انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی
ماشین های کشاورزی

دانشگاه فردوسی مشهد

جلد۱۲ شماره ۲
سال ۱۴۰۱
(شماره پیاپی: ۲۴)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

شناسایی زنجرک پسته *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) با استفاده از پردازش تصویر و شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۰۸
زینب عزیزپور، حسنعلی واحدی، علی نجات لرستانی

تحلیل اکسرژی سامانه تولید بخار به‌منظور کاوش پتانسیل بهینه‌سازی مصرف انرژی ۱۲۰
ایمان گلپور، پرویز احمدی مقدم، علی محمد نیکبخت

توسعه شبیه‌ساز رایانه‌ای به‌منظور مدیریت بهتر شرایط تهویه‌ای مرغداری و بهینه‌سازی تولید ۱۳۲
حامد فرزانپور، سیدصادق سیدلو هریس، حبیبه نعلبندی

بررسی هضم مشترک کود مرغی با روده مرغ و محتویات آن و محتویات شکمبه گاوی ۱۴۸
آیسودا میرزایی، محسن سلیمانی، هوشنگ بهرامی، مجتبی نوروزی مصیر

انتخاب طول‌موج‌های طیفی حساس از میان داده‌های فراطیفی جهت تشخیص برگ‌های درخت پسته آلوده به پسیل ۱۶۰
علی مقیمی، آمنه سازگارنیا، محمد حسین آق خانی

بهینه‌سازی واحد کوبنده برای دانه‌های آفتاب‌گردان آجیلی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) ۱۷۰
اسماعیل چاوشقلی، شمس‌اله عبداله پور، حمیدرضا قاسم زاده

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیر تلفات کمباین برنج برپایه حسگر پیزوالکتریک در مقیاس آزمایشگاهی ۱۸۳
مهدی حسن‌نیا سماکوش، سید رضا موسوی سیدی، علیرضا مهدویان

مطالعه امکان تأمین انرژی تولید تخته نئوپان از باگاس با استفاده از ضایعات نیشکر (مطالعه موردی: کشت و صنعت دعبل خزاعی) ۱۹۴
ابراهیم البوعطیوی، عباس عساکره، حسن ذکی دیزجی، یعقوب منصوری

تحلیل انرژی و اکسرژی خط تغلیظ آلبالو ۲۰۸
نسیم صداقت حرفه، علی محمد نیکبخت، حسین مبلی، علی‌رضا کیهانی، احمد پیری

اثر سامانه‌های خاک‌ورزی و کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند ۲۲۰
احمد حیدری، علی قدمی فیروزآبادی

بررسی میکروسکوپی اثر پلاسمای سرد بر جوانه‌زنی بذر نخود ۲۳۲
محسن فریدونی، حسین حاجی‌آقاعلیزاده

توسعه سامانه الکترونیکی برای تعیین بار عمودی وارده بر اکسل عقب کمباین غلات در حین حرکت ۲۴۲
اعظم رضایی، حسن مسعودی، حسن ذکی دیزجی، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی

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

"بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

جلد ۱۲ شماره ۲ تابستان ۱۴۰۱

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)
پوررضا، علیرضا گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی (دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا)
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
سوپاکیت، سایاسونثرن استادیار- دانشکده کشاورزی (دانشگاه کاستسارت، تایلند)
عباسپور فرد، محمدحسین استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
علیمردانی، رضا استاد- گروه ماشین‌های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)
عمادی، باقر استاد مدعو- گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک (دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا)
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 گروه مهندسی کشاورزی (دانشگاه کاسل آلمان)

ناشر: انتشارات 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:
AGRIS، CABI، DOAJ، EBSCO، Google scholar، پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، سامانه نشریات علمی، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)، مرجع دانش (CIVILICA)

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 ۴ شماره در سال و به‌صورت آنلاین منتشر می‌شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

شناسایی زنجرک پسته *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) با استفاده از پردازش تصویر و شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۰۸
زینب عزیزپور، حسنعلی واحدی، علی نجات لرستانی

تحلیل اکسرژی سامانه تولید بخار به‌منظور کاوش پتانسیل بهینه‌سازی مصرف انرژی ۱۲۰
ایمان گلپور، پرویز احمدی مقدم، علی محمد نیکبخت

توسعه شبیه‌ساز رایانه‌ای به‌منظور مدیریت بهتر شرایط تهویه‌ای مرغداری و بهینه‌سازی تولید ۱۳۲
حامد فرزانپور، سیدصادق سیدلو هریس، حبیبه نعلبندی

بررسی هضم مشترک کود مرغی با روده مرغ و محتویات آن و محتویات شکمبه گاوی ۱۴۸
آیسودا میرزایی، محسن سلیمانی، هوشنگ بهرامی، مجتبی نوروزی مصیر

انتخاب طول‌موج‌های طیفی حساس از میان داده‌های فراطیفی جهت تشخیص برگ‌های درخت پسته آلوده به پسیل ۱۶۰
علی مقیمی، آمنه سازگارنیا، محمد حسین آق خانی

بهینه‌سازی واحد کوبنده برای دانه‌های آفتاب‌گردان آجیلی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) ۱۷۰
اسماعیل چاوشقلی، شمس‌اله عبداله پور، حمیدرضا قاسم زاده

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیر تلفات کمباین برنج برپایه حسگر پیزوالکتریک در مقیاس آزمایشگاهی ۱۸۳
مهدی حسن‌نیا سماکوش، سید رضا موسوی سیدی، علیرضا مهدویان

مطالعه امکان تأمین انرژی تولید تخته نئوپان از باگاس با استفاده از ضایعات نیشکر (مطالعه موردی: کشت و صنعت دعبل خزاعی) ۱۹۴
ابراهیم البوعطیوی، عباس عساکره، حسن ذکی دیزجی، یعقوب منصوری

تحلیل انرژی و اکسرژی خط تغلیظ آلبالو ۲۰۸
نسیم صداقت حرفه، علی محمد نیکبخت، حسین مبلی، علی‌رضا کیهانی، احمد پیری

اثر سامانه‌های خاک‌ورزی و کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند ۲۲۰
احمد حیدری، علی قدمی فیروزآبادی

بررسی میکروسکوپی اثر پلاسمای سرد بر جوانه‌زنی بذر نخود ۲۳۲
محسن فریدونی، حسین حاجی‌آقاعلیزاده

توسعه سامانه الکترونیکی برای تعیین بار عمودی وارده بر اکسل عقب کمباین غلات در حین حرکت ۲۴۲
اعظم رضایی، حسن مسعودی، حسن ذکی دیزجی، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 107-118

Identification of *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) Using Image Processing and Artificial Neural Networks

Z. Azizpour[1], H. Vahedi[2], A. N. Lorestani[3*]

1- MSc Student, Plant Protection Department, Agricultural Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran
2- Associate Professor, Plant Protection Department, Agricultural Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran
3- Associate Professor, Mechanical Engineering of Biosystems Department, Agricultural Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: lorestani@razi.ac.ir)

Received: 28-05-2019
Revised: 16-11-2019
Accepted: 02-12-2019

How to cite this article:
Azizpour, Z., H. Vahedi, and A. N. Lorestani. 2022. Identification of *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) Using Image Processing and Artificial Neural Networks. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 107-118. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.81004.

Introduction

Pistachio or Green Gold is one of the most important agricultural crops and is especially important for Iranian exports. A group of pistachio's pests mainly feed on pistachio, among which *Idiocerus stali* is very important. Conventional methods for identifying insects using identification keys are time-consuming and costly. Due to the rapid development of the Pistachio industry, the use of artificial intelligence techniques such as image processing, for identification and population monitoring is highly recommended. On the other hand, little research was carried out on *I. stali*. Therefore, in this research, *I. stali* was selected as a target insect for the identification and counting on sticky yellow cards using image processing techniques and artificial neural networks. The purpose of this study was to determine the feasibility of *I. stali* identification algorithm by image processing, to determine the possibility of separation and counting of *I. stali* from other non-target insects by artificial neural network and to determine its accuracy in identification of *I. Stali*.

Materials and Methods

Idiocerus stali was selected as the target insect for identification. Sticky yellow cards were used for collecting samples. Taking the photos with the help of a SONY Handycam Camera, which had a 12-megapixel resolution and G lens, was carried out (SONY, HDR-XR500, CMOS, SONY Lens G, Made in Japan). Then insects were counted on each card manually and the data was recorded. The data, which were digital images of yellow sticky cards, were imported into the MatLab R2017b software environment. A total of 357 color properties and 20 shape's features for the identification of *I. stali* were extracted by an image processing algorithm. Color properties were divided into two categories of mean and standard deviation and characteristics related to vegetation indices. An ANN-PSO (Artificial Neural Network hybrid method-Particle Swarm Optimization) algorithm was used to select the effective features. The selected effective characteristics for insect classification were: Color index for extra collective vegetation related to HSL color space, normalized difference index for LCH color space, gray channel for color space YCbCr, second component index minus third component for color space YCbCr, area and mean of the first, second and third components of color space Luv.

Results and Discussion

Comparing the results with the results of Qiao *et al.* (2008), we found that in his study, which divided the data into three categories, for medium and high-density groups, the detection rate was 95.2% and 94.6%, respectively. On the other hand, in low densities (less than 10 trapped insects); its detection rate was 72.9%, while the detection rate of the classifier system designed in this study for different densities of trapped insects, was identical and equal to 99.59%. Also, comparing the results of this study with Espinoza *et al.* (2016), we found that their algorithm in whiteflies detection had a high accuracy of about 0.96 on a sticky yellow card, while the Thrips identification algorithm accuracy was 0.92 on a sticky blue card. As stated above, the correct detection rate of *I. stali* by the algorithm designed in this study was 99.72%.

Conclusion

The results showed the feasibility of the new method for identifying the pest insects without destroying them on the farm and in natural light conditions and in a short time and with very high accuracy. This suggests that this algorithm can be applied to the machine vision system and can be used in future in the construction of agricultural robots.

Keywords: Artificial Neural Network, Classification, Identification, Image processing

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۱۸-۱۰۷

شناسایی زنجرک پسته *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) با استفاده از پردازش تصویر و شبکه‌های عصبی مصنوعی

زینب عزیزپور[۱]، حسنعلی واحدی[۲]، علی نجات لرستانی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱

چکیده

استراتژی مدیریت تلفیقی آفات (IPM)، به پایش پیوسته جمعیت آفات وابسته است، این کار نه تنها زمان‌بر است، بلکه وابستگی زیادی به داوری انسان دارد و پر هزینه نیز می‌باشد. استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به جای تصمیم‌گیری‌های دستی و انسانی، علاوه بر این که سبب افزایش بهره‌وری می‌گردد، از دقت بالایی نیز برخوردار است. پسته، یک محصول تجاری است و هر ساله خسارت زیادی توسط حشرات به تولیدکنندگان این محصول وارد می‌شود. گروهی از آفات پسته عمدتاً از میوه پسته تغذیه می‌کنند، که از این گروه زنجرک پسته، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در این تحقیق زنجرک پسته به‌عنوان حشره هدف جهت شناسایی انتخاب شد. برای جمع‌آوری نمونه‌ها از کارت‌های زرد چسبنده استفاده شد. ۳۵۷ خصوصیت رنگی و ۲۰خصوصیت شکلی برای شناسایی زنجرک پسته به‌وسیله الگوریتم پردازش تصویر استخراج شد. خصوصیات رنگی به دو دسته‌ی خصوصیات مربوط به میانگین و انحراف‌معیار و خصوصیات مربوط به شاخص‌های سبزی تقسیم شدند. از ۱۷ فضای رنگی مختلف مثل RGB، HSV و غیره برای استخراج خصوصیات و از روش هیبرید شبکه عصبی مصنوعی-الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (ANN-PSO) برای انتخاب خصوصیات مؤثر استفاده گردید. خصوصیات مؤثر انتخابی جهت طبقه‌بندی حشرات عبارتند از: شاخص رنگی برای پوشش گیاهی استخراجی مربوط به فضای رنگی HSL، شاخص تفاضل نرمال شده مربوط به فضای رنگی LCH، کانال خاکستری مربوط به فضای رنگی YCbCr، شاخص مؤلفه دوم منهای مؤلفه سوم مربوط به فضای رنگی YCbCr، مساحت و میانگین مؤلفه های اول، دوم و سوم فضای رنگی Luv. نرخ شناسایی الگوریتم پردازش تصویر طراحی شده، ۹۹/۷۲درصد کل اشیا (زنجرک پسته، سوسک چوب‌خوار قرمز پسته و سایر حشره‌های غیر هدف و متفرقه) می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی، توانایی طبقه‌بندی حشرات به سه کلاس (زنجرک پسته، سوسک چوب‌خوار قرمز پسته و سایر حشره‌های غیر هدف و متفرقه) و دو کلاس (زنجرک پسته و سوسک چوب‌خوار قرمز پسته) به‌ترتیب با دقت ۹۱/۵۳ و ۹۹/۵۹ درصد را دارند.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، زنجرک پسته، شبکه عصبی مصنوعی، شناسایی

مقدمه

پسته یا طلای سبز یکی از محصولات مهم کشاورزی است و در میان محصولات صادراتی ایران، از اهمیت ویژه و اعتبار بالایی برخوردار می‌باشد. ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده و صادرکننده پسته در سطح جهانی می‌باشد (Karbasi and Taohidi, 2015). سطح زیر کشت پسته در ایران در سال ۲۰۱۷ میلادی برابر ۴۲۹۵۳۵ هکتار بوده که با برداشت ۵۷۴۹۸۷ تن محصول در آن سال، عملکرد ۱۳۳۸/۶ کیلوگرم بر هکتار به‌دست آمد (FAO, 2017). در باغات پسته آفات متنوعی دیده می‌شود که از قسمت‌های مختلف درخت پسته تغذیه نموده و خسارت می‌زنند. گروهی از آن‌ها عمدتاً از میوه پسته تغذیه می‌کنند، که از این گروه زنجرک پسته[۴]، دارای اهمیت زیادی می‌باشد (Jalilvand and Kashani-Zadeh, 2013)، به‌طوری‌که در باغ‌های آلوده اگر با آن مبارزه نشود، خسارت سنگینی به بار می‌آورد و کاهش معنی‌داری در عملکرد رخ خواهد داد (Mehrnejad, 2001). شناسایی عبارت است از آگاهی از جنس و گونه‌ی هر نمونه از جاندار با بهره‌گیری از مجموعه‌ها و منابع علمی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- دانشیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: lorestani@razi.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.81004

4- Pistachio Leaf hopper

موجود. واژه‌ی شناسایی به‌صورت تعیین هویت و تشخیص نیز بیان می‌شود. برای شناسایی مهم‌ترین وسیله‌ی مورد نیاز تاکسونومیست، کلید شناسایی است. تهیه‌ی کلید شناسایی مستلزم صرف زمان زیادی می‌باشد. معمولاً مشخصات ریخت‌شناسی مثل رنگ بدن، طول بدن، اندازه بدن و غیره بیش از دیگر خصوصیات در طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Modarres Awal, 2009). تصویر دیجیتالی ماتریسی دو در دو است که هر زوج از اندیس‌های سطری و ستونی آن، یک نقطه از تصویر را مشخص می‌کند. عناصر این ماتریس پیکسل نامیده می‌شوند. برای شناساندن رنگ یک پیکسل به نرم‌افزار، مدل‌های مختلفی وجود دارد که مدل رنگ RGB به دلیل سادگی کار با آن، بهترین مدل بوده و بیشتر از آن استفاده می‌شود. هر پیکسل از یک تصویر رنگی RGB، دارای سه مؤلفه به نام‌های مؤلفه قرمز[1]، سبز[2] و آبی[3] می‌باشد. این اجزا متناسب با نوع کلاس داده، مقادیر محدودی خواهند داشت. به‌عنوان مثال در صورتی که تصویر RGB در کلاس داده double، unit8 یا unit16 باشد به‌ترتیب دارای مقادیری بین صفر و یک، صفر و ۲۵۵ یا صفر و ۶۵۵۳۵ می‌باشند. سایر فضاهای رنگی با استفاده از این فضای رنگی درست شده‌اند. به‌طور کلی به عملیاتی که قبل از پردازش اصلی تصویر دیجیتال صورت می‌گیرد، پیش‌پردازش گویند. به‌عنوان مثال تغییر مقیاس تصویر، چرخش تصویر، استخراج نواحی مورد نظر در یک تصویر و غیره. از طرفی دیگر، به مجموعه عملیاتی که بعد از اجرای بخشی از پردازش تصویر صورت می‌گیرد، عملیات پس‌پردازش گویند. به‌عنوان مثال، به‌منظور استخراج خصوصیات شکلی نیاز به تبدیل تصویر دودویی می‌باشد (Gonzalez and Woods, 2018). فرآیند پردازش تصویر در چهار مرحله پیش‌پردازش، استخراج خاصیت[4]، انتخاب خاصیت و طبقه‌بندی هوشمند انجام می‌گیرد. ابتدا از یک یا چند نمونه مورد مطالعه، با استفاده از دوربین دیجیتال، تصویر تهیه می‌شود. گام بعدی پردازش تصویر است، که تصاویر رنگی را به تصاویر سیاه و سفید تبدیل می‌کنند، سپس به تصویر باینری تبدیل می‌شوندکه تنها شامل دو بخش سیاه و سفید است که طی آن، ناحیه مورد نظر از پس زمینه تصویر جدا می‌شود (Solomon and Breckon, 2011). سپس استخراج خاصیت صورت می‌گیرد و خاصیت‌های استخراج شده طبقه‌بندی می‌شوند. طبقه‌بندهای مختلفی همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی[5] می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (Ghaiwat and Arora, 2014). یکی از مهم‌ترین خصوصیات به‌منظور قطعه‌بندی و هم‌چنین طبقه‌بندی، خصوصیات رنگی است. بیست خصوصیت شکلی مختلف از جمله طول، عرض، مساحت، محیط، لگاریتم نسبت طول به عرض، نسبت محیط شکل به محیط مستطیل در برگیرنده شکل، نسبت عرض به طول، نسبت مساحت به طول، خروج از مرکزیت، تمایل، سطح محدب[6]، سطح یکپارچه، قطر معادل، عدد اویلر، یکپارچگی، محدوده[7]، کشیدگی، فشردگی، نسبت تصویر و نسبت طول به محیط استخراج می‌شوند. انتخاب خصوصیات مؤثر در میان خصوصیات استخراج شده به‌منظور طبقه‌بندی بسیار پراهمیت می‌باشد. روش‌های مختلفی برای انتخاب خصوصیات مؤثر مثل هیبرید شبکه عصبی مصنوعی– الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[8]، وجود دارد (Gonzalez *et al.*, 2004). شبکه‌های عصبی مصنوعی از عناصر عملیاتی ساده‌ای به‌صورت موازی ساخته می‌شوند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته‌اند. در طبیعت، ساختار شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزا تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان یک ساختار مصنوعی به تبعیت از شبکه‌های طبیعی ساخت و با تنظیم مقادیر هر اتصال تحت عنوان وزن اتصال نحوه ارتباط بین اجزای آن را تعیین نمود. پس از تنظیم یا همان آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن منجر به دریافت پاسخ خاص می‌شود. شبکه بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا این‌که خروجی شبکه و هدف بر هم منطبق گردند. عموماً تعداد زیادی از این زوج‌های ورودی و خروجی به‌کار گرفته می‌شوند تا در این روند، که از آن تحت عنوان یادگیری نظارت شده یاد می‌شود، شبکه آموزش داده شود. جهت آموزش مدل به شبکه از روش آموزش لونبرگ–مارکوارت[9] استفاده می‌شود، زیرا این روش آموزش دارای سرعت و دقت بالاتری از الگوریتم پس‌انتشار[10] استاندارد می‌باشد و داده‌های ورودی کمتری برای آموزش نیاز دارد. پس از تکمیل آموزش، شبکه طراحی شده بایستی توانایی تعمیم به کل مجموعه و آن‌هایی که در آموزش شرکت نداشته‌اند، را داشته باشد (Kia, 2009).

تحقیقات زیادی در خصوص شناسایی حشرات با پردازش تصویر انجام شده که چند مورد آن به شرح زیر آمده است. چو و همکاران (Cho *et al.*, 2007) به شناسایی خودکار سفیدبالک‌ها، شته‌ها و تریپس‌ها با استفاده از پردازش تصاویر پرداختند. شناسایی خودکار حشرات انتخابی آفت در گلخانه‌ها، روی نمونه‌های جمع‌آوری شده بر روی تله‌های چسبنده زرد انجام شد. اندازه (مساحت) و مؤلفه‌های رنگی اشیاء (میانگین مؤلفه‌های R، G و B) به‌عنوان خصوصیات شناسایی خودکار انتخاب شدند. شته‌ها به آسانی شناسایی شدند زیرا اختلاف کمی در اطلاعات مربوط به رنگ آن‌ها مشاهده شد و اندازه بدن آن‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای با حشره‌های دیگر داشت. پس از شناسایی شته‌ها، خطای شناسایی برای داده‌های مربوط به تریپس و

1- Red (R)
2- Green (G)
3- Blue (B)
4- Feature Extraction
5- Artificial Neural Networks (ANN)

6- Convex Area
7- Extent
8- Artificial Neural Network- Particle Swarm Optimization algorithm (ANN-PSO)
9-Levenberg- Marquardt (LM)
10- Backpropagation (BP)

سفیدبالک کاهش یافت. مقادیر مرجع اندازه و مؤلفه‌های رنگی نمونه‌برداری شده از ۵۰ حشره، برای هر حشره جهت شناسایی و شمارش استفاده شد. دقت شناسایی الگوریتم برای سفیدبالک‌ها، شته‌ها و تریپس‌ها به‌ترتیب ۹۳/۹۶، ۹۲/۷۳ و ۸۸/۹ درصد به‌دست آمد. ایشان اظهار داشتند که اگر از کارت‌های زرد چسبنده یکپارچه (بدون شبکه‌بندی) استفاده شود، دقت کار بیشتر خواهد شد (Cho *et al.*, 2007). بویسارد و همکاران (Boissard *et al.*, 2008) برای شناسایی سریع و شمارش خودکار آفت گلخانه‌ای سفیدبالک از سیستم پردازش تصویر به‌صورت عکس‌برداری در محل و در شرایط نور طبیعی، استفاده نمودند. آن‌ها از سفیدبالک‌های بالغ چسبیده به زیر برگ‌های گل رز (به تعداد ۲۰ برگ) عکس تهیه نمودند. آن‌ها در این تحقیق از مشخصه‌های رنگ (فضای رنگی HSL که مشابه HSI می‌باشد)، شکل (گرد بودن، خروج از مرکزیت، چهار گوش بودن، کشیده بودن، محدب بودن و فشردگی تصویر حشره) و اندازه (مساحت، طول و محیط) حشره که از تصویرها به کمک پردازش تصویر استخراج گردید، برای شناسایی و شمارش سفیدبالک‌ها استفاده نمودند. لازم به ذکر است که ایشان از ۱۲ خاصیت و ۲۰ نمونه برای استخراج خصوصیات تصویر جهت شناسایی و شمارش در الگوریتم پردازش تصویر استفاده نمودند. ایشان اظهار داشتند که شمارش دستی به‌وسیله انسان به آزمایشگاه و شرایط نورپردازی مناسب و وسایلی مثل ذره‌بین و غیره نیاز دارد، از طرفی چون شمارش حشرات کاری تکراری است، بعد از مدتی شخص خسته شده و از دقت کار کاسته می‌شود ولی سیستم شمارش خودکار که با الگوریتم پردازش تصویر تدارک دیده شده است، ضمن داشتن دقت و سرعت بالا هیچ کدام از مشکلات و محدودیت‌های شمارش توسط انسان را ندارد. در ضمن دقت الگوریتم پردازش تصویر پیشنهاد شده برای شناسایی و شمارش سفیدبالک‌ها، در مقایسه با شمارش چشمی، ۸۳٪ گزارش گردید (Boissard *et al.*, 2008). کیائو و همکاران (Qiao *et al.*, 2008) اظهار داشتند که پیش‌بینی دقیق تراکم آفت برای مدیریت مؤثر آفت ضروری است. آن‌ها آزمایش‌ها را در آزمایشگاه و گلخانه انجام دادند. ۸۱ کارت زرد چسبناک (۱۸ cm در ۱۳ cm) با خطوط سبز رنگ شبکه‌بندی شده در ۹ ردیف به فاصله ۲ متر از همدیگر در روی بوته‌های گوجه‌فرنگی در گلخانه به‌کار بردند. نمونه‌ها به‌وسیله کارت‌های زرد چسبناک از گلخانه‌ای جمع‌آوری شدند، که بعد الگوریتم پردازش تصویر را در آن‌جا پیاده سازی نمودند. سپس تصاویر دیجیتال (۲۰۰ dpi) را با استفاده از اسکنر از کارت‌های زرد رنگ چسبناک تهیه نمودند. با استفاده از سیستم پردازش تصویر به‌طور خودکار تراکم سفیدبالک‌ها بر روی کارت‌های زرد چسبناک را تخمین زدند. تراکم‌های تخمین زده شده نمونه‌ها در آزمایشگاه و گلخانه با مقادیر واقعی هم‌خوانی داشتند. نرخ تشخیص در کارت‌های زرد چسبناک با تعداد حشره ۳۹ تا ۱۴۹ عدد در روی هر کارت و در آزمایشگاه، تقریباً ۹۷/۵درصد بود. ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و تخمین زده شده ۰/۹۹۹ بود ($P<0.0001$) (Qiao *et al.*, 2008). باربدو (Barbedo, 2014) از تکنیک پردازش تصویر برای شمارش سفیدبالک روی برگ‌های سویا استفاده کرد. وی از ۷۴۸ تصویر از برگ‌های سویا برای این کار استفاده نمود. میزان آلودگی این برگ‌ها از کاملاً سالم و بدون آفت تا کاملاً آلوده، متغیر بود. تصاویر با استفاده از یک دوربین ۱۰ مگاپیکسل گرفته شدند. تصاویر گرفته شده ۳۶۴۸ پیکسل عرض و ۲۷۳۶ پیکسل ارتفاع داشتند که به فرمت JPEG و در فضای رنگی RGB بودند. نشان داده شد که شمارش اکثر هدف‌ها می‌تواند کاملاً به‌طور خودکار انجام شود و سیستم پیشنهادی هنوز سریع‌تر از شمارش دستی است. الگوریتم پیشنهاد شده قادر بود نه تنها سفیدبالک‌های بالغ را تشخیص داده و شمارش نماید، بلکه نمونه‌ها در مرحله پورگی را نیز با دقت ۹۸/۳درصد تشخیص دهد. اگرچه این الگوریتم به‌طور کامل با استفاده از برگ‌های سویا توسعه یافته، اما می‌تواند به آسانی برای انواع محصولات دیگر نیز با کمی تغییر توسعه داده شود. این سیستم چون عملیات پردازش تصویر را به خدمت می‌گیرد، لذا می‌تواند در هر بسته نرم‌افزاری پردازش تصویری اعمال شود (Barbedo, 2014). اسپینوزا و همکاران (Espinoza *et al.*, 2016) از ترکیب پردازش تصویر و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان یک دستاورد جدید، برای شناسایی سفیدبالک[1] (*Bemisia tabaci*) و تریپس[2] (*Frankliniella occidentalis*) بالغ به‌ترتیب روی کارت‌های چسبنده زرد رنگ و آبی یکپارچه (بدون شبکه‌بندی) برای اجتناب از ایجاد نویز در عکس‌برداری دیجیتال، در گلخانه‌های کشاورزی استفاده نمودند. آن‌ها ۹۰۳ کارت زرد چسبناک و ۶۹۰ کارت آبی چسبناک داشتند. بعد از شمارش دستی سفیدبالک‌ها و تریپس‌های روی کارت‌های رنگی، از آن‌ها عکس گرفته شد. الگوریتم شناسایی سفیدبالک دقت بالایی در حدود ۰/۹۶ روی کارت زرد چسبناک داشت، در حالی‌که الگوریتم شناسایی تریپس دقتی در حدود ۰/۹۲ روی کارت آبی چسبناک داشت (Espinoza *et al.*, 2016). حیدری و امیری پریان (Heidari and Amiri Parian, 2019) در مطالعه‌ای شناسایی و شمارش خودکار آفات مهم گلخانه (سفید بالک و تریپس) از طریق کارت‌های چسبناک زرد رنگ به کمک پردازش تصویر را انجام دادند. از کارت‌های زرد رنگ در طول روز به کمک دوربین دیجیتال عکس گرفته شد. الگوریتم پیشنهاد شده قادر به تشخیص آفات سفید بالک و تریپس و نیز شمارش تعداد آن‌ها بود. برخی مؤلفه‌های رنگی و اندازه اشیاء برای شناسایی خودکار انتخاب شدند. به کمک روش ماتریس اغتشاش، دقت الگوریتم پیشنهاد شده برابر با ۹۴/۵ و ۸۷/۲ درصد به‌ترتیب برای شناسایی حشرات سفید بالک و تریپس محاسبه شد (Heidari and Amiri Parian, 2019).

روش‌های مرسوم برای شناسایی حشرات با استفاده از کلید

1-Whitefly
2-Thrips

شناسایی زمان‌بر و پر هزینه هستند. استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به جای تصمیم‌گیری‌های دستی و انسانی، علاوه بر این‌که سبب افزایش بهره‌وری می‌گردد، از دقت بالایی نیز برخوردار است. از طرفی در خصوص زنجرک پسته تحقیقات انگشت‌شماری یافت شد، لذا در این تحقیق زنجرک پسته، به‌عنوان حشره هدف برای شناسایی، طبقه‌بندی و شمارش آن روی کارت زرد، انتخاب شد و از تکنیک‌های پردازش تصویر و شبکه عصبی مصنوعی، که دارای سرعت و دقت بالایی می‌باشند، جهت شناسایی و طبقه‌بندی استفاده می‌شود. هدف از این تحقیق امکان‌سنجی تدوین الگوریتم شناسایی زنجرک پسته به کمک پردازش تصویر، بررسی امکان طبقه‌بندی و شمارش آفت زنجرک پسته شناسایی شده از سایر حشرات غیر هدف به کمک شبکه عصبی مصنوعی و تعیین دقت آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در زمینی به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع در باغ پسته ۴۵ ساله با تراکم ۹۰۰ درخت بر هکتار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی انجام گرفت. این باغ پسته آلوده به آفاتی چون زنجرک پسته بود و سم‌پاشی نشده بود. برای جمع‌آوری نمونه‌ها از ۱۰۵ کارت زرد چسبناک (Daegil Co Ltd., Made in Korea) یکپارچه (بدون شبکه‌بندی) به ابعاد ۱۰۰ mm*۲۵۰ mm استفاده شد. حشره مورد مطالعه زنجرک پسته *Idiocerus stali* (Hem.:Cicadellidae) Fieber, 1868 (Mozaffarian and Wilson, 2016) بود. نمونه‌برداری در تیر و مردادماه ۱۳۹۶ انجام گردید. هر روز صبح زود کارت‌های زرد رنگ روی درختان پسته آلوده به آفت زنجرک پسته نصب می‌شدند. بعد از حدود ۶ ساعت کارت‌ها از سطح باغ پسته جمع‌آوری شده با یک شماره، هر کارت را از بقیه متمایز نموده و تحت شرایط نور آفتاب از آن‌ها عکس گرفته شد. عکس‌برداری به کمک دوربین هندی‌کم SONY مدل HDR-XR500 ساخت کشور ژاپن، دارای لنز G سونی با رزولوشن ۱۲ مگاپیکسل (SONY, HDR-X500, CMOS, SONY Lens G, Made in Japan) انجام شد. ابتدا حشرات روی کارت‌های چسبنده زرد رنگ توسط متخصصین حشره‌شناسی شناسایی و بعد به‌طور چشمی نیز حشرات روی هر کارت شمارش شده و داده‌ها ثبت گردید. لازم به ذکر است که علاوه بر *I. stali*، که حشره مورد مطالعه بود، حشره دیگری نیز با نام *Anthaxia* Sp. Eschscholtz, 1829 (Coleoptera: Buprestidae)، (Baiocchi, 2013)، روی کارت زرد به دام افتاده بود، که مورد بررسی قرار گرفت. داده‌ها که تصاویر دیجیتال از کارت‌های زرد چسبناک بودند، به محیط نرم‌افزار متلب MatLab R2017b فراخوانده شدند. در این نرم‌افزار با توجه به برنامه‌نویسی انجام شده، تصاویر ابتدا پیش‌پردازش شده، نویزها (قسمت‌هایی از پس‌زمینه که به‌صورت اشتباهی حشره تشخیص داده شد) و بی‌نظمی‌ها حذف شدند، سپس به فضاهای رنگی مختلف تبدیل شدند. بعد با توجه به تعداد کانال‌ها، از هر تصویر تعداد ۳۷۷ خصوصیت رنگی و شکلی استخراج شد. آماره‌های مینیمم، میانگین، ماکزیمم، انحراف معیار و واریانس برای خصوصیات استخراجی اعمال شد. این خصوصیات در فضاهای مختلف رنگی مورد بررسی قرار گرفتند و از بین آن‌ها خصوصیاتی که بیشترین تأثیر را در شناسایی و طبقه‌بندی داشتند، به‌عنوان خصوصیات مؤثر انتخاب شدند، که این خصوصیات مؤثر ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی بودند. خصوصیات مؤثر توسط الگوریتم هیبرید شبکه عصبی مصنوعی- بهینه‌سازی ازدحام ذرات انتخاب شدند و روش کار چنین است که ابتدا کل خصوصیات استخراجی به عنوان یک بردار در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از میان این بردار، بردارهای دیگر با اندازه‌های مختلف انتخاب و به شبکه عصبی مصنوعی ارسال می‌گردند. این بردارها به‌عنوان ورودی‌ها به شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه ارسال می‌شوند. خروجی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه شامل کلاس‌ها می‌باشد. در نهایت میانگین مربعات خطای مربوط به هر برداری که توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه ارسال می‌گردد، ثبت می‌شود. هر بردار انتخابی توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که دارای کمترین مقدار میانگین مربعات خطا باشد، به‌عنوان خصوصیت مؤثر انتخاب می‌گردد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از الگوی حرکات دسته‌جمعی پرندگان برای حل مسائل، تقلید می‌کند. دسته پرندگان در حال پرواز را در نظر بگیرید که هر کدام ضمن حفظ فاصله خود با همسایگان، سرعت را نیز حفظ می‌کنند. زمانی که منبع غذایی یا موقعیتی برای استراحت پیدا می‌کنند، به‌طور ناگهانی تغییر جهت داده و در مکان مورد نظر فرود می‌آیند. پس در این الگوریتم، اجتماع پرندگان به‌صورت ازدحام ذرات در نظر گرفته شده است و هر پاسخ مسئله را یک ذره فرض نموده که هر ذره نیز مدام در حال جستجو و جابه‌جایی با حفظ سرعت می‌باشد. حرکت ذره به موقعیت کنونی ذره، بهترین موقعیتی که ذره تاکنون داشته و بهترین موقعیتی که کل مجموعه ذرات تاکنون داشته‌اند، بستگی دارد (Kennedy and Eberhart, 1995). یکی از مهم‌ترین مراحل پردازش تصویر قطعه‌بندی[1] می‌باشد. در صورتی که عملیات قطعه‌بندی دارای دقت بالایی نباشد، ممکن است که بخش‌هایی از پس‌زمینه به‌عنوان حشره تشخیص داده شود و برعکس، که در نهایت منجر به کاهش دقت، افزایش زمان انجام عملیات محاسبات و کاهش کارآیی سیستم ماشین بینایی می‌شود. ابتدا تصویر یک کارت را انتخاب نموده که در فضای رنگی RGB تهیه شده است (شکل ۱). تصویر مورد نظر از فضای رنگی RGB به فضای رنگی CMY تبدیل می‌شود (شکل ۱). سپس آستانه $Y(i,j)<200$ اعمال می‌شود. این آستانه بیان می‌کند هر پیکسل در فضای رنگی CMY با مقدار مؤلفه سوم (Y) کمتر از ۲۰۰، عضو کارت می‌باشد و باید باقی بماند. مقدار آستانه از طریق سعی و خطا در هنگام برنامه‌نویسی جهت پردازش تصویر تعیین شد. این

1- Segmentation

آستانه برای حالتی که علاوه بر کارت، قسمت‌های دیگری از زمین در حوزه دید دوربین قرار دارند، دارای کاربرد می‌باشد. مرحله بعد اعمال آستانه زیر (رابطه ۱) بر روی تصویر مرحله قبل برای حذف پس‌زمینه می‌باشد (شکل ۲). این آستانه بیان می‌کند که اگر مؤلفه اول پیکسلی بزرگ‌تر از ۱۱۰ و مؤلفه دوم پیکسلی بزرگ‌تر از ۱۱۰ و مؤلفه سوم پیکسلی بزرگ‌تر از ۱۰۵ و قدر مطلق تفاضل مؤلفه اول و دوم پیکسلی کمتر از ۱۰ یا مؤلفه اول بزرگ‌تر از ۱۵۰ باشد، آن پیکسل جزو پس زمینه می‌باشد و باید حذف گردد.

$$(TBW1(i,j)>110 \ \& \ TBW2(i,j)>110 \ \& \ TBW3(i,j)>105 \ \& \ abs(TBW1(i,j)-TBW2(i,j))<10) \ |TBW1(i,j)>150 \qquad (۱)$$

شکل ۱- تصویر یک کارت زرد چسبناک در فضای رنگی RGB (سمت راست) و تبدیل تصویر RGB به فضای رنگی CMY (سمت چپ)

Fig.1. Images of a sticky yellow card in RGB color space (Right) and the converted RGB image to CMY color space (Left)

شکل ۲- اعمال آستانه برای حذف پس‌زمینه (سمت راست) و کارت زرد پردازش شده که اشیاء با شماره مشخص شده‌اند (سمت چپ)

Fig.2. Applied thresholds to remove the background (Right) and processed yellow card with objects marked with the number (Left)

در این تحقیق هدف شناسایی زنجرک پسته بود، پس در نهایت داده‌ها به دو کلاس طبقه‌بندی شدند که برای این کار در جعبه‌ابزار شبکه‌های عصبی مصنوعی نرم‌افزار متلب، از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه[1]، با ۳ لایه، ۳۸ نورون، ۳ تابع انتقال satlins، tansig و tansig به‌ترتیب در لایه‌های اول، دوم و سوم با تابع آموزش شبکه پس‌انتشار برگشتی، trainlm و تابع یادگیری وزن/بایاس پس‌انتشار برگشتی، learnsom مطابق جدول ۱ استفاده شد. ۶۰ درصد از داده‌ها به‌صورت تصادفی برای آموزش، ۲۰ درصد برای آزمون و ۲۰ درصد نیز برای اعتبارسنجی استفاده گردید.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای لایه‌های پنهان جهت طبقه‌بندی به دو کلاس

Table 1- Parameters' values of the multilayer perceptron neural network for hidden layers for classification into two classes

Neurons **نرون‌ها**	**First Layer: 18, Second Layer: 13, Third Layer: 7** **لایه اول: ۱۸، لایه دوم: ۱۳، لایه سوم: ۷**
Number of Layers تعداد لایه‌ها	3
Transfer Functions توابع انتقال	First Layer: satlins, Second Layer: tansig, Third Layer: tansig لایه اول: satlins، لایه دوم: tansig، لایه سوم: tansig
Backward back propagation network training function تابع آموزش شبکه پس‌انتشار برگشتی	Trainlm
Backward back propagation Weight / Bias learning function تابع یادگیری وزن/بایاس پس‌انتشار برگشتی	Learnsom

1- Multi-Layer Perceptron (MLP)

جهت بررسی عملکرد و کارآیی سیستم طبقه‌بند به‌کار رفته در این الگوریتم از ماتریس اغتشاش[1]، دقت طبقه‌بندی و نمودار خصوصیت عملیاتی دریافت‌کننده (ROC)[2] استفاده می‌شود. ماتریس اغتشاش، ماتریسی است مربعی که به تعداد کلاس‌ها، سطر و ستون دارد. دقت طبقه‌بندی بر مبنای کل داده‌هایی که درست طبقه‌بندی شده‌اند، ارائه شده است. عملکرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی، معمولاً توسط ارزیابی حساسیت[3]، خاصیت[4] و دقت[5] بررسی می‌گردند. سه معیار حساسیت، خاصیت و دقت به‌ترتیب با استفاده از روابط (۲) تا (۴) تعریف می‌شوند (Kazmi *et al.*, 2015):

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۲)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (۳)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{N} \quad (۴)$$

در این روابط:

Sensitivity، حساسیت (بر حسب درصد)، Specificity، خاصیت (بر حسب درصد) و Accuracy، دقت کل می‌باشد (بر حسب درصد)، N برابر تعداد کل نمونه‌ها، TP برابر است با تعداد نمونه‌های هر کلاس، که درست طبقه‌بندی شده‌اند. TN برابر است با تعداد نمونه‌های کلاس‌های دیگر غیر از کلاس مورد نظر، که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند. FN برابر است با مجموع نمونه‌های کلاس مورد نظر، که به درستی در کلاس مورد نظر طبقه‌بندی نشده‌اند یا به طور نادرست در کلاس‌های دیگر طبقه‌بندی شده‌اند. FP برابر است با مجموع نمونه‌های کلاس‌های دیگر، که به طور نادرست در کلاس مورد نظر طبقه‌بندی شده‌اند (Kazmi *et al.*, 2015).

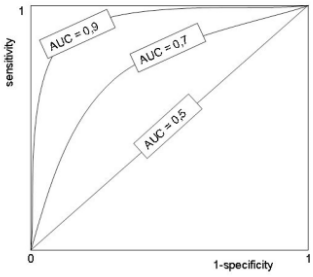
شکل منحنی ROC و سطح زیر منحنی[6] به ما در تخمین این‌که توان تشخیص یک سیستم طبقه‌بند چه‌قدر است، کمک می‌کند. هر قدر منحنی به گوشه بالا سمت چپ نزدیک‌تر باشد و سطح زیر منحنی بزرگ‌تر باشد، سیستم طبقه‌بند عملکرد بهتری دارد (شکل ۳). سطح زیر منحنی می‌تواند مقداری بین صفر و یک داشته باشد و این یک شاخص خوب برای ارزیابی سیستم طبقه‌بند است. یک سیستم طبقه‌بند عالی سطح زیر منحنی برابر یک را دارد (AUC=1.0). در صورتی‌که یک سیستم طبقه‌بند ضعیف سطحی برابر نیم دارد (AUC=0.5). به‌طور کلی رابطه بین AUC و دقت تشخیص طبق داده‌های جدول ۲ است (Šimundić, 2009).

1- Cconfusion matrix
2- Receiver Operating Characteristic (ROC)
3- Sensitivity
4- Specificity
5- Accuracy
6- Area under the curve (AUC)

جدول ۲- رابطه بین سطح زیر منحنی ROC و دقت تشخیص

Table 2- The relationship between the area under the ROC curve and the accuracy of detection

Area سطح	Diagnostic accuracy دقت تشخیص
0.9-1.0	Excellent عالی
0.8-0.9	Very good خیلی خوب
0.7-0.8	Good خوب
0.6-0.7	Sufficient کافی
0.5-0.6	Bad بد
< 0.5	Test not useful آزمون مفید نیست



شکل ۳- منحنی خصوصیت عملیاتی دریافت‌کننده (ROC)

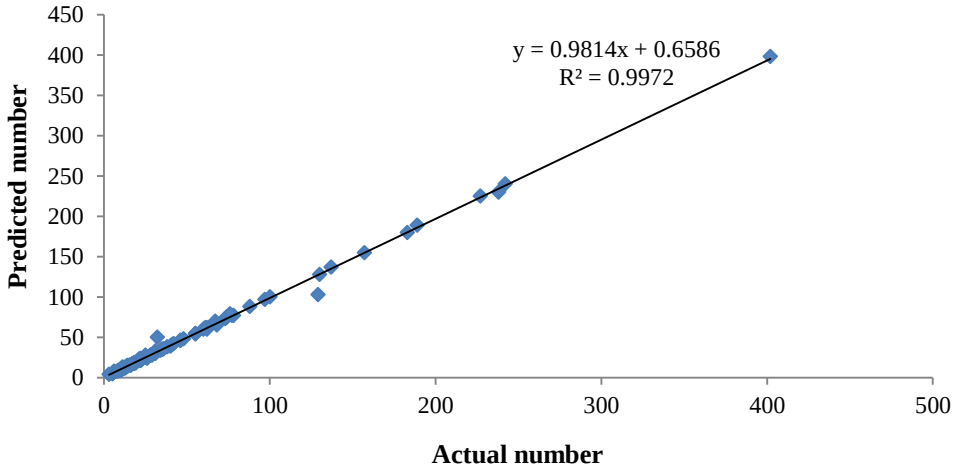
Fig.3. Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve

نتایج و بحث

تعداد زنجرک‌های پسته چسبیده به کارت‌های زرد بین ۸ تا ۴۰۲ عدد در روی هر کارت متغیر بود، که به‌طور متوسط ۴۶ عدد *I. Stali* در روی هر کارت زرد وجود داشت. با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر طراحی شده به‌طور خودکار تراکم زنجرک‌های پسته بر روی کارت‌های زرد چسبناک تخمین زده شد. تراکم‌های تخمین زده شده نمونه‌ها به‌وسیله سیستم پردازش تصویر با مقادیر واقعی هم‌خوانی خوبی داشتند. ضریب تعیین[7] بین تعداد *I. Stali* چسبیده به کارت زرد و تعداد *I. Stali* تخمین زده شده به وسیله پردازش تصویر ۰/۹۹۷۲ بود (شکل ۴). بنابراین نرخ تشخیص الگوریتم پردازش تصویر طراحی شده ۹۹/۷۲ درصد می‌باشد. در مقایسه با کار کیائو و همکاران (Qiao

7- Coefficient of determination (R^2)

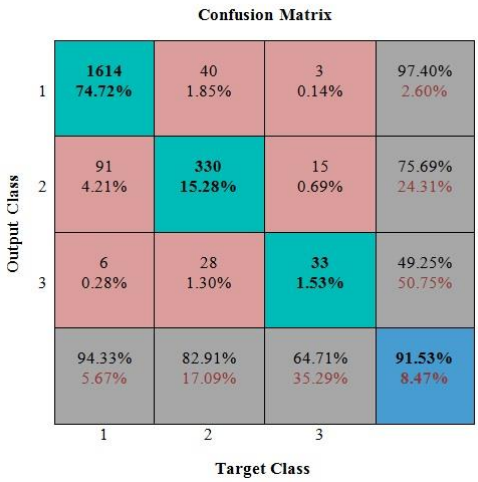
et al., 2008) که گروه‌ها براساس تعداد سفیدبالک‌های در دام افتاده: کمتر از ۱۰(تراکم کم)، ۱۰ تا ۵۰ (تراکم متوسط) و بیش از ۵۰ (تراکم زیاد) تقسیم‌بندی شده بودند، ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های برآورد شده و واقعی به‌ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۶ برای گروه‌های با تراکم متوسط و زیاد بود. با این حال، در تراکمِ کم، ضریب تعیین (R^2) تنها ۰/۶۵۶ بود. ضریب تعیین کیائو برای کل سفیدبالک‌ها ۰/۸۶۵ بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب تعیین تحقیق حاضر (R^2=۰/۹۹۷۲)، که روی کل کارت‌ها با تراکم‌های مختلف زنجرک پسته انجام گرفته است، بسیار بالاتر از ضریب تعیین کیائو می‌باشد.



شکل ٤– نمودار رگرسیونی بین تعداد زنجرک‌های به دام افتاده مشاهده شده (محور افقی) و تعداد زنجرک‌های تشخیص داده شده به‌وسیله الگوریتم پردازش تصویر (محور عمودی)

Fig.4. Regression graph between number of *I. Stali* observed (horizontal axis) and number of *I. Stali* identified by image processing algorithm (vertical axis)

ماتریس اغتشاش و دقت طبقه‌بندی مربوط به داده‌های آزمون جهت بررسی عملکرد و کارآیی سیستم طبقه‌بند به‌ترتیب در شکل ۵ و جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۳ سه دسته زنجرک پسته، *Anthaxia* Sp. و اشیاء متفرقه وجود دارد که اشیاء متفرقه ممکن است حشرات متفرقه دیگر یا گرد و خاک باشند. همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌گردد، حشره هدف که زنجرک پسته می‌باشد، دارای کمترین درصد تشخیص اشتباه (۲/۶۰ درصد) بوده و دقت طبقه‌بندی این الگوریتم، در صورتی‌که بخواهیم حشرات جذب شده روی کارت زرد را به سه دسته طبقه‌بندی نماییم، ۹۱/۵۳ درصد می‌باشد، که دقت قابل قبولی است.



شکل ۵– ماتریس اغتشاش بر روی مجموعه آزمون برای سه کلاس مختلف

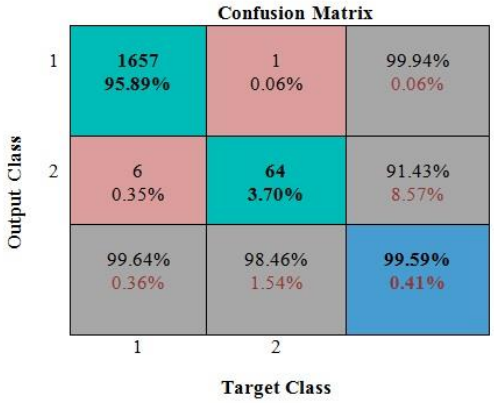
Fig.5. The confusion matrix on the test set for three different classes

جدول ۳- ماتریس اغتشاش و میزان دقت سیستم طبقه‌بندی بر روی مجموعه آزمون برای سه کلاس مختلف

Table 3- The confusion matrix and accuracy level of the classification system on the test set for three different classes

Classes کلاس‌ها	*Idiocerus stali* زنجرک پسته	Miscellaneous objects اشیاء متفرقه	*Anthaxia* Sp. سوسک چوب‌خوار قرمز پسته	Total کل	Percentage of misdiagnosis درصد تشخیص اشتباه	Total percentage of correct diagnosis در صد کل تشخیص درست
Idiocerus stali زنجرک پسته	**1614**	40	3	1657	2.60	**91.53**
Miscellaneous objects اشیاء متفرقه	91	**330**	15	436	24.31	
Anthaxia Sp. سوسک چوب‌خوار قرمز پسته	6	28	**33**	67	50.75	

اما با توجه به این‌که هدف از این تحقیق شناسایی زنجرک پسته بود، لذا با استفاده از این الگوریتم داده‌ها به دو دسته حشره هدف یعنی زنجرک پسته و *Anthaxia* Sp.، طبقه‌بندی شدند. تعداد حشره زنجرک پسته روی کارت زرد ۴۱۴۹ عدد و حشره *Anthaxia* Sp.، ۱۷۱ عدد بود که در مجموع ۴۳۲۰ حشره بودند و سیستم از ۴۰ درصد این تعداد حشره یعنی ۱۷۲۸ حشره به‌صورت تصادفی برای آزمون و اعتبارسنجی استفاده نمود. همان‌گونه که در شکل ۶ و جدول ۴ مشاهده می‌شود، درصد تشخیص اشتباه زنجرک پسته ۰/۰۶ درصد می‌باشد و دقت الگوریتم برای شناسایی زنجرک پسته در طبقه‌بندی داده‌ها به دو دسته، ۹۹/۵۹ درصد می‌باشد.



شکل ٦- ماتریس اغتشاش بر روی مجموعه آزمون برای دو کلاس مختلف

Fig.6. The confusion matrix on the test set for two different classes

جدول ٤- ماتریس اغتشاش و میزان دقت سیستم طبقه‌بندی بر روی مجموعه آزمون برای دو کلاس مختلف

Table 4- The confusion matrix and accuracy level of the classification system on the test set for two different classes

Classes کلاس‌ها	*I. stali* زنجرک پسته	*Anthaxia* Sp. سوسک چوب‌خوار قرمز پسته	Total کل	Percentage of misdiagnosis درصد تشخیص اشتباه	Total percentage of correct diagnosis درصد کل تشخیص درست
I. stali زنجرک پسته	**1657**	1	1658	0.06	**99.59**
Anthaxia Sp. سوسک چوب‌خوار قرمز پسته	6	**64**	70	8.57	

در مقایسه این نتایج با نتایج تحقیق چو و همکاران (Cho *et al.*, 2007) مشاهده می‌شود که در کار ایشان که سه حشره مختلف سفیدبالک، شته و تریپس را مورد شناسایی قرار دادند و نرخ تشخیص الگوریتم به‌ترتیب برابر با ۹۳/۶۳ درصد، ۹۲/۷۳ درصد و ۸۸/۹ درصد بود و این در حالی است که نرخ تشخیص سیستم طبقه‌بند طراحی شده در تحقیق حاضر برای هر دو نوع حشره به دام افتاده یکسان و برابر ۹۹/۵۹ درصد بود.

در مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیق بویسارد و همکاران (Boissard *et al.*, 2008) که ایشان از سیستم پردازش تصویر به‌صورت عکس‌برداری در محل و در شرایط نور طبیعی، برای شناسایی سفیدبالک استفاده نمودند، مشاهده می‌شود که دقت تشخیص الگوریتم شناسایی آن‌ها در مقایسه با شمارش چشمی، ۸۳ درصد بود، در حالی که دقت تشخیص الگوریتم شناسایی تحقیق حاضر ۹۹/۵۹ درصد می‌باشد.

در مقایسه این نتایج با نتایج تحقیق کیائو و همکاران (Qiao *et al.*, 2008)، مشاهده می‌شود که در کار ایشان که داده‌ها را به سه زیردسته تقسیم کرده بود، برای دسته تراکم متوسط و زیاد نرخ تشخیص به‌ترتیب برابر با ۹۵/۲ و ۹۴/۶درصد بود. از طرفی در تراکم کم (کمتر از ۱۰ حشره به دام افتاده)، نرخ تشخیص آن نیز ۷۲/۹درصد بود و این در حالی است که نرخ تشخیص سیستم طبقه‌بند طراحی شده در تحقیق حاضر برای تراکم‌های مختلف حشرات به دام افتاده یکسان و برابر ۹۹/۵۹ درصد بود.

در مقایسه این نتایج با نتایج تحقیق حیدری و امیری پریان (Heidari and Amiri Parian, 2019)، که ایشان در تحقیق خود سفیدبالک و تریپس را به‌ترتیب با دقت ۹۴/۵ و ۸۷/۴ درصد شناسایی نمودند و این در حالی است که دقت تحقیق حاضر برای شناسایی زنجرک پسته، ۹۹/۵۹ درصد می‌باشد.

جدول ۵ مقادیر حساسیت، خاصیت و دقت مربوط به سیستم طبقه‌بندی برای حالت دو کلاس را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه مقادیر موجود در جدول ۵ با استفاده از روابط (۲) تا (۴) بوده که در آن‌ها، به‌عنوان مثال برای زنجرک پسته مقادیر TP برابر ۱۶۵۷، TN برابر ۶۴، FN برابر ۱ و FP برابر ۶ از جدول ۴ به‌دست آمدند. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، نتایج نشان می‌دهد که روش هیبرید عصبی-ازدحام ذرات در شناسایی زنجرک پسته دارای حساسیت ۹۹/۹۴ می‌باشد و این بدان معنی است که سیستم طراحی شده ۹۹/۹۴ درصد حشره زنجرک پسته را درست تشخیص داده است. به‌طور کلی حساسیت بالا بدین معنی است که نمونه‌های بیشتری به‌طور صحیح طبقه‌بندی شده‌اند. از طرفی خاصیت سیستم برای همین حشره برابر با ۹۱/۴۳ به‌دست آمد و این بدان معنی است که سیستم طبقه‌بند فقط ۸/۵۷ درصد حشره *Anthaxia* Sp. و نقاط سیاه رنگ ناشی از گرد و خاک روی کارت‌های زرد رنگ را به‌صورت اشتباه زنجرک پسته تشخیص داده است. در نهایت مشاهده می‌گردد که حشره زنجرک پسته با دقت ۹۹/۵۹ درصد طبقه‌بندی شده است.

