., pp. 493-541.
13. Gheshlaghi, F., and A. Mardani. 2016. Predicting the wheel rolling resistance regarding important motion parameters using the artificial neural network. Journal of Agricultural Machinery 6 (1): 259-270. (In Farsi).
14. Glab, T., and K. Gondek. 2013. The Influence of Soil Compaction on Chemical Properties of Mollic Fluvisol Soil under Lucerne. Polish Journal of Environmental Studies 22 (1): 107-13.
15. Kumar, A., Y. Chen, A. Sadek, and S. Rahman. 2012. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content and bulk density for no-tillage and conventional tillage, Agricultural Engineering International, CIGR Journal, 14 (1): 26-37.
16. Mohammadzadeh, H. 2011. Investigation of Tire and Obstacle Interaction Based on Wheel Parameters, Obstacle and Forward Speed in Soilbin, MSc Thesis, Agricultural Machinery Mechanics Department, Faculty of Agriculture, Uremia University. (In Farsi).
17. Naderi Boldaji, M. A. Kazemzadeh, A. Hemmat, and S. Rostami. 2016. Development of laboratory tests and fields of a boiling sensor, Iranian Biosystems Engineering 47 (2): 291-300.
18. Zare Abyaneh, H., M. Jovzi, A. Afruzi, and A. Gharibzadeh. 2014. Determination of electrical conductivity of the saturation extract (ECe) relationships with a few soil salinity parameters in comparison with the new method of calculating ECe, Journal of Irrigation and Water Engineering 4 (16): 81-93.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 299-311

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۱۱-۲۹۹

Effect of Compaction and Soil Moisture on Apparent Electrical Conductivity of Soil and Rolling Resistance of Tractor Tire

G. Safar alizadeh herisi[1], A. M. Borghei[2], A. Sharifi Malvajerdi[3*]

Received: 17-09-2018
Accepted: 13-02-2019

Introduction

One of the main factors affecting plant growth is soil compaction. More attention should be paid to soil compaction than the past. Soil compaction not only destroys the soil structure, but also leads to a heavier soil structure with natural cavities. The rolling resistance reduces energy and occurs when the tire moves on a soft soil and rolling resistance of the tire is brought about by two processes of soil deformation and wheel change. This force is influenced by the design of the tire, the parameters of the tire, and the characteristics of the soil. The apparent electrical conductivity (ECa) indicates the direct conductivity of direct current in the soil. The electrical conductivity is effective on chemical and physical properties, including the amount of soluble salts in the soil, salinity, cation exchange capacity, soil texture, organic matter content, moisture content and water holding capacity, and compression. The purpose of this study was to investigate the effect of soil compaction and soil moisture on the soil electrical conductivity and rolling resistance of the Messy Ferguson 285 tractor rear tire. This study showed the density and soil moisture were associated with soil electrical conductivity and rolling resistance.

Materials and Methods

This test had independent and dependent variables. The dependent variables including rolling resistance and electrical conductivity, whose values were measured by a torque meter and a portable EC meter. Independent variable comprised of soil compaction and soil moisture measured by Penetrologger and soil moisture measurement tools including soil harvesting cylinder, scale and oven device. Experiments were carried out in the soil bin Laboratory with a 1.7 m wide, 24 m long and 1 m deep with soil texture of clay loamy in Agricultural Engineering Research Institute (Karaj). The soil was prepared layer by layer and up to a depth of 20 cm by the soil preparation unit. In all experiments, the vertical load was fixed at 4000 N and the tire pressure of 6899 $N.m^{-2}$. On each layer, the water was evenly sprayed to reach the desired moisture. To do this research, factorial experiment with soil compaction levels at 3 levels of 2, 4 and 6 roller passes, respectively, with the bulk density of 1.47, 1.54 and 1.69 $g.cm^{-3}$ and soil moisture at 3 levels of 10%, 12% and 14% were used in 3 replications. Data were analyzed using SPSS software. The tools used included the tire test rig, the rear tire of a Massy Ferguson 285 tractor, the soil preparation unit, and the measuring instrument, including the torque meter, the penetrologger and the portable EC meter.

Results and Discussion

In this experiment, it was found that as the amount of moisture increased, the compaction was also increased. The test indicated that the soil rolling resistance was increased by decreasing the soil moisture content. Moreover, increasing in the soil compaction ration led to decreasing the soil rolling resistance. The CI was used at a depth of 20 cm to 0 cm. In these experiments, we concluded that the higher density of compaction resulted in increasing the soil cone index (CI). This index was directly related to the compaction, but it had an adverse relation with the moisture. It means the lower amount of moisture led to the higher amount of CI. The amount of electrical conductivity of soil was measured at a depth of 0-25 cm. In this experiment, we concluded that the higher compaction ratio resulted in the higher electrical conductivity. It means that electrical conductivity had a direct relation with the compaction and the moisture content. The lower moisture content led to the lower electrical conductivity of the soil.

Conclusions

In general, considering all the tests and comparison between rolling resistance, soil cone index and apparent electrical conductivity before and after roller passing, it can be concluded that as the amount of moisture content

1- MSc in Bio Systems Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch of Tehran, Iran
2- Professor of Bio Systems Mechanics Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch of Tehran, Iran
3- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.sharifi@aeeo.ac.ir)

increased, the soil cone index (CI) decreased. The soil cone index (CI) had a relationship with the moisture. The lower moisture content led to the lower soil moisture resistance, as well as the higher moisture content resulted in the higher soil resistance. The lower amount of soil compaction showed the greater soil rolling resistance, and the greater amount of soil compaction caused to the less soil moisture resistance. The electrical conductivity before and after the roller pass was different in the case of roller pass, and the higher amount of moisture led to the greater electrical conductivity, because the electrical conductivity was directly related to the moisture and the compaction affects all parameters.

Keywords: Electrical conductivity, Moisture, Rolling resistance, Soil compaction

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 313-323

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۲۳-۳۱۳

اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر عملکرد و کارآیی مصرف آب چغندرقند

احمد حیدری[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

تراکم خاک موجب کاهش خلل و فرج خاک و در نتیجه افزایش مقاومت و چگالی ظاهری خاک می‌شود. اگر بعد از کاشت، بین ردیف‌ها مجدداً خاک‌ورزی انجام شود، می‌تواند اثرات مثبتی بر کاهش فشردگی خاک و همچنین بر عملکرد محصول داشته باشد. این تحقیق به مدت دو سال (۱۳۹۶-۱۳۹۵) با هدف خاک‌ورزی بین ردیفی به‌منظور کاهش اثرات منفی تراکم خاک و نیز نرم کردن خاک اطراف ریشه چغندرقند در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اکباتان همدان با خاکی لومی و در قالب طرح آزمایشی کرت‌های یک‌بار خرد شده در سه تکرار اجرا شد. آبیاری در دو سطح شامل: ۱۰۰درصد نیاز آبی گیاه (I_1) و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه (I_2) به‌عنوان عامل اصلی و خاک‌ورزی بین ردیفی در چهار سطح شامل: کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های هلالی و قلمی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر (T_1)، کولتیواتور هلالی (T_2)، کولتیواتور هلالی+ نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر (T_3) و ماشین مرکب روتیواتور بین ردیفی مجهز به کولتیواتور دوار و تیغه پنجه‌غازی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر (T_4) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. در حین آزمایش برخی خواص فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری و شاخص مخروط خاک در کف جویچه اندازه‌گیری شدند. در پایان فصل رشد، عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید اندازه‌گیری و محاسبه شدند. نتایج نشان داد که اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص‌های چگالی ظاهری خاک و شاخص مخروط خاک معنی‌دار شدند و تیمار T_3 (کولتیواتور هلالی+ نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر) نسبت به بقیه تیمارها کمترین مقدار چگالی ظاهری و شاخص مخروط خاک داشتند. اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی و سطوح آبیاری و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر عملکرد ریشه و شکر سفید معنی‌دار نبودند. نتایج نشان داد که اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر کارآیی مصرف آب معنی‌دار نبود. اثر نیاز آبی بر کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر و شکر سفید معنی‌دار بود. نیاز آبی ۷۵ درصد نسبت به نیاز آبی ۱۰۰ درصد، کارآیی مصرف آب بر اساس عمکرد ریشه، شکر و شکر سفید را به‌ترتیب ۴، ۱۴ و ۷ درصد افزایش داد. بنابراین با هدف کاهش مصرف آب و عدم کاهش معنی‌دار عملکرد، می‌توان پس از استقرار گیاه حدود ۲۵٪ مصرف آب را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، چغندرقند، زیرشکنی بین ردیفی، کولتیواتور، نیاز آبی

مقدمه

سطح زیر کشت چغندرقند در کل کشور در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، ۱۴۰۸۲۱ هکتار بوده که استان همدان با سطح زیر کشت ۸۴۲۶ هکتار و تولید ۵۵۸۵۰۲ تن، ششمین استان در کشور از نظر سطح زیر کشت و تولید می‌باشد (Ahmadi *et al*., 2018). نیاز آبی چغندرقند نسبتاً زیاد است (Haghayeghi *et al*., 2005). میزان آب مصرفی چغندرقند در منطقه همدان با سیستم آبیاری بارانی حدود ۱۰۰۰۰ متر مکعب در هکتار گزارش شده است (Mirzaei and Rezvani, 2012). استفاده بیش از حد از ماشین‌های کشاورزی سنگین موجب تراکم خاک می‌شود (Hamza and Anderson, 2005). از طرفی تراکم خاک، مقاومت و چگالی ظاهری خاک را افزایش داده و نفوذ آب و هوا به خاک را کاهش می‌دهد و نتیجه آن اثرات منفی بر توسعه ریشه و فعالیت میکروبی خواهد بود (Nawaz *et al*., 2013). وقتی توسعه ریشه محدود شود، حجمی از ریشه که می‌تواند آب و مواد غذایی را جذب کند کاهش می‌یابد (Sojka *et al*., 1993) و این عوامل در نهایت ممکن است باعث کاهش عملکرد محصول شوند. حال اگر بتوان با نرم کردن خاک اطراف ریشه از طریق انجام خاک‌ورزی مناسب، نفوذ ریشه را زیاد و مقدار مصرف آب را کم نمود به‌طوری‌که به عملکرد چغندرقند خللی وارد نشود، از نظر اقتصادی حائز اهمیت خواهد بود. افضلی‌نیا و همکاران (Afzalinia *et al*., 2008) در تحقیقی اثر استفاده از انواع کولتیواتور را بر عملکرد چغندرقند بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که از نظر عملکرد ریشهٔ چغندرقند و عیار قند هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین تیمارها وجود ندارد. اختلاف تیمارها از نظر درصد شکر استحصالی، نیتروژن مضر و مقدار سدیم موجود در ریشه در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. تحقیقات نشان داده است که استفاده از عملیات زراعی بعد از زیرشکنی باعث تراکم دوباره خاک می‌شود و در نتیجه مزیت

۱- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: heidari299@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.76864

به‌کارگیری زیرشکن کاهش یا کاملاً از بین می‌رود (Larney and Fortune, 1986).

زیرشکنی قبل و بعد از کاشت در تعدادی از محصولات ردیفی مطالعه شده است. زیرشکنی بین ردیفی قبل از کاشت باعث افزایش عملکرد چغندرقند (Henriksen *et al.*, 2005)، عملکرد سیب‌زمینی (Pierce and Burpee, 1995; Sojka *et al.*, 1993) و ذرت (Chancy and Kamprath, 1982) شد. نتایج چندین مطالعه نشان داد که زیرشکنی بین ردیفی در محصولات سیب‌زمینی و ذرت، مصرف آب را کاهش داد (Ibrahim and Miller, 1989; Miller and Martin, 1990; Ross, 1986).

زیرشکنی بین ردیفی بعد از کاشت اثر منفی بر رشد و عملکرد چغندرقند داشت (Henriksen *et al.*, 2005)، در حالی‌که در مورد محصول سیب‌زمینی گزارش‌های متناقضی در خصوص اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بعد از کاشت بر عملکرد سیب‌زمینی ارائه شده است. فرایسلبن (Friessleben, 1981) گزارش نمود که زیرشکنی داخل ردیف در سیب‌زمینی هنگامی که ارتفاع گیاه حدود ۲۵ سانتی‌متر بود، باعث کاهش جزیی عملکرد شد، در حالی‌که گزارش‌های دیگر محققین حاکی از افزایش عملکرد سیب‌زمینی با انجام زیرشکنی بین ردیفی بعد از کاشت بود (Heidari *et al.*, 2014; Ekelöf *et al.*, 2015). تحقیقات نشان داد که زیرشکنی بین ردیفی بعد از کاشت موجب کاهش مقاومت خاک در محصول سیب‌زمینی (Heidari *et al.*, 2014; Guaman *et al.*, 2016) و افزایش عملکرد ذرت می‌شود (Beck and DeBoer, 1992; Reeves and Touchton, 1986; Ross, 1986).

گزارشات حاکی از کاهش عملکرد ریشه چغندرقند با انجام کم آبیاری و تنش خشکی بود (Sahin *et al.*, 2014; Mirzaei and Rezvani, 2012; Nourjou *et al.*, 2006; Jahadakbar *et al.*, 2003; Nuruzi *et al.*, 2007). نورجو و همکاران (Nourjou *et al.*, 2006) و میرزایی و قدمی (Mirzaei and Ghadami Firouzabadi, 2008) با هدف کاهش مصرف آب و دستیابی به کارآیی مصرف آب بیشتر، آبیاری بر اساس ۷۵ درصد نیاز آبی را که اثر معنی‌داری بر کاهش عملکرد در زراعت چغندرقند نداشت توصیه کردند.

این پژوهش با هدف بررسی اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بعد از کاشت بر عملکرد کمی و کیفی چغندرقند و کارآیی مصرف آب در شرایط اقلیمی همدان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

بررسی اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بعد از کاشت در دو سطح نیاز آبی بر عملکرد کمی و کیفی چغندرقند به مدت ۲ سال (۱۳۹۶-۱۳۹۵) در ایستگاه تحقیقاتی اکباتان مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان با خاک لومی انجام شد. این ایستگاه در ´۳۲ و °۴۸ طول شرقی و ´۵۲ و °۳۴ عرض شمالی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۷۴۱ متر است.

این تحقیق در قالب طرح آزمایشی، کرت‌های یک‌بار خرد شده و در سه تکرار اجرا شد. آبیاری در دو سطح شامل: ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه (I1) و ۷۵٪ نیاز آبی گیاه (I2) به‌عنوان عامل اصلی و خاک‌ورزی بین ردیفی در چهار سطح شامل: کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های هلالی و قلمی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر (T1)، کولتیواتور هلالی (T2)، کولتیواتور هلالی+ نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر (T3) و ماشین مرکب روتیواتور بین ردیفی مجهز به کولتیواتور دوار و تیغه پنجه‌غازی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر (T4) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند (شکل ۱). ابتدا در بهار هر سال، قطعه زمینی به ابعاد ۱۰۰×۳۰ متر در ایستگاه تحقیقات اکباتان واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان انتخاب شد. نمونه مرکب خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر برداشت و جهت تجزیه معمول خاک‌شناسی و توصیه کودی به آزمایشگاه بخش تحقیقات خاک و آب ارسال شد (جدول ۱). خاک‌ورزی اولیه با گاوآهن برگردان‌دار به عمق ۳۰ سانتی‌متر و خاک‌ورزی ثانویه با سیکلوتیلر و غلطک انجام شد. در سوم خردادماه، بذر چغندرقند (رقم شکوفا) به میزان ۲۵۰ هزار بوته در هکتار با بذرکار نیوماتیک شرکت تراشکده (با فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بذرها از یکدیگر در روی ردیف ۸ سانتی‌متر) کشت شد. یک سوم کود اوره (معادل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و تمام کود سوپر فسفات تریپل (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) قبل از کاشت به زمین داده شد. مابقی کود اوره بعد از تنک چغندرقند، با آب آبیاری داده شد. اعمال تیمار آبیاری پس از استقرار کامل گیاه در اواخر تیرماه (حدوداً ۵۰ روز پس از آبیاری اول) به‌صورت بارانی (ویل موود) انجام گرفت. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری ۱۰۰٪ و ۷۵٪ نیاز آبی چغندرقند بودند. تیمارهای خاک‌ورزی بین ردیفی T_1، T_2 و T_4 با یک‌بار عبور تراکتور و تیمار T_3 با دو بار حرکت تراکتور (یک‌بار کولتیواتور و یک‌بار زیرشکن) بعد از عملیات تنک در اواخر تیرماه انجام شد. در طول فصل رشد، چند نوبت سمپاشی بر علیه علف‌های هرز، آفات و قارچ‌ها و برای مبارزه با علف‌های هرز روی ردیف، یک بار وجین دستی اعمال شد.

برخی خواص فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری خاک و شاخص مخروط خاک بعد از انجام عملیات خاک‌ورزی بین ردیفی (اواخر تیرماه) در کف جویچه اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

(b) (a) (c) (d)

شکل ۱- خاک‌ورزهای بین ردیفی (a- کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های قلمی و هلالی، b- کولتیواتور هلالی، c- کولتیواتور هلالی+ نیمه‌زیرشکن و d- ماشین مرکب روتیواتور بین ردیفی مجهز به کولتیواتور دوار و تیغه پنجه‌غازی)

Fig.1. Inter-row tillers (a- Combined cultivator equipped with chisel and crescent blades, b- Simple cultivator equipped with crescent blades ,c- Crescent cultivator + inter row and d- Combined cultivator equipped with rotary and sweep blades)

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک محل آزمایش

Table 1- Some soil physical and chemical properties of the test site

عمق خاک Soil depth (cm)	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS. m^{-1})	اسیدیته خاک (pH)	کربن-آلی O.C (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	فسفر قابل جذب Available phosphorus (mg. kg^{-1})	پتاسیم قابل جذب Available potassium (mg. kg^{-1})	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت Texture
0-30	0.85	8.09	0.33	0.03	49.60	6.24	45.50	29.20	25.30	Loam

روش اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک

برای تعیین چگالی ظاهری خاک، با استفاده از سیلندرهایی به قطر ۷/۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۴ سانتی‌متر، نمونه‌های دست نخورده از عمق‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری از کف جوی برداشت شد. استوانه‌ها را در داخل آون تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا خاک خشک شود. سپس استوانه‌ها را از آون خارج نموده و پس از سرد شدن وزن شد. برای محاسبه چگالی ظاهری خاک از رابطه (۱) استفاده شد (Alizadeh, 2008). بلافاصله بعد از اعمال تیمارهای خاک‌ورزی، آبیاری انجام شد و دو روز پس از آن این پارامتر اندازه‌گیری شد.

$$BD = \frac{W_s}{V} \qquad (۱)$$

که در آن BD، چگالی ظاهری خاک (g.cm^{-1})، W_s، جرم خاک خشک (g) و V حجم کل خاک (cm^3) می‌باشد.

روش اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک (شاخص مخروط)

به‌منظور اندازه‌گیری شاخص مخروطی خاک از دستگاه فروسنج (مدل Sp1000، ساخت کشور اسکاتلند) با قطر مخروط ۱۲/۸۳ میلی‌متر و زاویه راس۳۰ درجه استفاده شد (شکل ۲). در هر کرت، از ۱۰ نقطه و تا عمق ۳۵ سانتی‌متر خاک، شاخص مخروطی در محل کف جوی اندازه‌گیری شد. شاخص مخروط بعد از اعمال تیمارهای خاک‌ورزی بین ردیفی (اواخر تیرماه) و دو روز بعد از آبیاری مزرعه اندازه‌گیری شد و رطوبت وزنی خاک در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ سانتی‌متری خاک به‌ترتیب ۱۲/۶، ۱۳/۱ و ۱۴/۵ درصد بر پایه خشک بود که با روش اندازه‌گیری مستقیم (برداشت نمونه و سپس خشک کردن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) انجام شد.

شکل ۲- فروسنج

Fig.2. Penetrometer

اندازه‌گیری مقدار آب مصرفی و کارآیی مصرف آب

آبیاری با دور یک هفته به‌طور یکسان تا قبل از اعمال تیمار نیاز آبی در کلیه پلات‌ها انجام شد. برای اعمال تیمارهای آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی، مقدار آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری، با اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌صورت وزنی تا عمق ۴۵ سانتی‌متری تعیین و با استفاده از رابطه (۲) ارتفاع آب آبیاری محاسبه شد:

$$D = \rho_b \left(\theta_{fc} - \theta_i\right) \times h \qquad (۲)$$

که در آن D ارتفاع آب آبیاری، θ_{fc} رطوبت وزنی خاک در ظرفیت مزرعه، θ_i رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، ρ_b چگالی ظاهری خاک و h عمق توسعه ریشه (در این آزمایش بر اساس اندازه‌گیری داخل مزرعه ۴۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد) می‌باشد. به‌منظور اندازه‌گیری حجم آب آبیاری از کنتور حجمی استفاده شد. به منظور محاسبه کارآیی مصرف آب آبیاری، مجموع آب مصرفی برای هر یک از تیمارهای آبیاری محاسبه و سپس با توجه به مقادیر عملکرد ریشه و شکر و شکر سفید مقادیر کارآیی مصرف آب از رابطه (۳) محاسبه شد (Howell, 2001):

$$IWUE = \frac{Y_i - Y_d}{I_i} \qquad (۳)$$

که در آن IWUE کارآیی مصرف آب آبیاری ($kg.m^{-3}$)، Y_i عملکرد محصول با آبیاری ($kg.ha^{-1}$)، Y_d عملکرد محصول در حالت دیم ($kg.ha^{-1}$) و I_i آب آبیاری به‌کار برده شده ($m^3.ha^{-1}$) می‌باشد.

در ادامه از واژه کارآیی مصرف آب به‌جای کارآیی مصرف آب آبیاری استفاده می‌شود.

اندازه‌گیری عملکرد ریشه و شاخص‌های کیفی چغندرقند

برای تعیین عملکرد ریشه در هر پلات از دو خط میانی به طول ۵ متر، غده‌های چغندرقند برداشت و با احتساب نسبت جرم به سطح برداشت شده، عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. از نمونه‌ها، خمیر تهیه شد و برای اندازه‌گیری فاکتورهای درصد قند، درصد قند سفید، درصد قند ناخالص (ملاس)، ضریب استحصال شکر، سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره به موسسه تحقیقات چغندرقند انتقال یافت. اندازه‌گیری قند به روش سرد با به‌کار بردن شفاف‌کننده سولفات آلومینیوم مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۶۸۹۵ انجام شد. داده‌های حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی، مزرعه‌ای و همچنین عملکرد تیمارها مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته و از آزمون چند دامنه‌ای دانکن جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص مخروط خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص مخروط خاک در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص مخروط خاک معنی‌دار بوده و در بین تیمارهای خاک‌ورزی، تیمار T_3 (کولتیواتور هلالی + نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر) کمترین مقدار شاخص مخروط خاک که معیاری از مقاومت مکانیکی خاک می‌باشد، داشته است (جدول ۳). همان‌گونه که مشاهده می‌شود تا عمق ۳۵ سانتی‌متری خاک که در محدوده عمق کار زیرشکن می‌باشد این تیمار کمترین مقدار شاخص مخروطی خاک را دارد. نتیجه به‌دست آمده را می‌توان به گسیختگی بیشتر در ردیف‌های کاشت با انجام زیرشکنی مرتبط دانست. نتایج به‌دست آمده با گزارش گیومان و همکاران (Guaman *et al.*, 2016) و حیدری و همکاران (Heidari *et al.*, 2014) مبنی بر کاهش بیشتر مقاومت خاک با انجام زیرشکنی بین ردیفی منطبق است. تا عمق ۲۰ سانتی‌متری بعد از تیمار T_3، تیمار T_1 (کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های هلالی و قلمی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر) کمترین مقدار شاخص مخروط خاک را داشته است که این نتیجه با توجه به عمق کار این وسیله قابل پیش‌بینی بود. اما در خصوص تیمار T_4 ممکن است واحد کولتیوار دوار که عملکردی مشابه روتیواتور دارد باعث فشردگی خاک شده باشد. استالهام و همکاران (Stalham *et al.*, 2007) نیز گزارش نمودند که ریشه اکثر گیاهان قادر به نفوذ در خاک‌های با مقاومت ۳-۲ مگاپاسگال می‌باشند.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص مخروطی خاک

Table 2- Variance analysis of inter-row tillage effect on soil cone index

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عمق خاک Soil depth (mm)						
		50	100	150	200	250	300	350
Year سال	1	79350 ns	432016.7 *	510416.7 *	173400 ns	254204.2 ns	292604.2 ns	2204.2 **
Error خطا	4	40383.3	48441.7	34154.2	67658.3	182345.8	322529.2	563466.7
خاک ورزی بین ردیفی Inter-row tillage	3	28633.3 *	143694.4 **	74494.4 *	25022.2 *	38970.8 *	256637.5 *	492181.9 *
سال در خاک‌ورزی بین ردیفی Yr*Inter-row tillage	3	5894.4 ns	42894.4 *	24227.8 ns	24844.4 ns	72693 ns	88837.5 ns	46037.5 ns
Error خطا	12	5988.9	9036.1	16731.9	13625	16273.6	53545.8	153072.2

*, **: Significant at 5 and 1% of probability levels, respectively.

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

ns: Non Significant

ns غیر معنی‌دار

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص مخروط خاک (مگا پاسکال)

Table 3- Mean comparison of inter-row tillage methods effect on soil cone index (MPa)

خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage	عمق خاک Soil depth (mm)						
	50	100	150	200	250	300	350
T_1	0.2 b	0.4bc	0.51 a	0.58ab	0.8 a	1.2 a	1.92 a
T_2	0.35 a	0.65 a	0.6 a	0.66 a	0.75ab	1.21 a	1.88 a
T_3	0.21 b	0.28 c	0.33 b	0.5 b	0.61 b	0.77 b	1.34 b
T_4	0.27ab	0.5ab	0.53 a	0.6ab	0.72ab	1.01ab	1.5ab

اعداد هر ستون که دارای حروف یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) are not significantly different at 5 % of probability level based on Duncan's multiple range tests.

اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر چگالی ظاهری خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر چگالی ظاهری خاک در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر این شاخص در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک معنی‌دار بوده است و در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک، تیمار T_3 (کولتیواتور هلالی + نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر) و تیمار T_1 (کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های قلمی و هلالی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر) کمترین مقدار چگالی ظاهری خاک را نسبت به دو تیمار دیگر داشتند. در اعماق ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری خاک، تیمار تیمار T_3 (کولتیواتور هلالی + نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر) نسبت به تیمارهای دیگر کمترین مقدار چگالی ظاهری خاک را داشت (جدول ۵).

جدول ٤- تجزیه واریانس اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر چگالی ظاهری خاک

Table 4- Variance analysis of inter-row tillage effect on soil bulk density

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عمق خاک Soil depth (mm)		
		0-100	100-200	200-300
Year سال	1	416.6 ns	40837.5 **	12604.1 **
Error خطا	4	2566.6	725	154.1
خاک ورزی بین ردیفی Inter-row tillage	3	5394.4 **	45670.8 **	31781.9 **
سال در خاک‌ورزی بین ردیفی Yr*Inter-row tillage	3	3394.4 **	7570.8 **	16448.6 **
Error خطا	12	327.7	1141.6	315.2

*, **: Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively.

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

ns: None. Significant

ns غیر معنی‌دار

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی بر چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

Table 5- Mean comparison of inter-row tillage methods effect on soil bulk density ($g.cm^{-3}$)

خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage	عمق خاک Soil depth (mm)		
	0-100	100-200	200-300
T_1	1.18 b	1.39 a	1.49 a
T_2	1.22 a	1.45 a	1.48 a
T_3	1.18 b	1.26 b	1.36 b
T_4	1.23a	1.45 a	1.47 a

اعداد هر ستون که دارای حروف یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) are not significantly different at 1 % of probability level- using Duncan's Multiple Range Test.

جدول ٦- تجزیه واریانس اثر تیمار بر عملکرد کمی و کیفی چغندرقند

Table 6- Analysis of variance of treatment effect on quantitative and qualitative yield of sugar beet

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد ریشه Root yield	عملکرد شکر Sugar yield	عملکرد شکر سفید White sugar yield	عملکرد قند ناخالص (ملاس) Molasses yield	سدیم Na	پتاسیم K	نیتروژن مضره N	ضریب استحصال شکر White sugar content
سال Year	1	164.28^{ns}	44.88^{ns}	56.58^{ns}	0.77^{ns}	47.7^{**}	0.32^{ns}	0.96^{ns}	896.7^{ns}
R (Y)	4	60.38	0.66	0.34	0.08	0.52	0.78	0.07	8.7
آبیاری Irrigation	1	164.28^{ns}	1.61^{ns}	0.57^{ns}	0.18^{ns}	0.01^{ns}	0.07^{ns}	0.04^{ns}	1.07^{ns}
سال در آبیاری Y*I	1	110.41^{ns}	5.22^{ns}	4.22^{ns}	0.03^{ns}	0.22^{ns}	0.95^{ns}	0.16^{ns}	23.06^{ns}
خطا Error	1	91.85	2.16	1.05	0.16	0.16	0.7	0.2	4.5
خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage	3	37.92^{ns}	0.84^{ns}	0.38^{ns}	0.1^{ns}	0.19^{ns}	0.7^{ns}	0.26^{ns}	9.7^{ns}
سال در خاک‌ورزی بین ردیفی Y*T	3	59.42^{ns}	1.39^{ns}	0.99^{ns}	0.05^{ns}	0.21^{ns}	0.57^{ns}	0.18^{ns}	6.47^{ns}
آبیاری×خاک‌ورزی بین ردیفی I*T	3	29.43^{ns}	1.03^{ns}	0.91^{ns}	0.04^{ns}	0.14^{ns}	0.52^{ns}	0.25^{ns}	7.52^{ns}
سال×آبیاری×خاک‌ورزی بین ردیفی Y*I*T	3	50.62^{ns}	1.34^{ns}	0.75^{ns}	0.09^{ns}	0.08^{ns}	0.27^{ns}	0.24^{ns}	7.04^{ns}
خطا Error	24	51.92	1.22	0.76	0.06	0.11	0.24	0.11	3.94
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (٪)		15.06	14.29	14.32	17.85	16.4	7.5	14.86	2.54

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

^{ns} غیر معنی‌دار

*, **: Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

^{ns} : None. Significant

به علت نفوذ بهتر زیرشکن به عمق‌های پایین‌تر خاک و نیز گسیختگی بیشتر خاک، کارآیی این وسیله در کاهش فشردگی خاک نسبت به بقیه تیمارها بهتر بوده است. در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری خاک، بعد از تیمار T_3، تیمار T_1 (کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های قلمی و هلالی به عمق ۲۵-۲۰ سانتی‌متر) کمترین مقدار چگالی ظاهری خاک را داشته است که این نتیجه با توجه به عمق کار این وسیله بوده است. در عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متری خاک به‌جز تیمار زیرشکن بقیه تیمارها با توجه به عمق کارشان نتوانسته‌اند این محدوده از خاک را تحت تاثیر قرار دهند. مجهز بودن تیمار T_4 به کولتیوار دوار، احتمالاً در متراکم نمودن خاک موثر بوده است.

اثر خاک‌ورزی بین‌ردیفی و آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی چغندرقند

نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری و خاک‌ورزی بین ردیفی بر عملکرد ریشه و معیارهای کمی چغندرقند نشان داد که اثرات آبیاری و خاک‌ورزی بین ردیفی و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر عملکرد کمی و

کیفی چغندرقند معنی‌دار نبوده است (جدول ۶). با توجه به این‌که شاخص مخروط خاک در تمام تیمارها کمتر از ۲ مگا پاسگال می‌باشد، بنابراین تراکم خاک در حدی نبوده است که روی رشد ریشه و عملکرد تاثیر منفی داشته باشد. نتیجه به‌دست آمده منطبق بر گزارش (Stalham *et al.*, 2007) می‌باشد. افضلی نیا و همکاران (Afzalinia *et al.*, 2008) نیز گزارش نمودند که اثر انواع کولتیواتور بر عملکرد ریشه و میزان قند چغندرقند معنی‌دار نبوده است. تیمار T_3 (کولتیواتور هلالی + نیمه‌زیرشکن به عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر) نسبت به روش‌های دیگر خاک‌ورزی بین ردیفی بیشترین اثر را بر کاهش شاخص مخروطی و چگالی ظاهری خاک داشت ولیکن کمترین عملکرد ریشه چغندرقند را به خود اختصاص داد (جدول ۷). با توجه به فاصله کم ردیف‌ها (۵۰ سانتی‌متر) در زراعت چغندرقند و نیز ساختار زیرشکن و عمق کار آن، احتمالاً زیرشکنی موجب جابه‌جایی ریشه‌ها و آسیب جزیی به آن‌ها شده است. هنریکسون و همکاران (Henriksen *et al.*, 2005) نیز گزارش دادند که زیرشکنی داخل ردیف بعد از کاشت دارای ریسک بالایی در صدمه به محصول چغندرقند می‌باشد و نمی‌توان انتظار افزایش عملکرد را داشت.

جدول ۷ – مقایسه میانگین عملکرد کمی و کیفی چغندرقند در تیمارهای مختلف

Table 7- Mean comparison of quantitative and qualitative yield of sugar beet in different treatments

آبیاری Irrigation		عملکرد ریشه Root yield ($t.ha^{-1}$)	عملکرد شکر Sugar yield ($t.ha^{-1}$)	عملکرد شکر سفید White sugar yield ($t.ha^{-1}$)	عملکرد قند ناخالص Molasses yield ($t.ha^{-1}$)	سدیم Na (%)	پتاسیم K (%)	نیتروژن مضره N (%)	ضریب استحصال شکر White sugar content (%)
I_1		49.708a	7.907a	6.187a	1.419a	1.969a	6.641a	2.215a	78a
I_2		46.008a	7.540a	5.967a	1.295a	1.996a	6.563a	2.276a	78.3a
خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage									
	T_1	46.983a	7.707a	6.065a	1.361a	1.929a	6.762a	2.252a	78.3a
	T_2	49.350a	7.946	6.269a	1.374a	2.011a	6.464a	2.102a	78.4a
	T_3	45.775a	7.356a	5.845a	1.237a	1.847a	6.338a	2.183a	79.1a
	T_4	49.325a	7.885	6.130a	1.455a	2.144a	6.844a	2.446a	76.9a
آبیاری Irrigation	خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage								
I_1	T_1	46.783a	7.481a	5.776a	1.425a	2.015a	7.002a	2.330a	77.2a
	T_2	52.917a	8.416a	6.586a	1.500a	2.023a	6.568a	2.117a	78.2a
	T_3	47.517a	7.575a	5.987a	1.304a	1.863a	6.402a	2.213a	79
	T_4	51.617a	8.154a	6.398a	1.446a	1.975a	6.593a	2.202a	77.7a
I_2	T_1	47.183a	7.933a	6.354a	1.296a	1.843a	6.522a	2.173a	79.4a
	T_2	45.783a	7.475	5.952a	1.248a	1.998a	6.360a	2.087a	78.6a
	T_3	44.033a	7.137a	5.703a	1.170a	1.830a	6.275a	2.153a	79.1a
	T_4	47.033a	7.615a	5.863a	1.464a	1.313a	7.095a	2.690a	76.1a

اعداد هر ستون که دارای حروف یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) are not significantly different at 5 % of probability level- using Duncan's Multiple Range Test.

کارآیی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر کارآیی مصرف آب نشان داد که خاک‌ورزی بین ردیفی بر کارآیی مصرف آب معنی‌دار نشده است. اثر نیاز آبی بر کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر و شکر سفید در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۸). نیاز آبی ۷۵ درصد نسبت به ۱۰۰ درصد باعث افزایش کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد ریشه، عملکرد شکر و عملکرد شکر سفید به‌ترتیب به میزان، ۴ درصد، ۱۴ درصد و ۷ درصد شد (جدول ۹). بنابراین با هدف کاهش مصرف آب و عدم کاهش معنی‌دار عملکرد، می‌توان پس از استقرار گیاه حدود ۲۵٪ مصرف آب را کاهش داد. مقدار کل کاهش در مصرف آب در طول زمان رشد گیاه حدود ۱۵٪ بود. نورجو و همکاران (Nourjou *et al.*, 2006) و میرزایی و قدمی (Mirzaei and Ghadami Firouzabadi, 2008) نیز تیمار ۷۵٪ نیاز آبی را در زراعت چغندرقند توصیه نمودند. در تیمار آبی ۷۵٪ درصد نیاز آبی، روش خاک‌ورزی بین ردیفی T_1 (کولتیواتور مرکب مجهز به تیغه‌های قلمی (عمق ۲۵-۲۰سانتی‌متر)) نسبت به دیگر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی باعث افزایش بیشتر کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد ریشه، شکر و شکر سفید شد.

جدول ۸- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمار بر کارآیی مصرف آب

Table 8- Analysis of variance of treatment effect on water use efficiency

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد ریشه Water use efficiency based on root yield	کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر Water use efficiency based on sugar yield	کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر سفید Water use efficiency based on White sugar yield
سال Year	1	71.724^{**}	3.546^{**}	3.068^{**}
R (Y)	4	0.629	0.013	0.007
آبیاری Irrigation	1	4.745^{ns}	0.181^{*}	0.139^{*}
سال در آبیاری Y*I	1	2.289^{ns}	0.173^{ns}	0.148^{*}
خطا Error	1	1.433	0.027	0.013
خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage	3	0.519^{ns}	0.014^{ns}	0.007^{ns}
سال در خاک‌ورزی بین ردیفی Y*T	3	1.209^{ns}	0.02^{ns}	0.014^{ns}
آبیاری×خاک‌ورزی بین ردیفی I*T	3	0.294^{ns}	0.017^{ns}	0.014^{ns}
سال×آبیاری×خاک‌ورزی بین ردیفی Y*I*T	3	0.968^{ns}	0.019^{ns}	0.011^{ns}
خطا Error	24	0.708	0.017	0.011
ضریب تغییرات (درصد) (٪) Coefficient of variation		14.83	13.95	13.94

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.

^{ns} غیر معنی‌دار

*, **: Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

^{ns} : Non. Significant

جدول ۹ – میانگین کارآیی مصرف آب در تیمارهای مختلف

Table 9- Mean of water use efficiency in different treatments

آبیاری Irrigation		کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر Water use efficiency based on sugar yield (kg. m^{-3})	کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر Water use efficiency based on sugar yield (kg. m^{-3})	کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر سفید Water use efficiency based on White sugar yield (kg. m^{-3})
I_1		5.361a	0.875b	0.690b
I_2		5.575a	0.998a	0.738a
خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage				
	T_1	5.585a	0.931a	0.740a
	T_2	5.749a	0.964a	0.768a
	T_3	5.442a	0.890a	0.713a
	T_4	5.361a	0.961a	0.754a
آبیاری Irrigation	خاک‌ورزی بین ردیفی Inter-row tillage			
I_1	T_1	5.046a	0.818a	0.638a
	T_2	5.532a	0.937a	0.739a
	T_3	5.139a	0.830a	0.660a
	T_4	5.727a	0.915a	0.723a
I_2	T_1	6.124a	1.044a	0.842a
	T_2	5.967a	0.990a	0.796a
	T_3	5.746a	0.951a	0.767a
	T_4	5.121a	1.007a	0.785a

اعداد هر ستون که دارای حروف یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن درسطح احتمال ۵٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) are not significantly different at 5 % of probability level- using Duncan's Multiple Range Test.

نتیجه‌گیری

اثر خاک‌ورزی بین ردیفی بر شاخص مخروط و چگالی ظاهری خاک معنی‌دار شد و تیمار زیرشکن نسبت به بقیه روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی، موجب کاهش بیشتر این دو شاخص شد. اثر روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی و سطوح آبیاری بر عملکرد ریشه و شکر معنی‌دار نشدند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تاثیر میزان نیاز آبی بر کارآیی مصرف آب، پس از استقرار کامل گیاه، می‌توان آب مصرفی را در حدود ۲۵ درصد کاهش داد (این کاهش در کل طول رویش چغندرقند در حدود ۱۵ درصد بود).

پیشنهادات

با توجه به اثر منفی زیرشکنی بین ردیفی بر عملکرد چغندرقند، توصیه می‌شود از انجام زیرشکنی بین ردیفی در محصولات ردیفی همچون چغندرقند که فاصله ردیف‌های کاشت آن کم است، اجتناب شود. استفاده از کولتیواتور مرکب (تیغه‌های قلمی و هلالی) و کم آبیاری (کاهش ۲۵ درصد آب مصرفی پس از استقرار گیاه) در زراعت چغندرقند پیشنهاد می‌شود. همچنین در تحقیقات بعدی توصیه می‌شود تیمار بدون خاک‌ورزی در زمان داشت در کنار بقیه روش‌های خاک‌ورزی بین ردیفی مورد بررسی قرار گیرد.

References

1. Afzalinia, S., M. Niroumand Jahromi, and D. Mohammadi. 2008. The effect of row crop cultivator types on sugar beet yield and quality. Jornal of Agricultural Engineering Research 9: 57-68.
2. Ahmadi, K., H. R. Abadzadeh, H. Abdshah, A. Kazemian, and M. Rafee. 2018. Aricultural Statistics (2016-2017). Ministry of Agricultural Jihad.
3. Alizadeh, A. 2008. Soil, water, plant relationship. Emam Reza University Press.
4. Beck, D. L., and D. W. DeBoer. 1992. Post-emergence, inter-row tillage to enhance infiltration under sprinkler irrigation. Soil and Tillage Research 23: 111-123.
5. Chancy, H., and E. Kamprath. 1982. Effects of Deep Tillage on N Response by Corn on a Sandy Coastal Plain Soil 1. Agronomy Journal 74: 657-662.
6. Ekelöf, J., V. Guamán, E. Jensen, and P. Persson. 2015. Inter-row subsoiling and irrigation increase starch potato yield, phosphorus use efficiency and quality parameters. Potato Research 58: 15-27.
7. Friessleben, G. 1981. Investigations into mechanical and chemical post-planting cultivation of potatoes on a loess site. Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde 25: 301-310.
8. Guaman, V., B. Båth, J. Hagman, A. Gunnarsson, and P. Persson. 2016. Short time effects of biological and inter-row subsoiling on yield of potatoes grown on a loamy sand, and on soil penetration resistance, root growth and nitrogen uptake. European Journal of Agronomy 80: 55-65.
9. Haghayeghi, A., Gh. Tohidloo, and H. Sareghaen. 2005. Water use efficiency and yield of sugar beet under sprinkler and furrow irrigation. Journal of Agricultural Engineering Research 22: 1-14.
10. Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research 82: 121-145.
11. Heidari, A., A. Hemmat, and S. Rezvani. 2014. The effect of inter-row tillage on potato yield quality and quantity and water use efficiency in a fine-textured Soil. JWSS-Isfahan University of Technology 18: 35-44.
12. Henriksen, C. B., J. Rasmussen, and C. Søgaard. 2005. Kemink subsoiling before and after planting. Soil and Tillage Research 80: 59-68.
13. Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. Agronomy Journal 93: 281-289.
14. Ibrahim, B., and D. Miller. 1989. Effect of subsoiling on yield and quality of corn and potato at two irrigation frequencies. Soil science society of America journal 53: 247-251.
15. Jahadakbar, M., H. R. Ebrahimian, M. Torabi, and J. Gohari. 2003. Effect of water deficit on sugar beet quality and quantity in Kabotarabad-Esfahan.
16. Larney, F., and R. Fortune. 1986. Recompaction effects of mouldboard ploughing and seedbed cultivations on four deep loosened soils. Soil and Tillage Research 8: 77-87.
17. Miller, D., and M. Martin. 1990. Responses of three early potato cultivars to subsoiling and irrigation regime on a sandy soil. American Potato Journal 67: 769-777.
18. Mirzaei, M. R., and A. Ghadami Firouzabadi. 2008. Investigation of quantity and quality characters of Sugar Beet crop under Furrow and micro irrigation Systems in hamedan Jornal of Sugar beet 23: 111-122.
19. Mirzaei, M. R., and S. Rezvani. 2012. Effects of deficit irrigation levels at four growth stages on yield and quality of sugar beet. Iranian Journal of Crop Sciences 14: 94-107.
20. Nawaz, M. F., G. Bourrie, and F. Trolard. 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. Agronomy for Sustainable Development 33: 291-309.
21. Nourjou, A., F. Abbasi, A. Jodaei, and M. Baghaei Kia. 2006. The effect of deficit irrigation on the quality and quantity of sugar beet in Miandoab region. Jornal of Sugar beet 22: 53-66.

22. Nuruzi, A., M. A. D. Rezvani, K. Azari, and A. M. Jafari. 2007. Impacts of different irrigation systems on nitrogen and water use efficiency and the quality and quantity of sugar beet yield. Agricultural Scientific Information and Documentation Centre, Agricultural Research and Education Organization. Report no. 375.
23. Pierce, F., and C. G. Burpee. 1995. Zone tillage effects on soil properties and yield and quality of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). Soil and Tillage Research 35: 135-146.
24. Reeves, D., and J. Touchton. 1986. Effects of in-row and interrow subsoiling and time of nitrogen application on growth, stomatal conductance and yield of strip-tilled corn. Soil and tillage research 7: 327-340.
25. Ross, C. 1986. The effect of subsoiling and irrigation on potato production. Soil and Tillage Research 7: 315-325.
26. Sahin, U., S. Ors, F. M. Kiziloglu, and Y. Kuslu. 2014. Evaluation of water use and yield responses of drip-irrigated sugar beet with different irrigation techniques. Chilean Journal of Agricultural Research 74: 302-310.
27. Sojka, R., D. Westermann, D. Kincaid, I. McCann, J. Halderson, and M. Thornton. 1993. Zone-subsoiling effects on potato yield and grade. American Potato Journal 70: 475-484.
28. Stalham, M., E. Allen, A. Rosenfeld, and F. Herry. 2007. Effects of soil compaction in potato (*Solanum tuberosum*) crops. The Journal of Agricultural Science 145: 295-312.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 313-323

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۲۳-۳۱۳

Effect of Inter-row Tillage on Yield and Water Productivity of Sugar Beet

A. Heidari[1*]

Received: 04-12-2018
Accepted: 06-03-2019

Introduction: Soil compaction reduces soil porosity and thus, increases the resistance and bulk density of the soil. These changes limit water and air movement and root penetration in the soil and ultimately, they may reduce the seed germination and the crop yield. For planting sugar beets, tractors and equipment need to move several times on the ground, which is a factor in soil re-compaction and the loss of the effects of previous tillage. Therefore, if, after planting, inter-row tillage was done, it can have a positive effect on reducing the bulk density of the soil and it may even increase yield.

Materials and Methods: An experiment was conducted to determine the effect of inter-row tillage on the sugar beet yield and its quality and water use efficiency during two years cropping period (2016-2017) in Ekbatan Research Station, Hamadan with loam texture soil. A strip plot experiment with eight treatments and three replications was used. Irrigation regimes consist of 100% of sugar beet water requirement (I_1) and 75% of sugar beet water requirement (I_2) were considered as main plots. Inter-row tillage operations consist of combined cultivator equipped with chisel and crescent blades to 20-25 cm soil depth (T_1), a simple cultivator equipped with crescent blades (T_2), crescent cultivator + inter-row subsoiling to 30-35 cm soil depth (T_3), combined cultivator equipped with rotary and sweep blades to 20-25 cm soil depth were considered (T_4) as sub-plots. During the experiment, some physical properties of soil including bulk density and soil cone index were measured. At the end of the growth season, the root yield and yield of white sugar were measured and analyzed statistically.

Results and Discussion: The results showed that the effect of inter-row tillage methods on the soil bulk density and soil cone index was significant. The T_3 treatment (crescent cultivator + inter-row subsoiling to 30-35 cm soil depth) had the highest effect on reducing the cone index and bulk density of soil, but the lowest root yield was obtained. Due to the low spacing of rows (50 cm) in the sugar beet cultivation, as well as the structure of the subsoiler and its depth, it is possible that the subsoiling caused the moving of the roots and minor damage to it. The effects of irrigation and inter-row tillage and their interactions on quantitative and qualitative yield of sugar beet were not significant. The results of analysis of variance of treatment effect on the water use efficiency showed that the effect of inter-row tillage on the water use efficiency was not significant. The effect of water requirement on the water use efficiency on the basis of sugar and white sugar performance was significant at 5% probability level. The treatment of 75% of water requirement increased the efficiency of water use based on the root yield, sugar yield and white sugar yield by 4%, 14% and 7%, respectively. Therefore, with the goal of reducing water consumption and not significantly reducing the yield, after plant establishment, it can reduce water use by about 25%.

Conclusions: The effect of inter-row tillage on the cone index and bulk density of soil was significant and subsoiling treatment caused a further reduction of these two indices compared to the other inter-row tillage methods. The effect of inter-row tillage and water requirement on root and sugar yields was not significant. According to the results, after planting completely establishment, the water use can be reduced by about 25% (this decrease in the total length of sugar beet growing was about 15%).

Keywords: Cultivator, Inter-row subsoiling, Soil compaction, Sugar beet, Water requirements

1- Department of Agricultural Engineering, Research Agricultural and Natural Resource and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamadan, Iran
(*- Corresponding Author Email: heidari299@ yahoo.com)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 325-336

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۳۶-۳۲۶

بررسی اثر سرعت دورانی، دما، نوع پیچ فشاری و قطر دای بر میزان روغن استخراج‌شده از دانه روغنی کنجد

منصور عسافی[۱]، رسول معمار دستجردی[۲*]، محمد نوشاد[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر همگام با رشد جمعیت و بهبود سطح زندگی، مصرف روغن‌های گیاهی رو به افزایش نهاده و موجب افزایش سطح زیر کشت دانه‌های روغنی شده است. اخیراً کنجد به‌عنوان یک گیاه مناسب روغنی برای کشت در شرایط آب و هوایی ایران مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش یک دستگاه عصاره‌گیری از دانه‌ی روغنی کنجد، به روش پیچ پرسی طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های مختلفی برای تعیین میزان روغن استخراج شده بر اساس پارامترهای قابل تغییر همچون شکل هندسی پیچ‌های پرسی، سرعت دورانی پیچ پرسی، دمای استخراج و قطر دای انجام شد. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ($30^{\circ}C$، ۶۰ و ۹۰)، سه سطح سرعت دورانی (۲۰، ۵۰ و ۸۰ rpm)، سه مدل پیچ پرسی (سر راست با گام ثابت، سر راست با گام متغیر و مخروطی) و سه قطر دای (۶، ۸ و ۱۰mm)، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گردید. نتایج تحقیق نشان داد که اثر نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی، دمای استخراجی و اندازه دای بر میزان استخراج روغن در سطح یک درصد معنی‌دار است به‌گونه‌ای که پیچ پرسی مخروطی با سطح سرعت ۵۰ rpm و سطح دمایی $60\ ^{\circ}C$ و قطر دای ۶mm بیشترین میزان استخراج روغن را داشت. برای پیش‌بینی میزان روغن کنجد استخراج شده از شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون چندلایه و مقایسه آن با مدل‌های رگرسیونی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با توپولوژی ۱-۸-۳ با ضریب همبستگی ۹۷/۴۷ درصد و مجذور میانگین مربعات خطای، ۰/۶۵ در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی و درجه دوم کارایی بالاتری در پیش‌بینی میزان روغن استخراجی دارد.

واژه‌های کلیدی: استخراج، پیچ پرسی، حرارت، روغن کنجد، سرعت دورانی، شبکه عصبی، قطر دای

مقدمه

در سال‌های اخیر همگام با رشد جمعیت و بهبود سطح زندگی، مصرف روغن‌های گیاهی رو به افزایش نهاده و موجب افزایش سطح زیر کشت دانه‌های روغنی شده است. امروزه در راستای بهبود رژیم غذایی، جایگزینی چربی‌های حیوانی با روغن‌های گیاهی به چشم می‌خورد که این موضوع به‌منظور داشتن یک رژیم غذایی سالم و استفاده از غذاهایی با اثر سلامت‌بخشی در ارتباط است (Cert *et al.*, 2000). افزایش تولید روغن‌های خوراکی را می‌توان علاوه بر بهبود شیوه‌های کشت و اصلاح ارقام پر محصول، از طریق بهبود سامانه‌های مورد استفاده در مراحل مختلف مربوط به دانه و ازجمله سامانه دستگاه روغن‌کشی تأمین نمود. با توجه به این‌که بیش از ۹۰ درصد روغن‌های خوراکی از طریق واردات تأمین می‌شود، با ساخت و اصلاح دستگاه‌های استخراج روغن می‌توان تولید داخلی را بالا برد و میزان وابستگی را کاهش داد (Feyzollahzadeh *et al.*, 2013). در همین راستا نیز پیشرفت‌هایی در فرآوری دانه‌های روغنی همچون روش پرس سرد، به‌منظور فراهم آوردن محصولی با کیفیت بالا صورت گرفته است. بزرگ‌ترین منبع روغن‌های نباتی، گیاهان یک‌ساله نظیر سویا، ذرت، پنبه و بادام‌زمینی می‌باشند. منابع دیگر روغن‌های نباتی گیاهانی مانند درخت نخل روغنی، زیتون و نارگیل هستند (Malek, 2000). یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در دنیا، کنجد می‌باشد. کنجد با نام علمی (*Sesamum Indicum* L.)، گیاهی علفی از خانواده (Pedaliaceae) می‌باشد که حاوی ۵۸-۴۴ درصد روغن، ۲۵-۱۸ درصد پروتئین و ۱۳/۵ درصد کربوئیدرات می‌باشد (Alyemeni *et al.*, 2011; Rababa'h, 1998). این گیاه یک‌ساله بوده و ارتفاعش بالغ بر یک متر است. کنجد در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری با آب و هوای خشک و بارانی رشد می‌کند (Biabani *et al.*, 2008). بیش‌ترین سطح زیر کشت این محصول مربوط به کشورهای در حال‌توسعه آسیا و آفریقا می‌باشد و در این میان سه کشور چین، هند و میانمار به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده این محصول در دنیا به‌حساب می‌آیند (El Khier *et al.*, 2008). میزان تولید کنجد در ایران در سال ۲۰۱۶ بیش از ۵۶۱۷۶ تن بوده است (FAO, 2017). روش‌های متفاوتی برای استخراج

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران
۳- استادیار گروه صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: rasoul.memar@asnrukh.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.78223

روغن از دانه‌های روغنی وجود دارد؛ ازجمله این روش‌ها می‌توان به روش استخراج روغن به کمک حلال‌های صنعتی، استخراج روغن به‌وسیله پرس هیدرولیک، پیچ پرسی و غلتک‌های فشاری اشاره کرد (Ajibola *et al.*, 2002; Bamgboye and Adejumo, 2007). امروزه از میان انواع مختلف روش‌های روغن‌گیری از دانه‌های روغنی، مطمئن‌ترین روش استخراج روغن از دانه‌های روغنی روش پیچ پرسی می‌باشد. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها ساده‌تر، دارای قیمت مناسب، امنیت غذایی بالا و دوست‌دار محیطزیست است (Haumann, 1997; Wiesenborn *et al.*, 2001). عوامل مختلفی بر ماکزیمم میزان استخراج روغن از دانه‌های روغنی در این روش تأثیرگذار هستند. با شناخت و بهبود این روش‌ها می‌توان میزان استخراج روغن از دانه‌های روغنی را افزایش و میزان روغن خارج شده به همراه تفاله خروجی را کاهش داد. برای شناخت بیشتر این عوامل می‌توان به مواردی مانند نوع هندسی پیچ پرسی، میزان رطوبت دانه روغنی، میزان سرعت چرخش شافت پرسی (rpm)، دما و قطر سوراخ دای[1] اشاره کرد. با بهبود فاکتورهای گفته شده می‌توان یک دستگاه روغن‌گیری از دانه‌های روغنی با بیشترین میزان بازده عملکرد را ارائه داد. فشار و پرس دانه‌ها و چرخش هم‌زمان سیلندر، سبب ایجاد حرارت و افزایش دما می‌شود. پیش‌تیمار حرارتی و افزایش دما سبب خروج بیشتر و سریع‌تر روغن از دانه و مؤثر شدن فرآیند استخراج می‌گردد (Malek, 2000). استخراج روغن با پرس، به‌صورت گرم یا سرد می‌باشد. روش پرس برای دانه‌هایی مانند کنجد که حاوی مقادیر بالایی از روغن می‌باشند، به‌کار گرفته می‌شود. استفاده از این روش به‌تنهایی ناکافی بوده و میزان زیادی از روغن در خوراک باقی می‌ماند که سپس از طریق حلال استخراج می‌گردد. بازده استخراجی روغن در پرس گرم بالاتر از پرس سرد بوده ولی به دلیل حرارت تولید شده در حین فشردن، کیفیت روغن حاصله پایین‌تر است و این در حالی است که روغن حاصله از پرس سرد خواص طبیعی خود را بهتر حفظ نموده و عاری از مواد شیمیایی می‌باشد (Siger *et al.*, 2008). با توجه به افزایش سطح آگاهی مردم مبنی بر اثرات نامطلوب و سمی ناشی از استفاده مواد شیمیایی در استخراج روغن بر سلامت افراد و همچنین اثرات جبران‌ناپذیر حلال‌ها بر محیطزیست، تلاش جهت بهبود این فرآیندها و جایگزینی آن‌ها با سایر روش‌های دیگری مانند روش استخراج روغن به کمک پیچ پرسی که هم‌خوانی بیشتری با محیطزیست دارند صورت گرفته است (Mazaheri, 2006). لذا هدف کلی از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای سرعت دورانی پرس مارپیچی، دما، نوع پیچ پرسی و قطر دای بر میزان استخراج روغن از دانه روغنی کنجد و مطالعه پیش‌بینی میزان استخراج روغن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با مدل‌های رگرسیون خطی و درجه دوم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خواص فیزیکی کنجد

کنجد مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها از مراکز مطمئن تولید روغن کنجد در شهرستان خریداری شد. برای اندازه‌گیری میانگین هندسی دانه حدود ۱۰۰ عدد دانه‌ی روغنی کنجد به‌صورت تصادفی انتخاب گردید و سه محور اصلی دانه‌ی روغنی (W= عرض، L= طول، T= ضخامت) به کمک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد. با استفاده از این سه محور، قطر متوسط هندسی (D_a)، میانگین هندسی قطر (D_g) و ضریب کرویت ($\emptyset_p$) و سطح (s) دانه توسط روابط (۱)، (۲)، (۳)، (۴) محاسبه شدند (Mohsenin, 1986).

$$D_a = \frac{L + W + T}{2} \quad (۱)$$

$$D_g = (LWT)^{1/3} \quad (۲)$$

$$\emptyset_p = \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \quad (۳)$$

$$S = \pi {D_g}^2 \quad (۴)$$

جرم نمونه و همچنین وزن هزار دانه به‌وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱gr اندازه‌گیری شد. خواص فیزیکی دانه‌ی روغنی کنجد، D_a، D_g، $\emptyset_p$ و s به‌ترتیب ۲/۶۵ mm، ۱/۷۳ mm، ۰/۶۰ و mm^2 ۹/۳۹ به‌دست آمدند.

دستگاه روغن‌گیری کنجد

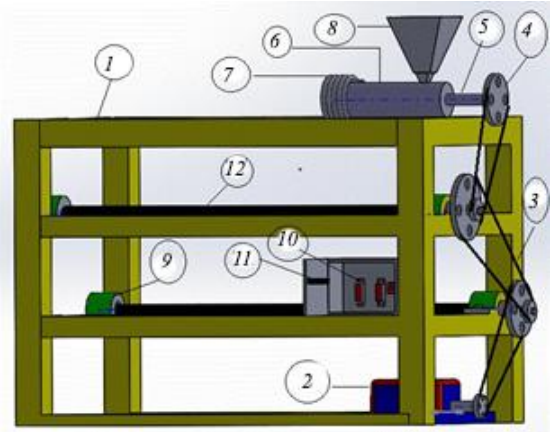
به‌منظور بررسی تأثیر سرعت پیچ پرسی، حرارت محفظه پرس، نوع پیچ پرسی و اندازه سوراخ دای بر میزان روغن کنجد استخراج شده، دستگاه استخراج روغن با قابلیت تغییر پارامترهای مورد نظر طراحی و ساخته شد. طرح‌واره دستگاه عصاره‌گیری از دانه‌ی روغنی کنجد در شکل ۱ نشان داده شده است.

طراحی پیچ‌های پرسی دستگاه روغن‌کشی

پیچ‌های پرسی که در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین قطعات دستگاه روغن‌گیری از دانه‌ی روغنی می‌باشند. این قطعه‌ها نقش مهمی در افزایش عملکرد استخراج روغن از دانه‌ی روغنی را ایفا می‌کنند. این پیچ‌ها هم وظیفه انتقال مواد به سمت جلوی دستگاه و هم وظیفه پرس دانه‌های روغنی را بر عهده دارند. انتخاب درست نوع پیچ و به‌کارگیری صحیح آن در دستگاه روغن‌گیری سبب افزایش بازده دستگاه می‌شود. پیچ‌های پرسی دارای انواع مختلفی می‌باشد که هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ جنس اولیه با هم متفاوت می‌باشند. با توجه به اهمیت استفاده از پیچ پرسی در افزایش عملکرد استخراج روغن، در این پژوهش از سه نوع مدل

۱- محل خروج تفاله از دستگاه روغن‌گیری

پیچ پرسی سر راست، مخروطی و گام متغیر استفاده شد و تأثیر آن‌ها در میزان روغن خروجی مورد بررسی گرفت.



شکل ۱- طرح‌واره دستگاه عصاره‌گیری از دانه‌ی روغنی (۱- شاسی، ۲- موتور الکتریکی، ۳- تسمه، ۴- پولی، ۵- پیچ پرسی، ۶- مخزن، ۷- المنت حرارتی، ۸- سیلندر تغذیه، ۹- یاتاقان، ۱۰- کلید، ۱۱- ترموستات، ۱۲- محور نگهدارنده پولی)

Fig.1. Schematic of oil extraction machine (1- Chassis, 2- Electric motor, 3- Belt, 4- Pulley, 5- Press screw, 6- Hopper, 7- Thermal element, 8- Feeding cylinder, 9- Bearings, 10- Switches, 11- Thermostats, 12- Pulley support axis)

شکل ۲- پیچ‌های پرسی مورد استفاده (سر راست با گام ثابت (a)، مخروطی (b) و گام متغیر(c))

Fig.2. Press screws (Spur gear with constant pitch (a), Conical (b) and Variable pitch(c))

مکانیسم تغییر سرعت دورانی

یکی از مکانیزم‌های انتقال نیرو، سیستم پولی و تسمه می‌باشد. وظیفه این سیستم انتقال نیرو از موتور الکتریکی به پیچ پرسی و تولید گشتاور مورد نیاز می‌باشد. در دستگاه عصاره‌گیری از دانه‌های روغنی برای به‌دست آوردن سرعت دورانی مورد نیاز و تولید گشتاور مناسب از این سیستم استفاده شد. برای رسیدن به سه سطح سرعت دورانی ۲۰، ۵۰ و ۸۰ rpm دو پولی واسط به‌کار برده شد. مطابق شکل ۱ این پولی‌ها برای کاهش دور و همچنین برای کاهش قطر پولی‌هایی که روی پیچ‌های پرسی نصب می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفتند. برای به‌دست آوردن سرعت و قطر مناسب پولی‌ها از رابطه‌ی (۵) استفاده شد (Olaomi, 2008).

$$N_1D_1 = N_2D_2 \qquad (۵)$$

که در این رابطه N_1، سرعت پولی خروجی، D_1، قطر پولی خروجی (m)، N_2، سرعت پولی ورودی و D_2، قطر پولی ورودی (m) می‌باشند.

طراحی دای

یکی از قطعات تأثیرگذار در افزایش راندمان استخراج روغن و همچنین افزایش فشار وارده به دانه‌ی روغنی کنجد، دای می‌باشد. این قطعه در شکل ۳ نمایش داده شده است. این قطعه در قسمت جلوی دستگاه، محلی که بیشترین فشار به دانه‌ی روغنی وارد می‌شود قرار دارد. هدف از ساخت دای به‌دست آوردن قطر مناسب جهت خروج تفاله می‌باشد. با تغییر قطر دای می‌توان فشار حاصله را تغییر داد. جهت حصول فشارهای متغیر از سه قطر سوراخ متفاوت دای (۶، ۸ و ۱۰mm) استفاده شد.

شکل ۳- طرح‌واره دای دستگاه عصاره‌گیری از دانه روغنی کنجد (۱- محل یاتاقان، ۲- محل خروج تفاله)
Fig.3. Schematic of sesame oil extracting machine nozzle (1- Bearing location, 2- Residual outlet)

سیستم حرارتی

در دستگاه عصاره‌گیری از یک المنت میله‌ای ۸۰ واتی که داری قابلیت انعطاف بالایی است استفاده شد. این المنت در قسمت جلوی دستگاه تعبیه گردید. برای کنترل دما از یک ترموستات BR6 و یک حس‌گر دمایی type k استفاده شد. این سیستم وظیفه تأمین و ثابت نگه‌داشتن دما در سه سطح (۳۰، ۶۰، ۹۰ درجه سلسیوس) را بر عهده داشت. برای یکسان شدن دما در کل طول سیلندر تغذیه، حدود ۱۰ دقیقه قبل از انجام آزمایش‌ها سیستم حرارتی شروع به‌کار می‌کرد.

مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

جهت تعیین شبکه عصبی بهینه از ابزار عصبی نرم‌افزار متلب (Matlab, 2012b) استفاده گردید. نوع شبکه طراحی شده پرسپترون چندلایه (MLP) بود. جهت طراحی این شبکه، در لایه اول (ورودی) ۳ نورون وجود دارد که برابر تعداد پارامترهای متغیر مورد بررسی است (نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی پیچ و دما)، لایه دوم مخفی است و لایه آخر (خروجی) دارای یک نورون (میزان روغن استخراج شده) است که برابر تعداد خروجی مورد بررسی در این شبکه است. جهت آموزش از الگوریتم لونبرگ-مارکوارت[1] (LM) استفاده شد که جزو سریع‌ترین روش‌های آموزش شبکه عصبی می‌باشد. در واقع وظیفه این الگوریتم کاهش خطا در حین آموزش شبکه است. یکی از مشکلاتی که هنگام آموزش شبکه عصبی ممکن است پیش بیاید، بیش‌آموزی شبکه است. بدین‌صورت که در هنگام آموزش شبکه، خطا به مقدار قابل قبول می‌رسد ولی هنگام ارزیابی، خطای شبکه به‌مراتب از خطای داده‌های آموزشی بیش‌تر باشد. برای جلوگیری از بیش‌آموزی دو راه وجود دارد: ۱- توقف سریع آموزش، ۲- انتخاب کم‌ترین تعداد نرون در لایه پنهان (Erenturk and Erenturk, 2007; Hernandez-Perez *et al.*, 2004). در این تحقیق از روش دوم استفاده شد. بدین‌صورت که برای آموزش شبکه، ابتدا داده‌ها به‌صورت تصادفی به سه قسمت تقسیم شدند، به‌طوری که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد داده‌ها برای ارزیابی و ۱۵ درصد داده‌ها برای تست شبکه استفاده شد. در حین آموزش شبکه، زمانی که خطای بین داده‌های آموزش و ارزیابی در حال افزایش باشد، فرآیند آموزش قطع می‌شود. جهت اتصال لایه ورودی به لایه پنهان از توابع فعال‌سازی تانژانت سیگموید هیپربولیکی در مراحل مختلف آزمون و خطای شبکه‌ها استفاده شد. جهت اتصال لایه پنهان به لایه خروجی، تابع فعال‌سازی خطی به‌کاربرده شد. از دو معیار ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) برای ارزیابی و مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. معادلات هر یک از آماره‌ها در ذیل ارائه شده است:

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{pi} - Y_{ei}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{pi} - \bar{Y}\right)^2}} \qquad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_{pi} - Y_{ei})^2}{n}} \qquad (۷)$$

در این روابط Y_{pi} داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل و Y_{ei} داده‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد کل داده‌ها است (Dolatabadi *et al.*, 2016).

طرح آماری مورد استفاده

در این پژوهش برای تعیین بهترین پارامتر های استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد از دو آزمایش استفاده شد. در آزمایش اول متغیرهای مستقل شکل هندسی پیچ پرسی (پیچ پرسی با فاصله گام ثابت، پیچ پرسی با فاصله گام متغیر و پیچ پرسی مخروطی)، دما ($^{\circ}C$ ۳۰، ۶۰ و ۹۰) و سرعت (۲۰، ۵۰ و ۸۰ rpm) بوده و متغیر وابسته، میزان خروج روغن از دانه‌ی روغنی بود. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار صورت گرفت. قطر دای در این آزمایش ثابت ۶mm در نظر گرفته می‌شود (Deli *et al.*, 2011). بعد از مشخص شدن بهترین پارامترها (شکل هندسی پیچ پرسی، دما و سرعت) آزمایش دوم با ثابت گرفتن این پارامترها برای تعیین بهترین قطر دای انجام صورت گرفت. این آزمایش با استفاده از طرح کاملاً تصادفی با یک فاکتور (قطر دای) در سه سطح ۶، ۸ و ۱۰mm و با سه تکرار انجام شد. میزان کنجد مورد استفاده برای هر آزمایش مقدار ثابت ۳۰۰gr بود. هم‌چنین تحلیل رگرسیون‌های خطی و چندجمله‌ای درجه دوم با استفاده از نرم‌افزار

1- Levenberg- Marquardrt Algorithm

MINITAB نسخه ۱۷ انجام شد. رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم بر اساس روش گام‌به‌گام انجام و جملات غیر معنی‌دار از مدل حذف شدند. دقت مدل‌ها با محاسبه شاخص‌های ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مقایسه شدند. مدلی که دارای بالاترین مقدار ضریب همبستگی و کم‌ترین مقدار RMSE باشد، در پیش‌بینی داده‌های اندازه‌گیری شده، دقت بالاتری دارد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد. کلیه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح یک درصد و پنج درصد با یکدیگر مقایسه شدند. برای رسم قطعات مورد نیاز برای طراحی دستگاه از نرم‌افزار Solid works استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آنالیز تجزیه واریانس میانگین داده‌های حاصل از تغییر نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی و دما بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد در جدول ۱ نمایش داده شده است. طبق جدول ۱ اثر نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی و دمای استخراجی و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان استخراج روغن در سطح یک درصد معنی‌دار شده است.