جدول ۵- مقادیر حساسیت، خاصیت و دقت مربوطبه سیستم طبقه‌بندی برای حالت دو کلاس

Table 5- The sensitivity, specificity and accuracy values of the classification system for the two classes

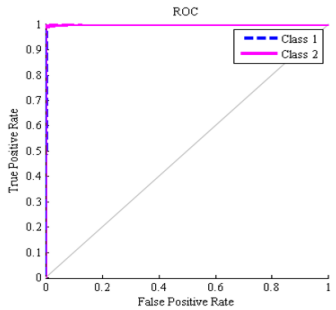
Classes کلاس‌ها	The hybrid method of ANN-PSO روش هیبرید شبکه عصبی مصنوعی- بهینه‌سازی ازدحام ذرات Sensitivity حساسیت	Accuracy دقت	Specificity خاصیت
I. stali زنجرک پسته	99.94	99.59	91.43
Anthaxia Sp. سوسک چوب‌خوار قرمز پسته	91.43	99.59	99.94

جدول ٦- مقادیر مربوط به معیارهای مختلف خطا، درصد طبقه‌بندی صحیح و سطوح زیر منحنی ROC برای حالت ۲ کلاس

Table 6- The values for the different error criteria, the percentage of the correct classification and the Area under the ROC curve for the 2 classes

MSE میانگین مربعات خطا	RMSE ریشه میانگین مربعات خطا	MAE میانگین خطای مطلق	OCA دقت طبقه‌بندی کلی	AUC(1) سطح زیر منحنی کلاس ۱	AUC(2) سطح زیر منحنی کلاس ۲
0.0036	0.0598	0.013	99.59	0.99969	0.99962

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها ذکر گردید، از مجموع ۳۷۷ خصوصیت استخراجی از هر شیء، با استفاده از روش هیبرید شبکه عصبی مصنوعی–الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (ANN-PSO)، ۶ خصوصیت که میانگین مربعات خطای کمتری داشتند، به‌عنوان خصوصیات مؤثر انتخاب گردید و به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی اعمال شدند. خصوصیات مؤثر عبارتند از: شاخص رنگی برای پوشش گیاهی استخراجی مربوط به فضای رنگی HSL، شاخص تفاضل نرمال شده مربوط به فضای رنگی LCH، کانال خاکستری مربوط به فضای رنگی YCbCr، شاخص مؤلفه دوم منهای مؤلفه سوم مربوط به فضای رنگی YCbCr، مساحت و میانگین مؤلفه‌های اول، دوم و سوم فضای رنگی Luv. تحلیل منحنی ROC جهت مشخص کردن حساسیت و خاصیت سیستم طبقه‌بند به‌کار برده می‌شود. محور افقی این منحنی نرخ مثبت کاذب FPR[1] یا همان یک منهای خاصیت[2] است و محور عمودی آن نرخ مثبت واقعی TPR[3] یا همان حساسیت می‌باشد (Panduranga Vitala *et al.*, 2015). نرخ FPR عبارت است از عنصر روی قطر فرعی[4] تقسیم بر مجموع عناصر روی ردیف مربوطه در ماتریس اغتشاش. نرخ TPR برابر است با عنصر روی قطر اصلی برای هر کلاس که درست طبقه‌بندی شده، تقسیم بر مجموع عناصر روی ردیف مربوطه که برابر حساسیت است (Wisaeng, 2013). به تعداد کلاس‌ها منحنی وجود دارد. نمودار ROC مربوط به طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی برای دو کلاس در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- نمودار ROC مربوط به طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی برای ۲ کلاس مختلف، (کلاس ۱ *Anthaxia* Sp.، کلاس ۲ زنجرک پسته)

Fig.7. The ROC curve for Artificial Neural Network classification for two different classes, (Class 1 *Anthaxia* Sp., Class 2 *Idiocerous stali*)

1- False Positive Rate (FPR)
2 -1-specificity
3- True Positive Rate (TPR)
4- Non-diagonal elements

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود هر دو کلاس با فاصله خیلی زیادی از نیم‌ساز واقع شده‌اند، این بدان معنی است که سیستم طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی، هر دو کلاس را به خوبی طبقه‌بندی نموده است. معیارهای مختلف خطا، درصد طبقه‌بندی صحیح و سطوح زیر منحنی ROC برای حالت ۲ کلاس مختلف نیز در جدول ۶ نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل ۷ و جدول ۶ سطح زیر منحنی در هر دو کلاس بسیار بیشتر از سطح بالای منحنی‌ها بوده و طبق جدول ۲ در ناحیه دقت تشخیص عالی می‌باشد و این یعنی طبقه‌بند شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالا نمونه‌های هر دو کلاس را طبقه‌بندی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که دقت طبقه‌بندی کلی[5] برای دو کلاس مختلف ۹۹/۵۹ درصد می‌باشد. سایر معیارهای میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) نسبت به حالت سه کلاس بسیار پایین‌تر می‌باشد، که هر قدر این پارامترها کوچک‌تر باشند، نشان‌دهنده طراحی بهتر الگوریتم طبقه‌بندی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

برای توسعه الگوریتم پردازش تصویر، جهت شناسایی زنجرک پسته، از خصوصیات رنگی و شکلی اشیاء (حشره زنجرک پسته و سایر حشره‌های غیر هدف و متفرقه) موجود در تصاویر مربوط به کارت زرد چسبناک، استفاده شد. از ۱۷ فضای رنگی، ۳۵۷ خصوصیت رنگی و ۲۰ خصوصیت شکلی برای شناسایی زنجرک پسته به‌وسیله الگوریتم پردازش تصویر، استخراج شد. از روش هیبرید شبکه عصبی مصنوعی– الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای انتخاب خصوصیات مؤثر مثل شاخص رنگی برای پوشش گیاهی استخراجی مربوط به فضای رنگی HSL، شاخص تفاضل نرمال شده مربوط به فضای رنگی LCH، کانال خاکستری مربوط به فضای رنگی YCbCr، شاخص مؤلفه دوم منهای مؤلفه سوم مربوط به فضای رنگی YCbCr، مساحت و میانگین مؤلفه‌های اول، دوم و سوم فضای رنگی Luv، جهت طبقه‌بندی حشرات استفاده گردید. شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، با سه لایه پنهان ۳۸ نورونی و سه تابع انتقال satlins، tansig و tansig به‌ترتیب در لایه‌های اول تا سوم و تابع آموزش شبکه پس‌انتشار برگشتی trainlm و تابع یادگیری وزن/بایاس پس‌انتشار برگشتی learnsom برای طبقه‌بندی داده‌ها به دو کلاس مورد استفاده قرار گرفت. نرخ شناسایی الگوریتم پردازش تصویر طراحی شده، ۹۹/۷۲درصد کل اشیاء (زنجرک پسته و سایر حشره‌های غیر هدف و متفرقه) می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی، توانایی طبقه‌بندی حشرات به سه کلاس (زنجرک پسته، سوسک

5- Overall Classification Accuracy (OCA)

چوب‌خوار قرمز پسته وسایر حشره‌های غیر هدف و متفرقه) و دو کلاس زنجرک پسته و *Anthaxia* Sp. به‌ترتیب با دقت ۹۱/۵۳ و ۹۹/۵۹ درصد را دارند. این امر بیانگر آن است که این الگوریتم می‌تواند روی سیستم ماشین بینایی پیاده شود و در آینده در ساختمان ربات‌های کشاورزی از آن بهره گرفت.

References

1. Baiocchi, D. 2013. The *Anthaxia* (*Anthaxia*) manca (Linnaeus, 1767) species-group in Iran, with description of a new species and a new synonymy (Coleoptera: Buprestidae). Zootaxa 3616: 455-481.
2. Barbedo, J. G. A. 2014. Using digital image processing for counting whiteflies on soybean leaves. Journal of Asia-Pacific Entomology 17: 685-694.
3. Boissard, P., V. Martin, and S. Moisan. 2008. A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops. Computers and Electronics in Agriculture 62: 81-93.
4. Cho, J., J. Choi, M. Qiao, C.-W. Ji, H.-Y. Kim, K.-B. Uhm, and T.-S. Chon. 2007. Automatic identification of whiteflies, aphids and thrips in greenhouse based on image analysis. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation 7 (1): 46-53.
5. Espinoza, K., D. L. Valera, J. A. Torres, A. López, and F. D. Molina-Aiz. 2016. Combination of image processing and artificial neural networks as a novel approach for the identification of *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* on sticky traps in greenhouse agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 127: 495-505.
6. FAO. 2017. Food and agriculture organization of the United Nations. Retrieved May 16, 2019; Available at: http://fao.org/faostat/en/#data.
7. Ghaiwat, S. N. and P. Arora. 2014. Detection and classification of plant leaf diseases using image processing techniques: A review. International Journal of Recent Advances in Engineering and Technology 2 (3): 1-7.
8. Gonzalez, R. C., and R. E. Woods. 2018. Digital Image Processing, 4th ed. Pearson, 1306 pp., New York, USA.
9. Gonzalez, R. C., R. E. Woods, and S. L. Eddins. 2004. Digital Image Processing Using MATLAB, (Second ed.).USA. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
10. Heidari, A., and J. Amiri Parian. 2019. Identification and Counting of Two Important Greenhouse Pests by Image Processing, Case Study: Whitefly and Thrips. Journal of Agricultural Machinery 9 (2): 309-320. (In Persian).
11. Jalilvand, N. and S. Kashani-Zadeh. 2013. Study on the Biology of *Idiocerus stali* in Qazvin Climate. Agricultural Research and Natural Resources Journal 3 (15): 22-30. (In Persian).
12. Karbasi, A. R., and A. H. Taohidi. 2015. Factors Affecting Iranian Pistachio Export. Agricultural Economics Research 7 (1): 91-112. (In Persian).
13. Kazmi, W., F. J. Garcia-Ruiz, J. Nielsen, J. Rasmussen, and H. J. Andersen. 2015. Detecting creeping thistle in sugar beet fields using vegetation indices. Computers and Electronics in Agriculture 112: 10-19.
14. Kennedy, J., and R. Eberhart. 1995. Particle Swarm Optimization, 1942-1948 pp., Proceedings of the International Conference on Neural Networks, 27 Nov-1 Dec. 1995, Perth, Australia.
15. Kia, M. 2009. Neural Networks, (Second ed.) Tehran, Iran: Kian Rayaneh Sabz Publisher. 232 pp. (In Persian).
16. Mehrnejad, M. R. 2001. The current status of pistachio pests in Iran. In: Proceedings of the XI GREMPA Seminar on Pistachios and Almonds. (Cahiers Options Méditerranéennes; n. 56). Zaragoza: CIHEAM. pp. 315-322. Retrieved November 21, Available at: http://om.ciheam.org/option.php?IDOM=769.
17. Modarres Awal, M. 2009. Classification of insects, (1st ed.). Mashhad, Iran: Ferdowsi University Publisher. (In Persian).
18. Mozaffarian, F., and M. R. Wilson. 2016. A checklist of the leafhoppers of Iran (Hemiptera: Auchenorrhyncha: Cicadellidae). Zootaxa, 4062 (1): 1-63.
19. Panduranga Vitala, T., G. S. V. Prasada Rajub, K. Sreeramamurthy, and V. P. Venkata Charan. 2015. A Probabilistic Neural Network Approach for Classification of Datasets Collected From North Coastal Districts of AP, India Using MatLab 715-721 pp., Proceedings of the International Conference on Computer, Communication and Convergence (ICCC 2015), Odisha, India.
20. Qiao, M., J. Lim, C. W. Ji, B. K. Chung, H. Y. Kim, K. B. Uhm, C. S. Myung, J. Cho, T. S. Chon, D. Herák, A. K., A. Sedláček, and G. Gűrdil. 2008. Density estimation of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in a greenhouse using sticky traps in conjunction with an image processing system. Journal of Asia-Pacific Entomology 11: 25-29.
21. Šimundić, A. M. 2009. Measures of Diagnostic Accuracy: Basic Definitions. The Journal of the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (EJIFCC) 19: 203-211.
22. Solomon, C., and T. Breckon. 2011. Fundamentals of Digital Image Processing. (First ed.). West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 328 pp.
23. Wisaeng, K. 2013. A Comparison of Decision Tree Algorithms for UCI Repository Classification. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) 4: 3393-3397.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 119-130

Exergy Analysis of the Steam Generation System to Explore the Potential for Optimizing Energy Consumption

I. Golpour, P. Ahmadi Moghaddam[2*], A. M. Nikbakht[3]

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran
2- Associate Professor of Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran
3- Professor of Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: p.ahmadi@urmia.ac.ir)

Received: 03-06-2019
Revised: 28-09-2019
Accepted: 08-10-2019

How to cite this article:
Golpour, I., P. Ahmadi Moghaddam, and A. M. Nikbakht. 2022. Exergy Analysis of the Steam Generation System to Explore the Potential for Optimizing Energy Consumption. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 119-130. (In Persian).
DOI: 10.22067/jam.2021.57932.0

Introduction

Steam generation system is a crucial and essential part of food industries which generates and distributes steam for consumption in domestic production units. Energy analysis based on the first law of thermodynamics was employed as the basic approach to assess energy systems. However, the energy approach does not provide information on the degradation of the energy quality occurring within energy systems and is, therefore, insufficient for sustainable design or optimization goals. Nevertheless, exergy analysis based on both the first and second laws of thermodynamics can overcome shortcomings of energy analysis. In the present study, the performance of equipment of the steam generation system in Pakdis's juice production Company located in Urmia is investigated. Owing to the energy and exergy analyses, the sites with the highest loss of exergy are identified as the critical points of the process.

Materials and Methods

In this study, the steam generation unit of a juice production company located in Urmia, West Azarbaijan province in Iran was exergetically analyzed. Using mass, energy, and exergy balances for each component of the unit, the thermodynamic objective functions including the exergy efficiency, exergy destruction rate, exergy loss rate, and the potential improvement rate were assessed. After data acquisition, energy and exergy analysis of this unit was achieved by solving the related equations with the help of thermodynamic properties along with programming in EES software package.

Results and Discussion

The results showed that the highest exergy efficiency of 98.44% was assigned to the steam distributor (O) of the unit with a potential improvement rate of 1.51 kW and an exergy loss rate of 68.80 kW, as well as the pump (M) before the fourth boiler with an exergy efficiency of 19.69%, had the lowest value of exergy efficiency. The values of 12.55 and 11.93 kW were obtained for the exergy destruction rate and its potential improvement rate, respectively. The highest exergy destruction rate of the unit was for the first boiler with a value of 12391.80 kW, with an efficiency of 19.55% and a potential improvement rate of 10295.26 kW.

Conclusion

With regard to the energy and exergy analyses of the steam production system, more than 98% of the exergy destruction rate of the entire steam generation system was assigned to boilers, which had a major contribution to the exergetic efficiency of the system. The highest percentage of potential improvement was related to the first boiler and also the third boiler had the highest exergy loss rate, although the lowest exergy loss rate was the expansion tank of the system. In general, this study demonstrated the importance of exergy analysis for detecting the system components with the highest exergy destruction, which can be a breakthrough to identify these components and provides suitable solutions to improve the overall exergy efficiency of the steam-generating system.

Keywords: Exergetic efficiency, Exergy destruction rate, Exergy potential improvement rate, Steam generation system

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۳۰-۱۱۹

تحلیل اکسرژی سامانه تولید بخار به‌منظور کاوش پتانسیل بهینه‌سازی مصرف انرژی

ایمان گلپور[۱]، پرویز احمدی مقدم[۲*]، علی محمد نیکبخت[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

چکیده

در این کار تحقیقاتی، تحلیل انرژی و اکسرژی سامانه تولید بخار شرکت آبمیوه پاکدیس ارومیه با چهار دیگ بخار بررسی شد و با استفاده از معادلات تعادل جرم، انرژی و اکسرژی برای هر یک از اجزای سامانه، توابع هدف ترمودینامیکی شامل بازده اکسرژی، نرخ تخریب اکسرژی، نرخ تلفات اکسرژی و نرخ پتانسیل بهبود آن‌ها بر اساس قانون اول و دوم ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از اکتساب داده‌ها، تحلیل انرژی و اکسرژی این سامانه با حل معادلات مربوطه با کمک روابط خواص ترمودینامیکی همراه با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار EES صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که بیشترین بازده اکسرژی ۹۸/۴۴ درصد، مربوط به توزیع‌کننده بخار (O) سامانه با نرخ پتانسیل بهبود ۱/۵۱ کیلووات و نرخ تخریب اکسرژی ۲۸/۳۸ کیلووات بود، و همچنین پمپ (M) قبل از دیگ بخار چهارم با بازده اکسرژی ۱۹/۶۹ درصد دارای کمترین مقدار بازده اکسرژی بود به طوری‌که مقادیر ۱۲/۵۵ و ۱۱/۹۳ کیلووات به‌ترتیب برای نرخ تخریب اکسرژی و نرخ پتانسیل بهبود آن حاصل شد. بیشترین نرخ تخریب اکسرژی سامانه را دیگ بخار اول با مقدار ۱۲۳۹۱/۸۰ کیلووات با بازده ۱۹/۵۵ درصد و نرخ پتانسیل بهبود ۱۰۲۹۵/۲۶ کیلووات دارا بود. طبق نتایج حاصله، بیشترین و کمترین مقدار نرخ تلفات اکسرژی سامانه با مقادیر ۴۴۶/۹۰ و ۰/۴۷ کیلووات به‌ترتیب برای دیگ بخار سوم (L) و منبع انبساط (F) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بازده اکسرژی، سامانه تولید بخار، نرخ پتانسیل بهبود اکسرژی، نرخ تخریب اکسرژی

مقدمه

سامانه‌های تولید بخار در هر واحد صنعتی همچون صنایع غذایی، صنایع داروسازی، صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی و دیگر صنایع مهم، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین بخش‌های این واحدها محسوب می‌شوند که دستیابی به عملکرد بهینه سامانه با تحلیل روش‌های مناسب و ارائه راهکارهای مفید برای این سامانه‌ها، به‌عنوان هدفی دائم برای همه تولیدکنندگان و مجتمع‌های صنعتی مطرح می‌باشد تا با کاهش هزینه‌ها بتوانند مجموعه سودآورتری را اداره نمایند. به دلیل افزایش روزافزون مصرف انرژی و نیز کاهش مداوم منابع آن در جهان، به‌خصوص در ایران بحث انرژی و راهکارهای صرفه‌جویی و استفاده بهینه از آن می‌تواند نقش مهمی در حفظ ذخایر انرژی کشور داشته باشد. از طرفی، انرژی یکی از عوامل مهم تعیین‌کننده اقتصادی و صنعتی کشورها محسوب می‌شود به طوری‌که یک فاکتور مهم و اساسی در جهت رسیدن به هدف‌های اقتصادی و صنعتی می‌باشد (Jokandan *et al.*, 2015). در تحلیل سامانه‌های انرژی بر پایه قانون اول ترمودینامیک (موازنه انرژی)، تمام شکل‌های انرژی معادل فرض می‌شود و کاهش کیفیت انرژی با تبدیل شکل‌های انرژی لحاظ نمی‌شود در حالی‌که تحلیل اکسرژی همراه با قانون اول و دوم ترمودینامیک به‌صورت معیار جامعی از کیفیت شکل‌های مختلف انرژی در تحلیل سامانه‌های انرژی، این امکان را فراهم می‌سازد. تحلیل اکسرژی، ابزاری مفید برای ظاهر کردن تفاوت بین تلفات انرژی با برگشت‌ناپذیری‌های داخلی و سنجش کارکرد اجزای یک روند تولید است (Utlu and Hepbasli, 2007). لذا، این تحلیل، روشی مناسب برای تشخیص کارکرد اجزای فرآیند و تعیین انرژی مورد استفاده و تلف‌شده است (Ziaaddini *et al.*, 2017). بنابراین، با این روش می‌توان اکسرژی

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: p.ahmadi@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.57932.0

نقاطی را که در آن‌ها تبدیل انرژی صورت می‌گیرد، به‌دست آورد؛ راندمان اجزای سیکل را محاسبه کرد؛ همچنین می‌توان محل وقوع بیشترین تلفات را شناسایی و برای کاهش آن‌ها تلاش کرد (Dincer and Cengel, 2001). با این حال، موازنه انرژی، بیانی از قانون بقای انرژی و موازنه اکسرژی بیانی از قانون اتلاف انرژی[1] است. اتلاف انرژی معادل اتلاف اکسرژی[2] به علت برگشت‌ناپذیری فرآیندهای واقعی است، لذا فرآیندهای برگشت‌پذیر اتلاف اکسرژی ندارند (Kotas, 2012). با این حال، تحلیل اکسرژی به‌عنوان بهترین ابزار جهت بهینه‌سازی سیکل‌های صنعتی با توجه به داده‌های سیکل محسوب می‌شود (Rosen and Dincer, 2001). همچنین، تجزیه و تحلیل عملکرد اکسرژی نه تنها می‌تواند بزرگی، مکان و دلایل برگشت‌ناپذیری در سامانه‌های صنعتی را مشخص کند بلکه ارزیابی معنی‌دارتری از این سامانه‌ها را برای بهره‌وری اجزای مجزای آن‌ها می‌دهد. بنابراین، تجزیه و تحلیل اکسرژی نشان‌دهنده‌ی یک دید واقع‌بینانه از عملکرد تجهیزات است و ابزاری مفید برای ارزیابی مهندسی محسوب می‌شود (Utlu and Hepbasli, 2007; Rosen and Dincer, 2001). از آنجا که اکسرژی دسترسی به حداکثر کار مفیدی تعریف می‌شود که در ضمن رسیدن به تعادل با شرایط محیط از انرژی نابسامان[3] گرفته شود و با توجه به این‌که انواع مختلف انرژی به‌طور مستقیم در ترم‌های اکسرژی در نظر گرفته می‌شوند، می‌توان گفت که بازده اکسرژی یک معیار عینی و دقیق برای ارزیابی سیستم‌های ترمودینامیکی است (Kotas, 1995). امروزه استفاده از روش تحلیل اکسرژی و استفاده از قانون دوم ترمودینامیک در آنالیز سامانه‌های مهندسی، بر دیگر روش‌ها ترجیح داده می‌شود، زیرا این نوع تحلیل دارای دقت بیشتر، قابل اعتمادتر و از همه مهم‌تر دارای نتایج معنی‌دارتری است (Moran and Talwar, 1994). در سال‌های اخیر، محققان زیادی از روش اکسرژی برای تحلیل واحدهای صنعتی استفاده کردند. در پژوهشی، به تحلیل اکسرژی یک کوره اقتصادی پرداخته شد و بازده اکسرژی مورد ارزیابی قرار گرفت به صورتی‌که بازده اکسرژی سامانه ۵۵٪ برآورد شد (Camdali and Tunc, 2003). همچنین در تحقیقی دیگر، تحلیل انرژی و اکسرژی نیروگاه بخار شهید منتظری در اصفهان با ظرفیت ۲۰۰ مگاواتی مورد بررسی قرار گرفت (Ahmadi and Toghraie, 2016)؛ نتایج تحلیل انرژی و اکسرژی این تحقیق نشان داد که ۶۹/۸۰٪ انرژی تلف شده کل در کندانسور اتفاق افتاد درحالی‌که این تحلیل نشان داد که ۸۵/۶۶٪ کل اکسرژی ورودی توسط دیگ بخار از بین رفت. در تحقیقی دیگر، با استفاده از تحلیل انرژی و اکسرژی به بررسی تعیین محل‌ها و افت‌ها برای ماکزیمم کردن عملکرد یک نیروگاه ۵۰۰ مگاواتی پرداخته شد و بیشترین تخریب اکسرژی فرآیند تولید بخار را برای دیگ‌های بخار گزارش شد (Mborah and Gbadam, 2010). همچنین جوکندان و همکاران (Jokandan *et al.*, 2015) به تحلیل اکسرژی سامانه تولید بخار در یک کارخانه تولید ماست پرداختند و به این نتیجه رسیدند که دیگ‌های بخار با مقدار ۱۲۴۸۴/۸۸ کیلووات بیشترین نرخ تخریب اکسرژی را در بین تجهیزات کارخانه داشت.

بنابراین، گام اصلی در تحلیل سامانه‌های انرژی تشخیص محل و مقدار کاهش کیفیت انرژی است که با تحلیل اکسرژی در این تحقیق انجام می‌شود به طوری‌که این پژوهش یک طرح ارتباط با صنعت محسوب می‌شود و مبتنی بر عملکرد واقعی کارخانه انجام شده است و برای اولین مرتبه، تحلیل اکسرژی سامانه تولید بخار یک کارخانه تولید آبمیوه در ایران نیز انجام شده است که از نتایج این تحقیق می‌توان در تحقیقات دیگر در بخش تحلیل اکسرژی اقتصادی این سامانه نیز استفاده نمود. بر این اساس، با توجه به ضرورت و اهمیت سامانه تولید بخار در کارخانه‌ها که به‌عنوان بخش اساسی هر کارخانه جهت تولید بخار برای مصرف در واحدهای تولیدی داخلی آن‌ها به حساب می‌آید، در این تحقیق، عملکرد تجهیزات سامانه تولید بخار در شرکت تولید آبمیوه پاکدیس واقع در ارومیه بررسی و با تحلیل انرژی و اکسرژی، محل‌هایی با بیشترین اتلاف اکسرژی به‌عنوان نقاط بحرانی فرآیند شناسایی می‌شود.

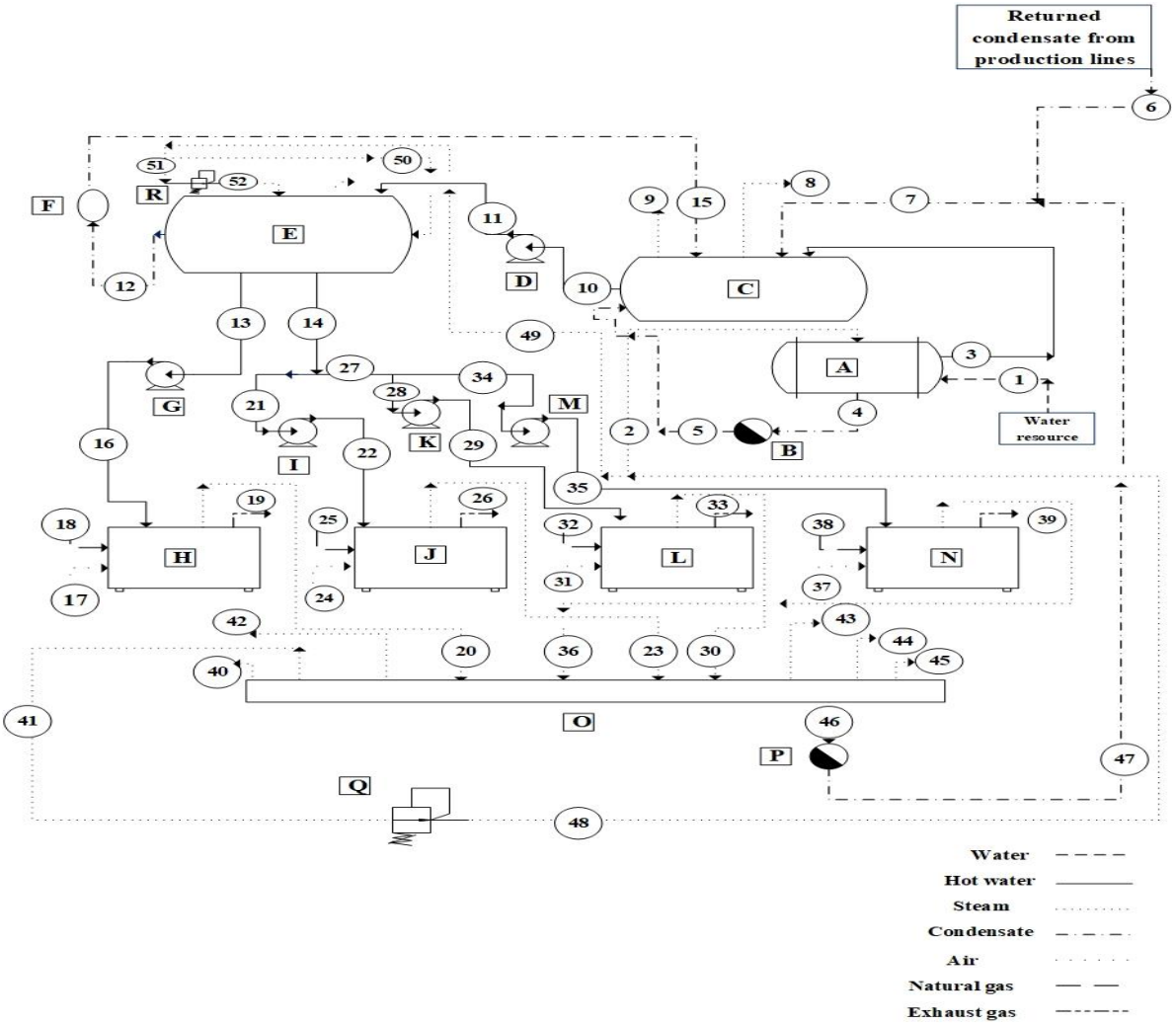
مواد و روش‌ها

سامانه تولید بخار

ابتدا برای تحلیل اکسرژی، طرحواره‌ای از سامانه تولید بخار رسم شد و مسیر ورود تا خروج آب سرد، آب گرم و بخار تعیین گردید. این طرحواره از سامانه تولید بخار مرکزی شرکت آبمیوه پاکدیس ارومیه، در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن، اعداد داخل دایره نشان‌دهنده‌ی مسیر جریان و اعداد داخل مربع نشان‌دهنده‌ی اجزای سامانه می‌باشند؛ لازم به ذکر است که این دیاگرام جریان فرآیند[4] (PFD) با کمک نرم‌افزار Visio Professional (2016) ترسیم شده است (شکل ۱). در این تحقیق، مدل دی اریتور HDL ساخت ایران با ظرفیت ۱۱۰۰۰ پوند بر ساعت، دیگ بخار H، با مدل ۳۰C با ظرفیت ۳۰۰۰۰ پوند بر ساعت، دیگ بخار J و L، با مدل ۲۲۵C با ظرفیت ۱۴۰۰۰ پوند بر ساعت و دیگ بخار N، با مدل ۱۴C با ظرفیت ۳۰۰۰۰ پوند بر ساعت به طوری‌که هر چهار دیگ بخار ساخت کشور ایران بودند. در این سامانه، ابتدا آب سرد با دمای ۲۹۲/۱۵ درجه کلوین برای عملیات پیش گرمایش، وارد مبدل حرارتی پوسته و لوله

1- Degradation of energy
2- Exergy loss
3- Disordered energy
4- Process flow diagram

شد و در نهایت آب با دمای ۳۲۰/۱۵ درجه کلوین از مبدل حرارتی خارج و وارد مخزن کندانس شد. آب وارد شده همراه با آب کندانس‌های برگشتی از سالن‌های تولید و دی اریتور، با دمای ۳۳۹/۶۵ درجه کلوین به دی‌اریتور پمپاژ شد تا عملیات اکسیژن‌زدایی و گرم کردن آب ورودی به دیگ‌های بخار صورت پذیرد. بخار ورودی به دی‌اریتور با دما و فشار به‌ترتیب ۳۸۳/۱۵ درجه کلوین و ۱۳۱/۳۲۵ کیلوپاسکال از توزیع‌کننده بخار مرکزی پس از خروج فشارشکن تأمین شد. در نهایت، آب خروجی از دی‌اریتور با دمای ۳۶۱/۶۵ درجه کلوین وارد دیگ‌های بخار فایرتیوب برای تولید بخار مورد استفاده سالن‌های تولید کارخانه منتقل شد. لازم به ذکر است که بخار تولیدی هر یک از دیگ‌های بخار به‌ترتیب برای دیگ اول ۴۵۳/۱۵ درجه کلوین و ۱۰۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال (جریان ۲۰)، دیگ بخار دوم ۴۴۳/۱۵ درجه کلوین و ۹۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال (جریان ۲۳)، دیگ بخار سوم ۴۴۶/۱۵ درجه سلسیوس و ۹۵۱/۳۲۵ کیلوپاسکال (جریان ۳۰)، و دیگ بخار چهارم، ۴۳۸/۱۵ درجه کلوین و ۹۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال (جریان ۳۶) حاصل شد. در نهایت، بخارهای تولیدی از دیگ‌های بخار به توزیع‌کننده بخار منتقل شد تا برای مصرف سالن‌های تولید کارخانه مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱- طرحواره سامانه تولید بخار مرکزی: A: مبدل حرارتی؛ B و P: تله‌بخارها؛ C: مخزن کندانس؛ D، G، I، K و M: پمپ‌ها؛ E: دی اریتور؛ F: منبع انبساط؛ H، J، L و N: دیگ‌های بخار؛ O: توزیع‌کننده بخار؛ Q و R: فشارشکن‌ها

Fig.1. Scheme of central steam generation system: A: heat exchanger; B and P: steam traps; C: condensate tank; D, G, I, K and M: pumps; E: deaerator; H, J, L and N: boilers; O; steam distributer; R and Q; pressure reducers

اکتساب داده‌ها

داده‌های مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل اکسرژی سامانه تولید بخار، از شرکت تولید آبمیوه پاکدیس واقع در منطقه شمال غربی ایران، در استان آذربایجان غربی، شهر ارومیه به‌دست آمد. در نهایت،

داده‌های زیر از کل سامانه تهیه گردید: نوع سیال (آب، بخار، هوای فشرده)، وضعیت سیال در کل خطوط (دما، فشار و دبی هر سیال در هر انشعاب و (توان اسمی و مصرفی پمپ‌ها).

لازم به ذکر است برای کسب داده‌ها هم از داده‌های ثبت شده در کارخانه و هم از ابزارهای اندازه‌گیری برای تعیین برخی پارامترها برای تحلیل اکسرژی استفاده شد. دستگاه دبی‌سنج صوتی که ساخت شرکت krohne مدل UFM 610P ساخت کشور آلمان بود برای اندازه‌گیری دبی آب گرم و سرد مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲). این نکته باید ذکر شود که این دبی‌سنج تقریباً در فاصله یک متری از ورودی و خروجی اجزا قرار می‌گرفت.

شکل ۲– سامانه اندازه‌گیری دبی آب ورودی و خروجی هر تجهیز

Fig.2. Measurement system of the inlet and outlet water mass flow of each component

همچنین اندازه‌گیری دماهایی که در دسترس نبود با دماسنج مادون قرمز (MASTECH, MS6520B) ساخت کشور ترکیه، به‌دست آمد. با توجه به این‌که برای محاسبه اکسرژی هوای ورودی به دیگ بخار نیاز به دبی هوای ورودی بود، بنابراین دبی هوای ورودی به دمنده توسط بادسنج سیم داغ (MODEL 8465- TSI) ساخت کشور آمریکا اندازه‌گیری شد به طوری‌که برای این منظور در قسمت ورودی فن، مقدار دبی در نقاط مختلف آن اندازه‌گیری شد و در نهایت، میانگین آن‌ها برای محاسبه دبی هوای ورودی جهت تحلیل اکسرژی در نظر گرفته شد. با این حال، این نکته باید بیان شود که برخی از داده‌ها توسط کارخانه ثبت شد و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت به طوری‌که از سنسور PT100 برای اندازه‌گیری دما، گیج‌های فشار برای اندازه‌گیری فشار که متناسب با ورودی و خروجی‌ها هر جریان اجزای مشخص، قرار می‌گرفت. همچنین، توان مصرفی پمپ‌ها نیز توان نامی پمپ‌ها در بازده مکانیکی، بازده الکتریکی و بازده حجمی آن‌ها ضرب شد و در نهایت توان مصرفی حاصل شد که در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

فرض‌های تحلیل اکسرژی

در طی روند انجام این تحقیق، فرض‌های زیر در نظرگرفته شد (Dowlati *et al.*, 2017):

الف) کل سامانه تولید بخار و اجزای مشخص آن، در شرایط حالت پایا نسبت به زمان در نظرگرفته شد.

ب) هوای ورودی و گاز احتراق خروجی از دیگ بخار به‌عنوان مخلوط گازهای ایده‌آل در نظر گرفته شد.

پ) برای احتراق گاز طبیعی در سامانه تولید بخار، یک واکنش شیمیایی کامل فرض شده است.

ت) اکسرژی‌های جنبشی و پتانسیل جریان‌های مختلف، با توجه به سهم ناچیز نسبت به کل اکسرژی، صرف‌نظر شد.

ث) دما و فشار حالت مرجع به‌ترتیب ۲۹۳/۱۵ کلوین و ۱۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد.

ج) تغییر در دمای محیط صرف‌نظر شد.

تحلیل انرژی و اکسرژی

اصل بقای جرم یا به نوعی معادلهٔ تعادل جرمی برای یک سیستم جریان پایا با چندین ورودی و خروجی در یک سیستم حجم کنترل می‌تواند به شکل نرخی به‌صورت رابطه (۱) بیان شود (Szargut *et al.*, 1988):

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \qquad (۱)$$

علاوه بر این، اصل بقای انرژی یا معادلهٔ تعادل انرژی برای یک سیستم جریان پایا در یک حجم کنترل را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) بیان نمود:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}h - \sum_{in} \dot{m}h \quad \text{یا} \quad \sum \dot{E}n_{in} = \sum \dot{E}n_{out} \qquad (۲)$$

که در این معادلات $\dot{m}_{in}$ و $\dot{m}_{out}$ به‌ترتیب نرخ‌های جریان‌های جرمی ورودی و خروجی (کیلوگرم بر ثانیه)، $\dot{E}n_{in}$ و $\dot{E}x_{out}$ نرخ‌های انرژی ورودی و خروجی (کیلوژول بر ثانیه)، h_{in} و h_{out} آنتالپی‌های ورودی و خروجی (کیلوژول بر کیلوگرم)، $\dot{Q}$ نرخ انتقال حرارت (کیلوژول بر ثانیه) و $\dot{W}$ نرخ کار (کیلوژول بر ثانیه) است.

علاوه بر این، معادلهٔ تعادل اکسرژی برای حالت پایا در یک حجم کنترل، برای به‌دست آورن تخریب اکسرژی به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود (Ahmadi and Toghraei, 2016):

$$\dot{Q}(1 - T_0/T_s) - \dot{W} + \sum(\dot{m}_{in}h_{in}) - \sum(\dot{m}_{out}h_{out}) = \sum(\dot{E}x_{des}) \quad \text{یا} \quad (\dot{E}x_{in}) - \dot{E}x_out = \sum(\dot{E}x_{des}) + \dot{E}x_loss \qquad (۳)$$

که $\dot{E}x_in$ و $\dot{E}x_out$ نرخ‌های اکسرژی ورودی و خروجی (کیلوژول بر ثانیه)، $\dot{E}x_des$ نرخ تخریب اکسرژی (کیلوژول بر

ثانیه)، $\dot{E}x_loss$ نرخ اکسرژی تلف شده، T_s دما بر حسب درجهٔ کلوین، T_0 دمای محیط بر حسب درجهٔ کلوین هستند.

با این حال، اکسرژی جریان ویژه و نرخ اکسرژی جریانی فیزیکی آب و بخار نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد (Colak *et al.*, 2013):

$$ex^{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad \text{و} \quad \dot{E}x^{ph} = \dot{m}\, ex \tag{۴}$$

که در آن، $\dot{E}x^{ph}$ نرخ اکسرژی فیزیکی آب (کیلوژول بر ثانیه)، $\dot{m}$ نرخ جریان جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)، h آنتالپی ویژهٔ آب (کیلوژول بر کیلوگرم)، h_0 آنتالپی مرجع (کیلوژول بر کیلوگرم)، s آنتروپی ویژهٔ آب (کیلوژول بر کیلوگرم درجهٔ کلوین) و s_0 آنتروپی مرجع (کیلوژول بر کیلوگرم درجهٔ کلوین) است.

در حالت کلی، نرخ اکسرژی کل دیگ بخار از مجموع اکسرژی فیزیکی و شیمیایی حاصل شد (Soufiyan *et al.*, 2016):

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{ph} + \dot{E}x^{ch} \tag{۵}$$

که نرخ اکسرژی شیمیایی سوخت مصرفی (گاز طبیعی) به‌صورت رابطه (۶) به‌دست آمد:

$$\dot{E}x^{ch} = \dot{m}\, ex^{ch} = \dot{m}\varphi q_{LHV} \tag{۶}$$

به طوری که φ فاکتور اکسرژی شیمیایی سوخت‌های هیدروکربنی محسوب می‌شود و با استفاده از رابطه (۷) حاصل شد به طوری‌که q_{LHV} ارزش حرارتی پایین سوخت (کیلوژول بر کیلوگرم) است (Soufiyan *et al.*, 2016):

$$\varphi = 1.033 + 0.0169\frac{b}{a} - \frac{0.0698}{a} \tag{۷}$$

و همچنین نرخ اکسرژی فیزیکی گاز طبیعی مصرفی، هوای ورودی و دود خروجی نیز از رابطه (۸) به‌دست آمد (Dowlati *et al.*, 2017):

$$\dot{E}x^{ph} = \dot{m}[C_p (T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0)) + RT_0 \ln(P/P_0)] \tag{۸}$$

که در آن، $\dot{E}x^{ph}$ نرخ اکسرژی فیزیکی برای هوا یا گاز (کیلوژول بر ثانیه)، $\dot{m}$ نرخ جریان جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)، C_p گرمای ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم درجهٔ کلوین)، T دمای هوا یا گاز بر حسب درجهٔ کلوین، R ثابت گازها و P فشار هوا یا گاز (کیلوپاسکال) است.

که ظرفیت گرمای ویژه گاز طبیعی از رابطه (۹) به‌دست آمد:

$$C_p = \sum_{i=1}^{n} X_i C_{p,i} \tag{۹}$$

که در روابط بالا C_p ظرفیت گرمای ویژه هوا یا گاز (کیلوژول بر کیلوگرم درجهٔ کلوین)، $C_{p,i}$ گرمای ویژهٔ جز i هوا یا گاز (کیلوژول بر کیلوگرم درجهٔ کلوین)، X_i کسر مولی جز i، هستند.

$$\dot{E}x^{ch} = \dot{m}n(\sum_i (y_i \varepsilon_i + RT_0 \sum_i (y_i \ln(y_i))) \tag{۱۰}$$

به‌طوری که ε_i اکسرژی استاندارد شیمیایی (کیلوژول بر مول)، y_i کسر مولی جز i، $\bar{R}$ ثابت عمومی گازها (۸/۳۱۴ ژول بر مول درجه کلوین)، n تعداد مول ویژه (مول بر کیلوگرم) هستند. باید اشاره شود که اکسرژی شیمیایی گاز داغ خروجی با استفاده از اکسرژی‌های شیمیایی استاندارد ترکیبات گاز خروجی به‌دست آمد (Jokandan *et al.*, 2015). همچنین، درصدهای مولی استاندارد اجزای مختلف که در حالت مرجع مورد بررسی قرار گرفته به شرح زیر می‌باشد (Szargut *et al.*, 1988):

(O_2)=۷۵/۶۷, (N_2)=۲۰/۳۴, (CO_2)=۰/۰۳, $H_2O(g)$=۳/۰۳, (Ar)=۰/۹۲, (He)=۰/۰۰۵۲, (Ne)=۰/۰۰۱۸, (Kr)=۰/۰۰۰۰۷۶

با این حال، بازدهی قانون دوم ترمودینامیک (بازدهٔ اکسرژی) به‌عنوان یک مقیاس تقریبی از عملکرد برگشت‌پذیر در نظر گرفته شد که با استفاده از رابطه (۱۱) طبق عملکرد هر جز سامانه محاسبه شد:

$$\psi = (\dot{E}x_product)/(\dot{E}x_fuel) \tag{۱۱}$$

به طوری که ψ بازده اکسرژی، $\dot{E}x_product$ نرخ اکسرژی محصول و $\dot{E}x_fuel$ نرخ اکسرژی سوخت در هر تجهیز می‌باشد.

در نهایت نرخ پتانسیل بهبود اکسرژی برای هر واحد عملیاتی با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه شد (Hepbasli, 2010):

$$\dot{I}P = (1 - \psi)(\dot{E}x_in - \dot{E}x_out) \tag{۱۲}$$

در رابطهٔ (۱۲) $\dot{I}P$ نرخ پتانسیل بهبود (کیلوژول بر ثانیه)، $\dot{E}x_in$ و $\dot{E}x_in$ به‌ترتیب مجموع نرخ‌های اکسرژی ورودی به سامانه و مجموع نرخ‌های اکسرژی خروجی از سامانه (کیلوژول بر ثانیه) است.

علاوه بر این، نرخ اکسرژی تلف شده به دلیل انتقال حرارت از بدنه هر جز به محیط با استفاده از رابطه (۱۳) به‌دست آمد (Ahmadi and Toghraei, 2016):

$$\dot{E}x_(HL/HA) = \dot{Q}_(HL/HA)\,(1 - T_0/T_s) \tag{۱۳}$$

لازم به ذکر است که از نرم‌افزار EES (Engineering Equation Solver) برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد به طوری‌که پس از وارد کردن داده‌ها و مشخص نمودن یکاهای آن‌ها با برنامه‌نویسی در این نرم‌افزار، تحلیل انرژی و اکسرژی سامانه انجام شد.

تحلیل عدم قطعیت با استفاده از روش توسعه‌یافته توسط هولمان (Holman, 2001) به‌منظور نمایش تکرارپذیری و تکرارناپذیری خطای آزمایشی داده‌ها با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد:

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial z_1}u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z_2}u_2\right)^2 + \ldots \left(\frac{\partial F}{\partial z_n}u_n\right)^2} \tag{۱۴}$$

نتایج و بحث

عدم قطعیت

در جدول ۱، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت‌های دقیق برای اجزای سامانه تولید بخار مطابق رابطه (۱۴) محاسبه شده است. به‌طور کلی، همه عدم قطعیت‌های محاسبه شده در یک سطح قابل قبول (کمتر از ۵ درصد) می‌باشند.

تحلیل اکسرژی

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و ثبت‌شده در سامانه تولید بخار شرکت پاکدیس، نوع سیال، دما، فشار و نرخ جریان جرمی به‌دست آمد به طوری که جدول ۲، نرخ اکسرژی جریان‌های این سامانه را بر اساس شماره هر نقطه که در شکل ۱ داده شده را نشان می‌دهد که با استفاده از روابط بیان شده برای هر جریان به‌دست آمد.

علاوه بر این، جدول ۳ شامل نرخ اکسرژی ورودی، نرخ اکسرژی خروجی، تخریب اکسرژی، بازده اکسرژی و نرخ پتانسیل بهبود هر یک از اجزای سامانه تولید بخار می‌باشد که با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول ۲ محاسبه شده است. با توجه نتایج به‌دست آمده، مشخص شد که بیشترین نرخ اکسرژی ورودی‌ها مربوط به دیگ‌های بخار بود به طوری که بیشترین مقدار اکسرژی ورودی برای این دیگ‌ها، ۱۵۹۰۷/۳۰ کیلووات برای دیگ بخار اول بود و اکسرژی خروجی آن مقدار ۳۱۱۰/۲۰ کیلووات حاصل شد. پس از دیگ بخار اول، نرخ اکسرژی ورودی دیگ بخار سوم (۱۱۳۵۸/۳۶ کیلووات با نرخ اکسرژی خروجی ۲۴۰۹/۴۴ کیلووات) دارای بیشترین نرخ اکسرژی ورودی بود. لازم به ذکر است که کمترین مقدار نرخ اکسرژی ورودی با توجه به مقادیر مشخصات ورودی مربوط به تله بخار (B) با مقدار نرخ ۴/۴۸ کیلووات حاصل شد (جدول ۳). همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، در تمامی اجزای سامانه، مقادیر اکسرژی ورودی از اکسرژی خروجی بیشتر می‌باشد که این اختلاف بین اکسرژی ورودی و خروجی نشان‌دهنده‌ی تخریب اکسرژی در اجزای سامانه تولید بخار می‌باشد که بیشترین مقدار این اختلاف به‌ترتیب مربوط به دیگ بخار اول (H)، دیگ بخار سوم (L)، دیگ بخار دوم (J)، و دیگ بخار چهارم (N)، می‌باشد. با این حال، می‌توان بیشترین سهم‌های اصلی نرخ‌های تخریب اکسرژی در سامانه تولید بخار را به‌ترتیب زیر براساس اهمیت نزولی دسته‌بندی نمود: دیگ بخار اول (H) (۱۲۳۹۱/۸۰ کیلووات)، دیگ بخار سوم (L) (۸۵۰۲/۰۲ کیلووات)، دیگ بخار دوم (J) (۸۰۲۵/۱۵ کیلووات)، دیگ بخار چهارم (N) (۳۳۸۱/۹۸ کیلووات)، دی‌اریتور (E) (۱۴۰/۷۰ کیلووات)، فشارشکن (Q) (۱۳۴/۵۴ کیلووات)، مبدل حرارتی (A) (۳۲/۳۹ کیلووات) و مقادیر دیگر تخریب سایر تجهیزات که در جدول ۳ مشخص است به طوری که از کمترین مقادیر تخریب‌ها می‌توان به تله بخار (B) (۱/۴۸ کیلووات)، تله بخار (P) (۰/۰۶ کیلووات) و منبع انبساط (F) (۰/۰۱ کیلووات) اشاره نمود (جدول ۳).

شکل ۳، درصد نرخ‌های تخریب اکسرژی اجزای سامانه تولید بخار را نشان می‌دهد به طوری که مشخص است بیش از ۹۸ درصد نرخ تخریب اکسرژی سامانه تولید بخار مربوط به دیگ‌های بخار می‌باشد که به‌ترتیب برای دیگ بخار اول، دوم، سوم و چهارم ۳۷/۸۲، ۲۴/۵۷، ۲۵/۹۴ و ۱۰/۳۲ درصد از کل تخریب اکسرژی این خط در آن اتفاق افتاده است که اثر عمیق آن روی کل بازده اکسرژی سامانه آشکار است (شکل ۳). با این حال، این نتایج به‌دست آمده با نتایج جوکندان و همکاران (Jokandan *et al.*, 2015) همخوانی داشت به طوری‌که دیگ‌های بخار در تحقیق مربوطه بیشترین نرخ تخریب اکسرژی و کمترین بازده را داشتند. بنابراین، انتقال حرارت شدید، واکنش شیمیایی شدید، تغییر شکل سریع فازی آب و اختلاط بزرگ را می‌توان به‌عنوان دلایلی برای نرخ تخریب اکسرژی بالای آن‌ها ذکر کرد. لذا، با ارائه راهکارهایی همچون غنی‌سازی اکسیژن و پیش‌گرمایش هوا و همچنین کاهش مقدار هوای احتراق می‌توان برگشت‌ناپذیری دیگ بخار را کاهش داد. همچنین، با نگهداشتن دمای شعله در مقادیر بالاتر و حفظ گرادیان دما در مقادیر پایین‌تر در محفظه احتراق می‌توان، نرخ تخریب اکسرژی را کاهش داد به طوری‌که در تحقیق (Gümüş and Atmaca, 2013) چنین راهکارهایی را برای کاهش برگشت‌ناپذیری دیگ بخار گزارش نمودند.

جدول ۱- تحلیل عدم قطعیت برای اجزای سامانه تولید بخار

Table 1- Uncertainty analysis for the components of the steam generation unit

عدم قطعیت Uncertainty	واحد Unit	پارامترها Parameters
± 0.028	(°C)	عدم قطعیت در اندازه‌گیری دما (Uncertainty in the temperature measurement)
± 0.015	(kPa)	عدم قطعیت در اندازه‌گیری فشار (Uncertainty in the pressure measurement)
± 0.214	(kg s^{-1})	عدم قطعیت در اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی هوا (Uncertainty in the mass flow rate measurement of air)
± 0.022	(kg s^{-1})	عدم قطعیت در اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی آب (Uncertainty in the mass flow rate measurement of water)
± 1.428	%	عدم قطعیت بازده اکسرژی مبدل حرارتی (Uncertainty for exergy efficiency of heat exchanger)

جدول ۲- نوع سیال، دما، فشار و نرخ جریان جرمی و نرخ اکسرژی برای جریان‌های سامانه تولید بخار

Table 2- Fluid type, temperature, pressure, mass flow rate, and exergy rate for the streams of the steam generation system

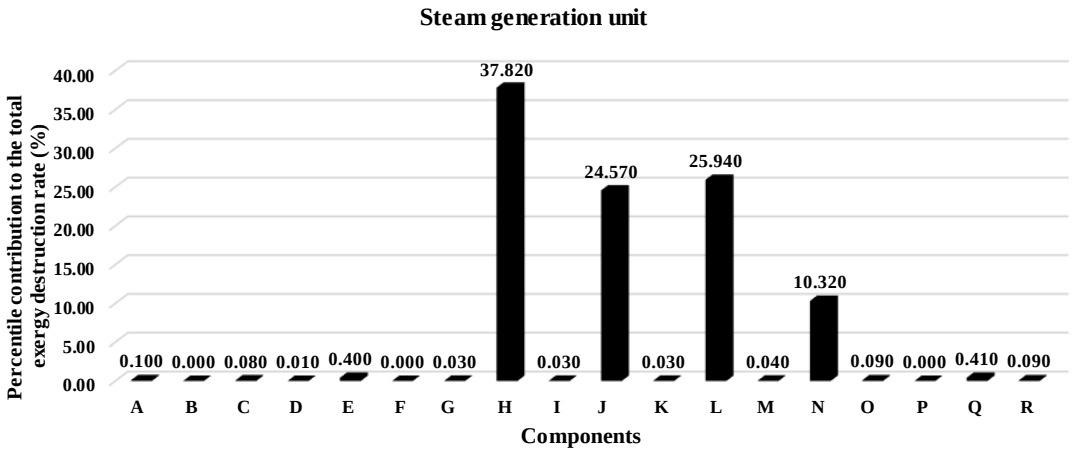
شماره جریان State no.	نوع سیال Fluid type	نرخ اکسرژی Exergy rate (kW)	شماره جریان State no.	نوع سیال Fluid type	نرخ اکسرژی Exergy rate (kW)
1	آب (Water)	0.49	27	آب داغ (Hot water)	137.37
2	بخار (Steam)	68.59	28	آب داغ (Hot water)	80.79
3	آب داغ (Hot water)	27.98	29	آب داغ (Hot water)	86.26
4	آب کندانس (Condensate)	4.48	30	بخار (Steam)	1620.00
5	آب کندانس (Condensate)	2.65	31	هوا (Air)	0.00
6	آب کندانس (Condensate)	120.40	32	گاز طبیعی (Natural gas)	11256.60
7	آب کندانس (Condensate)	142.00	33	گاز داغ خروجی (Exhaust gas)	889.44
8	بخار (Steam)	3.02	34	آب داغ (Hot water)	56.58
9	بخار (Steam)	1.84	35	آب داغ (Hot water)	60.22
10	آب داغ (Hot water)	146.30	36	بخار (Steam)	926.22
11	آب داغ (Hot water)	151.10	37	هوا (Air)	0.00
12	بخار+ آب داغ (Steam+ Hot water)	11.67	38	گاز طبیعی (Natural gas)	4936.08
13	آب داغ (Hot water)	106.70	39	گاز داغ خروجی (Exhaust gas)	579.00
14	آب داغ (Hot water)	218.20	40	بخار (Steam)	925.44
15	آب داغ (Hot water)	11.19	41	بخار (Steam)	438.70
16	آب داغ (Hot water)	114.00	42	بخار (Steam)	1490.94
17	هوا (Air)	0.00	43	بخار (Steam)	1325.14
18	گاز طبیعی (Natural gas)	15666.80	44	بخار (Steam)	891.20
19	گاز داغ خروجی (Exhaust gas)	988.20	45	بخار (Steam)	985.10
20	بخار (Steam)	2122.00	46	بخار (Steam)	5.82
21	آب داغ (Hot water)	80.79	47	آب کندانس (Condensate)	4.14
22	آب داغ (Hot water)	87.38	48	بخار (Steam)	246.29
23	بخار (Steam)	1530.00	49	بخار (Steam)	177.70
24	هوا (Air)	0.00	50	بخار (Steam)	83.74
25	گاز طبیعی (Natural gas)	10574.49	51	بخار (Steam)	93.96
26	گاز داغ خروجی (Exhaust gas)	838.20	52	بخار (Steam)	59.75

با این حال، تمامی راه حل‌های ذکر شده در بالا اشکالاتی مانند دمای بالای گاز خروجی و اتلاف بیشتر حرارت از دودکش دیگ بخار به محیط را دارند. علاوه بر این، پیش گرمایش آب ورودی با استفاده از گرمای گازهای خروجی می‌تواند به بهبود بازده اکسرژی دیگ‌های بخار کمک کند که چنین راهکاری برای افزایش بازده دیگ بخار در تحقیق (Todorović *et al.*, 2014) ذکر شده است. همچنین، پس از دیگ‌های بخار، دی اریتور (E)، فشارشکن (Q) و مبدل حرارتی به‌ترتیب با درصد نرخ تخریب‌های ۰/۴۳، ۰/۴۱ و ۰/۱ درصد، بیشترین تخریب را دارا بودند و در نهایت منبع انبساط، کمترین مقدار و تخریب تخریب اکسرژی را در این سامانه داشت (شکل ۳). با توجه به این موضوع که برای منبع انبساط تقریباً هیچ تغییرات دما و فشار در آن وجود نداشت؛ نرخ‌های تخریب اکسرژی تقریباً نزدیک صفر به‌دست آمد. کاهش دمای زیاد و کاهش فشار بالا، می‌تواند به‌عنوان دلایلی برای نرخ تخریب اکسرژی بالای رخ داده شده در کاهنده فشارها باشد. باید به این اشاره شود که بخشی از این برگشت‌ناپذیری می‌تواند به‌وسیله یک شیر اختلاط ساده بازیابی شود. انتقال حرارت سریع همراه با تفاوت دمایی زیاد در مبدل حرارتی سامانه تولید بخار برای نرخ تخریب اکسرژی بالا رخ داده در این سامانه ظاهر شد. همچنین، اگر بتوان مقدار انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی را با کمترین اختلاف دمایی ممکن بین سیالات در اطراف محصول و سوخت حفظ نمود، نرخ تخریب اکسرژی آن می‌تواند کاهش یابد.