جدول ۱- تجزیه واریانس میانگین داده‌های حاصل از نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی و دمای استخراجی بر میزان استخراج روغن

Table 1- Analysis of variance of press screw type, rotational speed and extraction temperature on the amount of oil extraction

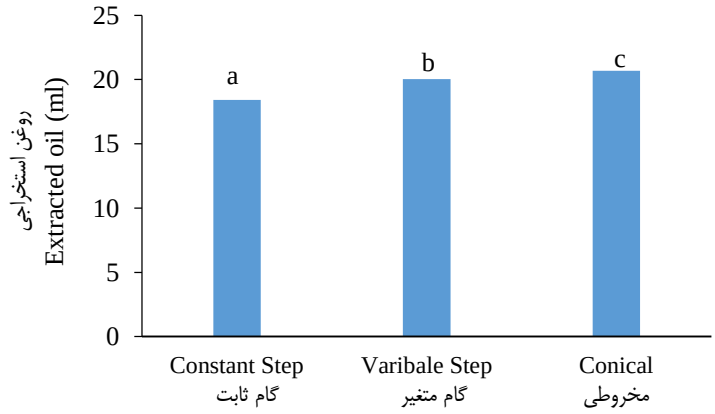
منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares
پیچ پرسی Press screw	2	36.540**
سرعت دورانی Rotational speed	2	118.244**
دمای استخراجی Extraction temperature	2	166.318**
پیچ پرسی × سرعت دورانی Press screw× Rotational speed	4	0.920**
پیچ پرسی × دمای استخراجی Press screw× Extraction temperature	4	6.663**
سرعت دورانی× دمای استخراجی Rotational speed × Extraction temperature	4	5.114**
پیچ پرسی × سرعت دورانی× دمای استخراجی Press screw× Rotational speed× Extraction temperature	8	2.283**
خطا Error	54	0.247

ns، * و** به‌ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

ns, * and **, non-significant and significant at 0.05 and 0 .01 level, respectively

اثر شکل هندسی پیچ پرسی بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی

نتایج حاصل آزمایش‌ها نشان داد که تغییر نوع هندسی پیچ پرسی بر میزان استخراج روغن در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مطابق شکل ۴ بیشترین میزان استخراج روغن مربوط به پیچ پرسی مخروطی با مقدار ۲۰/۶۸ ml و کمترین میزان استخراج مربوط به پیچ پرسی سر راست با فاصله گام ثابت (پیچ ساده) با مقدار ۱۸/۴۲ ml می‌باشد. در پیچ پرسی سر راست با فاصله گام متغیر به سبب کاهش فاصله بین گام‌ها و کاهش سطح مقطع، نیروی وارده بر دانه‌ی روغنی بیشتر شده و این امر سبب افزایش گرمای حاصل از اصطکاک دانه‌های روغنی می‌شود. این دو مزیت، افزایش فشار و افزایش گرما سبب افزایش راندمان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی می‌شود. در پیچ پرسی مخروطی نیز به دلیل کاهش فاصله بین شیارهای پیچ‌پرسی و دیواره‌ی داخلی محفظه‌ای که پیچ در آن قرار می‌گیرد، فشار و گرما افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش فشار دیواره سلولی دانه شکسته شده و روغن بیشتری آزاد می‌شود (Khan and Hanna, 1983). در پژوهشی که روی سیاه‌دانه انجام شد مشخص شد که هرچه اندازه قطر پیچ پرسی کوچک‌تر گردد، میزان فشار افزایش یافته و روغن خروجی بیشتر می‌شود (Deli *et al.*, 2011).

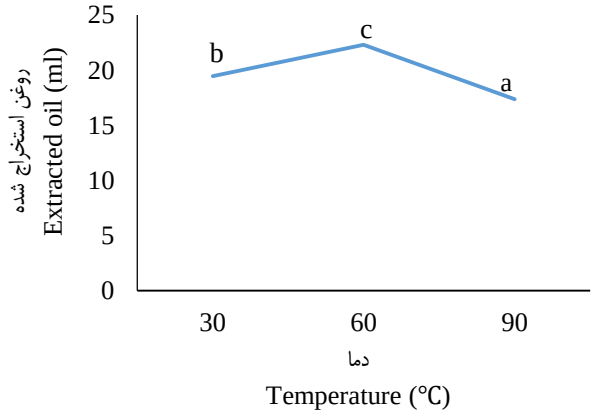


شکل ٤– اثر نوع پیچ پرسی بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی کنجد

Fig.4. The effect of press screw type on the amount of oil extracted from sesame seeds

اثر متغیر دما بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد

تجزیه واریانس میانگین داده‌های حاصل از سه سطح دمایی (°C ۳۰، ۶۰ و ۹۰) بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد نشان داد که تغییر دما تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر میزان استخراج روغن دارد (جدول ۱). مطابق شکل ۵ بیشترین میزان استخراج مربوط به سطح دمایی ۶۰°C با مقدار ۲۲/۳۱ ml و کمترین میزان مربوط به سطح دمایی ۹۰°C با مقدار ۱۷/۳۷ ml می‌باشد. در حقیقت با افزایش دما تا سطح ۶۰°C قابلیت تراکم‌پذیری در دانه‌ی روغنی افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار لازم برای استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کاهش می‌یابد. اما با افزایش دما تا سطح ۹۰°C ، به دلیل کاهش میزان رطوبت و سوخته شدن کنجاله بخشی از روغن همراه کنجاله از دستگاه خارج می‌شود و میزان روغن کاهش می‌یابد (Ogunsina *et al.*, 2008; Rostami *et al.*, 2014). در پژوهشی که روی روغن چریش[1](نیم) انجام شد نیز مشخص گردید که اگر میزان رطوبت در اثر افزایش دما، کاهش یابد، عملکرد استخراج روغن از ۳۲٪ به ۱۸ ٪ می‌رسد (Soetaredjo *et al.*, 2008).



شکل ۵– اثر دما بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی کنجد

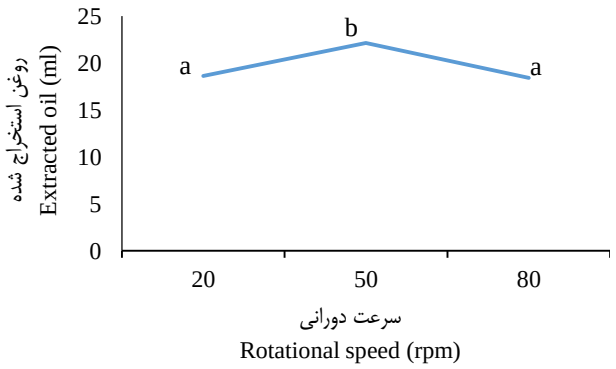
Fig.5. The effect of temperature on the amount of oil extracted from sesame seeds

اثر متغیر سرعت دورانی بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد

تجزیه واریانس میانگین داده‌های حاصل از سه سطح سرعت (۲۰، ۵۰ و ۸۰) rpm بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد نشان داد که تغییر سرعت دورانی پیچ پرسی تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر میزان استخراج روغن دارد (جدول ۱). مطابق شکل ۶ بیشترین میزان استخراج مربوط به سطح سرعت ۵۰ rpm با مقدار ml ۲۲/۱۲ و کمترین میزان مربوط به سطح سرعت ۸۰ rpm با مقدار ۱۸/۴۰ml گزارش داده شد. در حقیقت با افزایش سرعت دورانی از ۵۰

1- Neem oil

به ۸۰ rpm زمان ماندگاری مواد در داخل دستگاه روغن‌کشی کاهش پیدا کرده در نتیجه روغن شانس کمتری برای خروج و جریان یافتن از بین کنجاله‌ها را دارد و در نتیجه میزان روغن خروجی کاهش می‌یابد (Eggers *et al.*, 1985; Evangelista, 2009). از طرفی کاهش سرعت چرخش پیچ پرسی از ۸۰ به ۵۰ rpm سبب افزایش ماندگاری مواد درون سیلندر شده و این ماندگاری دانه‌های روغنی سبب افزایش فشار بین دانه‌ها و افزایش دما شود (Evangelista, 2009). این شرایط درنهایت منتهی به جریان ساده‌تر روغن و افزایش میزان آن می‌شود (Bamgboye and Adejumo, 2007). از طرفی مطابق شکل ۶ بین سرعت ۲۰ و ۸۰ از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. کاهش استخراج روغن در سرعت ۲۰ احتمالاً به دلیل آن است که نیروی برشی کافی جهت استخراج روغن از دانه‌های روغنی در این سرعت فراهم نشده است.

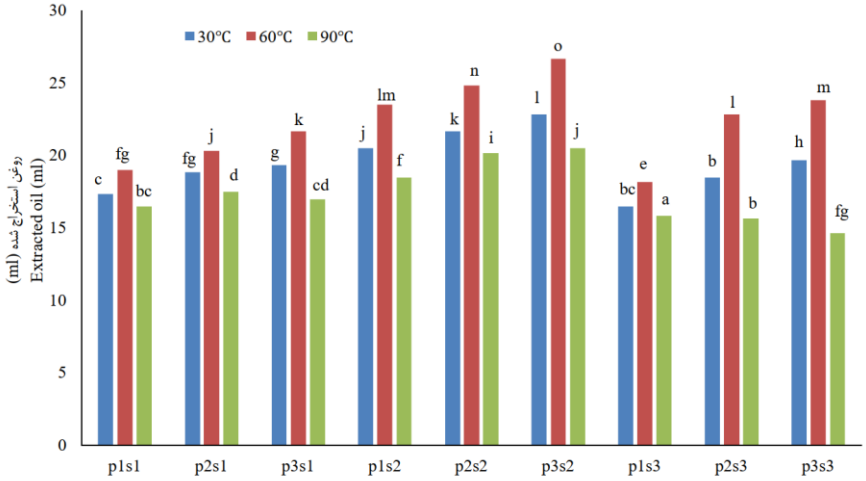


شکل ٦– اثر سرعت دورانی بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی کنجد

Fig.6. The effect of rotational speed on the amount of oil extracted from sesame seeds

اثر متقابل سه‌گانه پیچ پرسی، سرعت دورانی و دما بر میزان استخراج روغن

اثر متقابل سه‌گانه نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی و دمای استخراجی بر میزان استخراج روغن در سطح یک درصد معنی‌دار بود بر اساس نتایج به‌دست آمده بیشترین میزان استخراج روغن مربوط به پیچ پرسی مخروطی، سطح دمایی ۶۰°C و سرعت دورانی ۵۰ rpm با میزان ۲۶/۶۶ml و کمترین میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی مربوط به پیچ پرسی مخروطی، سرعت دورانی ۸۰ و دمای ۹۰ °C با میزان ۱۴/۶۶ ml به‌دست آمد (شکل ۷). از لحاظ تئوری عملکرد روغن با افزایش دما و فشار باید افزایش یابد. اما تحت شرایط معین افزایش دما می‌تواند منتهی به کاهش میزان روغن گردد (Adeeko and Ajibola, 1990; Baryeh, 2001; Hamzat and Clarke, 1993). افزایش بیش از حد دما سبب کاهش راندمان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی می‌شود. در حقیقت افزایش زیاد دمای ناشی از تغییر پیچ پرسی (پیچ مخروطی) و دمای ۹۰ درجه باعث کاهش محتوای رطوبتی دانه شده و در نهایت میزان استخراج روغن کاهش می‌یابد (Soetaredjo *et al.*, 2008). همچنین در دمای ۶۰ °C و سرعت ۵۰ rpm، به‌طور هم‌زمان تراکم‌پذیری دانه روغنی افزایش یافته و فشار لازم برای استخراج روغن کاهش می‌یابد و زمان کافی برای استخراج روغن مهیا بوده است (Bargale *et al.*, 1999). سرعت دورانی پیچ پرسی با زمان ماند مواد درون سیلندر ارتباط مستقیمی دارد به‌طوری که با کاهش سرعت دورانی، زمان ماند مواد درون سیلندر افزایش یافته و این امر سبب افزایش برخورد پیچ پرسی و دانه و خود دانه‌ها با یکدیگر می‌شود. در سرعت ۲۰ rpm به سبب افزایش زمان ماندگاری مواد درون سیلندر تعداد برخورد دانه‌های روغنی بالا رفته، در نتیجه اصطکاک بین دانه‌های روغنی افزایش یافته که این امر باعث بالا رفتن بیش از حد دما و در نتیجه باعث کاهش رطوبت موجود بین بافت‌های دانه‌ی روغنی می‌شود در نتیجه میزان استخراج پایین می‌آید. اما در سرعت دورانی ۵۰ rpm به دلیل کاهش اصطکاک زیاد دانه‌های روغنی و داشتن زمان کافی برای پرس شدن دانه‌ها راندمان استخراج افزایش می‌یابد. همچنین کاهش فاصله بین قطر داخلی پیچ پرسی و دیواره سیلندر سبب افزایش فشار شده در نتیجه میزان گرمای حاصل از اصطکاک بالا رفته و روغن بیشتری از دانه‌ی روغنی خارج می‌شود (Evangelista, 2009). در حقیقت در سرعت ۵۰ دور بر دقیقه و پیچ مخروطی دما و زمان ماند کافی برای استخراج روغن وجود دارد.



شکل ۷– اثر متقابل سه‌گانه پیچ پرسی و سرعت دورانی و دما بر میزان استخراج روغن

p_1 = پیچ ساده، p_2 = پیچ متغیر، p_3 = پیچ مخروطی و s_1 = سرعت ۲۰rpm، s_2 = ۵۰rpm، s_3 = ۸۰rpm

Fig.7. The triple interaction of press screw type, rotational speed and temperature on the amount of oil extraction from sesame seeds

p_1 = Spur gear with constant pitch s, p_2 = Cone type, p_3 = Variable pitch and s_1 = 20 rpm, s_2 = 50 rpm, s_3 = 80 rpm

نتایج شبکه عصبی و مدل‌های رگرسیونی

نتایج نشان داد از مجموع ۱۰۰۰ تکرار آموزشی در بخش آموزش شبکه، کمترین میزان خطای آموزش از تکرار ۳۶ ولی از نظر اعتبارسنجی در تکرار ۲۲ اتفاق افتاد. بنابراین تکرار ۲۲ به‌عنوان بهترین مدل آموزشی انتخاب شد. ساختار شبکه شامل تعداد نرون و پارامترهای یادگیری شبکه عصبی بهینه در جدول ۲ ارائه شده است.

مقادیر بالای ضریب همبستگی و کم RMSE گویای کارایی بالای مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی میزان روغن استخراجی از کنجد در طی فرآیند استخراج می‌باشد. شکل ۸ مقادیر واقعی داده‌های به‌دست آمده از آزمایش در مقابل مقادیر پیشگویی شده توسط مدل شبکه عصبی نشان می‌دهد.

جدول ۲– درصد ضریب همبستگی و شاخص RMSE پیش‌بینی مدل شبکه عصبی

Table 2- Correlation coefficient and RMSE index prediction of neural network model

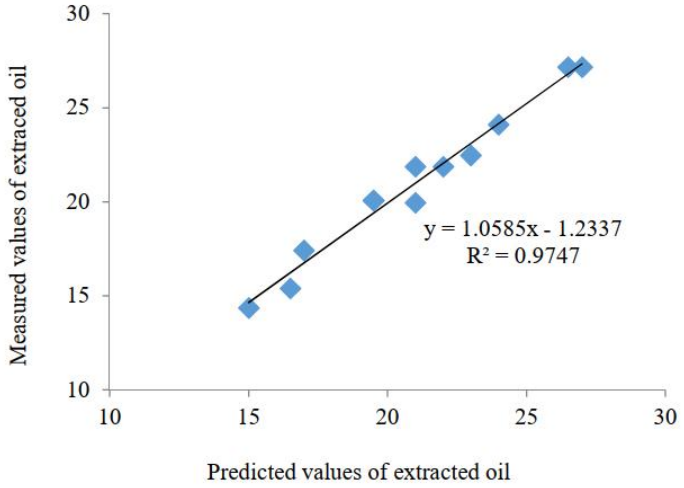
پارامتر Parameter	معماری Architecture	تابع فعال‌سازی Activation function		آموزش Training		آزمون Test	
		لایه مخفی Hidden Layer	لایه خروجی Output Layer	RMSE	R^2	RMSE	R^2
میزان روغن استخراجی Extracted oil	3-8-1	تانژانت هیپربولیک Hyperbolic tangent	خطی Linear	0.006	98.9	0.65	97.8

درصد ضریب همبستگی و شاخص RMSE پیش‌بینی مدل‌های رگرسیونی در جدول ۳ آمده است. بالاترین ضریب همبستگی در مدل رگرسیون غیرخطی درجه دوم ۸۸ درصد مشاهده شد. در حالی‌که کم‌ترین ضریب همبستگی برای پاسخ‌ها با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، ۹۷/۴۷ درصد بود. هم‌چنین مقایسه خطای محاسبه شده برای هر یک از مدل‌های رگرسیونی بیش‌تر از خطای شبکه عصبی بهینه بود. بنابراین می‌توان از شبکه عصبی مصنوعی بهینه یافته در این پژوهش در ارزیابی عوامل مؤثر بر تغییرات کمی میزان روغن استخراجی از کنجد در طی فرآیند استخراج و بهینه‌یابی شرایط آن، استفاده کرد.

جدول ۳– درصد ضریب همبستگی و شاخص RMSE پیش‌بینی مدل‌های رگرسیونی

Table 3- Correlation coefficient and RMSE index prediction of regression models

پارامتر Parameter	مدل Model			
	رگرسیون خطی Linear regression		رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم Secondary order polynomial regression	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2
میزان روغن استخراجی Extracted oil	2.77	10.22	0.98	88.00



شکل ۸– همبستگی بین خروجی واقعی و خروجی پیش‌بینی شده در بخش آزمون شبکه عصبی

Fig.8. Correlation between actual output and predicted output in the test section of neural network

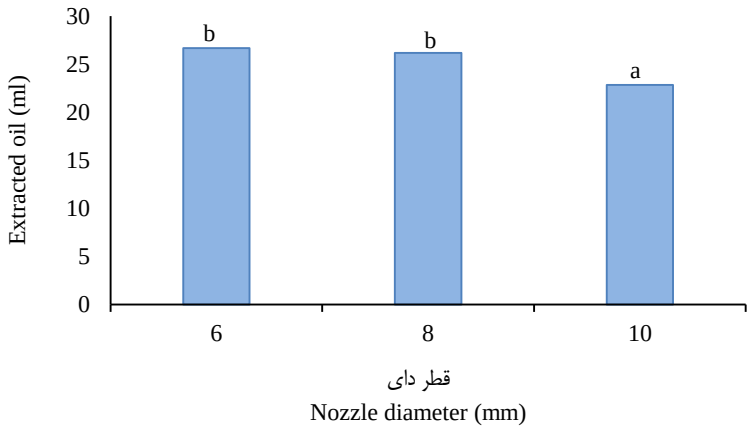
جدول ٤– آنالیز تجزیه واریانس میانگین داده‌های حاصل از تغییر قطر دای بر میزان استخراج روغن از دانه‌های روغنی

Table 4- Analysis of variance of die size changes on the amount of oil extraction

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares
قطر دای Die diameter	2	13.02**
خطا Error	6	0.250

** وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

**, significant 0 .01 level



شکل ۹– اثر قطر دای (mm) بر میزان استخراج روغن

Fig.9. The effect of die diameter (mm) on the amount of oil extraction

اثر تغییر قطر دای بر میزان استخراج روغن

نتایج حاصل از آنالیز تجزیه واریانس میانگین داده‌های حاصل از تغییر قطر دای بر میزان استخراج روغن از دانه‌های روغنی در جدول ۴ نمایش داده شده است. این آزمایش برای نشان دادن تأثیر قطر دای‌های مختلف بر میزان استخراج روغن در شرایط ثابت پیچ مخروطی، دمای ۶۰°C و سرعت دورانی ۵۰ rpm صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بالاترین میزان استخراج روغن مربوط به قطر دای ۶mm با میزان ۲۶/۶۶ ml و کمترین میزان مربوط به قطر دای ۱۰mm با مقدار ۲۲/۸۳ ml گزارش داده شد. مطابق شکل ۹ نتایج آزمایش نشان‌گر وجود اختلاف معنی‌دار در

سطح یک درصد اثر قطر دای بر میزان استخراج روغن بود. می‌توان گفت قطر دای با فرآیند فشار ارتباط دارد به عبارتی هرچه اندازه دای کوچک‌تر گردد فشار به دانه‌های روغنی افزایش می‌یابد. با افزایش فشار دمای بین دانه‌ها و بین دانه‌ها و پیچ پرسی افزایش می‌یابد که نتیجه این امر سبب بالا رفتن میزان استخراج روغن می‌شود. در پژوهشی که دلی و همکاران، انجام دادند مشخص شد با کاهش اندازه دای، میزان روغن استخراجی از دانه روغنی سیاه‌دانه افزایش می‌یابد (Deli *et al.*, 2011).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر شرایط دمایی، سرعت دورانی پیچ پرسی، نوع پیچ پرسی و اندازه دای بر میزان استخراج روغن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد تغییر نوع پیچ پرسی، سرعت دورانی و دما بر میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشند. بیشترین راندمان استخراج روغن مربوط به پیچ پرسی مخروطی، سطح دمایی ۶۰ $^{\circ}C$ و سرعت دورانی rpm ۵۰ با میزان ml ۶۶ /۲۶ و کمترین میزان استخراج روغن از دانه‌ی روغنی کنجد مربوط به پیچ پرسی مخروطی، سرعت دورانی ۸۰ و دمای ۹۰ $^{\circ}C$ با ml ۱۴/۶۶ به‌دست آمد. همچنین مشخص گردید تغییر قطر دای بر میزان استخراج روغن از دانه‌های روغنی در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. بیشترین و کمترین مقدار روغن استخراج شده به‌ترتیب ml ۲۶/۶۶ و ml ۲۲/۸۳ مربوط به قطر دای ۶mm و ۱۰mm به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با توپولوزی ۱-۸-۳ با ضریب همبستگی ۹۷/۴۷ درصد و مجذور میانگین مربعات خطای، ۰/۶۵ در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی و درجه دوم کارایی بالاتری در پیش‌بینی میزان روغن استخراجی دارد.

References

1. Adeeko, K., and O. Ajibola. 1990. Processing factors affecting yield and quality of mechanically expressed groundnut oil. Journal of Agricultural Engineering Research 45: 31-43.
2. Ajibola, O., D. Okunade, and O. Owolarafe. 2002. Oil point pressure of soybean. Journal of Food Process Engineering 25: 407-416.
3. Alyemeni, M. N., A. Basahy, and H. Sher. 2011. Physico-chemical analysis and mineral composition of some sesame seeds (*Sesamum indicum* L.) grown in the Gizan area of Saudi Arabia. Journal of Medicinal Plants Research 5: 270-274.
4. Bamgboye, A. I., and A. D. Adejumo. 2007. Development of a sunflower oil expeller. Agricultural Engineering International: CIGR EJournal. IX: 1-7
5. Bargale, P., R. Ford, F. Sosulski, D. Wulfsohn, and J. Irudayaraj. 1999. Mechanical oil expression from extruded soybean samples. Journal of the American Oil Chemists' Society 76: 223-229.
6. Baryeh, E. A. 2001. Effects of palm oil processing parameters on yield. Journal of Food Engineering 48: 1-6.
7. Biabani, A., and H. Pakniyat. 2008. Evaluation of seed yield-related characters in sesame (*Sesamum indicum* L.) using factor and path analysis. Pakistan Journal of Biological Sciences 11: 1157-1160.
8. Cert, A., W. Moreda, and M. Pérez-Camino. 2000 .Chromatographic analysis of minor constituents in vegetable oils. Journal of Chromatography A 881: 131-148.
9. Deli, S., M. Farah Masturah, Y. Tajul Aris, and W. Wan Nadiah. 2011. The Effects of physical parameters of the screw press oil expeller on oil yield from *Nigella sativa* L seeds. International Food Research Journal 18.
10. Dolatabadi, Z., A. H. E. Rad, V. Farzaneh, S. H. A. Feizabad, S. H. Estiri, and H. Bakhshabadi. 2016. Modeling of the lycopene extraction from tomato pulps. Food Chemistry 190: 968-973.
11. Eggers, R., H. Boeck, and W. Stein. 1985. Messung von Druck-und Temperaturprofilen beim Abpressen von Ölsaaten in Seiherschneckenpressen. Fette, Seifen, Anstrichmittel 87: 494-499.
12. El Khier, M. K. S., K. E. A. Ishag, and A. Yagoub. 2008. Chemical composition and oil characteristics of sesame seed cultivars grown in Sudan. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 4: 761-766.
13. Erenturk, S., and K. Erenturk. 2007. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. Journal of Food Engineering 78: 905-912.
14. Evangelista, R. L. 2009. Oil extraction from lesquerella seeds by dry extrusion and expelling. industrial crops and products 29: 189-196.
15. FAOSTAT. 2017. URL http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC.
16. Feyzollahzadeh, M., A. M. Nikbakht, and A. ModarresMotlagh 2013. Investigation of the Effects of Irrigation and Nutrient Treatments on Biophysical and Biomechanical Properties of Safflower Seed. Journal of Agricultural Machinery 3 (1): 58-70. (In Farsi).
17. Hamzat, K., and B. Clarke. 1993. Prediction of oil yield from groundnuts using the concept of quasi-equilibrium oil yield. Journal of Agricultural Engineering Research 55: 79-87.
18. Haumann, B. 1997. Mechanical extraction: capitalizing on solvent-free processing. inform 8: 165-174.
19. Hernandez-Perez, J., M. Garcıa-Alvarado, G. Trystram, and B. Heyd. 2004. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. Innovative Food Science & Emerging Technologies 5: 57-64.

20. Khan, L., and M. Hanna. 1983. Expression of oil from oilseeds-a review. Journal of Agricultural Engineering Research 28: 495-503.
21. Malek, F. 2000. Edible Fats and Vegetables Oils, Characteristic and Processing Farhang-Ghalam Press. 464 p. (In Farsi).
22. Mazaheri, A. 2006. New technology in oils and fats science. Journal of Vegetable Oil Industry 37: 12-14.
23. Ogunsina, B., O. Owolarafe, and G. Olatunde. 2008. Oil point pressure of cashew (Anacardium occidentale) kernels. International Agrophysics 22: 53.
24. Olaomi, J. 2008. Design and Construction of a Motorized Groundnut oil Expelling Machine. B. Eng Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Ilorin, Nigeria.
25. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers. 734 p.
26. Rababa'h, T. 1998. Improvement of the quality of Halawa Tahinia with special emphasis on the problem of oil separation. Master thesis, Jordan University.
27. Rostami, M., V. Farzaneh, A. Boujmehrani, M. Mohammadi, and H. Bakhshabadi. 2014. Optimizing the extraction process of sesame seed's oil using response surface method on the industrial scale. Industrial Crops and Products 58: 160-165.
28. Siger, A., and M. Nogala-Kalucka and E. Lampart-Szczapa. 2008. The content and antioxidant activity of phenolic compounds in cold-pressed plant oils. Journal of Food Lipids 15: 137-149.
29. Soetaredjo, F. E., G. Budijanto, R. Prasetyo, and N. Indraswati. 2008. Effects of pre-treatment condition on the yield and quality of neem oil obtained by mechanical pressing. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 3: 45-49.
30. Wiesenborn, D., R. Doddapaneni, K. Tostenson, and N. Kangas. 2001. Cooking indices to predict screw-press performance for crambe seed. Journal of the American Oil Chemists' Society 78: 467-471.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 325-336

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۳۶-۳۲۶

The Effect of Rotational Speed, Temperature, Type of Screw and Die Diameter on the Amount of Oil Extracted from Sesame

M. Asafi[1], R. Meamar Dastjerdi[2*], M. Noshad[3]

Received: 02-01-2019
Accepted: 16-04-2019

Introduction

In recent years, with increasing population growth and improving livelihoods, the consumption of vegetable oils has been increasing and has led to an increase in the level of oilseed cultivation. Sesame (*Sesamum indicum* L.) is an economically important crop which is widely cultivated all over the world. Sesame has been considered as an oil plant for cultivation in Iran's climatic conditions recently. Sesame contains about 58-44% oil, 18-25% protein and 13.5% carbohydrate. Sesame is grown mainly in the developing tropical and subtropical areas of Asia, Africa. The three countries of China, India and Myanmar are accounted as the largest producers of this product in the world. Screw pressing is the most reliable method for extracting oil from oilseed grains. This method is simpler than others and is more efficient in terms of cost and food security. The general objective of this research was to investigate the effects of rotational speed, temperature, type of screwing and die diameter on the amount of oil extraction from sesame oil and prediction of oil extraction using artificial neural network and compare to regression models.

Materials and Methods

In this research, a sesame oil extractor machine was designed and manufactured. Various experiments were carried out to determine the amount of oil extracted based on variable parameters such as the shape of the press screw, the rotational speed, the temperature and the diameter of the die. The experiment was performed at three levels of press screw type (constant pitch, variable pitch and conical), temperature (30, 60, 90), three levels of rotational speed (20, 50, 80 rpm) and three level of die diameter (6, 8, 10mm). The experimental design was factorial based on completely randomized design with three replications. The mathematical software (Matlab, 2012b) was used to determine the optimal neural network. The type of network was Multi-Layer Perceptron (MLP). In order to design this network, there were 3 neurons in the first layer (input), which was equal to the number of studied variable parameters (type of screw, rotational speed and temperature), the second layer was hidden layer, and the last layer (the output) had a neuron for the extracted oil) was equal to the number of outputs examined in this network. The Levenberg-Marquardt algorithm (LM) was used to train it, which is one of the fastest neural network training methods. The Second-order polynomial regressions were performed based on the step-by-step method and non-meaningful sentences were eliminated from the model. The accuracy of the models was determined by calculating the correlation coefficient and root mean square error (RMSE) indices.

Results and Discussion

The results of the experiments showed that the effect of type of press screw, rotational speed, extraction temperature and die diameter on the amount of oil extraction was significant ($p \leq 0.01$). The highest amount of extracted oil was obtained at conical press screw , rotational speed of 50 rpm, temperature of 60 °C and die diamter of 6 mm. An artificial neural network of three-layer perceptron and regression models were used to predict the amount of sesame oil extracted. The results showed that the artificial neural network model (1-8-3) with a correlation coefficient of 97.47% and a RMSE of 0.65 compared to linear regression and quadratic regression models had the higher efficiency in predicting the amount of extracted oil.

Conclusions

In this study, the effect of temperature, rotational speed, press screw type and die diameter on the amount of extracted oil were investigated. The results of this study showed that the change in the type of screw, rotational speed, diameter of die and temperature on the amount of extracted oil was significant at 1% level. Results also showed that the artificial neural network method was more efficient than linear and second order regression methods.

Keywords: Artificial neural networks, Die dimension, Extraction, Press screw, Rotational speed, Sesame oil, Temperature

1- MSc. Graduated, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
2- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
3- Assistant Professor, Department of Food Sciences, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran
(*- Corresponding Author Email: rasoul.memar@asnrukh.ac.ir)

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 337-346

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۴۶-۳۳۷

ارزیابی و انتخاب مدل پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور MF399 (مطالعه موردی: منطقه پارس‌آباد مغان)

سعید عباسی[1*]، امن اله شکری[2]، محمد غلامی پرشکوهی[3]، سید محسن سیدان[4]، علیمحمد جعفری[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶

چکیده

برنامه‌ریزی در امور زراعی بدون بودجه‌ریزی سالیانه در مورد اقلام مربوط به نهاده‌های مختلف، اثربخش نیست. در میان نهاده‌های مختلف تولید، مصرف انرژی سهم قابل‌توجهی در هزینه‌های تولیدات کشاورزی داشته و پیش‌بینی آن نیازمند ابزار علمی دقیق می‌باشد. این تحقیق با هدف ارزیابی و تعیین مدل پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل در تراکتور MF-399 در شهرستان پارس‌آباد مغان بر اساس پارامترهای زراعی و ماشینی در انجام عملیات مکانیزه گندم آبی انجام شد. در این مطالعه، میزان مصرف سوخت دیزل در واحد سطح به‌عنوان متغیر وابسته و اندازه سطح زیرکشت گندم آبی (هکتار) به‌همراه عملکرد زمانی تراکتور در انجام عملیات زراعی به‌عنوان متغیرهای مستقل در ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. پس از بررسی و آزمون دو مدل کاب داگلاس و متعالی بر اساس معیارهای آماری و اقتصادسنجی، مدل کاب- داگلاس با چهار متغیر مستقل به‌عنوان بهترین مدل به‌منظور پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل انتخاب گردید. در این مدل ضریب تبیین تعدیل شده برابر ۰/۷۶ و درصد میانگین مطلق خطا برابر ۰/۹۳ درصد تخمین زده شده است. در مدل یاد شده متغیر سطح زیرکشت دارای ضریب منفی و برابر با ۰/۰۱۲ بود، که نشان داد به‌ازای افزایش هر یک درصد در سطح زیرکشت، مصرف سوخت به میزان ۰/۰۱۲ درصد کاهش می‌یابد. زمان‌های صرف شده برای عملیات خاک‌ورزی، کاشت و داشت دارای ضریب مثبت در مصرف سوخت بود. این ضرایب نشان داد که در ازای افزایش هر یک درصد در زمان عملیات خاک‌ورزی، کاشت و داشت مصرف سوخت به‌ترتیب به میزان ۰/۶، ۰/۰۴ و ۰/۰۸ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: زمان عملیات، سطح زیرکشت، سوخت دیزل، گندم آبی، مدل کاب- داگلاس

مقدمه

به موازات پیشرفت علمی در جوامع بشری، مکانیزاسیون کشاورزی نیز از این حرکت تاثیر گرفته و لزوم استفاده از روش‌ها و ابزارهای علمی در برنامه‌ریزی‌های تولید را ضروری ساخته است. در این راستا، پیش‌بینی مصرف سوخت در تولید محصولات مختلف به چند دلیل دارای اهمیت می‌باشد؛ اول این‌که، برنامه‌ریزی تولید محصولات کشاورزی بدون بودجه‌ریزی سالیانه در مورد یکی از نهاده‌های هزینه‌بر یعنی سوخت مصرفی بی‌فایده بوده و برای این‌کار نیاز به ابزار علمی دقیق می‌باشد. دوم این‌که، با توجه به مصرف بالای سوخت دیزل در بخش کشاورزی، یافتن راهکارهای مناسب جهت کاهش مصرف سوخت ضروری بوده و این کار با داشتن یک مدل مناسب به‌صورت راحت‌تر و شفاف‌تر عملی خواهد بود.