جدول ۳- نرخ‌های اکسرژی ورودی و خروجی، نرخ تخریب اکسرژی، بازده اکسرژی و نرخ پتانسیل بهبود اکسرژی برای هر جزء از سامانه تولید بخار

Table 3- Inlet and outlet exergy rates, exergy destruction rate, exergy loss rate, exergetic efficiency, and exergetic improvement potential rate of each component of the steam generation system

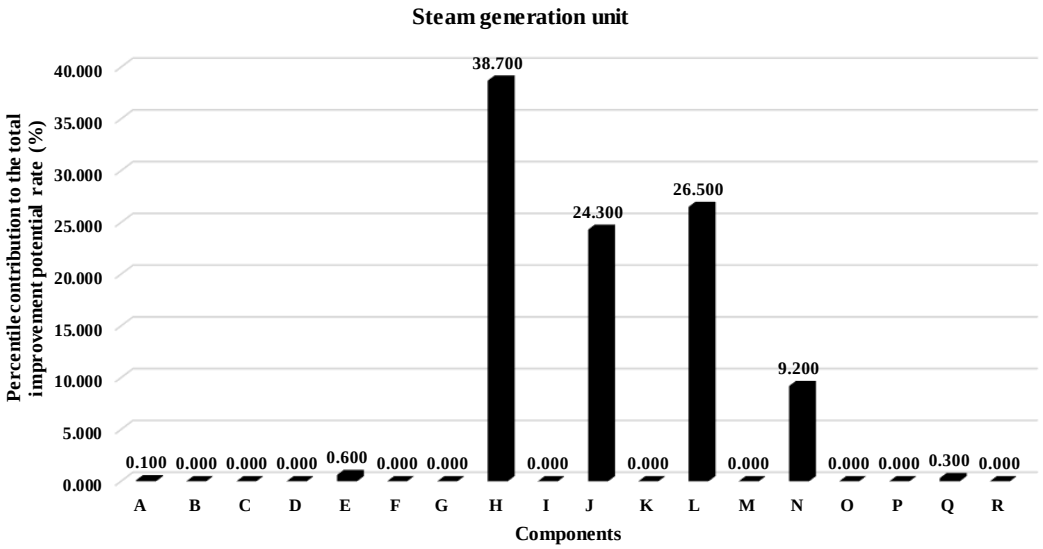
تجهیزات Subcomponent(s)	نرخ اکسرژی ورودی Inlet exergy rate (kW)	نرخ اکسرژی خروجی Outlet exergy Rate (kW)	نرخ تخریب اکسرژی Exergy destruction rate (kW)	نرخ اکسرژی تلف شده Exergy loss Rate (kW)	بازده اکسرژی Exergetic efficiency (%)	نرخ پتانسیل بهبود Improvement potential rate (kW)
مبدل حرارتی (A)	69.08	32.46	32.39	4.22	42.88	20.92
تله بخار (B)	4.48	2.65	1.48	0.34	59.22	0.74
مخزن کندانس (C)	183.80	154.20	25.50	4.11	83.89	4.77
پمپ (D)	154.40	151.10	2.38	1.01	58.73	1.40
دی اریتور (E)	664.80	336.60	140.70	187.50	50.62	162.10
منبع انبساط (F)	11.67	11.19	0.01	0.47	95.88	0.01
پمپ دیگ بخار اول (G)	125.20	114.00	10.08	1.19	39.09	6.86
دیگ بخار اول (H)	15907.30	3110.20	12391.80	405.30	19.55	10295.26
پمپ دیگ بخار دوم (I)	99.29	87.38	11.27	0.64	35.60	7.67
دیگ بخار دوم (J)	10671.25	2368.20	8052.15	250.90	22.19	6460.60
پمپ دیگ بخار سوم (K)	99.29	86.26	11.28	1.75	29.59	9.17
دیگ بخار سوم (L)	11358.36	2409.44	8502.02	446.90	21.21	7050.85
پمپ دیگ بخار چهارم (M)	75.08	60.22	12.55	2.30	19.69	11.93
دیگ بخار چهارم (N)	5004.80	1505.22	3381.98	117.60	30.07	2446.90
توزیع‌کننده بخار (O)	6234.42	6137.24	28.38	68.80	98.44	1.51
تله بخار (P)	5.82	4.14	0.06	1.61	71.12	0.48
فشارشکن (Q)	438.70	246.29	134.54	57.87	56.14	84.37
فشارشکن (R)	93.96	59.75	30.91	3.29	63.59	12.45



شکل ۳- سهم درصدی نرخ‌های تخریب اکسرژی اجزای مختلف سامانه تولید بخار به نرخ تخریب اکسرژی کل

Fig.3. Percentile contribution of the exergy destruction rate of the different components of steam generation unit to the total exergy destruction rate

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای بازده اکسرژی‌های تجهیزات، توزیع‌کننده بخار (O) با بازده اکسرژی ۹۸/۴۴ درصد دارای بیشترین بازده اکسرژی و همچنین، منبع انبساط (F) و منبع انبساط (C) دومین و سومین بازده اکسرژی را به‌ترتیب ۹۵/۸۸ و ۸۳/۸۹ درصد بازده اکسرژی خط تولید بخار نشان دادند (جدول ۳). همچنین با توجه به این نتایج مشخص است که دیگ بخار اول (H)، دارای کمترین بازده اکسرژی ۱۹/۵۵ درصد است. کمترین بازده اکسرژی دوم با بازده ۱۹/۶۹ درصد مربوط به پمپ دیگ بخار چهارم (M) بود که در بین بازده پمپ‌ها نیز کمترین مقدار را داشت (جدول ۳). با این حال، می‌توان بازده کم پمپ را به نرخ بالای تخریب اکسرژی و به علت مقدار بالای کار مکانیکی اعمال شده برای پمپاژ آب در این واحد نسبت داد که به دلیل اتلاف حرارتی می‌تواند باشد به طوری که این نتایج با نتایج جوکندان و همکاران (Jokandan *et al.*, 2015) مشابهت داشت که علت بازده پایین پمپ‌ها را مقدار کار مکانیکی و اتلاف حرارتی بالای آن بیان نمودند. بنابراین، درصد پایین بازده اکسرژی پمپ‌ها را با کاهش اکسرژی مصرفی الکتریکی پمپ‌ها با استفاده از محرک‌های با سرعت متغیر (VSD) کاهش داد و به همین صورت می‌توان باعث تقویت بازده‌های اکسرژی آن شد. دی اریتور با بازده ۵۰/۶۲ درصد بعد از دیگ‌های بخار اول، سوم و دوم، دارای بیشترین نرخ تلفات اکسرژی ۱۸۷/۵۰ کیلووات بود به طوری که بازده دی‌اریتور را می‌توان با عایق‌بندی مناسب، قرارگیری در ارتفاع بیشتر و افزایش دمای ورودی آب به آن افزایش داد. همچنین، کمترین بازده به‌دست آمده برای دیگ‌های بخار پس از دیگ بخار اول H با بازده ۱۹/۵۵ درصد، مربوط به دیگ‌های بخار سوم، دوم و چهارم به‌ترتیب بازده‌های اکسرژی ۲۱/۲۱، ۲۲/۱۹ و ۳۰/۰۷ درصد حاصل شد (جدول ۳). بنابراین، بازده اکسرژی دیگ‌های بخار فایرتیوب را می‌توان با نصب توربولاتور بهبود بخشید به طوری‌که با ایجاد اغتشاش در جریان و از بین بردن لایه مرزی، ضریب انتقال حرارت را افزایش داده و از رسوب دوده بر سطح داخلی لوله جلوگیری می‌کند و باعث طولانی‌تر شدن مسیر عبور جریان دود در لوله می‌شود و در نتیجه دوده مدت زمان بیشتری در تماس با سطح تبادل حرارتی قرار می‌گیرد و میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. عایق‌بندی و آب‌بندی قاب دیگ‌های بخار تجاری، راه‌حل دیگری برای افزایش بازده حرارتی می‌تواند باشد. همچنین، بازده اکسرژی دیگ بخار را با کمینه کردن برگشت‌ناپذیری و کاهش اتلاف حرارتی می‌توان افزایش داد. بازده اکسرژی توزیع‌کننده بخار (O) را نیز با ایزوله کردن مناسب جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی می‌توان به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. بازده مخزن کندانس را نیز با می‌توان با عایق‌بندی مناسب و همچنین با افزایش اندازه آن نیز همراه با افزودن مقادیر آب کندانس با دمای بیشتر افزایش داد.



شکل ٤– سهم درصدی نرخ پتانسیل بهبود اجزای مختلف سامانه تولید بخار به نرخ پتانسیل بهبود کل

Fig.4. Percentile contribution of improvement potential rate of the different components of steam generation unit to the total improvement potential rate

در جدول ۳ و شکل ۴ نیز مقادیر نرخ‌های پتانسیل بهبود و درصد آن‌ها نشان داده شده است که به‌ترتیب دیگ بخار اول با ۱۰۲۹۵/۲۶

کیلووات و ۳۸/۷۰ درصد بالاترین پتانسیل بهبود به دلیل دارا بودن بیشترین نرخ تخریب اکسرژی، دیگ بخار سوم با ۷۰۵۰/۸۵ کیلووات و ۲۶/۵۰ درصد دومین نرخ پتانسیل بهبود بالا و دیگ بخار دوم با ۶۴۶۰/۶۰ کیلووات و ۲۴/۳۰ درصد سومین پتانسیل بهبود بالا را داشتند (شکل ۴). در حالت کلی در این سامانه درصد نرخ پتانسیل بهبود ۹۸ درصد برای کل دیگ‌های بخار گزارش شد که بیشترین سهم را در بین اجزای سامانه دارا بود. این نتایج با نتایج دولتی و همکاران (Dowlati *et al.*, 2017) و صوفیان و همکاران (Soufiyan *et al.*, 2016) مطابقت داشت به طوری که در گزارش آن‌ها نیز دیگ‌های بخار بیشترین سهم را در نرخ پتانسیل بهبود سامانه داشتند. همچنین در این سامانه منبع انبساط دارای کمترین درصد مقدار پتانسیل بهبود به دلیل کمترین مقدار نرخ تخریب اکسرژی بود (شکل ۴).

نتیجه‌گیری

به‌منظور تشخیص مکان‌های بازده‌های ترمودینامیکی و پتانسیل ذخیره انرژی، پارامترهای عملکرد اکسرژی از نظر قانون اول و دوم ترمودینامیک همه اجزای سامانه تولید بخار شرکت پاکدیس با انتخاب حجم کنترل مناسب و با استفاده معادلات موازنه انرژی و اکسرژی در این تحقیق محاسبه شد. با توجه به تحلیل انرژی و اکسرژی سامانه تولید بخار، بیش از ۹۸ درصد نرخ تخریب اکسرژی کل سامانه تولید بخار مربوط به دیگ‌های بخار بود که سهم عمده‌ای در بازده اکسرژی این سامانه داشتند. بیشترین درصد نرخ پتانسیل بهبود مربوط به دیگ بخار اول بود و همچنین بیشترین نرخ تلفات اکسرژی را دیگ بخار سوم دارا بود با این‌که کمترین مقدار نرخ تلفات اکسرژی را منبع انبساط سامانه داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، توزیع‌کننده بخار سامانه و پمپ قبل دیگ بخار چهارم به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار بازده اکسرژی سامانه تولید بخار را داشتند. به‌طور کلی این تحقیق توانست اهمیت تحلیل اکسرژی برای تشخیص اجزای سامانه با بیشترین تخریب اکسرژی را نشان دهد که می‌توان با تعیین این اجزا و ارائه راهکارهای مناسب برای هر یک از آن‌ها به بهبود بازده اکسرژی کل سامانه تولید بخار کمک نمود.

References

1. Ahmadi, G. R., and D. Toghraie. 2016. Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in iran, Renewable and Sustainable Energy Reviews 56: 454-463.
2. Çamdali, Ü., and M. Tunç. 2003. Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC furnace. Applied Thermal Engineering 23: 2255-2267.
3. Colak, N., Z. Erbay, and A. Hepbasli. 2013. Performance assessment and optimization of industrial pasta drying. International Journal of Energy Research 37: 913-922.
4. Dincer, I. and Y. A. Cengel. 2001. Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. Entropy 3: 116-149.
5. Dowlati, M., M. Aghbashlo, and M. M. Soufiyan. 2017. Exergetic performance analysis of an ice-cream manufacturing plant: a comprehensive survey. Energy 123: 445-459.
6. Gümüş, M., and M. Atmaca. 2013. Energy and exergy analyses applied to a CI engine fueled with diesel and natural gas. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 35: 1017-1027.
7. Hepbasli, A. 2010. A review on energetic, exergetic and exergoeconomic aspects of geothermal district heating systems (GDHSs). Energy Conversion and Management 51: 2041-61.
8. Holman, J. P. 2001. Analysis of experimental data. In: Holman JP, editor. Experimental methods for engineers. Singapore: McGraw-Hill: 48-143.
9. Jokandan, M. J., M. Aghbashlo, and S. S. Mohtasebi. 2015. Comprehensive exergy analysis of an industrial-scale yogurt production plant. Energy 93: 1832-1851.
10. Kotas, T. J. 1995. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger Publishing Company.
11. Kotas, T. J. 2012. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Exergon Publishing Company.
12. Mborah, C., and E. K. Gbadam. 2010. on the energy and exergy analysis of a 500 kW steam power plant at benso oil palm plantation (bopp). Research Journal of Environmental and Earth Sciences 2: 239-244.
13. Moran, J., and N. Talwar. 1994. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 3nd Edition, McGraw Hill, New Yirk.
14. Rosen, M. and I. Dincer. 2001. Exergy as the Confluence of Energy, Environment and Sustainable development. Exergy, an International Journal 1: 3-13.
15. Soufiyan, M. M., A. Dadak, S. S. Hosseini, F. Nasiri, M. Dowlati, M. Tahmasebi, and M. Aghbashlo. 2016. Comprehensive exergy analysis of a commercial tomato paste plant with a double-effect evaporator. Energy 111: 910-922.
16. Szargut, J., D. R. Morris, and F. R. Steward. 1988. Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes. Hemisphere Publishing Corporation., New York.
17. Todorović, M. N., D. S. Živković, M. V. Mančić, and G. S. Ilić. 2014. Application of energy and exergy analysis to increase efficiency of a hot water gas fired boiler. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly 20 (4).

18. Utlu, Z., and A. Hepbasli. 2007. A review on analyzing and evaluating the energy utilization efficiency of countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11: 1-29.
19. Ziaaddini, A., H. Mortezapour, M. Shamsi, and A. Sarafi. 2017. Energy and exergy analysis of a greenhouse heating system equipped with a parabolic trough concentrator and a flat-plate solar collector. Journal of Agricultural Machinery 9 (2): 439-453. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v9i2.65174.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 131-146

Developing the Computational Simulator to Control the Ventilation Condition of Poultry House and Optimize the Production

H. Farzanpour[1], S. S. Seiiedlou[2*], H. Nalbandi[3]

1- MSc. graduate, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: seiiedloo@tabrizu.ac.ir)

Received: 06-07-2019
Revised: 02-11-2019
Accepted: 07-12-2019

How to cite this article:
Farzanpour, H., S. S. Seiiedlou, and H. Nalbandi. 2022. Developing the Computational Simulator to Control the Ventilation Condition of Poultry House and Optimize the Production. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 131-146. (In Persian).
DOI: 10.22067/jam.v12i2.81420

Introduction

In livestock and specifically poultry houses, controlling the internal environment conditions is a key factor to increase animal productivity and prevent their casualties. Controlling the atmospheric conditions like the air temperature and gas concentration in semi-enclosed spaces like poultry houses can improve the living conditions. Experimental tests on the atmospheric conditions of livestock and poultry houses are challengeable and due to limitation of measurement points, unstable climate conditions and experimental errors. Simulation of the air temperature and momentum conditions is used unlimitedly with computer resources by Computational Fluid Dynamics (CFD) methods to overcome the limitations of experimental tests. This method has vast abilities of parametric analysis and predicting the optimum range of functional parameters. So in this research, the air temperature and velocity distribution of a poultry house were simulated using CFD to achieve the best condition for the air ventilation and uniform temperature distribution.

Materials and Methods

In the present study, the geometrical model of poultry house was created using Gambit software and meshed. The mesh independence study was also performed. According to the results, 166550 elements were enough to solve the problem with an acceptable accuracy.

The Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equation was selected to simulate the momentum transfer inside the poultry house. The k-ε model is one of the most used turbulence models for industrial applications. The main assumption in this model is that the flow is incompressible and that the fluid is Newtonian. A transient heat transfer equation within the fluid domain was selected to predict the air temperature that describes a time-dependent process that includes the conduction and convection terms. All the boundary condition was measured experimentally during 24 hours and their temperature was modeled using the proper mathematical models and applied to the developed model. The mathematical models were solved simultaneously in ANSYS- FLUENT software. The developed simulator was validated experimentally by measuring the air temperature of some specified locations (13 points).

Results and Discussion

The results demonstrate that the model enjoyed satisfactory accuracy so that the RMSE value between the measured and predicted air temperature was in the range of 0.405 to 1.29 and the simulator could predict the air temperature with the accuracy of 0.6 degrees. Therefore, it is possible to use the validated simulator for the real-time controlling of poultry houses to optimize the ventilation process. According to the results, the high heterogeneity in the air temperature and about an 18-degree difference was observed in the air temperature distribution at various locations of poultry houses. In addition, the air velocity was not uniform at the different plans of poultry house; especially in the central points of poultry house, it was higher than 1 m/s that is higher than the recommended value. Therefore, the simulator was used to improve the ventilation of the poultry house. The results of various simulations carried out indicated that the angle of the air inlets vents affects the air turbulence. Also, the air temperature and velocity distribution were more uniform when the air inlet vents were across each other. Therefore, some new gates were opened and the angle of the existing gates was changed to improve the ventilation condition of the poultry house. By such modification, the ventilation condition of the poultry house was improved and the air velocity and temperature distribution in the optimized house were more uniform than that observed in the primary one. The air temperature and velocity were in the range of 291 to 297 K (18 to 24 °C) and 0.23 and 0.46 m s^{-1}, respectively. These values are at the recommended condition for poultry houses.

Conclusion

The opening angle of the vents had a significant effect on the air distribution. Application of across vents in the side-walls of poultry house led to uniform distribution of air velocity and temperature. The developed simulator has good performance and accuracy to design and construct poultry houses.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Numerical simulation, Poultry house, Ventilation

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۴۶-۱۳۱

توسعه شبیه‌ساز رایانه‌ای به‌منظور مدیریت بهتر شرایط تهویه‌ای مرغداری و بهینه‌سازی تولید

حامد فرزانپور[۱]، سیدصادق سیدلو هریس[۲*]، حبیبه نعلبندی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

چکیده

تهویه یک متغیر کلیدی برای بهینه‌سازی شرایط محیط داخلی مرغداری است که با کنترل عواملی مانند درجه حرارت، سرعت هوا و غلظت گازهای موجود، می‌تواند از تلفات طیور جلوگیری کند. در حال حاضر دستورالعمل‌های دقیقی در راستای طراحی و ساخت سالن‌های مرغداری و سیستم‌های تهویه با هدف کنترل دقیق شرایط محیطی توسعه نیافته است. در این تحقیق در یک مرغداری طولی و با تهویه مکانیکی فشار منفی، توزیع دما و الگوهای جریان هوا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شد و با استفاده از شبیه‌ساز توسعه‌یافته راهکارهایی برای بهبود سیستم تهویه ارایه شد. در توسعه شبیه‌ساز مذکور همه شرایط مرزی از طریق اندازه‌گیری‌های تجربی در طول یک دوره ۲۴ ساعته به‌دست آمد. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌ساز، در ۱۳ نقطه آزمون شد و مشخصه‌های آماری بیان‌کننده دقت پیش‌بینی مانند RMSE، بین دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در محدوده ۰/۴۰۵ تا ۱/۲۹ قرار داشت و شبیه‌ساز قادر بود تغییرات دمای نقاط مختلف سالن مرغداری را با دقت ۰/۶ درجه پیش‌بینی نماید. نتایج شبیه‌ساز نشان داد که در مرغداری مورد مطالعه پروفیل دما در سطح استقرار طیور، حدود ۱۸ درجه در نقاط مختلف سالن تفاوت دمایی وجود دارد و سرعت هوا در نواحی مرکزی سالن بیش از یک متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین در مرحله بعدی از شبیه‌ساز توسعه‌یافته برای بهبود تهویه سالن مرغداری مذکور استفاده و تغییراتی در محل استقرار ورودی های هوا و سرعت هوای اعمال و در نهایت با اصلاحات انجام شده توزیع دما در مرغداری نسبت به حالت اولیه یکنواخت‌تر شد و دمای هوا در محدوده ۲۹۱ تا ۲۹۷ کلوین (معادل ۱۸ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد) و در حد مطلوب قرار گرفت. هم‌چنین پس از اصلاحات انجام شده، سرعت هوا در اغلب نقاط سالن در محدوده‌ی ۰/۲۳ تا ۰/۴۶ متر بر ثانیه قرار داشت که در محدوده توصیه شده می‌باشد. بنابراین برای طراحی و ساخت مرغداری‌ها و نصب سیستم‌های تهویه، شبیه‌ساز توسعه داده شده دارای عملکرد و دقت خوبی است.

واژه‌های کلیدی: توزیع دما، تهویه، سرعت هوا، شبیه‌سازی، مرغداری، یکنواختی

مقدمه

گوشت مرغ و تخم‌مرغ به‌عنوان منابع غنی از پروتئین، در طول سال‌ها به‌طور وسیعی در تغذیه انسان مورد توجه قرار گرفته است به‌طوری‌که در بعضی از کشورها که کمبود مراتع طبیعی مشهود است، گوشت طیور به سرعت جانشین گوشت سایر دام‌ها شده و طی چند دهه گذشته مرغداری‌های طیور گوشتی، به یک صنعت بزرگ و سودآور تبدیل شده است. پیشرفت‌های اخیر در تولید گوشت مرغ و پرورش جوجه‌های گوشتی، حاصل اصلاحات ژنتیکی طیور، استفاده از جیره‌های غذایی کنسانتره، بهبود کنترل و پیشگیری از بیماری‌ها، اقدامات ایمنی و زیستی و هم‌چنین استفاده از فن‌آوری‌های نوین برای کنترل شرایط محیطی سالن‌های مرغداری می‌باشد که همه این اقدامات موجب افزایش میزان و بهره‌وری تولید شده است. علی‌رغم تمام اقدامات صورت گرفته تلفات حیوانی هنوز در مرغداری‌ها بسیار بالا است. در سیستم‌های تولید متراکم طیور، تراکم بالای جوجه‌ها در سطح سالن، موجب کاهش جریان هوا و تجمع گازهای مضر در نزدیکی جوجه‌ها و کف مرغداری شده و نیز از میزان انتقال گرمای اضافی بدن طیور به محیط بیرون کاسته می‌شود که این امر موجب بروز تنش گرمایی و مشکلات تنفسی و زیستی در جوجه‌ها می‌شود. در اثر فعالیت‌های زیستی طیور و نیز فعالیت باکتری‌ها، میزان اکسیژن در دسترس جوجه‌ها کاهش و درصد رطوبت، غلظت آمونیاک و گازهای مضر متصاعد شده از فضولات طیور افزایش یافته و کیفیت هوای سالن مرغداری افت پیدا می‌کند که با ناکافی بودن جریان هوا در سطح طیور عوامل مذکور موجب افزایش تلفات حیوانی می‌گردند

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: seiiedloo@tabrizu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.81420

(Simmons *et al*., 1997; Yahav *et al*., 2001; Feddes *et al*., 2003; Atilgan and Koknaroglu, 2006).

توانایی در بـه‌دسـت آوردن شـرایط زیسـت‌محیطـی مطلـوب در سیستم‌های پرورش متراکم و مدرن حیوانات و به‌ویـژه طیـور، بیشـتر وابسته به نحوه طراحی و اجرای سیستم تهویـه در امـاکن نگهـداری حیوانات است به‌طوری‌که با تهویه مناسب و بهینه می‌تـوان از میـزان تلفات در سیستم‌های پرورش حیوانات و بـه‌خصـوص طیـور کاسـت. مشخصه‌های زیست‌محیطی فضای داخلی مرغداری‌ها و گاوداری‌ها از قبیل دما، رطوبت و غلظت گازهـای اتمسـفر سـالن مرغـداری، تـابع الگوهای جریان هوا هستند. الگوهای جریان هوا پیونـد اساسـی بـین محیط بیرون و محیط داخل ساختمان را برقرار می‌کنند. بنابراین برای پاسخ‌گویی به نیازهای برنامه‌های عملیاتی و مدیریتی در مرغداری‌هـا، درک درست از اصول جریان هوا به‌منظور حصـول مقـادیر مطلـوب و توزیع مناسب آن ضروری است (Tao and Xin, 2003).

مطالعه تجربی الگوهای جریان هوا در سـالن‌هـای مرغـداری بـه دلیل وسعت سالن‌ها و تعدد دریچه‌های ورود و خروج هوا و نیـز تـاثیر متقابل عوامل روی یکدیگر، فرآیندی سخت، پیچیده، زمـان‌بـر و نیـز هزینه‌بر است (Charles and Walker, 2002; Pedersen, 1999).

به همین دلیل استفاده از تکنیک‌های جدید برای مطالعات مشـابه مورد توجه قرار گرفته است. غلامرضایی و همکاران (Gholamrezai *et al*., 2017) از شـبکه عصـبی بـه‌عنـوان یـک ابـزار مـدل‌سـازی غیرخطی برای پیش‌بینی دما و رطوبـت در سـالن مرغـداری اسـتفاده کردنـد. باغـانی و آق‌خـانی (Baghani and Aghkhani, 2018) بـا استفاده از مدل رگرسیونی نرخ انتشار گاز آمونیاک در سالن مرغـداری را با دقت بالا پیش‌بینی کردند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[1]) نیز در دهه‌های اخیر بـرای مطالعه شرایط تهویه‌ای مرغداری مـورد اسـتفاده قـرار گرفتـه اسـت. امروزه با استفاده از CFD، به‌کارگیری مدل‌های پیچیده‌ی ریاضی بـر پایه معادلات دینامیک سیالات، روش‌های عددی و الگوریتم‌هایی که رفتار سیال را در فضاهای سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌کننـد، امکـان‌پـذیر شده است. در طول سالیان متمادی توسعه روش‌های مدرن محاسباتی همانند CFD همراه با افزایش قدرت محاسباتی به‌عنوان نتیجـه‌ای از توسعه فن‌آوری ساخت سخت‌افزارها، استفاده از این روش‌ها را بسـیار متنوع، دقیـق و آسـان نمـوده اسـت (Chen and Srebric, 2002). به‌عنوان نمونه روش‌های عددی امکان آزمودن و ارزیـابی ایـده‌هـای طراحی را قبل از اجرا و یا ساخت مجموعه مرغداری فراهم می‌کند که یـک مزیـت فـوق‌العـاده محسـوب مـی‌شـود. CFD از مشـکلات و ناسازگاری‌های مربوط به متشـابه‌سـازی اجبـاری عملکـرد تهویـه‌ای سالن‌ها به دلیل کاهش مقیاس، جلوگیری می‌کند، زیرا که با اسـتفاده از CFD می‌توان در مقیاس کامل شبیه‌سازی را انجام داد. با اسـتفاده از CFD می‌توان کنترل کاملی بر شرایط مرزی داشت و بـه راحتـی و بسـیار مـوثر تـاثیر پارامترهـای مختلـف را مـورد مطالعـه قـرار داد (Ramponi and Blocken, 2012). تحقیقات زیـادی بـا اسـتفاده از CFD در راستای پیش‌بینی الگوهای جریـان هـوا در مرغـداری‌هـا و دامداری‌ها انجام شده است که در اغلب ایـن مطالعـات شـرایط آب و هوایی تحت شرایط یکنواخت شبیه‌سازی شده است. به‌طوری‌که لی و همکاران (Lee *et al*., 2007) در یک دامنـه محاسـباتی سـه‌بعـدی، پدیده‌های انتقال جرم و گرما را در یک مرغداری با تهویه طبیعی و در شرایط محیطی یکنواخت، شبیه‌سازی نموده و جریـان هـوا در داخـل مرغداری را بررسی کردند. سـئو و همکـاران (Seo *et al*., 2009) بـا لحاظ دمای تولید شده توسط طیور در سیسـتم تهویـه طبیعـی، مـدل توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی شرایط محیطی مرغداری را ارتقـا داده و به نتایج دقیق‌تری دست یافتند. در این مطالعه شرایط محیطی شـامل دمای هوای محیط بیـرون، دمـای هـوای داخـل سـالن مرغـداری و گرمای تولیدی توسط طیور ثابت در نظر گرفته شد. تحت شرایط ثابت دمایی، تحقیقات مشابهی نیز توسط سایر محققین انجـام شـده اسـت (Mostafa *et al*., 2012; Zhu *et al*., 2012).

روجانو و همکاران (Rojano *et al*., 2014 and 2015) نیز طـی تحقیقی با استفاده از CFD محیط داخلی مرغداری مجهز به سیسـتم تهویه طبیعی را با در نظرگرفتن گرمای تولیدشده توسط طیور، گرمای حاصل از کود جامد و نیز گرما، رطوبت و دی‌اکسید کربن منتقل‌شـده بین محیط داخل و بیـرون مرغـداری، بـا اسـتفاده از مـدل دو بعـدی شبیه‌سازی کردند که نتایج منجر به افزایش صحت پیش‌بینی‌ها شـد. مدل CFD توسعه‌یافته در ایـن مطالعـه شـامل پـیش‌بینـی حـرارت، رطوبت و دی‌اکسـیدکربن تبـادل شـده بـین محـیط بیـرون و داخـل مرغداری بود. تمایز اصلی این مطالعه در نظر گـرفتن گرمـای منتشـر شده توسط جوجه‌ها و کود جامد موجود در بسـتر مرغـداری بـود کـه به‌طور قابل‌توجهی پویایی شرایط محیطی را با توجه به تـراکم بـالای طیور تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. با این وجود در مطالعه مذکور از متوسـط دمای هوای ورودی در یک ساعت به سالن برای شبیه‌سازی اسـتفاده شد. تحقیقات مشابه دیگری نیز توسط سایر محققین انجام شده است (Van Ouwerkerk *et al*., 1994; Worley and Manbeck, 1995; Mistriotis *et al*., 1997; Norton *et al*., 2007; Blanes-Vidal *et al*., 2008; Norton *et al*., 2010; González Díaz *et al*., 2014).

نتایج حاصل از همه تحقیقـات انجـام شـده نشـان‌دهنـده قـدرت CFD در شبیه‌سازی و پیش‌بینی شرایط داخل مرغداری‌هـا مـی‌باشـد که می‌توان از آن با دقت قابل قبولی بـرای اصـلاح و مـدیریت بهتـر مرغداری‌ها به‌منظور کاهش تلفات حیوانی استفاده کرد.

هدف تحقیـق حاضـر کـاربرد دینامیـک سـیالات محاسـباتی در

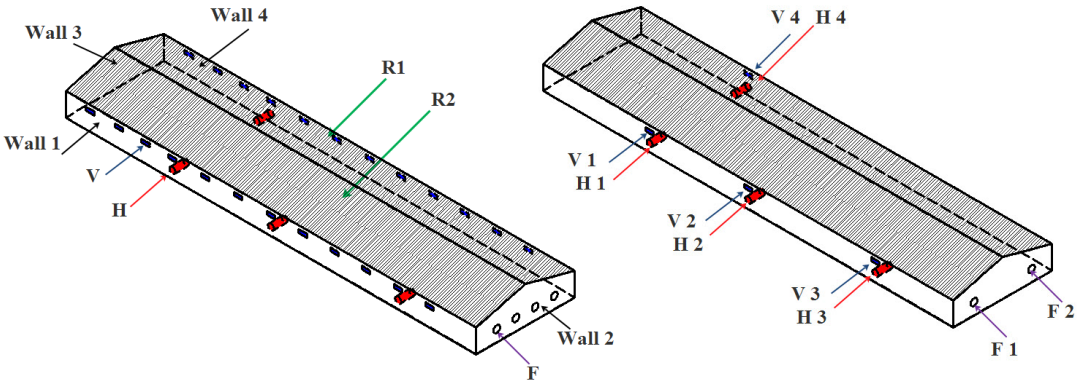
1- Computational Fluid Dynamics

شبیه‌سازی نحوه توزیع دما و بررسی الگوهای جریان هوا در یک مرغداری می‌باشد تا با استفاده از نتایج شبیه‌سازی بتوان پیشنهادهایی برای بهبود سیستم تهویه در راستای بالابردن راندمان تولید، از طریق اصلاح یکنواختی دمای محیط داخل مرغداری و به تبع آن یکنواختی شرایط محیطی داخل مرغداری ارایه کرد. در این شبیه‌سازی کلیه شرایط مرزی به‌صورت واقع‌گرایانه لحاظ شد به‌طوری‌که با اندازه‌گیری‌های میدانی و عملی دمای متغیر واقعی سطوح مختلف شامل سقف، دیواره‌های جانبی، هوای ورودی از دریچه‌ها، دمای متغیر بستر مرغداری همراه با گرمای ساطع شده از سطح گرم‌کن‌های موجود در مرغداری در شرایط مرزی لحاظ شده است.

مواد و روش‌ها

مرغداری مورد مطالعه

مرغداری مورد مطالعه از نوع طولی و با تهویه مکانیکی فشار منفی بوده و در موقعیت مکانی ۳۷/۹ درجه شمالی و ۴۷/۱۳ درجه شرقی قرار داشت. این نوع مرغداری، تیپ غالب مرغداری‌های چند استان ایران است که کنترل شرایط محیطی در آن‌ها نسبت به مرغداری‌های عرضی نسبتاً آسان‌تر می‌باشد. هندسه و ابعاد سالن مرغداری در شکل ۱-a نشان داده شده است. سالن مرغداری مذکور به مساحت ۶۰۰ متر مربع در راستای شرق به غرب قرار داشته و دیوارها و سقف آن از بلوک‌های سیمانی ساخته شده بود. سیستم تهویه آن از نوع تهویه مکانیکی فشار منفی بود که برای ورود هوای تازه به داخل سالن مرغداری، روی هر کدام از دیوارهای شماره ۱ و ۴، ۱۲ عدد دریچه با ابعاد ۴۰×۱۰۰ سانتی‌متر و برای خروج هوای داخل سالن نیز ۴ عدد مکنده با قطر ۸۰ سانتی‌متر در دیوار شماره ۲ در ضلع غربی نصب شده بود. در زمان مطالعه، مرغداری دارای ۷۰۰۰ قطعه مرغ گوشتی ۴۰ و ۴۱ روزه و با جرم متوسط ۲/۵ کیلوگرم بود که به دلیل برودت هوا (آذر ماه) و برای انجام حداقل تهویه و حفظ دمای سالن مرغداری، فقط از سه دریچه در دیوار شماره ۱ و یک دریچه در دیوار شماره ۴ با زاویه بازشدگی ثابت ۱۵ درجه، برای ورود هوای تازه به داخل سالن مرغداری استفاده می‌شد (شکل ۱-b). تعداد دریچه‌های باز و محل آن‌ها و نیز مقدار بازشدگی آن‌ها صرفاً بر اساس تجربه مرغدار تنظیم می‌شد و هیچ داده‌برداری دمایی یا سرعت هوا برای انتخاب دریچه‌های باز و مقدار بازشدگی وجود نداشت.



شکل ۱- طرحواره مرغداری مورد مطالعه؛ H: هیتر، V: دریچه ورود هوا، F: مکنده، W: دیوار، R: سقف

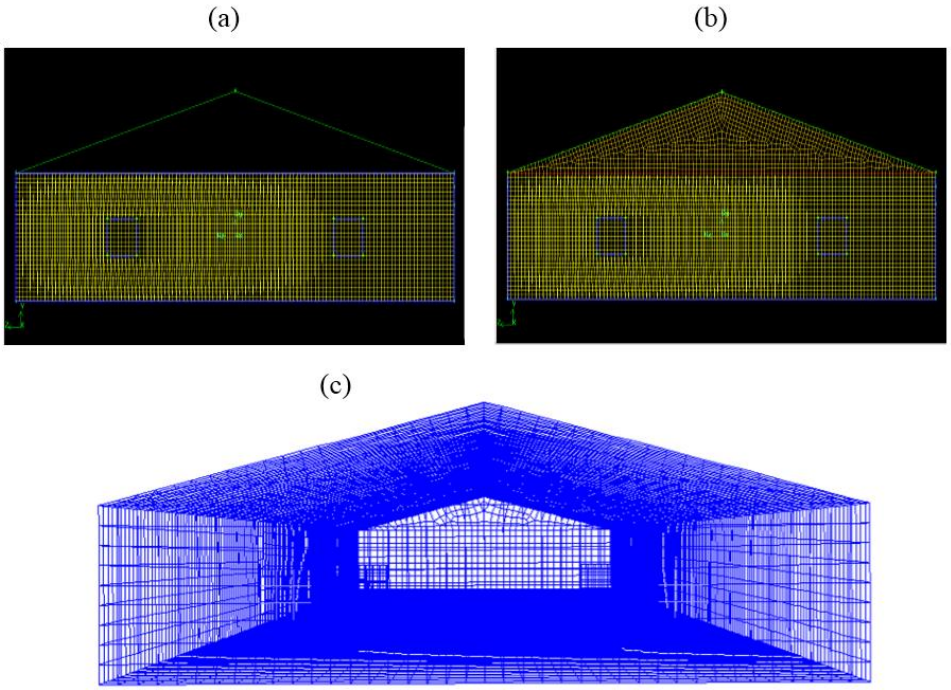
Fig.1. Configration of studied poultry house: H: Heater; V: Air inlet Vent; F: Suction Fan; W: Wall; R: Roof

هم‌چنین برای انتقال هوای داخل سالن مرغداری به بیرون نیز فقط ۲ مکنده (شکل ۱-b) مورد استفاده قرار می‌گرفت. برای تامین گرمای مرغداری، از ۴ عدد گرم‌کن از نوع محفظه احتراق (با ظرفیت حرارتی حدود ۱۰۰۰۰ کیلو کالری در ساعت) واقع در پایین دریچه‌های ورود هوا (شکل ۱-a و b) استفاده می‌شد.

شبیه‌سازی شرایط محیطی مرغداری مورد مطالعه

ایجاد مدل هندسی و المان‌بندی مرغداری

مدل هندسی مرغداری مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار گمبیت (نسخه ۲-۲-۳) ترسیم و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی در محیط آن انجام شد. در مدل مذکور صرفاً دریچه‌ها و مکنده‌های مورد استفاده توسط مرغدار در هندسه مورد نظر لحاظ و وضعیت موجود مرغداری ترسیم شد به‌طوری‌که فقط ۲ عدد از مکنده‌های انتهایی و نیز ۴ عدد از دریچه‌های ورود هوا (شکل ۱-b) توسط مرغدار مورد استفاده قرار می‌گرفت. جهت تسریع و کنترل بهتر محاسبات از شبکه‌بندی منظم استفاده شد. برای این منظور دامنه محاسباتی به دو قسمت مجزا شامل فضای a و b تقسیم شد و برای شبکه‌بندی قسمت a از المان‌های مکعبی (Hexahedral) و برای قسمت b از ترکیب المان‌های مکعبی و مثلثی (Tetrahedral) استفاده شد (شکل ۲). دامنه محاسباتی اولیه دارای ۱۶۶۵۵۰ المان بود.



شکل ۲– المان‌بندی فضای محاسباتی مورد مطالعه

Fig.2. Computational grid of studied domain

معادلات حاکم

پدیده‌های انتقال حاکم در محیط مرغداری شامل انتقال ممنتوم و انتقال گرما می‌باشند که برای شبیه‌سازی سالن مرغداری معادلات حاکم در محیط نرم‌افزار انسیس- فلوئنت با اعمال شرایط مرزی مناسب به‌صورت عددی حل شدند.

انتقال ممنتوم

معادلات حاکم در پدیده انتقال ممنتوم با فرض جریان غیر قابل تراکم و سیال نیوتنی به‌صورت روابط (۱) و (۲) بیان شدند که به‌ترتیب معادله بقای جرم یا پیوستگی و معادله بقای ممنتوم می‌باشند.

$$\nabla . \mathbf{u} = \mathbf{0} \qquad (۱)$$

$$\rho_a \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_a (u.\nabla) u = \nabla\left[-PI + (\eta + \eta_T)\left(\nabla u + (\nabla u)^T\right)\right] \qquad (۲)$$

استفاده از مدل آشفتگی در تحلیل مسئله

جریان‌های تهویه مکانیکی به‌دلیل نرخ بالای جریان و نیز به‌دلیل فعل و انفعالات ناشی از انتقال گرما در میدان جریان، همراه با حرکت متلاطم هستند (Norton *et al.*, 2007). هم‌چنین در مطالعه انجام گرفته سرعت متوسط هوای ورودی از دریچه‌ها طی آزمایش‌های تجربی در حدود ۴/۲ متر بر ثانیه ثبت شد. بنابراین عدد رینولدز با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد و مقدار آن برابر با ۱۸۴۴۷۶ به‌دست آمد که نشان‌دهنده متلاطم بودن رژیم جریان در محل دریچه‌های ورودی هوا است. در داخل سالن نیز به دلیل بزرگ بودن قطر هیدرولیکی مطمئنا رژیم جریان متلاطم پیش‌بینی می‌شود. بنابراین از مدل آشفتگی k-Ɛ استاندارد که قابلیت زیادی در پیش‌بینی الگوهای جریان در جریان‌های تهویه مکانیکی دارد برای تحلیل مسئله استفاده شد (Norton *et al.*, 2009).

$$R_e = \frac{\rho u D}{\eta} \qquad (۳)$$

معادلات انتقال مذکور با استفاده از مدل آشفتگی k-Ɛ استاندارد به‌صورت روابط (۴) و (۵) بازنویسی شدند و رابطه (۶) به‌عنوان شرط اولیه برای تحلیل معادلات مورد استفاده قرار گرفت (ANSYS-Fluent, 2014).

$$\rho_a \frac{\partial k_T}{\partial t} + \rho_a u.\nabla k_T = \nabla\left[(\eta + \eta_T / \sigma_k)\nabla k_T\right] + \eta_T P(u) - \rho_a \varepsilon \qquad (۴)$$

$$\rho_a \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_a u.\nabla \varepsilon = \nabla\left[(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon)\nabla \varepsilon\right] + C_{\varepsilon 1}\varepsilon \eta_T P(u) / k_T - C_{\varepsilon 2}\rho_a \varepsilon^2 / k_T \qquad (۵)$$

$$P(u) = \nabla u\left(\nabla u + (\nabla u)^T\right)$$
$$\eta_T = \rho_a C_\eta k_T^{\,2} / \varepsilon \qquad (۶)$$
$$t = 0 \quad \Rightarrow k = 0 \ , \ \ \varepsilon = 0$$

نمادها

Nomenclature

زمان Time (s)	t	سرعت Velocity (m s^{-1})	u
ضریب انتقال گرمای هوا Air thermal conductivity (W $m^{-1}K^{-1}$)	k	دانسیته هوا Air density (kg m^{-1})	ρ_a
ظرفیت گرمایی ویژه Specific heat capacity (J $kg^{-1}K^{-1}$)	Cp	عدد رینولدز Reynolds number	R_e
منبع گرما Heat source (W m^{-3})	S_T	جرم بدن طیور Poultry body mass (kg)	m
ویسکوزیته سیال Fluid viscosity (m^2 s^{-1})	η	دما Temperature (K)	T
عدد ثابت برابر ۰/۰۹ Model constants equal to 0.09	Cη	قطر هیدرولیکی مقطع سالن مرغداری Hydraulic diameter of poultry house (m)	D
عدد ثابت برابر ۱/۴۴ Model constants equal to 1.44	$C_{\varepsilon1}$	گرمای کل تولیدی توسط طیور در مرغداری Heat generated by the poultry (W)	AH
عدد ثابت برابر ۱/۹۲ Model constants equal to 1.92	$C_{\varepsilon2}$	دمای هوای سالن مرغداری Air temperature of poultry house (°C)	T_i
عدد ثابت برابر ۱/۳ Model constants equal to 1.3	σ_ε	انرژی جنبشی متلاطم Turbulent kinetic energy (m^2 s^{-2})	k_T
عدد ثابت برابر ۱ Model constants equal to 1	σ_k	ویسکوزیته متلاطم Turbulent viscosity(m^2 s^{-1})	η_T
ضریب تبیین Coefficient of determination	R^2	انرژی اتلافی در اثر آشفتگی Dissipation rate of turbulence energy (m^2 s^{-3})	ε
		میانگین ریشه مربعات خطا Root-mean-square error	RMSE

برای حل معادلات مذکور شرایط مرزی زیر مورد استفاده قرار گرفتند:

مرز ورود هوا: هوا از طریق دریچه‌های ورود هوا (V1، V2، V3 و V4) وارد مرغداری می‌شد که شرایط مرزی از نوع فشار ثابت (فشار اتمسفری) انتخاب شدند. زاویه ورود هوا برابر میزان بازشدگی دریچه‌ها (۱۵ درجه) اعمال شد.

مرز خروج هوا: مرزهای خروج هوا شامل مکنده‌های موجود در انتهای سالن مرغداری (F1 و F2) بود که شرایط مرزی از نوع سرعت تعیین شد. متوسط سرعت هوای خروجی از مکنده‌ها طی آزمایش‌های تجربی به‌دست آمد.

مرز دیوارها: سایر مرزهای موجود در دامنه محاسباتی شامل همه دیوارهای جانبی، سقف، بستر و سطح گرم‌گن‌ها به‌صورت دیواره‌های بدون لغزش در نظر گرفته شدند.

انتقال گرما

تغییرات دمای هوای داخل سالن مرغداری منتج از گرمای ایجاد شده در اثر فعالیت‌های زیستی طیور، گرمای ساطع شده از بستر مرغداری (حاصل از فضولات طیور)، دمای هوای ورودی به سالن و تغییرات دمای دیوارهای سالن در اثر تغییرات دمای محیط بیرون مرغداری و تابش آفتاب می‌باشد. بنابراین لازم بود معادله انتقال گرما در حالت ناپایا لحاظ و تحلیل شود. هم‌چنین پیش‌بینی می‌شد که در برخی مناطق سالن مرغداری سرعت هوا صفر باشد و انتقال گرما در این مناطق صرفاً از طریق هدایت صورت گیرد، لذا فرآیند انتقال گرما به‌صورت ترکیبی از هدایت و جابه‌جایی درنظر گرفته شد (رابطه ۷).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho Cp(u\nabla T) = \nabla(k\nabla T) + S_T \qquad (۷)$$

شرایط مرزی زیر برای حل عددی معادله انتقال گرما استفاده شدند:

مرز ورود هوا: شرط مرزی در دریچه‌های ورود هوا (V1، V2، V3 و V4) از نوع شرایط مرزی دمایی انتخاب شد. دمای هوای ورودی به سالن با آزمایش‌های تجربی در طول ۲۴ ساعت اندازه‌گیری و به‌صورت رابطه (۱۲) و تابعی از زمان مدل‌سازی شد. هم‌چنین دمای اولیه هوا برابر ۲۹۴ درجه کلوین به‌عنوان شرط اولیه لحاظ شد.

مرز خروج هوا (مرز شماره ۲): از شرط مرزی شار همرفتی استفاده شد.

دیوار و سقف رو به آفتاب (R1،W4): برای دیوار و سقف رو به آفتاب مرغداری از شرط مرزی دمایی استفاده شد. دمای این مرزها نیز از طریق آزمایش‌های تجربی به‌صورت روابط (۹) و (۱۰)

مدل‌سازی شدند.

کف مرغداری: جهت اعمال گرمای ایجاد شده توسط طیور و بستر مرغداری از شرط مرزی شار گرمایی استفاده شد. با توجه به پراکنده بودن مرغ‌ها در کف سالن مرغداری و ارتفاع کم طیور، شار گرمایی در کف مرغداری در نظر گرفته شد. گرمای تولید شده توسط هر مرغ با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد (Rojano *et al.*, 2015). در این رابطه جرم بدن هر مرغ ۲/۵ کیلوگرم و متوسط دمای هوای محیط مرغداری ۲۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن ۷۰۰۰ مرغ و مساحت کف سالن مرغداری، شار گرمایی برابر ۲۶۵/۵۵ وات بر متر مربع محاسبه گردید. گرمای تولید شده توسط فعل و انفعالات حاصل از بستر مرغداری نیز ۱۰ درصد گرمای حاصل از طیور در نظر گرفته شد.

$$AH = 10.62m^{0.75}\left(1+\frac{40-20T_i}{1000}\right) \quad (۸)$$

گرم‌کن‌ها (H1، H2، H3، H4): برای اعمال گرمای تولید شده توسط گرم‌کن‌ها در فرآیند شبیه‌سازی از متوسط دمای سطح گرم‌کن‌ها استفاده شد. گرم‌کن‌ها به‌صورت دایم کار با دمای ثابت سطح برابر با ۲۳۹ درجه کلوین فرض شدند. جنس گرم‌کن‌ها از فولاد با دانسیته ۸۰۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، گرمای ویژه‌ی ۵۰۲/۴۸ ژول بر کیلوگرم درجه کلوین و با ضریب هدایت حرارتی ۱۶/۲۷ وات بر متر–درجه کلوین لحاظ شد.

سایر مرزهای دامنه محاسباتی: برای سایر مرزها (W1، W2، W3، R2) نیز از شرط مرزی دما استفاده شد. تغییرات دمای سطوح مذکور نیز همانند دمای سقف و دیوار رو به آفتاب مدل‌سازی شد (رابطه ۱۱).

حل عددی

برای حل عددی معادلات ناویر استوکس از الگوریتم حل مبتنی بر فشار استفاده شد. جهت تحلیل و حل مساله با استفاده از کوپلینگ فشار– سرعت استفاده شد. در این مطالعه، از روش فشار ضمنی پیزو (Pressure Implicit with Splitting of Operator) برای ارتباط بین سرعت و فشار با توجه به ماهیت مسئله و حل آن در حالت ناپایا، استفاده شد (ANSYS-Fluent, 2014).

شبیه‌سازی مرغداری طی ۲۴ ساعت کارکرد آن انجام گرفت. حل عددی معادلات با گام‌های زمانی ۱۰ ثانیه‌ای و در مجموع شامل ۸۶۴۰ گام با تعداد حداکثر ۱۰۰۰ تکرار برای هر گام زمانی راه‌اندازی و تنظیم شد.

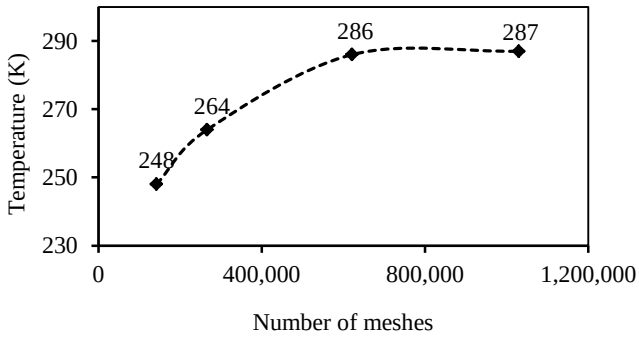
شرایط همگرایی: باقی‌مانده‌های مورد قبول برای حل معادله پیوستگی برابر ۰/۰۰۱، برای معادلات سرعت، انرژی جنبشی توربولانس و نیز نرخ تلفات انرژی جنبشی توربولانس برابر ۰/۰۰۰۱ و در نهایت برای معادله انرژی برابر ۰/۰۰۰۰۰۱ در نظر گرفته شد.

بررسی استقلال شبکه

جهت بررسی استقلال شبکه چهار نوع شبکه‌بندی به‌ترتیب با ۱۴۲۳۱۸، ۲۶۶۵۵۰، ۶۲۱۳۱۲ و ۱۰۳۰۰۱۶ المان با شرایط مرزی یکسان انتخاب و تحلیل شده و نتایج دما استخراج گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده (شکل ۳) اختلاف بین سطوح سوم و چهارم کمتر از ۰/۳ درصد بود. لذا برای کاهش حجم محاسبات و صرفه‌جویی در زمان تحلیل از تعداد ۶۲۱۳۱۲ المان برای تحلیل‌های نهایی استفاده شد.

آزمایش‌های تجربی

دمای داخل سالن مرغداری همواره تابعی از دمای محیط بیرون مرغداری است که تابعی از فصل و نیز زمان روز متفاوت خواهد بود. دمای محیط بیرون مرغداری، گرمای منتقل شده از سقف و دیوارهای سالن و نیز دمای هوای ورودی به سالن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا برای افزایش دقت شبیه‌سازی لازم بود از مقادیر واقعی در شرایط مرزی مدل توسعه‌یافته استفاده شود. برای این منظور آزمایش‌های تجربی گسترده‌ای در ۲۴ام آذرماه سال ۱۳۹۶ انجام و تغییرات دمای مرزها در طول یک دوره ۲۴ ساعته، اندازه‌گیری و مدل‌سازی شد.



شکل ۳– نتایج بررسی استقلال شبکه

Fig. 3. Results of mesh independency study

لازم به توضیح است شرایط مرزی از جمله دیوارها و سقف و نیز دمای هوای ورودی به سالن تابع زمان روز و تاریخ داده‌برداری خواهد بود. به دلیل متغیر بودن این داده‌ها در طول سال و برای امکان استفاده از شبیه‌ساز توسعه‌داده شده همیشه لازم است که متوسط دمای دیوارها در یک بازه زمانی در ماه یا فصل مورد نظر و نیز متوسط دمای هوای ورودی و متوسط تغییرات دمای هوا در طول روز در همان بازه زمانی اندازه‌گیری و در مدل اعمال شود تا وضعیت پروفیل دمایی و سرعتی در سالن مشخص گردد.