افزایش هزینه‌ی سوخت کشاورزی باعث شده است که در مصرف آن صرفه‌جویی شود تا هزینه‌ی تولید محصول کاهش یابد.

عمادی و همکاران در طی تحقیقی در زمینه‌ی تأثیر اندازه مزرعه بر میزان انرژی مصرفی و هزینه‌های ورودی تولید بادام زمینی در استان گیلان دریافتند که زمین‌های با مساحت بزرگ‌تر از یک هکتار سوخت دیزل کمتری در واحد سطح مصرف می‌کنند (Emadi *et al.*, 2015).

در طی مطالعه‌ای که توسط مقیمی و همکاران (Moghimi *et al.*, 2013) در مورد بررسی میزان مصرف انرژی و نیز ارزیابی مدل اقتصادسنجی بین منابع مختلف انرژی مصرف شده و عملکرد گندم تولیدی در شهرستان قروه انجام شد، تابع تولید کاب- داگلاس به‌عنوان بهترین مدل برای تبیین این ارتباط شناخته شد. صفا و همکاران (Safa *et al.*, 2009) از رهیافت شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی مصرف سوخت با در نظر گرفتن متغیرهای اجتماعی، جغرافیایی و فنی موثر در تولید گندم استفاده نمودند که در بین متغیرهای مورد مطالعه، میزان اسب بخار در هکتار و اندازه قطعات مزرعه به‌ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را در میزان مصرف سوخت داشتند. استاندارد ASABE[6] (2006, 2009) به‌طور گسترده از تخمین سوخت مصرفی به‌منظور بودجه‌ریزی استفاده می‌کند. به

۱- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران
۲- بخش تولیدات زراعی، شرکت کشت و صنعت مغان، ایران
۳- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران
۴- بخش تحقیقات اقتصاد کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران
۵- بخش تحقیقات اقتصاد کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: sa.abbasi@areeo.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.73385

6- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)

طوری‌که مصرف سوخت (بر حسب گالن در ساعت) تابعی از توان پی‌تی‌او بیشترین کاربرد را دارد.

هم‌چنین گریسو و همکاران یک مدل کلی به‌منظور پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور برای حالت‌های تمام‌بار و بارهای جزئی تخمین زدند. با استفاده از این مدل، امکان پیش‌بینی و صرفه‌جویی مصرف سوخت برای مدل‌های خاص از تراکتور و نیز در شرایط متفاوت از نظر نوع عملیات زراعی و نیز بار تراکتور فراهم گردید (Grisso *et al.*, 2008).

صفا و طباطبایی‌فر (SafaTabatabaeefar, 2008) کل سوخت مصرفی را در دو سامانه کشت گندم آبی و دیم شهرستان ساوه مورد ارزیابی قرار دادند که بیشترین میزان مصرف سوخت در تولید گندم آبی برابر ۵۹۸ و ۷۴ لیتر در هکتار به‌ترتیب برای دو سامانه کشت گندم آبی و دیم بوده است که در این میان بیشترین سهم سوخت مصرفی در سامانه کشت آبی مربوط به عملیات آبیاری (۷۸/۴ درصد) و بیشترین سهم مصرف سوخت در سیستم کشت دیم به عملیات خاک‌ورزی ۵۹ درصد) اختصاص داشته است. هم‌چنین در مطالعه‌ای که توسط کاناکسی و همکاران (Canakci *et al.*, 2005) جهت ارزیابی سوخت مصرفی برای تولید گندم در منطقه آنتالیای ترکیه انجام شد، میزان کل سوخت مصرفی برابر ۶۷/۸ لیتر در هکتار برآورد شد که از این مقدار عملیات تهیه بستر با ۴۶/۵ لیتر بیشترین سهم را دارا بود؛ ضمن این‌که عملیات دیگر نظیر برداشت (۱۳/۵ لیتر)، حمل و نقل (۵/۷ لیتر)، کنترل آفات (۱ لیتر)، کوددهی (۰/۶ لیتر) و کاشت (۰/۵ لیتر) به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار داشتند.

در طی تحقیقی که در کشور هند توسط سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2002) به‌منظور بررسی میزان کل سوخت مصرفی برای سه محصول گندم، نخود سبز و ارزن صدفی انجام شد، نتایج نشان داد که برای تولید این محصولات به‌ترتیب ۵۹، ۲۲/۳ و ۲۸/۷ لیتر در هکتار سوخت گازوئیل و هم‌چنین ۲۵۱/۲، ۸۲/۷ و ۵۹/۷ کیلووات در هکتار الکتریسیته نیاز است. همت و مصدقی (HemmatMossadeghi, 2001) گزارش نمودند که به‌کارگیری روش‌های صحیح خاک‌ورزی و انتخاب مناسب ادوات زراعی ازجمله عواملی هستند که می‌توانند علاوه بر کاهش میزان سوخت مصرفی سبب آلودگی کمتر محیط‌زیست گردند

براساس نوع سوخت و مقدار زمانی که تراکتور یا ماشین برای انجام عملیات کشاورزی صرف می‌کند، هزینه‌های مربوط به سوخت و روغن‌کاری حداقل از ۱۶ درصد تا بیش از ۴۵ درصد از کل هزینه‌های ماشینی را شامل می‌شود. لذا، شاخص مصرف سوخت نقش قابل ملاحظه‌ای در انتخاب و مدیریت تراکتور و تجهیزات زراعی دارد. هم‌چنین، بیشتر مدل‌های بودجه‌ریزی از یک روش ساده برای تخمین مصرف سوخت دیزل استفاده می‌کنند لیکن، مدلی که شرایط واقعی عملیات زراعی را که به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف مدیریت ماشین‌های کشاورزی دربر داشته باشد مورد نیاز است (SiemensBowers, 1999). نتایج تحقیقات انجام شده در کشور نپال توسط شرستا (Shrestha, 1998) در دوره زمانی ۱۹۹۵-۱۹۷۰ نشان داد که سهم سوخت مصرفی ۱۷ درصد از کل انرژی مزارع این کشور را تشکیل می‌دهد.

بورین و سارتوری (BorinSartori, 1997) گزارش نمودند که متوسط انرژی ورودی در هکتار متناسب با شدت عملیات خاک‌ورزی بود. وقتی عملیات خاک‌ورزی کاهش می‌یافت، مصرف سوخت کاهش و کارایی انرژی افزایش می‌یافت. آنها گزارش نمودند که ۳۰ درصد از کل انرژی ورودی در مزرعه صرف عملیات خاک‌ورزی می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه انجام شده توسط پیمنتل و پیمنتل (PimentelPimentel, 1996) در آمریکا نیز مقدار مصرف سوخت برای تولید گندم را معادل ۷۳ لیتر در هکتار (۴۶ لیتر گازوئیل و ۲۷ لیتر بنزین) نشان داد. ایشان در تحقیق مشابه دیگری نتیجه گرفتند که ۲۵ درصد از کل انرژی مصرفی برای تولید ذرت در آمریکا مربوط به استفاده از ماشین‌ها و به موجب آن مصرف سوخت می‌باشد. بوناری و همکاران (Bonari *et al.*, 1995) در مطالعه‌ای نشان دادند که مدت انجام عملیات، مصرف سوخت، انرژی مورد نیاز و هزینه در شرایط حداقل خاک‌ورزی به میزان ۵۵ درصد کاهش می‌یابد، در حالی‌که عملکرد محصول گندم تغییر قابل‌توجهی نداشت. سایر تحقیقات نیز نشان دادند که عملیات خاک‌ورزی که به‌عنوان بخشی از عملیات زراعی جهت آماده‌سازی خاک زراعی انجام می‌شود بیشترین مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی را به خود اختصاص داده است (Pimentel *et al.*, 1973).

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در مورد پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور از مدل‌ها و روش‌های مختلفی استفاده شده است. لیکن، به چند دلیل ضرورت مطالعه حاضر قابل‌توجیه تشخیص داده شد: ۱- در هیچ‌کدام از مطالعات زمان‌های مربوط به عملیات مکانیزه به‌صورت مجزا در نظر گرفته نشده است، ۲- مدل‌ها عموماً به‌صورت کلی و بدون مطالعه بر روی یک مدل خاص از تراکتور انجام شده است. ۳- در بیشتر مدل‌های تعیین شده، به‌منظور پیش‌بینی مصرف سوخت نیاز به ابزار خاص برای اندازه‌گیری بوده که در خیلی از موارد سهولت کاربردی بودن آن‌ها به‌خصوص برای کشاورزان غیرممکن می‌باشد. لذا، با توجه به موارد گفته شده، تعیین و ارزیابی مدلی که ضمن داشتن دقت بالا، دارای پیچیدگی زیادی نباشد و صرفاً با داشتن اطلاعات موردنظر در مورد مساحت مزرعه و زمان صرف شده برای انجام عملیات مکانیزه بتواند سوخت مورد نیاز برای عملیات مکانیزه قابل انجام توسط تراکتور MF-399 را پیش‌بینی نماید، ضروری به نظر رسید. هم‌چنین، در حال حاضر برای بودجه‌ریزی سالیانه از یک روش ساده برای تخمین سوخت دیزل استفاده می‌شود که اگر بر اساس عملیات واقعی در مزرعه باشد در امر

سیاست‌گذاری کشاورزی بسیار مفید خواهد بود. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند در برنامه‌ریزی سالیانه سوخت مورد نیاز بخش کشاورزی برای تولید گندم استفاده شده و نیز به‌عنوان یک ابزار علمی برای بودجه‌ریزی سالیانه‌ی بخشی از هزینه‌های جاری مکانیزاسیون به‌کار گرفته شود. هم‌چنین، نتایج حاصل از این مدل‌سازی می‌تواند در یافتن راهکارهای مفید به‌منظور کاهش مصرف انرژی در بخش کشاورزی و حرکت به سمت کشاورزی پایدار موثر باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت موردی در شهرستان پارس‌آباد مغان واقع در شمال شهرستان استان اردبیل انجام شد. محصولات عمده مورد کشت در شهرستان پارس‌آباد مغان شامل گندم، جو، ذرت دانه‌ای، ذرت بذری، کلزا و چغندرقند می‌باشد. محصول نمونه در این مطالعه گندم آبی بوده که سطح زیرکشت آن برابر ۱۸۰۴۲ هکتار می‌باشد (Center, 2017).

در این مطالعه به‌منظور ایجاد شرایط همگن در بررسی مصرف سوخت دیزل و عدم تاثیر نوع و مدل تراکتور در آن، صرفاً مصرف سوخت دیزل توسط تراکتور MF-399 در نظر گرفته شد و زارعین نمونه نیز از بین دارندگان این نوع تراکتور نمونه‌گیری و انتخاب شدند.

روش نمونه‌گیری

انتخاب دارندگان تراکتور MF-399 شهرستان پارس‌آباد مغان با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی انجام شده است. برای این منظور از روش کوکران بر اساس رابطه (۱) استفاده گردید (Cochran, 1963):

$$n = \frac{Nz^2pq}{Nd^2 + z^2pq} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، n: تعداد نمونه، N: تعداد جامعه آماری (تعداد تراکتور MF-399 در شهرستان) که برابر ۲۱۲ دستگاه می‌باشد (Unnamed, 2013)، z: مقدار متغیر نرمال واحد استاندارد، که در سطح اطمینان ۹۵٪ برابر ۱/۹۶ می‌باشد، p: درصد زارعینی که دارای تراکتور MF-399 در شهرستان می‌باشند که در اینجا برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد، q: درصد زارعینی که فاقد تراکتور MF-399 در شهرستان هستند (q =1-p) که برابر ۰/۵ به‌دست می‌آید و d: مقدار اشتباه مجاز (که در این تحقیق برابر ۱۳ درصد در نظر گرفته شد).

به این ترتیب و با توجه به رابطه (۱) تعداد ۳۷ نمونه جهت مطالعه انتخاب گردید.

جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در این مطالعه در مورد سطح زیرکشت هریک از محصولات در قالب مصاحبه و زمان صرف شده برای انجام هریک از عملیات در هر هکتار با روش اندازه‌گیری مستقیم در مزرعه انجام شد. به طوری‌که در انجام هریک از عملیات زراعی، در شرایط واقعی که تراکتور در حال انجام عملیات بود، اقدام به نصب دو عدد میخ چوبی به فاصله ۴۰ متر نموده و زمان طی شدن حد فاصل این دو نشانگر با استفاده از تایمر اندازه‌گیری می‌شد. با مشخص بودن عرض کار دنباله‌بند، مساحت تحت عملیات محاسبه شده مشخص می‌شد.

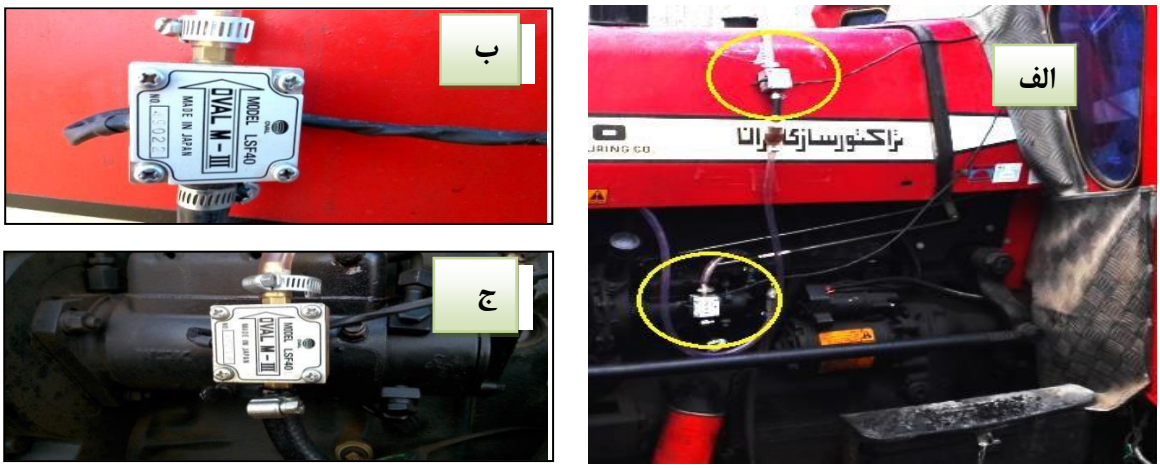
برای هریک از نمونه‌های منتخب میزان مصرف سوخت در عملیات زراعی استفاده از تراکتور (خاک‌ورزی، کاشت و داشت) از دو حسگر دبی‌سنج از نوع دنده‌بیضی با جابه‌جایی مثبت مدل (Super Micro Flow Mate Oval Model Lsf40) ساخت شرکت Oval ژاپن استفاده شد. دقت این سوخت‌سنج ۱± درصد در محدوده‌ی کاری ۵۰-۱ لیتر در ساعت است. با توجه به این‌که در موتورهای دیزلی سوخت مازاد از پمپ انژکتور به باک سوخت برمی‌گردد، از این‌رو علاوه بر حسگری که در مسیر رفت سوخت به پمپ انژکتور قرار دارد، یک دبی‌سنج نیز در مسیر برگشت سوخت تعبیه شد تا از اختلاف جریان عبوری از دو حسگر میزان مصرف سوخت محاسبه شود (شکل ۱).

تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی

در این مطالعه، به‌منظور مدل‌سازی مصرف سوخت دیزل در تولید گندم آبی از دو پارامتر سطح زیرکشت و زمان انجام عملیات مکانیزه استفاده شد. به‌طوری‌که، عملیات مکانیزه مورد نظر که توسط تراکتور قابل انجام است شامل: عملیات خاک‌ورزی، کاشت و داشت بوده و زمان انجام هریک از این عملیات در واحد سطح به همراه متغیر سطح زیرکشت گندم آبی به‌عنوان چهار متغیر مستقل در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به توضیح است با توجه به عدم به‌کارگیری تراکتور مورد نظر در عملیات برداشت گندم آبی، مصرف سوختی در این مرحله منظور نشده است.

در این مطالعه از روش رگرسیونی برای برقراری رابطه بین میزان مصرف سوخت دیزل و متغیرهای مستقل نام‌برده استفاده شد. به این منظور از بین انواع مختلف توابع، از دو مدل انعطاف‌پذیر و انعطاف‌ناپذیر استفاده شد که شامل تابع کاب داگلاس[1] و تابع متعالی (ترانسندنتال[2]) بوده و فرم تبعی این دو تابع در روابط (۲) و (۳) نشان داده شده است. دلیل انتخاب این دو تابع ساده بودن، سازگاری با منطق فیزیکی و قدرت تعمیم‌دهی آن بود. از این توابع در تحقیقات دیگری که در ایران و سایر کشورها انجام شده است نیز استفاده گردیده است (BanaeianZangeneh, 2011; Mohammadi *et al.*, 2009).

1- Cobb- Douglas
2- Transcendental



شکل ۱- الف) محل قرارگیری حسگرهای دبی‌سنج در مسیر سوخت‌رسانی، ب) حسگر نصب شده در مسیر برگشت سوخت مازاد از انژکتورها و ج) حسگر نصب شده در مسیر ورودی سوخت به پمپ انژکتور

Fig.1. (a) The location of the flow meter sensors in the refueling path; (b) the sensor mounted on the fuel return path of the injectors; and (c) the sensor mounted on the fuel inlet path to the injector pump

$$Fuel_{diesel} = \alpha . A^{\beta_1} . T_1{}^{\beta_2} . T_2^{\beta_3} . T_3^{\beta_4} \quad (۲)$$

$$LnFuel_{diesel} = Ln\alpha + \beta_1 LnA + \beta_2 lnT_1 + \beta_3 lnT_2 + \beta_4 lnT_3 + \beta_5 A + \beta_6 T_1 + \beta_7 T_2 + \beta_8 T_3 \quad (۳)$$

که در آن، $Fuel_{diesel}$: میزان مصرف سوخت دیزل (بر حسب لیتر در هکتار)، A: سطح زیرکشت گندم آبی (بر حسب هکتار)، T_1: زمان انجام عملیات خاک‌ورزی (بر حسب ساعت در هکتار)، T_2: زمان انجام عملیات کاشت (بر حسب ساعت در هکتار)، T_3: زمان انجام عملیات داشت (بر حسب ساعت در هکتار) و α و β: ضرایب مدل.

اساساً اشکال مختلف تابع تولید در واقع سطح فن‌آوری را نشان می‌دهند. لذا برای انتخاب فرم برتر از میان فرم‌های مختلف توابع باید از معیارهای اقتصادسنجی بهره گرفت. تعداد پارامترهای کمتر، سادگی تفسیر، سادگی محاسبات، برازش مناسب، قدرت تعمیم‌دهی و پیش‌بینی از جمله معیارهای است که در تعیین الگوی اقتصادسنجی مفید هستند. مطابقت و سازگاری علامت‌ها و مقادیر پارامترهای تابع از معیارهای مهم در شناسایی الگوی برتر است. علاوه بر این، مطالعات تجربی نیز راهنمای خوبی برای انتخاب الگوی برتر است. آزمون‌ها و معیارهای اقتصادسنجی مناسبی نیز وجود دارد که به انتخاب الگوی مناسب کمک می‌کند. از جمله آن‌ها می‌توان به آزمون‌های نرمال بودن جملات اخلال، ضریب تبیین، آزمون F، آزمون معنی‌دار بودن ضرایب، آزمون وایت، آزمون به‌روش پاگان و آزمون پارک اشاره کرد. محاسبات آماری در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و SPSS16 انجام شده است.

نتایج و بحث

برای مقایسه بهترین شکل تابع سوخت از آزمون‌های مقایسه‌ی فرم توابع از جمله F حداقل مربعات مقید، آزمون LR[1]، آزمون وایت، آزمون بروچ گادفری،آزمون رمزی و آزمون درصد میانگین مطلق خطا[2] استفاده شد. جدول ۱ این آماره‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین با محاسبه آماره‌های تشخیص (ضریب خوبی برازش)، نرمال بودن توزیع جملات اخلال و نیز ناهمسانی واریانس مشخص شد که هر دو فرم قابل‌قبول هستند. لذا برای انتخاب بهترین فرم تابع از میان دو مدل کاب-داگلاس و ترانسندنتال (تابع دوم به‌عنوان تابع غیرمقید و تابع اول به‌عنوان تابع مقید در نظر گرفته شد) از آزمون نسبت درست‌نمایی استفاده شده است. نتایج این آزمون ($LR=6.08^{ns}$) در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس آماره LR آماره صفر مبنی بر نبود اختلاف بین دو مدل مقید (کاب-داگلاس) و غیر مقید (متعالی) رد نمی‌شود لیکن، مدل مقید به دلیل سادگی و قدرت توضیح‌دهی بالاتر، بر مدل متعالی ارجحیت دارد. برتری مدل کاب- داگلاس بر مدل متعالی در پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل بر اساس متغیرهای سطح زیرکشت و عملکرد زمانی، تأییدی بر مطالعه مقیمی و دیگران (Moghimi *et al.*, 2013) در انتخاب مدل کاب- داگلاس در ارزیابی اقتصادسنجی بین منابع مختلف انرژی و تولید گندم می‌باشد.

بنابراین مدل کاب-داگلاس برای تحلیل انتخاب شد. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص شد، مقدار ضریب تبیین تعدیل شده در مدل کاب- داگلاس برابر با ۰/۷۹ است. این شاخص نشان می‌دهد که ۷۹ درصد تغییرات در مصرف سوخت توسط متغیرهای مستقل مورد بررسی (سطح زیرکشت گندم و عملکرد زمانی عملیات مکانیزه‌ی

1- Likelihood Ratio Test
2- Mean Absolute Percentage Eroor (MAPE)

خاک‌ورزی، کاشت و داشت) قابل تبیین است. معنی‌دار بودن مقدار F در سطح احتمال صفر درصد نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن تمام ضرایب تابع به‌طور هم‌زمان می‌باشد (ضرایب مخالف صفر هستند).

جدول ۱- آماره‌های توابع دو مدل برآورد شده کاب-داگلاس و متعالی (یافته‌های تحقیق)

Table 1- Functional statistics of two predicted Cobb-Douglas and Transcendental models

متغیر مستقل Independent variable	مدل کاب داگلاس Cobb-Douglas	مدل متعالی Transcendental model
	ضریب Coefficient	ضریب Coefficient
β_0[1]	3.71*	3.89*
lnA	-0.012**	0.008**
lnT_1	0.6*	0.101*
lnT_2	0.04*	0.4*
lnT_3	0.08**	-0.144*
A	-	0.001ns
T_1	-	0.07*
T_2	-	-0.14ns
T_3	-	0.19*

*، ** و ***: به‌ترتیب نمایان‌گر معنی‌دار بودن در سطح ۱، ۵ و ۱۰ درصد است. ns نشان‌دهنده عدم معنی‌داری است.

*,** and ***: it was significant at the 1, 5 and 10% level, respectively. ns indicates no significant.

پس از بررسی و مقایسه کلی دو مدل، بررسی معنی‌داری ضرایب نیز در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که از روش حداقل مربعات معمولی[2] به‌منظور محاسبه‌ی ضرایب مربوط به مدل‌ها استفاده شده است. ضرایب متغیرها در این مدل (کاب-داگلاس) نشان می‌دهد که در سطح یک یا پنج درصد معنی‌دار است. دو ضریب عرض از مبدأ و ضریب مربوط به متغیر زمان انجام عملیات خاک‌ورزی و عملیات کاشت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار است. ضریب مربوط به زمان انجام عملیات داشت و ضریب مربوط به سطح زیرکشت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. در فرم متعالی از ده پارامتر موجود در مدل دو پارامتر معنی‌دار نبود.

به‌منظور بررسی نرمال بودن مقادیر خطای مربوط به پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل در مدل کاب- داگلاس و نیز مقادیر مشاهده شده، نتایج مربوط در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس شکل ۲، توزیع خطای استاندارد مقادیر پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل در مدل کاب- داگلاس تقریباً به‌صورت نرمال می‌باشد.

هم‌چنین در شکل ۳ وضعیت نرمال بودن توزیع خطا به‌صورت تصویری نمایش داده شده است. براساس این تصویر توزیع مقادیر خطا در مدل کاب- داگلاس تقریباً در وضعیت نرمال قرار دارد.

1- $ß0= Ln\alpha$

2- OLS

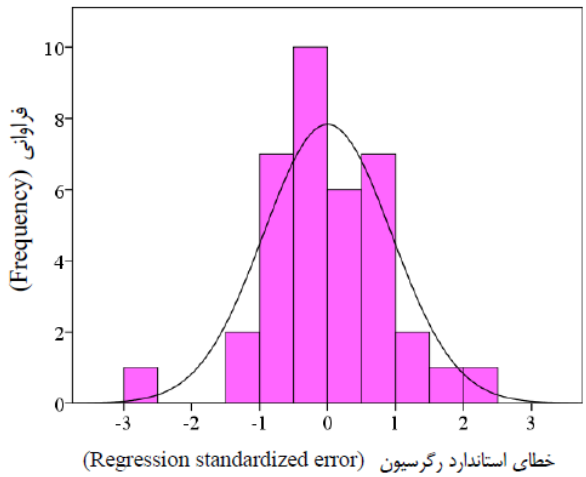
جدول ۲- ضرایب تابع مصرف سوخت به دو فرم کاب-داگلاس و متعالی

Table 2- Fuel consumption function coefficients in Cobb-Douglas and Transcendental forms

نوع مدل Model	کاب داگلاس Cobb-Douglas	متعالی Transcendental
$\bar{R}^2$	0.79	0.76
F	28.849*	17.97*
Test of Hypothesis Mean	0.004ns	0.31ns
Ramsey RESET	0.9ns	1.01ns
White	1.6ns	0.78ns
Breusch-Godfrey	0.38ns	0.09ns
Jarque-Bera	0.004ns	0.028ns
تابع درست‌نمایی LR=6.08ns	12.5	4.5
MAPE	9.86	8.2

** و * به‌ترتیب نمایان‌گر معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱، ۵ درصد. ns نشان‌دهنده‌ی عدم معنی‌داری.

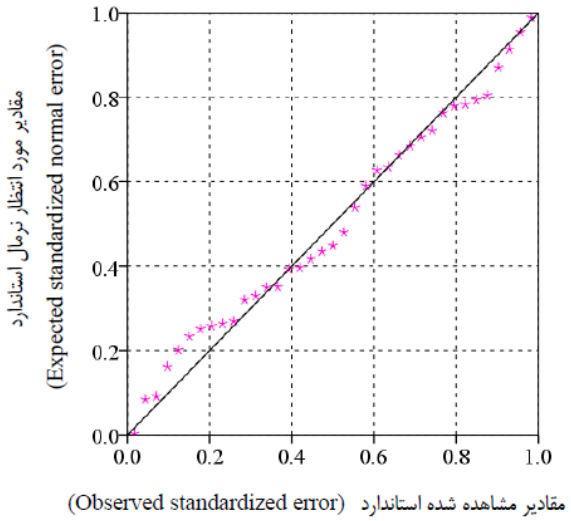
*, and **: it was significant at the 1 and 5% level, respectively. ns indicates no significant.



شکل ۲- توزیع خطای استاندارد مقادیر پیش‌بینی شده‌ی میزان سوخت مصرفی

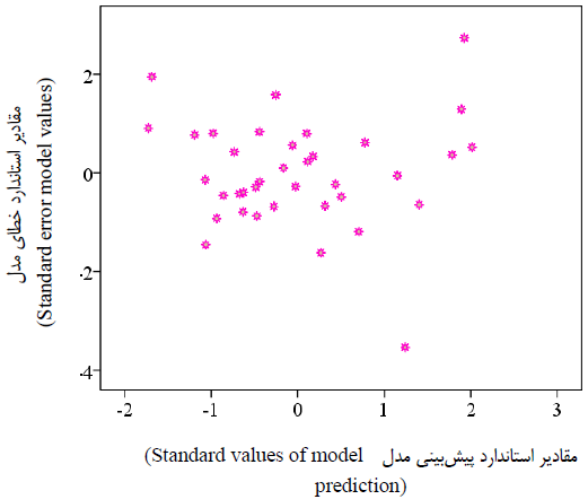
Fig.2. Distribution of Standard Error of Estimated Fuel Consumption

در شکل ۳ وضعیت استقلال خطاهای مدل کاب- داگلاس از مقادیر پیش‌بینی مصرف سوخت دیزل به‌صورت تصویری نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پراکندگی مقادیر خطا در مدل کاب- داگلاس تقریباً مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و ضمن وجود تقارن حول محور صفر (در محور افقی) منطبق با طرح خاصی نمی‌باشد. به بیان دیگر، مدل کاب- داگلاس از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر سوخت دیزل مصرفی در تکرارهای مختلف وجود نخواهد داشت.



شکل ۳- آزمون تصویری وضعیت نرمال بودن توزیع خطا

Fig.3. Visual testing status of normal error distribution



شکل ٤- آزمون تصویری وضعیت استقلال خطا در مدل پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزلی

Fig.4. Figurative independent error test in diesel fuel consumption prediction model

با توجه به شاخص‌های اقتصادسنجی و آماری، مدل کاب-داگلاس با پنج جمله و چهار متغیر مستقل، دارای توانایی قابل قبول در پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل در انجام عملیات مکانیزه گندم آبی مطابق رابطه (۴) می‌باشد:

$$Fuel_{diesel} = 40.85A^{-0.012}T_1^{0.6}T_2^{0.04}T_3^{0.08} \qquad (۴)$$

حال که بر اساس شاخص‌های آماری و اقتصادسنجی بهترین مدل برای پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل برای انجام عملیات مکانیزه گندم آبی به‌دست آمد، لازم است که ماهیت استفاده از این مدل روشن‌تر شده و میزان تغییرات مصرف سوخت در ازای تغییرات مربوط به هریک از پارامترهای زراعی و ماشینی مشخص شود تا این‌که بتوان از مدل به‌دست آمده که به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در حوزه مکانیزاسیون کشاورزی محسوب می‌شود، علاوه بر پیش‌بینی میزان سوخت مورد نیاز، بتوان تمهیدات و راه‌کارهای مناسب در جهت کاهش میزان مصرف سوخت اتخاذ نمود.

در مدل کاب-داگلاس ضرایب دارای نقش کشش[1] می‌باشند. بدین معنی که با تغییر یک درصد در متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که چند درصد میزان مصرف سوخت تغییر می‌کنند. بر اساس مدل تخمین زده شده (رابطه ۲)، مشخص است که افزایش سطح زیرکشت دارای کشش منفی در میزان مصرف سوخت دیزل دارد که البته این تاثیر بسیار اندک می‌باشد. به‌طوری‌که، در ازای افزایش هر ۱ درصد در مقدار سطح زیرکشت، میزان مصرف سوخت دیزل به میزان ۰/۰۱۲ درصد کاهش می‌یابد. این نتیجه با ماهیت انجام عملیات مکانیزه سازگار می‌باشد. چرا که در شرایط یکسان و صرفاً با افزایش سطح زیرکشت، تعداد دفعات دور زدن‌ها کاهش یافته و متناسب با آن، زمان‌های غیرمفید انجام عملیات و در نهایت میزان مصرف سوخت کاهش می‌یابد. این نتیجه تأییدی بر نتایج به‌دست آمده از تحقیق صفا و دیگران (Safa *et al.*, 2009) است.

هم‌چنین بر اساس مدل تخمین زده شده، مدت زمان انجام عملیات خاک‌ورزی دارای کشش مثبت در میزان مصرف سوخت دیزل و در بین سایر متغیرهای مدل، بالاترین کشش را دارد. به طوری‌که، در ازای کاهش ۱ درصد در مدت زمان انجام عملیات خاک‌ورزی، ۰/۶ درصد مصرف سوخت دیزل کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج حاصل از مطالعات انجام یافته توسط بورین و سارتوری، کاناکسی و همکاران، همت و مصدقی، پیمنتل و همکاران و صفا و طباطبایی‌فر (BorinSartori, 1997; Canakci *et al.*, 2005; HemmatMossadeghi, 2001; Pimentel *et al.*, 1973; SafaTabatabaeefar, 2008) هم‌سو می‌باشد. لازم به ذکر است که متوسط زمان لازم برای عملیات خاک‌ورزی ۳۸۷/۶ دقیقه در هکتار است که در صورت کاهش یک درصد این زمان (۳/۹ دقیقه) به میزان ۰/۳۳ لیتر در هکتار در مصرف سوخت صرفه‌جویی خواهد شد. بدین‌ترتیب ارزش میزان گازوئیل صرفه‌جویی شده حدوداً ۹۹۰ ریال در هکتار و به اندازه ۶/۷ درصد ارزش هر کیلوگرم از گندم تولید شده خواهد شد. بنابراین در صورت کاهش زمان عملیات در سطح کلان کشور رقم قابل‌توجهی هزینه صرفه‌جویی خواهد شد. لذا ضروری است مدیران مزرعه مدیریت زمان را در انجام عملیات خاک‌ورزی جدی گرفته و در جهت کاهش این زمان تلاش کنند.

بر اساس مدل تخمین زده شده، مدت زمان انجام عملیات کاشت نیز دارای کشش مثبت در میزان مصرف سوخت دیزل دارد.

1- Elasticity

به‌طوری‌که، در ازای کاهش ۱ درصد در مدت زمان انجام عملیات کاشت، به میزان ۰/۰۴ درصد مصرف سوخت دیزل کاهش می‌یابد. البته مشخص است که میزان تاثیر افزایش مدت زمان انجام عملیات کاشت در افزایش مصرف سوخت کمتر از مقدار مربوطه در عملیات خاک‌ورزی می‌باشد. لازم به ذکر است که متوسط زمان لازم برای عملیات کاشت ۱۴۸/۲ دقیقه در هکتار است که در صورت کاهش یک درصد این زمان (۱/۵ دقیقه) به میزان ۰/۰۰۸ لیتر در هکتار در مصرف سوخت صرفه‌جویی خواهد شد. بدین‌ترتیب ارزش میزان گازوئیل صرفه‌جویی شده حدوداً ۲۴ ریال در هکتار و به اندازه ۰/۲ درصد ارزش هر کیلوگرم از گندم تولید شده خواهد شد.