دمای دیوار و سقف رو به آفتاب: برای اندازه‌گیری دمای سطح دیوار و سقف رو به آفتاب (W4، R1) روی دیوارهای مورد نظر یک عدد ترموکوپل نوع k (با رنج عملکرد دمایی بین ۲۰۰- الی ۱۳۵۰ + درجه سانتی‌گراد و حساسیت ۴۱μV/°C) نصب و در مدت ۲۴ ساعت تغییرات دمای آن‌ها هر ۵ دقیقه یکبار به‌وسیله دیتالاگر (DL2) ثبت شد. داده‌برداری از ساعت ۱۲:۳۰ بعد از ظهر شروع شد. داده‌های ثبت شده در محیط نرم‌افزار متلب به‌صورت تابعی از زمان مدل‌سازی شده و در شرایط مرزی اعمال شد. این نوع معادلات بر اساس منطقه جغرافیایی و زمان فصل باید تبیین و تعیین شود.

دمای دیواره‌ها و سقف رو به شمال (W1، W2، W3، R2): تغییرات دمای سطح دیوار W1 به‌عنوان نماینده‌ی همه دیوارها و سقف قرار گرفته در سایه نیز به روش مشابه در قسمت قبل، اندازه‌گیری و در نهایت تغییرات آن‌ها تابعی از زمان مدل‌سازی شد.

دمای هوای ورودی به سالن مرغداری (V1، V2، V3 و V4): دمای هوای ورودی به سالن مرغداری نیز به روش مشابه اندازه‌گیری دمای دیوارها و در دریچه‌های ورود هوا به داخل سالن (۴ دریچه در شکل ۱-b) اندازه‌گیری و مدل‌سازی شد.

دمای سطح گرم‌کن‌ها (H1، H2، H3، H4): برای تعیین متوسط دمای سطح گرم‌کن‌ها از دو ترموکوپل استفاده شد. یک ترموکوپل روی سطح یکی از گرم‌کن‌ها نصب و دمای سطح آن در طول ۲ دوره روشن و خاموش شدن مشعل اندازه‌گیری شد. ترموکوپل دوم در مجاورت گرم‌کن نصب شد تا تعداد دفعات و مدت زمان روشن و خاموش شدن گرم‌کن در طول ۲۴ ساعت، مشخص گردد. در نهایت با توجه به تعداد دفعات روشن خاموش شدن گرم‌کن و هم‌چنین میانگین دمای سطح گرم‌کن در طول ۲ دوره روشن و خاموش شدن، متوسط دمای سطح گرم‌کن محاسبه شده و در مدل‌ها به‌عنوان منبع حرارتی اعمال شد که این امر برای ساده‌سازی مدل توسعه یافته بود در غیر این صورت بایستی تغییرات دمایی منبع حرارتی به‌صورت ناپایا تابعی از زمان در مدل‌ها اعمال می‌شد.

سرعت هوای خروجی از مکنده‌ها (F1 و F2): این سرعت به‌وسیله یک دستگاه سرعت‌سنج از نوع سیم‌داغ (TES-1341) اندازه‌گیری شد و سرعت هوا در ۸ نقطه در مقطع هر کدام از مکنده‌ها ثبت و میانگین آن‌ها به‌عنوان متوسط سرعت هوای خروجی در نظر گرفته شد که در طول آزمایش‌ها همیشه ثابت بود.

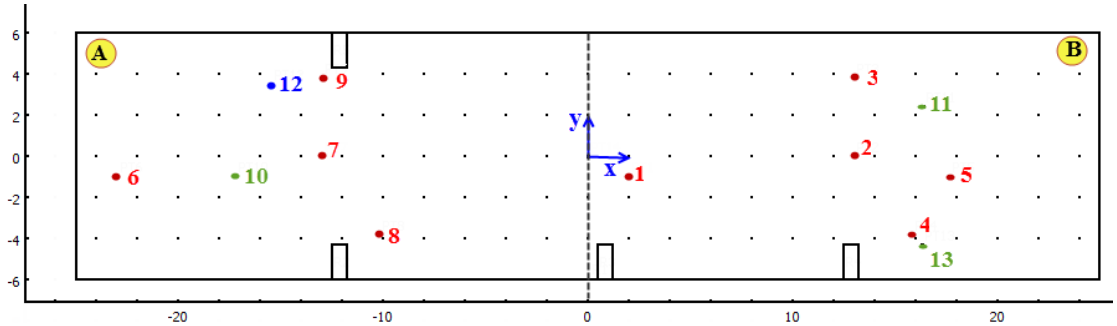
اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته

هم‌زمان با اندازه‌گیری‌های مربوط به شرایط مرزی، داده‌برداری دمایی در نقاط مختلف سالن مرغداری و در شرایط تهویه واقعی برای اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته انجام شد. به دلیل بزرگ بودن سالن مرغداری، ساختمان به دو بخش A و B تقسیم شد (شکل ۴) و دمای هوا در ۱۳ نقطه مختلف در طول ۲۴ ساعت به‌وسیله ترموکوپل اندازه‌گیری و ثبت شد. نقاط تعیین شده برای ثبت دما در ۳ ارتفاع مختلف سالن شامل ارتفاع ۴۰، ۱۴۰ و ۲۰۰ سانتی‌متری از بستر سالن مرغداری قرار داشتند. برای اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته دمای پیش‌بینی شده توسط شبیه‌ساز در هر نقطه با متوسط دمای اندازه‌گیری شده مقایسه و با استفاده از شاخص‌آماری RMSE دقت مدل توسعه‌یافته بررسی شد.

به غیر از نقاط نزدیک دریچه‌های ورودی و خروجی هوا، همیشه مقادیر سرعت هوا در مقاطع مختلف سالن بسیار بطئی و ناچیز می‌باشد که این مقادیر برای تخلیه گازهای سمی و غیرسمی حاصل از تنفس و فضولات کف سالن کفایت می‌کند فقط بایستی توزیع سرعت هوا در نقاط مختلف یکنواخت باشد. اندازه‌گیری سرعت‌های هوای کم با استفاده از ابزارهای موجود تقریباً دشوار و در مواردی دارای دقت بسیار پایینی است که در این تحقیق نیز چنین مشکلی حادث شد. بنابراین با توجه به این‌که پروفیل‌های سرعت و دمای هوا به همدیگر وابسته می‌باشند پس اعتبارسنجی مدل صرفاً بر پایه اندازه‌گیری‌های دمای هوا صورت گرفت.

بهینه‌سازی مرغداری

در پایان بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مرغداری با ۴ دریچه باز برای ورود هوا و ۲ مکنده در حال کار، وضعیت مرغداری از لحاظ یکنواختی توزیع دما و نیز توزیع سرعت هوا در نقاط مختلف مرغداری مورد مطالعه قرار گرفت و برای ایجاد یکنواختی بیشتر در وضعیت تهویه داخلی (دما و سرعت هوا) اصلاحاتی از نظر افزایش تعداد دریچه‌های باز و مقدار زاویه بازشدگی آن‌ها، توزیع نحوه باز شدن دریچه‌های ۲۴ گانه و سرعت هوای خروجی از مکنده‌ها اعمال گردید به‌طوری‌که طرح نهایی اصلاح شده در بخش نتایج آورده شده است.



شکل ٤– نقاط اندازه‌گیری دما برای اعتبارسنجی شبیه‌ساز (نقاط ۱ الی ۹ در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری از بستر، نقاط ۱۰، ۱۱ و ۱۳ در ارتفاع ۱۴۰ سانتی‌متری و نقطه ۱۲ در ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متری از کف مرغداری)

Fig.4. Location of temperature measuring points to validating developed simulator (points 1 to 9: height of 40 cm from the ground d; points 10, 11 and 13: height of 40 cm from the ground; point 12: height of 40 cm from the ground)

نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری شرایط مرزی

برای افزایش دقت مدل توسعه داده شده، همه شرایط مرزی به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شدند.

دمای دیوار و سقف رو به آفتاب (W4، R1): تابش مستقیم آفتاب به دیوار رو به آفتاب (W4) و سقف رو به آفتاب (R1)، سبب گرم شدن دیوار شده که اختلاف دمای آن با هوای داخل سالن مرغداری موجب ایجاد شار گرمای مثبت و یا منفی به سالن مرغداری شود. تغییرات دما در مرز W4 به‌صورت تابعی از زمان روز و در طول ۲۴ ساعت به‌صورت رابطه (۹) و تغییرات دمای مرز R1 به‌صورت تابعی از زمان روز و به‌صورت رابطه (۱۰) مدل‌سازی شدند. شاخص‌های آماری R^2 و RMSE که بیانگر اعتبار مدل می‌باشند برای هر کدام از مدل‌های شرایط مرزی در زیر آورده شده‌اند. مقادیر آن‌ها بیانگر دقت بالای مدل‌های استقرایی توسعه داده شده می‌باشد.

$$T_{W4} = 291.4 + 0.6249\ \cos(0.0000780\,4 \times t) + 1.019\ \sin(0.00007804 \times t) \quad (۹)$$
$$R^2 = 0.7952, \quad RMSE = 0.4522$$

$$T_{R1} = 292.3 - 0.09696\cos(0.00006431 \times t) + 0.5157\sin(0.00006431 \times t) \quad (۱۰)$$
$$R^2 = 0.8885, \quad RMSE = 0.1418$$

تغییرات دمای سقف رو به سایه و سایر دیوارها به غیر از دیوار رو به آفتاب (W1، W2، W3، R2): اختلاف دمای دیوارهای قرار گرفته در طرف سایه با دمای هوای داخل سالن مرغداری، سبب شار گرمای منفی و هدر رفت گرما از این دیوارها به طرف بیرون می‌شد. تغییرات دما در سطح داخلی آن‌ها به‌صورت تابعی از زمان روز و به‌صورت رابطه (۱۱) مدل‌سازی و در شرایط مرزی در حل معادلات استفاده شد.

$$T_{W1} = -7.003\times10^{-10}\times t^2 + 5.896\times10^{-5}\times t + 291.2 \quad (۱۱)$$
$$R^2 = 0.7085, \quad RMSE = 0.2605$$

تغییرات دمای محیط بیرون: دمای هوای داخل سالن مرغداری به‌طور قابل‌توجهی متاثر از دمای هوای وارد شده به مرغداری بود. تغییرات دمای هوای ورودی به سالن مرغداری تابعی از زمان و به‌صورت رابطه (۱۲) مدل‌سازی شد.

$$T_{W1} = 4.042\times10^{-9}\times t^2 - 0.0003668\times t + 280 \quad (۱۲)$$
$$R^2 = 0.8078, \quad RMSE = 1.226$$

نتایج اندازه‌گیری سرعت هوای مکنده‌ها و نیز دمای سطح گرم‌کن‌ها نشان داد که مقادیر آن‌ها به‌ترتیب برابر ۷/۳ متر بر ثانیه و ۵۱۲ کلوین (معادل ۲۳۹ درجه سانتی‌گراد) بودند.

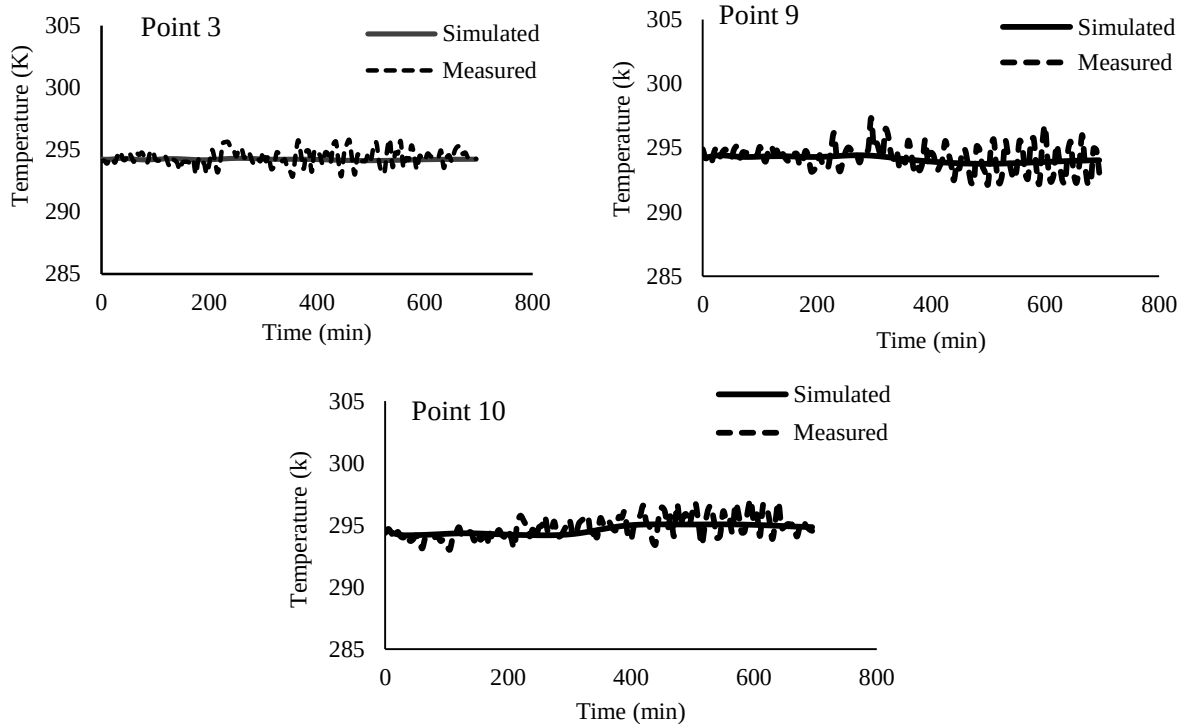
اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته

همان‌طوری‌که قبلاً ذکر شد اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته در ۱۳ نقطه انجام شد. مقادیر RMSE بین دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل در محدوده ۰/۴۰۵ تا ۱/۲۹ قرار داشت (جدول ۱). مقادیر به‌دست آمده در این تحقیق بهتر از نتایج ارایه شده توسط روجانو و همکاران (Rojano *et al.*, 2015) بود که در آن مقدار RMSE در محدوده ۰/۹ الی ۱/۹ گزارش شده بود. نمودار مربوط به دمای ۳ نقطه به‌عنوان نماینده‌ای از نقاط اندازه‌گیری شده در شکل ۵ آورده شده است که نشان می‌دهد تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده وجود دارد به‌طوری‌که در نقطه ۳ حداکثر، حداقل و متوسط اختلاف بین دمای اندازه‌گیری شده و

شبیه‌سازی شده به‌ترتیب برابر ۱/۶۴، ۰/۰۰۱ و ۰/۴۹۷ درجه بود. در نقاط ۹ و ۱۰ نیز متوسط اختلاف دما به‌ترتیب برابر ۰/۶ و ۰/۷۵ درجه به‌دست آمد. تفاوت‌های مشاهده شده بین داده‌های تجربی و شبیه-سازی شده به دلیل محدودیت و صحت پیش‌بینی معادلات حاکم استفاده شده در بیان دینامیک انتقال جرم و انرژی توسط حیوانات بود. به‌عنوان مثال رطوبت به‌عنوان عنصری موثر در شرایط محیط داخلی مرغداری می‌تواند در مقدار تولید گرما موثر باشد ولی در معادلات حاکم برای شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. هم‌چنین در فرآیند شبیه‌سازی دمای گرم‌کن ثابت در نظر گرفته شد ولی در شرایط واقعی گرم‌کن در دوره‌های زمانی معینی روشن و خاموش می‌شد. با این وجود مدل توسعه‌یافته به خوبی قادر بود تغییرات دمای نقاط مختلف سالن مرغداری را با دقت ۰/۶ درجه پیش‌بینی کند و می‌توان از آن برای مطالعه شرایط محیطی مرغداری و مدیریت بهتر آن استفاده کرد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی

پس از اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته، شرایط تهویه‌ای مرغداری شامل پروفیل‌های توزیع دما و سرعت هوا در نقاط مختلف سالن مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در ادامه آورده شده است.



شکل ۵- منحنی تغییرات دمای پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف سالن مرغداری در برابر زمان

Fig.5. Predicted the air temperature versus the measured temperature at the various point of the poultry house as a function of time

جدول ۱- مقادیر RMSE بین دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل در نقاط مختلف سالن مرغداری

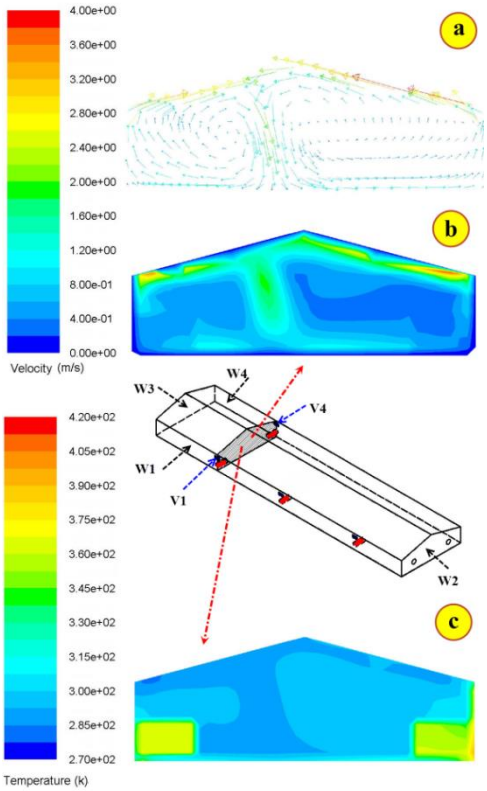
Table 1- RMSE value between the experimental and predicted temperature by the model at the various point of the poultry house

نقاط اندازه‌گیری دما Temperature measuring points	RMSE	نقاط اندازه‌گیری دما Temperature measuring points	RMSE
1	0.405	8	1.12
2	0.71	9	0.97
3	0.652	10	0.78
4	0.815	11	1.25
5	0.533	12	1.065
6	0.697	13	1.29
7	0.995		

پیش‌بینی پروفیل سرعت هوای سالن مرغداری

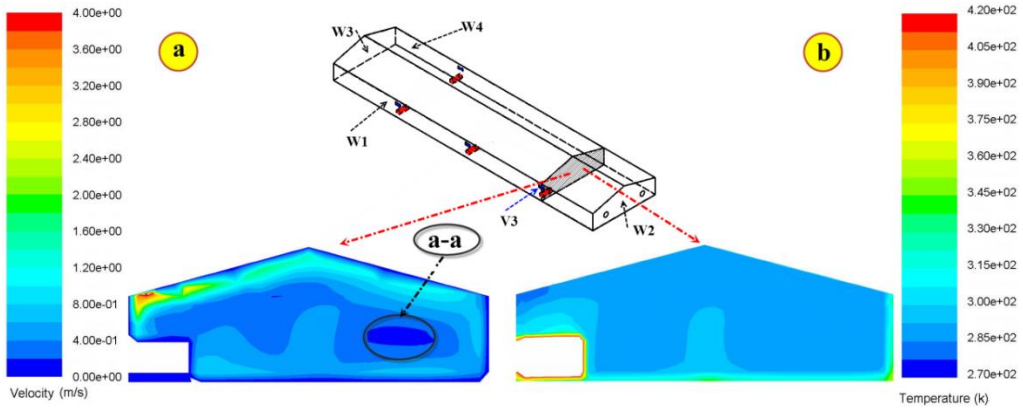
همان‌طوری‌که قبلاً اشاره شد برای تهویه مرغداری در فصل سرد از ۴ دریچه (شکل ۱–b) استفاده می‌شد که انتخاب تعداد، محل و میزان بازشدگی آن‌ها بر اساس تجربه مرغدار صورت می‌گرفت و هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد یکنواختی توزیع سرعت هوا و دمای هوا در سالن مرغداری در دست نبود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرایط محیطی مرغداری نشان داد که غیریکنواختی قابل‌توجهی از لحاظ سرعت هوا در نقاط مختلف سالن مرغداری وجود دارد به‌طوری‌که در برخی نقاط سالن سرعت هوا نزدیک صفر و در برخی مناطق بیش از مقادیر توصیه شده بود. در مقطع عرضی واقع در مجاورت دریچه‌های ۱ و ۴ (شکل ۶–a و b) بیشترین سرعت هوا در نواحی مرکزی مرغداری حدود ۲/۵ متر بر ثانیه مشاهده شد. در مقطع عرضی در مجاورت دریچه شماره ۳ (شکل ۷–a) نیز توزیع سرعت هوا یکنواخت نبود و در ناحیه a-a شکل ۷–a سرعت هوا حدود صفر بود.

توزیع دما و تجمع گازها در سطح قرارگیری طیور (ارتفاع ۰/۴ متری از کف سالن مرغداری، شکل ۸– a) از دیدگاه زیستی و سلامتی مرغ‌ها حائز اهمیت می‌باشد. حداقل مقدار سرعت هوا در مجاورت دیوارها، گوشه‌های سالن، گرم‌کن شماره ۳ (H3) مشاهده شد که عدم تهویه مناسب در این نواحی موجب اجتماع طیور در مناطق مرکزی مرغداری شده و تهویه مرکز سالن را با مشکل مواجه می‌کند. حداکثر سرعت هوا با مقادیر بیش از ۱ متر بر ثانیه در قسمت‌هایی از نواحی مرکزی سالن و نواحی مجاور گرم‌کن شماره ۱ (H1) مشاهده شد. سرعت بالای هوای سرد در سطح طیور موجب کاهش دمای بدن آن‌ها و مشکلات زیستی می‌شود. به همین دلیل سرعت هوای مجاز در کف مرغداری و در سطح طیور در فصول سرد و در زمان تهویه حداقل، کمتر از ۰/۲۵ متر بر ثانیه توصیه شده است (Lee *et al.*, 2007). ملاحظه می‌شود الگوی قرارگیری دریچه‌ها در دیواره‌های جانبی بیش‌ترین تاثیر را روی یکنواختی جریان هوا دارد که در مرغداری مورد مطالعه به درستی انتخاب نشدند.



شکل ٦– بردار و پروفیل سرعت هوا (a و b) و پروفیل دمای هوا (c) در راستای عرض سالن مرغداری و در مجاورت دریچه‌های شماره ۱ و ۴ پس از ۱۰ ساعت

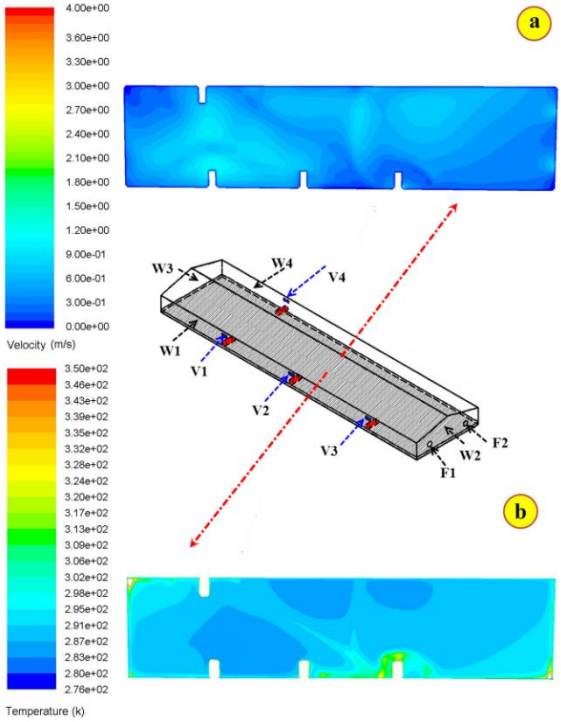
Fig.6. Vectors and profile of air velocity (a and b) and profile of air temperature (c) at the cross section of the poultry house nearby the vents 1 and 4 after 10 hours



شکل ۷– پروفیل بردارهای سرعت هوا (a) و دمای هوا (b) در مقطع عرضی سالن مرغداری و در مجاورت دریچه‌ی شماره ۳ پس از ۱۰ ساعت

Fig.7. Vectors and profile of air velocity (a) and profile of air temperature (b) at cross section of poultry house nearby the vents 3 after 10 hours

البته باید توجه داشت که باز کردن تعداد بیشتری از دریچه‌های ورود هوا به دلیل افزایش دبی هوای ورودی به سالن مرغداری موجب یکنواختی بیشتر سرعت هوا در سالن شده و با تهویه مناسب‌تر، موجب کاهش تلفات طیور می‌گردد که این مسئله در فصول گرم سال مشکل خاصی ایجاد نمی‌کند و صرفاً لازم است طراحی محل دریچه‌ها، زاویه بازشدگی و میزان دبی هوای ورودی به مرغداری به شکل صحیحی انتخاب شود. ولی در فصول سرد جهت حصول یکنواختی بیشتر سرعت هوا در مرغداری، استفاده از دبی‌های بالای هوای ورودی هرچند موجب کاهش تلفات طیور، رشد بهتر و افزایش وزن طیور می‌شود ولی هم‌زمان مصرف انرژی بابت گرمایش سالن افزایش خواهد یافت. بنابراین ضمن این‌که طراحی، اجرا و تنظیم دریچه‌ها و مکنده‌های مرغداری باید بر اساس نتایج شبیه‌سازی باشد علاوه بر آن بایستی اثرات اقتصادی آن نیز مدنظر قرار گیرد تا هزینه تولید واحد محصول بهینه گردد.



شکل ۸– پروفیل سرعت (a) و دمای هوا (b) در راستای طولی مرغداری در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری از کف سالن (سطح طیور) پس از ۱۰ ساعت

Fig.8. Vectors and profile of air velocity (a) and profile of air temperature (b) at transversal section of poultry house 40 cm above the ground after 10 hours

پروفیل دمای هوای مرغداری

پروفیل توزیع دمای پیش‌بینی شده توسط شبیه‌ساز در مقطع عرضی سالن مرغداری پس از سپری شدن ۱۰ ساعت از زمان شروع مطالعه (ساعت ۲۲:۳۰) در شکل ۶- c و ۷- b نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود دمای هوا در مجاورت بستر سالن مرغداری به علت مجاورت با گرم‌کن و هم‌چنین مجاورت با محل استقرار طیور به‌عنوان منابع تولید گرما، بالاترین مقدار (به‌ترتیب ۵۱۰ و ۳۱۰ کلوین معادل ۲۳۷ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد) و در مجاورت سقف مرغداری پایین‌ترین مقدار را دارد. لازم به ذکر است مقادیر دماهای گزارش شده وابسته به زمان و دمای هوای بیرون سالن بوده و با تغییر آن‌ها تغییر نمودند. بررسی‌های بیشتر پروفیل دمای مرغداری در راستای طولی نشان می‌دهد که دما در نواحی مرکزی و قسمت انتهایی سالن مرغداری (مجاورت دیوار شماره ۲) که در نزدیکی مکنده‌ها قرار دارد نسبت به نواحی دیگر بالاتر است که علت آن نوع تهویه مرغداری و حرکت هوا از سمت دیواره‌های جانبی به سمت مرکز سالن و در نهایت حرکت آن به سمت انتهای مرغداری و به سمت مکنده‌ها می‌باشد. در طول این مسیر، تبادل گرمای همرفتی بین هوا، طیور، بستر و گرم‌کن‌ها موجب افزایش تدریجی دمای هوا در طول سالن مرغداری می‌شود. در مقاطع عرضی سالن بین دمای هوا در نواحی کناره دیوارهای جانبی و مرکزی سالن حدود ۱۰ درجه اختلاف دما وجود دارد. در ابتدا و انتهای سالن مرغداری نیز بیش از۱۴ درجه اختلاف دما مشاهده شد که مقدار آن در ارتفاع‌های مختلف متفاوت بود. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Mostafa *et al.*, 2012; Saraz *et al.*, 2013; Bustamante *et al.*, 2012).

توزیع یکنواخت دما در سطح طیور بسیار با اهمیت‌تر از سایر مناطق می‌باشد زیرا می‌تواند تلفات طیور را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. مطالعه پروفیل دما در سطح طیور نشان می‌دهد که غیریکنواختی قابل‌توجهی در دمای هوا در سطح سالن وجود دارد (شکل ۸-b). به‌طور متوسط ۱۸ درجه اختلاف بین دمای هوا در نقاط مختلف سالن مرغداری در سطح طیور ملاحظه شد. البته در مجاورت گرم‌کن شماره ۳ اختلاف دما به بیش از ۴۰ درجه رسیده است. هرچند غیریکنواختی توزیع طیور در سالن مرغداری در شبیه‌سازی انجام شده در نظر گرفته نشده است ولی تهویه ناکافی و بالا بودن دمای هوا در برخی نواحی سالن مرغداری موجب تجمع طیور در نواحی با شرایط مناسب‌تر از لحاظ دمایی مانند مرکز سالن خواهد شد که خود این امر موجب افزایش دمای این نواحی و غیریکنواختی بیشتر دمای هوا می‌گردد.

اصلاح پروفیل توزیع سرعت و دمای هوای مرغداری

همان‌طوری‌که نتایج بخش قبل نشان داد توزیع سرعت و دمای هوا در تمام نقاط سالن مرغداری یکنواخت نبود. بنابراین تغییراتی جهت بهبود شرایط موجود روی مرغداری انجام شد (جدول ۲) که به نتایج هر مرحله در ادامه اشاره می‌شود.

جدول ۲- تغییرات انجام شده در سالن مرغداری به‌منظور بهینه‌سازی توزیع سرعت هوا و دما

Table 2- Modification of the poultry house to improve the distribution of air velocity and temperature

تغییرات انجام شده **Changes made**	نتیجه به‌دست آمده **Results**
تغییر زاویه بازشدگی دریچه‌ها Angle of the air inlets vents variation	زاویه دریچه‌های V1، V2، V3 و V4 از ۱۵ به ۱۰ درجه کاهش یافت. The angle of V1, V2, V3 and V4 vents were decreased from 15 to 10 degree.
باز کردن دو دریچه جدید Adding two new vents	با حفظ تغییرات مرحله ۱، دو دریچه دیگر (V5 و V6) با زاویه بازشدگی ۱۰ درجه به سالن مرغداری افزوده شدند (شکل ۴). By maintaining the variation of stage 1, two vents (V5 and V6) were added to the poultry house by opening angle of 10 degree (Fig. 4).
باز کردن دو دریچه دیگر و تغییر در زاویه بازشدگی دریچه‌ها Adding two vents and variation of angle of the air inlets vents	دو دریچه‌ی دیگر (V7 و V8) با زاویه بازشدگی ۱۰ درجه اضافه شدند (شکل ۴) و زاویه بازشدگی دریچه‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ از ۱۰ درجه به ۱۵ درجه تغییر یافت. Two vents (V7 and V8) were added to the poultry house by opening angle of 10 degree (Fig. 4) and the opening angle of V2, V3, V5 and V6 were increased from 10 to 15 degree.
کاهش سرعت در مرز خروجی (طرح نهایی) Decreasing the air velocity in the outlet (final design)	با حفظ تغییرات مرحله ۳، سرعت هوا در مکنده‌ها از ۷/۳ متر بر ثانیه به ۶/۹ متر بر ثانیه کاهش یافت. By maintaining the variation of stage 3, the air velocity of blowers was decreased from 7.3 to 6.9 m s^{-1}

تغییر در زاویه بازشدگی دریچه‌ها

با توجه به این‌که در مجاورت دریچه‌های شماره ۱ و ۴ سرعت هوا در سطح طیور بیش‌تر از حد مجاز برای فصل سرد بود و به تبع آن دمای هوا در این ناحیه نیز پایین‌تر بود، جهت بهبود این شرایط،

زاویه بازشدگی دریچه‌ها از ۱۵ به ۱۰ درجه کاهش داده شد. این تغییر موجب یکنواختی توزیع سرعت هوا در سالن و یکنواختی توزیع دما در نواحی مجاور گرم‌کن‌های ۱ و ۴ در سطح طیور شد. با این وجود در نواحی مجاور دریچه‌های ۲ و ۳ و در سطح طیور تغییرات اعمال شده سبب افزایش دمای هوا در ناحیه مرکزی مرغداری نسبت به حالت اولیه شد.

باز نمودن دو دریچه جدید (V5 و V6)

نتایج مطالعات نشان داد که وجود دو دریچه مقابل هم به دلیل ایجاد تلاطم، موجب اختلاط بهتر هوا در نواحی مرکزی سالن می‌گردد. بنابراین دو دریچه جدید (V5 و V6) با زاویه بازشدگی ۱۰ درجه در دیوار شماره ۴ و در مقابل دریچه‌های ۲ و ۳ ایجاد شد. با تغییرات انجام شده توزیع دما و سرعت هوا در مجاورت گرم‌کن‌های مربوط به دریچه‌های شماره ۲ و ۳ بهتر و ناحیه کور در مرکز مرغداری نسبت به حالت اولیه محدودتر شد. ولی در مجاورت دیوار شماره ۳ و در مرکز مرغداری هنوز مناطقی با دمای هوای بالا و تهویه نامطلوب وجود داشت.

باز نمودن دو دریچه‌ی دیگر و تغییر مجدد زاویه بازشدگی دریچه‌ها

با توجه به مطلوب نبودن نتایج مرحله قبل، دو دریچه دیگر (V7 و V8) در دیوارهای شماره ۱ و ۴ با زاویه بازشدگی ۱۰ درجه باز شده و زاویه بازشدگی دریچه‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ از ۱۰ درجه به ۱۵ درجه افزایش یافت. با تغییرات انجام شده یکنواختی توزیع دما و سرعت هوا در نواحی مرکزی مرغداری نسبت به مرحله قبل و نیز حالت اولیه مرغداری بهتر شد. ولی هم‌چنان در سطح طیور شرایط تهویه دمای هوا مطلوب نبود.

کاهش سرعت هوای خروجی از مکنده‌ها

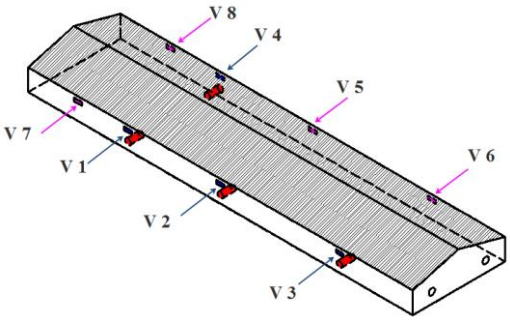
برای رساندن سرعت هوا به حد مطلوب و با حفظ تغییرات انجام شده در مرحله قبل، سرعت هوای خروجی از مکنده‌ها از ۷/۳ به ۶/۹ متر بر ثانیه کاهش داده شد. بر اساس نتایج حاصل، دمای هوا در سطح طیور افزایش یافته و به حد مطلوب رسید به‌طوری‌که در اغلب نواحی مرغداری دمای هوا در محدوده‌ی ۲۹۲ تا ۲۹۷ کلوین (معادل ۱۹ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد) و سرعت هوا نیز در محدوده‌ی ۰/۲۵ تا ۰/۵۷ متر بر ثانیه قرار داشت.

طرح نهایی

با اعمال تغییرات مذکور طرح نهایی مرغداری به شرح زیر می‌باشد:

دریچه‌های ۱، ۴، ۷ و ۸ با زاویه بازشدگی برابر ۱۰ درجه؛ دریچه‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ با زاویه بازشدگی برابر ۱۵ درجه و سرعت مکنده‌های خروجی برابر ۶/۹ متر بر ثانیه (شکل ۹).

با اعمال تغییرات فوق، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرایط تهویه مرغداری اصلاح شده نشان داد که میزان یکنواختی توزیع دما نسبت حالت اولیه مرغداری بیش‌تر شده و در دمای هوا در محدوده ۲۹۱ تا ۲۹۷ کلوین (معادل ۱۸ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد) و در حد مطلوب قرار دارد (شکل ۱۰). پروفیل سرعت هوا در سطح طیور نیز نشان داد که نقاط با سرعت هوای صفر و نقاط کور در مرغداری اصلاح شده نسبت به حالت اولیه کمتر است و هم‌چنین یکنواختی و دامنه اختلاف سرعت هوا در حالت اصلاح شده کمتر می‌باشد. در مرغداری اصلاح شده سرعت هوا در اغلب نقاط مرغداری در محدوده‌ی ۰/۲۳ متر بر ثانیه تا ۰/۴۶ متر بر ثانیه قرار دارد که به مقادیر توصیه‌شده توسط لی و همکاران (Lee *et al.*, 2007) برای سرعت هوا در طول فصل سرد و تهویه حداقل نزدیک است.



شکل ۹- طرح نهایی سالن مرغداری

Fig.9. Final design of the poultry house

شکل ۱۰– پروفیل دمای هوا در راستای طولی مرغداری اصلاح شده در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری از کف سالن (سطح طیور) پس از ۱۰ ساعت

Fig.10. Profile of air temperature at the transversal section of the modified poultry house, 40 cm above the ground after 10 hours

نتیجه‌گیری

تهویه یک متغیر کلیدی برای بهینه‌سازی شرایط محیط داخلی در مرغداری‌ها است و به‌طور مستقیم نرخ تلفات و بهره‌وری تولید را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در حال حاضر دستور العمل‌های دقیقی در راستای طراحی و ساخت سالن‌های مرغداری و سیستم‌های تهویه توسعه نیافته و اکثر پیشنهادهای ارائه شده براساس تجربه عمومی است. در این تحقیق برای بررسی الگوهای جریان هوا و توزیع دما در یک مرغداری تیپ موجود در منطقه و به‌منظور بهبود یکنواختی توزیع دما و یکنواختی سرعت هوا مدل CFD توسعه یافت. مدل توسعه‌یافته پس از اعتبارسنجی جهت پیش‌بینی الگوهای جریان هوا و توزیع دما در داخل مرغداری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف در جهت بهبود تهویه سیستم نشان داد که زاویه بازشدگی دریچه‌ها بیشترین تاثیر را در اختلاط هوا دارد. همچنین استفاده از دریچه‌های روبه‌روی هم در دیوارهای جانبی موجب یکنواختی بهتر توزیع سرعت و دمای هوا می‌گردد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، سالن مرغداری مورد مطالعه بهینه‌سازی و حداکثر یکنواختی توزیع سرعت و دمای هوا در سالن مرغداری و در سطح طیور حاصل شد.

References

1. ANSYS- Fluent. 2014. Theory Guide.
2. Atilgan, A., and H. Koknaroglu. 2006. Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses. Italian Journal of Animal Science 5 (4): 393-400.
3. Baghani, M., and M. H. Aghkhani. 2018. Study of Ammonia Gas Emission from Broiler Houses and the Effects of Temperature, Humidity and Age on It. Journal of Agricultural Machinery 8 (2): 377-388. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v8i2.65179.
4. Blanes-Vidal, V., E. Guijarro, S. Balasch, and A. G. Torres. 2008. Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. Biosystems Engineering 100 (1): 105-116.
5. Bustamante, E., E. Guijarro, F. J. Garcia-Diego, S. Balasch, A. Hospitaler, and A. G. Torres. 2012. Multisensor system for isotemporal measurements to assess indoor climatic conditions in poultry farms. Sensors (Basel) 12 (5): 5752-5774.
6. Charles, D. R., and A. W. Walker. 2002. Poultry environment problems: a guide to solutions, Nottingham University Press.
7. Chen, Q., and J. Srebric. 2002. A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses. HVAC&R Research 8 (2): 201-216.
8. Feddes, J., E. Emmanuel, M. Zuidhof, and D. Korver. 2003. Ventilation rate, air circulation, and bird disturbance: Effects on the incidence of cellulitis and broiler performance. The Journal of Applied Poultry Research 12 (3): 328-334.
9. Gholamrezai, N., K. Qaderi, and K. Jafari Naeimi. 2017. Temperature, Humidity and Energy Consumption Forecasting in the Poultry Hall Using Artificial Neural Network. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 546-557. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v7i2.50799.
10. González Díaz, S., R. Sotolongo Sospedra, M. A. León Sánchez, and F. Góngora Rojas. 2014. Incidencia de la Modificación del Bosque Semicaducifolio sobre Orquídeas en Sierra del Rosario Candelaria, Cuba. Revista

Facultad Nacional de Agronomia 67 (2): 7345-7353.
11. Lee, I. B., S. Sase, and S. H. Sung. 2007. Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ 41 (1): 53-64.
12. Mistriotis, A., T. D. Jong, M. Wagemans, and G. Bot. 1997. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings. Netherlands Journal of Agricultural Science (Netherlands).
13. Mostafa, E., I. B. Lee, S. H. Song, K. S. Kwon, I. H. Seo, S. W. Hong, H. S. Hwang, J. P. Bitog, and H. T. Han. 2012. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. Biosystems Engineering 112 (4): 293-303.
14. Norton, T., J. Grant, R. Fallon, and D. W. Sun. 2009. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. Biosystems Engineering 103 (1): 78-99.
15. Norton, T., J. Grant, R. Fallon, and D. W. Sun. 2010. Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity. Building and Environment 45 (4): 983-995.
16. Norton, T., D. W. Sun, J. Grant, R. Fallon, and V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. Bioresour Technol 98 (12): 2386-2414.
17. Saraz, J. A. O., M. Arêdes Martins, K. S. Oliveira Rocha, N. Silva Machado, and H. J. Ciro Velasques. 2013. Use of computational fluid dynamics to simulate temperature distribution in broiler houses with negative and positive tunnel type ventilation systems. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica 16 (1): 159-166.
18. Pedersen, S. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume II Animal Production & Aquacultural Engineering, Part I Livestock Housing and Environment, Chapter 2 Environment for Animals, Part 2.3. 2 Forced Ventilation.
19. Ramponi, R., and B. Blocken. 2012. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. Building and Environment 53: 34-48.
20. Rojano, A., P. Bournet, P. H. Robin, M. Hassouna, C. Choi, and M. Kacira. 2014. Test of two different schemes through CFD to include heat and mass transfer induced by animals inside a broiler house. Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich.
21. Rojano, F., P. E. Bournet, M. Hassouna, P. Robin, M. Kacira, and C. Y. Choi. 2015. Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. Biosystems Engineering 136: 25-38.
22. Seo, I. H., I. B. Lee, O. K. Moon, H. T. Kim, H. S. Hwang, S. W. Hong, J. P. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kwon, Y. H. Kim, and J. W. Han. 2009. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. Biosystems Engineering 104 (1): 106-117.
23. Simmons, J., B. Lott, and J. May. 1997. Heat loss from broiler chickens subjected to various air speeds and ambient temperatures. Applied Engineering in Agriculture 13 (5): 665-669.
24. Tao, X., and H. Xin. 2003. Temperature-humidity-velocity index for market-size broilers. 2003 ASAE Annual Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
25. Van Ouwerkerk, E., J. Voskamp, and Y. Aliskan. 1994. Climate simulation and validation for an aviary system for laying hens. XII CIGR World Congress and Agency 94 Conference on Agricultural Engineering.
26. Worley, M., and H. Manbeck. 1995. Modeling particle transport and air flow in ceiling inlet ventilation systems. Transactions of the ASAE 38 (1): 231-239.
27. Yahav, S., A. Straschnow, E. Vax, V. Razpakovski, and D. Shinder. 2001. Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. Poultry Science 80 (6): 724-726.
28. Zhu, S., P. Liu, N. Yang, J. He, and Z. Ye. 2012. Optimization of local ventilation system for gaseous pollutants removal in broiler house using CFD simulation. 2012 IX International Livestock Environment Symposium (ILES IX), American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 147-157

Investigation of the Co-digestion of Chicken Manure with Chicken Intestine and Its Contents and Rumen Contents

A. Mirzaee[1], M. Soleymani[2*], H. Bahrami[3], M. Norouzi Masir[4]

1- Former M.Sc student, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Associated Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4- Assistant Professor, Department of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.soleymani@scu.ac.ir)

Received: 17-07-2019
Revised: 09-10-2019
Accepted: 17-12-2019

How to cite this article:
Mirzaee, A., M. Soleymani, H. Bahrami, and M. Norouzi Masir. 2022. Investigation of the Co-digestion of Chicken Manure with Chicken Intestine and Its Contents and Rumen Contents. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 147-157. (In Persian).
DOI: 10.22067/jam.v12i2.82016

Introduction: Almost 18 percent of emitted greenhouse gasses in Iran come from livestock industries, especially from manure decomposition. With the anaerobic digestion of animal wastes, in addition to eliminating its disadvantages, biogas as a clean and renewable energy carrier is produced. In addition, the resulting sludge is a more healthy and nutritious fertilizer for use in agriculture. One of the challenges of the bio-gas industry is to increase gas production efficiency. Various approaches are proposed to enhance manure digestion efficiency and increase biogas production, which can be mentioned below: Changing operating parameters such as temperature, hydraulic retention time (HRT), and particle size of the substrate; adding some effective additives; returning the resulting sludge into the digestion process and using bio-filters. Therefore in this study, in order to increase biogas production from poultry manure, two methods (co-digestion with rumen contents, and chicken intestine and its contents, and returning the slurry into the reactor) were tested. The alkaline composition of chicken manure and its high content of ammonia makes it difficult to digest alone, and co-digestion with high-carbon organic matter improves its digestibility.

Materials and Methods: Polyethylene bottles were used as batch reactor units. In order to the possibility of gas exit, as well as taking samples of the digester, two valves were placed on the bottle cap. All digesters were placed in a hot water bath and a 700 watts electric heater and a thermostat were used respectively to supply heat and to keep the temperature constant. A U-shaped tube, connected to the reactor output pipe was used to measure the amount of produced gas. The volume of water removed from the tube was an indicator of produced gas. The experiment was carried out in two stages. In the first stage 21 reactors were used according to the design of the experiment which was a completely randomized design with 7 treatments (adding rumen fluid in three levels (10, 20, and 30 percent of chicken manure (weight basis), respectively), adding chicken intestines and its content in three levels (10, 20, and 30 percent of chicken manure (weight basis), respectively), and control treatment), and three replicates of each treatment. During the whole experiment period, the pH and temperature were kept constant, respectively between 7.2-8.2 and 40-35 °C (mesophilic range). In the second stage of the experiment, after all the treatments reached the end of their hydraulic retention time, the resulting sludge was filtered and the liquid part was returned to the cycle. Three treatments were also provided here (supplying 50% of the water required by sludge liquid, supplying 100% of the water required by sludge liquid, and control treatment (no liquefied sludge).

Results and Discussion: Based on the results, although the type of organic supplementation had a significant effect on the amount of biogas production, the quantity of them had not. Treatments of chicken manure + 20%, 30%, and 10% of chicken intestines resulted in the highest amount of biogas production, respectively. But these three treatments were not significantly different. Also, the co-digestion of chicken manure with chicken intestines was more effective than the co-digestion of chicken manure with rumen fluid. The return of sludge, resulted from anaerobic digestion of chicken manure, again into the cycle, in addition to enhancing the amount of produced gas, can reduce the waiting time to start gas production by at least six days (in the treatment of providing 100% of required water from returned sludge). This can lead to continuous gas production and availability of sufficient gas in commercial gas-producing units. The effect of treatments on the time of reaching the cumulative gas production index to 100 mm was significant (α= 5%) and treatment of S_{100} reduced this duration by approximately 17 days (65%) and S_{50}, for approximately 16 days (74%).

Conclusion: According to the results of this study, co-digestion of chicken manure with cow rumen fluid did not have a significant effect on the increase of biogas production, but co-digestion of chicken manure with chicken intestine and its contents (at least by 20% of chicken manure (weight basis)) can have a significant effect on the increase in the production of biogas and can increase the amount of gas at least twice. The highest amount of gas volume was about 305 $Ml.gr^{-1}$ VS_{added} and came from the treatment of co-digestion of chicken manure with 20% (weight base) chicken intestine and its contents. The return of the resulting sludge of anaerobic digestion of chicken manure, back into the cycle, in addition to increasing the amount of gas, can minimize the time it takes to start to produce gas and help to produce gas continuously. Moreover, the water used for digestion will also be significantly reduced (at least 50%).

Keywords: Anaerobic digestion, Batch reactor, Co-digestion, Renewable energy

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۵۷-۱۴۷

بررسی هضم مشترک کود مرغی با روده مرغ و محتویات آن و محتویات شکمبه گاوی

آیسودا میرزایی[۱]، محسن سلیمانی[۲*]، هوشنگ بهرامی[۳]، مجتبی نوروزی مصیر[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

چکیده

هدف از این مطالعه، آزمون هضم مشترک کود مرغی با محتویات شکمبه گاوی و روده مرغ و محتویات آن، در هاضم‌های بی‌هوازی ناپیوسته، به هدف افزایش تولید زیست گاز و همچنین مطالعه اثر برگرداندن لجن حاصله به چرخه تولید، بر مقدار تولید زیست‌گاز و کاهش مدت زمان انتظار برای تولید گاز بود. آزمایش در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول اثرات هضم مشترک کود مرغی با محتویات شکمبه گاوی و روده مرغ و محتویات آن، هرکدام در سه سطح (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی کود مرغی) مورد بررسی قرار گرفت و در مرحله دوم، پس از رسیدن همه تیمارها به پایان زمان ماند هیدرولیکی، قسمت مایع لجن حاصل از تیمارهای مرحله اول، به هاضم‌های مرحله دوم آزمایش وارد شد. در این مرحله نیز سه تیمار (تیمار شاهد (تامین کل آب مورد نیاز با آب خالص)، تامین ۵۰ و ۱۰۰ درصد از آب مورد نیاز توسط مایع لجن) آزمون شدند. با توجه به نتایج، هضم مشترک محتویات شکمبه گاوی با کود مرغی اثر معنی‌داری بر میزان افزایش تولید زیست‌گاز نداشت اما هضم مشترک روده مرغ و محتویات آن با کود مرغی (حداقل به میزان ۱۰ درصد وزنی) اثر معنی‌داری بر افزایش تولید زیست‌گاز داشته و می‌تواند میزان گاز حاصله را حداقل به میزان دو برابر افزایش دهد. تیمار (کود مرغی +۲۰٪ روده مرغ و محتویات آن) بیشترین مقدار تولید زیست‌گاز را به میزان تقریبی $ml.grVS^{-1}$ ۳۰۵ نتیجه داد. اثر برگرداندن لجن حاصله به چرخه هضم، هم بر مقدار تولید گاز و هم بر روی مدت زمان انتظار برای تولید گاز، در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود؛ اما تفاوت معنی داری بین دو تیمارِ تامین ۵۰ درصدی و ۱۰۰ درصدی آب مورد نیاز توسط آب لجنی از لحاظ تسریع در شروع تولید گاز و همچنین میزان گاز تولید شده دیده نشد. بنابراین استفاده از آب لجنی برای تامین حداقل ۵۰ درصد از آب مورد نیاز هضم، علاوه بر افزایش میزان گاز تولیدی و کم کردن مدت زمان انتظار برای شروع تولید گاز، مصرف آب را نیز حداقل به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، هضم بی‌هوازی، هضم ترکیبی، هاضم ناپیوسته

مقدمه

صنعت دام و طیور در دنیا، صنعتی بسیار پویا است. با توجه به نرخ رشد جمعیت، رشد درآمد و فناوری، تقاضا در جوامع توسعه یافته تقریباً ثابت است. سامانه‌های تولیدی در این کشورها به کارایی تولید و پایداری زیست محیطی متمرکز شده‌اند. اما این صنعت در کشورهای درحال توسعه، در پاسخ به تقاضای فزاینده در حال رشد است (Thornton, 2010). در سال ۱۳۹۶ در ایران از مجموع ۷۶۵,۲۱۱,۹۶۸ قطعه مرغ، ۲۲۳۷ هزار تن گوشت مرغ تولید شده است (Anonymous, 2018). آنچه مسلم است تولید بیشتر ماکیان، پسماندهای این صنعت را نیز افزایش می‌دهد. با توجه به نرخ تولید کود مرغی (۴۱ تن به ازای هر ۱۰۰۰ قطعه مرغ (Anonymous, 2010)) سالانه بیش از ۴۲ میلیون تن کود مرغی در کشور تولید می شود که منبعی بسیار غنی برای تولید زیست‌گاز محسوب می‌شود. رهاسازی پسماندهای دامی در طبیعت بدون توجه به مدیریت صحیح در دفع آن، منجر به آلودگی‌هایی از جمله انتشار گاز آمونیاک (Nicholson *et al.*, 2004)، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی با ترکیبات نیتروژن و فسفر (Greenwood, 1990; USDA, 1991) و نشر بو و عوامل بیماری‌زا می‌گردد. حدود ۱۸

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- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴- استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.soleymani@scu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.82016

درصد از گازهای گلخانه‌ای انتشاریافته در ایران از صنایع دامی نشات می‌گیرد (Roshani *et al.*, 2012). با هضم بی‌هوازی پسماندهای دامی، علاوه بر حذف مضرات یاد شده، یک حامل پاک و تجدیدپذیر انرژی به اسم زیست‌گاز[1] تولید می‌شود. به علاوه لجن حاصله نیز کود سالم‌تر و مغذی‌تری برای استفاده در بخش کشاورزی می‌باشد (Roshani *et al.*, 2012). یکی از چالش‌های صنعت زیست‌گاز، افزایش بازده تولید گاز می‌باشد. برای بالا بردن بازدهی هضم بی‌هوازی کود و افزایش تولید زیست‌گاز روش‌های مختلفی پیشنهاد می شود که می توان به تغییر در پارامترهای عملیاتی مانند دما، مدت‌زمان هیدرولیکی (HRT) و اندازه ذرات بستر، استفاده از افزودنی ها، بازگشت مقداری از لجن حاصله به فرآیند هضم بی هوازی و استفاده از بیوفیلترها اشاره کرد (Yadvika *et al.*, 2004).

اکثر مطالعات گذشته به دنبال تعیین مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی بوده‌اند و تقریباً محدوده بهینه این مقادیر، پیدا شده است. بنابراین در این مطالعه، در راستای افزایش تولید زیست‌گاز از کود مرغی، دو روش هضم مشترک با مواد آلی، و برگرداندن مقداری از لجن به چرخه هضم، آزمون شدند. به دلیل ترکیب قلیایی کود مرغی و محتوی بالای آمونیاک آن (Callaghan *et al.*, 2002)، هضم آن به تنهایی دشوار است و افزودن مواد آلی با کربن بالا، بازده هضم را بهبود می‌بخشد. با افزودن مواد مختلف و قرار گرفتن مواد مغذی در دسترس ریزاندام‌های بی‌هوازی گوناگون، فعالیت این باکتری‌ها افزایش یافته و بازده هضم و تولید زیست‌گاز افزایش می‌یابد (Roshani *et al.*, 2012). مطالعات زیادی بر روی هضم هم‌زمان کود و ضایعات کشاورزی انجام شده است. با این حال انتخاب ماده مشترک هضم، به دسترس بودن و ارزان بودن آن و هزینه‌های مرتبط با جمع‌آوری و حمل و نقل آن وابسته است (Frigon and Guiot, 2010; Li *et al.*, 2011). اگر فرض بر این باشد که کشتارگاه طیور نیز در مجموعه مرغداری وجود داشته باشد، بنابراین روده مرغ و محتویات آن، با کمترین هزینه در دسترس خواهد بود. همچنین محتویات شکمبه گاوی نیز با کمترین هزینه از کشتارگاه‌های دام قابل تهیه است. بنابراین در این مطالعه اثر هضم مشترک این دو مورد با کود مرغی بر افزایش بازدهی هضم بی‌هوازی مورد مطالعه قرار گرفت.

در اضافه کردن ساقه ذرت به کود مرغی توسط (Li *et al.*, 2013)، در ترکیب نسبتی سه به یک و یک به یک (ساقه ذرت به کود مرغی، بر پایه VS) اثرات مثبت هم‌افزایی مشاهده شد که به‌ترتیب منجر به تولید ۲۱۸/۸ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد فرار اضافه شده و ۱۴/۲ لیتر متان به ازای هر لیتر حجم هاضم گردید. هضم هم‌زمان بی‌هوازی کود مرغی و ساقه ذرت در راکتورهای پیوسته و ناپیوسته[2] توسط (Li *et al.*, 2014) مطالعه شد. آزمون‌های هم‌زمان راکتورهای ناپیوسته در غلظت‌های مواد جامد فرار (VS) اولیه $grVS.L^{-1}$، نسبت کربن به نیتروژن برابر با ۲۰ و زمان ماند ۳۰ روزه انجام گرفتند. عملکرد متان، $12\pm281\ mL.grVS^{-1}$ به‌دست آمد. راکتورهای پیوسته با غلظت تغذیه ۱۲ درصد از کل مواد جامد و نسبت کربن به نیتروژن برابر با ۲۰ در نرخ‌های بارگذاری مواد آلی (OLRs) برابر با $grVS.L^{-1}.d^{-1}$ ۱-۴ به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان دادند که در نرخ بارگذاری مواد آلی برابر با $grVS.L^{-1}.d^{-1}$ ۴، عملکرد پایدار و مطلوب $۲۲۳\pm۷\ mL.grVS^{-1}$ به‌دست می‌آید که از نظر عملکرد انرژی برابر با $۳\pm۸\ MJ.kgVS^{-1}$ می‌باشد. هضم مجدد لجن حاصله نیز $۵/۱-۶/۲\ MJ.kgVS^{-1}$ عملکرد انرژی اضافی حاصل می‌کند. در مطالعه (Callaghan *et al.*, 2002) تاثیر هضم مشترک کود مرغی با لجن کود گاوی به اندازه هضم مشترک پسماند میوه و سبزی در افزایش تولید متان در هضم بی‌هوازی موفق نبود. با افزایش مقدار کود مرغی و افزایش نرخ بارگذاری مواد آلی، مقدار متان تولیدی کاهش می‌یافت. ظاهراً دلیل این امر غلظت آمونیاک آزاد در محیط هضم بود. هضم هم‌زمان پسماندهای کشاورزی و کودهای دامی، می‌تواند منجر به تعادل مواد مغذی شده و عملکرد ویژه متان را افزایش دهد (Li *et al.*, 2014). هضم هم‌زمان کود مرغی و گاوی در نسبت‌های ۰، ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد کود مرغی توسط (Altinbas and Cicek, 2019) مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج، بیشترین پتانسیل تولید متان به ازای هر کیلوگرم VS اضافه شده، به‌ترتیب ۱۴۴، ۲۰۱، ۲۱۷ و ۲۵۶ لیتر به‌دست آمد. با رسیدن غلظت نیتروژن کل به مقدار بیشینه (به مقدار $۶۵۲mgNH_3\text{-}N.L^{-1}$)، افزایش مقدار pH از تولید گاز ممانعت به عمل می‌آورد. در این مطالعه نشان داده شد که محتویات شکمبه گاوی، به تنهایی می‌تواند همبستر[3] مناسبی برای کود مرغی در هضم بی‌هوازی باشد. در مطالعه (Song *et al.*, 2019)، هضم هم‌زمان (ترکیبی) کود مرغی و کود گوسفندی، با افزایش ظرفیت بافری، در نسبت کود مرغی به کود گوسفندی برابر با ۲/۵، بالاترین عملکرد تولید متان ($۳۱۰mlCH4.grVS^{-1}$) را نتیجه داد و این عملکرد در زمانی سریع‌تر (به میزان ۳۸/۴ درصد) حاصل شد (Song *et al.*, 2019).

به‌کارگیری مجدد شیره (فاضلاب هضم)، جهت راه‌اندازی هضم بی‌هوازی مواد خام زیست‌توده‌ای، فناوری نسبتاً جدیدی است که برای افزایش مقدار گاز تولیدی به‌کار گرفته می‌شود. از دیگر مزایای این روش می‌توان به افزایش کیفیت لجن حاصله، کاهش هزینه هضم، کاهش هزینه مدیریت دفع لجن و کاهش مقدار آب مصرفی اشاره کرد (Chan *et al.*, 2002). در مطالعه (Chan *et al.*, 2002)،

1- Biogas

2- Batch

3- Co-substrate

به‌کارگیری مجدد لجن باعث کاهش زمان پایداری ضایعات شهری شده و در افزایش مقدار گاز تولیدی و بهبود کیفیت لجن مخصوصاً از نظر شاخص COD، موثر بوده است.

در این مطالعه اثر هضم مشترک مواد آلی با کود مرغی و همچنین برگرداندن لجن حاصله به چرخه تولید، در روش هضم بی‌هوازی ناپیوسته برای افزایش بازدهی تولید زیست‌گاز آزمون گردید. بنابراین از یافته‌های مطالعات قبلی برای تعیین بهترین شرایط پارامترهای موثر بهره‌گیری خواهد شد. یادویکا و همکاران (Yadvika *et al.*, 2004)، برای افزایش تولید زیست‌گاز، سه نوع افزودنی شامل: زیست‌توده سبز، سویه‌های میکروبی و افزودنی معدنی را پیشنهاد کرده‌اند. ازآنجا که هدف از تولید زیست‌گاز، احداث راکتور در محل مرغداری و فرآهم کردن کل یا بخشی از انرژی مورد نیاز واحد مرغداری است، بنابراین سعی بر این است که از موادی به‌عنوان خوراک مشترک هضم استفاده شود که بتوان بدون کمترین مشکلی در همان محل مرغداری به آن دسترسی پیدا کرد. بنابراین در این مطالعه اثرات ترکیب محتویات شکمبه گاوی یا روده مرغ و محتویات آن با کود مرغی، بر میزان تولید زیست‌گاز، همچنین اثر بازگرداندن مایع لجن حاصل از هضم بی‌هوازی به چرخه تولید گاز، بر روی کاهش مدت زمان انتظار برای تولید گاز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی مواد اولیه

ماده اصلی و خوراک هضم در این مطالعه کود مرغی می‌باشد. از آنجا که این مطالعه به دنبال آزمون اثر ترکیب محتویات شکمبه گاوی یا روده مرغ و محتویات آن با کود مرغی، به‌عنوان تأمین‌کننده باکتری‌های متان‌ساز[1] و همچنین تسریع‌کننده واکنش بود، بنابراین این مواد آلی نیز (که نوع و میزان آن بسته به نوع تیمار، متفاوت بود) جزئی از مواد اولیه آزمایش می‌باشند. درصد مواد جامد (TS[2]) و درصد مواد فرار (VS[3]) مواد ورودی با توجه به پروتکل پیشنهادی آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (US EPA[4]) (Telliard, 2001) به‌دست آمد. پس از ترکیب کود مرغی و مواد آلی (بسته به نوع تیمار: محتویات شکمبه گاوی یا روده مرغ و محتویات آن، یا کود مرغی خالص)، ۵۰ درصد حجمی واحدهای هضم به نحوی پر شد (با اضافه کردن آب خالص، بسته به نوع تیمار) که غلظت مواد داخل هاضم‌ها، بر اساس توصیه چودوری و همکاران (Chowdhry *et al.*, 1994) به میزان هشت درصد برسد.

1- Methanogens
2- Total Solid
3- Volatile Solid
4- United States Environmental Protection Agency

تنظیم pH مواد ورودی

هدف این بود که pH همه نمونه‌ها در محدوده بازی ۶/۸-۷/۲ قرار گیرد. برای تنظیم pH در این محدوده از روش تجربی تنظیم اسید و باز استفاده شد. بنابراین این روش بر روی ۱۰۰ میلی‌لیتر از مواد (زیست‌توده نهایی) انجام گرفت. سپس از نسبت به‌دست‌آمده (جدول ۱) برای تعیین حجم محلول قلیایی سه مولار سود (هیدروکسید سدیم، NaOH) موردنیاز برای تنظیم pH مواد استفاده شد. قبل از شروع کار، وسایل آزمایشگاهی و دستگاه pHمتر، شستشو داده شد و دستگاه pHمتر کالیبره شدند. جهت رسیدن به pH دلخواه، محلول سود به‌وسیله پیپت مدرج به آرامی و هم‌زمان با همزنی زیست‌توده توسط همزن مغناطیسی، به محلول زیست‌توده اضافه شد. این کار تا نمایش مقدار pH مورد نظر، روی دستگاه pHمتر ادامه یافت. نسبت محلول سود برای رسیدن به مقادیر pH موردنظر در جدول ۱ آورده شده است. پس از به‌دست آمدن نسبت مناسب محلول سود با زیست‌توده، از همین نسبت درون واحدهای هضم استفاده شد. جهت اطمینان و پس از اضافه کردن سود و پس از همزنی کافی واحدهای هاضم، دوباره مقدار pH نهایی درون هاضم‌ها اندازه‌گیری شدند.

هاضم‌ها و کنترل پارامترهای موثر بر هضم

در این آزمایش از بطری‌های پلی‌اتیلن به‌عنوان واحد هضم استفاده شد (شکل ۱، الف). مزیت اصلی بطری‌های پلی‌اتیلن انعطاف‌پذیری بدنه آن‌ها می‌باشد که امکان بی‌هوازی کردن واحدها به‌صورت دستی و با فشردن بدنه و خروج هوا از درون واحد، وجود دارد. عیب آنان نیز در عدم امکان دقیق اندازه‌گیری حجم زیست‌گاز تولیدی است. برای اندازه‌گیری مقدار زیست‌گاز تولیدی باید در هر مرتبه اندازه‌گیری، بطری را فشرده ساخت تا تمام حجم گاز تولیدی از بطری خارج شده و وارد مجرای سامانه اندازه‌گیری گاز گردد. فشرده‌سازی بطری می‌تواند آب‌بندی درزها را مختل سازد. جهت خروج گاز تولید شده و همچنین امکان نمونه‌برداری از درون هاضم‌ها دو شیر (شیرهای قطع و وصل جریان گاز و شیر مجرای نمونه‌برداری) بر روی درب بطری‌ها تعبیه شد (شکل ۱، ب). طول لوله نمونه‌برداری بلندتر از لوله عبور گاز در نظر گرفته شد تا از قرارگیری لوله در درون مواد داخل هاضم اطمینان حاصل شود و همچنین در زمان نمونه‌برداری، گاز تولید شده نشت نیابد. با آزمون نشت‌یابی بر روی اتصالات شیرها، از عدم نشت گاز اطمینان حاصل شد.

برای این‌که دمای هاضم‌های مربوط به تکرارهای تیمارهای مشابه ثابت بماند، این هاضم‌ها درون یک حمام آب گرم قرار گرفتند و جهت تامین گرمای حمام از گرمکن برقی میله‌ای ۷۰۰ وات،

مستقیماً برای هر یک از حمام‌ها استفاده شد. به‌منظور ایجاد جریان همرفتی مناسب، گرم‌کن‌ها در نزدیکی کف حمام‌ها قرار گرفتند. حجم حمام به گونه‌ای انتخاب شد که فضای کافی برای هاضم‌ها و اتصالات آن‌ها، گرمکن و جریان گرما وجود داشته باشد. جهت کنترل دمای حمام آب گرم، از ترموستات ۹۰-۳۰ تک بان یخچالی-آبگرمکنی عقربه‌ای با دقت کافی (۰/۵ درجه سلسیوس خطا در مخازن هاضم) و متناسب با فاصله مقادیر شاخص دما استفاده گردید. به‌منظور پاسخ‌دهی سریع‌تر ترموستات، حسگر آن در نزدیک‌ترین محل ممکن به گرمکن قرار گرفت. تنظیم و کالیبراسیون ترموستات با توجه به دمای درون مخزن انجام گردید. این آزمون‌ها نشان دادند که به دلیل تأخیر در زمان انتقال گرما، خطای عملی ترموستات بر تغییرات دمای درون مخازن تأثیر اندکی دارد. چگونگی قرارگیری هاضم‌ها درون حمام آب گرم و همچنین نحوه قرارگیری گرمکن و ترموستات درون مخازن در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقدار محلول سود برای رساندن pH ۱۰۰ گرم زیست‌توده با مقادیر pH اولیه متفاوت به محدوده ۶/۸-۷/۲

Table 1- The amount of caustic soda needs to change the pH of biomass solution from different initial values to the range of 6.8-7.2

مقدار pH اولیه The initial pH	6.3	5.4	5.9	6.1
مقدار سود مورد نیاز در ۱۰۰ گرم زیست‌توده (ml) The amount of required caustic soda for 100 gr biomass	2.1	4.78	3.33	2.66

(a)

(b)

شکل ۱- الف) هاضم‌های مورد استفاده و ب) تعبیه دو شیر در سر هاضم برای خروج گاز و نمونه‌برداری

Fig. 1. a) Reactors used in this study and b) Two sampler valves placed on the reactor cap

(a)

(b)

شکل ۲- الف) چگونگی قرارگیری هاضم‌ها درون استخر آب گرم و ب) نحوه قرارگیری گرمکن و ترموستات درون استخر آب گرم

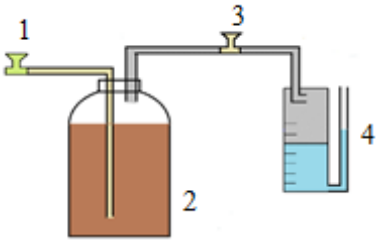
Fig. 2. Position of a) reactors and b) heaters and thermostats inside the hot water bath

برخی مواقع، تولید زیست‌گاز در برخی از واحدها متوقف، یا بسیار کاهش می‌یابد، معمولاً این اتفاق ناشی از کاهش شدید pH می‌باشد.

به همین دلیل وجود یک مسیر نمونه‌برداری از مواد درون هر واحد الزامی است. در هاضم مورد استفاده، برای هر واحد یک مسیر نمونه‌برداری دارای شیر قطع و وصل در نظر گرفته شد (شکل ۱). مقدار pH، هر شش روز یک‌بار از نمونه‌های خارج‌شده از واحدها، اندازه گرفته و ثبت شد. همه واحدهای هضم روزی یک بار به‌صورت دستی به‌هم زده می‌شدند.

اندازه‌گیری مقدار زیست‌گاز

جهت ایجاد سامانه اندازه‌گیری حجم گاز تولیدی در هاضم مورد نظر، از یک مخزن با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی‌لیتر استفاده شد. لوله خروجی از هاضم به درون این مخزن وارد می‌شد. با افزایش فشار ناشی از تولید گاز، آب از مخزن مدرج به لوله خروجی رانده می‌شد و به درون سرنگ مدرج ریخته می‌شد (شکل ۳). مقدار آب جابه‌جا شده، شاخصی حجمی از مقدار گاز تولیدی را در اختیار قرار می‌داد. مقدار جابه‌جایی آب از روی ستون مدرج، به‌صورت روزانه ثبت شد. در حالت کلی اتصال بین شیر قطع و وصل گاز و سامانه اندازه‌گیری، برقرار بود اما پس از اندازه‌گیری شاخص حجم، این اتصال قطع می‌شد تا با تخلیه گاز از سامانه اندازه‌گیری، فشار درون سامانه به حالت عادی برگردد و آب خارج‌شده از سامانه، با استفاده از سرنگ، جایگزین گردد و همچنین عملیات همزنی دستی واحدها انجام شود. به‌منظور عدم وجود نشتی در محل اتصال و قطع اتصال، از یک شلنگ فشاری خشک در مقابل یک شلنگ فشاری نرم استفاده شد. تست‌های نشت‌یابی در فشار بالا نشان داد این اتصال هیچ‌گونه نشتی ندارد.



شکل ۳- چگونگی اندازه‌گیری مقدار زیست‌گاز (۱: شیر و لوله نمونه‌برداری، ۲: راکتور، ۳: شیر قطع‌کننده جریان گاز و ۴: لوله یو شکل مدرج)

Fig. 3. Measuring system of the amount of produced biogas (1: Sampling valve and tube, 2: Reactor, 3: Shut-off valve and 4: A U-shaped tube)

طرح آزمایشی و تعداد هاضم‌ها

تعداد هاضم‌ها بر اساس طرح کاملاً تصادفی، ۲۱ واحد (۷ تیمار شامل هضم مشترک کود مرغی با محتویات شکمبه گاوی در سه سطح، با روده مرغ و محتویات آن در سه سطح و تیمار شاهد) هر کدام در سه تکرار انتخاب شد. متغیرهای مستقل مورد آزمون در این طرح، میزان محتویات شکمبه گاوی و روده مرغ و محتویات آن، در ترکیب با کود مرغی، و متغیر وابسته، میزان تولید زیست‌گاز از کود مرغی بودند. در کل زمان آزمایش، pH در محدوده ۶/۸-۷/۲ (بازی) (Yadvika *et al.*, 2004) و دما در محدوده ۳۵-۴۰ درجه سلسیوس (دمای محدوده مزوفیلیک) ثابت نگه‌داشته شد. بعد از آماده شدن هاضم‌ها، در حمام آب گرم قرار داده شدند.

ابتدا همه ترکیبات زیست‌توده‌ای با استفاده از آسیاب خانگی به قطعات کمتر از دو میلی‌لیتر خرد شدند. سپس با توجه به ترکیب تیماری مورد نظر، کود مرغی با محتویات شکمبه گاو و یا روده مرغ و محتویات آن، ترکیب شده زیست‌توده حاصله با غلظت مناسب (حدود ۸ درصد) درون راکتورها ریخته شد. به نحوی که تا حجم ۵۰ درصد از هر بطری را زیست‌توده و مابقی را فضای خالی جهت تولید گاز اشغال می‌کرد. درون هر بطری، به‌صورت دستی و با خروج هوا از طریق فشردن بطری‌ها، به‌صورت بی‌هوازی درآمد. سپس همه بطری‌ها (هر شش بطری در درون یک حمام) در دمای ۳۵-۴۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بطری‌ها هر روز به‌صورت دستی به هم زده شدند.

در مرحله دوم آزمایش، پس از رسیدن همه تیمارها به پایان زمان ماند هیدرولیکی (زمانی که دیگر گازی تولید نشد) لجن حاصله از صافی گذرانده شد و قسمت مایع دوباره به هاضم برگردانده شد. بدین ترتیب از آنجا که میکروب‌های فعال در لجن، به چرخه تولید بازگردانده می‌شوند، جمعیت میکروبی اضافه‌ای فرآهم‌شده و همچنین به دلیل بازگشت آب لجن، در مصرف آب نیز صرفه‌جویی می‌گردد (Yadvika *et al.*, 2004). جهت تامین لجن مورد نیاز همه تیمارهای مرحله دوم، لجن در این جا نیز سه تیمار (تامین ۵۰ درصد از آب مورد نیاز توسط مایع لجن، تامین ۱۰۰ درصد از آب مورد نیاز توسط مایع لجن و تیمار شاهد (بدون مایع لجنی) آزمون شدند. این تیمارها بر روی کود مرغی پایه (مشابه تیمار شاهد در مرحله اول آزمایش) انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش اول

مرحله اول آزمایش به مدت ۴۳ روز طول کشید یعنی عملیات آزمایش زمانی متوقف شد که میزان تولید زیست‌گاز، نسبت به روزهای قبل به حداقل مقدار خود رسید. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین شاخص زیست‌گاز تولیدی در مرحله اول آزمایش در جدول ۲ و شکل ۴ آمده است. نتایج تجزیه این بررسی نشان می‌دهد که تیمارهای مورد مطالعه، در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر روی تولید زیست‌گاز دارند.

جدول ۲- تجزیه واریانس تیمارهای مورد بررسی بر میزان تولید زیست‌گاز

Table 2- Analysis of variance of the effect of the studied treatments on the amount of biogas production

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean squares
تیمار Treatment	5	21106**
خطا Error	12	4151
ضریب تغییرات Coefficient of variation	17	

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

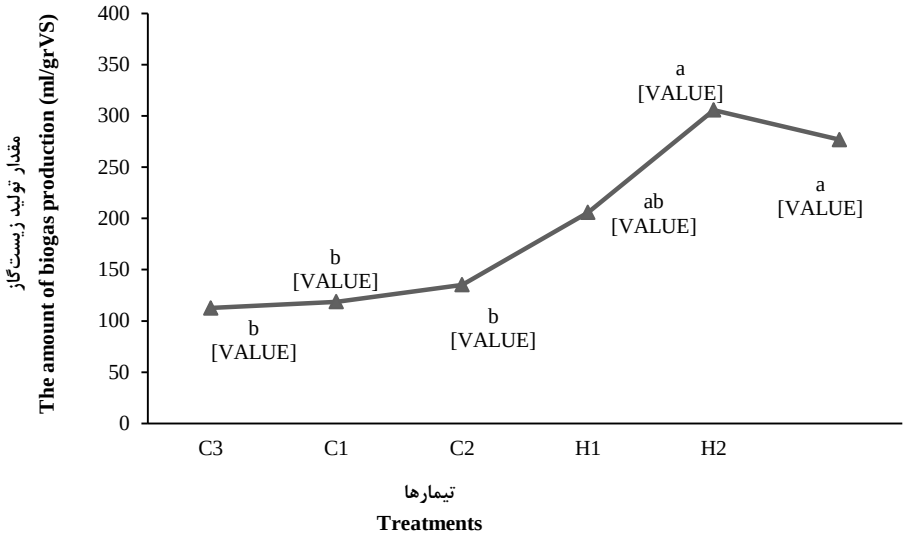
**significant at p<0.01

نتایج جدول ۲ و شکل ۴ نشان می‌دهد با آن که نوع ماده آلی مشترک، تاثیر معنی‌داری بر میزان تولید زیست‌گاز دارد، اما میزان درصد ماده آلی مشترک تاثیر معنی‌داری بر میزان تولید زیست‌گاز ندارد. تیمار (کود +۲۰٪ روده مرغ و محتویات آن) بیشترین میزان تولید زیست‌گاز را نتیجه داده است (میزان تقریبی ۳۰۵ml.grVS^{-1}). همچنین تیمار (کود +۳۰٪ روده مرغ و محتویات آن) و تیمار (کود +۱۰٪ روده مرغ و محتویات آن)، به‌ترتیب به میزان تقریبی ۲۷۶ml.grVS^{-1} و ۲۰۶ ml.grVS^{-1} در رتبه دوم و سوم بیشترین میزان تولید زیست‌گاز قرار گرفته‌اند. ناگفته نماند که میزان تولید زیست‌گاز این دو تیمار نسبت به تیمار قبلی اختلاف معنی‌داری ندارد. بنابراین در زمان‌هایی که دسترسی به امعا و احشای شکم مرغ با محدودیت مواجه است، اضافه کردن تنها ۱۰ درصد روده مرغ و محتویات آن به کود خام، جهت تولید زیست‌گاز کافی است و بیش از آن، از آنجا که منجر به افزایش معنی‌دار تولید زیست‌گاز نمی‌گردد، الزامی ندارد. همچنین کمترین میانگین تولید زیست‌گاز مربوط به تیمار کود +۱۰٪ محتویات شکمبه گاو بود (تقریباً ۱۱۸ml.grVS^{-1}). هرچند که اختلاف آن با تیمارهای (کود +۳۰٪ محتویات شکمبه گاو، ۱۱۲ ml.grVS^{-1}) و (کود +۲۰٪ محتویات شکمبه گاو، ml.grVS^{-1} ۱۳۵) از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. با توجه به این نتایج، استفاده از ترکیب کود و روده مرغ و محتویات آن در سطح‌های مختلف جهت تولید زیست‌گاز نسبت به ترکیب کود و محتویات شکمبه گاو اثر مثبت بیشتری داشته است. در مطالعه بودیونو و همکاران (Budiyono *et al.*, 2014)، که از محتویات شکمبه گاوی به‌عنوان تلقیح‌کننده هضم بی‌هوازی کود گاوی استفاده شد، بازده تولید گاز تا دو برابر افزایش یافت. با توجه به مطالعه مروری کاینثولا و همکاران (Kainthola *et al.*, 2019)، انتخاب ماده تلقیح نه تنها به دلیل فرآهم آوردن عناصر کم مقدار، محتوی رطوبتی، مواد مغذی (میکرو و ماکرو) بلکه به دلیل فرآهم‌آوری خاصیت بافری در سیستم از اهمیت برخوردار است. عموماً پساب حاصل از هضم بی‌هوازی در نقش تلقیح‌کننده بهتر از موادی مانند محتویات شکمبه عمل می‌کند (Kainthola *et al.*, 2019). هم‌افزایی محتویات شکمبه گاوی و کود گاوی در مطالعه بودیونو و همکاران (Budiyono *et al.*, 2014)، در تولید گاز و محتویات روده مرغی و کود مرغی در مطالعه حاضر نشان‌دهنده وجود باکتری‌های متان‌زای ویژه هضم کود مرغی در روده مرغی می‌باشد. از طرفی افزایش میزان اسیدهای چرب فرار موجود در بافت روده نیز عامل مهم دیگری در افزایش مقدار گاز تولیدی در تیمارهای روده مرغ و محتویات آن است (Kainthola *et al.*, 2019).

برای این که اثر مواد آلی مورد آزمون در هضم مشترک با کود مرغی، بر مقدار تولید زیست‌گاز آزمون شود، مقایسه‌ای به روش آزمون دانت بین تیمار شاهد و تیمارهای دیگر انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول هرچند که افزودن مواد آلی به کود مرغی باعث افزایش میزان تولید زیست‌گاز گردیده است اما میانگین تولید زیست‌گاز، تنها بین دو تیمار ۲۰ درصد و ۳۰ درصدی روده مرغ و محتویات آن، و تیمار شاهد معنی‌دار است. به بیان دیگر، در ۴ تیمار دیگر، هضم مشترک با مواد آلی، از نظر آماری منجر به افزایش تولید زیست‌گاز نشده است.

نتایج آزمایش مرحله دوم

آزمایش دوم در سه تیمار و چهار تکرار مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های دو تکرار از تیمار شاهد و یک تکرار از دو تیمار دیگر به دلایل نوسانات شدید (احتمالاً به دلیل وجود نشتی در هاضم‌ها) از محاسبات خارج شدند.



شکل ٤- مقایسه میانگین تیمارهای مورد بررسی بر میزان تولید کل زیست‌گاز در آزمایش اول (C_1، C_2 و C_3 به‌ترتیب، کود مرغی به‌علاوه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد محتویات شکمبه گاو و H_1، H_2 و H_3 به‌ترتیب، کود مرغی به‌علاوه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد روده مرغ و محتویات آن)

Fig. 4. Comparison of the mean amount of biogas production under the studied treatments (Duncan's test) (C_1, C_2 and C_3, stands for chicken manure + 10, 20 and 30 percent cow rumen fluid, respectively, and H_1, H_2 and H_3, stands for chicken manure + 10, 20 and 30 percent chicken intestines, respectively)

جدول ۳- نتایج آزمون دانت در مقایسه بین تیمار شاهد و بقیه تیمارها بر میزان تولید زیست‌گاز در آزمایش اول

Table 3- Dunnett's test results comparing the mean amount of biogas production in the control treatment with and other treatments

متغیر وابسته Dependent variable	تیمارها Treatments	اختلاف میانگین با تیمار شاهد Mean difference with control treatment	p-value
شاخص تولید زیست‌گاز Biogas production index	کود +۱۰٪ محتویات شکمبه گاو Chicken Manure +10% Cow Rumen fluid	22.59^{ns}	0.994
	کود +۲۰٪ محتویات شکمبه گاو Chicken Manure +20% Cow Rumen fluid	39.19^{ns}	0.921
	کود +۳۰٪ محتویات شکمبه گاو Chicken Manure +30% Cow Rumen fluid	16.42^{ns}	0.999
	کود +۱۰٪ روده مرغ و محتویات آن Chicken Manure +10% Chicken intestines	109.6^{ns}	0.175
	کود +۲۰٪ روده مرغ و محتویات آن Chicken Manure +20% Chicken intestines	209.5^{**}	0.004
	کود +۳۰٪ روده مرغ و محتویات آن Chicken Manure +30% Chicken intestines	180.6^{*}	0.013

^{ns} غیر معنی‌دار، ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

^{ns} not significant, **significant at $p<0.01$

بنابراین طرح آزمایشی به یک طرح کاملاً تصادفی با تکرارهای نامساوی تبدیل شد. این مرحله به مدت ۴۰ روز طول کشید یعنی زمانی که میزان تولید زیست‌گاز به حداقل مقدار خود رسید، آزمایش متوقف شد. نتایج تجزیه واریانس میزان زیست‌گاز حاصل از مرحله دوم آزمایش، در جدول ۳ آمده است. با توجه به جدول ۳، اثر تیمارها بر روی میزان تولید زیست‌گاز در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. با

توجه به آزمون مقایسه میانگین دانکن، بین تیمار شاهد و دو تیمار دیگر اختلاف معنی‌دار وجود دارد اما اختلاف معنی‌داری از نظر آماری بین دو تیمار تامین ۵۰ درصد و صد درصد از آب مورد نیاز توسط مایع لجن، وجود ندارد (جدول ۵). برگرداندن مایع لجنی به چرخه تولید به دلیل شروع فعالیت باکتری‌های متانزا (Budiyono *et al.*, 2014) از همان ابتدا و بالتبع در مدت زمان بیشتر، باعث افزایش بازده تولید گاز و هضم تا حد ممکن مواد قابل هضم می‌گردد.

جدول ٤– تجزیه واریانس تیمارهای مرحله دوم بر میزان تولید زیست‌گاز

Table 4- Analysis of variance of the effect of the studied treatments in the second stage of the experiment on the amount of biogas production

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean squares
تیمار Treatment	2	60657**
خطا Error	5	5657

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

**significant at p<0.01

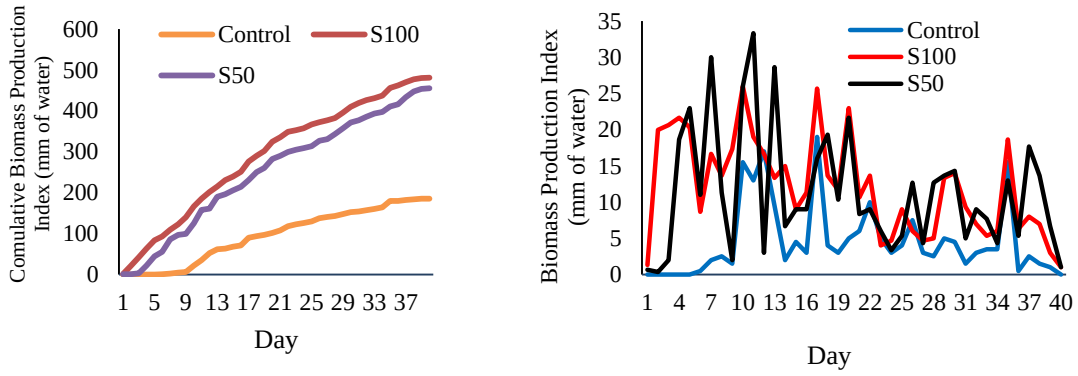
جدول ۵– نتایج مقایسه میانگین تیمارها در آزمایش دوم به روش آزمون چند دامنه دانکن

Table 5- Comparison of the mean amount of biogas production in different treatments of the second stage of the experiment (Duncn's test)

تیمارها Treatments	گروه اول First group	گروه دوم Second group
شاهد Control	185[c]	
S_{50}[a]		455
S_{100}[b]		481
p-value	1	0.708

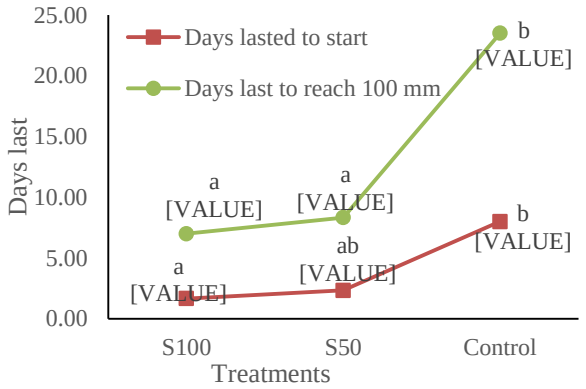
a. مهیا کردن کل آب مورد نیاز از آب لجنی، b. مهیا کردن نصف آب مورد نیاز از آب لجنی و c. اختلاف بین میانگین‌های موجود در هر ستون، از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نیست.

a. Providing 100% of required water from sludge liquid, b. Providing 50% of required water from sludge liquid, c. Means in the same column are not significantly different (P<0.05)



شکل ۵– روند تولید زیست‌گاز در سه تیمار مورد مطالعه در مرحله دوم (شاهد، تامین ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد از آب هاضم توسط لجن مرحله قبلی) (a: تولید روزانه و b: تولید تجمعی)

Fig. 5. The rate of biogas production in the second stage of the experiment (Control, S50: Providing 50% of required water from sludge liquid and S100: Providing 100% of required water from sludge liquid) (a: daily production and b: cumulative production)



شکل ٦– میانگین تیمارهای مورد بررسی در مرحله دوم (شاهد، تامین ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد از آب هاضم توسط لجن مرحله قبلی) از نظر مدت زمان انتظار برای تولید گاز و زمان رسیدن شاخص گاز تولیدی به ۱۰۰ میلی‌متر

Fig. 6. Mean of time lasted to start gas production and time consumed to receive gas production index to 100 mm of the treatments of the second stage experiment (Control, S50: Providing 50% of required water from sludge liquid and S100: Providing 100% of required water from sludge liquid)

هدف اصلی از برگرداندن لجن به چرخه تولید گاز، تسریع در شروع تولید گاز بود. به بیان دیگر به دلیل وجود میکروب‌های فعال بی‌هوازی موجود در لجن مدت زمان لازم برای شروع هضم بستر (سوبسترا) به حداقل ممکن می‌رسد. شکل ۵ روند تولید زیست‌گاز در سه تیمار مورد مطالعه در مرحله دوم را در طول دوره آزمایش نشان می‌دهد. چند نکته از این تصاویر به وضوح مشخص است: ۱. روند تولید تجمعی گاز همانند دیگر مطالعات (Budiyono *et al.*, 2014; Taghinazhad *et al.*, 2018) از تابع سیگموئیدی تبعیت می‌کند. ۲. روند تولید گاز در طول دوره، به دلیل کاهش سوبسترای قابل هضم کاهش یافته است. ۳. مقدار تولید گاز در تیمار شاهد، تقریباً در کل بازه ۴۰ روزه از دو تیمار دیگر کمتر است و از همه مهم‌تر، ۴. زمان شروع تولید قابل‌توجه گاز در تیمار شاهد حتی تا ۹ روز دیرتر از دو تیمار دیگر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای تولید پیوسته گاز، برگرداندن لجن حاصله، می‌تواند نقش بسیار مهمی داشته باشد. مورد بعدی این است که با وجود کم شدن شیب نمودار تجمعی گاز تولیدی (نسبت به مرحله اول آزمایش)، اما هنوز تمایل به تولید گاز بیشتر وجود دارد. با توجه به مطالعه (Richard, 1996)، باکتری‌های بی‌هوازی یا نمی‌توانند و یا به کندی توان تجزیه لیگنین و برخی هیدروکربن‌های دیگر را دارند.

انتظار می‌رفت که با بازگرداندن لجن فعال به درون راکتورها، به دلیل وجود میکروارگانیزم‌های فعال در درون لجن، زمان انتظار برای شروع تولید زیست‌گاز کاهش یابد. به همین دلیل دو شاخص تعداد روزهای انتظار برای تولید زیست‌گاز و همچنین زمان لازم برای رسیدن شاخص تولید زیست‌گاز به ۱۰۰ میلی‌متر آب در تیمارها با هم مقایسه شد. میانگین هر سه تیمار در این شاخص‌ها در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. برگرداندن لجن حاصله از هضم بی‌هوازی کود مرغی، همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشخص است باعث می‌شود که زمان انتظار برای تولید گاز حداقل به میزان شش روز کاهش یابد (در تیمار برگرداندن صد درصدی لجن حاصله). این قضیه به پیوستگی و تداوم تولید گاز و در دسترس بودن گاز تولید شده کافی در واحد صنعتی کمک می‌کند. اثر تیمارها بر مدت زمان رسیدن شاخص تجمعی گاز تولیدی به ۱۰۰ میلی‌متر هم در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و تیمار برگرداندن ۱۰۰ درصدی لجن این مدت را به مدت را تقریباً ۱۷ روز (۶۵ درصد) و تیمار برگرداندن ۵۰ درصدی لجن به مدت تقریبی ۱۶ روز (۷۴ درصد) کاهش می‌دهد. هرچند اختلاف دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار نیست. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، برگرداندن لجن حاصله علاوه بر کمک به تولید پیوسته زیست‌گاز، در صرفه‌جویی در میزان مصرفی نیز بسیار موثر است. استفاده از پساب هاضم (آب لجن) به‌عنوان تلقیح‌کننده، سیستم را پایدارتر می‌سازد، درصد ماده جامد بیشتری را فراهم می‌کند و جمعیت میکروبی فعالی (اسیدزا[1] و متان‌زا) که با مواد بستر (سابستریت) و محیط سازگارتر است را فراهم می‌کند (Kainthola *et al.*, 2019).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مطالعه، هضم مشترک محتویات شکمبه گاوی به کود مرغی اثر معنی‌داری بر میزان افزایش زیست‌گاز حاصل از هضم بی‌هوازی کود مرغی نداشت اما هضم مشترک روده مرغ و محتویات آن و کود مرغی (حداقل به میزان ۲۰ درصد وزنی) می‌تواند

1- Acidogens

اثر معنی‌داری بر افزایش تولید مقدار زیست‌گاز داشته و می‌تواند میزان گاز حاصله را حداقل به میزان دو برابر افزایش دهد. برگرداندن لجن حاصله از هضم بی‌هوازی کود مرغی علاوه بر افزایش میزان گاز خروجی، می‌تواند زمان مورد نیاز برای تولید گاز را به حداقل ممکن برساند و به تولید پیوسته گاز کمک کند. علاوه بر این، بدین ترتیب در مصرف آب مورد نیاز برای هضم بی‌هوازی نیز به میزان قابل‌توجهی (حداقل به میزان ۵۰ درصد) صرفه‌جویی خواهد شد.

References

1. Altinbas, M., and O. A. Cicek. 2019. Anaerobic co-digestion of chicken and cattle manures: Free ammonia inhibition. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 41: 1097-1109. doi:10.1080/15567036.2018.1539143.
2. Anonymous, 2010. Fertiliser Recommendations for Agricultural and Horticultural Crops (RB 209) (8th Edn). The Stationery Office, Norwich
3. Anonymous, 2018. Agricultural Statistics in 2017, (Volume 2). (In Persian).
4. Budiyono, B., I. Nyoman Widiasa, S. Johari, and S. Sunarso. 2014. Increasing biogas production rate from cattle manure using rumen fluid as inoculums. International Journal of Science and Engineering (IJSE) 6: 31-38. doi:10.12777/ijse.6.1.31-38.
5. Callaghan, F. J., D. A. J. Wase, K. Thayanithy, and C. F. Forster. 2002. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. Biomass and Bioenergy 22: 71-77. doi:10.1016/S0961-9534(01)00057-5.
6. Chan, G. Y. S., L. M. Chu, and M. H. Wong. 2002. Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill. Environmental Pollution 118: 393-399.
7. Chowdhry, S. D. R., S. K. Gupta, and S. K. Banergy. 1994. Evaluation of the potentiality of tree leaves for biogas production. Indian Forester 120 (8): 720-728.
8. Frigon, J-C., and S. R. Guiot. 2010. Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review. Biofuels, Bioproducts and Biorefining 4: 447-458. doi:10.1002/bbb.229.
9. Greenwood, D. J. 1990. Production or productivity: the nitrate problem. Annals of Applied Biology 117 (1): 209-231.
10. Kainthola, J., A. S. Kalamdhad, and V. V. Goud. 2019. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. Process Biochemistry 84: 81-90 doi:10.1016/j.procbio.2019.05.023.
11. Li, Y., S. Y. Park, and J. Zhu. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainainable Energy Reviews 15: 821-826. doi:10.1016/J.RSER.2010.07.042.
12. Li, Y., R. Zhang, C. Chen, G. Liu, Y. He, and X. Liu. 2013. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. Bioresource Technology 149: 406-412. doi:10.1016/j.biortech.2013.09.091.
13. Li, Y., R. Zhang, Y. He, C. Zhang, X. Liu, C. Chen, and G. Liu. 2014. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch. Bioresource Technology 156: 342-347.
14. Nicholson, F. A., B. J. Chambers, and A. W. Walker. 2004. Ammonia emissions from broiler litter and laying hen manure management systems. Biosystems Engineering 89 (2): 175-185.
15. Richard, T. 1996. The effect of lignin on biodegradability. Cornell Composting Science and Technology.
16. Roshani, A., J. Shayegan, and A. Babaee. 2012. Methane production from anaerobic co-digestion of poultry manure. Journal of Environmental Studies 38: 83-88. (In Persian).
17. Song, L., D. Li, X. Cao, Y. Tang, R. Liu, Q. Niu, and Y. Y. Li. 2019. Optimizing biomethane production of mesophilic chicken manure and sheep manure digestion: Mono-digestion and co-digestion kinetic investigation, autofluorescence analysis and microbial community assessment. Journal of Environmental Management 237: 103-113. doi:10.1016/j.jenvman.2019.02.050.
18. Telliard, W. A. 2001. Method 1684: Total, fixed, and volatile solids in water, solids, and biosolids. US Environmental Protection Agency, Washington.
19. Taghinazhad, J., R. Abdi, and M. Adl. 2018. Modeling of biogas production process from cow manure with completely stirred tank reactor under semi continuously feeding. Journal of Agricultural Machinery 8: 159-169. (In Persian). doi: 10.22067/jam.v8i1.57758.
20. Thornton, P. K. 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 365 (1554): 2853-2867.
21. U. S. Department of Agriculture (USDA), 1991. “Nitrate Occurrence in US. Waters.” USDA. Washington, DC.
22. Yadvika, S., T. R. Sreekrishnan, S. Kohli, and V. Rana. 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques- A review. Bioresource Technology 95: 1-10. doi:10.1016/j.biortech.2004.02.010.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 159-167

Spectral Feature Selection from the Hyperspectral Dataset to Identify Pistachio Leaves Infected by Psylla

A. Moghimi[1], A. Sazgarnia[2], M. H. Aghkhani[3*]

1- Ph.D. student of Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Medical Physics, Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
3- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: aghkhani@um.ac.ir)

Received: 22-07-2019
Revised: 24-08-2020
Accepted: 02-09-2020

How to cite this article:
Moghimi, A., A. Sazgarnia, and M. H. Aghkhani. 2022. Spectral Feature Selection from the Hyperspectral Dataset to Identify Pistachio Leaves Infected by Psylla. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 159-167. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.82089.

Introduction

Pistachio production has been adversely affected by Psylla, which is a devastating insect. The primary goal of this study was to select sensitive spectral bands to distinguish pistachio leaves infected by Psylla from healthy leaves. Diagnosis of psylla disease before the onset of visual cues is crucial for making decisions about topical garden management. Since it is not possible to diagnose psylla disease even after the onset of symptoms with the help of color images by drones, hyperspectral and multispectral sensors are needed. The main purpose of this study was to extract spectral bands suitable for distinguishing healthy leaves from psylla leaves. For this purpose, in this paper, a new method for selecting sensitive spectral properties from hyperspectral data with the high spectral resolution is presented. The intelligent selection of sensitive bands is a convenient way to build multispectral sensors for a specific application (in this article, the diagnosis of psylla leaves). Knowledge of disease-sensitive wavelengths can also help researchers analyze multispectral and hyperspectral aerial images captured by satellites or drones.

Materials and Methods

A total number of 160 healthy and diseased leaves were scanned in 64 spectral bands between 400-1100 nm with 10 nm spectral resolution. A random forest algorithm was used to identify the importance of features in classifying the dataset into diseased and healthy leaves. After computing the importance of the features, a clustering algorithm was developed to cluster the most important features into six clusters such that the center of clusters was 50 nm apart. To transfer the hyperspectral dataset into a multispectral dataset, the reflectance was averaged in spectral bands within ±15 nm of each cluster center and achieved six broad multispectral bands. Afterwards a support vector machine algorithm was utilized to classify the diseased and healthy leaves using both hyperspectral and multispectral datasets.

Results and Discussion

The center of clusters were 468 nm, 598 nm, 710 nm, 791 nm, 858 nm, and 1023 nm, which were calculated by taking the average of all the members assigned to the individual clusters. These are the most informative spectral bands to distinguish the pistachio leaves infected by Psylla from the healthy leaves. The F1-score was 90.91 when the hyperspectral dataset (all bands) was used, while the F1-score was 88.69 for the multispectral dataset. The subtle difference between the F1-scores indicates that the proposed pipeline in this study was able to select appropriately the sensitive bands while retaining all relevant information.

Conclusion

The importance of spectral bands in the visible and near-infrared region (between 400 and 1100 nm) was obtained to identify pistachio tree leaves infected with psylla disease. Based on the importance of spectral properties and using a clustering algorithm, six wavelengths were obtained as the best wavelengths for classifying healthy and diseased pistachio leaves. Then, by averaging the wavelengths at a distance of 15 nm from these six centers, the hyperspectral data (64 bands) became multispectral (6 bands). Since the correlation between the wavelengths in the near-infrared region was very high (more than 95%), out of the three selected wavelengths in the near-infrared region (710, 791, and 1023), only the 710-nm wavelength, which was closer to the visible region, was selected. The results of classification of infected and diseased leaves using hyperspectral and multispectral data showed that the degree of classification accuracy decreases by about 2% and if only 4 bands are used, the degree of accuracy decreases by about 3%.

The results of this study revealed that the proposed framework could be used for selecting the most informative spectral bands and accordingly develop custom-designed multispectral sensors for disease detection in pistachio. In addition, we could reduce the dimensionality of the hyperspectral datasets and avoid the issues related to the curse of dimensionalitylity.

Keywords: Classification, Feature selection, Hyperspectral data, Multispectral data, Pistachio, Psylla, Random forest, Spectroscopy

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۶۷-۱۵۹

انتخاب طول‌موج‌های طیفی حساس از میان داده‌های فراطیفی جهت تشخیص برگ‌های درخت پسته آلوده به پسیل

علی مقیمی[۱]، آمنه سازگارنیا[۲]، محمد حسین آق خانی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

چکیده

در سال‌های اخیر تولید پسته توسط آفتی به نام پسیل تهدید شده است. هدف از انجام این تحقیق انتخاب باندهای طیفی مناسب جهت تشخیص برگ‌های آلوده به آفت پسیل می‌باشد. برای این منظور از ۱۶۰ برگ سالم و ۱۶۰ برگ بیمار در ۶۴ باند طیفی در ناحیه بین ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر با قدرت تفکیک طیفی حدوداً ۱۰ نانومتر طیف‌نگاری انجام شد. از روش جنگل‌های تصادفی برای مرتب‌سازی طول‌موج‌ها بر اساس قدرت تفکیک بین برگ‌های سالم و بیمار استفاده شد. پس از شناسایی و مرتب‌سازی طول‌موج‌ها بر اساس میزان اهمیت، طول‌موج‌های دارای بیشترین اهمیت توسط یک الگوریتم خوشه‌بندی در شش خوشه تقسیم‌بندی شدند به‌طوری‌که میانگین طول‌موج‌های هر خوشه‌ها حداقل ۵۰ نانومتر از یکدیگر فاصله داشته باشند. میانگین طول‌موج‌های قرار گرفته در شش خوشه به‌ترتیب اهمیت عبارت بود از: ۷۱۰، ۷۹۱، ۸۵۸، ۵۹۸، ۴۶۸، و ۱۰۲۳ نانومتر. برای تبدیل داده‌های فراطیفی به چندطیفی، از بازتابش‌های به‌دست آمده در فاصله ۱۵± نانومتری این مراکز میانگین‌گیری انجام گرفت و داده‌های بازتابش به‌دست آمده از دیگر طیف‌ها حذف شد. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی برگ‌های سالم و بیمار با استفاده از داده‌های فراطیفی و چند طیفی به‌دست آمده در این پژوهش به‌کار گرفته شد. دقت طبقه‌بندی با استفاده از تمام ۶۴ طول‌موج (داده‌های فراطیفی) ۹۰/۹۱ درصد و با استفاده از ۶ طول‌موج (داده‌های چندطیفی) ۸۸/۶۹ درصد بود. اختلاف بسیار کم (حدود ۲ درصد) در میزان دقت طبقه‌بندی نشان‌دهنده صحت شیوه ارائه شده در این پژوهش برای کاهش ابعاد داده‌های فراطیفی می‌باشد. علاوه بر کاهش ابعاد داده، تعیین باندهای طیفی مناسب از میان داده‌های فراطیفی گامی موثر در طراحی و ساخت حسگری چندطیفی جهت تشخیص بیماری گیاهان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انتخاب ویژگی، پسته، جنگل‌های تصادفی، طیف‌سنجی، فراطیفی

مقدمه

به‌طور کلی پایش وضعیت سلامت و تشخیص بیماری گیاهان و درختان برای کشاورزی پایدار امری حیاتی می‌باشد. اطلاعات اولیه از سلامت درختان و تشخیص بیماری آن‌ها می‌تواند کنترل بیماری‌ها را تسهیل نماید و در نهایت بهره‌وری را افزایش دهد که این مسئله با به‌کارگیری استراتژی‌های مدیریتی مناسب مانند مدیریت استفاده از آفت‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و مواد شیمیایی مخصوص بیماری محقق می‌گردد.

یکی از محصولات مهم در حوزه کشاورزی ایران پسته می‌باشد که اهمیت بسیار بالایی در بخش صادرات غیرنفتی ایران دارد (Mohammadigol *et al.*, 2013). عاملی که هر ساله باعث به‌وجود آمدن خسارت‌های مالی فراوانی در باغات پسته ایران می‌شود آفت پسیل می‌باشد. علاوه بر تبعات اقتصادی این آفت، بدون تردید سم‌پاشی‌های بی‌رویه با سموم خطرناک، فجایع زیست‌محیطی و بهداشتی متعددی در پی خواهد داشت. در حال حاضر، پایش وضعیت سلامت درختان پسته بیشتر به بازرسی چشمی و میدانی توسط کشاورزان انجام می‌گیرد. به وضوح این روش نیاز به نیروی کارگری و هزینه بالایی دارد و همچنین یک روش بسیار زمان بر و کم دقت می‌باشد.

در سال‌های اخیر با توجه به دسترسی به پلتفرم‌های هوایی و

۱- دانش‌آموخته دکترای گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد، گروه فیزیک پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران
۳- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: aghkhani@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.82089

زمینی خودکار، استفاده از سنسورهای چندطیفی و فراطیفی به‌عنوان یک روش سریع و غیر مخرب برای ارزیابی سلامت درختان مطرح شده است. این سنسورها در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک عمل می‌کنند. طیف‌سنجی در ناحیه مرئی و فروسرخ می‌تواند به‌عنوان یک روش موثر برای ارزیابی خصوصیات کیفی درونی میوه‌ها و سبزی‌ها (Moghimi *et al.*, 2011)، تشخیص تنش‌های زیستی (Susič *et al.*, 2018) و غیر زیستی (Moghimi *et al.*, 2018) گیاهان استفاده گردد حتی قبل از این‌که نشانه‌های بصری به‌وجود آیند. هنگامی که گیاه دچار تنش می‌شود باز تابش گیاه در ناحیه‌های مرئی و فروسرخ نزدیک تغییر می‌کند. آسیب در ساختار برگ، محتوی آبی درون سلول، کاهش میزان کلروفیل و تغییرات رنگدانه از فعل و انفعال بیماری در گیاه منتج می‌شود و این مسئله روی بازتابش گیاه تاثیر می‌گذارد (Mahlein *et al.*, 2012; Wahabzada *et al.*, 2016).

در اینجا به بررسی چند نمونه از پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه استفاده از سنسورهای فراطیفی و چندطیفی در کشاورزی می‌پردازیم. جهت تشخیص آلودگی آفلاتوکسین در پسته از تصویربرداری فراطیفی و برای طبقه‌بندی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شد (Kheiralipour *et al.*, 2016). دقت به‌دست آمده برای جداسازی پسته‌های آلوده از سالم به میزان ۹۱/۷ درصد بود.

برای تشخیص بیماری کپک سطحی (Powdery mildew) در جو از تصویربرداری فراطیفی و برای تحلیل تصاویر از ماشین بردار پشتیبان استفاده شد (Thomas *et al.*, 2018). در این پژوهش میزان شدت بیماری به محض بروز اولین نشانه‌های بصری توسط تصویربرداری فراطیفی قابل تشخیص بود.

در تحقیقی بر میزان اهمیت کاهش ابعاد داده‌های فراطیفی جهت تشخیص بیماری پوسیدگی زغالی پرداخته شد (Nagasubramanian *et al.*, 2018). در این پژوهش طول‌موج‌های حساس که قادر به تشخیص بیماری به‌صورت موثر بودند انتخاب شدند. از میان ۲۴۰ طول‌موج دوربین فراطیفی، فقط تعداد شش طول‌موج (۴۷۵، ۵۱۶، ۵۴۸، ۶۵۲، ۷۲۰، و ۹۱۵ نانومتر) برای رسیدن به دقت طبقه‌بندی ۹۷ درصد لازم بود که بیانگر اهمیت انتخاب طول‌موج‌های حساس می‌باشد.

در تحقیقی مشابه از دوربین فراطیفی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای انتخاب طول‌موج‌های حساس جهت تشخیص بیماری FHB[1] در گندم استفاده شد (Moghimi *et al.*, 2019). نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد ۵ طول‌موج به‌ترتیب اهمیت شامل ۷۶۶، ۸۶۸، ۶۹۶، ۵۹۱، و ۵۴۰ نانومتر برای تشخیص بیماری کافی می‌باشد. در پژوهشی دیگر از دوربین فراطیفی جهت تشخیص خوشه‌های هفت واریته مختلف گندم آلوده به بیماری FHB استفاده شد (Alisaac *et al.*, 2018). تصویربرداری در ناحیه مرئی و فروسرخ (۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) انجام شد و نتایج نشان داد که همبستگی بالایی بین شدت بیماری و چهار ناحیه از طول‌موج‌ها (۴۳۰ تا ۵۲۵ نانومتر، ۵۶۰ تا ۷۱۰ نانومتر، ۷۴۰ تا ۸۱۰ نانومتر و ۱۱۱۵ تا ۲۵۰۰ نانومتر) وجود دارد.

به‌طور کلی دوربین‌های فراطیفی به علت رزولوشن طیفی بالا ابزار بسیار مناسبی برای بررسی بازتابش برگ‌های دچار تنش و مقایسه آن با برگ‌های سالم می‌باشند. به هر حال عواملی مانند قیمت بالا، همبستگی بالا میان طیف‌ها، پیچیدگی تحلیل و تفسیر داده‌ها و مشکلات مربوط به نوع تصویربرداری (Line scanning) این دوربین‌ها عواملی هستند که استفاده از این نوع سنسورها را محدود به انجام مطالعات پژوهشی کرده است. از طرفی دوربین‌های چندطیفی ممکن است قادر به تشخیص تنش گیاه نباشند به علت رزولوشن طیفی پایین و همچنین این نکته که آفت و بیماری‌های گوناگون به صورت‌های مختلفی بر نحوه بازتابش برگ‌ها اثر می‌گذارند. لذا یک دوربین چند طیفی که قادر به سنجش در طیف‌های خاص و از پیش تعریف شده است ممکن است قادر به تشخیص تنش‌های محدودی باشد.