مدت زمان انجام عملیات داشت نیز دارای کشش مثبت در میزان مصرف سوخت دیزل می‌باشد. به‌طوری‌که، در ازای کاهش هر ۱ درصد در مدت زمان انجام عملیات داشت، به میزان ۰/۰۸ درصد مصرف سوخت دیزل کاهش می‌یابد. در اینجا نیز مشخص است که تاثیر مدت زمان انجام عملیات داشت در مصرف سوخت در مقایسه با عملیات خاک‌ورزی کمتر است. لازم به ذکر است که متوسط زمان لازم برای عملیات داشت ۷۱/۴ دقیقه در هکتار است، که در صورت کاهش یک درصد این زمان (۰/۷ دقیقه) به میزان ۰/۰۰۵ لیتر در هکتار در مصرف سوخت صرفه‌جویی خواهد شد. بدین‌ترتیب ارزش میزان گازوئیل صرفه‌جویی شده حدوداً ۱۵ ریال در هکتار و به اندازه ۰/۱ درصد ارزش هر کیلوگرم از گندم تولید شده خواهد شد.

نتیجه‌گیری

اهم نتایج به‌دست آمده و پیشنهادهای مورد نظر در این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

۱- استفاده از مدل کاب- داگلاس با پنج جمله و چهار متغیر مستقل شامل؛ سطح زیرکشت، زمان عملیات خاک‌ورزی، زمان عملیات کاشت و زمان عملیات داشت به‌منظور پیش‌بینی میزان مصرف سوخت دیزل برای تولید گندم آبی نتایج قابل قبول و معنی‌داری ارائه داد و به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی‌کننده با پیچیدگی کم و لیکن با دقت بالا، می‌تواند به راحتی در بودجه‌ریزی سالیانه تولید گندم آبی مورد استفاده قرار گیرد. شکل ریاضی مدل به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Fuel_{diesel} = 40.85A^{-0.012}\mathrm{T}_1^{0.6}T_2^{0.04}T_3^{0.08}$$

۲- در بین عملیات مکانیزه‌ی گندم آبی، افزایش مدت زمان عملیات خاک‌ورزی بیشترین تاثیر را در افزایش شدت مصرف سوخت دیزلی داشته و عملیات داشت و کاشت به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. به‌طوری‌که در صورت کاهش یک درصد در زمان عملیات خاک‌ورزی (۳/۹ دقیقه) به میزان ۰/۳۳ لیتر در هکتار در مصرف سوخت صرفه‌جویی خواهد شد. بدین‌ترتیب ارزش میزان گازوئیل صرفه‌جویی شده حدوداً ۹۹۰ ریال در هکتار و به اندازه ۶/۷ درصد ارزش هر کیلوگرم از گندم تولید شده خواهد شد. لذا ضروری است مدیران مزرعه مدیریت زمان را در انجام عملیات زراعی به‌خصوص در مرحله خاک‌ورزی جدی گرفته و در جهت کاهش این زمان تلاش کنند.

سپاسگزاری

به این وسیله، از همکاری کشاورزان شهرستان مغان در انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

1- Banaeian, N. and M. Zangeneh. 2011. Modeling Energy Flow and Economic Analysis for walnut production in Iran. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology: 3:194-201.
2- Bonari, E. and M. Mazzoncini and A. Peruzzi. 1995. Effect of conservation and minimum tillage on winter oilseed rape in a sand soil. Soil and Tillage Research 33: 91-108.
3- Borin, M. and L. Sartori. 1997. Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. Soil and Tillage Research 40(3-4): 209-226.
4- Canakci, M., M. Topakci, I. Akinci and A. Ozmerzi. 2005. Energy use pattern of some field crops and vegetable production: Case study for Antalya Region , Turkey. Energy Conversion and management 46: 655-666.
5- Center, I. S. 2017. Results of the census in 2011, revised in May 2013. Iran Statistics Center: Iran Statistics Center. Report no.
6- Cochran, W. G. 1963. Sampling Techniques, 2nd Ed., New York: John Wiley and Sons, Inc.
7- Emadi, B., A. Nikkhah, M. Khojasteh Poor and S. H. Peyman. 2015. Effect of farm size on energy consumption and input costs for pinut production in Gillan province. Journal of Agricultural Machinery 5(1): 217-228.
8- Grisso, R. D. and D. H. Vaughan and G. T. Roberson. 2008. Fuel prediction for specific tractor models. Applied Engineering in Agriculture 24(4) 423-428.
9- Hemmat, A. and M. R. Mossadeghi. 2001. Tillage for production in low rainfall area. Author Godwin, R. G. Published research organization, education and agricultural extension.
10- Moghimi, M. R., B. Mohammadi Alasti, M. A. Hadad Drafsh, M. Abasgholipor ghadim and M. Taki. 2013. Energy consumption and assessment of econometric model between input and output for wheat production in Gorve country, Kordestan Province of Iran. International Journal of Agriculture and Crop Sciences 5(20): 2342-2348.

11- Mohammadi, A., S. Rafiee, S. S. Mohtasebi, H. Rafiee and . 2009. Energy inputs-yield relationship and cost analysis of kiwifruit production in Iran. Renewable Energy 35: 1071-1075.
12- Pimentel, D. and M. Pimentel. 1996. Food, Energy and Society. Pages 400. Niwet: Colorado Press, Taylor & Francis.
13- Pimentel, D., L. E. Hurd, A. C. Bellotti, M. J. Forster, I. N. Oka, O. D. Sholes and R. J. Whitman. 1973. Food production and the energy crisis. Science 182: 443-449.
14- Safa, M. and A. Tabatabaeefar. 2008. Fuel Consumption in Wheat Production in Irrigated and Dry Land Farming. World Journal of Agricultural Sciences 4(1): 86-90.
15- Safa, M. and S. Samarasinghe and M. Mohsen. 2009. Modeling fuel consumption in wheat production using neural networks. in 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns. Australia
16- Shrestha, B. L. 1998. Energy analysis in selected crop in Nepal.
17- Siemens, J. C. and W. W. Bowers. 1999. Machinery management: How to select machinery to fit the real needs of farm managers. John Deere Publishing. East Moline.
18- Singh, H. and D. Mishra and N. M. Nahar. 2002. Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India, part I. Energy Conversion and Management 43: 2275-2286.
19- Unnamed. 2013. Census results of 2011. . Iran Statistical Center. (In Farsi).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 337-346

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۴۶-۳۳۷

Estimation and Selection of Fuel Consumption Forecasting Model for MF399 Tractor (Case study: Pars Abad Region of Moghan)

S. Abbasi[1*], A. Shokri[2], M. Gholami parshokohi[3], S. M. Seyedan[4], A. Jafari[5]

Received: 09-06-2018
Accepted: 15-04-2019

Introduction: Considering the high consumption of diesel fuel in the agricultural sector, it is necessary to find solutions to reduce its consumption, and it will be feasible to have a convenient mathematical model more easily and transparently.

Fuel and lubrication costs range from at least 16% to more than 45% of total machine costs, depending on the type of fuel and the amount of time that the tractor or the machine carries out for agricultural operations. Therefore, the fuel consumption index has a significant role in the selection and management of tractors and agricultural equipment. Most budgeting models also use a simple method to estimate the consumption of diesel fuel, but it is needed a model that describes the real conditions of agronomic operations used to compare agricultural machinery management policies.

Materials and Methods: This case study was conducted in Parsabad city of Moghan, the northernmost province of Ardabil province. The main agricultural products in Pars-Abad Moghan include wheat, maize, maize, canola and sugar beet. The product of this study was irrigated wheat with a crop area of 18042 hectares.

In this study, in order to create homogeneous conditions in the study of diesel fuel consumption and the ineffectiveness of the type and model of tractor in it, only diesel fuel consumption was considered by the tractor MF-399. Selection of sample farmers was also carried out among owners of this type of tractor. Selection of owners of tractor MF-399 in Pars-Abad Moghan city was done by random sampling method. For this purpose, Cochran formula was used.

Two-way flexible and non-flexible models have been used to predict the diesel fuel consumption. The model used includes the Cobb-Douglas function and transcendental function. Statistical calculations in this study were performed using Excel software and SPSS16 software.

Results and Discussion: For comparing the best form of the fuel function, the test formulas for the comparison of the form of functions such as bounded least squared F, LR test, White test, Breusch-Godfrey test and Rigorous test were used. Diagnostic statisticians (well-fitting coefficient), the normal distribution of distorted sentences, and the heterogeneity of variance showed that both forms were acceptable. Based on the LR statistic, zero statistics did not rule out the discrepancy between the two coherent models (Cobb-Douglas) and non-dominant (transcendent), but the coherent model was preferable to be the transcendental model because of its simplicity and power of explanation.

According to the estimated model, the duration of soil tillage operations had a positive stretch in diesel fuel consumption and, among other variables, had the highest elongation. It should be noted that the average time required for tillage operations was 387.6 min ha^{-1}, which will save 0.31 L ha^{-1}, if one percent of this time (3.9 minutes) is reduced. Thus, the value of the amount of gasoline saved will be about 990 Rials per hectare and equal to 7.7 percent of the value of one kilogram of wheat. Therefore, if the operating time is reduced at the macro level of the country, a significant amount of cost will be saved. Therefore, it is imperative that farm managers take time management in serious soil tillage operations and try to reduce this time.

So that, in exchange for an increase of 1% over the duration of the tillage, a fuel consumption of 0.6% would be increased. It is also clear that an increase of 0.6% in fuel consumption for tillage operations is significant, indicating the fact that farm managers have made the need for time management, especially in the tillage operations, to reduce this time. According to the estimated model, the duration of the planting operation also had a positive stretch in the consumption of diesel fuel. So that, in exchange for an increase of 1% over the duration of the planting operation, a fuel consumption of 0.04% would be increased.

1- Research division of Agricultural Engineering, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Hamedan Province, Research Institute of Agricultural Engineering, Agricultural Research, Education & Extension Organization, Iran
2- Crop Production Department, Moghan Agro-Industry Co., Iran
3- Department of Biosystems Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran
4 and 5- Research division of Agricultural Economic and Humanity, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Hamedan Province, Agricultural Research, Education & Extension Organization, Iran
(*- Corresponding Author Email: sa.abbasi@areo.ir)

Conclusions: Use of the Cobb-Douglas model with five sentences and four independent variables including cropping area, soil tillage operation time, planting time and weeding operation time in order to predict the amount of diesel fuel used to produce wheat, had acceptable results and as a predictive model with low complexity but with high precision, can be easily used in annual budgeting for the production of wheat.

Keywords: Cobb-Douglas model, Diesel fuel, Farm size, Irrigation wheat, Operation time

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 347-359

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۵۹-۳۴۷

بررسی اثر بلند مدت استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر کارایی عملیاتی و روند نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر با استفاده از سری‌های زمانی

فاطمه افشارنیا[۱*]، افشین مرزبان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵

چکیده

کارکرد مطلوب و نگهداری سیستم‌های مهندسی ارتباط تنگاتنگی با پیش‌بینی دقیق خرابی‌های آن‌ها دارد. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در بهبود قابلیت اطمینان، دوره عمر مفید و کارایی تجهیزات نقش اساسی ایفا می‌کند. استفاده از روش‌های بازرسی دوره‌ای منظم و سرویس‌دهی، منجر به بهبود راندمان نگهداشت و نهایتاً موجب کاهش هزینه‌های آن می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی روند نرخ خرابی و کارایی ماشین برداشت نیشکر در طی یک دوره ۶ ساله و پیش‌بینی آن در شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان بود. برای این منظور الگوهای سری زمانی ARIMA برآورد و بهترین الگو انتخاب گردید. طبق نتایج نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۰، ۷۳/۲۳ درصد کاهش داشته است. کارایی عملیاتی ماشین برداشت نیشکر نیز در همین مدت، ۱۴/۹ درصد افزایش داشته است. زیر سیستم‌های تاپر، برق و موتور به‌ترتیب با ۹۴/۷۵، ۸۰/۴۶ و ۵۸/۷۴ درصد کاهش خرابی‌ها در سال ششم نسبت به سال اوّل بیشترین تأثیرپذیری را از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نشان دادند. بر اساس نتایج حاصل از پیش‌بینی متغیر نرخ خرابی مشخص شد که تفاوت چندانی در روند نرخ خرابی پیش‌بینی‌شده و نرخ خرابی واقعی ماشین برداشت نیشکر وجود ندارد که این امر بیانگر دقت بالای پیش‌بینی با استفاده از مدل ARIMA می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ARIMA، پیش‌بینی، کارایی، ماشین برداشت نیشکر، نرخ خرابی

مقدمه

نگهداری و تعمیرات یکی از بخش‌های بسیار مهم در افزایش بهره‌وری و اثربخشی (Karbasi *et al.*, 2011) ناوگان مکانیزه تولید کشاورزی است. یک سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب باید بتواند متناسب با هدف انجام به‌موقع عملیات کشاورزی را تضمین کند. برداشت نیشکر به‌عنوان یک عملیات استراتژیک، نیازمند بهره‌گیری از مدیریت مکانیزاسیون در سطح منطقه می‌باشد. اگر محصول خیلی زود یا خیلی دیر برداشت شود، ممکن است به‌علت کاهش درصد قند استحصالی، درآمد حاصله کاهش پیدا کند. طول دوره برداشت نیشکر در شرایط خوزستان بسته به وضعیت جوی بین ۴ تا ۶ ماه می‌باشد. اغلب به‌علت مصادف شدن فصل برداشت (پاییز و زمستان) با بارندگی و شرایط نامناسب رطوبت مزرعه، عملیات برداشت به‌موقع انجام نمی‌گیرد و به تعویق می‌افتد، در نتیجه میزان درجه خلوص و درصد قند محصول کاهش می‌یابد؛ تأخیر در برداشت نیشکر و کشیده شدن برداشت تا اردیبهشت ماه می‌تواند به میزان ۳۰-۲۰ درصد استحصال شکر را کاهش دهد (Monjezi *et al.*, 2017). به‌همین دلیل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، کاهش زمان ازکارافتادگی و تعمیرات هرچه بیشتر تجهیزات برداشت نیشکر، دارای اهمیت فراوانی است. از کار افتادن دستگاه‌ها و سیستم‌ها موجب ایجاد اختلال در سطوح مختلف تولیدی و پشتیبانی می‌شود و می‌تواند به‌عنوان تهدیدی جدی در جهت افزایش هزینه‌های تولید تلقی شود (Vafaei *et al.*, 2010). نگهداری عبارت است از مجموعه فعالیت‌هایی که به‌طور مشخص و معمولاً به‌صورت برنامه‌ریزی شده با هدف جلوگیری از خرابی ناگهانی ماشین‌آلات، تجهیزات و تأسیسات انجام می‌گیرد تا قابلیت اطمینان و در دسترس بودن آن‌ها افزایش یابد (Rasekhi and Shamsi, 2010). سیاست‌های نگهداری شامل دو دسته تعمیرات اصلاحی[۳] و نگهداری پیشگیرانه[۴] است. در سیاست اصلاحی، تعمیرات پس از شکستگی یا وقوع آشکار یک خرابی انجام می‌شود. در سیاست پیشگیرانه، نگهداری جهت جلوگیری از وقوع شکستگی قطعات اجرا می‌شود. سیاست نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان، برنامه‌های نگهداری بر پایه زمان را جهت قطعات تعویضی اعمال می‌کند (Amari and McLaughlin, 2006) که شامل برنامه روانکاری، بررسی‌ها و تنظیم‌های روزانه می‌باشد (Wireman, 2005). در هر

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
۲ دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: phd.afsharnia@asnrukh.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.70962

3- Corrective maintenance
4- Preventive maintenance

نوع برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات می‌بایست به این واقعیت توجه داشت که خرابی و ازکارافتادگی ماشین‌ها مسئله‌ای نیست که بتوان به‌طور مطلق از آن جلوگیری و ممانعت نمود، بلکه می‌توان با استفاده از فنون برنامه‌ریزی، قابلیت اطمینان و قابلیت بهره‌برداری از ماشین‌ها را بهبود بخشید (Shirmohammadi, 2002). پیش‌بینی خرابی ماشین‌ها، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های سربار فرآیندهای تولید دارد (Atashkar and Saravani, 2016)؛ بنابراین کاربرد ابزارهای پیش‌بینی‌کننده دقیق ضروری به نظر می‌رسد. تکنیک‌های رگرسیونی اولین بار توسط انجمن مهندسان کشاورزی امریکا برای پیش‌بینی هزینه‌های تعمیر و نگهداری استفاده شدند (Bowers and Hunt, 1970; Sabir *et al.*, 1990) که پس از آن در مطالعات زیادی از این تکنیک برای پیش‌بینی هزینه‌ها استفاده شد (Vafaee *et al.*, 2008; Morris, 1988; Almasi and Yaganeh, 2002; Rasekhi and Shamsi, 2010). اما Rohani *et al.* (2009) جهت پیش‌بینی هزینه‌های تعمیر و نگهداری تراکتور دو چرخ محرک از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که مدل بهینه شبکه عصبی در مقایسه با رگرسیون دارای متوسط قدر مطلق درصد خطا و ریشه متوسط مربعات خطای کمتری می‌باشد. در پژوهشی دیگر نیز، این هزینه‌ها را به کمک شبکه عصبی RBF[1] پیش‌بینی کرد (Rohani, 2013). در ارزیابی نرخ‌های خرابی، تابع نمایی[2] رایج‌ترین تابع به‌شمار می‌آید (Say and Sumer, 2011). Afsharnia *et al.* (2014) این تکنیک را جهت پیش‌بینی میزان خرابی تراکتورها به‌کار بردند و نرخ خرابی چهار مدل تراکتور را با استفاده از تابع نمایی ارزیابی کردند. اما علاوه بر رگرسیون، سری زمانی نیز شاخه‌ای از علم آمار است که با استفاده از اطلاعات گذشته متغیرها امکان پیش‌بینی مقادیر آینده را می‌دهد که این یک فاکتور کلیدی در برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و مدیریت سیستم‌ها است (Pinches, 1970). سری زمانی یک الگوی قوی دوره‌ای دارد که می‌تواند مدل‌سازی کرده و طبق آن پیش‌بینی کند (García *et al.*, 2010). García *et al.* (2010) روش‌های سری زمانی را برای پیش‌بینی و تشخیص عیب به‌کار بردند. Amin *et al.* (2013) نیز از مدل آریما سری‌های زمانی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان نرم‌افزار استفاده کردند.

در ماشین برداشت نیشکر زیرسیستم‌ها تعمیرپذیر هستند؛ بنابراین، با استفاده از سیستم و همچنین افزایش عمر آن، قابلیت اطمینان سیستم کاهش و نرخ خرابی افزایش خواهد یافت (Najafi *et al.*, 2014). در نتیجه، لازم است در امر نگهداری و تعمیرات با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های پیشرفته، سرمایه‌گذاری‌های لازم صورت پذیرد تا بتوان حداکثر بهره‌وری از سرمایه‌های هزینه شده در خرید ماشین‌ها را به‌عمل آورد (Khodabakhshian and Shakeri, 2011). روش‌های بهینه‌سازی طول عمر[3]، دوام تجهیزات تحت نگهداری پیشگیرانه را به اندازه ۴۰-۳۰ درصد نسبت به آن‌هایی که تحت نگهداری ضعیفند، افزایش می‌دهد (Wireman, 2005). این پژوهش جهت بررسی دقیق اثر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر نرخ خرابی و کارایی عملیاتی ماشین برداشت نیشکر صورت پذیرفت تا مؤثر بودن این استراتژی نگهداری بر کاهش توقفات از طریق مطالعه در روندی چند ساله و پیش‌بینی آینده نرخ خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی ۳۰ دستگاه ماشین برداشت نیشکر از نوع استافت مدل ۷۰۰۰ با ۱۴ سال کارکرد از شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان انجام شد. اطلاعات مربوط به کارکرد هر دستگاه دروگر در مدت زمان ۶ سال زراعی از ۱۳۹۱-۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۵ که تحت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بودند، جمع‌آوری گردید. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در این شرکت شامل کلیه برنامه‌های بازرسی فنی، برنامه‌های روانکاری، عیب‌یابی و رفع عیب، تعمیر برنامه‌ریزی شده، تعویض قطعه، تعمیر اضطراری و تعمیرات اساسی برای هر دستگاه ماشین برداشت نیشکر می‌باشد. این راهبرد نگهداری و تعمیرات بر پایه زمان استوار است و در آن براساس دوره‌های زمانی از پیش تعریف شده، دستگاه از عملیات برداشت خارج و مورد بازرسی قرار می‌گیرد. بر اساس بازرسی صورت پذیرفته تعمیرات لازم انجام و دستگاه دوباره به عملیات زراعی برمی‌گردد. بنابراین براساس این راهبرد، تعویض قطعات، بازسازی و تعمیر اساسی دستگاه در دوره زمانی قطعی بوده و صرف‌نظر از شرایط کارکردی آن، در زمان مقرر عملیات لازم بر روی آن انجام می‌شود. عمده‌ترین اطلاعات جمع‌آوری شده ساعت‌های استفاده سالیانه از دستگاه، تعداد خرابی سیستم‌های مختلف هر دستگاه و کارکرد بر حسب ساعت در دوره‌های زمانی مشخص را شامل می‌گردید. کلیه ماشین‌های برداشت مورد بررسی دارای شرایط نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، سن و کاربری مشابهی بودند. برای اندازه‌گیری نرخ خرابی از رابطه (۱) استفاده شده است (Shirmohammadi, 2002; Afsharnia, 2017):

$$\mathrm{MTBF} = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{n}} \qquad (۱)$$

$$\mathrm{L} = \frac{1}{\mathrm{MTBF}}$$

1- Radial Basis Function Neural Network
2- Exponential
3- Life time optimization

در اینجا MTBF[1] متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی، L نرخ خرابی، T کل زمان سیکل (ساعت) و n تعداد خرابی‌ها در یک سیکل زمانی می‌باشد.

شاخص کارایی عملیاتی (رابطه ۲) نسبت مقدار کارکرد مفید تجهیزات به مقدار برنامه‌ریزی‌شده در طول یک دوره کاری تعریف می‌شود و کلیه توقفات از ساعت کارکرد در دسترس کسر شده و تنها خالص کارکرد دستگاه مدنظر قرار می‌گیرد (Hansen, 2008).

$$AOE = \frac{T_a}{T_i} \qquad (۲)$$

در اینجا T_a توان عملیاتی واقعی، T_i توان عملیاتی برنامه‌ریزی شده و AOE[2] کارایی عملیاتی خالص است.

برای تعیین قابلیت دسترس‌پذیری از رابطه (۳) که بیانگر قابلیت دسترس‌پذیری ذاتی (مکانیکی) است، استفاده شد (Hall and Daneshmend, 2010):

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \qquad (۳)$$

در اینجا MTBF میانگین زمان بین خرابی‌های ماشین، MTTR میانگین زمان تعمیرات و A قابلیت دسترس‌پذیری است.

مدل‌های به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق شامل مدل سری زمانی (ARIMA) بود. مدل فرآیند یا الگوی خود توضیح میانگین متحرک (ARIMA) از تلفیق فرآیندهای خودتوضیح و میانگین متحرک به‌وجود می‌آید و به‌صورت رابطه (۴) قابل نمایش می‌باشد (Box *et al.*, 2014):

$$\begin{aligned}[1-\varphi_1(B)-\varphi_2(B)^2-\cdots-\varphi_P(B)^P]\times L_t &= c \\ &+ [1-\theta_1(B)-\theta_2(B)^2-\cdots \\ &-\theta_q(B)^q]\times e_t\end{aligned} \qquad (۴)$$

که در این رابطه، φ_i: نشان‌دهنده پارامتر مدل اتورگرسیو و θ_i: نشان‌دهنده پارامتر مدل میانگین متحرک، p: مرتبه مربوط به مدل اتورگرسیو، q: مرتبه مربوط به مدل میانگین متحرک، c: مقدار ثابت، e_t: خطا در زمان t، B: عامل عقب رونده و L_t: مقدار سری زمانی نرخ خرابی در زمان t (بر حسب ساعت) است.

در این مطالعه آزمون ریشه واحد دیکی فولر تعمیم‌یافته[3] (ADF) برای تشخیص ایستایی فرآیندهای سری زمانی نرخ خرابی استفاده شد. زمانی که متغیر ناپایا یا دارای ریشه واحد باشد، فرآیند تکنیک اقتصادسنجی مرسوم ممکن است مناسب نباشد زیرا تخمین رگرسیونی منجر به برآوردهای تورش‌دار و گمراه‌کننده می‌شود (Engle and Granger, 1987). از این‌رو ایستایی متغیر نرخ خرابی آزمون شده و سپس به برآورد الگو پرداخته شد. برای آزمون ایستایی سری نرخ خرابی از آزمون ریشه واحد و بسته نرم‌افزاری XLSTAT 2017 استفاده شد.

برای اطمینان از قابلیت پیش‌بینی سری و به‌عبارتی تصادفی نبودن آن، قبل از استفاده از روش‌های پیش‌بینی، آزمون تصادفی بودن سری داده‌های نرخ خرابی مورد بررسی قرار گرفت. در صورتی‌که داده‌ها تصادفی باشند، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی بر اساس روند گذشته مجاز نخواهد بود (Day, 1965). در این مطالعه تصادفی بودن متغیر نرخ خرابی با استفاده از آزمون دوربین–واتسون[4] بررسی گردید. در صورت پذیرفتن فرضیه وجود خودهمبستگی، فرض تصادفی بودن سری مردود است. استفاده از این آزمون مستلزم آن است که داده‌های نرخ خرابی دارای توزیع تقریباً نرمال باشند که برای این منظور از آزمون کلموگروف اسمیرنوف[5] بهره گرفته شد (Faraj zadeh and Shah Vahi, 2009).

مراحل ساخت سری زمانی نرخ خرابی شامل چهار مرحله است که به صورت تکراری انجام شد (Saplioglu *et al.*, 2010):

۱- **مرحله شناسایی الگو:** در این مرحله با رسم توابع خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) ایستایی در میانگین و واریانس داده‌های نرخ خرابی ارزیابی شد (Currie, 1989). علاوه بر خودهمبستگی میان (L_t, L_{t+k})، جهت بررسی همبستگی میان (L_t, L_{t+k}) بعد از اینکه وابستگی خطی مشترک میان متغیرهای (L_{t+1}, L_{t+2}, …, L_{t+k-1}) حذف شد، از تابع خودهمبستگی جزئی (PACF) استفاده شد. رفتار این توابع در همبستگی‌نگار، یکی از مهم‌ترین معیارها برای تخمین الگوی سری زمانی است. به‌دلیل ناایستایی، ابتدا سری مورد نظر با استفاده از سری تفاضلی مناسب در میانگین و واریانس پایدار شد و سپس سری ایستا گردید. در این مرحله با تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های تفاضل شده نرخ خرابی مرتبه پارامتر d برای مدل طوری انتخاب شد که دارای حداقل واریانس باشد. از سوی دیگر، با استفاده از تابع‌های PACF و ACF مراتب p و q مشخص گردید.

۲- **برازش الگو (برآورد پارامترها):** در این مرحله با شناسایی الگوهای مناسب در مرحله قبل، برای مقایسه چند الگو و انتخاب بهترین آنها از معیار آکائیک استفاده گردید. معیار آکائیک اصلاح شده (AIC) از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Golabi *et al.*, 2014).

$$AIC = n\left(\ln\left(\frac{RSS}{n}\right)\right) + 2(p+q) \qquad (۵)$$

در اینجا RSS: مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها، p: مرتبه مربوط به مدل اتورگرسیو، q: مرتبه مربوط به مدل میانگین متحرک و n: تعداد داده‌های نرخ خرابی است. مدلی انتخاب می‌گردد که کمترین مقدار AIC را داشته باشد.

1- Mean time between failures
2- Absolute Operational Efficiency
3- Augmented Dickey Fuller
4- Durbin Watson test
5- Kolmogorov Smirnov test

۳- **تشخیص درستی الگو:** برای بررسی درستی مدل، مقادیر باقیمانده‌ها از نظر نرمال بودن و ایستایی ارزیابی شد.

۴- **پیش‌بینی:** نتایج به‌دست آمده به‌عنوان داده‌های نرخ خرابی پیش‌بینی‌شده برای ساعت‌های مورد نظر ارزیابی گردید. برای مدل‌سازی داده‌های نرخ خرابی از نرم‌افزار Minitab 17 و SPSS 19 استفاده گردید که اساس کار آن شیوه تکراری باکس- جنکینز است. برای بررسی کفایت مدل از آزمون پرت- مانتو استفاده شد. این آزمون از خودهمبستگی باقی‌مانده‌ها برای بررسی فرضیه صفر توأم $H_0: \rho_1 = \rho_2 = \cdots = \rho_k = 0$ آماره آزمون (۶) استفاده می‌کند.

$$Q = n(n+2)\sum_{h=1}^{k}(n-h)^{-1}\,\widehat{p_2^h} \qquad (۶)$$

که در آن n تعداد مشاهدات است. این آماره آزمون، آماره Q اصلاح شده یا همان LBQ است و تحت فرض H_0 تقریباً دارای توزیع χ^2_{k-m} است. m تعداد پارامترهای برآورد شده در مدل است. هرگاه مقدار آماره Q از مقدار متناظر جدول کی دو بیشتر باشد، فرضیه H_0 رد می‌شود. فرضیه H_0 در واقع فرضیه کفایت مدل است (El-Din and Smith, 2002).

ارزیابی دقت الگوهای پیش‌بینی

یکی از مراحل مهم در انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی یک متغیر، اندازه‌گیری و تعیین دقت مدل‌ها است. در این مطالعه از دو معیار ریشه میانگین مجذور خطاهای پیش‌بینی (RMSE[1]) در رابطه (۷) و درصد میانگین خطاهای پیش‌بینی (MAPE[2]) در رابطه (۸) برای مقایسه دقت پیش‌بینی الگوها استفاده شد (Dodangeh *et al.*, 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\widehat{L_t} - L_t)^2}{n}} \qquad (۷)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{(\hat{L}_t - L_t)}{L_t}\right| \times 100 \qquad (۸)$$

در اینجا n: تعداد پیش‌بینی‌ها، L_t: مقادیر واقعی نرخ خرابی (تعداد خرابی در ساعت)، $\hat{L}_t$: مقادیر پیش‌بینی شده نرخ خرابی (تعداد خرابی در ساعت) و $\widehat{L}_t - L_t$: خطای پیش‌بینی است که از تفاوت مقادیر نرخ خرابی پیش‌بینی‌شده ($\hat{L}_t$) و مقادیر واقعی آن (L_t) به‌دست می‌آید.

نتایج و بحث

مشخصات آماری متغیرهای مورد مطالعه ماشین برداشت نیشکر در جدول ۱ آورده شده است. متوسط نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر در دوره بررسی برابر ۰/۱۴۷ خرابی در ساعت بود که حداکثر مقدار آن ۰/۵۱۷ خرابی در ساعت و در کمترین مقدار خود به صفر رسید. این ماشین‌ها به‌طور میانگین ۱۸۹/۸ ساعت در سال مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر این، مقادیر آماره‌های F در جدول ۲ نشان داد که بین متوسط نرخ خرابی ماشین‌های برداشت نیشکر مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت؛ زیرا شرایط کارکرد ماشین‌ها کاملاً یکنواخت و همگن بوده است. شکل ۱ الف روند متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی[3] را در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی روندی افزایشی داشته است به‌طوری‌که با وجود گذشت زمان و فرسوده‌تر شدن دستگاه‌ها، متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی در سال زراعی ۹۶-۹۵ نسبت به سال ۹۱-۹۰، ۲/۷ برابر شده است. افزایش این فاصله زمانی حاکی از کاهش خرابی‌ها می‌باشد. طبق نتایج Jacobs *et al.* (1983) ماشین‌ها ممکن است به‌خاطر نقص در طراحی، خسارت فیزیکی یا فرسودگی و شکستگی عادی دچار خرابی شوند، اما در اکثر موارد، ماشین‌ها به دلیل نبود برنامه مناسب نگهداری از کار می‌افتند. در این مطالعه نیز مشخص گردید، با اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نرخ خرابی روندی نزولی و کارایی عملیاتی دستگاه روندی صعودی پیدا کرده است (شکل ۱ب). به‌طوری‌که نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۰، ۷۳/۲۳ درصد کاهش و کارایی عملیاتی نسبت به سال اول مطالعه، ۱۴/۹ درصد افزایش داشته است زیرا بازبینی و نگهداری پیشگیرانه و به‌موقع، نه تنها به کاهش خرابی‌های بزرگ و از دست رفتن زمان کمک کرده است، بلکه در شناسایی خرابی‌هایی که می‌توانند با تعمیرات نسبتاً جزئی برطرف شوند، نیز بسیار مؤثر بوده است (Grisso and Pitman, 2009). فرکانس خرابی ماشین‌های کشاورزی نیز عمدتاً تحت تأثیر ساعت‌های کار سالیانه، سیاست‌های تعمیر و نگهداری و محیط کار قرار می‌گیرد (Say and Sumer, 2011). سرویس مرتب ماشین‌های کشاورزی و بازرسی پیوسته از آن‌ها و انجام هر نوع تعمیر جزیی می‌تواند از بسیاری خرابی‌های حین کار بکاهد (Afsharnia *et al.*, 2014). این نتایج با گزارش Anek (1994) و Amari *et al.* (2006) که دلیل اصلی خرابی‌ها را نگهداری ضعیف معرفی کردند، همخوانی دارد.

میزان برداشت دستگاه بر اساس عملکرد (تن/ ساعت) در طی سال‌های مورد بررسی روندی صعودی داشته است (شکل ۱ج). به‌طوری‌که میزان برداشت نیشکر با ۴۷ درصد افزایش از ۳۶ تن در ساعت در سال اول مطالعه به ۵۳ تن در ساعت در سال آخر تغییر داشته است. این بدان معنی است که بیشتر ساعت‌های کارکرد، دستگاه مشغول برداشت نیشکر بوده است و زمان پرت و تلف شده

1- Root mean squared error
2- Mean absolute percentage error
3- Mean time to failures

کمتری داشته است. تغییرات مربوط به دسترس‌پذیری ماشین برداشت نیشکر در سال‌های مورد مطالعه نیز گویای این مطلب است (شکل ۱د). دسترس‌پذیری ماشین برداشت نیشکر از ۰/۷۴ در سال اول مطالعه به ۰/۸۷ در سال آخر تغییر پیدا کرده است. افزایش ۱۷/۵ درصدی دسترس‌پذیری موجب کاهش تلفات زمانی و افزایش میزان برداشت نیشکر شده است.

شکل ۲ درصد نرخ‌های خرابی هر زیرسیستم را از کل خرابی‌های سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است زیرسیستم‌های برق، کف‌بر و هیدرولیک به‌ترتیب با ۲۲/۳۸، ۱۸/۲۶ و ۱۶/۵۳ درصد از کل خرابی‌های سیستم بیشترین خرابی‌های سیستم را به خود اختصاص دادند. روند نرخ خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین برداشت نیشکر طی مدت زمان ۶ سال در شکل ۳ آورده شده است. نرخ خرابی کلیه زیرسیستم‌ها با اعمال استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه روندی نزولی داشته‌اند. با وجود اینکه برخی زیر سیستم‌ها شامل سیستم‌های برق، کف‌بر، هیدرولیک، خردکن و بالابر در برخی سال‌ها نسبت به سال قبل روندی صعودی داشته‌اند، اما با وجود افزایش سن دستگاه‌ها در سال‌های آتی، با گذشت زمان و ادامه یافتن استراتژی نگهداری و تعمیرات به‌صورت پیشگیرانه روندی نزولی یافته‌اند، زیرا جهت مشاهده تأثیر هر برنامه و استراتژی نوین نیاز به گذشت زمان می‌باشد. زیر سیستم‌های تاپر، برق و موتور به‌ترتیب با ۹۴/۷۵، ۸۰/۴۶ و ۵۸/۷۴ درصد کاهش خرابی‌ها در سال آخر مطالعه نسبت به سال اوّل بیشترین تأثیرپذیری را از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نشان دادند. نرخ خرابی دیگر زیرسیستم‌ها نیز با تداوم اعمال استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه کاهش یافت. زیر سیستم برق بیشترین نرخ خرابی در ماشین برداشت نیشکر را داشت؛ از این رو با اعمال سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان داده است.

جدول ۱- مشخصات آماری متغیرهای مورد مطالعه ماشین برداشت نیشکر

Table 1- Descriptive statistics of variables in sugarcane harvester

متغیر Variable	میانگین Mean	کمینه Min	بیشینه Max	انحراف معیار Standard deviation	چولگی Skewness
نرخ خرابی Failure rate	0.147	0	0.517	0.107	1.52
ساعت استفاده سالیانه Annual use hour	189.8	26	622.5	112.94	1.66
ساعت استفاده تجمعی Cumulated time	2607.72	2006	3639	45.107	0.42

جدول ۲- مقایسه میانگین مقادیر نرخ خرابی ماشین‌های برداشت نیشکر مورد مطالعه با استفاده از آزمون آماری F

Table 2- Compare means of surveyed sugarcane harvesters failure rate using ANOVA

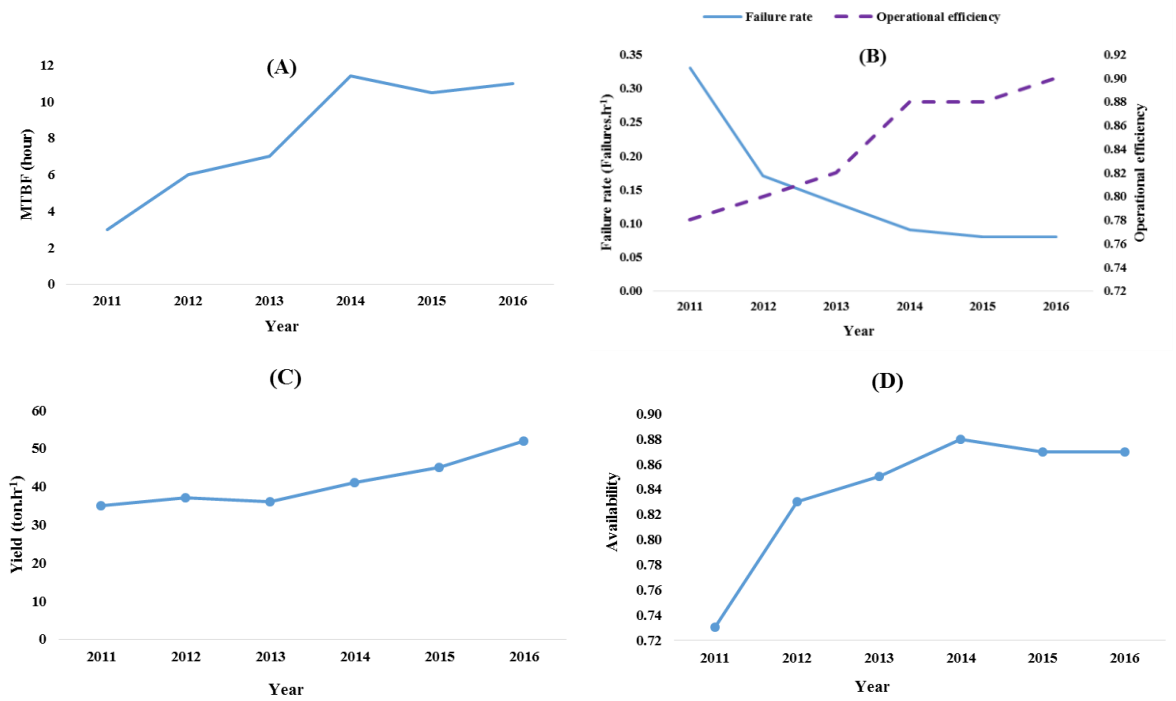
	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	مقدار آماره F value	سطح معنی‌داری Significant level
بین گروه‌ها Between groups	0.159	29	0.005	0.476	0.979
درون گروه‌ها Within groups	1.738	150	0.011		
کل Total	1.896	179			

در مورد زیر سیستم موتور، در حالی‌که تعویض روغن یک دستورالعمل نگهداری بسیار حیاتی می‌باشد اما دستورالعمل‌های نگهداری بقیه زیرسیستم‌ها در یک ماشین می‌تواند به‌طور مثبت یا منفی عمر روغن را تحت تأثیر قرار دهد. تقریباً هر زیرسیستم در یک ماشین به نحوی متصل به موتور است. اجرای نگهداری روزانه ماشین یک فعالیت مهم برای افزایش عمر موتور است. وقتی همه زیرسیستم‌ها به‌طور بهینه در حال کار باشند، موتور می‌تواند به‌خوبی کار کند. به‌طور مثال تعویض فیلتر هوا، نگهداری مناسب از فیلتر اگزوز، تأمین سوخت و نازل‌های تمیز، نگهداری مناسب رادیاتور و مبدل‌ها و فشار باد مناسب تایرها می‌توانند عمر روغن موتور را تحت تأثیر قرار دهند. غفلت از همه این اجزا می‌تواند منجر به مشکلاتی در روغن موتور از جمله افزایش ترکیبات آب/گلیکول[1]، رقیق شدن زیاد سوخت، تشکیل دوده، ویسکوزیته غیرعادی، افزایش دوده و عدد اسیدی یا کاهش عدد قلیایی روغن شود (Kader *et al.*, 2014).

با توجه به اهمیت اطلاع از رفتار متغیر در طول زمان، آزمون‌های ایستایی و همچنین تصادفی بودن متغیر مورد مطالعه صورت پذیرفت. انجام آزمون ایستایی با استفاده از روش دیکی فولر تعمیم‌یافته نشان

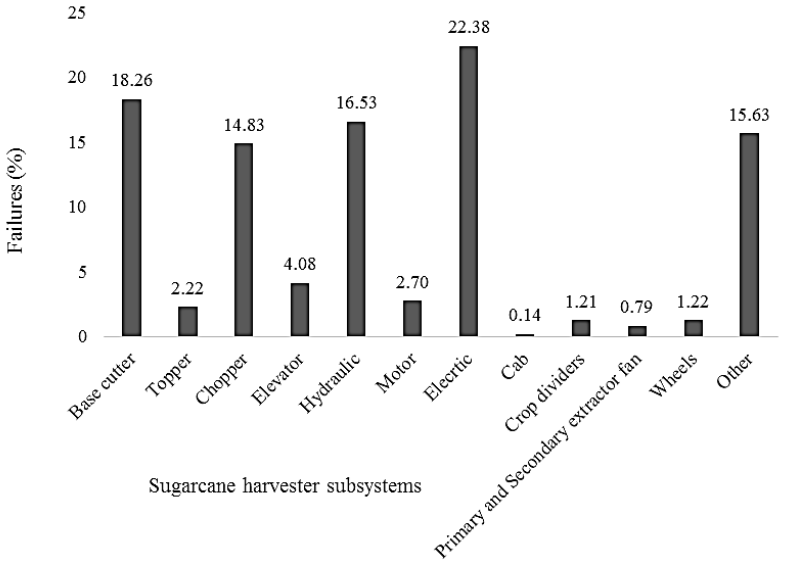
1- Glycol

داد که متغیر نرخ خرابی با انجام تفاضل‌گیری مرتبه سوم دارای ایستایی می‌باشد؛ بدین مفهوم که هیچ‌گونه روند و تناوبی در داده‌ها وجود ندارد و سری زمانی ایستا است. جزئیات مربوط به آزمون ایستایی در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قدر مطلق آماره دیکی فولر تعمیم‌یافته محاسباتی از قدر مطلق مقدار آماره بحرانی بزرگتر است بنابراین، فرضیه صفر مبنی بر ریشه واحد بودن متغیر رد می‌شود و سری زمانی مانا است.



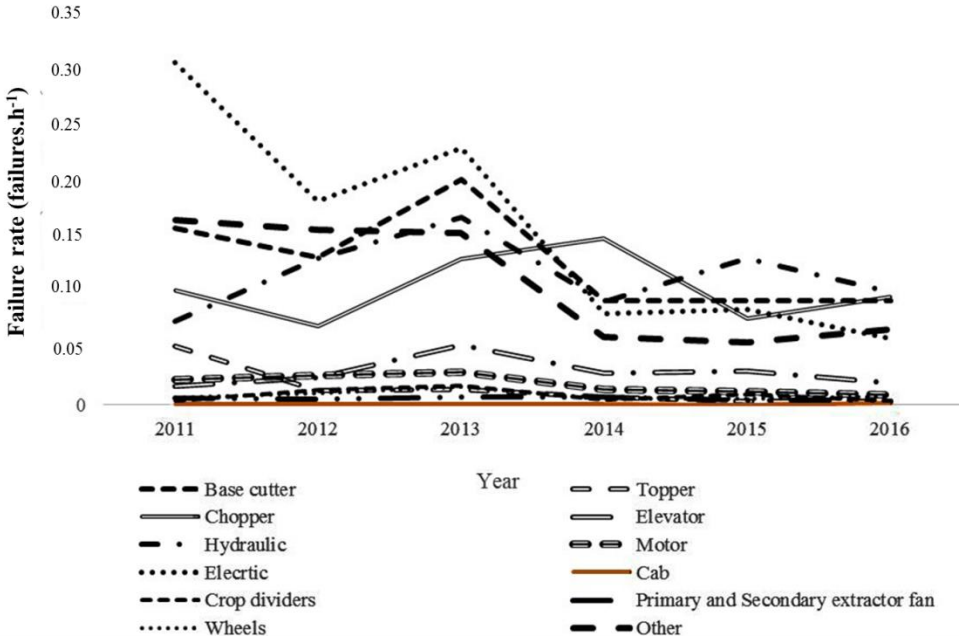
شکل ۱– الف) روند متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌ها، ب) روند نرخ خرابی و کارایی عملیاتی، ج) عملکرد (تن/ساعت) و د) دسترس‌پذیری ماشین برداشت نیشکر از سال زراعی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵

Fig. 1. A) The trend of MTBF, B) The trend of failure rate and operational efficiency, C) Yield (ton/h) and D) Availability for sugarcane harvester in 2011-2016



شکل ۲– متوسط درصد خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین برداشت نیشکر

Fig. 2. The mean failure percent of several sugarcane harvester subsystems



شکل ۳- تغییرات نرخ خرابی کلیه زیرسیستم‌های ماشین برداشت نیشکر در سال‌های مختلف زراعی

Fig. 3. The changes in the failure rate of all sugar cane harvester subsystems in different agronomic years

همچنان‌که قبلاً گفته شد، یکی دیگر از آزمون‌های مهم قبل از انجام پیش‌بینی سری‌های زمانی، آزمون تصادفی بودن سری است. چنانچه یک متغیر روندی تصادفی داشته باشد، پیش‌بینی آن متغیر غیر ممکن خواهد بود. بر این اساس تصادفی‌بودن متغیر با استفاده از آزمون دوربین–واتسون مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ ارائه گردیده است. به استناد نتایج حاصل از آماره این آزمون که مقدار آن بین ۱/۵ تا ۲/۵ می‌باشد، متغیر نرخ خرابی غیرتصادفی و بنابراین قابل پیش‌بینی است؛ یعنی خطاهای زمان t و t-1 از یکدیگر مستقل می‌باشند.

جدول ۳- نتایج مربوط به بررسی مانایی در سری نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Table 3- Results of stationary survey in the sugarcane harvester failure rate series

نوع آزمون مانایی Test type	درجه ایستایی Stationary degree	مقدار آماره بحرانی Critical value	مقدار آماره محاسباتی Calculated value	نتیجه آزمون Test result
ADF	I(3)	-3.56	-5.34	Stationary

جدول ٤- نتیجه آزمون تصادفی بودن دوربین واتسون

Table 4- The result of a randomized Durbin-Watson test

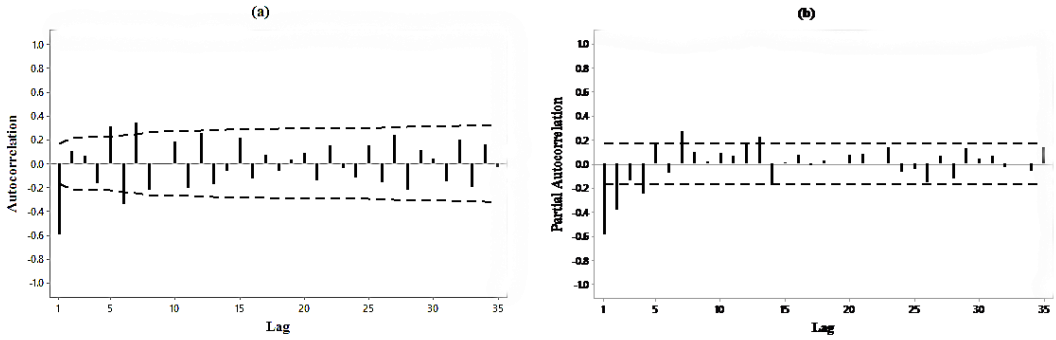
متغیر Variable	آماره کولموگروف اسمیرنوف Kolmogorov Smirnov test	آماره دوربین واتسون Durbin-Watson test	نتیجه آزمون Test result
نرخ خرابی Failure rate	1.05	1.971	سری غیرتصادفی است positive autocorrelation

اگر یک سری زمانی دارای تغییرات فصلی نباشد، در نتیجه همبستگی‌نگار آن هم متناوب نخواهد بود (Golabi *et al.*, 2014). این تابع بینشی از الگوی احتمالی که داده‌ها را تولید می‌کند، ارائه می‌دهد؛ که از این امر برای تشخیص و برازش مدل تصادفی مناسب برای داده‌ها، استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، با توجه به بیرون‌زدگی خطوط همبستگی‌نگار از حدود اطمینان (خطچین‌ها)، وجود همبستگی بین داده‌های ساعتی نرخ خرابی مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده مستقل نبودن داده‌های ساعتی در زمان‌های تأخیر مختلف است.

در این بخش سعی شده که بهترین مدل آریما برای پیش‌بینی نرخ خرابی در استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای ماشین برداشت نیشکر با توجه به رفتار تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی داده‌های نرمال استاندارد شده شناسایی گردد. همان‌طورکه در تابع خودهمبستگی ملاحظه می‌گردد، تغییرات غیرفصلی مشهود است. در شکل ۴ به‌ترتیب تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی ترسیم

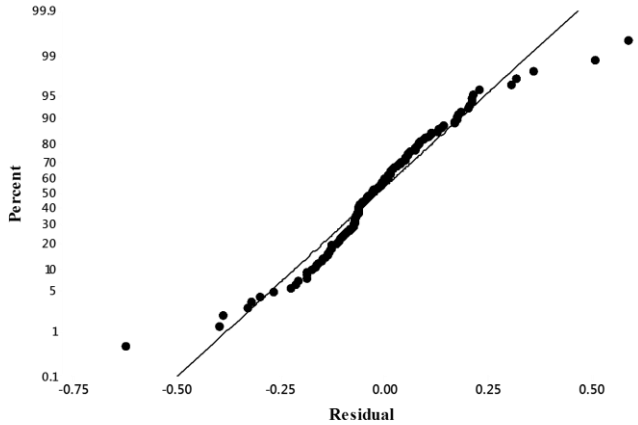
شد. برای انتخاب بهترین مدل از دیدگاه استفاده از حداقل پارامترهای تخمینی از معیار آکائیک اصلاح شده استفاده شد. معیار آکائیک برای بهترین مدل برازش یافته از بین کلیه مدل‌های ARIMA در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که ذکر شد، یکی از روش‌های صحت‌سنجی الگوهای برازش شده بر سری، تجزیه و تحلیل باقی‌مانده‌های الگوست. یک روش منطقی آزمون خطای مدل، آزمون نرمال بودن داده‌ها و همچنین رسم توابع خودهمبستگی باقی‌مانده‌های مدل است. اگر مدل برازش شده مدل مناسبی باشد، تابع خودهمبستگی نمونه‌های مانده هیچ ساختاری را نشان نمی‌دهند و به‌عبارت دیگر، برای تمام تأخیرها در بازه اطمینان قرار می‌گیرند. در شکل ۵ تابع توزیع تجربی مانده‌ها در کاغذ احتمالاتی نرمال نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که فرض نرمال بودن توزیع مانده‌ها درست است. روش رسمی‌تر برای بررسی مناسبت مدل که بر مبنای خودهمبستگی‌های باقی‌مانده‌هاست، آزمون پرت‌مانتو است. مقادیر آماره آزمون پرت‌مانتو (Q(r)) برای متغیر مورد نظر در جدول ۵ آورده شده است. برای قضاوت در مورد فرضیه H_0 مقدار آماره به‌دست آمده از پرت‌مانتو با مقدار λ^2 در سطح معنی‌داری ۵ درصد مقایسه گردید و از مقدار متناظر λ^2 کمتر بود. نتایج حاصل از تعیین نوع فرآیندی که متغیر از آن پیروی می‌کند، مبین آن است که نرخ خرابی در استراتژی نگهداری پیشگیرانه از فرآیند ARIMA تبعیت می‌کند.

انتخاب بهترین الگوی پیش‌بینی و تعیین جایگاه آن بر اساس معیارهای خطا یعنی RMSE و MAPE صورت گرفت. بدین مفهوم که برای پیش‌بینی هر یک از متغیرها از میان الگوهای مورد بررسی یعنی ARIMA الگوی حاوی کمترین خطای پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا در جدول ۵ مقادیر RMSE و MAPE مربوط به الگو در پیش‌بینی نرخ خرابی ارائه گردیده است. بر اساس معیار MAPE می‌توان گفت که دقت پیش‌بینی الگو ۰/۵۶ درصد است و دقت مطلوبی محسوب می‌شود. به استناد اطلاعات آمده در جدول ۵، بهترین الگو برای پیش‌بینی نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر، الگوی (1,3,2) ARIMA است. شایان ذکر است که خطای پیش‌بینی این مدل نسبت به دیگر مدل‌ها حداقل و برابر با ۲ درصد به‌دست آمده است.



شکل ٤- تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی سری زمانی نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Fig. 4. a) Autocorrelation and b) Partial autocorrelation function curve of sugarcane harvester failure rate



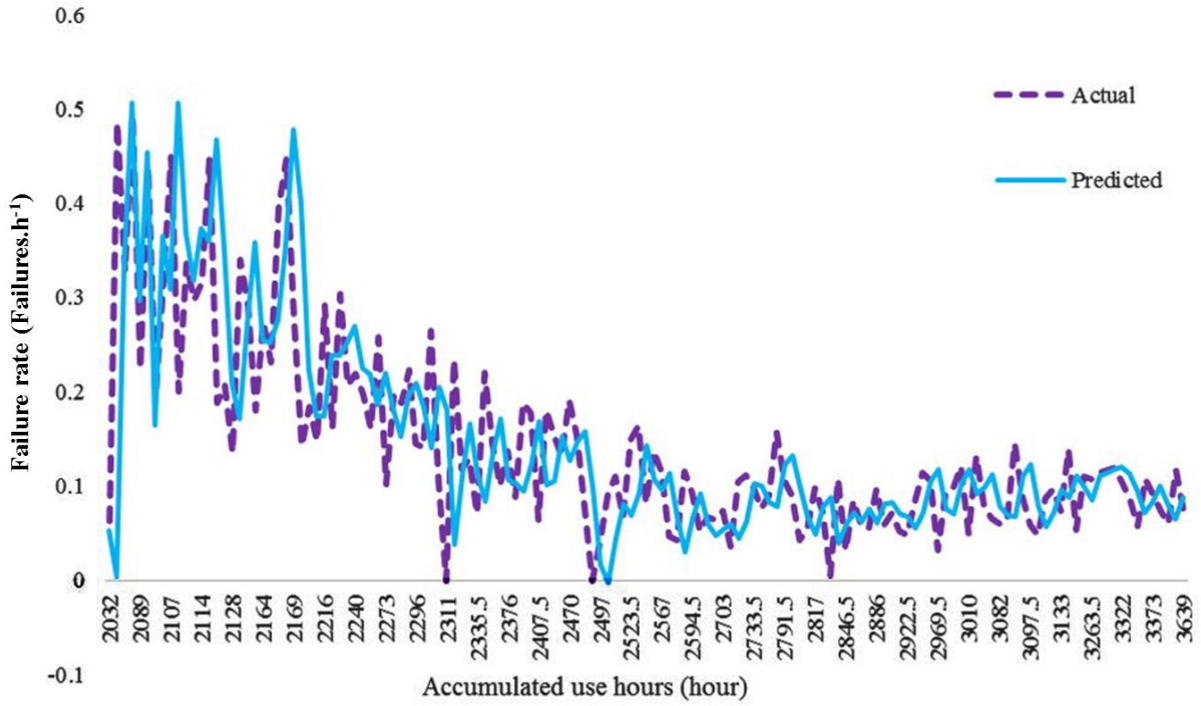
شکل ۵- تابع توزیع تجربی مانده‌ها در کاغذ احتمالاتی نرمال برای نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Fig. 5. Normal of probability plot for sugarcane harvester failure rate

جدول ۵– خلاصه‌ای از پارامترهای آماری بهترین مدل‌های آریما برازش یافته بر نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Table 5- Summary of the statistical parameters of the best fitted ARIMA models on the sugarcane harvester failure rate

متغیر Variable	مدل Model	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3	Q	AIC	MAPE (%)	RMSE
نرخ خرابی Failure rate	ARIMA (1,3,1)	-0.697			0.99			57.5	-108.67	0.76	0.132
	ARIMA (1,3,2)	-0.495			1.98	-0.996		26.07	-124.003	0.56	0.114
	ARIMA (1,3,3)	-0.578			1.85	-0.72	-0.13	29.96	-105.24	0.58	0.116
	ARIMA (2,3,1)	-0.97	-0.4		0.99			43.95	-85.95	0.7	0.126
	ARIMA (2,3,2)	-1.5	-0.69		0.31	0.68		52.105	-120.5	0.76	0.129
	ARIMA (2,3,3)	-1.3	-0.47		1.09	0.77	-0.88	25.13	-69.64	0.57	0.125
	ARIMA (3,3,1)	-1.1	-0.7	-0.31	0.98			48.03	-103.19	0.62	0.12
	ARIMA (3,3,2)	-1.9	-1.3	-0.4	0.95	0.9		45.17	-86.23	0.7	0.127
	ARIMA (3,3,3)	-1.2	-0.63	-0.25	1.4	0.14	-0.57	33.03	-94.71	0.63	0.116



شکل ٦– سری زمانی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده نرخ خرابی

Fig. 6. Time series curve of failure rate real and predicted values

تغییرات سری زمانی نرخ خرابی واقعی و پیش‌بینی‌شده در ساعت‌های استفاده تجمعی در شکل ۶ نیز مبین دقت بالای این روش هست. همانطور که مشخص است شکل و تغییرات مقادیر پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل ARIMA (1,3,2) بسیار مشابه و منطبق با مقادیر واقعی نرخ خرابی است. مورد دیگری که در رابطه با شکل ۶ مشهود است روند تغییر متغیر نرخ خرابی در طول ساعت‌های مختلف استفاده تجمعی است. در این شکل در ابتدا نوسانات نرخ خرابی زیاد است زیرا این مرحله شروع به‌کار استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بوده است و خرابی‌های دستگاه به‌دلیل نقص در بررسی و تعمیرات اورهال[1] بیشتر است اما با افزایش و تداوم اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در طول سال‌های بعدی به‌تدریج از نوسانات نرخ خرابی کاسته شده و به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد که این امر به‌دلیل کاهش فواصل و افزایش تعداد تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد، این نتایج با یافته‌های Ma *et al.* (2007) که کاهش فواصل زمانی تعمیرات پیشگیرانه را در بهبود خرابی و قابلیت اطمینان تجهیزات مؤثر دانستند همخوانی دارد.

1- Overhaul

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر نقش عمده‌ای در کنترل و کاهش خرابی دستگاه و برنامه‌ریزی عملیات برداشت نیشکر در زمان مناسب دارد. استراتژی کلیدی در کاهش توقفات و خرابی‌های بزرگ ماشین‌های پیچیده و گران‌قیمتی مثل ماشین برداشت نیشکر، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد. بنابراین ترکیب این دو به معنی پیش‌بینی نرخ خرابی در استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه زمینه سنجش دقیق‌تر دسترس‌پذیری ماشین را فراهم می‌آورد. طبق نتایج به‌دست آمده، اجرای استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجب کاهش نرخ خرابی و افزایش کارایی عملیاتی ماشین برداشت نیشکر شده است. با وجود کاهش نرخ خرابی در زیرسیستم‌های مختلف ماشین برداشت نیشکر، زیرسیستم‌های تاپر، برق و موتور به‌ترتیب با ۹۴/۷۵، ۸۰/۴۶ و ۵۸/۷۴ درصد کاهش خرابی‌ها در سال آخر بررسی نسبت به سال اوّل بیشترین تأثیرپذیری را از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه داشتند. علاوه بر این، الگوی ARIMA (1,3,2) در مورد پیش‌بینی نرخ خرابی در استراتژی پیشگیرانه دقت بالایی نشان داد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از بنیاد ملّی نخبگان به‌خاطر حمایت مالی انجام این مطالعه در قالب هسته پژوهشی تحلیل سامانه‌های کشاورزی و زیستی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌گردد.

References

1. Afsharnia, F. 2017. Failure Rate Analysis. PP 99-115 in A. Ali eds. Failure Analysis and Prevention. Intech Open, London.
2. Afsharnia, F., M. A. Asoodar, and A. Abdeshahi. 2014. Regression Analysis Modeling the Failure Rate and Finding the Effective Failure Factors of Tractors in Khuzestan province. Journal of Agricultural Engineering 36 (2): 49-58. (In Farsi).
3. Almasi, M., and H. R. Yaganeh. 2002. Determining a suitable mathematical model to predict the repair and maintenance costs of farm tractors in Karoon agro-industry co. Iranian Journal of Agricultural Sciences 33 (4): 707-716. (In Farsi).
4. Amari, V., and McLaughlin. 2006. Cost effective condition-based maintenance using markov decision processes. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1-6.
5. Amin, A., L. Grunske, and A. Colman. 2013. An approach to software reliability prediction based on time series modeling. Journal of Systems and Software 86 (7): 1923-1932.
6. Aneke, D. O. 1994. A Survey of farm power problem in Nigeria. Applied Engineering in Agriculture 10 (5): 623-626.
7. Anonymous. 2004. Eviews 5 User's Guide. Quantitative Micro Software, LLC. Eviews Inc.
8. Atashgar, K., and A. Saravany. 2016. Failure prediction and diagnostic analysis for lathes using a hybrid approach including artificial neural network and decision making block. International Journal of Industrial Engineering and Production Management 27 (2): 143-156. (In Farsi).
9. Bowers, W., and D. Hunt. 1970. Application of Mathematical Formulas to Repair Cost. Transactions of the ASAE. 13 (6): 806-809.
10. Box, G. E. P., G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. 2014. Time series analysis: forecasting and control. Translated by Meshkani, M.R. Sharif University of Technology press. 4th edition. 842pp.
11. Currie, R. G. 1989. Comments on power spectra and Coherence of Drought in the interior Plains. International Journal of Climatology 9: 91-100.
12. Day, R. H. 1965. Probability distributions of field crop yields. Journal of Farm Economics 47: 713-741.
13. Dodangeh, S., J. S. Abedi Koupai, and A. Gohari. 2012. Application of time series modeling to investigate future climatic parameters trend for water resources management purposes. Journal of Water and Soil Science 16 (59): 59-74. (In Farsi).
14. El-Din, A. G., and D. W. Smith. 2002. A neural network model to predict the wastewater inflow incorporating rainfall events. Water Research 36 (1): 115-112.
15. Engle, R. F. and C. W. Granger. 1987. Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. Econometrica: Journal of the Econometric Society 251-276.
16. Faraj zadeh, Z., and A. Shah Vahi, 2009. Forecasting agricultural crops prices: case study of cotton, rice and saffron. Journal of Agricultural Economics and Development 17 (67): 43-72. (In Farsi).
17. García, F. P., D. J. Pedregal, and C. Roberts. 2010. Time series methods applied to failure prediction and detection. Reliability Engineering and System Safety 95 (6): 698-703.
18. Grisso, R. D., and R. Pitman. 2009. Five strategies for extending machinery life. Extension engineer, Biological Systems Engineering Department. University of Nebraska USA, 442-451.

19. Hall, R. A., and L. K. Daneshmend. 2010. Reliability modeling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies. International Journal of Surface Mining and Reclamation and Environment 17 (3): 139-155.
20. Hansen, R. C. 2008. Overall equipment effectiveness. Translated by Ahmadi, H. Arkan Danesh press. 288 pp. (In Farsi).
21. Jacobs, C. O., W. R. Harrell, and G. C. Shinn. 1983. Agricultural power and machinery. McGraw-Hill. Inc. New York.
22. Kader, M., T. Ramani, J. Johnson, C. Speigelman, and J. Zietsman. 2014. FLEET equipment perf ormance measurement preventive maintenance model: final report. Texas department of transportation Federal highway administration. Texas a&m transportation institute. 76 PP.
23. Karbasi, M., M. Shahsavari, O. Veisi, and S. Fathi, 2011. Enhancement of equipment efficiency in the army through applying predictive, forecasting and comprehensively productive network-based repair and maintenance methods. Military Management Journal 43 (11): 103-134. (In Farsi).
24. Khodabakhshian, R., and M. Shakeri, 2011. Prediction of repair and maintenance costs of farm tractors by using of Preventive Maintenance. International Journal of Agriculture Sciences 3 (1): 39-44.
25. Ma, L., Y. Sun, and J. Mathew. 2007. Effects of Preventive Maintenance on the reliability of production lines. In Proceedings 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2007): 631-635, Singapore.
26. Monjezi, N., H. Zaki Dizaji, M. J. Sheikhdavoodi, A. Marzban, and M. Shomeili. 2017. Application of fuzzy GERT method in operations scheduling of sugarcane production. Journal of Agricultural Engineering 40 (1): 125-139.
27. Morris, J. 1988. Estimation of Tractor Repair and Maintenance Costs. Journal of Agricultural Engineering Research 41: 191-200.
28. Najafi, P., M. A. Asoodar, A. Marzban, and M. Hormozi. 2014. Reliability evaluation and analysis of sugarcane 7000 series harvesters in sugarcane harvesting. Journal of Agricultural Machinery 5 (2): 446-455. (In Farsi).
29. Pinches, G. E. 1970. The Random Walk. Hypothesis and Technical Analysis. Financial Analysis Journal. (March-April 1970): 104-110.
30. Rasekhi, R., and M. Shamsi. 2010. A case study for determining and evaluation a mathematical model to predict the repair and maintenance costs of MF285 tractors. 6th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Tehran. Iran. (In Farsi).
31. Rohani, A. 2013. Prediction of tractor repair and maintenance costs using rbf neural network. World Applied Sciences Journal 28 (12): 1929-1937.
32. Rohani, A., I. Ranjbar, Y. Ajabshir, M. H. Abbaspour-Fard and M. Valizadeh. 2009. Prediction of two-wheel drive tractor repair and maintenance costs using artificial neural network in comparing with regression. Journal of Agricultural Science and Natural Resources. 16 (Special issue 1-a): 225-235.
33. Sabir, M. S., M. A. Zaidi, and G. S. Sheikh. 1990. Mathematical model for repair and maintenance costs of agricultural machinery. Pakistan Journal of Agricultural Sciences 27 (1): 30-33.
34. Saplioglu, K., M. Cimen, and B. Akman. 2010. Daily precipitation prediction in Isparta station by artificial neural network: Ohrid, Republic of Macedonia.
35. Say, S. M., and S. K. Sumer. 2011. Failure rate analysis of cereal combined drills. African Journal of Agricultural Research 6 (6): 1322-1329.
36. Shirmohammadi, A. 2002. Repair and maintenance planning. Arkane Danesh. Iran. 315p. (In Farsi).
37. Vafaee, M. R., H. Mashhadi Meighani, and A. Borgheei. 2008. Determination the mathematical model of repair and maintenance cost of New Holland TM155 and Valtra 8400 tractors in Markazi and Fars Provinces. Journal of New Finding in Agriculture 2 (2): 190-200. (In Farsi).
38. Vafaei, M. R., H. Mashadi Meighani, M. Almasi, and S. Minaei. 2010. Choosing of most appropriate method for reliability parameter calculation on cereal harvesting machine John deer 955 in Markazi province. Daneshe Novine Keshavarzi magazine, 5 (15): 143-151. (In Farsi).
39. Wireman, T. 2005. Developing performance indicators for managing Maintenance. Industrial Press, Inc., New York, NY.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 347-359

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۵۹-۳۴۷

Investigating The Long-term Effect of Preventive Maintenance Strategy on The Operational Efficiency and Failure Rate of Sugarcane Harvester Using Time Series

F. Afsharnia[1*], A. Marzban[2]

Received: 12-02-2018
Accepted: 26-06-2018

Introduction

Optimal operation and maintenance of engineering systems heavily relies on the accurate prediction of their failures. Repairable engineering systems are well known in industries. A repairable engineering system indicates that the performance of this system after each failure can be restored through suitable maintenance. It is normally a complex system composed of a number of components. Failure prediction of a repairable system and its subsystems is an important topic in the reliability engineering. One of the most important repairable systems in agro-industrial companies is the sugarcane harvester. This machine has a key role in harvesting operations of sugarcane plant. The failures of this machine causes delay in operations and reduce products yield and quality. Currently, preventive maintenance is conducted on these harvesters to improve the overall reliability of these systems. Therefore, in this study, the long-term effect of preventive maintenance strategy on the efficiency and failure rate of the sugarcane harvester was investigated.

Materials and Methods

This research was carried out on 30 sugarcane harvesters used by sugarcane and by Products Development Company of Khuzestan during 6 years period. The goal of this study was to introduce a methodology aimed to acquire the information to predict the effect of preventive maintenance strategy on the failure rate and efficiency of sugarcane harvester by time series. Time series forecasting is the use of a model to predict future values based on previously observed values. The expected shape is a forecast from a combination of an ARIMA models (AR, MA, ARMA and ARIMA). The first step in analyzing the time series is plotting the data and obtaining the sample records. The next step is consideration of a trend and periodic components and remove them from the time series and fitting the static model on the time series. The next stage is implementation of the data normalization using skewness coefficient method and their normalization through logarithm differentiation of data. The arithmetic mean of data was applied to obtain zero average of the time series. Sample ACF (Auto Correlation Function) and PACF (Partial Auto Correlation Function) was drawn and then the model rank "a" was recognized and selected by comparison of ACF and PACF for AR, MA, ARMA, and ARIMA models.