تشخیص بیماری پسیل قبل از ظهور نشانه‌های بصری جهت اتخاذ تصمیمات در راستای مدیریت موضعی باغ بسیار مهم می‌باشد. از آنجا که امکان تشخیص بیماری پسیل حتی پس از ظهور علائم بیماری با کمک تصاویر رنگی گرفته شد توسط پرنده‌های بدون سرنشین وجود ندارد نیاز به سنسورهای فراطیفی و چندطیفی می‌باشد. هدف عمده این مطالعه استخراج باندهای طیفی مناسب برای تشخیص برگ سالم از برگ‌های دچار به آفت پسیل می‌باشد. برای این منظور در این مقاله یک روش جدید برای انتخاب ویژگی‌های طیفی حساس از میان داده‌های فراطیفی با قدرت تفکیک طیفی بالا ارائه می‌شود. انتخاب هوشمندانه باندهای حساس یک راه‌حل مناسب برای ساخت سنسورهای چندطیفی برای یک کاربرد خاص (در این مقاله تشخیص برگ‌های دچار به بیماری پسیل) می‌باشد. همچنین اطلاع از طول‌موج‌های حساس به بیماری می‌تواند به محققین در تحلیل تصاویر هوایی چندطیفی و فراطیفی اخذ شده به‌وسیله ماهواره و یا پرنده‌های بدون سرنشین کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی برگ‌ها

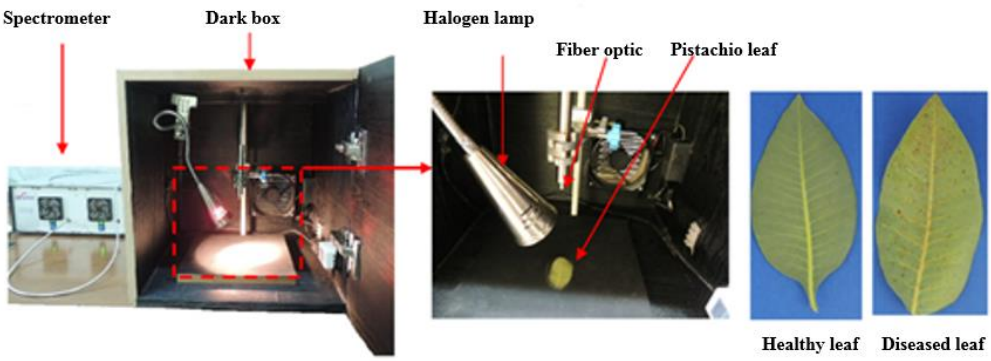
برگ‌ها از یک باغ پسته به مساحت ۲۵ هکتار واقع در روستای حسن آباد کیلومتر ۴۰ جاده مشهد-سرخس با طول جغرافیایی

1- Fusarium head blight

E″۱۲′۰۱°۶۰ و عرض جغرافیایی N″۳۰′۰۶°۳۶ برداشت شده است. انتخاب برگ‌های سالم و بیمار به‌صورت بصری و بر اساس علائم آفت پسیل (وجود لکه و عسلک روی برگ) صورت گرفت (شکل ۱). هر یک از برگ‌های سالم و بیمار پس از آن‌که از درخت جدا شدند در داخل پلاستیک قرار گرفتند. در طول زمان انتقال به آزمایشگاه تمام پلاستیک‌ها در داخل جعبه حاوی یخ نگهداری شدند و بلافاصله در همان روز به آزمایشگاه منتقل گشتند. در مجموع از ۳۲۰ برگ (شامل ۱۶۰ برگ سالم و ۱۶۰ برگ آفت زده) طیف‌نگاری انجام گرفت.

طیف‌سنجی ابرطیفی

طیف‌سنجی در همان روز برداشت برگ‌ها توسط اسپکترومتر آزمایشگاهی (AvaSpec-2048 Dual Thermo-Electric Cooled Fiber Optic) انجام شد. دامنه اسکن دستگاه بین ۴۰۰ نانومتر تا ۱۱۰۰ نانومتر بود و در مجموع ۶۴ باند با فاصله حدودا ۱۰ نانومتر برای هر برگ اسکن شد. برای انجام طیف‌نگاری به‌صورت یکسان در طول انجام آزمایش، طیف‌نگاری از قسمت میانی و اطراف رگبرگ اصلی برگ‌ها انجام شد. از یک تفلون سفید به‌عنوان مرجع جهت نرمالیزه کردن بازتابش برگ استفاده شد. هر ده دقیقه یکبار از تفلون سفید طیف‌نگاری شد زیرا میزان تابش منبع نوری مورد استفاده ممکن است در طول زمان تغییر کند. منبع نوری لامپ هالوژنی اسرام (۵۰ وات) بود که قادر به ساطع کردن نور در طول‌موج‌های مرئی و فروسرخ نور می‌باشد. نور بازتاب شده از سطح برگ‌ها با استفاده از فیبر نوری (standard reflection probe with SMA connector) به سنسور دستگاه اسپکترومتر هدایت شد. به‌منظور جلوگیری از تداخل بین نورهای محیطی و نور بازتاب شده، تمام آزمایش‌ها در فضای کاملاً تاریک انجام گرفت. برای این منظور اتاقک کوچکی با دیواره‌های تیره برای جلوگیری از بازتابش نور تهیه شد و طیف‌نگاری در داخل آن انجام گرفت. شکل ۱ نحوه طیف‌نگاری از برگ‌های سالم و بیمار را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طیف‌نگاری برگ‌های پسته با استفاده از اسپکترومتر و نمونه برگ‌های سالم و بیمار

Fig. 1. Scanning the healthy and diseased leaves of pistachio using a spectrometer

پیش‌پردازش داده‌ها

ابتدا میزان جریان تاریک (Dark current) اسپکرومتر اندازه‌گیری و سپس از طول‌موج‌های به‌دست آمده از برگ و تفلون کم شد. در گام بعدی، برای از بین بردن اثر تغییرات شدت نور ساطع شده از منبع نوری در طول آزمایش، طیف‌های خام برگ‌ها به طیف به‌دست آمده از تفلون سفید تقسیم شد. با انجام این پیش‌پردازش بازتابش نسبی برگ‌ها که بین صفر و یک می‌باشد به‌دست آمد (Moghimi *et al.*, 2020). همچنین داده‌ها نرمال‌سازی (با میانگین صفر و واریانس یک) شدند.

انتخاب باندهای حساس

از الگوریتم جنگل‌های تصادفی استفاده شد که ترکیبی از چندین درخت تصمیم‌گیری می‌باشد (Breiman, 2001). الگوریتم جنگل‌های تصادفی در این تحقیق دارای ۱۰۰۰ درخت بود. هر درخت با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها که به‌صورت تصادفی از میان داده‌های آموزش انتخاب شدند آموزش دیده شد. همچنین برای هر درخت مجموعه‌ای از ویژگی‌ها به‌صورت تصادفی از میان کل ویژگی‌ها انتخاب شد. تعداد ویژگی‌های انتخاب شده برای هر درخت در این تحقیق برابر با مقدار جذر تعداد کل ویژگی‌ها بود (Hastie *et al.*, 2009).

از معیار آنتروپی برای انتخاب ویژگی جهت آزمون در هر گره از درخت استفاده گردید. ویژگی که دارای بیشترین قدرت جداسازی نسبت به سایر ویژگی‌ها بود برای آن گره انتخاب شد تا داده‌ها به دسته‌های کوچک‌تر و خالص‌تر در هر گره تقسیم شوند. بر اساس این نکته که چه مقدار ویژگی انتخاب شده قادر به تفکیک داده‌ها می‌باشد اهمیت آن ویژگی برای آن درخت محاسبه و سپس این مقدار با مقادیر به‌دست آمده از دیگر درخت‌ها جمع و به تعداد کل درختان

تقسیم شد تا اهمیت آن ویژگی برای کل درخت‌ها میانگین گرفته شده باشد.

از نرم‌افزار Python و ابزار scikit-learn برای آموزش جنگل‌های تصادفی و انتخاب ویژگی استفاده شد.

خوشه‌بندی ویژگی‌های طیفی (طول‌موج‌ها)

پس از آن‌که ویژگی‌ها به‌ترتیب اهمیت توسط جنگل‌های تصادفی مرتب شدند در مرحله بعدی ویژگی‌های مهم در شش کلاس خوشه‌بندی شدند (Moghimi *et al.*, 2018). از آنجا که بیشتر دوربین‌های چندطیفی حداکثر دارای شش کانال می‌باشند از یک الگوریتم برای خوشه‌بندی ویژگی‌ها (که به‌ترتیب اهمیت مرتب شدند) در شش خوشه استفاده شد. این الگوریتم خوشه‌بندی ویژگی‌ها را به‌صورت ترتیبی از اولین ویژگی مهم شروع می‌کند. بدین صورت که ویژگی به خوشه‌ای تعلق می‌گیرد که اختلاف بین ویژگی و مرکز آن خوشه کمتر از ۵۰ نانومتر باشد. پس از هر بار خوشه‌بندی هر یک از ویژگی‌ها به یکی از خوشه‌ها، مرکز آن خوشه با میانگین‌گیری از ویژگی‌های آن خوشه به‌روز می‌شود و در تکرارهای بعدی از مراکز جدید خوشه‌ها برای اندازه‌گیری اختلاف بین ویژگی‌ها و مراکز خوشه‌ها استفاده می‌شود.

روند کار به این صورت است که اولین ویژگی در اولین خوشه قرار گرفته و مرکز خوشه به‌روز می‌شود. پس از پایان تکرار اول الگوریتم، فقط مرکز خوشه اول به روز می‌شود. سپس الگوریتم ویژگی بعدی را ارزیابی می‌کند. اگر این ویژگی در فاصله ۵۰ نانومتری مرکز خوشه اول باشد آن‌را در همان خوشه اول قرار داده در غیر این‌صورت به خوشه دوم منتقل می‌شود و مراکز خوشه‌ها با میانگین‌گیری از ویژگی‌های قرار گرفته در آن خوشه به‌روز می‌گردد. روند کار وقتی پایان می‌یابد که الگوریتم نتواند ویژگی بعدی را در یکی از شش خوشه قرار دهد زیرا اختلاف بین این ویژگی و هر یک از مراکز خوشه‌ها بیشتر از ۵۰ نانومتر است.

میانگین‌گیری از باندها و کاهش بعد و تبدیل به چندطیفی

پس از خوشه‌بندی طول‌موج‌ها در شش خوشه، از مراکز خوشه‌ها برای تبدیل داده‌های فراطیفی به چندطیفی استفاده شد به این صورت که از بازتابش‌های به‌دست آمده در فاصله ۱۵± نانومتری این مراکز میانگین‌گیری انجام گرفت و بازتابش در دیگر طیف‌ها حذف شدند. انتخاب بازه ۱۵± نانومتری جهت میانگین‌گیری بدان علت بود که برای ساخت دوربین‌های چندطیفی بتوان از فیلترهایی با دامنه عبور ۳۰ نانومتر استفاده نمود.

طبقه‌بندی برگ‌های بیمار و سالم

پس از تبدیل داده‌های فراطیفی و چندطیفی از مدل ماشین بردار پشتیبان[1] برای طبقه‌بندی برگ‌های بیمار از سالم استفاده گردید. در این تحقیق از روش اعتبارسنجی متقابل (Cross-validation) برای ارزیابی میزان قابلیت تعمیم مدل و همچنین میزان مستقل بودن نتایج از داده‌های آموزش استفاده شد. برای این منظور، ابتدا داده‌ها به‌صورت تصادفی به پنج زیرمجموعه (5-fold CV) تقسیم‌بندی شدند. فرآیند مدل‌سازی پنج بار تکرار و در هر تکرار یک مجموعه جدید برای ارزیابی و چهار مجموعه دیگر برای آموزش مدل استفاده گشت. در پایان میانگین نتایج به‌عنوان دقت مدل گزارش شده است. با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل، هر یک از نمونه‌ها یک بار برای ارزیابی مدل استفاده می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از طبقه‌بندی به کمک مدل آموزش دیده شده و با استفاده از داده‌های چندطیفی بیانگر میزان دقت طول‌موج‌های انتخاب شده برای جداسازی برگ‌های سالم و بیمار می‌باشد. از امتیاز F1 (F1-score) برای مقایسه دقت طبقه‌بندی استفاده شد (رابطه ۱).

$$F1 = \frac{2rp}{r+p} \qquad (۱)$$

امتیاز F1 یک میانگین هارمونیک بین دقت (p) و یادآوری (r) می‌باشد. پارامتر دقت نسبت بین برگ‌های سالم صحیح طبقه‌بندی شده به کل برگ‌هایی که به‌عنوان برگ سالم توسط مدل طبقه‌بندی شده‌اند می‌باشد و پارامتر یادآوری نسبت بین برگ‌های سالم صحیح طبقه‌بندی شده توسط مدل به کل برگ‌های سالم است.

نتایج و بحث

همبستگی بین طول‌موج‌ها

شکل ۲ میزان همبستگی بین طول‌موج‌های مختلف در این مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بین طول‌موج‌های فروسرخ (بیشتر از ۷۶۰ نانومتر) میزان همبستگی بالای ۹۵ درصد است. این مسئله دلالت بر افزونگی و اضافه بودن برخی از طول‌موج‌ها دارد. لذا این طول‌موج‌های اضافه باید حذف گردند. مثلاً اخذ یک طول‌موج در ناحیه قرمز باید کافی باشد زیرا طول‌موج‌های دیگر در این ناحیه اطلاعات جدیدی فراهم نمی‌کنند. بنابراین این طول‌موج‌ها فقط باعث افزایش ابعاد داده‌ها شده بدون افزودن هیچ اطلاعات جدید دیگری. شکل ۲ بر اهمیت انتخاب ویژگی تاکید می‌کند.

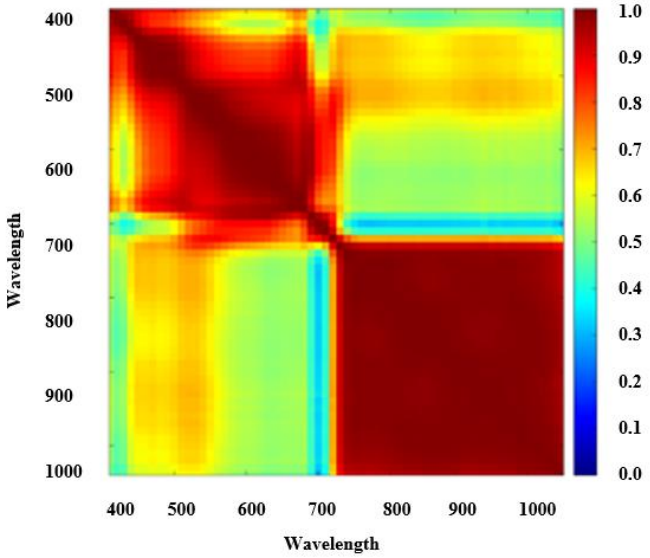
بازتابش برگ‌های سالم و بیمار

از بازتابش برگ‌های هر گروه (سالم و بیمار) میانگین‌گیری شد (شکل ۳). میزان میانگین بازتابش برگ‌های بیمار در ناحیه قرمز (۶۵۰ نانومتر) بیشتر از میانگین بازتابش برگ‌های سالم بود. بازتابش بیشتر برگ‌های بیمار در ناحیه قرمز نشان‌دهنده میزان کلروفیل کمتر در

1- Support Vector Machine (SVM)

برگ‌های بیمار می‌باشد زیرا در یک برگ سالم طول‌موج‌های قرمز (حدود ۶۵۰ نانومتر) و آبی (حدود ۴۵۰ نانومتر) توسط کروفیل برای انجام فتوسنتز جذب می‌شود (Al-Saddik *et al.*, 2018).

همچنین میانگین بازتابش برگ‌های بیمار در ناحیه فروسرخ به نسبت برگ‌های سالم کمتر شده است. بازتابش در ناحیه فروسرخ به ساختار سلولی گیاه ارتباط دارد و برگ‌های سالم بیشتر میزان نور تابیده شده در این ناحیه را بازتابش می‌کنند. بنابراین میزان بازتابش کمتر برگ‌های بیمار در مقایسه با برگ‌های سالم در این ناحیه گویای این مسئله می‌باشد که بیماری پسیل به ساختار سلولی برگ‌ها آسیب وارد کرده است که در نتیجه برگ تمایل به جذب بیشتری در این ناحیه دارد.



شکل ۲- میزان همبستگی بین طول‌موج‌ها در این مطالعه. همبستگی بالای ۹۵ درصد بین طول‌موج‌های فروسرخ وجود دارد.

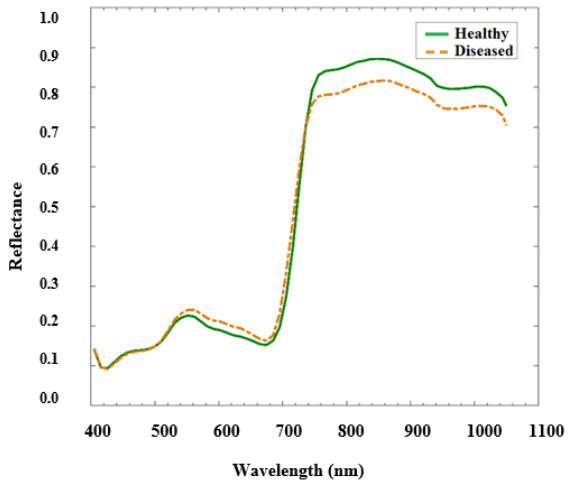
Fig. 2. Pairwise correlation between the spectral bands. The near infrared bands were highly correlated (>95%).

به‌علاوه طیف بازتابش‌یافته از روی برگ‌های بیمار در ناحیه لبه قرمز[1] امواج الکترومغناطیس که بین ناحیه قرمز (جذب بالا) و فروسرخ (بازتابش بالا) قرار دارد به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر تمایل پیدا کرده است. این پدیده برای بیماری‌های دیگر و گیاهان دیگر نیز گزارش شده است (Mutanga and Skidmore, 2007; Sankaran *et al.*, 2011).

ترتیب طول‌موج‌ها بر اساس اهمیت

برای انتخاب ویژگی‌ها بر اساس اهمیت از الگوریتم جنگل‌های تصادفی استفاده شد. شکل ۴ میزان وزن هر یک از طول‌موج‌ها را نشان می‌دهد به‌طوری‌که این وزن‌ها نشان‌دهنده میزان اهمیت هریک از طول‌موج‌ها می‌باشد و مجموع وزن‌ها برابر با یک می‌باشد.

طول‌موج‌های ناحیه لبه قرمز بین ۶۹۵ تا ۷۱۵ نانومتر (به‌ترتیب ۷۱۵، ۷۰۵، ۷۲۵، و ۶۹۵ نانومتر) بیشترین اهمیت را داشتند. پس از ناحیه لبه قرمز، طول‌موج‌های فروسرخ حدوداً بین ۷۶۵ تا ۸۲۵ نانومتر دارای وزن و اهمیت بیشتری بودند. منحنی میزان اهمیت ویژگی‌ها دارای دو ماکزیمم محلی دیگر در ناحیه‌های بین ۶۳۵-۶۰۰ نانومتر و ۴۹۰-۴۶۰ نانومتر بود.



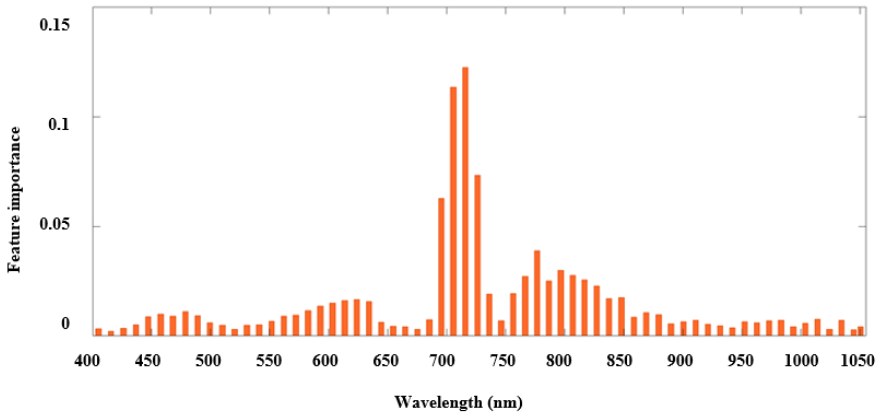
شکل ۳- میانگین بازتابش برگ‌های سالم و بیمار

Fig. 3. The average of spectral reflectance for the healthy and diseased leaves

نتایج خوشه‌بندی ویژگی‌ها

1- Red Edge

جدول ۱ نتایج خوشه‌بندی طول‌موج‌های دارای بیشترین وزن در شش خوشه و همچنین میانگین طول‌موج‌های هر خوشه را نشان می‌دهد.



شکل ٤– میزان اهمیت محاسبه شده هر یک از طول‌موج‌ها (ویژگی‌ها) توسط جنگل‌های تصادفی

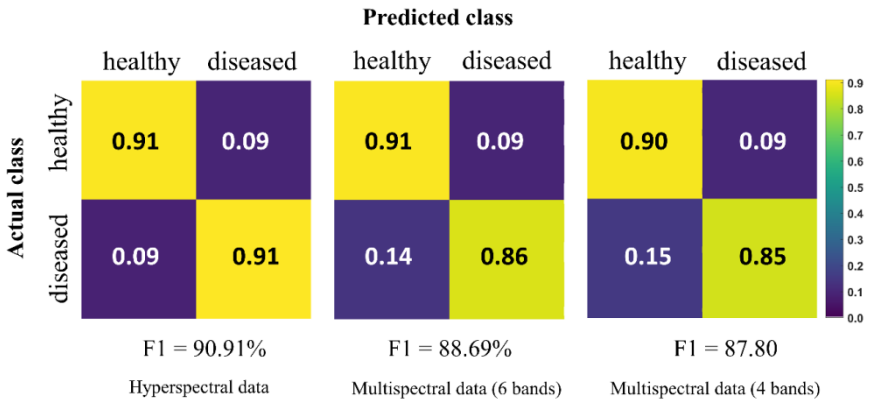
Fig. 4. Feature importance of the spectral bands calculated by random forests

جدول ۱– خوشه‌بندی طول‌موج‌های دارای بیشترین وزن در شش خوشه (طول‌موج‌ها برحسب نانومتر می‌باشند)

Table 1- Clustering of the spectral bands with the largest weights in six clusters (wavelengths are presented in nanometer)

	Cluster center	Members of each cluster							
Cluster 1	710	715^{1}	705^{2}	725^{3}	695^{4}	735^{13}	685^{33}		
Cluster 2	791	776^{5}	796^{6}	806^{7}	766^{8}	816^{9}	786^{10}	826^{11}	756^{12}
Cluster 3	858	847^{14}	837^{15}	868^{23}	879^{25}	858^{31}			
Cluster 4	598	623^{16}	613^{17}	634^{18}	603^{19}	592^{20}	582^{21}	572^{26}	561^{28}
Cluster 5	468	478^{22}	457^{24}	489^{27}	468^{29}	447^{30}			
Cluster 6	1023	1013^{32}	1034^{34}						

* Superscripts denote the rank of the features, ** Wavelengths are shown without decimal digits



شکل ٥– ماتریس آشفتگی به‌دست آمده برای طبقه‌بندی داده‌های فراطیفی و چندطیفی به کمک مدل ماشین بردار پشتیبان

Fig. 5. Confusion matrix obtained by support vector machine for classification of hyperspectral and multispectral data

با توجه با نمودار اهمیت طول‌موج‌ها و این نکته که میزان همبستگی بالایی بین طول‌موج‌های فروسرخ وجود داشت (شکل ۲) از میان مراکز خوشه‌ها، که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند، فقط چهار طول‌موج ۷۱۰، ۷۹۱، ۵۹۸ و ۴۶۸ نانومتر انتخاب شدند.

نتایج طبقه‌بندی

پس از انتخاب مرکز باندهای چندطیفی، ماتریس داده‌ها از فراطیفی به چندطیفی تبدیل شد. شکل ۵ ماتریس آشفتگی برای طبقه‌بندی کلاس بیمار و سالم را نشان می‌دهد که توسط مدل ماشین بردار پشتیبان به‌دست آمده است.

همانطور که از شکل ۵ مشخص است تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین امتیاز F1 طبقه‌بندی داده‌های فراطیفی و چندطیفی (۴ باند و ۶ باند) وجود ندارد. این مسئله دقت روش انتخاب ویژگی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همچنین عدم تفاوت معنی‌دار بین دقت طبقه‌بندی با استفاده از تمام باندها و ۴ باند دلالت بر وجود همبستگی بالا بین باندهای فراطیفی و همچنین افزونگی در باندهای فراطیفی دارد.

نتیجه‌گیری

میزان اهمیت باندهای طیفی در ناحیه مرئی و فرو سرخ نزدیک (بین ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر) جهت شناسایی برگ‌های درخت پسته که آلوده به بیماری پسیل هستند به‌دست آمد. بر اساس میزان اهمیت ویژگی‌های طیفی و با استفاده از یک الگوریتم خوشه‌بندی ۶ طول‌موج به‌عنوان بهترین طول‌موج‌ها برای طبقه‌بندی برگ‌های سالم و بیمار پسته به‌دست آمد. سپس با میانگین‌گیری از طول‌موج‌هایی که در فاصله ۱۵ نانومتری این ۶ مرکز بود داده‌های فراطیفی (۶۴ باند) به چندطیفی (۶ باند) تبدیل شد. از آنجا که میزان همبستگی بین طول‌موج‌ها در ناحیه فروسرخ نزدیک بسیار بالا (بیش از ۹۵ درصد) بود از ۳ طول‌موج انتخاب شده در ناحیه فروسرخ نزدیک (۷۱۰، ۷۹۱، و ۱۰۲۳) فقط طول‌موج ۷۱۰ نانومتر که نزدیک‌تر به ناحیه مرئی بوده انتخاب شد. نتایج طبقه‌بندی برگ‌های آلوده و بیمار به استفاده از داده‌های فراطیفی و چندطیفی نشان داد که میزان دقت طبقه‌بندی در حدود ۲ درصد کاهش می‌یابد و اگر تنها از ۴ باند استفاده شود میزان دقت در حدود ۳ درصد کاهش می‌یابد.

نتایج این تحقیق برای انتخاب طول‌موج‌های مناسب می‌تواند در توسعه دو حوزه سخت‌افزاری (ساخت دوربین‌های چندطیفی) و نرم‌افزاری (کاهش ابعاد و تحلیل داده‌های فراطیفی) جهت تشخیص به هنگام بیماری پسیل و اتخاذ تصمیمات مدیریتی بسیار مفید و کاربردی باشد. به‌عنوان مثال با تجهیز پرنده‌های بدون سرنشین به دوربین‌های فراطیفی یا چندطیفی و استفاده از یافته‌های این تحقیق می‌توان نقشه دقیقی از توسعه و پراکندگی میزان آلودگی پسیل در باغ‌های استفاده کرد. با در اختیار داشتن نقشه آلودگی و با استفاده از تکنولوژی‌های نرخ متغیر (VRT) می‌توان از مزایای سم‌پاشی دقیق استفاده نمود. نتایج این تحقیق همچنین می‌تواند به پژوهشگران در انتخاب و توسعه شاخص‌های طیفی گیاهی جهت تحلیل تصاویر ماهواره‌ای فراطیفی و چندطیفی کمک نماید.

References

1. Al-Saddik, H., J. C. Simon, and F. Cointault. 2018. Assessment of the Optimal Spectral Bands for Designing a Sensor for Vineyard Disease Detection: The Case of Flavescence Dorée. Precision Agriculture (0123456789). doi.org/10.1007/s11119-018-9594-1.
2. Alisaac, E., J. Behmann, M. T. Kuska, H.W. Dehne, and A. K. Mahlein. 2018. Hyperspectral Quantification of Wheat Resistance to Fusarium Head Blight: Comparison of Two Fusarium Species. European Journal of Plant Pathology. doi.org/10.1007/s10658-018-1505-9.
3. Breiman, L. 2001. Random Forests. Machine Learning 45 (1): 5-32.
4. Hastie, T., R. Tibshirani, and J. Friedman. 2009. Springer Series in Statistics The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. New York: Springer-Verlag New York. springerlink.com/index/10.1007/b94608.
5. Kheiralipour, K., H. Ahmadi, A. Rajabipour, Sh. Rafiee, M. Javan-Nikkhah, D. S. Jayas, and K. Siliveru. 2016. Detection of Fungal Infection in Pistachio Kernel by Long-Wave near-Infrared Hyperspectral Imaging Technique. Quality Assurance and Safety of Crops and Foods 8 (1): 129-35. doi.org/10.3920/QAS2015.0606.
6. Mahlein, A., E. Christian Oerke, U. Steiner, and H. Wilhelm Dehne. 2012. Recent Advances in Sensing Plant Diseases for Precision Crop Protection. European Journal of Plant Pathology 133 (1): 197-209.
7. Moghimi, A., C. Yang, M. E. Miller, F. Shahryar Kianian, and P. M. Marchetto. 2018. A Novel Approach to Assess Salt Stress Tolerance in Wheat Using Hyperspectral Imaging. Frontiers in Plant Science. doi.org/10.3389/fpls.2018.01182.
8. Moghimi, A., M. H. Aghkhani, A. Sazgarnia, and M. H. Abbaspour-Fard. 2011. Improvement of NIR Transmission Mode for Internal Quality Assessment of Fruit Using Different Orientations. Journal of Food Process Engineering 34 (5): 1759-74.
9. Moghimi, A., C. Yang, and J. A. Anderson. 2020. Aerial Hyperspectral Imagery and Deep Neural Networks for High-Throughput Yield Phenotyping in Wheat. Computers and Electronics in Agriculture 172: 105299. arxiv.org/abs/1906.09666.
10. Moghimi, A., C. Yang, J. A. Anderson, and S. K. Reynolds. 2019. Selecting Informative Spectral Bands Using Machine Learning Techniques to Detect Fusarium Head Blight in Wheat. In ASABE Annual International

Meeting, Boston, MA. doi.org/10.13031/aim.201900815. (August 13, 2019).
11. Moghimi, A., C. Yang, and P. M. Marchetto. 2018. Ensemble Feature Selection for Plant Phenotyping: A Journey from Hyperspectral to Multispectral Imaging. IEEE Access 6: 56870-84.
12. Mohammadigol, R., M. H. Khoshtaghaza, R. Malekfar, M. Mirabolfathi, and A. M. Nikbakht. 2013. Detection of Pistachio Aflatoxin Using Raman Spectroscopy and Artificial Neural Networks. Journal of Agricultural Machinery 5 (1): 1-9. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v5i1.28122.
13. Mutanga, O., and A. K. Skidmore. 2007. Red Edge Shift and Biochemical Content in Grass Canopies. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 62 (1): 34-42.
14. Nagasubramanian, K., S. Jones, S. Sarkar, A. K. Singh, A. Singh, and G. Baskar. 2018.Hyperspectral Band Selection Using Genetic Algorithm and Support Vector Machines for Early Identification of Charcoal Rot Disease in Soybean Stems. Plant Methods 14 (1): 1-13. doi.org/10.1186/s13007-018-0349-9.
15. Sankaran, S., A. Mishra, J. M. Maja, and R. Ehsani. 2011. Visible-near Infrared Spectroscopy for Detection of Huanglongbing in Citrus Orchards. Computers and Electronics in Agriculture 77 (2): 127-34. doi.org/10.1016/j.compag.2011.03.004.
16. Susic, N., U. Zibrat, S. Sirca, P. Strajnar, J. Razinger, M. Knapic, and B. Stare. 2018. Discrimination between Abiotic and Biotic Drought Stress in Tomatoes Using Hyperspectral Imaging. Sensors and Actuators, B: Chemical 273(June): 842-52.
17. Stefan, T., J. Behmann, A. Steier, T. Kraska, O. Muller, U. Rascher, and A. K. Mahlein. 2018.Quantitative Assessment of Disease Severity and Rating of Barley Cultivars Based on Hyperspectral Imaging in a Non-Invasive, Automated Phenotyping Platform. Plant Methods 14 (1): 45. doi.org/10.1186/s13007-018-0313-8.
18. Wahabzade, M., A. K. Mahlein, C. Bauckhage, U. Steiner, E. C. Oerke, and K. Kersting. 2016.Plant Phenotyping Using Probabilistic Topic Models: Uncovering the Hyperspectral Language of Plants. Scientific Reports 6(February): 22482. http://www.nature.com/articles/srep22482.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 169-179

Development and Optimization a Threshing Unit for Sunflower Grain with Response Surface Methodology (RSM)

E. Chavoshgholi[1*], Sh. Abdollahpour[2], H. Ghasemzadeh[3]

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
3- Professor in Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: Es.chavoshgoli@gmail.com)

Received: 21-09-2019
Revised: 26-10-2019
Accepted: 17-12-2019

How to cite this article:
Chavoshgholi, E., Sh. Abdollahpour, and H. Ghasemzadeh. 2022. Development and Optimization a Threshing Unit for Sunflower Grain with Response Surface Methodology (RSM). Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 169-179. (In Persian).
DOI: 10.22067/jam.v12i2.83123.

Introduction

The nut sunflower is usually cultivated in small farms and is harvested with a low capacity of harvester at high moisture content. For the rigid threshing components, impact and knead force are so large as it leads to crushing of the grain or inner stress. This reduces marketability and the germination rate of seeds. The mechanical damage degree of sunflower grain is influenced by the material of the threshing beaters, the velocity of impact, moisture contents, etc. Traditional manual methods, that separate grain from the sunflower head, take a lot of time, require large manpower, have high grain damage, and low efficiency. The objective of the present work was to develop and optimize a threshing unit for nutty sunflower that would combine safe impact velocities with appropriate adjusting of its variable to maximize threshing efficiency whilst minimizing grain damage resulting from shearing, cracking, or crushing.

Materials and Methods

The nutty Sunflower heads were procured from the Experimental Orchard of University of Tabriz, Iran at the moisture content of harvesting. Axial threshing units using kinematic equation and properties of the grain, designed and constructed that the variables of its components are adjustable. The beater of the thresher is flexible, which the deformation and vibration undergoing the overall rotation and impact process becomes larger with increasing speed and prevents grain damage. The power required for threshing and separation grain from heads was calculated at about 4.5 kW. Diameter and rotational drum speed value estimated using relation ($V=\frac{D}{2}n$) and study of other researches as considering critical impact velocity of sunflower grain. The length of the thresher was 1.2 m that estimated by determining the capacity and the number of beaters. Threshing efficiency (%), separation efficiency (%), and grain damage (%) were parameters of performance for study. The experimental design by the Response Surface Methodology in Design Expert software 11 with central composite experiment design developed and the affecting parameters on accuracy analyzed and optimized. The threshing unit was evaluated against three threshing drum speeds of 380, 280, and 180 (rpm), feed rates 4000, 3000, and 2000 (kg (head) h^{-1}), moisture content of 60%, 45%, and 30 (%w.b).

Results and Discussion

The results showed that the models and effect of variables were statistically significant at the 95% confidence level. The moisture content on threshing efficiency and grain damage had the greatest effect followed by drum speed and feed rate. While for separation efficiency, the feed rate had the most influence. With reducing feed rate and moisture content the threshing efficiency increased, although the decrease in drum speed reduced it. This might be due to sunflower grains adhering loosely to the head at the low moisture contents. The maximum (99.81) and minimum (96.12) percentage of threshed heads was at the moisture content of 30 and 60, respectively. The separation efficiency increased with reducing of feed rate and moisture content. Though, drum speed had insignificant efficacy statistically. The sunflower heads with high moisture content are fragile and brittle, also at high feed rates, the number of impact forces and collisions of heads rises in the condition of threshing. Therefore, the extra MOG is produced and passed from the separator grille. The feed rate of 2000 kg h^{-1} and moisture content of 30% was the maximum point of separation efficiency that obtained 69.82%. The grain damage decreased significantly with reducing drum speed (380 to 180) and moisture content (60 to 30). This result may be due to the reasons that at higher moisture content the husk of grains becomes soft. The goal of optimization is maximizing threshing and separation efficiency and minimizing grain damage that the optimized values of variables were determined 292.134 rpm for drum speed, 2000 kg h^{-1} for feed rate, and 30.7406% (w.b) for moisture content.

Conclusion

A threshing unit of sunflower, using properties of grains and kinematic equation, was designed and constructed. The models and effect of the variable were statistically significant on performances. The moisture content had a greater effect than other factors on threshing efficiency (%) and grain damage (%). Also, the feed rate of crops in thresher had the most influence on separation efficiency (%). With decreasing the moisture content, threshing and separation efficiency increased and grain damage reduced. The threshing efficiency (%), separation efficiency (%), and grain damage (%) were reported in the range of 96.12 to 99.81, 57.34 to 68.55, and 0.49 to 1.25, respectively. The optimized points were determined at the drum speed of 292.134 m s^{-1}, feed rate of 2000 kg h^{-1}, and moisture content of 30.7406% (w.b).

Keywords: Critical velocity, Nutty sunflower, Optimization, Performance, RSM, Threshing

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۷۹-۱۶۹

بهینه‌سازی واحد کوبنده برای دانه‌های آفتاب‌گردان آجیلی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

اسماعیل چاوشقلی[۱*]، شمس‌اله عبداله پور[۲]، حمیدرضا قاسم زاده[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

چکیده

آفتاب‌گردان آجیلی معمولاً بدون کمباین برداشت در رطوبت بالا برداشت می‌شود لذا در تحقیق حاضر یک واحد کوبنده با ترکیب متغیرهای مناسب برای جداسازی دانه آفتاب‌گردان و طبق‌ها با ظرفیت بالا و آسیب‌دیدگی پایین دانه، طراحی و ساخته شد. کوبنده برای شرایط گوناگون قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی دارد که برای توسعه ماشین برداشت با ظرفیت بالا اهمیت فراوانی دارد. آزمایش‌های ارزیابی و بهینه‌یابی با استفاده از روش سطح پاسخ طراحی شد. تأثیرات سرعت‌دورانی کوبنده ۳۸۰، ۲۸۰ و ۱۸۰ (دور در دقیقه)، نرخ تغذیه ۴۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ (کیلوگرم در ساعت) و رطوبت (رطوبت برداشت) ۶۰٪، ۴۵٪ و ۳۰٪ (بر پایه تر) روی عملکرد کوبنده مورد بررسی قرار گرفت. بازده کوبش (٪)، بازده جداسازی (٪) و آسیب‌دیدگی دانه (٪) به‌ترتیب در محدوده ۹۶/۱۲ تا ۹۹/۸۹، ۵۶/۷۱ تا ۶۹/۸۲ و ۰/۴۹ تا ۱/۲۵ به‌دست آمد. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که مدل‌های ایجاد شده از لحاظ آماری و اثر محتوی رطوبت روی بازده کوبش و آسیب‌دیدگی دانه و اثر نرخ تغذیه روی بازده جداسازی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بودند. منحنی‌های سطح پاسخ مشخص کردند که با کاهش محتوی رطوبت، بازده کوبش و جداسازی افزایش و آسیب‌دیدگی دانه‌ها کاهش پیدا کرد. هدف از بهینه‌یابی رسیدن به حداکثر بازده کوبش و جداسازی و حداقل کردن آسیب‌دیدگی دانه‌ها است که مقادیر بهینه شده متغیرها در نرم‌افزار Design Expert برای سرعت دورانی ۲۹۲/۱۳۴ دور در دقیقه، نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و محتوی رطوبت ۳۰/۷۴٪ (بر پایه تر) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آفتاب‌گردان آجیلی، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ، سرعت ضربه‌ای بحرانی، عملکرد، واحد کوبنده

مقدمه

آفتاب‌گردان (*Helianthus annuus* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات روغنی جهان است. هم‌چنین به دلیل مصرف تازه و آجیلی در بعضی از کشورها مانند ایران، ترکیه و بسیاری از کشورهای عربی بسیار محبوب است (Chavoshgoli *et al*., 2015). آفتاب‌گردان آجیلی معمولاً در مزارع با وسعت کوچک کشت و در رطوبت بالای محصول بدون ماشین برداشت‌کننده با ظرفیت بالا عمل جداسازی دانه‌ها از طبق‌ها و مواد غیردانه انجام می‌شود (Azharuddin *et al*., 2016). کوبش محصولات دانه‌ای یکی از اصلی‌ترین موضوع‌ها است که در تعیین عملکرد کمباین‌های برداشت‌کننده نقش اساسی ایفا می‌کند (Sudajan *et al*., 2002). در بسیاری از کوبنده‌های ثابت و روش‌های جداسازی موجود نیروهای ضربه‌ای بالا بوده که منجر به آسیب‌دیدگی و تنش‌های داخلی دانه‌ها شده که این موضوع باعث کاهش ارزش درجه‌بندی دانه و در نتیجه کاهش بازارپسندی و جوانه‌زنی دانه‌ها می‌شود؛ درجه آسیب‌دیدگی مکانیکی دانه آفتاب‌گردان تحت تاثیر اجزای کوبنده، سرعت ضربه‌ای، نوع و شکل نیروی ضربه‌ای وارده، شرایط محصول هم‌چون رطوبت و غیره بوده است. شکست دانه در کوبنده‌ها بیش‌تر بستگی به سرعت‌های ضربه‌ای وارده به دانه و میزان سفتی ضربه‌زن‌ها دارد (Xu *et al*., 2013; Zhenjie, 2017). در روش‌های سنتی و دستی یا ماشین‌های کم ظرفیت که برای جداسازی دانه‌های آجیلی آفتاب‌گردان از طبق آن استفاده می‌شود که زمان و نیروی انسانی بیش‌تری را می‌طلبد و یا

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گرایش طراحی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، ایران
۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Es.chavoshgoli@gmail.com)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.83123

آسیب دانه‌ای زیادی دارد (Mirzabe *et al.*, 2016). محققان بسیاری تئوری عملکردی کوبنده‌های غلات را بررسی کرده‌اند و نشان دادند که بازده کوبش و جداسازی و آسیب‌دیدگی دانه به متغیرهای ماشین و خواص محصول بستگی دارد. برای مثال مونا و همکاران (Muna *et al.*, 2016) مدلی برای بازده کوبنده براساس پارامترهای ماشین از قبیل سرعت خطی استوانه کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، طول کوبنده، تعداد ضربه‌زن‌ها و پارامترهای محصول از قبیل محتوی رطوبت بیان کردند. سادجان و همکاران (Sudajan *et al.*, 2002) توان مورد نیاز و فاکتورهای عملکردی یک کوبنده آفتاب‌گردان را مورد بررسی قرار دادند. لطفی (Lotfi, 2009) یک وسیله جداساز محلی را برای جداسازی دانه آفتاب‌گردان با استفاده از نیروی رانش و خارج از مرکز توسعه داد. داسیا و همکاران (Thasaiya *et al.*, 2014) بیان کردند که نیروی لازم برای گسیختگی دانه‌ها، به خواص محصول بستگی دارد که برای طراحی تجهیزات کوبنده مورد نیاز است. میرزاب و همکاران (Mirzabe *et al.*, 2016) بسیاری از خواص فیزیکی طبق و دانه آفتاب‌گردان آجیلی را تعیین و دستگاه جداساز دانه بر اساس جت هوای فشرده را ساخت و ارزیابی کردند. آژارودین و همکاران (Azharuddin *et al.*, 2016) کوبنده ثابت برای جداسازی و تمیزکردن دانه آفتاب‌گردان را طراحی کرده، ساخته و ارزیابی کردند. جهانی (Jahani, 2014)، قیاسی و همکاران (Ghiasi *et al.*, 2016) مکانیزم جداکننده دانه از طبق آفتاب‌گردان را طراحی، ساخت و ارزیابی کردند. با توجه به مشکلات موجود در انجام آزمایش‌ها، بسیاری از محققان از روش سطح پاسخ برای ارزیابی و بهینه‌سازی کوبنده‌های محصولات کشاورزی استفاده کردند (Singh and Vinay, 2014; Salari *et al.*, 2013). بررسی مطالعات انجام شده نشان داد که بازده و کارایی روش‌های موجود برای کوبش این محصول پایین است. هم‌چنین دانه‌های آجیلی با توجه به نوع مصرف در بازار، باید بدون آسیب‌دیدگی از طبق در رطوبت بالا جداسازی شوند.

هدف از تحقیق حاضر طراحی و ساخت و بهینه‌سازی یک واحد کوبنده برای دانه‌های آفتاب‌گردان آجیلی است که بتوان با ترکیب سرعت ضربه‌ای مناسب و تنظیم سایر متغیرهای آن به بازده کوبش بالا و کم‌ترین درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ای دست یافت.

مواد و روش‌ها

تئوری طراحی کوبش

برای دست‌یابی به متغیرهای طراحی یک ماشین در زمینه جداسازی مواد دانه‌ای و غیردانه‌ای، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها مطالعه سینماتیکی و دینامیکی روی محصول کشاورزی و اجزای دستگاه مانند کوبنده، جداکننده و تمیزکننده است (Srivastava, 2006; Abdollahpour, 1998).

نیروی لازم برای کوبیدن محصولات دانه‌ای تابعی از سرعت خطی استوانه کوبنده، ضریب اصطکاک بین محصول و محصول و محصول و سطح ضدکوبنده است که در واقع مجموع نیروهای ضربه‌ای و نیروهای اصطکاکی کوبنده است (Popov *et al.*, 1986; Mohtasebi *et al.*, 2006).

$$F=[\frac{q\,(aV-V1)}{(1-f)}] \qquad (۱)$$

که در آن:

F: نیروی مورد نیاز برای کوبش محصول (نیوتن)، q: نرخ تغذیه به کوبنده (کیلوگرم در ثانیه)، V: سرعت خطی استوانه کوبنده (متر بر ثانیه)، V1: سرعت ورود محصول به کوبنده (متر بر ثانیه)، f: ضریب که بستگی به اصطکاک و نوع استوانه کوبنده دارد. a: عددی تجربی است که به طول کوبنده، رطوبت محصول، نرخ تغذیه و خواص فیزیکی دانه بستگی دارد.

P_1 توان مورد نیاز (وات) برای کوبش که از ضرب طرفین رابطه (۱) در سرعت خطی V حاصل می‌شود.

$$P_1=FV=[\frac{q\,(aV-V1)}{(1-f)}]V \qquad (۲)$$

از طرفی توانی هم برای غلبه بر مقاومت هوا در حین دوران استوانه کوبنده و نیروهای اصطکاکی در بلبرینگ‌ها مورد نیاز می‌باشد. که این توان (P_2) از رابطه (۳) به‌دست می‌آید (Popov *et al.*, 1986).

$$P_2=AV+BV^3 \qquad (۳)$$

ضرایب A و B به‌ترتیب بستگی به اصطکاک و نیروی هوا دارد و توسط محققان پیشین برای محصولات مختلف تعیین شده است.

در نهایت توان کل لازم P_{th}، از رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$P_{th}=P_1+P_2=[\frac{q\,(aV-V1)}{(1-f)}]\,V + AV + BV^3 \qquad (۴)$$

برای یک کوبنده با فرض این‌که با سرعت دورانی n (دور در دقیقه) هر ضربه‌زن جرم برابری از محصول (Q) بر حسب کیلوگرم دریافت می‌کند، تعداد ضربه‌زن‌ها (N_b) مطابق رابطه (۵) حاصل می‌شود (Abdollahpour, 1998).

$$Q=\frac{60q}{nN_b} \qquad (۵)$$

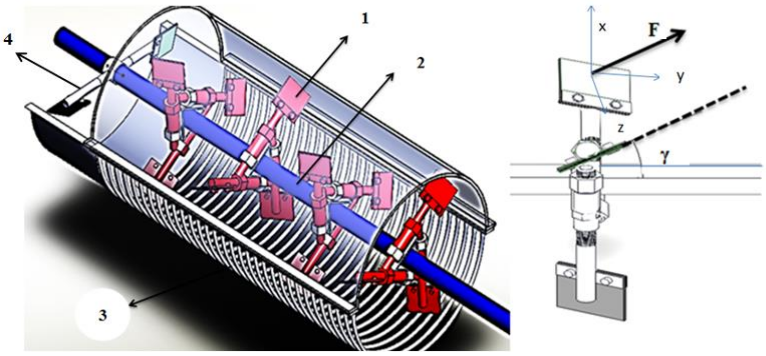
با تعیین انرژی لازم برای گسیختگی دانه در آزمایش شبه‌استاتیک E (ژول) و جرم دانه m (کیلوگرم) می‌توان سرعت بحرانی ضربه v (متر برثانیه) وارد به دانه را با استفاده از رابطه انرژی جنبشی ($E=\frac{1}{2}mv^2$) تخمین زد (Khazaei *et al.*, 2007).

شرح و ساخت واحد کوبنده

در این پژوهش یک واحد کوبنده برای دستگاه جداساز دانه آفتاب‌گردان آجیلی با بهره‌گیری از مطالعات پیشین و خواص مکانیکی و فیزیکی محصول در کارگاه ماشین‌های کشاورزی گروه مهندسی

بیوسیستم دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. برای این دستگاه اکثر متغیرهای اجزا (مانند سرعت دورانی، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، زاویه مسیر مارپیچ ضربه‌زن‌ها و غیره) قابل تغییر و تنظیم است و می‌توان برای هر نوع شرایطی از محصول آزمایش و به‌کار برد. تنظیم بودن متغیرهای واحد کوبش در تعیین عملکردی برداشت‌کننده‌ها و دست‌یابی به کم‌ترین مقدار درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند.

شکل ۱ نمایی از واحد کوبنده با اجزا را نشان می‌دهد. کوبنده این دستگاه طرح محوری دارد (محصول در راستای محور کوبنده جابه‌جا خواهد شد). محصول از قسمت انتقال وارد تغذیه‌کننده (۴) می‌شود که از دو بازو تشکیل شده است و توسط این قسمت محصول با شتاب وارد فضای بین کوبنده و ضدکوبنده (۳) می‌شود و پس از کوبیده شدن محصول، طبق‌های خالی از دانه از انتهای کوبنده خارج شده و مواد دانه‌ای به همراه یک سری مواد غیردانه‌ای از ضدکوبنده عبور کرده و وارد قسمت تمیزکننده می‌شوند. ترکیب ضربه و مالش طبق‌های آفتاب‌گردان مهم‌ترین دلیل جداسازی دانه‌ها است. جنس صفحات ضربه‌زن (۱) لاستیکی و انعطاف‌پذیر بوده و این عامل مهم در جلوگیری از آسیب‌دیدگی دانه‌ها و هم‌چنین ایجاد مالش جهت جداسازی بهتر دانه‌ها است. الگوی نصب ضربه‌زن‌ها و تغییر موقعیت زاویه‌ای صفحات لاستیکی (γ)، باعث می‌شود که محصول در اثر نیروهای ضربه‌ای در محیط و طول کوبنده حرکت کند و عمل جداسازی در حین تنظیم نرخ تغذیه انجام شود. بیش‌ترین توان مورد نیاز برای کوبیدن با استفاده از رابطه (۴) و قرار دادن V=۲۲، α=۱، تقریباً صفر=V1، q=۱/۴، f=۰/۷، A=۰/۹، B=۰/۰۴۵ و در نظرگرفتن ضریب طراحی برابر ۱/۵، در حدود ۴/۱۴ کیلووات محاسبه شد که با استفاده از PTO تراکتور تامین می‌شود. طبق مطالعات گذشته و مشاهدات عینی طول کوبنده ۱/۲ متر، ۱۲ عدد ضربه‌زن با ۳ مسیر مارپیچی و فاصله ۰/۴ متر بین مجموعه ضربه‌زن‌ها انتخاب شد (Abdollahpour, 1998). قطر استوانه کوبنده، D (متر) و بیش‌ترین اعمال سرعت دورانی آن، n (دور در دقیقه) با استفاده از رابطه سرعت محیطی ($V=\frac{D}{2}n$) و مطالعات محققان قبلی با در نظر داشتن سرعت ضربه‌ای بحرانی دانه حاصل شد (Khazaei, 2007). جایی که با در نظر گرفتن محدودیت‌های ابعادی دستگاه و با فرض حداکثری قطر ۶۰۰ میلی‌متر و سرعت دورانی ۶۵۰ دور در دقیقه، سرعت محیطی حدود ۲۰/۴۱ متر برثانیه به‌دست می‌آید و این عدد کوچکتر از ۲۱/۸۹ سرعت بحرانی شکست دانه آفتاب‌گردان است، که در تحقیق جعفری (Jafari, 2008) گزارش شده است. ضدکوبنده (جداساز) از مفتول‌های گرد فولادی به‌صورت شبکه جداساز که فاصله بین آن‌ها با استفاده از ابعاد دانه (Chavoshgoli *et al.*, 2015) در حدود ۰/۰۲ متر ساخته شد.



شکل ۱- شماتیک واحد کوبنده با نمای عمودی مجموعه ضربه‌زن: ۱- صفحه لاستیکی ضربه‌زن با موقعیت زاویه‌ای (γ) و نیروی ضربه‌ای F، ۲- شفت کوبنده، ۳- ضدکوبنده (جداساز) و ۴- تغذیه‌کننده

Fig. 1. Schematic representation of threshing unit with cross section of a set beater: 1- Flexible plates of beaters with adjustable angular position (γ), 2- Shaft thresher, 3- Separator (concave), F- Impact force

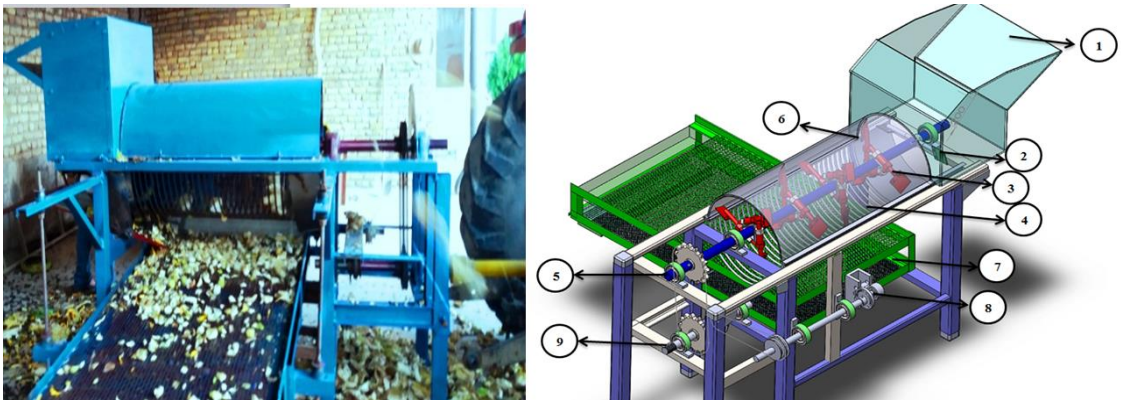
شکل ۲ دستگاه نوین ساخته‌شده را به‌همراه واحد کوبنده و سایر اجزا نشان می‌دهد.

طرح آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های عملکردی، طبق‌های دانه آفتاب‌گردان آجیلی با نام محلی قلمی از مزارع استان آذربایجان غربی تهیه شدند (شکل ۳).

پارامترهای عملکردی برای ارزیابی کوبنده شامل: بازده کوبش (٪) ، بازده جداسازی (٪) و آسیب‌دیدگی دانه‌ها (٪) طبق مطالعه سادجان و همکاران (۲۰۰۵) محاسبه شدند. با توجه به این‌که روش ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند با انجام یک‌سری آزمایش‌ها،

وقت‌گیر و اغلب بسیار پرهزینه است در این تحقیق طرح آزمایش‌ها و ارزیابی پارامترها با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) در نرم‌افزار Design Expert 11 با طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد.



شکل ۲- شماتیک دستگاه ساخته شده جداساز دانه آفتاب‌گردان آجیلی، واحد کوبنده: ۱- کانال ورودی، ۲- تغذیه‌کننده، ۳- ضربه‌زن، ۴- شبکه جداساز، ۵- شفت کوبنده، ۶- پوشش استوانه کوبنده، ۷- مجموعه الک‌ها، ۸- محور نوسان‌کننده و ۹- انتقال‌دهنده توان

Fig. 2. Schematic of the apparatus for separating sunflower grain: (1) Input channel, (2) Feeder, (3) Beaters, (4) Separator (concave), (5) Thresher shaft, (6) Covering of drum thresher, (7) set of screens, (8) Crank of oscillation (9) Power transmission

شکل ۳- نمونه طبق آفتاب‌گردان آجیلی

Fig.3. The sample of heads of nutty sunflower

استفاده از این روش برای انجام آزمایش‌ها طولانی و سخت، مناسب و موثر است (Hosseinzadeh Samani *et al.*, 2016 Sagar, 2018). پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شود. معمولاً مدل مورد استفاده در روش پاسخ سطح، معادله درجه دوم کامل یا فرم کاهیده آن است و به‌صورت رابطه (۶) ارائه می‌شود (Mehrijani *et al.*, 2019).

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^{3}\beta_i X_i+\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=i+1}^{3}\beta_{ij} X_i X_j+\sum_{i=1}^{3}\beta_{ij} X_i^2 \qquad (۶)$$

که در آن y پاسخ پیش‌بینی‌شده، X_i و X_j متغیرهای مستقل، β_0، β_i، β_{ii}، β_{ij} ضرایب ثابت رگرسیون هستند.