Results and Discussion

According to the results of failure rate related to the sugarcane harvester, it can be found that the mean failure rate of this machine for the 6-years period was equal to 0.147 per hour. The minimum and maximum value of the failure rate were 0 and 0.517 per hour, respectively. The mean annual use hours of these harvesters was 189.8 h. Although the accumulated used hours increased, the mean time between failures (MTBF) was increased. According to Jacobs et *al*. (1983), the machines may breakdown due to a design defect, physical damage, or normal wear and tear, but many times machines fail because of a neglect and the lack of properly scheduled maintenance. In this study, implemented preventive maintenance resulted in decreasing of failure rate and increasing of machine efficiency as well. In 2016, the failure rate of sugarcane harvester was decreased by 73.23% and the machine efficiency was increased by 14.9% compared to 2011, because timely preventative maintenance and inspection will not only help to reduce major problems and downtime, but it will also help to identify problems when they can be corrected with relatively minor repairs. Among the 12 studied subsystems, topper, electric and motor subsystems were more affected by preventive maintenance by 94.75%, 80.46% and 58.74% decreasing in the failure rate, respectively. With regard to the evaluation criteria such as AIC, MAPE and RMSE, the ARIMA (1, 3, 2) model was determined as a suitable model for predicting the failure rate of sugarcane harvester. Furthermore, there is no significant difference between statistical descriptive measures of forecasting and actual tractor failure rate that it represents high accuracy of forecasting via ARIMA model.

1- PhD candidate of Agricultural Machinery Engineering Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran
2- Associate Professor of Agricultural Machinery Engineering Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: phd.afsharnia@asnrukh.ac.ir)

Conclusions

This study was adapted to the preventive maintenance as a useful strategy that could increase availability and operational efficiency of the sugarcane harvester. Furthermore, it focused on time series modeling method to analyze and forecast the reliability characteristics such as the expected number of failures per interval (failure rate). It is found that time series model is a viable alternative that gives satisfactory results for interval failure predictions in terms of its predictive performance for the sugarcane harvester reliability.

Keywords: ARIMA, Efficiency, Failure rate, Forecasting, Sugarcane harvester

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 361-373

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۷۳-۳۶۱

انتخاب مناسب‌ترین نوع سالن مرغداری از نظر مصرف انرژی در استان خوزستان

حسین وکیلی[۱]، مصطفی کیانی ده کیانی[۲*]، مازیار چنگیزیان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴

چکیده

صنعت طیور یکی از بزرگ‌ترین و توسعه‌یافته‌ترین صنایع موجود در کشور است و بررسی میزان انرژی مصرفی در مرغداری‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل در پرورش مرغ می‌باشد. تحقیق حاضر به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین نوع سالن مرغداری از نظر مصرف انرژی در استان خوزستان در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت. ابتدا با طراحی پرسشنامه و قرار دادن آن در اختیار مرغداران شهرهای مختلف استان (نماینده‌های اقلیم‌های مختلف)، اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار کریر به‌منظور محاسبه بارهای حرارتی و برودتی به‌دست آمد. سپس تاثیر اجزای مختلف سالن‌های مرغداری رایج در استان (آجری، بلوکی و پنل مرسوم) بر این بارها مورد بررسی قرار گرفت و اجزا با کمترین بارهای حرارتی و برودتی به‌عنوان اجزای سالن پیشنهادی معرفی گردید. برای مقایسه مصرف انرژی، ظرفیت همه‌ی سالن‌ها یکسان (۲۰۰۰۰ قطعه) در نظر گرفته شد. در مقایسه بار حرارتی سالن‌های مورد مطالعه، مشاهده گردید که سالن‌های بلوکی با ۸۹۱۵۲۵ کیلوژول در ساعت بیشترین بار حرارتی و سالن‌های پیشنهاد شده در این تحقیق با ۳۰۹۰۶۸ کیلوژول در ساعت کمترین بار حرارتی را داشتند. همچنین سالن‌های بلوکی با ۱۶۰۴۸۲۸ کیلوژول در ساعت بیشترین بار برودتی و سالن‌های معرفی شده در این تحقیق با ۳۳۰۷۹۵ کیلوژول در ساعت کمترین بار برودتی را داشتند. به‌طور کلی میانگین بارهای حرارتی و برودتی برای سالن پیشنهادی نسبت به نوع بلوکی و آجری به‌ترتیب ۲۹/۶ و ۱۸/۲۴ درصد کمتر بود. تفاوت هزینه ساخت سالن پیشنهادی و آجری (مرسوم‌ترین سالن در استان) معادل ۹/ ۲۸ میلیون تومان بود که با مقایسه تفاوت هزینه انرژی مصرفی در آن‌ها (۱۱/۷۲۶ میلیون تومان) این مبلغ پس از ۲ سال و ۵ ماه جبران شده و از آن به بعد به‌عنوان سود سرمایه‌گذاری به حساب می‌آید.

واژه‌های کلیدی: بار برودتی، بار حرارتی، مصالح ساختمان، مقایسه اقتصادی، نرم‌افزار کریر

مقدمه

کشاورزی یکی از بخش‌های اساسی در مصرف انرژی به‌شمار می‌آید. با توجه به افزایش جمعیت و بالارفتن سطح کیفی زندگی بشر، تقاضا برای محصولات کشاورزی افزایش یافته و در نتیجه آن مصرف انرژی در این بخش نیز افزایش یافته است. صنعت طیور به‌عنوان یکی از زیر بخش‌های عمده کشاورزی از این قاعده مستثنا نیست. محدود بودن منابع انرژی (سوخت‌های فسیلی) و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده از آن‌ها، باعث ترغیب نمودن بشر برای استفاده بهینه و صرفه‌جویی در این منابع شده است (AlQdah, 2010; Kythreotou *et al.*, 2011; Rajaniemi and Ahokas, 2012). با توجه به حساسیت طیور در دوره رشد نسبت به عواملی مانند دما، تهویه و رطوبت، طراحی سالن‌های مرغداری از این لحاظ و از جهت مصرف انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Kochakzadeh and Tajari, 2015; Wang *et al.*, 2018).

امروزه با توجه به اهمیت روزافزون انرژی و تاثیر این نهاده بر قیمت نهایی محصول، انتخاب مصالح و اجزای سالن‌های مرغداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. سالن‌های مرغداری به دو دسته سالن‌های باز و سالن‌های بسته تقسیم می‌شوند. سالن‌های بسته سالن‌هایی هستند که در آن‌ها، شرایط محیطی، مطابق با احتیاجات طیور قابل کنترل می‌باشد. در این سالن‌ها، انتخاب مصالح و اجزای سالن (درب، پنجره و غیره) از حساسیت بیشتری نسبت به نوع باز برخوردار می‌باشند (Mostashari Mohases, 2017). با توجه به شرایط آب و هوایی استان خوزستان تقریباً تمام سالن‌های که در این استان استفاده می‌شود، از نوع بسته می‌باشند. مرغداری‌های استان خوزستان در فصول گرم دارای بار برودتی زیادی می‌باشند که در صورت انتخاب نامناسب مصالح و اجزای سالن، تلفات انرژی زیاد می‌شود و در نهایت قیمت گوشت نیز افزایش می‌یابد.

تحقیقات زیادی در زمینه مصرف انرژی در مرغداری‌ها انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. در تحقیقی تجزیه و تحلیل سهم نهاده‌های مختلف در پرورش مرغ گوشتی در شهرستان مشهد انجام شد. نتایج نشان داد که سوخت مصرفی بیشترین سهم در میان نهاده‌ها به خود اختصاص داده است (Sadrnia *et al.*, 2017). در تحقیقی دیگر، مقایسه مصرف انرژی و کارایی واحدهای پرورش مرغ گوشتی و تخم‌گذار استان البرز انجام گردید. نتایج نشان داد که

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.kiani@scu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.77393

در واحدهای گوشتی سوخت بیشترین سهم را در انررژی ورودی داشتند (Vahedi and Younesi Almoti, 2017). پاینده و همکاران در بررسی شاخص‌های مصرف انرژی پرورش مرغ گوشتی در شهرستان نجف آباد گزارش نمودند که سوخت مصرفی با ۵۷/۳۶ درصد بالاترین سطوح مصرف انرژی را به خود اختصاص دادند. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که مصرف سوخت در واحد مورد تحقیق به‌ازای هر جوجه ۱/۷۱ لیتر بود که میزان مصرف حدود ۰/۹۱ لیتر بیشتر از سهمیه‌بندی پیشنهادی سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌باشد. آن‌ها عمده دلایل بالا بودن میزان مصرف را وضعیت فیزیکی سالن‌ها، سامانه گرمایشی و نحوه تهویه سالن‌ها عنوان کردند (Payandeh *et al.*, 2016). در پژوهشی، کارآیی انرژی واحدهای پرورش مرغ گوشتی در ۲۸ استان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که تنها واحدهای ۶ استان (بوشهر، زنجان، قزوین، گلستان، مازندران و هرمزگان) از کارآیی برخوردارند (Hasani *et al.*, 2013). در پژوهشی دیگر که توسط اسکندر و همکاران در شهرستان اردبیل بر انرژی مصرفی مرغ گوشتی انجام گردید، سوخت مصرفی بیشترین سهم (۵۱/۵۸) در میان نهاده‌های انرژی به خود اختصاص داد (Eskandar *et al.*, 2015). تحقیقات ذکر شده نشان می‌دهد که مصرف سوخت در مرغداری‌ها بیشترین سطح انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده است. مصرف سوخت در مرغداری‌ها عمدتاً برای سرمایش و گرمایش این سالن‌ها استفاده می‌شود و یکی از دلایل عدم کارایی انرژی واحدهای مرغداری می‌تواند مربوط به ساختمان و اجزای سازنده آن باشد. بنابراین بررسی بارهای حرارتی و برودتی سالن‌ها و اجزای آن‌ها و به‌کارگیری اجزای مناسب برای جلوگیری از اتلاف انرژی ضروری به نظر می‌رسد. بارهای حرارتی و برودتی ساختمآن‌ها و سالن‌ها را می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای مختلفی (کریر[1]، انرژی پلاست[2]، دیزاین بیلدر[3]، ترنسیس[4] و غیره) محاسبه نمود (Schwab and Simonson, 2004; Swan and Ugursal, 2009; Valade, 2009) که یکی از کارآمدترین و دقیق‌ترین این نرم‌افزارها، نرم‌افزار کریر می‌باشد. تحقیقات زیادی با استفاده از این نرم‌افزار صورت گرفته است (Jafarian *et al.*, 2010; Karbassi *et al.*, 2015; Shekoohi Dehkordi and Farhadian, 2017; Zanganeh *et al.*, 2009).

با توجه به پیشینه موضوع، مصرف انرژی در سالن‌های مرغداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. بنابراین در این تحقیق تاثیر اجزای مختلف سالن‌ها مرغداری رایج در استان خوزستان بر بارهای حرارتی و برودتی آن‌ها به‌طور مجزا با استفاده از نرم‌افزار کریر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و در نهایت اجزای بهینه از نظر مصرف انرژی برای ساخت سالن پیشنهاد گردید. سرانجام مقایسه اقتصادی میان سالن پیشنهادی و سالن آجری به‌عنوان مرسوم‌ترین سالن در استان صورت گرفت

مواد و روش‌ها

در این پژوهش شهرستان‌های ایذه، شوش، آبادان و اندیمشک به‌ترتیب به‌عنوان نماینده اقلیم‌های پر بارش، گرم و خشک، کم بارش با رطوبت نسبی بالا و معتدل و بارشمند استان انتخاب گردید. اطلاعات مربوط به مشخصه‌های سالن از طریق پرسش‌نامه‌ای که به این منظور طراحی شد از مرغداران این شهرستان‌ها اخذ گردید. پرسشنامه طراحی شده با هدف تعیین مشخصات فیزیکی سالن پرورش مرغ‌ها، انواع دستگاه‌های مورد استفاده در فضا، روش تهویه سالن و نیز مقدار سوخت و برق مصرفی طراحی گردید. بر این اساس برای هر یک از ساختمان‌های بررسی شده، موقعیت جغرافیایی سالن، جهت ساختمان، مساحت کل سالن و ابعاد دیوارها و سقف، نوع سازه (آجری، بتنی، فلزی)، تعداد درها و پنجره‌ها و سایر اطلاعات مربوط به هندسه، ابعاد و جنس مربوط به این مرغداری‌ها جمع‌آوری شد. همچنین اطلاعات مربوط به انواع دستگاه‌های موجود در سالن‌ها و نیز روش تامین هوای تازه مرغداری‌ها، روش تامین سرمایش و گرمایش ساختمان و تعداد تجهیزات مرتبط با موارد ذکر شده به‌کمک پرسشنامه‌ها گردآوری شد. شایان ذکر است که با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده، بانک داده‌های مربوط به انواع مرغداری‌های منطقه تکمیل شد و از این اطلاعات به‌عنوان ورودی نرم‌افزار کریر برای محاسبه بارهای سرمایشی و گرمایشی استفاده گردید. همچنین از اطلاعات مربوط به میزان برق و سوخت مصرفی برای صحه‌گذاری نتایج نرم‌افرار استفاده شد. علاوه بر این موارد، اطلاعاتی که مربوط به شرایط بهینه برای پرورش مرغ‌های گوشتی است از جمله: مناسب‌ترین دما، رطوبت و مقدار تهویه مورد نیاز از منابع معتبر در زمینه پرورش طیور استخراج گردید (Bagi, 2015; Lotfipour, 2008). نرم‌افزار کریر یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال جامع‌ترین نرم‌افزارهای موجود جهت محاسبات بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها با کاربردهای مختلف می‌باشد. مزیت اصلی کریر به سایر نرم‌افزارها، ساختار ساده و در عین حال گزارشات بسیار دقیق و کاربردی این نرم‌افزار است. این نرم‌افزار قدرتمند، امکانات بسیار زیاد و کاربردی را در عین سادگی و کاربری آسان در اختیار مهندسان تاسیسات و مکانیک قرار می‌دهد. در کشور ما نیز این نرم‌افزار مورد تایید سازمان نظام مهندسی است. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، این پژوهش برای سه نوع سالن مرسوم در استان (بلوکی، آجری و پنل مرسوم) در قالب یک سالن مستطیل شکل به ابعاد ۸۵ متر طول و ۱۶ متر عرض در نظر گرفته شده که از ابعاد رایج مورد استفاده

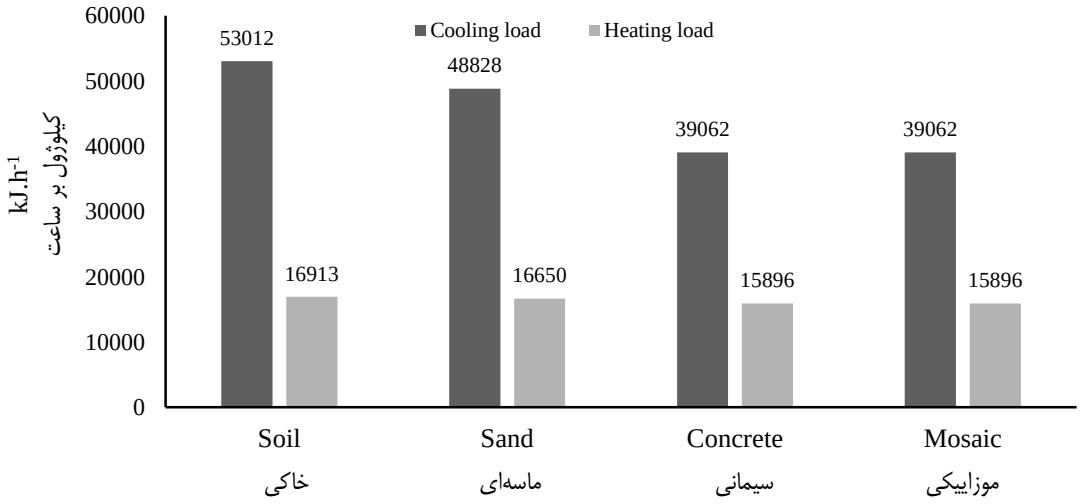
1- Carrier
2- Energy plus
3- Design Builder
4- Transys

سالن‌هاست و ظرفیت این سالن‌ها ۲۰۰۰۰ قطعه مرغ گوشتی است. از آن‌جایی‌که هدف بررسی تاثیر مصالح مختلف به‌کار رفته در ساختمان بر بارهای حرارتی و برودتی آن بود، یک ساختمان نمونه در یک منطقه جغرافیایی (در اینجا شوش) در نرم‌افزار طراحی شد و با تغییر پارامترهای مربوط به اجزای سالن، این بارها محاسبه و مقایسه گردید و اجزای با کمترین بارهای برودتی و حرارتی به‌عنوان اجزای سالن پیشنهادی در نظر گرفته شد. همچنین در پایان هزینه ساخت سالن‌های مختلف بر اساس قیمت روز محاسبه گردید. با به‌دست آوردن میانگین بارهای حرارتی و برودتی میان مرسوم‌ترین سالن در استان (آجری) و سالن پیشنهادی، تحلیل اقتصادی انجام شد (به دلیل حجم بالای مطالب از آوردن جداگانه بارها برای شهرستان‌های مختلف صرف‌نظر شد). بدین صورت که تفاوت هزینه ساخت دو سالن و تفاوت انرژی مصرفی محاسبه و مقایسه گردید. در محاسبه قیمت سالن، استهلاک سالیانه آن از طریق روش خطی مستقیم محاسبه شد.

نتایج و بحث

بارهای حرارتی و برودتی کف سالن‌های مرغداری

کف در سالن‌های مرغداری و هر نوع سالن دیگر یکی از بسترهایی است که تبادلات حرارتی از طریق آن انجام می‌گیرد. کف ممکن است دارای انواع مختلف باشد: کف بدون مصالح سالنی و کف با مصالح سالنی (کف چوبی، کف‌های سیمانی، موزاییکی و غیره) باشد. برای به‌دست آوردن تلفات حرارتی و شاخص‌های آن، بارهای حرارتی و برودتی انواع کف مورد استفاده در سالن‌های مرغداری مورد بررسی قرار گرفت. این بارها در دو بخش حرارتی و برودتی با استفاده از داده‌های منطقه‌ای به کمک نرم‌افزار کریر محاسبه گردید. بر اساس شکل ۱ مشاهده می‌شود که کف‌های ماسه‌ای و خاکی به‌ترتیب با ۴۸۸۲۸ و ۵۳۰۱۲ کیلوژول بر ساعت دارای بیشترین بار برودتی و کف سیمانی و موزاییکی با ۳۹۰۶ کیلوژول بر ساعت کمترین بار برودتی را دارا می‌باشد (هر کیلوژول بر ساعت تقریباً معادل ۰/۲۷۸ وات است). همچنین بار حرارتی این دو کف نسبت به کف‌های ماسه‌ای و خاکی کمتر می‌باشد. کف سیمانی به دلیل قیمت تمام شده کمتر نسبت به کف موزاییکی شرایط بهتری برای انتخاب دارد.



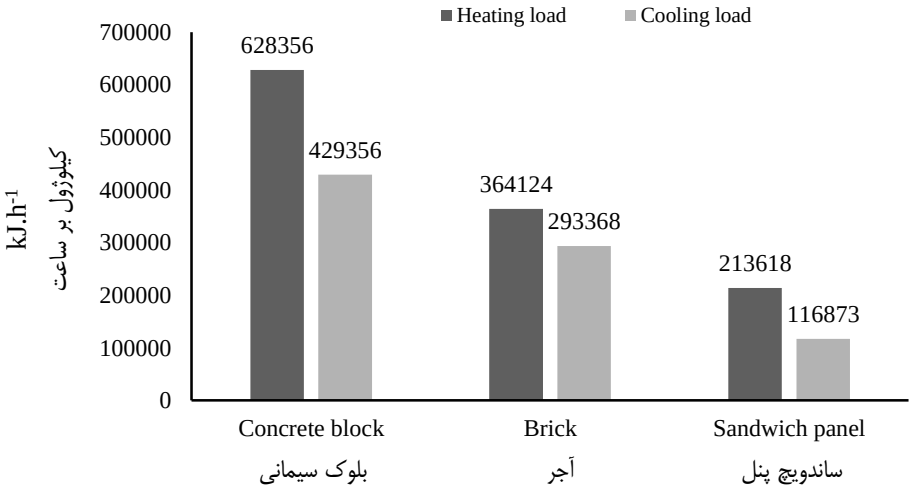
شکل ۱– مقایسه بارهای حرارتی و برودتی برای انواع کف در سالن‌های مرغداری

Fig.1. Comparison of heating and cooling loads for floor types in poultry houses

بارهای حرارتی و برودتی جداره‌های خارجی (دیوارها)

در سالن‌های مرغداری بسته به نوع و شکل سالن، دیوارها متفاوت می‌باشند. معمولاً دیوار سالن‌های با سقف ساده، کوتاه است و ارتفاع در سالن‌هایی که دارای سقف دوگانه هستند، بلندتر می‌باشند. در استان خوزستان به‌طور رایج از ساندویچ پنل، بلوک سیمانی و آجر در جداره‌های سالن استفاده شده است. شکل ۲، بارهای حرارتی و برودتی را برای انواع جدارهای خارجی سالن نشان می‌دهد. مقایسه بارهای حرارتی و برودتی در انواع دیوارهای ساخته شده با مصالح مختلف نشان داد که دیوارهای بلوکی با بیشترین بارهای حرارتی به میزان ۴۲۹۳۵۶ کیلوژول بر ساعت و بیشترین بار برودتی به میزان ۶۵۸۳۵۶ کیلوژول بر ساعت را داشتند، در حالی‌که دیوارهای ساندویچ پنل با ۱۱۶۸۷۳ بر ساعت کمترین بار حرارتی و ۱۲۳۶۱۸ کیلوژول بر ساعت کمترین بار برودتی را دارا بودند. این اختلاف فاحش بارهای حرارتی و برودتی دیوارهای ساندویچ پنلی در مقایسه با دیوارهای

بلوکی و آجری به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد. کمتر بودن بارهای حرارتی و برودتی با توجه به ضریب پایین انتقال حرارت و سرعت بسیار بالای نصب و انجام عملیات دیوارکشی در کنار سبک بودن دیوارها از مهم‌ترین دلایل برتری دیوارهای ساندویچ پنل در انتخاب به‌عنوان مناسب‌ترین نوع دیوار از نظر مصرف انرژی می‌باشد (شکل ۲).

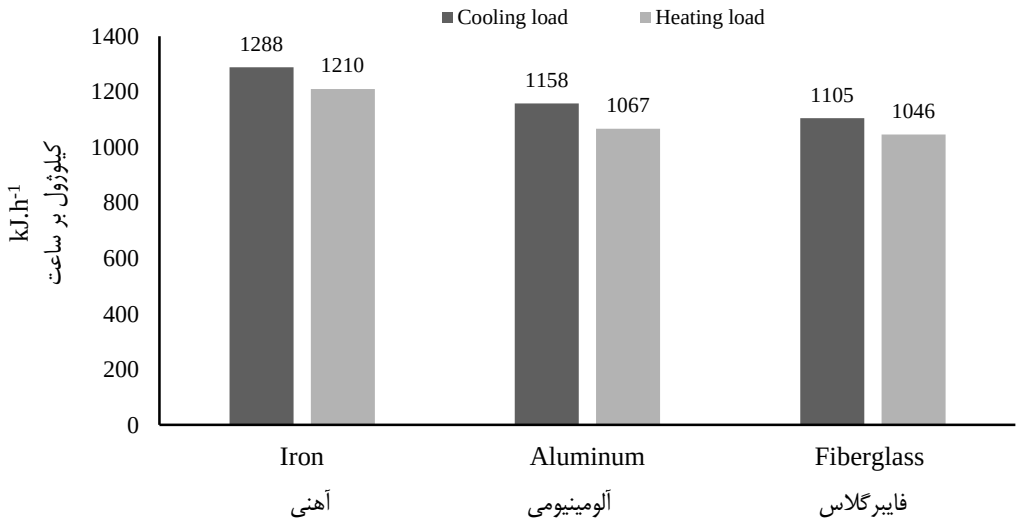


شکل ۲- مقایسه بارهای حرارتی و برودتی برای مصالح سالنی مختلف در دیوارها

Fig.2. Comparison of heating and cooling loads for various saloon materials in the walls

مقایسه بارهای حرارتی و برودتی درها

در بررسی وضعیت بارهای حرارتی و برودتی سالن‌های مختلف، تبادل حرارتی این درهای با جنس‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. در ساخت درهای سالن‌های مرغداری و پرورش از سه جنس آهنی، فایبرگلاس و آلومینیومی معمولاً استفاده می‌شود. نتایج نشان داد که درب آهنی دارای بیشترین بار حرارتی و بیشترین بار برودتی بوده و درب از جنس فایبرگلاس دارای کمترین بار حرارتی و بار برودتی می‌باشد (شکل ۳).

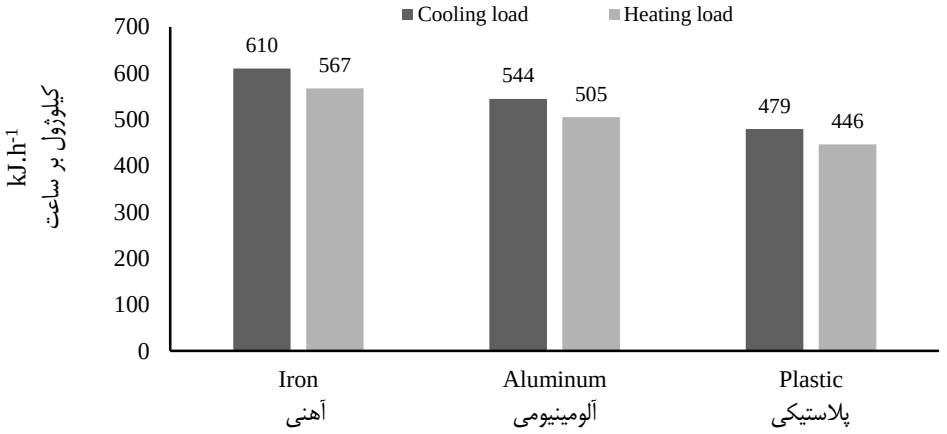


شکل ۳- مقایسه بار حرارتی و برودتی برای جنس درهای مختلف سالن مرغداری

Fig.3. Comparison of heating and cooling loads for the different types of poultry house doors

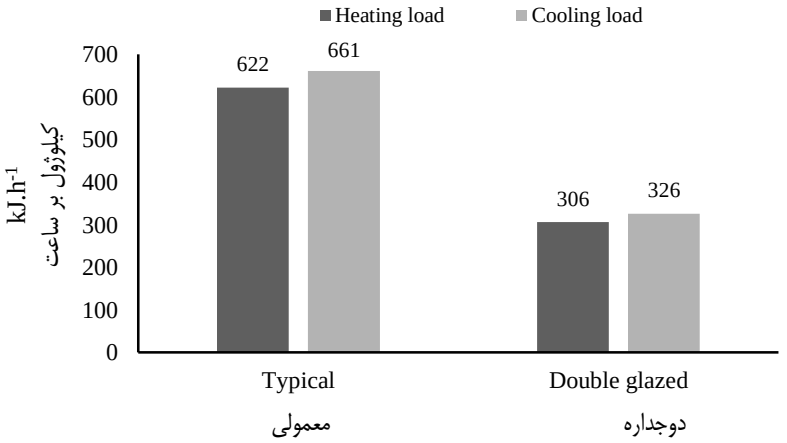
مقایسه بارهای حرارتی و برودتی پنجره‌ها

در مبحث پنجره‌ها نیز به مقایسه بار حرارتی و برودتی بر اساس تفاوت در جنس و مدل آن‌ها پرداخته شد. در بررسی تاثیر جنس پنجره‌ها بر بارهای حرارتی و برودتی، بر اساس شکل ۴ مشاهده گردید که پنجره‌های آهنی دارای بیشترین بار حرارتی و برودتی می‌باشند در حالی‌که پنجره‌های پلاستیکی دارای کمترین بار حرارتی و برودتی می‌باشند. با توجه به این‌که تقریباً یک پنجره با جنس‌های مختلف در یک رنج قیمتی قرار دارد و از لحاظ قیمتی تفاوت معنی‌داری ندارند، لذا انتخاب پنجره از جنس پلاستیک سبب اتلاف انرژی کمتری نسبت به سایر جنس‌ها می‌شود. امروزه از دو مدل پنجره در سالن‌های مرغداری و پرورش استفاده می‌شود که این مدل‌ها شامل پنجره‌های معمولی و پنجره‌های دوجداره می‌باشد. شکل ۵ مقادیر بارهای برودتی و حرارتی را برای این دو مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بارهای برودتی و حرارتی در پنجره‌های دوجداره به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از پنجره‌های معمولی می‌باشد.



شکل ٤– مقایسه بار حرارتی و برودتی برای جنس‌های مختلف پنجره‌های مرغداری

Fig.4. Comparison of heating and cooling loads for different types of poultry house

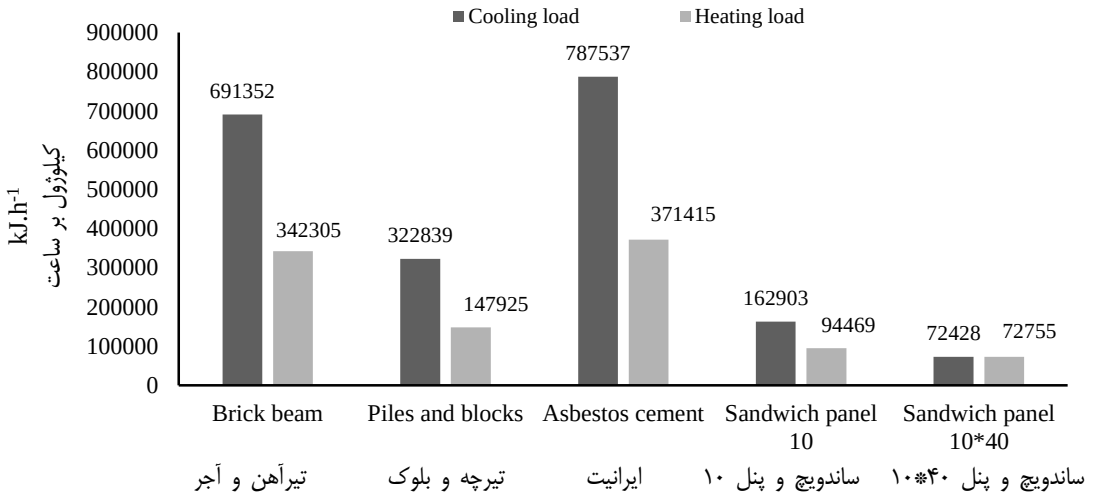


شکل ٥– مقایسه بار حرارتی و برودتی برای مدل پنجره‌ها

Fig.5. Comparison of heating and cooling loads for the windows model

مشخصات سقف سالن‌ها

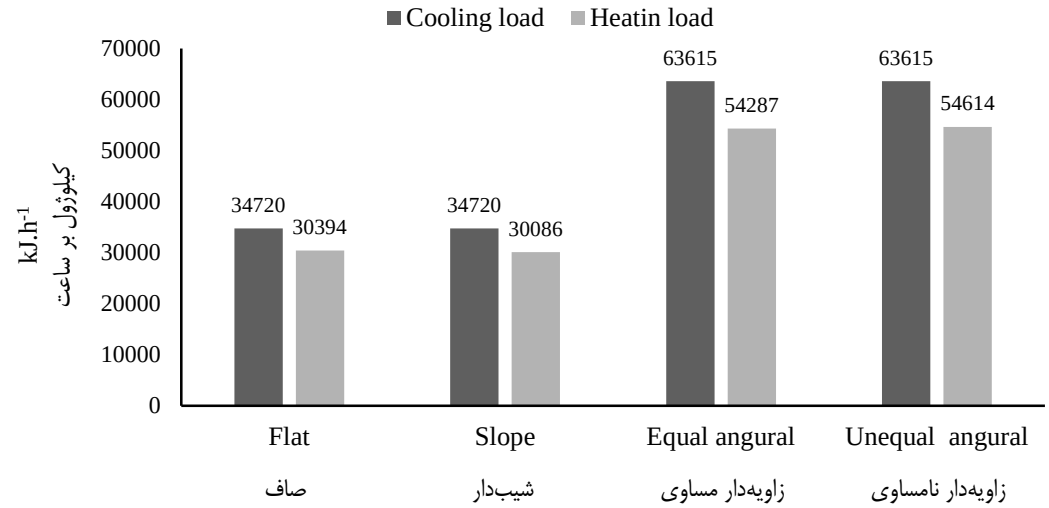
سقف سالن‌ها فضایی است که مقدار خیلی زیادی از تلفات انرژی از آن ناحیه انجام می‌گیرد. لذا انتخاب یک سقف مناسب سبب کاهش هرچه بیشتر تلفات انرژی در سالن‌های مرغداری می‌گردد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که سقف‌ها از جنس ایرانیت به دلیل عدم عایق‌کاری مناسب دارای بیشترین بار حرارتی به میزان ۳۷۱۴۱۶ کیلوژول بر ساعت و بیشترین بار برودتی به میزان ۷۸۷۵۳۵ کیلوژول بر ساعت می‌باشد، در حالی‌که سقف از جنس ساندویچ پنل به دلیل ضریب پایین انتقال حرارت دارای کمترین بار حرارتی به میزان ۷۲۷۵۶ کیلوژول در ساعت و کمترین بار برودتی به میزان ۷۲۴۲۹ کیلوژول در ساعت می‌باشد.



شکل ٦– مقایسه بارهای حرارتی و برودتی برای جنس سقف سالن‌های مرغداری

Fig.6. Comparison of heating and cooling loads for the ceiling of the poultry saloons

مقایسه بارهای حرارتی و برودتی برای انواع سقف‌ها در صورتی‌که از یک جنس مصالح باشند (در این نمونه ساندویچ پنل) نشان می‌دهد که سقف‌های زاویه‌دار با زاویه غیرمساوی دارای بیشترین بار حرارتی به میزان ۶۳۶۱۶ کیلوژول در ساعت و برودتی به میزان ۵۴۶۱۵ کیلوژول در ساعت می‌باشد، در حالی‌که سقف شیب‌دار یک‌طرفه با بار حرارتی ۳۴۷۲۱ کیلوژول در ساعت و برودتی ۳۰۰۸۶ کیلوژول در ساعت دارای کمترین بار حرارتی و برودتی می‌باشد (شکل ۷).