آزمایش‌های کوبنده ساخته شده برای بررسی اثر متغیرهای سرعت دورانی کوبنده با در نظر داشتن سرعت بحرانی شکست دانه و ضربه لازم برای جداسازی دانه از طبق آفتاب‌گردان بر اساس مشاهدات عینی هم‌چنین مطالعات محققان پیشین در سه سطح ۳۸۰، ۲۸۰ و ۱۸۰ دور در دقیقه، نرخ تغذیه محصول با توجه به سرعت دورانی، ابعاد و ظرفیت کوبنده در ۴۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و محتوی رطوبت (بر پایه تر) محصول در ۶۰٪ (رطوبت برداشت آفتاب‌گردان آجیلی)، ۴۵٪ و ۳۰٪ انجام شد. طرح آزمایش‌ها و اندازه آن‌ها در جدول ۱ به‌همراه کدهای آزمایش اعمال شده در نرم‌افزار (1، 0، 1-) آورده شده است.

شرایط عملیاتی بهینه‌سازی با استفاده از گزینه بهینه‌سازی عددی (Numerical optimization) نرم‌افزار با تعیین اهداف بهینه‌سازی، یعنی Maximize کردن برای بازده‌های کوبش و جداسازی (دست‌یابی به بازده بیشتر)، Minimize کردن برای آسیب‌دیدگی دانه‌ها (دست‌یابی به آسیب دانه کمتر) تشریح شد. در این‌جا برای همه متغیرها درجه وزنی (Weight) برابر یک و درجه اهمیت (Importance) برابر ۳ قرار داده شد.

نتایج و بحث

معنی‌داری اثر متغیرها طبق آزمون آماری F-value و P-value در جدول تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شد به‌طوری که مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای P-value معنی‌دار بودن نتایج تا سطح اطمینان ۹۵٪ را نشان می‌دهد. نتایج ANOVA در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر مدل‌های ایجاد شده برای همه پارامترهای عملکردی، اثر سرعت دورانی، محتوی رطوبت، توان دوم محتوی رطوبت روی بازده کوبش (٪)، اثر نرخ تغذیه، محتوی رطوبت روی بازده جداسازی (٪) و اثر سرعت دورانی، محتوی رطوبت روی آسیب‌دیدگی دانه (٪)، در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار شده است و اثر بقیه عامل‌ها معنی‌دار نبوده است. هرچه مقدار P-value کم‌تر و مقدار F-value بیش‌تر باشد نشان‌دهنده تاثیر بیش‌تر آن متغیر روی نتایج است (Safary and Chayjan, 2016). بررسی بالا بودن مقدار F-value در جدول ۲ نشان می‌دهد که تغییرات رطوبت بر بازده کوبش و آسیب‌دیدگی دانه و نیز تغییرات نرخ تغذیه بر بازده جداسازی بیش‌ترین تاثیر را در مقایسه با سایر متغیرها دارند. یعنی به‌طور مثال برای کاهش آسیب‌دیدگی دانه‌ها در حین کوبش، در اولویت اول کنترل تغییر محتوی رطوبت محصول مدنظر قرار می‌گیرد.

جدول ۱- طرح آزمایش‌های انجام شده به‌روش پاسخ سطح برای واحد کوبنده

Table 1- Experimental design proposed by RSM for threshing unit

آزمایش Run	سرعت دورانی Drum speed (rpm)	نرخ تغذیه Feed rate (kgh^{-1})	محتوی رطوبت Moisture (%w.b)	بازده کوبنده Threshing efficiency%	بازده جداسازی Separation efficiency%	آسیب‌دیدگی Grain damage%
1	280(0)	3000(0)	45(0)	99.77	61.89	0.89
2	280(0)	3000(0)	60(1)	96.12	65.96	1.1
3	280(0)	3000(0)	45(0)	99.44	61.88	0.68
4	380(1)	4000(1)	30(-1)	99.81	61.91	0.68
5	280(0)	3000(0)	30(-1)	99.57	63.33	0.58
6	180(-1)	2000(-1)	30(-1)	99.38	69.26	0.49
7	180(-1)	2000(-1)	60(1)	97.41	66.21	0.98
8	380(1)	3000(0)	45(0)	99.57	59.99	1.02
9	280(0)	3000(0)	45(0)	99.63	62.12	0.85
10	280(0)	3000(0)	30(-1)	99.41	63.21	0.54
11	380(1)	4000(1)	60(1)	97.75	56.85	1.21
12	280(0)	4000(1)	45(0)	98.76	60.1	0.91
13	280(0)	4000(1)	45(0)	98.81	60.04	0.86
14	280(0)	3000(0)	45(0)	99.55	62	0.83
15	280(0)	2000(-1)	45(0)	98.95	68.55	0.55
16	380(1)	2000(-1)	30(-1)	99.89	69.82	0.63
17	180(-1)	2000(-1)	30(-1)	99.48	69.26	0.51
18	380(1)	4000(1)	30(-1)	99.79	61.89	0.65
19	180(-1)	4000(1)	60(1)	97.43	57.45	1.04
20	380(1)	2000(-1)	30(-1)	99.91	69.74	0.61
21	180(-1)	4000(1)	30(-1)	98.12	62.12	0.52
22	380(1)	3000(0)	45(0)	99.57	59.99	1.02
23	280(0)	3000(0)	45(0)	99.65	62	0.86
24	280(0)	3000(0)	60(1)	96.12	65.96	1.1
25	380(1)	2000(-1)	60(1)	97.83	65.67	1.25
26	280(0)	3000(0)	45(0)	99.06	68.45	0.59
27	380(1)	4000(1)	60(1)	97.76	56.71	1.11
28	180(-1)	2000(-1)	60(1)	97.43	66.18	0.97
29	380(1)	2000(-1)	60(1)	97.83	65.67	1.25
30	180(-1)	3000(0)	45(0)	98.47	64.98	0.66
31	180(-1)	3000(0)	45(0)	98.43	64.94	0.65
32	180(-1)	4000(1)	60(1)	97.29	57.34	1.01
33	180(-1)	4000(1)	30(-1)	98.82	62.32	0.54
34	280(0)	2000(-1)	45(0)	99.06	68.45	0.59

با انجام آنالیز رگرسیون چند متغیره، مدل چندجمله‌ای برای پیش‌بینی بازده کویش (y_1)، بازده جداسازی (y_2) و آسیب‌دیدگی دانه (y_3) بر حسب سرعت دورانی (A)، نرخ تغذیه (B) و محتوی رطوبت (C) به‌ترتیب در روابط (۸)، (۹) و (۱۰) آمده است.

$$y_1=96.12-0.0075A-0.0014B+0.327C+1.056(10^{-6})A\times B-0.083(10^{-3})A\times C+7.708(10^{-6})B\times C+0.021(10^{-3})A^2+9.57(10^{-8})B^2-0.0044C^2 \quad (۸)$$

$$y_2=80.31+0.071A-0.006B-0.365C-1.16(10^{-6})A\times B-0.11(10^{-3})A\times C-0.023(10^{-3})B\times C-0.012(10^{-3})A^2+5.93(10^{-7})B^2+0.0041C^2 \quad (۹)$$

$$y_3=-0.034-0.0024A+0.0004B-0.0038C-1.56(10^{-7})A\times B+0.13(10^{+4})A\times C-9.58(10^{-7})B\times C+5.9(10^{-6})A^2-5.09(10^{-8})B^2+0.00022C^2 \quad (۱۰)$$

جدول ۲- آنالیز واریانس نتایج عملکردی واحد کوبنده با استفاده از Design Expert

Table 2- Analysis of variance for performance of threshing unit using Design Expert

منابع تغییر Source of variation	df	بازده کوبش٪ Threshing efficiency% (y_1)		بازده جداسازی٪ Separation efficiency% (y_2)		آسیب‌دیدگی دانه٪ Grain damage% (y_3)	
		F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
مدل Model	9	16.82	< 0.0001	11.35	< 0.0001	23.17	< 0.0001
سرعت دورانی Drum speed (A)	1	12.93	0.0015	1.79	0.1937	26.2	< 0.0001
نرخ تغذیه Feed rate (B)	1	1.87	0.1846	86.23	< 0.0001	3.03	0.0948
محتوی رطوبت Moisture content (C)	1	104.81	< 0.0001	10.66	0.0033	171.49	< 0.0001
A×B	1	0.8318	0.3708	0.0553	0.816	0.4824	0.494
A×C	1	1.15	0.2935	0.1149	0.7376	0.7418	0.3976
B×C	1	0.9967	0.3281	0.491	0.4902	0.4083	0.5289
A^2	1	1.11	0.303	2.03	0.1669	2.3	0.142
B^2	1	0.2285	0.6369	0.4819	0.4942	1.72	0.2021
C^2	1	24.69	< 0.0001	1.17	0.2906	1.76	0.1976
باقیمانده Residual	7						
عامل عدم برازش Lack of fit	5	29.28	< 0.0001	6.38	0.0012	5.27	0.0033
مجموع همبستگی Correlation total	16						

اطلاعات آماری مربوط به مدل‌های ایجاد شده نتایج در جدول ۳ آورده شده است. هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر باشد قدرت مدل برازش‌یافته در توصیف تغییرات پاسخ به‌عنوان تابعی از متغیرها می‌باشد. مقادیر بالای R^2 و $Adj\text{-}R^2$ یک ارتباط و همبستگی قوی بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایشی برای بازده کوبش و توانایی مدل برای برازش اطلاعات را نشان می‌دهد. پارامتر $Adj.R^2$ میزان تغییرات داده‌ها در اطراف میانگین می‌باشد که توسط مدل شرح داده شده است. Adeq.Precision، مقادیر به‌دست آمده در نقاط مرکزی را نسبت به میانگین بررسی می‌کند و چنانچه مقدار آن بیش‌تر از ۴ باشد نشان‌دهنده این است که مدل ارائه شده از کفایت لازم برخوردار است. C.V میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند و از تقسیم Std.Dev. (انحراف معیار) بر Mean (میانگین) ضرب در ۱۰۰ به‌دست می‌آید (Ahamadi Gavidelan, 2013 Safary *et al.*, 2016). به‌عنوان یک قاعده کلی C.V. نباید از ۱۰٪ بیش‌تر شود، که در این‌جا مقدار پایینی دارند و نشان‌دهنده دقت و قابلیت اطمینان آزمایش‌های انجام شده می‌باشد.

جدول ۳- اطلاعات آماری مربوط به مدل‌های بازده کوبش٪، بازده جداسازی٪ و آسیب‌دیدگی دانه٪ در کوبنده

Table 3- Statistical information on models of threshing efficiency% (y_1), separation efficiency% (y_2), grain damage% (y_3)

نتایج Results	انحراف معیار Std. Dev.	میانگین Mean	ضریب تغییر C.V. %	ضریب تبیین R^2	Adj. R^2 تنظیم شده R^2	دقت Adeq. Precision
بازده کوبش٪ Threshing efficiency% (y_1)	0.4633	98.70	0.4694	0.87	0.82	12.54
بازده جداسازی٪ Separation efficiency% (y_2)	1.98	63.60	3.11	0.83	0.75	11.45
آسیب‌دیدگی دانه٪ Grain damage% (y_3)	0.0814	0.8156	9.9814	0.90	0.86	1.475

منحنی‌های سه‌بعدی برای بررسی پارامترهای عملکردی در مقابل تغییرات سرعت دورانی × نرخ تغذیه (در رطوبت ۴۵٪)، سرعت دورانی × رطوبت (در نرخ تغذیه ۳۰۰۰ کیلوگرم در ساعت) و نرخ تغذیه × محتوی رطوبت (در سرعت دورانی ۲۸۰ دور در دقیقه) در شکل ۴ مشاهده می‌شود. شکل ۴ (a، b، c) نشان داد که با کاهش محتوی رطوبت از ۶۰٪ تا ۳۰٪ و نرخ تغذیه از ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰ و افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ تا ۲۸۰، بازده کوبش افزایش و تمایل دانه‌ها به جداشدن از طبق‌ها بیش‌تر می‌شود. کاهش رطوبت باعث کاهش نیروی چسبندگی دانه‌ها روی طبق شده و جدایش دانه‌ها به‌راحتی صورت می‌گیرد هم‌چنین با افزایش سرعت دورانی، تعداد و مقدار ضربه وارد به طبق‌ها بیش‌تر شده و در نتیجه دانه‌های کم‌تری روی طبق‌های کوبیده که از خروجی کوبنده خارج می‌شوند، باقی می‌ماند. از طرفی نرخ تغذیه پایین سبب می‌شود که شتاب ورود مواد از تغذیه‌کننده به داخل کوبنده و در نتیجه ضربه وارده به طبق‌ها بیش‌تر باشد و جدایش بیش‌تری از دانه انجام گیرد. سادجان و همکاران (Sudajan *et al.*, 2002) و قیاسی و همکاران (Ghiasi *et al.*, 2016) در محدوده مطالعاتی که برای کوبنده آفتاب‌گردان انجام دادند به چنین نتایج مشابهی دست یافتند. بیش‌ترین مقدار درصد طبق‌های کوبیده شده (۹۹/۸۱٪) در رطوبت ۳۰٪ و کم‌ترین مقدار (۹۶/۱۲٪) در رطوبت برداشت محصول (۶۰٪) حاصل شد. در شکل ۴ (d، e، f) مشخص است که بازده جداسازی ضدکوبنده با کاهش محتوی رطوبت و نرخ تغذیه افزایش یافته است هرچند تغییر سرعت دورانی از لحاظ آماری اثر تاثیرگذاری نداشت. چون در رطوبت پایین (تا ۳۰٪) طبق‌ها از حالت ترد و شکنندگی خارج شده و انعطاف‌پذیرتر هستند که باعث می‌شود در مقابل ضربه کم‌تر خرد شوند، هم‌چنین در نرخ تغذیه پایین تعداد برخوردهای طبق‌ها کم‌تر است و باعث کاهش تکه‌های خردشده محصول (مواد غیردانه‌ای) شده که از شبکه ضدکوبنده عبور می‌کنند، بنابراین با این تغییرات بازده جداسازی هم افزایش پیدا می‌کند. نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و رطوبت ۳۰٪ نقاطی بودند که بیش‌ترین بازده جداسازی (۶۹/۸۲٪) گزارش شد. به‌طور مشخص با کاهش سرعت دورانی کوبنده از ۳۸۰ تا ۱۸۰ دور در دقیقه و محتوی رطوبت از ۶۰٪ تا ۳۰٪ درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها از ۱/۲۵ تا ۰/۴۹ کاهش پیدا کرده است هرچند تغییر نرخ تغذیه اثر چندانی روی آسیب‌دیدگی دانه‌ها نداشته است (شکل ۴ (g، h، i)). چون در سرعت دورانی پایین میزان نیروی ضربه‌ای وارد به دانه‌ها کم‌تر بوده و در رطوبت ۳۰٪ پوسته دانه از حالت شکنندگی خارج شده در مقایسه با رطوبت برداشت قابلیت جذب انرژی بیشتری در ضربات کوبنده دارد، بنابراین درصد آسیب‌دیدگی کاهش می‌یابد. گول و همکاران (Goel *et al.*, 2009) در تحقیق خود برای کوبنده دستی آفتاب‌گردان نتایج مشابهی را ارائه دادند و بیان کردند که با تغییر رطوبت از ۱۳/۸۴٪ تا ۸/۳۸٪ درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها از ۲/۰۷٪ تا ۰/۱۵٪ کاهش پیدا کرد. سادجان و همکاران (Sudajan *et al.*, 2002) بیان کردند که با افزایش سرعت دورانی آسیب‌دیدگی دانه از ۱/۲۴٪ تا ۱/۸۳٪ افزایش می‌یابد. آن‌چه که نمایان است با افزایش سرعت دورانی، بازده کوبش و ظرفیت کاری افزایش می‌یابد و از طرفی درصد آسیب‌دیدگی دانه هم افزایش پیدا می‌کند (Ukatu, 2006). محققان بسیاری هم گزارش کردند که تغییرات محتوی رطوبت دانه یکی از عامل‌های مهم در آسیب‌دیدگی دانه‌ها است (Salari *et al.*, 2013). لازم است که با توجه به هدف مورد نظر و شرایط کاری، نقاط بهینه را انتخاب کرد.

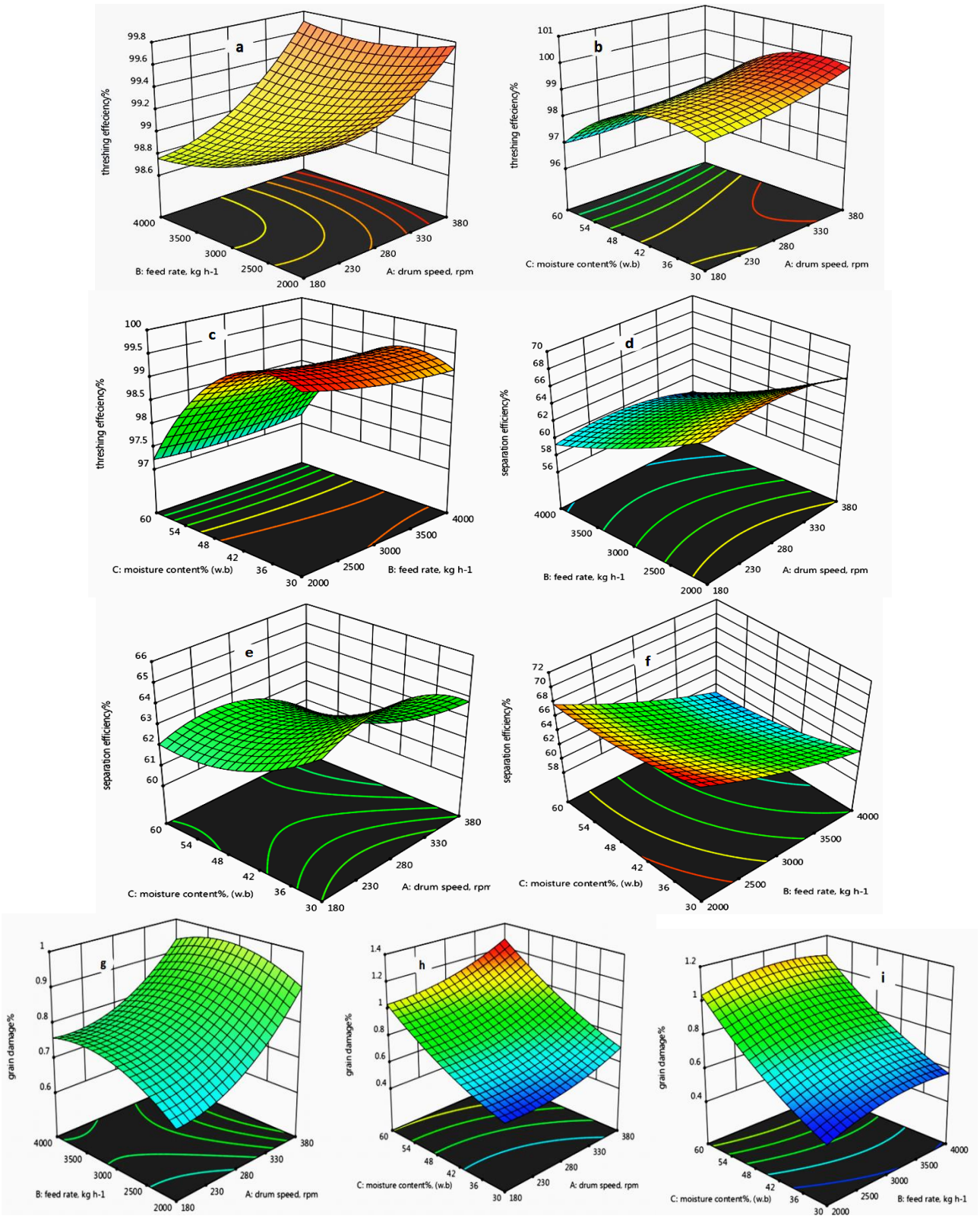
بهینه‌سازی فرآیند کوبش

بهینه‌سازی یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی و تحلیل آزمایش‌هاست. با توجه به نتایج به‌دست آمده در فرآیند بهینه‌سازی کوبیدن دانه آفتاب‌گردان آجیلی و برای رسیدن به بیش‌ترین بازده کوبش و جداسازی و کم‌ترین درصد آسیب‌دیدگی دانه، نرم‌افزار Design Expert ۶۵ نقطه را پیشنهاد داد، نقطه‌ای با بیش‌ترین شاخص مطلوبیت در شکل ۵ آورده شده است که برای عملکردهای مشخص شده نقطه با سرعت دورانی ۲۹۲/۱۳۴ دور در دقیقه، نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و رطوبت ۳۰/۷۴٪ تعیین شد. جهت دست‌یابی به شرایط بهینه و تنظیمات لازم روی متغیرهای دستگاه، استفاده از این مقادیر مورد نیاز می‌باشد. سینگ و وینای (Singh and Vinay, 2014) از این روش برای بهینه‌سازی کوبنده سورگوم استفاده کردند.

نتیجه‌گیری

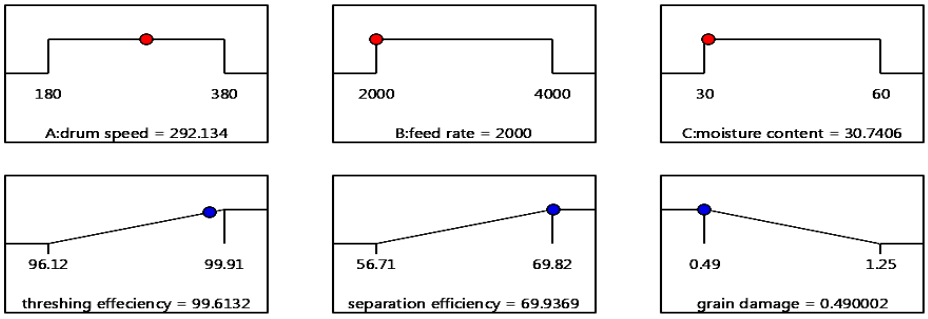
کوبنده با طرح محوری طراحی، ساخت و ارزیابی شد و برای جداسازی دانه آفتاب‌گردان آجیلی از طبق به‌کار برده شد. با توجه به کاربرد آن، این پژوهش می‌تواند گامی مهم در توسعه کمباین و ماشین‌های برداشت‌کننده این محصول باشد.

اثر مدل‌های ایجاد شده و متغیرهای مستقل روی اکثر متغیرهای وابسته (پارامترهای عملکردی) در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار شد. به‌طوری‌که تغییرات رطوبت بر بازده کوبش و آسیب‌دیدگی دانه و نیز تغییرات نرخ تغذیه بر بازده جداسازی بیش‌ترین تاثیر را در مقایسه با سایر متغیرها داشت.



شکل ٤- منحنی‌های سه‌بعدی اثر متغیرها روی پارامترهای عملکردی واحد کوبنده

Fig. 4. 3D surface response plots to observed the effect of drum speed, feed rat, moisture content on threshing efficiency (a, b, c), separation efficiency (d, e, f) and grain damage (g, h, i).



شکل ۵- متغیرهای بهینه‌شده واحد کوبنده در نرم‌افزار

Fig. 5. Optimized variables of threshing unite in software with options of Ramps

با کاهش محتوی رطوبت از ۶۰٪ تا ۳۰٪ و نرخ تغذیه از ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰ و افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ تا ۲۸۰، بازده کوبش افزایش یافت. بیش‌ترین مقدار بازده کوبش (۹۹/۸۱٪) در رطوبت ۳۰٪ و کم‌ترین مقدار (۹۶/۱۲٪) در رطوبت برداشت محصول (۶۰٪) حاصل شد. با کاهش محتوی رطوبت و نرخ تغذیه بازده جداسازی ضدکوبنده افزایش یافت. نرخ تغذیه ۲۰۰۰ و رطوبت ۳۰٪ نقاطی بودند که بیش‌ترین بازده جداسازی (۶۹/۸۲٪) گزارش شد. با کاهش سرعت دورانی و محتوی رطوبت درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها از ۱/۲۵ تا ۰/۴۹ کاهش پیدا کرد.

نرم‌افزار Design Expert با هدف دست‌یابی به بیش‌ترین بازده کوبش و جداسازی و کم‌ترین آسیب دانه، نقطه بهینه با سرعت دورانی ۲۹۲/۱۳۴ دور در دقیقه، نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و رطوبت ۳۰/۷۴٪ را تعیین کرد.

References

1. Abdollahpour, Sh. 1998. Studying the Type of Grains Combine and Presentation a Suitable Design for Condition of Iran. M.S. thesis. Graduate Studies Office in Mechanic of Agricultural Machinery. University of Tehran Iran. (In Persian).
2. Ahmadi Gavidelan, M. 2013. Optimization of hazelnut drying in infrared fluidized bed using response surface method. M.S. thesis. Graduate Studies Office in Mechanic of Agricultural Machinery. Bu-Ali Sina University, Iran. (In Persian).
3. Azharuddin, K., S. Mir, M. Narasimhan, and G. Pavan Kumar. 2016. Design and Fabrication of Sunflower Seed Extracting Machine. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) 4 (5): 90-97.
4. Chavoshgoli, E., Sh. Abdollahpour, R. Abdi, and A. Babaie. 2015. Engineering properties of sunflower seeds and materials other grain as moisture content for equipment of separator. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 17 (1): 10-21.
5. Hosseinzdeh Samani, B., E. Fayyazi, B. Ghobadian, and S. Rostami. 2016. Studying and optimizing the biodiesel production from mastic oil aided by ultrasonic using response surface method. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 440-450. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v6i2.37796.
6. Ghiasi, P., A. Masoumi, and A. Hemmat. 2016. Designing, construction and evaluation a thresher and concave of combine for harvesting of sunflower. 10th National Congress of Biosystems and Mechanization in Iran. (In Persian).
7. Goel, A. K., D. Behera, S. Swainand, and B. K. Behera. 2009. Performance Evaluation of a low-Cost Manual Sunflower Thresher. Indian Journal of Agricultural Research 43 (1): 37-41.
8. Jafari, S. 2008. Design and Construction a Laboratory Sunflower Seed Dehuller Machine. Faculty of Agriculture. University of Tehran, Iran. (In Persian).
9. Jahani, F. 2014. Designing, construction and evaluation a separator of sunflowwer grain. M.S. thesis. Graduate Studies Office in Mechanic of Agricultural Machinery. University of Shiraz, Iran. (In Persian).
10. Khazaei, J., A. Lotfi, M. Aminnayeri, and M. Zaki. 2007. Modelling the mechanical damage to lentil seeds under impact loading. Lucari Stiintifice 49 (1): 262-271.
11. Lotfi, A. 2009. Construction and performance evaluation of a local device for separating sunflower seeds and environment preservation. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 40 (4): 73-79.
12. Mehrijani, M., J. Khodaei, and S. Zareei. 2019. Modeling and Optimizing of the Energy Consumption of Moldboard Plow using Response Surface Methodology (RSM). Journal of Agricultural Machinery 9 (1): 167-176. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v9i1.65908.
13. Mirzabe, A. H., and G. R. Chegini. 2016. Effect of air-jet impingement parameters on the removing of sunflower

seeds from the heads in static conditions. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 18 (2): 43-59.
14. Mohtasebi, S., M. Behriizilar., J. Alidadian, and K. Besharati. 2006. A New Design for Grain Combine Thresher. International Journal of Agriculture and Biology 8 (5): 1560-8530.
15. Muna, N. H., U. S. Muhammed, A. M. El-Okene, and M. Isiaka. 2016. Development and Validation of Threshing Efficiency Mathematical and Optimization Model for Spike Tooth Cereal Threshers. International Journal of Engineering Research and Development 12 (11): 50-60.
16. Popov, I. F., N. I. Kienen, and V. Asakun, 1986. Agricultural machine .Russian Translations Series 31, A.A Balkema, Roterdam. P: 433-451.
17. Safary, M., and R.A. Chayjan. 2016. Optimization of Almond Kernels Drying under Infrared-vacuum Condition with Microwave Pretreatment using Response Surface Method and Genetic Algorithm. Journal of Agricultural Science and Technology 18: 1543-1556.
18. Sagar, M., U. Baligidad, K. Chandrasekhar, and S. Elangovan. 2018. RSM Optimization of Parameters influencing Mechanical properties in Selective Inhibition Sintering. Materials Today: Proceedings 5: 4903-4910.
19. Salari, K., R. Amiri Chayjan, J. Khazaei, and J. Amiri Parian. 2013. Optimization of Independent Parameters for Chickpea Threshing Using Response Surface Method (RSM). Journal of Agricultural Science and Technology 15: 467-477.
20. Salokhe, V. M., S. Sudajan, and S. Chusilp. 2005. Effect of concave hole size, concave clearance and drum speed on rasp-bar drum performance for threshing sunflower. AMA, Agriculture Mechanization in Asia, Africa and Latin America 36 (1): 52-60.
21. Singh, D., and D. Vinay. 2014. Optimization of machine parameters of Parvatiya Sugam motorized thresher using response surface methodology. Journal of Applied and Natural Science 6 (1): 207-213.
22. Srivastava, A., C. Goering, R. Rohrbach, and D. Buckmaster. 2006. Engineering principles of agricultural machines. St. Joseph, Michigan, USA. 2nd ed.
23. Sudajan, S., V. M. Salokhea, and K. Triratanasirichai. 2002. Effect of Type of Drum, Drum Speed and Feed Rate on Sunflower Threshing. Biosystems Engineering 83 (4): 413-421.
24. Thasaiya, A. S., R. M. Musuvadi, C. Tarsem, Sh. Rajiv, and S. Thirupathi. 2014. Compression loading behaviour of sunflower seeds and kernels. International Agrophysics 28: 543-548.
25. Ukatu, A. C. 2006. A Modified Threshing Unit for Soya Beans. Biosystems Engineering 95 (3): 371-377.
26. Xu, L. Z., Y. M. Li, Z. Ma, Z. Zhao, and C. H. Wang. 2013. Theoretical analysis and finite element simulation of a rice kernel obliquely impacted by a threshing tooth. Biosystems Engineering 114 (2): 146-156.
27. Zhenjie, Q., J. Chengqian, and Z. Dingguo. 2017. Multiple frictional impact dynamics of threshing process between flexible tooth and grain kernel. Computers and Electronics in Agriculture 141: 276-285.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 181-192

Design, Construction and Evaluation of a Measuring Device for Rice Picker Combine Losses Based on Piezoelectric Sensor at Lab Scale

M. Hasannia Samakoush[1], S. R Mousavi Seyedi[2*], A. Mahdavian[3]

1 and 2- MSc Graduated and Associate Professors of Mechanics of Biosystem Department, respectively, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3- Assistant Professor of Mechanics of Biosystem Department, Tarbiat Modares University, Iran
(*- Corresponding Author Email: mousavi22@sanru.ac.ir)

Received: 03-02-2020
Revised: 12-07-2020
Accepted: 20-07-2020

How to cite this article:
Hasannia Samakoush, M., S. R. Mousavi Seyedi, and A. Mahdavian. 2022. Design, Construction and Evaluation of a Measuring Device for Rice Picker Combine Losses Based on Piezoelectric Sensor at Lab Scale. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 181-192. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.85414

Introdution

Nowadays, supplying the needed food for people is one of the main global issues. Among foods, rice as the second vital crop has an important role in the world. The amount of global rice losses is about 21 percent and in Iran is reported between 16 to 30 percent that the most amount of it belongs to harvest (mowers and crushers) part. The measuring device for rice picker combine losses at lab scale is a tool which could report the losses of separating and cleaning units. One of the advantages of this device is choosing maximum speed by the operator with considering the acceptable amount of seed losses. Therefore, research about detecting and decreasing this type of losses is important. In this research, only the losses of the harvesting step, especially at the end of a combine harvester machine was addressed. Different methods included piezoelectric and acoustic sensors, load cell, and FIS controller were used as the measuring device of rice picker combine seed losses. In this research, on the contrary with other studies, the slope of meshed plate and humidity of product was measured using a piezoelectric sensor at lab scale under different conditions of the rotational speed of meshed plate. Therefore, the general purpose of this research was design, construction, and evaluation of the measuring device for rice picker combine losses based on the piezoelectric sensor at lab scale to measure the seed losses in the straws at the end of the machine at rice picking.

Materials and Methods

A meshed plate with the 100 × 60 cm^2 dimension was one of the main parts of the measuring device of seed losses. The diameter of its meshes was 7 mm based on the rice seed size. It separates the rice seeds from straws. Separated seeds from this part were fallen on the other plate which is mounted under the meshed plate. The seeds through four separated routes were fallen on the sensors and output pulses from sensors were sent to the operator plus shown at a monitor. The used seeds at tests were selected from Fajr rice cultivar with a high yield and short height. The used piezoelectric sensor had the ability to convert imposed force and pressure to voltage and vice versa. After the seed falling on the sensor and its vibration, the piezoelectric sensor worked as a beam fixed at one end. The used Integrated Circuit (IC) was ATMEGA328, which receives the needed data through the sensor as a processing and action system. An electric motor was used to create the rotational speed of meshed plate. The LCD indicator was used for monitoring the obtained data from the test. The amount of seed losses at the end of rice picker combine machine was studied using the piezoelectric sensor with high sensitivity for detecting seeds to separate the seeds from straws. The tested sample in this research was 1 kg straw plus 52 g seed which was equal to 3 percent loss at the end of the harvest combine machine. The experimental design was a simple randomized complete design with three replications. The used treatments included the rotational speed of meshed plate at 3 levels (50, 75, and 100 rpm), the slope of meshed plate at 3 levels (25, 37, and 45 deg) plus humidity at 3 levels (12, 18, and 24 percent). Then the data analysis was done using the conducted test design. The GenStat software was used for data analysis.

Results and Discussion

The analysis of variance table showed that all treatments have a significant difference in the number of rice lost seeds at 1% probability level. The interaction between the rotational speed of meshed plate and seed humidity had a significant difference at the 1% level. On this base, the best separation of seed from straw

recorded at 100 rpm and 12% humidity. The reason was the higher vibration of the meshed plate at high rotational speed and better separation of seeds at low humidity. Increasing the slope of meshed plate and humidity of seeds caused decreasing in the device efficiency. Because the motion speed of the sample on the meshed plate increased with increasing the slope of the meshed plate, a lower period was needed for separating the seeds from straws, and this separation at higher humidity was done hardly. The highest efficiency at this condition was obtained with 12% humidity and 25º slope. Increment of the rotational speed of meshed plate and decrement of meshed plate slope caused the best separation by the device. Its reason was high vibration at the high rotational speed and having enough time for separating the seeds from straws at a low slope of the meshed plate. The best angle for separating was 37º. Increment of the rotational speed of meshed plate, decrement of meshed plate slope, and sample humidity caused increasing the device efficiency. The reasons were high vibration at high rotational speed, having enough time for separating seeds from straws, and decreasing the compression at low humidity amounts. The results showed that the best device efficiency with 95.51% was obtained at 100 rpm rotational speed, humidity of 12%, and 25º slope of the meshed plate.

Conclusion

In this research, a measuring device for detecting the amount of seed losses combined by straws at the end of a rice picker combine machine was designed and constructed, and then was assessed. The results of lab tests showed that increment of the rotational speed of meshed plate plus decrement of meshed plate slope and sample humidity causes an increment of device efficiency. With installation and evaluation of this device on the rice picker combine machine, the needed correction at the farm will be done and the amount of losses will be decreased.

Keywords: Design, Meshed plate, Piezoelectric, Rice combine loss, Sensor

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۹۲-۱۸۱

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیر تلفات کمباین برنج برپایه حسگر پیزوالکتریک در مقیاس آزمایشگاهی

مهدی حسن‌نیا سماکوش[۱]، سید رضا موسوی سیدی[۲*]، علیرضا مهدویان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰

چکیده

دستگاه اندازه‌گیر تلفات دانه کمباین وسیله‌ای است که با نصب آن روی کمباین، می‌توان از میزان تلفات در واحدهای جداکننده و تمیزکننده آگاهی یافت. از جمله مزایای این دستگاه این است که به کاربر این امکان را می‌دهد با داشتن یک میزان قابل قبول از تلفات دانه، بیشینه سرعت پیشروی را انتخاب نمود. در تحقیق حاضر از صفحه مشبکی به ابعاد ۶۰×۱۰۰ سانتی‌متر مربع که قطر شبکه‌های آن ۷ میلی‌متر بوده برای جداسازی شلتوک از کاه و کلش استفاده شد. دانه‌های جداشده از این قسمت روی صفحه زیرین می‌ریزند که از طریق ۴ شبکه جداگانه روی حسگرهای مورد نظر سقوط کرده و پالس‌های مورد نظر از حسگرها به کاربر ارسال و در صفحه نمایشگر نشان داده می‌شود. میزان تلفات دانه در انتهای کمباین با استفاده از حسگر پیزوالکتریک که دارای حساسیت بالا در تشخیص دانه‌های شلتوک می‌باشد بررسی گردید. نمونه مورد آزمایش در این تحقیق یک کیلوگرم کاه و کلش به همراه ۵۲گرم شلتوک است که معادل تلفات سه درصدی (میانگین تلفات انتهای کمباین در کشورهای پیشرفته ۲/۱۴ درصد است) در انتهای کمباین می‌باشد. تیمارهای مورد استفاده، سرعت دورانی صفحه مشبک، شیب صفحه مشبک و رطوبت نمونه بوده که هرکدام در سه سطح و در سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. سپس با استفاده از طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل آماری انجام شد. برای تجزیه و تحلیل آماری عملکرد دستگاه، از نرم‌افزار GenStat استفاده شد. نتایج تحقیقات نشان داد مناسب‌ترین کارایی دستگاه در سرعت دورانی ۱۰۰ دور در دقیقه صفحه مشبک، رطوبت ۱۲ درصدی نمونه آزمایشی و شیب ۲۵ درجه‌ای صفحه مشبک معادل ۹۵/۵۱٪ می باشد، که مهم‌ترین دلیل آن ارتعاش زیاد در بیشینه سرعت دورانی صفحه مشبک و پراکندگی نمونه آزمایشگاهی به دلیل رطوبت پایین آن می‌باشد. کمترین میزان کارایی دستگاه نیز در سرعت دورانی ۱۰۰ دور در دقیقه، رطوبت ۲۴ درصدی نمونه آزمایشی و شیب ۴۵ درجه‌ای صفحه مشبک ۷۰٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیزوالکتریک، تلفات کمباین برنج، حسگر، صفحه مشبک، طراحی

مقدمه

امروزه با توجه به روند رو به رشد جمعیت جهان به‌خصوص در کشورهای جهان سوم و نیاز روزافزون به مواد غذایی، تأمین غذای مورد نیاز افراد یکی از اساسی‌ترین مسائل عصر حاضر می‌باشد. از این رو بشر همواره در تلاش بوده تا روش‌های جدیدی را به‌منظور افزایش عملکرد محصول و درآمد کشاورزان به‌وجود آورد. در این میان برنج نیز به‌عنوان دومین ماده غذایی ارزشمند، نقش مهمی در تغذیه جمعیت جهان دارد. غذای اصلی مردم ایران بعد از گندم، برنج می‌باشد. روند افزایش مصرف برنج در ایران بیانگر اهمیت آن در سبد غذایی خانوار است (Hedayatipour and Rahmati, 2007). سطح زیر کشت برنج (شلتوک) در کشور در سال زراعی ۹۸-۹۷ بیش از ۵۴۰ هزار هکتار با مقدار تولید ۲/۳ میلیون شلتوک تن بوده است. که سهم استان مازندران در این بین، ۲۱۵ هزار هکتار و تولید بیش از ۱/۴ میلیون تن می‌باشد (Bakhshandeh, 2019).

اتلاف دانه را می‌توان در زمینه‌های گوناگونی مورد بررسی و ارزیابی قرار داد: افت قبل از برداشت (PHL[۴]): افتی است که قبل از

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mousavi22@sanru.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.85414

4- Pre-Harvest Loss

برداشت رخ می‌دهد و توسط عوامل خارجی مانند باد، حیوانات و باران به‌وجود می‌آید. افت جمع‌آوری (GL[1]): تلفات ناشی از همه مکانیزم های دماغه‌ی کمباین که در ارتباط با محصول می‌باشند. افت فرآوری (PL[2]): توسط سیستم‌های جداکننده و تمیزکننده‌ی کمباین باعث می‌شوند. افت برداشت (HL[3]): برابر با مجموع تلفات جمع‌آوری و فرآوری است. تلفات غلات در مرحله برداشت گاه تا ۲۰ درصد گزارش شده است. در حالی که میزان تلفات گندم هنگام برداشت در کشورهای صنعتی ۲ تا ۵ درصد است (Aghagolzadeh, 2005). میزان ضایعات محصول برنج در دنیا حدود ۲۱ درصد بوده و در ایران نیز بین ۱۶ تا ۳۰ درصد گزارش شده، که بیشترین مقدار آن به مرحله برداشت (درو و خرمن‌کوبی) تعلق دارد (Aghagolzadeh, 2005). لذا تحقیق و پژوهش در زمینه کاهش و شناسایی این گونه تلفات و عوامل تأثیرگذار روی آن کاملاً ضروری است. البته تلفات بعد از برداشت تا مرحله مصرف جای بحث و بررسی جداگانه‌ای دارد و در این تحقیق تنها به تلفات مرحله برداشت و به‌طور خاص تلفات در انتهای کمباین پرداخته شده است. چنانچه بتوان با به‌کارگیری دستگاه فقط به میزان سه درصد، میزان تلفات کمباین را کاهش داد چیزی در حدود ۷۰ هزار تن افزایش برداشت خواهیم داشت که با احتساب ۶۵۰۰ تومان (قیمت خرید تضمینی شلتوک در سال ۱۳۹۸) برای هر کیلوگرم شلتوک مبلغی حدود ۴۵۰ میلیارد تومان خواهد شد. محققین متعددی طی سال‌های گذشته از دستگاه نمایشگر تلفات دانه (GLM)[4] با اهداف مختلف استفاده کرده‌اند که در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره کوتاهی می‌شود.

الدریج و همکاران (Eldredge *et al.*, 2001) از حسگرهای پیزوالکتریک جهت ساخت دستگاه اندازه‌گیر تلفات دانه استفاده نمودند. کریستال سرامیکی به‌طور محکم در قسمت تمیزکننده کمباین نصب می‌شود. دانه‌ها هنگام خروج از انتهای کمباین روی حسگر سقوط کرده و در نتیجه به آن نیرو وارد شده و یک سیگنال الکتریکی تولید می‌شود که پس از تقویت، به کاربر این امکان را می‌دهد که از میزان تلفات آگاه شود.

فریرا و همکاران (Ferreira *et al.*, 2001) در تحقیقی بر نحوه چگونگی استفاده از اندازه‌گیرهای افت در زمان برداشت محصول برنج گزارش نمودند، کمباین مطابق شرایط محصول، قادر به تنظیمات بهینه در شرایط کار می‌باشد. به‌طوری‌که با افزایش افت در زمان برداشت، تنظیمات جدید صورت می‌گیرد و میزان افت در زمان برداشت کاهش می‌یابد (Mostofi Sarkari, 2009).

برنهارت و همکاران (Bernhardt *et al.*, 2010) دستگاه و روش خاصی برای تعیین میزان تلفات کمباین ارائه کردند. حسگرهای استفاده شده در این تحقیق از نوع صوتی بودند. در این روش، اجزای واحد جداکننده هرکدام به حسگر مجهز شدند تا سیگنال متناسب با میزان محصول جداشده را ارائه نمایند. این سیگنال برای پردازش بیشتر به قسمت ارزیابی ارسال می‌شود، تا میزان تلفات محصول مشخص گردد. ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2011) یک دستگاه اندازه‌گیر تلفات برای واحد جداکننده کمباین برنج ساختند، که از حسگرهای پیزوالکتریک نوع PVDF[5] درتحقیقاتشان استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد از آنجایی که نسبت دانه از کاه بیشتر است MOG[6]، لذا فرکانس و بزرگی ولتاژ تولیدی ناشی از دانه بیشتر خواهد بود. به منظور تعیین تاثیر لرزش‌های کمباین و نیز سیگنال‌های ناشی از MOG، فرکانس بحرانی بین ۱ تا ۵ کیلوهرتز در نظر گرفته شد. حسگر در شرایط آزمایشگاه مورد آزمون قرار گرفت و کالیبره گردید. زاویه نصب حسگر ۴۵ درجه و فاصله آن از سطح ریزش مواد ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. میزان خطای نسبی شمارش دانه‌ها ۴/۵ درصد به‌دست آمد. سپس حسگر در شرایط مزرعه‌ای بررسی گردید. سرعت پیشروی کمباین بین ۲/۱ – ۰/۸ متر بر ثانیه تنظیم و نتایج در مزرعه نشان دادند که میزان خطای نسبی کمتر از ۱۲ درصد بود.

کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2010) برای ساخت دستگاه پایش تلفات کمباین، از لودسل برای اندازه‌گیری میزان تلفات استفاده کردند و از یک صفحه مشبک به‌منظور جلوگیری از ریزش کاه‌های بلند روی لودسل، کمک گرفته شد. طراحی سیستم شامل دو بخش طراحی سخت‌افزار و طراحی نرم‌افزار است. حساسیت دستگاه، بالا و قابل تنظیم در حد ۵۰ میلی‌گرم می‌باشد. نتایج نشان داد که زاویه ۳۷ درجه برای نصب لودسل جهت اندازه‌گیری روی دستگاه، مناسب می‌باشد.

لشگری (Lashgari, 2009) در تحقیقی روی پیاده‌سازی و ارزیابی کنترل‌کننده منطق فازی جهت تنظیمات خودکار کمباین غلات از دستگاه اندازه‌گیر افت دانه که آن را به اختصار GLM می‌نامیم با هدف اندازه‌گیری تلفات دانه مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش با بهره‌گیری از دانش سیستم خبره[7]، سیستمی مبتنی بر کنترل‌کننده منطق فازی برای تنظیمات خودکار کمباین، طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی شد. این سیستم هوشمند، قادر بود، بر اساس اطلاعات دریافتی، مقدار تلفات در الک‌ها و کاه پران‌ها را از طریق این دستگاه در کمباین اندازه‌گیری نماید، سپس تنظیمات آن را با توجه به

1- Gathering Loss
2- Processing Loss
3- Harvest Loss
4- Graine loss monitor

5- Poly vinylidene Di fluo
6- Material other than grain
7- Expert system

سرعت دورانی کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، سرعت دورانی دمنده و سرعت پیشروی کمباین به‌طور خودکار انجام دهد. در این سیستم برای اندازه‌گیری تلفات انتهای کمباین از سه حسگر که دو حسگر برای اندازه‌گیری تلفات کاه‌پران و یک حسگر برای اندازه‌گیری تلفات الک‌ها می‌باشد استفاده گردید. این حسگرها از نوع پیزوالکتریک می‌باشند.

مستوفی سرکاری و همکاران (Mostofi Sarkari *et al.*, 2014) تحقیقی روی ارزیابی مزرعه‌ای دستگاه نمایشگر افت دانه در شرایط متفاوت برداشت روی کمباین JD955 انجام دادند. سپس دقت دستگاه با استفاده از تیمارهای سرعت پیشروی ۳-۲/۵، ۳/۵-۳ و ۴-۳/۵ کیلومتر بر ساعت و سرعت کوبنده ۶۵۰، ۷۵۰ و ۸۵۰ دور در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه داده‌ها نشان داد افت ریزش دانه در تمامی سرعت‌های پیشروی در انتهای کمباین در رطوبت ۱۰ -۱۲ درصد دانه و سرعت کوبنده ۷۵۰ دور در دقیقه، در حد استاندارد و در حدود یک درصد می‌باشد.

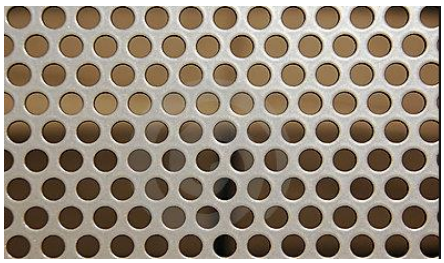
استرلیوف و همکاران (Sterlioff *et al.*, 1997) از خواص صوت برای اندازه‌گیری افت دانه استفاده کردند به این ترتیب که در انتهای کمباین حسگرهای حساس به صدا نصب گردید. صدای دانه‌های گندم به حسگر برخورد نموده و از طریق میکروفون دریافت شد. آنگاه پس از تقویت و فیلتر نمودن نویز و انجام محاسبات به‌عنوان میزان افت دانه نمایش داده می‌شود. حسگرها در انتهای واحد تمیزکننده و در زیر واحد جداکننده نصب گردیدند. آزمون‌هایی که روی کاه برها انجام شده، نشان داد که میزان تلفات دانه در قسمت جداکننده تقریباً معادل میزان دانه‌های جدا شده در فاصله ۱۸ اینچ پایانی کاه برها می‌باشد، لذا با اندازه‌گیری میزان دانه‌های جدا شده در ۱۸ اینچ پایانی کاه برها می‌توان به میزان تلفات دست یافت.

با بررسی‌های انجام شده در منابع مختلف که در مقدمه آمده است، نتیجه‌گیری می‌شود که اندازه‌گیری تلفات دانه هنگام برداشت محصول برنج با استفاده از کمباین مخصوص آن، نقطه مشترک این تحقیق با سایر مقالات می‌باشد. اما در این تحقیق میزان کارایی کمباین و همچنین تلفات دانه در انتهای آن بر خلاف سایر تحقیقات بررسی شده، با استفاده از حسگر پیزوالکتریک در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط مختلف صفحه دورانی لنگ متصل به صفحه مشبک، شیب صفحه مشبک و رطوبت محصول اندازه‌گیری شد.

بنابراین هدف کلی این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیر تلفات کمباین برنج با سنسور پیزوالکتریک در مقیاس آزمایشگاهی به‌منظور تعیین میزان تلفات دانه در کاه و کلش قسمت انتهایی کمباین به هنگام برداشت محصول برنج در مناسب‌ترین وضعیت سرعت دورانی لنگ متصل به صفحه مشبک (مشابه قسمت جداکننده کمباین)، رطوبت نمونه و شیب صفحه مشبک برای بهبود کارایی دستگاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

از اجزای مهم دستگاه اندازه گیر افت دانه، صفحه مشبکی به ابعاد ۶۰ ×۱۰۰ سانتی‌متر مربع (شکل ۱)، که قطر شبکه‌های آن براساس اندازه شلتوک و صفحات نصب شده در کمباین‌های مخصوص برنج، ۷ میلی‌متر می‌باشد، که وظیفه جداسازی دانه‌های برنج از کاه و کلش را بر عهده دارد. دانه‌های جدا شده از این قسمت بر روی صفحه دیگری که در زیر الک (صفحه مشبک) قرار دارد ریخته می‌شود که برای بهبود کارایی هرچه بهتر دستگاه در این مرحله، دانه‌ها از طریق ۴ شبکه جداگانه بر روی حسگرهای مورد نظر سقوط کرده و پالس‌های مورد نظر از حسگرها به کاربر ارسال و در صفحه نمایش نشان می‌دهد. بذر دانه (شلتوک) مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی از نوع برنج پر محصول کوتاه قد رقم فجر می‌باشد.



شکل ۱– صفحه مشبک به قطر ۷ میلی‌متر

Fig.1. Grid plate 7 mm in diameter

شکل ۲ حسگر پیزوالکتریک مدل (LDT0-028K) با حساسیت بالا، ضخامت ۲۸ میکرومتر با الکترودهای نقره‌ای را نشان می‌دهد. این حسگر توانایی تبدیل فشار و نیروی وارده به ولتاژ و برعکس را دارا است. با سقوط بذر روی حسگر و لرزش آن سنسور پیزوالکتریک به‌عنوان تیر یک‌سرگیردار عمل می‌کند.

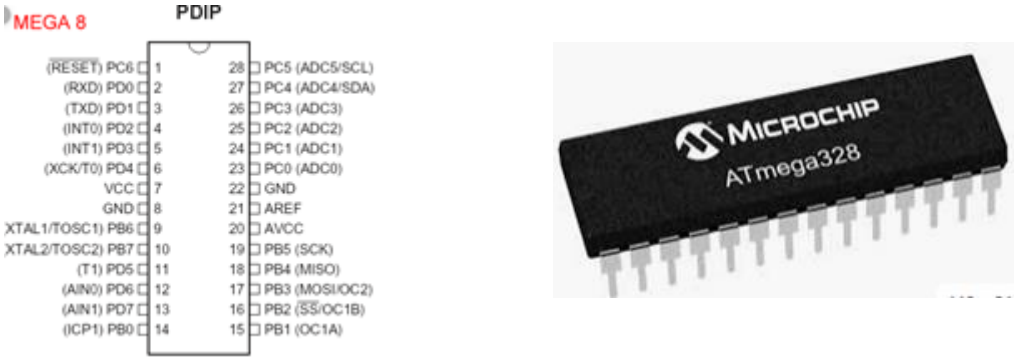
انتخاب درست تغذیه حسگر و تنظیم دقیق آن در قسمت پردازش

داده‌ها بسیار مهم و حساس می‌باشد. چون دقت خروجی حسگر وابسته به ورودی آن است. میزان ولتاژ فراهم شده برای حسگر باید خیلی دقیق بوده، کمترین میزان تغییرات را داشته باشد. IC مورد استفاده از نوع ATMEGA328، یک میکروکنترلر با پردازنده ۸ بیتی سری AVR است که به‌عنوان یک سیستم عملیاتی و پردازشی توابع سیگنال داده، داده‌های مورد نیاز از طریق حسگر دریافت می‌کند. شکل ۲ نمای ظاهری و ترتیبی پایه‌های IC را نشان می‌دهد.

برای ایجاد سرعت دورانی صفحه مشبک، از یک موتور الکتریکی سه فاز ۰/۷۵ کیلو وات مدل Stream استفاده شد (شکل ۴).

شکل ۲– حسگر مورد استفاده

Fig.2. Used sensor



(a) (b)

شکل ۳– **(a)** نمای ترتیبی پایه‌های ATMEGA، **(b)** نمای ظاهری ATMEGA

Fig.3. (a) Sequential view of ATMEGA foundations **(b)** Appearance of ATMEGA

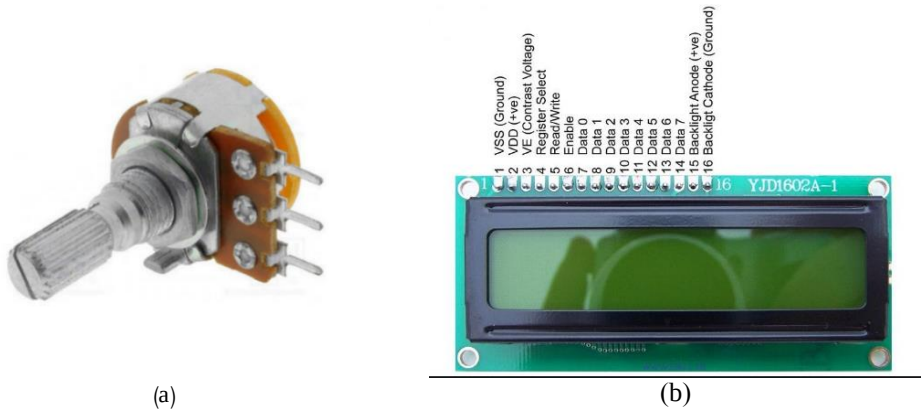
شکل ٤– موتور الکتریکی سه فاز، ۰/۷۵ کیلو وات

Fig.4. Three phase electric motor, 0.75 kW

نمایشگر ال‌سی‌دی ۲×۱۶ جهت نمایش داده‌های به‌دست آمده از آزمایش استفاده شد (شکل ۵– b). برای شفافیت بیشتر صفحه

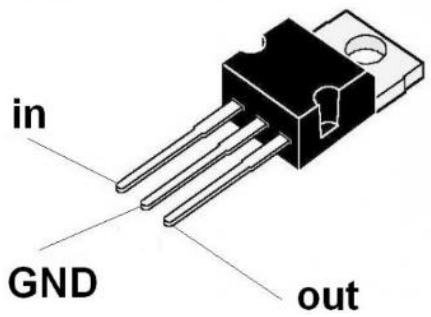
نمایش، یک پتانسیومتر ۱۰ کیلو اهمی در مدار الکترونیکی نصب گردید (شکل ۵- a).

رگولاتور LM7805 جهت کاهش و تثبیت ولتاژ در مدار الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶). در این مدار الکترونیکی چهار مقاومت ۱ مگا اهمی نیز به‌عنوان محافظ IC برای مواقعی که افزایش ولتاژ توسط حسگرها ایجاد می‌شود، نصب گردیده است. نمای کلی مدار الکتریکی در (شکل ۷)نشان داده شده است.