شکل ۷– مقایسه بار حرارتی و برودتی برای نوع سقف سالن

Fig.7. Comparison of heating and cooling loads for the type of roof

انتخاب سالن مرغداری

با توجه به مطالب ذکر شده در قسمت‌های قبلی، اجزای سالن با کمترین بارهای حرارتی و برودتی به‌عنوان سالن پیشنهادی معرفی گردید. (جدول ۱). در ادامه جهت تعیین مناسب‌ترین نوع سالن آن را با سالن‌های مرسوم در نقاط مختلف استان خوزستان از لحاظ میزان بار، هزینه تمام شده و مصرف انرژی مقایسه کرده و مناسب‌ترین نوع سالن، جهت اقلیم‌های مختلف استان خوزستان معرفی گردید. در این تحقیق تفاوت در نوع اجزای سالن مرغداری‌ها، جهت شناسایی عوامل

تاثیرگذار بر مصرف انرژی در پرورش مرغ، در نظر گرفته شد و سایر پارامترهای دخیل در انرژی مصرفی، از جمله جیره غذایی، نیروی انسانی، ضدعفونی، جوجه یک‌روزه، آب مصرفی و غیره در مرغداری‌ها به‌صورت ثابت و به یک میزان در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات اجزای سالن پیشنهادی

Table 1- component properties of suggested saloon

ردیف Row	اجزای سالن Saloon components	مصالح و مدل Materials and type
1	کف Floor	ساخته شده از ملات سیمان Made from concrete
2	دیوار Wall	ساخته شده از ساندویچ پنل به رنگ سفید Made from white panel sandwich
3	در Door	مدل یک لتی فایبرگلاس Fiberglass model
4	پنجره Window	دو جداره با فریم پلاستیکی Double glazed with plastic frame
5	سقف Roof	ساخته شده از دوسقف ساندویچ پنل۱۰ و ۴ به شیوه زاویه‌دار یک‌طرفه به رنگ سفید Made from double-roof sandwich panels 10 and 4 with one-sided angled and white color

در مقایسه بار حرارتی سالن‌های مورد مطالعه، مشاهده می‌شود که سالن‌های بلوکی با ۸۹۱۵۲۵ کیلوژول در ساعت بیشترین بار حرارتی را دارا می‌باشند و سالن‌های پیشنهاد شده در این تحقیق با ۳۰۹۰۶۸ کیلوژول در ساعت کمترین بار حرارتی را داشتند (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه بار حرارتی سالن و مصالح سالن‌های مرسوم با سالن پیشنهادی

Table 2- Comparison of heating load of components in common saloons and suggested saloon

ردیف Row	اجزای سالن Saloon components	بار حرارتی Heating load (kJ h^{-1})			
		آجری Brick	بلوکی Block	پنل مرسوم Common panel	سالن توصیه شده Suggested saloon
1	کف Floor	-	15896	15896	15896
2	دیوار Wall	293368	429356	116873	116873
3	در Door	1210	1210	1067	1046
4	پنجره Window	567	567	505	307
5	رنگ Color	102190	102190	102190	102190
6	سقف Roof	149925	342605	94470	72755
	کل بار حرارتی Total heating load	470717	891525	331001	309068

در مقایسه بار برودتی سالن‌های مورد مطالعه، مشاهده می‌شود که سالن‌های بلوکی با ۱۶۰۴۸۲۸ کیلوژول در ساعت بیشترین بار برودتی و سالن‌های معرفی شده در این تحقیق با ۳۳۰۷۹۵ کیلوژول در ساعت کمترین بار برودتی را داشتند (جدول ۳). شکل ۸ مقایسه بارهای حرارتی و برودتی برای سالن‌های مرسوم و پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مقایسه اقتصادی سالن‌های مرغداری مورد مطالعه

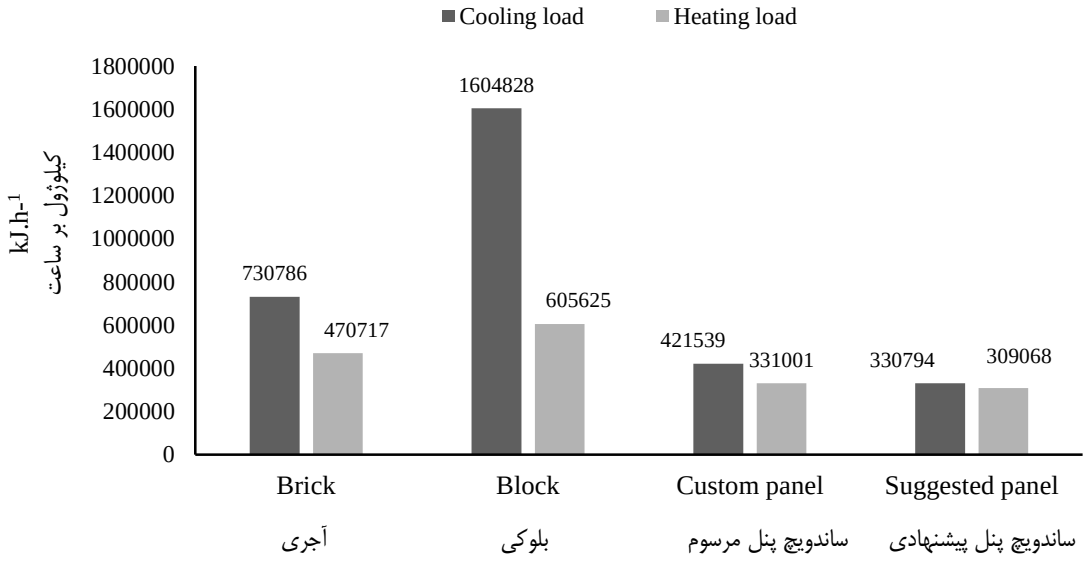
جهت مقایسه هزینه‌های نهایی ساخت انواع سالن، ابعاد همه سالن‌های مورد بررسی به اندازه ۱۶×۸۵×۲/۸ در نظر گرفته شد. در ساخت سالن آجری از سقف مرسوم تیرچه و بلوک و در نوع سالن بلوکی از سقف آجری استفاده شده بود. در نوع پنل مرسوم از سقف ساندویچ پنل با ضخامت ۱۰ به شیوه صاف (معمولی مثل هر دو سالن آجری و بلوکی) به متراژ ۱۳۶۰ متر مربع استفاده شده بود. در ساخت سالن پیشنهادی در این پژوهش به دلیل دارا بودن سقف زاویه‌دار یک‌طرفه این متراژ به ۱۴۰۲ متر مربع افزایش پیدا کرد. دیوارها نیز

به‌ترتیب براساس نام سالن‌ها یعنی آجری، بلوکی و ساندویچ پنل می‌باشند، که در انواع آجری و بلوکی از داخل کاشی کاری و از بیرون پلاستر سیمان و رنگ‌آمیزی انجام گرفته بود، متراژ دیوارها نیز ۵۶۵ متر مربع در نظر گرفته شد. تقریباً کف همه سالن‌های مورد مطالعه نیز از ملات سیمان و ماسه استفاده شده بود. تعداد درها ۴ در نظر گرفته شد که برای سالن آجری از جنس آهنی یک‌لتی، برای سالن بلوکی از جنس آهنی یک‌لتی، برای پنل‌های مرسوم از جنس آلومینیومی کشویی و برای سالن توصیه شده از جنس فایبرگلاس یک لتی بودند. پنجره‌ها برای سالن آجری و بلوکی از جنس فلزی (آهنی) و برای سالن‌هایی از جنس پنل مرسوم جنس آلومینیوم و برای سالن توصیه شده از جنس پلاستیک می‌باشند. سایر هزینه‌ها برای همه سالن ها ۱۰ درصد از کل هزینه‌های ساخت در نظر گرفته شد.

جدول ۳- مقایسه بار برودتی سالن و مصالح سالن‌های مرسوم با سالن پیشنهادی

Table 3- Comparison of cooling load of components in common saloons and suggested saloon

ردیف Row	اجزای سالن Saloon components	بار برودتی Cooling load ($kJ.h^{-1}$)			
		آجری Brick	بلوکی Block	پنل مرسوم Common panel	سالن توصیه شده Suggested saloon
1	کف Floor	39061	39061	39061	39061
2	دیوار Wall	364124	658356	12365	12365
3	در Door	1288	1288	1158	1105
4	پنجره Window	611	611	544	327
5	رنگ Color	10862	11807	94253	94253
6	سقف Roof	322839	787535	162903	72429
	کل بار برودتی Total cooling load	738786	1604828	421539	330795



شکل ۸- مقایسه بار حرارتی و برودتی برای مرغداری‌های مختلف

Fig.8. Comparison of heating and cooling loads for different poultry saloons

جدول ٤– مقایسه هزینه مصالح سالن‌های مرسوم با سالن پیشنهادی (میلیون تومان)

Table 4- Comparison of the cost of components in common saloons with a suggested saloon

ردیف Row	اجزای سالن Saloon components	مدل سالن Type of saloon			
		آجری Brick	بلوکی Block	پنل مرسوم Typical panel	سالن توصیه شده Suggested
1	کف Floor	10.2	10.2	10.2	10.2
2	دیوار Wall	51	42.4	65	65
3	در Door	3.5	3.5	3	3
4	پنجره Window	4	4	4.5	6
5	سقف Roof	176.8	129.2	122.4	193.3
6	رنگ Color	5.1	5.1	0	0
7	سایر Others	25	19	20	27
	هزینه کل Total cost	275.6	213.4	225.1	304.5

در جدول ۴ مشاهده می‌شود که ساخت سالن پنل پیشنهادی در این تحقیق در حدود ۳۰۴/۵ میلیون تومان هزینه در بر دارد و از این لحاظ دارای بیشترین میزان هزینه می‌باشد و سالن بلوکی کمترین هزینه ساخت به میزان ۲۱۳/۴ میلیون تومان می‌باشد. همچنین در این تحقیق به مقایسه میانگین بارهای حرارتی و برودتی سالن پیشنهادی و سالن آجری در استان پرداخته شد. علت انتخاب سالن آجری برای مقایسه این است که این سالن در استان مرسوم‌تر است و بیشتر مرغداران از این سالن‌ها استفاده می‌کنند. با توجه به قیمت ساخت سالن‌ها تفاوت قیمتی معادل ۹/ ۲۸ میلیون تومان بین سالن پیشنهادی و سالن آجری وجود دارد و از طرفی میانگین بار سرمایشی و گرمایشی مورد نیاز این دو سالن نیز در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵– میانگین بار مورد نیاز سالن پیشنهادی و آجری در استان

Table 5- Average required load for the brick saloon and suggested saloon

بار Load	آجری Brick	پنل پیشنهادی Suggested panel
میانگین بار گرمایی Average heading load	847608	610791
میانگین بار سرمایی Average cooling load	3878624	3386231

با توجه به این که حرارت سالن‌ها از طریق گاز طبیعی یا گازوئیل، و برودت آن‌ها نیز با استفاده از مصرف انرژی الکتریسیته تامین می‌شود، لذا به مقایسه مصرف برق و سوخت در مرغداری آجری و پیشنهادی پرداخته شد. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود در صورتی‌که به جای سالن‌های آجری، از سالن پیشنهاد شده در این تحقیق استفاده گردد از تلف شدن ۲۳۶۸۱۷ کیلوژول در ساعت، در بعد حرارتی و ۴۹۲۳۹۳ کیلوژول در ساعت، انرژی در بعد برودتی صرفه‌جویی می‌گردد. مقدار صرفه‌جویی در یک شبانه روز برای بار حرارتی معادل ۵۶۸۸ مگاژول است. با در نظر گرفتن ارزش حرارتی گازوئیل که معادل ۳۸ مگاژول است و تقسیم انرژی ذخیره شده در بعد حرارتی بر ارزش حرارتی یک لیتر گازوئیل معادل میزان گازوئیل ذخیره شده در یک روز به‌دست می‌آید که در اینجا ۱۴۹/۷ لیتر در روز می‌باشد. از طرفی با توجه به هزینه ۳۰۰ تومانی هر لیتر گازوئیل، درآمد طرح برای یک روز معادل ۴۴.۹۰۵ تومان است. با توجه به این‌که مرغداران در استان تقریباً ۵ دوره پرورش در سال دارند در صورتی‌که فرض شود تنها ۵۰ روز مداوم از سیستم گرمایشی استفاده شود عددی معادل ۲,۲۴۵,۰۰۰ تومان انرژی حرارتی ذخیره خواهد شد و این در حالی‌است که راندمان حرارتی وسایل گرمایشی، ۱۰۰ درصد

در نظر گرفته شده است که در عمل این راندمان کمتر است، بنابراین مقدار این مبلغ بیشتر خواهد بود. در برخی از موارد که اطلاعات مربوط به میزان برق و سوخت مصرفی در مرغداری‌ها موجود بود، نتایج نرم‌افزار با نتایج واقعی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که میانگین خطای به‌دست آمده کمتر از ۷ درصد بود و نتایج نرم‌افزار تقریباً قابل‌قبول می‌باشد.

در بعد برودتی نیز هر وات‌ساعت معادل ۳۶۰۰ ژول است که با تبدیل ۵۲۱ مگاژول، عددی معادل ۳۴۷۳ کیلووات‌ساعت، در روز صرفه‌جویی می‌شود. با توجه به قیمت برق در مرغداری‌ها که معادل ۲۷/۳ تومان به ازای هر کیلووات‌ساعت است و با فرض این‌که سیستم سرمایشی ۱۰۰ روز مداوم در سال کار کند هزینه صرفه‌جویی شده در این قسمت ۹۴,۸۱۳,۰۰۰ تومان در سال است. مجموع هزینه‌های صرفه‌جویی شده طرح در سال ۱۱,۷۲۶,۰۰۰ تومان است. باید توجه نمود که این مبلغ با در نظر گرفتن قیمت پایین سوخت به‌دست آمده است و در صورت اعمال قیمت واقعی این مبلغ بیشتر نیز خواهد شد. اگر اختلاف هزینه ساخت دو سالن مورد بحث را بر هزینه اختلاف مصرف انرژی آن‌ها تقسیم کنیم ۲/۴۶ سال که معادل ۲ سال و ۵ ماه است، طول می‌کشد تا اضافه هزینه ساخت سالن مستهلک شود و پس از آن سوددهی طرح شروع می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر اجزای مختلف سالن‌های مرغداری رایج در استان خوزستان (آجری، بلوکی و پنل مرسوم) بر بارهای حرارتی و برودتی مورد بررسی قرار گرفت و اجزای دارای کمترین بارهای حرارتی و برودتی به‌عنوان اجزای سالن بهینه از نظر مصرف انرژی پیشنهاد گردید. در مقایسه بار حرارتی سالن‌های مورد مطالعه، مشاهده می‌شود که سالن‌های بلوکی با ۸۹۱۵۲۵ کیلوژول در ساعت بیشترین بار حرارتی و سالن‌های پیشنهاد شده در این تحقیق با ۳۰۹۰۶۸ کیلوژول در ساعت کمترین بار حرارتی را داشتند. همچنین سالن‌های بلوکی با ۱۶۰۴۸۲۸ کیلوژول در ساعت بیشترین بار برودتی و سالن‌های معرفی شده در این تحقیق با ۳۳۰۷۹۵ کیلوژول در ساعت کمترین بار برودتی را داشتند. به‌طور کلی مقادیر بارهای حرارتی و برودتی برای سالن پیشنهادی نسبت به نوع بلوکی و آجری به‌ترتیب ۲۹/۶ و ۱۸/۲۴ درصد کمتر بود. تفاوت هزینه ساخت سالن پیشنهادی و آجری (مرسوم‌ترین سالن در استان) معادل ۲۸/۹ میلیون تومان بود که با مقایسه تفاوت هزینه انرژی مصرفی در آن‌ها (۱۱/۷۲۶ میلیون) این مبلغ پس از ۲ سال و ۵ ماه و ۱۶ روز قابل جبران بوده و از آن به بعد به‌عنوان سود سرمایه‌گذاری به‌حساب می‌آید.

References

1. AlQdah, K. 2010. Potential opportunities for energy savings in a Jordanian poultry company. Energy Conversion and Management 51: 1651-1655.
2. Bagi, M. 2015. Principles and breeding of broiler chickens. Marze Danesh. Tehran. (In Farsi).
3. Eskandar, M., H. Bakhoda, and M. Almasi. 2015. Economic study of broiler chickens in Ardebil. in International Conference on Economics and Management of Agricultural Sciences. Anzali. (In Farsi).
4. Hasani, A., M. Hir, and S. Farhang. 2013. Measuring Iranian provinces efficiency in meaty poultry production by use of Data Envelopment Analysis. International Research Journal of Applied and Basic Sciences 4: 3338-3346 (In Farsi).
5. Jafarian, M., H. Sadrneya, M. H. Aghkhani, and B. Safari. 2010. The Effect of Heat Damage in Poultry Using the Basic Equations (A Case Study of School of Agriculture of Ferdowsi University of Mashhad). Sixth National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Tehran, Iran. (In Farsi).
6. Karbassi, A. R., H. Jafari, A. Naghikhani, and M. Ramezani. 2015. simulation of Energy Consumption by HVAC systems in a building located in Tehran and comparative study on impacts of orientation and windows sizes on energy consumption. International Conferences of Emerging Trends in energy coservation. Tehran, Iran. (In Farsi).
7. Kochakzadeh, A., and B. Tajari. 2015. Control of energy consumption in poultry industry. in Emerging Trends in Energy Conservation 4rd Conference. Tehran. (In Farsi).
8. Kythreotou, N., S. A. Tassou, and G. Florides. 2011. The contribution of direct energy use for livestock breeding to the greenhouse gases emissions of Cyprus. Energy 36: 6090-6097.
9. Lotfipour, M. S. 2008. Laying Chicken Breeding. Marze Danesh. Tehran. (In Farsi).
10. Mostashari Mohases, M. 2017. Principles of designing broiler chickens in accordance with new breeding methods and minimum energy losses. Agricultural Research, Training and Promotion Organization. (In Farsi).
11. Payandeh, Z., K. Kheiralipour, and M. Karimi. 2016. Evaluation of energy efficiency of broiler production farms using data envelopment analysis technique, case study: Isfahan Province. Iranian Journal of Biosystem Engineering 47: 577-585. (In Farsi).
12. Rajaniemi, M., and J. Ahokas. 2012. A case study of energy consumption measurement system in broiler production. Agronomy Research Biosystem Engineering Special. (In Farsi).

13. Sadrnia, H., M. Khojastehpour, H. Aghel, and A. Saiedi Rashk Olya. 2017. Analysis of different inputs share and determination of energy Indices in broilers production in Mashhad city. Journal of Agricultural Machinery 7: 285-297. (In Farsi).
14. Schwab, M., and C. Simonson. 2004. Review of building energy simulation tools that include moisture storage in building materials and HVAC systems. Draft Report IEA Annex 41.
15. Shekoohi Dehkordi, K. and M. Farhadian. 2017. Investigating the effect of Atrium-related Green Roof Cooling and Heating loads on Energy Management in Pedagogical Spaces in Cold Climate. Journal of Environmental Science and Technology 19: 573-583. (In Farsi).
16. Swan, L. G., and V. I. Ugursal. 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 1819-1835.
17. Vahedi, A., and M. Younesi Almoti. 2017. Determinination of Energy Indices of Broiler Units in Alborz province. Agricultural Mechanization and Systems Research 17: 41-54. (In Farsi).
18. Valade, R. E. 2009. Development and verification of a simplified building energy model. Georgia Institute of Technology.
19. Wang, Y., W. Zheng, H. Shi, and B. Li. 2018. Optimising the design of confined laying hen house insulation requirements in cold climates without using supplementary heat. Biosystems Engineering 174: 282-294.
20. Zanganeh, M., G. Haydari nejad, and S. Delfani. 2009. Determination of the amount of refrigerated load of the building using thermal comfort calculations and comparison with Karir software. 7th Annual Conference of Mechanical Engineering. Tehran, Iran. (In Farsi).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 361-373

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۷۳-۳۶۱

Selection of The Most Suitable Type of Poultry Saloon in terms of Energy Consumption in Khuzestan Province

H. Vakili[1], M. Kiani Deh Kiani[2*], M. Changizian[3]

Received: 15-12-2018
Accepted: 25-05-2019

Introduction

According to the importance of energy and the impact of this input on the final price of a product, selection of materials and components of poultry saloons is very important. Poultry saloons are divided into two types: open saloons and closed saloons. In closed saloons, the choice of materials and components of the saloon (door, window, etc.) are more sensitive than the open type. Due to the climatic conditions of Khuzestan province, all of the used saloons in this province are almost closed. Poultry farms in Khuzestan province have a lot of cooling load in the warm seasons. If the materials and components of the saloons are not chosen properly, energy losses increase, and as a result, the price of meat increases. Therefore, investigating of heating and cooling loads of saloons and use of suitable components to prevent energy losses is necessary. Energy modeling of saloons and buildings is done by various software (Plast Energy, Design Builder, Trnsys, etc.). One of the most efficient and precise of this software is Carrier.

Materials and Methods

This study was conducted to calculate heating and cooling loads in different climates of Khuzestan province. In this research, the cities of Izeh, Shoosh, Abadan and Andimeshk were selected as corresponding to different climates in the province.

Required data for software was collected in three categories: (a) Weather data (geographic information, location of the saloon, local time zone and local soil specifications), (b) Data about the physical properties of the building (general specifications of the space, internal sources of heat production (personslabors, poultry, equipment), (c) Specifications of walls, floor, windows and doors, ceiling and lighters, (d) Infiltration of air, (e) Systems, and (f) Information on power and fuel consumption.

In this research, a rectangular saloon with dimensions of 85×16 meter was considered for all three types of conventional saloons in the province (block, brick and panel), which are the common dimensions and the capacity of these saloons is 20,000 broiler chickens. In this study, Carrier software was used to calculate heating and cooling loads. The results of software were verified by the amount of fuel and power consumption.

Results and Discussion

The sand and soil floors had the highest cooling load by 48828 and 53012 kJ h^{-1}, respectively, while concrete and mosaic floors had lower cooling load than them. The heating load of these two floors (3906 kJ h^{-1}) was less than that in the sand and soil floors. Concrete floor had better conditions to choose because of the less cost than the mosaic floor.

Comparison of heating and cooling loads in different types of walls made of various materials showed that the block wall had the highest heating load of 429356 kJ h^{-1} and the highest cooling load by 658356 kJ h^{-1}, while the sandwich panel wall had the lowest heating load by 116873 kJ h^{-1} and the lowest cooling load by 123618 kJ h^{-1}.

Three types of doors are commonly used in poultry houses: iron, fiberglass and aluminum. The results showed that the iron and fiberglass doors had the highest and lowest heating and cooling loads, respectively. The investigation of the effect of different types of windows on heating and cooling loads showed that iron and plastic windows had the highest and lowest heating and cooling loads, respectively. The results showed that Irannait ceiling had the highest heating and cooling loads by 371416 kJ h^{-1} and 787535 kJ h^{-1}, respectively, while the ceiling made of sandwich panel had the lowest heating and cooling loads by 72756 kJ h^{-1} and 72429 kJ h^{-1}, respectively, because of low heat transfer coefficient.

Comparison of heating load of the saloons showed that the block saloon had the highest heating load by 891525 kJ h^{-1} and the suggested saloon in this study had the lowest heating load by 309068 kJ h^{-1}. The block and suggested saloons also had the highest and lowest cooling loads by 1604828 kJ h^{-1} and 330795 kJ h^{-1}, respectively.

1- MSc. graduated, Biosystem Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Biosystem Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.kiani@scu.ac.ir)

Conclusions

The amount of heating and cooling loads for suggested saloon were 29.6% and 18.24% lower than that of brick and block saloons, respectively. The difference in the cost of constructing suggested and brick (the most common saloon in the province) saloons was 28.9 million tomans. By considering the difference in the cost of energy consumption of them (11.726 million tomans), this amount will be compensated after 2 years and 5 months and then will be returned on investment.

Keywords: Building components, Carrier software, Cooling load, Economic comparison, Heating load

شرایط پذیرش مقاله در نشریه علمی 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 به‌صورت 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 (به‌صورت 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 به‌ترتیب 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 به‌طور 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 به‌صورت 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- صفحه‌آرایی

- 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 درنظر گرفتن چکیده مبسوط انگلیسی از ۱۵ صفحه تجاوز نکند.
- کلیه سطرهای متن مقاله به‌صورت 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 به‌جای 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 به‌ترتیب با اندازه ۱۲ و ۱۰ نوشته شود.
- شماره جدول و شکل به‌صورت توپر (Bold) بوده و کلیه شکل‌ها و جدول‌ها بدون کادر باشند.
- شماره و عنوان هر جدول در بالای آن به‌صورت 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 جزییات 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. به‌طور 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 به‌صورت 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.

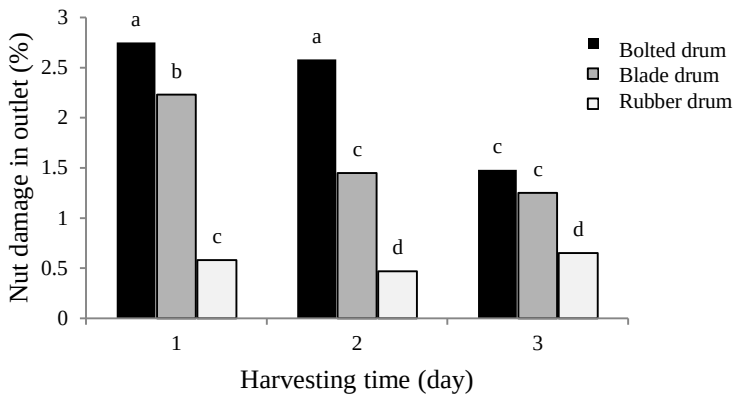
جدول ۱– نهاده های مصرف شده در سال اول مزرعه زعفران

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})**
کورم‌های 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 m^3 (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 شکل‌ها 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.
- سال‌های شمسی به میلادی تبدیل شوند.
- در برگردان اسامی افراد اطمینان حاصل شود که املاء آن‌ها 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 پایگاه‌های اطلاعاتی مثل SID، irandoc، Sciencedirect و غیره مراجعه شود و یا رأساً با شخص مورد نظر تماس گرفته شود.**

- نحوه رجوع منابع در متن به‌صورت اسم نویسنده (نویسندگان) و تاریخ انتشار منبع باشد. در ارجاع بـه منـابع باید تا حد ممکن از نام بردن افراد در شروع جمله خودداری و منابع در انتهای جمله و در پرانتز ارائـه شـوند. مثال:

(Loghavi, 2008).

- برای منبعی با دو نویسنده از کلمه "and" بین آن‌ها به‌صورت زیر استفاده شود:

(Aghkhani and Abbaspour-Fard, 2009).

- برای مقاله‌ای با بیشتر از دو نویسنده از کلمه ایتالیک "*et al*." به‌صورت زیر استفاده شود:

(Abbaspour-Fard *et al*., 2008).

- هنگام ارجاع همزمان به چند منبع از علامت ";" به‌صورت 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 انـدازه ۱۲در فهرسـت منـابع 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 به‌جز 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 coulter. International Agricultural Engineering Conference (IAEC). Asian Association for Agricultural Engineering, Bangkok, Thailand.

۷- مقالات و منابع الکترونیکی

Brittion, A. 2006. How much and how often should we drink British Medical Journal, 332: 1224-1225. Available at: http://bmj.bjjournals.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 به‌صورت 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 به‌خصوص برای اسامی اشخاص و اسامی خاص جلوگیری شود. این امر برای صحت استنادات ضروری است. به‌منظور کمک شما در این باره فایل‌هایی آماده شده است که می‌توانید 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.

The Title Should Be Times New Roman, Font Size 12, Bold and Center. The Scientific Name in Title and in Text Should Be *Italic*.

Introduction Text type here. Text type here. Text type here.

Estimation and Selection of Fuel Consumption Forecasting Model for MF399 Tractor (Case study: Pars Abad Region of Moghan) 345
S. Abbasi, A. Shokri, M. Gholami parshokohi, S. M. Seyedan, A. Jafari

Investigating The Long-term Effect of Preventive Maintenance Strategy on The Operational Efficiency and Failure Rate of Sugarcane Harvester Using Time Series 358
F. Afsharnia, A. Marzban

Selection of The Most Suitable Type of Poultry Saloon in terms of Energy Consumption in Khuzestan Province 372
H. Vakili, M. Kiani Deh Kiani, M. Changizian

Contents

Design, Fabrication and Evaluation of a Wet Cattle Manure Size Reduction Machine 129
J. Soleimani, M. H. Kianmehr, S. R. Hassan Beygi, S. M. Shariatmadari, K. Rezapoor

Implementation of a Machine Olfaction for the Detection of Adulteration in Cow Ghee 139
F. Ayari, E. Mirzaee- Ghaleh, H. Rabbani, K. Heidarbeigi

Simultaneous Localization and Mapping in Greenhouse with Stereo Vision 153
Z. Khosrobeygi, Sh. Rafiee, S. S. Mohtasebi, A. Nasiri

A Modern Approach for Classification of Soil Aggregates based on Stereo Vision 166
A. Azizi, Y. Abbaspour-Gilandeh, T. Mesri Gundoshmian, H. Abrishami Moghaddam

Modeling and Predicting the Forces on Moldboard Plough by using Response Surface and Artificial Neural Network 185
M. Rahmatian, R. Yeganeh, M. A. Nematollahi

Modeling and Optimization of the Grinding Cereals to Produce Poultry Feed in the Hammer Mill using Response Surface Method (RSM) 200
Z. Zibahoosh, J. Khodaei, S. Zareei

Optimization the Spray-Drying Process of Moldavian Balm Plant Extract using Response Surface Methodology and TOPSIS Method 212
E. Rahmati, F. Sharifian, M. Fattahi, G. Najafi

Prediction the inside Variables of Even-span Glass Greenhouse with Special Structure by Artificial Neural Network (MLP-RBF) Models 226
M. Hamdani, M. Taki, M. Rahnama, A. Rohani, M. Rahmati-Joneidabad

The Effect of Harvesting Time in Moghan on Corn Losses and its Prediction using Fuzzy Logic 240
M. Abbasgholipour

Study of The Vapor Thermo-Compressor to Reduce Energy Consumption in the Sugar Production Line using Computational Fluid Dynamics 252
A. Rezvanivand fanaei, A. Hasanpour, A. M. Nikbakht

Aero-acoustical Study of Axial Fan using Computational Fluid Dynamics 264
B. Sabralilou, A. Mohebbi, E. Akbarian, A. Rezvanivand fanaei

Sound Signals Processing of Roosters for Sexual Maturity and Puberty Diagnosis 271
M. Yavari, A. Banakar, M. Sharafi

Optimization and Evaluation of Working Conditions of New Tillage Blade for Use in Tillage Tools 286
M. Mohammadi, S. H. Karparvarfard, S. Kamgar, M. Rahmatian

Investigating the Impact of the Magnetized Water on the Growth and Germination of Five Wheat Grain Seeds 298
S. Zarei, M. Kasraei, M. A. Nematollahi

Effect of Compaction and Soil Moisture on Apparent Electrical Conductivity of Soil and Rolling Resistance of Tractor Tire 312
G. Safar alizadeh herisi, A. M. Borghei, A. Sharifi Malvajerdi

Effect of Inter-row Tillage on Yield and Water Productivity of Sugar Beet 323
A. Heidari

The Effect of Rotational Speed, Temperature, Type of Screw and Die Diameter on the Amount of Oil Extracted from Sesame 336
M. Asafi, R. Meamar Dastjerdi, M. Noshad

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 10 **No. 2** **2020**

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
Aboonajmi, M.	Mechanics of Agricultural Machinery	Asso. Prof. University of Tehran
Borgheei, A. M.	Mechanics of Agricultural Machinery	Prof. Member of Iranian Society of Mechanical Engineers
Khoshtaghaza, M. H.	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Tarbiat Modares University
Raji, A	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. University of Ibadan, Nigeria
Saiedirad, M. H.	Mechanics of Agricultural Machinery	Asso. Prof. Agricultural Engineering Research Institue,
Abbaspour-Fard, M. H.	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Ferdowsi University of Mashhad
Alimardani, R.	Mechanics of Agricultural Machinery	Prof. University of Tehran
Ghazanfari Moghaddam, A.	Mechanics of Biosystems Engineering	Prof. Shahid Bahonar University of Kerman
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
Nasirahmadi, A.	Precision Livestock Farming	Research Asso. University of Kassel

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. 10 No. 2

2020

Journal of Agricultural Machinery

Iranian Society of Mechanical Engineers (ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Design, Fabrication and Evaluation of a Wet Cattle Manure Size Reduction Machine 129
J. Soleimani, M. H. Kianmehr, S. R. Hassan Beygi, S. M. Shariatmadari, K. Rezapoor

Implementation of a Machine Olfaction for the Detection of Adulteration in Cow Ghee 139
F. Ayari, E. Mirzaee- Ghaleh, H. Rabbani, K. Heidarbeigi

Simultaneous Localization and Mapping in Greenhouse with Stereo Vision 153
Z. Khosrobeygi, Sh. Rafiee, S. S. Mohtasebi, A. Nasiri

A Modern Approach for Classification of Soil Aggregates based on Stereo Vision 166
A. Azizi, Y. Abbaspour-Gilandeh, T. Mesri Gundoshmian, H. Abrishami Moghaddam

Modeling and Predicting the Forces on Moldboard Plough by using Response Surface and Artificial Neural Network 185
M. Rahmatian, R. Yeganeh, M. A. Nematollahi

Modeling and Optimization of the Grinding Cereals to Produce Poultry Feed in the Hammer Mill using Response Surface Method (RSM) 200
Z. Zibahoosh, J. Khodaei, S. Zareei

Optimization the Spray-Drying Process of Moldavian Balm Plant Extract using Response Surface Methodology and TOPSIS Method 212
E. Rahmati, F. Sharifian, M. Fattahi, G. Najafi

Prediction the inside Variables of Even-span Glass Greenhouse with Special Structure by Artificial Neural Network (MLP-RBF) Models 226
M. Hamdani, M. Taki, M. Rahnama, A. Rohani, M. Rahmati-Joneidabad

The Effect of Harvesting Time in Moghan on Corn Losses and its Prediction using Fuzzy Logic 240
M. Abbasgholipour

Study of The Vapor Thermo-Compressor to Reduce Energy Consumption in the Sugar Production Line using Computational Fluid Dynamics 252
A. Rezvanivand fanaei, A. Hasanpour, A. M. Nikbakht

Aero-acoustical Study of Axial Fan using Computational Fluid Dynamics 264
B. Sabralilou, A. Mohebbi, E. Akbarian, A. Rezvanivand fanaei

Sound Signals Processing of Roosters for Sexual Maturity and Puberty Diagnosis 271
M. Yavari, A. Banakar, M. Sharafi

Optimization and Evaluation of Working Conditions of New Tillage Blade for Use in Tillage Tools 286
M. Mohammadi, S. H. Karparvarfard, S. Kamgar, M. Rahmatian

Investigating the Impact of the Magnetized Water on the Growth and Germination of Five Wheat Grain Seeds 298
S. Zarei, M. Kasraei, M. A. Nematollahi

Continue Content in Cover