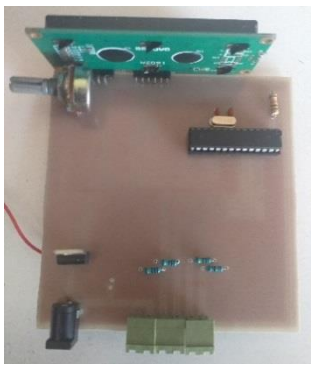
شکل ۵– (a) پتانسیومتر ۱۰ کیلو اهمی، (b) صفحه نمایش

Fig.5. (a) Potentiometer10 kHz, **(b)** Monitor



شکل ٦– رگولاتور مدل LM7805

Fig.6. Model LM7805 regulator



شکل ۷– نمای کلی مدار الکتریکی

Fig.7. Overview of the electrical circuit

آزمون دستگاه

برای آزمون دستگاه، در ابتدا جهت سنجش حسگرهای نصب شده روی آن، تعداد ۱۰۰۰ دانه شلتوک را که وزن آن‌ها معادل ۲۶ گرم می‌باشد، با مقدار مشخصی کاه و کلش مخلوط کرده، مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار داده تا میزان خطای مربوط به سنسورها در زمان کار دستگاه مشخص شود. سپس نمونه آزمایشگاهی از رقم پرمحصول برنج نوع فجر که عملکرد مزرعه‌ای آن ۶۰۰۰ کیلوگرم در هکتار است، انتخاب می‌شود (Bakhshandeh, 2019). ظرفیت مزرعه‌ای کمباین ۰/۴۴ هکتار در ساعت محاسبه شد (Tabatabaei *et al.*, 2013). مدت زمان انجام آزمایش برای یک کیلوگرم نمونه آزمایشگاهی با توجه به ظرفیت مزرعه‌ای کمباین، میزان کاه و کلش و دانه‌های اتلاف شده همراه آن و نسبت عرض خروجی کمباین به عرض دستگاه طراحی شده به مدت ۷/۵ ثانیه تنظیم شد. نمونه آزمایشگاهی برای میزان دانه تلف شده در یک کیلوگرم کاه وکلش خالص قسمت انتهای کمباین محاسبه شده است. میزان دانه تلف شده نسبت به عملکرد محصول (۶۰۰۰ کیلوگرم در هکتار)، ۳ درصد برآورد شد. قابل ذکر است که این میزان تلفات برای نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده بود و نتیجه ارزیابی سامانه سنجش تلفات نیست.

نسبت کاه (کاه و کلش و تلفات دانه) به دانه (عملکرد محصول برنج) ۰/۶ می‌باشد (Taheri *et al.*, 2019). رابطه (۱) میزان کاه که شامل کاه وکلش و دانه‌های تلف شده است را نشان می‌دهد. رابطه (۲) میزان دانه‌های تلف شده (۳ درصد عملکرد محصول) در این مقدار کاه (۳۶۰۰ کیلوگرم به‌دست آمده از رابطه ۱) را نشان می‌دهد

$$6000\ \text{kg ha}^{-1} \times 0.6 = 3600\ \text{kg ha}^{-1} \quad (۱)$$

$$6000\ \text{kg ha}^{-1} \times 0.03 = 180\ \text{kg ha}^{-1} \quad (۲)$$

بنابراین وزن کاه و کلش خالص بدون تلفات دانه در ۶۰۰۰ کیلوگرم برداشت در هکتار برابر با ۳۴۲۰kg ha^{-1} =۱۸۰ – ۳۶۰۰ می‌باشد.

طرفین بر ۳۴۲۰ تقسیم می‌شود. بنابراین در یک کیلوگرم کاه کلش خالص مقدار ۰/۰۵۲۶۳ کیلوگرم یا ۵۲/۶۳ گرم دانه محاسبه می‌شود.

برای شبیه‌سازی ریزش مواد از قسمت انتهای کمباین، نمونه آزمایشگاهی به‌طور یکنواخت روی صفحه مشبک ریخته شد. کارایی دستگاه برای نمونه آزمایشگاهی برای رطوبت در سه سطح ۱۲، ۱۸ و ۲۴ درصد مطابق با شرایط واقعی برداشت محصول، شیب صفحه مشبک در سه سطح ۲۵، ۳۷ و ۴۵ درجه بر اساس تحقیقات کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2010) و زاویه نصب الک‌های کمباین برنج و همچنین سرعت دورانی صفحه مشبک که مشابه کار واحد جداکننده در کمباین می‌باشد، در سه سطح ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ دور بر دقیقه بر مبنای سطوح رطوبت نمونه، شیب صفحه مشبک و زمان اجرای آزمایش به مدت ۷/۵ ثانیه تنظیم شد.

آزمون در قالب فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار صورت گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GenStat و رسم نمودار در محیط اکسل انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۹۹٪ صورت گرفت. کدنویسی برنامه در محیط آردوینو استفاده شد.

نتایج و بحث

میزان تلفات اندازه‌گیری شده به‌وسیله حسگر، بر حسب تعداد دانه‌ها می‌باشد. در قسمت کدنویسی تعداد دانه‌ها به وزن معادل تبدیل شده است. تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف و تأثیرات هر یک از آن‌ها بر کارائی دستگاه در جدول‌های ۱ تا ۵ نشان داده شده است.

بررسی جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) در رابطه با فاکتور تعداد دانه‌های تلف شده برنج بیانگر این مطلب است که اختلاف معنی‌داری در سطح ۱٪ بین تمامی تیمارها وجود دارد.

جدول ۲ که به اثر متقابل سرعت دورانی صفحه مشبک و درصد رطوبت نمونه آزمایشگاهی اشاره دارد، اختلاف معنی‌داری بین گروه‌ها را در سطح احتمال ۱ درصد نشان می‌دهد. براساس آزمایش‌ها و داده‌های دریافتی از آن، بهترین جدایش دانه از کاه و کلش، در سرعت دورانی ۱۰۰ دور بر دقیقه و رطوبت ۱۲ درصد می‌باشد که علت آن ارتعاش زیاد صفحه مشبک در سرعت دورانی بالا و پراکندگی نمونه آزمایشگاهی به دلیل رطوبت پایین می‌باشد، همچنین با کاهش سرعت دورانی و افزایش درصد رطوبت، میزان جدایش دانه‌ها نیز کاهش می‌یابد. از مهم‌ترین دلیل این نتیجه می‌توان به میزان ارتعاش در سرعت‌های متفاوت اشاره کرد، به طوری که با کاهش سرعت دورانی صفحه مشبک از میزان ارتعاش صفحه مشبک نیز کاسته می‌شود و افزایش میزان رطوبت، باعث تراکم زیاد نمونه آزمایشگاهی و جدایش کمتر دانه‌ها از کاه و کلش می‌شود. کمترین میزان کارایی دستگاه در سرعت دورانی۵۰ دور در دقیقه و رطوبت ۲۴ درصدی نمونه آزمایشگاهی (متناسب با شرایط برداشت مکانیزه) می‌باشد و نتایج مشاهده شده در این قسمت را می‌توان به دلیل رطوبت بالا در نمونه آزمایشگاهی دانست که در این صورت نمونه آزمایشگاهی حجمی متراکم به خود گرفته و با توجه به سرعت دورانی پایین، دانه‌ها در بین کاه و کلش باقی می‌مانند. نتایج حاصله با نتایج آزمایش‌های شریفی (Sharifi sangdeh, 2018)، که در پژوهش خود به تاثیر میزان رطوبت بر تلفات برنج (رقم هاشمی)، در

رطوبت‌های مختلف شلتوک هنگام برداشت (۱۷، ۱۹ و ۲۲ درصد بر پایه وزن خشک) پرداخت هم‌خوانی دارد.

جدول ۳ اثر متقابل شیب صفحه مشبک و رطوبت نمونه آزمایشگاهی را روی کارایی دستگاه نشان می‌دهد. با افزایش هر دو تیمار میزان کارایی دستگاه سیر نزولی پیدا می‌کند، زیرا با افزایش شیب صفحه مشبک، سرعت حرکت نمونه آزمایشگاهی بر روی صفحه مشبک افزایش یافته و مدت زمان کمتری برای جدایش دانه از کاه و کلش صرف می‌شود.

جدول ۱- جدول تجزیه واریانس اثر تغییر متغیرها روی کارایی دستگاه

Table 1- ANOVA of the treatment variations on device performance

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of square
رطوبت Moisture	2	111016.44**
سرعت دورانی Rotational speed	2	13484.33**
شیب Tilt	2	1219504.11**
رطوبت*سرعت Moisture* Rotational speed	4	539.61**
رطوبت*شیب Moisture* Tilt	4	5370.22**
سرعت* شیب Rotational speed*Tilt	4	12321.61**
رطوبت*سرعت* شیب Tilt * Rotational speed* Moisture	8	1393.92**
خطا Error	54	77.94
کل Total	80	

** معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱٪

** Significant at 1% of probability levels

جدول ۲- تأثیر سرعت دورانی و رطوبت بر کارایی دستگاه

Table 2 - Effect of rotational speed and moisture on device performance

سرعت Rotational speed (rpm)	رطوبت Moisture (%)			
	12	18	24	میانگین Mean
50	1699[b]	1625[d]	1581[f]	1635[c]
75	1707[b]	1624[d]	1588[f]	1642[b]
100	1755[a]	1665[c]	1610[e]	1677[a]
میانگین Mean	1720[a]	1644[b]	1593[c]	

بهترین کارایی در این آزمایش‌ها، رطوبت ۱۲ درصد و شیب ۲۵ درجه مشاهده شد. کارایی دستگاه در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه با رطوبت ۱۲ درصد و شیب ۳۷ درجه بهتر از کارایی دستگاه در رطوبت ۲۴ درصد و شیب ۲۵ درجه است، دلیل آن را می‌توان، افزایش سطح رطوبت نمونه آزمایشگاهی دانست که مانع پراکندگی کامل کاه و کلش جهت جدایش بیشتر دانه روی صفحه مشبک می‌گردد. کمترین میزان کارایی دستگاه در شیب ۴۵ درجه و رطوبت ۲۴ درصد نمونه در سرعت ۱۰۰ دور دقیقه مشاهده شد. نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج هاریسون (Harisson, 1991) در محصول جو که بیان‌کننده کاهش تلفات کوبش با کاهش میزان رطوبت دانه است و همچنین نتایج بررسی‌های ولیعهدی و همکاران (Valiahdi *et al.*, 2014) که در زمینه درصد رطوبت دانه بر ریزش در واحد تمیزکننده می‌باشد هم‌خوانی دارد.

با توجه به جدول ۴ که اثر متقابل سرعت دورانی و شیب صفحه

مشبک را بر کارایی دستگاه نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر سرعت دورانی و کاهش در سطح شیب صفحه مشبک، بهترین جدایش در دستگاه صورت می‌گیرد. این موضوع احتمالاً به دلیل میزان ارتعاش زیاد در سرعت دورانی بالا و زمان کافی برای جدایش دانه از کاه و کلش در شیب کم صفحه مشبک می‌باشد. کمترین کارایی دستگاه در سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه و شیب ۴۵ درجه می‌باشد که مهم‌ترین دلیل آن را می‌توان افزایش سرعت حرکت نمونه آزمایشگاهی بر روی صفحه مشبک بر اثر سرعت دورانی بالا و شیب زیاد صفحه مشبک در نظر گرفت. این دلیل باعث می‌شود فرصت کافی برای جدایش دانه از کاه و کلش وجود نداشته باشد. کریمی و همکاران (Karimi *et al*., 2010) تحقیقاتی را با لودسل انجام داده‌اند که نتایج آزمایش‌ها نشان داد بهترین زاویه برای جدایش محصول، ۳۷ درجه می‌باشد که با آزمایش فوق جهت قرارگیری صفحه مشبک در بهترین وضعیت خود (۲۵ درجه) هم‌خوانی نداشته که دلیل آن به‌علت عدم استفاده از سرعت دورانی به‌عنوان تیمار می‌باشد به گونه‌ای که کاه و کلش از روی صفحه مشبک بدون هیچ نیرو و عکس‌العملی همانند سرسره به طرف پایین آمده تا عمل جدایش انجام پذیرد .

جدول ۳- تأثیر شیب و رطوبت بر کارایی دستگاه

Table 3- Effect of tilt and moisture on device performance

شیب (درجه) Tilt	رطوبت Moisture (%)			
	12	18	24	میانگین Mean
25	1910[a]	1821[b]	1761[d]	1831[a]
37	1795[c]	1689[e]	1636[f]	1706[b]
45	1455[g]	1412[h]	1383[i]	1417[c]
میانگین Mean	1720[a]	1644[b]	1593[c]	

جدول ٤- تأثیر سرعت دورانی و شیب بر کارایی دستگاه

Table 4- Effect of rotational speed and tilt on device performance

سرعت دورانی Rotational speed	شیب Tilt			
	25	37	45	میانگین Mean
50	1792[c]	1669[f]	1444[g]	1635[c]
75	1826[b]	1695[e]	1406[h]	1644[b]
100	1876[a]	1755[d]	1400[h]	1677[a]
میانگین Mean	1831[a]	1706[b]	1417[c]	

جدول ۵- تأثیر سرعت دورانی، شیب و رطوبت بر کارایی دستگاه

Table 5- Effect of rotational speed, tilt and moisture on device performance

سرعت دورانی Rotational speed	رطوبت Moisture	شیب Tilt		
		25	37	45
50	12	1851[d]	1746[h]	1500[n]
	18	1781[f]	1655[k]	1438[o]
	24	1743[h]	1607[m]	1393[pq]
75	18	1916[b]	1766[g]	1438[o]
	18	1811[e]	1685[j]	1401[p]
	24	1750[h]	1635[l]	1380[qr]
100	12	1964[a]	1873[c]	1428[o]
	18	1872[c]	1726[i]	1397[p]
	24	1791[f]	1664[k]	1376[r]

با توجه به جدول ۵ که مقایسه اثرات متقابل سه‌گانه سرعت دورانی صفحه مشبک، شیب صفحه مشبک و رطوبت نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با افزایش سطح سرعت دورانی صفحه مشبک در زوایای ۲۵ و ۳۷ درجه در مقادیر کمینه رطوبت، کارایی دستگاه بهتر بوده که از دلایل آن می‌توان به ارتعاشات زیاد در سرعت دورانی بالا و کاهش تراکم در مقادیر پایین رطوبت و زمان کافی برای جدایش دانه‌ها با توجه به زوایای مذکور اشاره کرد. از طرفی با افزایش سرعت دورانی در زاویه ۴۵ درجه در مقادیر مختلف رطوبت کارایی دستگاه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین کارایی دستگاه مربوط به بیشترین سطح سرعت دورانی (۱۰۰ دور در دقیقه)، بالاترین سطح رطوبتی نمونه آزمایشگاهی (۲۴ درصد) و بیشترین شیب صفحه مشبک (۴۵ درجه) می‌باشد، از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به عدم زمان کافی با توجه به شیب صفحه مشبک برای جدایش دانه از کاه و کلش و تراکم زیاد نمونه آزمایشگاهی با توجه به رطوبت زیاد آن اشاره کرد. از نکات مهم و قابل توجه می‌توان به تأثیر شیب و رطوبت اشاره کرد به طوری که در سرعت بیشینه، کارایی دستگاه در شیب ۳۷ درجه و رطوبت ۱۲ درصد بهتر از شیب ۲۵ درجه و رطوبت ۲۴ درصد نمونه آزمایشگاهی می‌باشد که بیانگر تأثیر رطوبت بر کارایی دستگاه می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج تحقیق علیمحمدزاده و همکاران (Alimohammadzadeh *et al.*, 2015) که در مورد تأثیر رطوبت محصول و سرعت دورانی کمباین بر میزان تلفات محصول می‌باشد همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمون آزمایشگاهی در این کار تحقیقاتی نشان داد که اثر سرعت دورانی صفحه مشبک، شیب صفحه مشبک، رطوبت نمونه و همچنین اثر متقابل تیمارها بر کارایی دستگاه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. خطای مربوط به حسگرها نیز ۳ درصد می‌باشد و با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها، مشاهده شد، دستگاه در سرعت دورانی ۱۰۰ دور بر دقیقه صفحه مشبک، شیب ۲۵ درجه‌ای صفحه مشبک و رطوبت ۱۲ درصدی نمونه آزمایشی در بالاترین سطح از کارایی خود به میزان ۹۱/۵۱٪ قرار دارد.

References

1. Bakhshandeh, A. 2019. Deputy Minister of Planning and Economic Affairs, Minister of Agriculture of Iran.
2. Aghagolzadeh, H. 2005. Specifications of machinery needed for mechanized rice cultivation. 11th National Rice Conference of the country. Qazvin Agricultural Jihad Organization Agricultural Statistics 2018.
3. Alimohammadzadeh, S., H. ShamsAbadi, M. Azadbakht, and M. H. Rezghi. 2015. Comparison of quantitative losses of different combine harvesters in rice harvesting with different moisture content. Research Findings on Improving Crop Production 1 (1): 13-28.
4. Bernhardt, G., and R. Hubner. 2010. Patent No. 0199291. United States.
5. Eldredge, K. W., and R. C. Blyth. 2001. Grain loss Indicator. United States Patent. Number 4,490, 964.
6. Ferreira, D. B., A. Ferreira, S. Alonco, and H. Bley. 2001. Grain loss monitoring during all harvest season (gathering and processing losses), in the irrigated rice crop, and its results in reduction losses due to immediate adjustments in the combines. paper No. 011075. ASAE, Annual International Meeting, Sacramento, California, USA.
7. Harisson, H. B. 1991. Rotor power and losses of an axial-flow combine. Trans. ASAE 34 (1): 60-64.
8. Hedayatipour, A., and M. Rahmati. 2007. Study of drying temperature and final moisture content of rice on crop yield and conversion coefficient of high yield varieties in Mazandaran province. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 13 (6).
9. Karimi, H., H. Navid, A. Rostami, and A. Taheri hajivand. 2005. Design and Construction of a Grain Loss Monitor for Combine Harvester Using Load Cell. Journal of Agricultural Mechanization 1 (1).
10. Lashgari, M. 2009. Implementation and evaluation of fuzzy logic controller for automated grain combine adjustment. Journal of Agricultural Engineering Research 1 (3).
11. Mostofi Sarkari, M. R. 2009. Field Evaluation of grain loss monitor in different harvesting conditions on combine JD 955. In: Proceedings of 5th National Conference of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Agriculture Faculty. Ferdowsi University of Mashhad. pp. 946-956. (In Persian).
12. Mostofi Sarkari, M. R., M. S. Valiahdi, and I. Ranjbar. 2014. Field Assessment of End-of-Grain Combine Harvesters Equipped with a Grain Loss Monitor in JD-955 and JD-1165 Combines, Journal of Agricultural Machinery 4 (2): 335-343. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v4i2.29077.
13. Sharifi sangdeh, S. 2018. Investigation of the effect of grain moisture and type of 4LZ-2.5A and ICR20 combines on mortality of different rice harvesting units. Second National Conference on Harvesting and After Harvesting of Agricultural Technology, Mashhad, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center.
14. Strelioff, P., S. William, and J. Dale. 1977. Grain loss Monitor. United States Patent. Number 4,036,065.

15. Tabatabaei, R., H. Aghagolzadeh, and B. Bakhshi. 2013. Field Testing and Evaluation of a Complete Nutrition Harvesting Combine. 7th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization.
16. Taheri, A., H. Navid, H. Rostami, and H. Karimi. 2019. Field Assessment of Combine Seed Loss Monitoring Machine. 6th Scientific Research Congress on Development and Promotion of Agricultural Sciences and Natural Resources in Iran.
17. Valiahdi, M. S., I. Rangbar, M. R. Mostofi Sarkari, and M. Majdi. 2014. Investigation of Processing Losses on a Jundir Model 1165 Combine with a Grain Loss Monitor. National Conference on Non-Agent Defense in Agriculture.
18. Zhao, Z., Y. Li, J. Chen, and J. Xo. 2011. Grain separation loss monitoring system in combine harvester. Computers and Electronics in Agriculture 183-188.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 193-206

Potential Assessment of Energy Providing for Bagasse-Based Chipboard Industry Using Sugarcane Waste (A case study: Debal Khozaie Agro-Industry)

E. Alboativi[1], A. Asakereh[2*], H. Zaki Dizaji[3], Y. Mansoori[2]

1- MSc of Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor of Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
3- Associate Professor of Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: A.asakereh@scu.ac.ir)

Received: 04-07-2020
Revised: 02-09-2020
Accepted: 19-10-2020

How to cite this article:
Alboativi, E., A. Asakereh, H. Zaki Dizaji, and Y. Mansoori. 2022. Potential Assessment of Energy Providing for Bagasse-Based Chipboard Industry Using Sugarcane Waste (A case study: Debal Khozaie Agro-Industry). Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 193-206. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.87600

Introduction: Bagasse is the dry pulpy fibrous residue that remains after sugarcane stalks are crushed for juice extraction. Bagasse is widely used in conversional and by-product industries. Bagasse is commonly used as a substitute for wood in many tropical and subtropical countries for the production of pulp, paper, and board. One of the most important conversional industries in the sugarcane agro-industry is chipboard production. In recent years, two chipboard factories from bagasse were exploited in Khuzestan province. In the production of chipboard from bagasse, a lot of waste is produced, most of which include pith. The waste is transferred to the outside of the factory at a great cost and energy level. Also, annually, a large amount of surplus bagasse of conversional Industries is obtained in Khuzestan agro-industries. These wastes cause many environmental and health problems, while these wastes can be used to generate energy. On the other hand, chipboard industries consume a lot of energy which is mostly fossil energy. Nowadays, in many sugarcane agro-industries in different countries, wastes are used to generate energy for sugar plants and conversional industries. Bagasse is often used as a primary fuel source for sugar mills.

Materials and Methods: Current research is focused on the direct energy consumed in chipboard production from sugarcane bagasse and whether it can be provided by using residues and wastes of Debal Khozaie Agro-Industry Company. Data were collected from agro-industry companies as well as by sampling and measuring waste, input and energy consumption at the chipboard factory of Debal Khozaie. Direct energy consumed in the chipboard production from bagasse includes diesel fuel, electricity, natural gas, and labor. Input and output values of materials (bagasse, pith, etc.), and energy consumption (electricity, diesel, natural gas, etc.) were collected using both laboratory tests and data available in agro-industry. Potential of energy generation from bagasse, pith, wood chips, and straw in Debal Khozaie agro-industry, were considered by the direct burning method. Also, the potential of biogas production from vinasse in agro-industry for energy production was calculated. The moisture of bagasse (fresh bagasse, 24 hours, five days, 30 days, and 45 days after gathering), outdoor dried pith, outdoor dried straw and wood chip were measured based on the ASTM D2974 standard method in the laboratory. Ash percentage of bagasse, peat, straw, and Wood chips were measured using a furnace, desiccator and a scale. Also, the lower heating value of bagasse, straw, pith, and wood chips were measured using a calorimeter bomb.

Results and Discussion: The direct energy consumption in the chipboard factory was determined to be 5.829 GJ m^{-3} of produced chipboard. Natural gas and electricity were the major sources of direct energy with 78.52% and 18.87% share, respectively. To replace these sources, pith and woodchips form chipboard factory, sugarcane leaves, remainder sugarcane bagasse, and vinasse from molasses-based Razi alcohol factory were considered. Properties of the substituted resources were determined including ash, moisture content, heating value (using bomb calorimeter), and amount of woodchips along with the biogas potential from anaerobic fermentation of vinasse. Results showed that woody residues from chipboard factory and Debal Khozaie Agro-Industry Company had the potential to provide 4.33 fold the energy provided by gas in the chipboard factory, considering the efficiency equal to 60%. Using the residues of the chipboard factory individually, it is possible to replace all the consumed natural gas and electricity energy needed in the chipboard factory as well. According to the volume of available vinasse, the potential biogas production from this resource estimated to be 8.82 Gm^3.

Conclusion: Electricity, natural gas, and diesel fuel constitute the direct energy consumed in the production of chipboard, and natural gas with 78.52% has the highest share. Electricity accounts for 18.87% of direct energy consumption. The specific energy of chipboard production at the chipboard factory was 5.829 GJ m^{-3}. Only using the pith of chipboard factory can produce 2.85 times the total energy of natural gas consumed in chipboard factory. Investigation of the potential of biogas production from vinasse in Debal Khozaie agro-industry showed that it is possible to generate energy equivalent to 8824.3 thousand cubic meters of natural gas. Overall, the study showed that using the wastes of chipboard factory and sugarcane agro-industry has the potential to replace the entire natural gas and electricity consumption in chipboard factory.

Keywords: Bagasse, Heating value, Pith, Sugarcane, Vinasse

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۲۰۶-۱۹۳

مطالعه امکان تأمین انرژی تولید تخته نئوپان از باگاس با استفاده از ضایعات نیشکر (مطالعه موردی: کشت و صنعت دعبل خزاعی)

ابراهیم البوعطیوی[۱]، عباس عساکره[۲*]، حسن ذکی دیزجی[۳]، یعقوب منصوری[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

چکیده

در این مطالعه مصرف انرژی مستقیم در تولید تخته نئوپان از باگاس نیشکر و امکان جایگزینی آن با ضایعات کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی و صنایع جانبی آن بررسی گردید. انرژی مستقیم مصرفی به ازای هر مترمکعب نئوپان تولیدی ۵/۸۲۹ گیگاژول محاسبه شد که گاز طبیعی، برق و سوخت دیزل به‌ترتیب ۷۸/۵۲، ۱۸/۸۷ و ۲/۶۱ درصد آن را تشکیل می‌دهند. پیت و خرده چوب‌های حاصل از ضایعات کارخانه نئوپان‌سازی، برگ و پوشال نیشکر، باگاس مازاد و ویناس حاصل از تولید الکل از ملاس نیشکر به‌عنوان ضایعات جهت تولید انرژی در نظر گرفته شدند. خاکستر، رطوبت، ارزش حرارتی خالص (با استفاده از بمب کالری‌متر) و مقدار ضایعات خشبی و همچنین پتانسیل تولید زیست‌گاز از تخمیر بی‌هوازی ویناس اندازه‌گیری و محاسبه شد. نتایج نشان داد با استفاده از پسماند خشبی کارخانه نئوپان‌سازی و کشت و صنعت دعبل خزاعی می‌توان ۴/۳۳ برابر کل انرژی گاز مصرفی در کارخانه نئوپان‌سازی انرژی حرارتی با بازده ۶۰ درصد تولید کرد. همچنین با استفاده از ضایعات کارخانه نئوپان‌سازی و باگاس، می‌توان کل گاز و برق مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی را جایگزین کرد. بررسی حجم ویناس و پتانسیل تولید زیست‌گاز از آن نشان داد پتانسیل تولید انرژی معادل ۸۸۲۴۳۱۹ مترمکعب گاز طبیعی در سال وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: ارزش حرارتی، پیت، زیست‌گاز، نیشکر، ویناس

مقدمه

باگاس حاصل از عصاره‌گیری نیشکر در آسیاب کارخانه تولید شکر، کاربرد فراوانی در صنایع تبدیلی و جانبی دارد. از نظر ترکیب و ساختار، باگاس شبیه چوب و به رنگ زرد کاهی است. باگاس در صنایع کاغذسازی و نئوپان‌سازی خصوصیات مطلوبی از خود نشان داده است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای چوب درختان در این صنایع باشد (Kim and Day, 2011). در استان خوزستان، حجم بسیار زیادی باگاس تولید می‌شود که بخش عمده آن با صرف هزینه و انرژی زیاد به زمین‌های اطراف کارخانه نیشکر دفع می‌شود و عمدتاً دچار آتش‌سوزی ناخواسته می‌شود که به دلیل سوختن ناقص، موجب انتشار گازهای سمی و آلودگی هوا می‌شود. میانگین تولید باگاس از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ برابر با ۲/۳۴ میلیون تن با رطوبت ۵۰ تا ۵۵ درصد در سال بوده است (Anonymous, 2018). در راستای استفاده از این حجم زیاد باگاس و سایر پسماند نیشکر، صنایع جانبی مانند تولید تخته نئوپان، MDF[۳]، کاغذسازی، خوراک دام، کمپوست، الکل و خمیرمایه ایجاد یا مطرح شده‌اند. همچنین در مواردی از باگاس به‌عنوان منبع انرژی در کوره نیروگاه‌های کشت و صنعت (شرکت کارون) استفاده شده است. احداث دو کارخانه تولید تخته نئوپان از باگاس نیشکر (نئوپان‌سازی شرکت کشت و صنعت کارون و نئوپان‌سازی شرکت کشت و صنعت دعبل خزاعی با نام آریانا) در استان خوزستان از مهم‌ترین اقدامات در این زمینه می‌باشد. مجموع ظرفیت اسمی تولید تخته نئوپان این دو کارخانه برابر با ۱۴۰۰۰۰ مترمکعب در سال است. یکی از موارد مهم در صنایع تولیدی صفحات فشرده چوبی به‌خصوص از باگاس، مصرف پسماندهای کشاورزی و مواد چوبی کم‌ارزش و تبدیل این مواد زائد به منابع و محصولاتی با

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: A.asakereh@scu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.87600

3- Medium Density Fiberboard

ارزش افزوده (مانند منبع انرژی، تخته نئوپان و ملامینه) و به دنبال آن حفظ منابع طبیعی و محیطزیست است (Janghathaikul and Gheewala, 2005). در صنایع تولیدی تخته فشرده در استان خوزستان، به ازای تولید هر مترمکعب نئوپان، ۳/۱ تن باگاس با رطوبت ۵۴-۵۰ درصد مصرف می‌گردد که از آن، ۱/۲۴ تن پیت جدا می‌شود. در مرحله سمباده‌زنی نیز حدود ۱۸ درصد از وزن تخته‌های خام به‌صورت خرده چوب و غبار سمباده جدا می‌شود. به‌طور کلی حدود ۴۰ درصد از باگاس در قالب مغز، ضایعات برش و سمباده‌زنی تخته‌ها و غبار ناشی از مکنده‌ی الک‌ها و تصفیه هوای داخل سالن تولید، به‌عنوان مواد نامطلوب جدا می‌شود که با مصرف انرژی و هزینه زیادی از واحد تولیدی دورریز می‌شود. جهت دفع ضایعات و مواد دورریز، قسمت قابل‌توجهی از زمین‌های زراعی کشت و صنعت به آن اختصاص داده می‌شود. همچنین آتش‌سوزی ناخواسته این ضایعات (به دلیل گرمای زیاد هوا در استان خوزستان و تمایل به احتراق مواد انباشته شده) و به تبع آن ورود گازهای سمی به جو و ایجاد گرد و غبار زیاد در هوا، مشکلات دیداری و تنفسی شدیدی را برای کارکنان داخل و اطراف کارخانه تولید نئوپان و کشت و صنعت نیشکر به همراه دارد. در بسیاری از موارد، آلودگی هوای ناشی از سوختن ضایعات کشت و صنعت‌ها به شهرهای اطراف آن‌ها نیز می‌رسد.

میانگین تولید نیشکر در استان خوزستان از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ برابر با ۶/۸۸ میلیون تن بوده است که حدود ۳۵-۳۲ درصد وزنی آن را باگاس با رطوبت ۵۵-۵۰ درصد تشکیل می‌دهد (Anonymous, 2018). در سال ۱۳۹۶ تنها ۶/۹۰ درصد باگاس تولیدی (برابر با ۴۷۲۰۰۰ تن) جهت تولید نئوپان و تخته MDF و مقدار کمی (۲۱۰۰۰ تن) جهت تولید کود کمپوست مصرف شده است و بقیه دورریز شده که در نهایت اکثراً طعمه حریق شده‌اند. با توجه به حجم بسیار زیاد این ضایعات که عمدتاً مواد سلولزی هستند، پتانسیل زیادی برای تولید انرژی از آن‌ها می‌توان انتظار داشت (Hasanaki *et al.*, 2019). از طرف دیگر کارخانه‌های تولید نئوپان و تخته فشرده استان خوزستان، خود مصرف‌کننده عمده انرژی هستند که توسط حامل‌های انرژی فسیلی و برق شبکه سراسری تأمین می‌شود.

در سال ۱۹۲۶ کارخانه‌های تولید شکر در جزایر موریس[1] و هاوایی اولین گام را برای تولید انرژی برق با استفاده از باگاس نیشکر را برداشتند که در آن زمان کارخانه‌های موجود در جزایر موریس و هاوایی به‌ترتیب ۲۶ و ۱۰ درصد از انرژی مورد نیاز خود را از سوزاندن باگاس در کوره‌های بخار تأمین می‌کردند (Birru *et al.*, 2016). بررسی و مطالعات باگنت (Baguant *et al.*, 1984) نشان داد که پتانسیل تولید برق از باگاس در منطقه موریس دو برابر مصرف کل برق آن منطقه است. همچنین او اعلام کرد با توجه به کاهش جهانی قیمت قند، صنایع قند با تولید برق از باگاس می‌توانند درآمد خالص خود را افزایش دهند. امروزه در کشورهای پیشرو در تولید نیشکر مانند برزیل (بزرگ‌ترین تولیدکننده‌ی نیشکر) کارخانه‌های تولید نیشکر با استفاده از باگاس و پوشال نیشکر (به‌صورت تولید هم‌زمان برق و گرما[2] جهت حرکت توربین‌های نیروگاه بخاری، حرکت آسیاب‌ها و فرآیند تولید، تصفیه، تبلور و غیره شکر) علاوه بر تأمین انرژی مورد نیاز خود، مازاد انرژی را به‌صورت انرژی الکتریکی به شبکه توزیع برق می‌فروشند (Birru *et al.*, 2016; Rathnasiri *et al.*, 2005). کشور برزیل در سال ۲۰۰۹ حدود سه درصد از نیاز الکتریکی خود را از کارخانه‌های شکر تأمین کرده است. در همان سال میزان تولید برق مبتنی بر باگاس در کارخانه‌های برزیل ۴/۶ گیگاوات ساعت بود که ۲۵ درصد از آن به شبکه برق سراسری تزریق گردید و ۷۵ درصد دیگر جهت مصارف کارخانه‌ها به‌کار گرفته شد. از طرف دیگر در کشور هند نیز میزان تولید انرژی در کارخانه‌های تولید شکر از نیشکر، ۲/۳ گیگاوات ساعت بود که ۱/۳ گیگاوات ساعت آن به شبکه‌ی ملی تحویل داده شده است (Pellegrini and Junior, 2011). در مطالعه‌ای که در کشورهای امریکای لاتین و آفریقا، انجام شد مشخص گردید با استفاده از ۱۴۳ میلیون هکتار قابل کشت و مناسب برای تولید نیشکر در این مناطق، امکان تولید سالانه ۱۱۴۷۰۰۰ گیگاژول انرژی در سال به‌صورت انرژی اولیه و ۹۰۰۰۰ گیگاژول به‌صورت انرژی نهایی (مایع و برق) وجود دارد (Moreira, 2006). مبوهوا و فوکودا (Mbohwa and Fukuda, 2003) بیان می‌کنند، سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های صنعت شکر از نیشکر یک گزینه بسیار خوب برای تولید برق در کشور زیمباوه است. ارزیابی، تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی آن‌ها نشان می‌دهد که توسعه تولید برق از باگاس از لحاظ فنی و اقتصادی در این کشور امکان‌پذیر است. در پژوهشی که در کشور تایلند انجام شد، بیان گردید که با استفاده از ۲۷۲ تن باگاس امکان تولید ۳۴۲ تن بخار با دمای ۴۲۰ درجه سلسیوس وجود دارد. در این مطالعه بیان شده است که باگاس می‌تواند به‌عنوان یک ماده خام دوست‌دار محیطزیست برای تولید برق استفاده شود و پتانسیل زیادی جهت جایگزینی به جای سایر منابع انرژی دارد (Janghathaikul and Gheewala, 2005). در خارج از کشور مطالعات متعدد دیگری در زمینه استفاده از باگاس و ضایعات نیشکر جهت تولید برق و انرژی انجام شده است که در جدول ۱ به نتایج برخی از آن‌ها به‌صورت مختصر اشاره شده است.

در داخل کشور نیز مطالعاتی در زمینه استفاده از باگاس و ضایعات نیشکر به عنوان منبع انرژی صورت گرفته است. جدیدیان و همکاران (Jadidyan *et al.*, 2016) به ارزیابی تولید انرژی حرارتی و کربن فعال از پیت باگاس پرداختند. در این مطالعه بسیاری از خصوصیات پیت باگاس اندازه‌گیری شد. حسنکی (Hasanaki, 2018) به بررسی استفاده از باگاس نیشکر در کشت و صنعت کارون جهت تأمین انرژی کارخانه تولید شکر پرداخت. نتایج ایشان نشان داد، ضایعات نیشکر می‌تواند در حدود ۱۸ درصد از حرارت مورد نیاز کارخانه نیشکر را تأمین کند.

1- Mauritius

2- Combined Heat and Power (CHP)

جدول ۱- مطالعات مشابه در زمینه استفاده از ضایعات نیشکر جهت تولید انرژی

Table 1- Similar studies on the use of sugarcane waste for energy production

کشور یا منطقه مورد مطالعه Country or area of study	نتایج Results	منبع Reference
افریقای جنوبی South Africa	پتانسیل تولید یک گیگاوات ساعت برق از باگاس در سال وجود دارد. There is the potential to generate one GWh/year of electricity from bagasse.	Mashoko *et al.*, 2013
اندونزی Indonesia	سالانه پتانسیل تولید ۱۶۰ گیگاوات ساعت برق از باگاس همراه با کاهش انتشار ۲۴۰۷۷۴ تن گاز دی‌اکسید کربن وجود دارد. Annually, there is a potential to generate 160 GWh of electricity from bagasse with a reduction of 240,774 tons of CO_2 emissions.	Restutia and Michaelowa, 2007
نیجریه و افریقای جنوبی Nigeria and South Africa	گسترش استفاده از باگاس به‌عنوان منبع تولید انرژی می‌تواند در حل بحران کمبود انرژی در این دو کشور و خطرات و مشکلات آلودگی ناشی از باگاس کمک زیادی کند. همچنین تولید انرژی از باگاس موجب افزایش اشتغال در آن‌ها خواهد شد. Expanding the use of bagasse as an energy source can help a lot in solving the energy shortage and risks and pollution problems resulting from the bagasse in these two countries. Alaso, energy production from bagasse will increase employment in these countries.	Mohlala *et al.*, 2016
جزیره موریس Mauritius Island	انرژی برق حاصل از سوختن باگاس در زمینه انتشار آلاینده‌های هوا، ایجاد باران‌های اسیدی و کاهش مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر بهتر از تولید برق از زغال‌سنگ می‌باشد. Electricity generated by burning bagasse is better than electricity from coal in terms of air pollution, acid rain and non-renewable energy consumption.	Ramjeawon, 2008
استرالیا Australia	استفاده از باگاس جهت تولید انرژی در کارخانه‌های نیشکر نسبت به سایر منابع انرژی، هزینه کمتری دارد. Using bagasse to generate energy in sugarcane factories is less expensive than other energy sources.	Evans *et al.*, 2010
برزیل Brazil	سوزاندن باگاس جهت تولید برق نسبت به همه گزینه‌های استفاده از باگاس، بیشترین سود را از منظر سرمایه‌گذاران دارد. Burning bagasse to generate electricity is the most profitable between all options of bagasse usage.	Dantas *et al.*, 2013
پاکستان Pakistan	تولید برق از باگاس در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است. پتانسیل سالانه تولید برق از باگاس ۱۵۹۸ تا ۲۸۹۴ گیگاوات ساعت بیان شده است. Power generation from bagasse has increased dramatically in recent years. The annual power generation potential from bagasse is expressed as 1598 to 2894 GWh.	Arshad and Ahmed, 2016
برزیل Brazil	سالانه پتانسیل تولید ۲۰۲۸۰۰ گیگاوات ساعت از ضایعات خشبی نیشکر به‌صورت پایدار وجود دارد. The sustainable power generation potential from sugarcane waste is 202,800 GWh per year	Flausinio *et al.*, 2014
برزیل Brazil	تولید برق از بقایای نیشکر سودآوری بیشتری نسبت به تولید اتانول از ضایعات نیشکر دارد. Generating electricity from sugarcane waste is more profitable than producing ethanol from it.	Seabra and Macedo, 2007

سلیمانی و همکاران (Soleymani *et al.*, 2018) در مطالعه‌ای به ارزیابی چرخه حیات اتانول تولیدی از ملاس نیشکر در ایران پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید اتانول ۶۰ درصد کمتر از انتشار آلاینده‌های مربوط به سوخت دیزل می‌باشد. همچنین آن‌ها بیان کردند که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برق با استفاده از سوزاندن مستقیم باگاس در کوره‌ها نسبت به برق شبکه سراسری، ۷۰ درصد کمتر است. در استان‌های شمالی ایران کارخانه‌های نئوپان‌سازی متعددی از کوره‌های غبارسوز جهت تأمین انرژی حرارتی کارخانه استفاده می‌کنند. این کوره‌ها در ابتدا به‌منظور از بین بردن پسماند کارخانه‌ها و با اعمال فشار سازمان حفاظت محیط‌زیست و جنگلداری احداث گردیده بودند ولی پس از اجرای طرح هدفمندسازی یارانه‌ها و گران شدن قیمت سوخت فسیلی در ایران، تمایل کارخانه‌داران در استفاده از این گونه کوره‌ها برای تأمین انرژی فزونی یافت (Hasanaki, 2018). هارونی و همکاران (Haroni *et al.*, 2018) و اندکایی‌زاده و همکاران (Andekaizade *et al.*, 2018) انرژی مصرفی تولید نیشکر در کشت و صنعت‌های خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعات مقدار کل انرژی مصرفی در تولید نیشکر و سهم هر یک از نهادها در آن محاسبه گردید.

با وجود راه‌اندازی برخی صنایع جانبی مصرف‌کننده باگاس، سالانه حجم زیادی از باگاس و ضایعات نیشکر بدون استفاده می‌ماند که به نظر می‌رسد با استفاده از آن می‌توان بخشی از انرژی کارخانه‌های تولید شکر و صنایع جانبی آن را تأمین کرد. در این مطالعه پتانسیل و امکان استفاده از باگاس اضافی و ضایعات تولید

تخته نئوپان از باگاس جهت تأمین انرژی کارخانه نئوپان‌سازی در کشت و صنعت دعبل خزاعی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

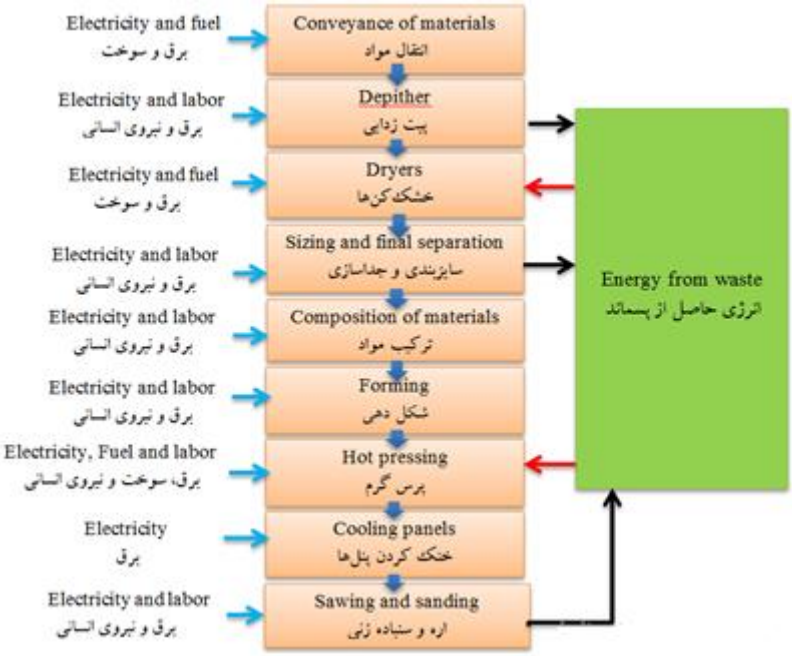
منطقه مورد مطالعه

شرکت کشت و صنعت دعبل خزاعی در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر اهواز و در فاصله بین رودخانه کارون و جاده اهواز- آبادان قرار دارد. این شرکت در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض ۳۱ درجه و ۸ دقیقه قرار دارد و با مساحتی حدود ۱۲۲۰۰ هکتار قابلیت تولید یک میلیون تن نیشکر در هر سال زراعی را دارد. این کشت و صنعت دارای کارخانه تولید شکر با ظرفیت اسمی ۱۰۰۰۰۰ تن شکر خام و ۱۷۵۰۰۰ تن شکر تصفیه شده در سال است. صنایع جانبی مستقر در این کشت و صنعت عبارتند از: کارخانه تولید خمیرمایه و الکل (شرکت خمیرمایه و الکل رازی) با ظرفیت اسمی ۳۳ میلیون لیتر در سال، کارخانه تولیدی نئوپان با ظرفیت اسمی ۱۱۰۰۰۰ مترمکعب در سال (شرکت آریانا)، کارخانه خوراک دام (در حال تکمیل) با ظرفیت اسمی ۱۰۰۰۰۰ تن در سال و کارگاه تولید زغال از باگاس با استفاده از روش پیرولیز (هنوز افتتاح نشده است). شرکت تولیدی تخته فشرده آریانا (بزرگ‌ترین کارخانه نئوپان‌سازی کشور)، به ظرفیت اسمی چهارصد مترمکعب در روز در زمینی به مساحت ۱۰ هکتار در مجاورت کارخانه تولید شکر شرکت کشت و صنعت دعبل خزاعی قرار دارد.

اطلاعات و داده‌های مورد نیاز از آمار موجود در دفاتر ثبت شرکت‌های کشت و صنعت نیشکر (به‌ویژه کشت و صنعت دعبل خزاعی)، انجمن صنفی کارخانه‌های قند و شکر ایران، مصاحبه حضوری با کارشناسان و مهندسین کشت و صنعت و کارخانه نئوپان‌سازی، نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و مطالعات کتابخانه (مانند آمارنامه‌ها ترازنامه‌ها و غیره) جمع‌آوری شد.

محاسبه انرژی مصرفی مستقیم و ضایعات تولیدی

مراحل مختلف تولید نئوپان از باگاس نیشکر و انرژی‌های مستقیم مصرفی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱ مشاهده می‌گردد، انرژی‌های مستقیم مصرفی در تولید نئوپان از باگاس شامل انرژی سوخت دیزل (گازوئیل)، برق، گاز طبیعی و نیروی انسانی است. انرژی برق در الکتروموتورها برای چرخاندن و راه‌اندازی ادوات و تجهیزات مختلف مانند ادوات پیت‌زدایی، آسیاب‌های خردکننده، نقاله‌ها، مکنده‌ها، آسیاب‌های ثانویه، الک‌ها، مخلوط‌کن‌ها، پرس غلتکی، الکتروموتور پمپ هیدرولیکی، بالابر چند طبقه‌ای پرس، انواع فن و پروانه‌ها، دستگاه سمباده‌زنی، سیستم تهویه، روشنایی و غیره مصرف می‌شود. سوخت دیزل در ماشین‌های حمل و نقل جهت جابه‌جایی محصول تولیدی (تخته‌های نئوپان)، دفع ضایعات به خارج از کارخانه و جابه‌جایی فیبر در کارخانه استفاده می‌شود. گاز طبیعی بیشتر جهت تولید گرما در خشک‌کن‌ها و بخش کمی جهت تأمین گرما در مرحله پرس گرم و ملامینه مصرف می‌شود.



شکل ۱- مراحل تولید نئوپان، انرژی مصرفی و پسماند تولیدی

Fig. 1. Processes of chipboard production, energy consumption and waste generation

مقادیر ورودی و خروجی مواد (باگاس، پیت و غیره) و انرژی‌های مصرفی (برق، سوخت دیزل، گاز طبیعی و غیره) در بازه‌های زمانی معین از طریق کنتور، باسکول و فرم سوخت‌گیری ماشین‌ها محاسبه گردید. انرژی الکتریکی در مراحلی که کنتور وجود دارد، برابر با مقداری است که کنتور نشان می‌دهد و در مکان‌ها و مراحلی که کنتور کلی وجود ندارد از طریق توان الکتروموتورها یا دستگاه‌های برقی، ولتاژ و شدت جریان آن ها و ضریب توان، مقدار برق مصرفی محاسبه شد. با اندازه‌گیری محصول تولید شده و برق مصرفی در بازه‌ی زمانی مشخص، مقدار برق مصرفی جهت تولید یک مترمکعب محصول از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$Ee=(W\times E)/M \quad (۱)$$

که در آن، Ee انرژی برق مصرفی جهت تولید هر مترمکعب نئوپان بر حسب مگاژول، W میزان مصرف انرژی الکتریکی در واحد زمان بر حسب کیلووات ساعت، M میزان تولید محصول در واحد زمان‌بر حسب مترمکعب و E انرژی معادل هر واحد کیلووات ساعت بر حسب مگاژول است. معادل هر کیلووات ساعت برق برابر است با ۳/۶ مگاژول است (Kitani, 1999).

حجم گاز طبیعی مصرفی با استفاده از کنتور گاز ورودی اندازه‌گیری شد و با ضرب کردن مقدار حجم آن در ارزش حرارتی گاز طبیعی، مقدار انرژی سوخت مصرفی جهت تأمین گرما محاسبه گردید. ارزش گرمایی هر مترمکعب گاز طبیعی در ایران برابر با ۳۷/۲۶ مگاژول است (Anonymous, 2016). انرژی سوخت دیزل نیز از حاصل‌ضرب مقدار مصرف سوخت در هم‌ارز و محتوای انرژی آن که ۳۸/۷ مگاژول بر لیتر است، به‌دست آمد (Kitani, 1999).

ضایعات عمده کارخانه تولید نئوپان شامل پیت باگاس و ضایعات برش و سمباده‌زنی تخته نئوپان‌های تولیدی است. پیت در مرحله جداسازی مغز و سایزبندی از الیاف مناسب جدا می‌شود. همچنین در کارخانه تولید شکر و کشت و صنعت دعبل خزاعی، حجم زیادی باگاس و پوشال مازاد تولید می‌شود. بنابراین پتانسیل این ضایعات به‌عنوان منابع خشبی جهت تأمین انرژی کارخانه نئوپان‌سازی بررسی شدند.

از محصولات جانبی مهم کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان، ملاس است که در تولید الکل (اتانول)، خمیرمایه، کاغذسازی و موارد دیگر استفاده می‌شود. ملاس پسماند صنایع تولید شکر در مرحله پخت و بلورسازی شیره نیشکر یا چغندرقند می‌باشد. شرکت خمیرمایه و الکل رازی در کشت و صنعت دعبل خزاعی قرار گرفته است و علاوه بر کشت و صنعت دعبل خزاعی، ملاس از سایر کشت و صنعت‌های نیشکر در استان خوزستان نیز به این واحد منتقل می‌شود.

ویناس[1] پسماند مایعی است که از فرآیند تولید الکل از ملاس حاصل می‌شود. این ماده دارای COD[2] و BOD[3] بالایی بوده و در صورت رهاسازی باعث آلودگی آب و خاک می‌گردد (Birru *et al.*, 2016). اغلب از ویناس به‌عنوان کود در کشاورزی استفاده می‌شود ولی به دلیل وجود مواد آلی فراوان در ویناس و تخمیر این مواد در خاک، مشکلات زیست‌محیطی بسیاری در خاک و آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌شود؛ بنابراین به‌جای استفاده مستقیم ویناس به‌عنوان کود باید راه‌حل منطقی‌تری اندیشیده شود. بهترین و آسان‌ترین روش برای کنترل آلودگی ناشی از ویناس هضم بی‌هوازی آن است که منجر به تولید زیست‌گاز نیز می‌شود و باقی‌مانده و پسماند آن بهداشتی بوده و به‌عنوان کود قابل استفاده است (Pourasad *et al.*, 2015). در کارخانه الکل و خمیرمایه رازی وابسته به کشت و صنعت دعبل خزاعی به ازای تولید هر لیتر الکل از ملاس نیشکر ۸ الی ۱۰ لیتر ویناس تولید می‌شود. برنامه تولیدی سالانه شرکت خمیرمایه و الکل رازی، تولید حدود ۳۳ میلیون لیتر الکل و ۸۵۰۰ تن خمیرمایه از ملاس است. در این مطالعه پتانسیل تولید زیست‌گاز از ویناس تولیدی در کارخانه الکل‌سازی کشت و صنعت دعبل خزاعی جهت تولید انرژی محاسبه گردید.

گزینه‌های زیادی برای تبدیل زیست‌توده به انرژی گرمایی و برق وجود دارد که دو فناوری رایج آن شامل سوزاندن مستقیم[4] و تبدیل کردن به گاز[5] است (Mondal and Denich, 2010). سوزاندن مستقیم شامل اکسیداسیون زیست‌توده با هوای اضافی برای تولید گرما، توان مکانیکی و برق است. بازده خالص تبدیل آن بین ۳۰ تا ۴۰ درصد است. تبدیل به گاز شامل تبدیل زیست‌توده به گاز قابل سوختن است. گاز به‌دست آمده به‌عنوان سوخت در فرآیند نیروگاه تولید توان، استفاده می‌گردد. بازده تبدیل در این روش اگر به‌صورت تلفیقی با چرخه سیکل بخار- گاز به‌کار رود، می‌تواند به ۵۰ درصد برسد (Caputo *et al.*, 2005). در حال حاضر روش تجاری و کاربردی برای مواد سلولوزی مانند پیت و باگاس که خاصیت خشبی دارند، سوزاندن مستقیم با بازده متداول ۳۰ درصد برای تولید برق و بازده ۶۰ درصد برای تولید حرارت مستقیم در کوره‌ها است (McKendry, 2002; Caputo *et al.*, 2005; Karaj *et al.*, 2009; Demirbas *et al.*, 2009).

پتانسیل تولید انرژی از پسماندهای نیشکر و نئوپان‌سازی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید.

1- Vinasse
2- Chemical Oxygen Demand
3- Biochemical Oxygen Demand
4- Direct Combustion
5- Gasification

$$E = \sum_{i=1}^{n} Q_i H_i \eta_i \quad (۲)$$

که در آن Q_i، مقدار پسماند در دسترس نوع i، H_i، ارزش گرمایی خالص پسماند i و η، ضریب تبدیل پسماند به انرژی می‌باشد.

اندازه‌گیری رطوبت

عامل مهم که بر ارزش گرمایی خالص سوخت اثر می‌گذارد، محتوای رطوبتی است. افزایش محتوای رطوبتی، ارزش گرمایی خالص سوخت را کاهش می‌دهد. به‌طور میانگین افزایش ۱۰ درصد رطوبت، ارزش گرمایی خالص یا پایین (LHV[1]) سوخت را ۱۱ درصد کاهش می‌دهد (Fowler *et al.*, 2009). بنابراین رطوبت باگاس (باگاس تازه، پس از ۲۴ ساعت دپو باگاس، بعد از پنج، ۳۰ و ۴۵ روز دپو باگاس)، پیت خشک شده در محوطه روباز، پوشال خشک شده در فضای باز، ضایعات حاصل از برش و سمباده‌زنی بر اساس روش ASTM D2974 در آزمایشگاه کارخانه شکر کشت و صنعت دعبل خزاعی تعیین شد. فواصل بین نمونه‌برداری از باگاس بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط کشت و صنعت نیشکر و پیشنهاد کارشناسان آن جهت تعیین روند کلی کاهش رطوبت باگاس انتخاب شد. اندازه‌گیری رطوبت سه بار تکرار و میانگین آن‌ها محاسبه شد.

اندازه‌گیری خاکستر

مقداری از نمونه زیست‌توده را در بوته چینی به مدت ۳ ساعت در کوره ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و سپس خاکستر به‌جای مانده را داخل دسیکاتور گذاشته تا به دمای محیط برسد. درصد خاکستر زیست‌توده از طریق رابطه (۳) محاسبه شد (Tang *et al.*, 2013).

$$\text{درصد خاکستر} = \frac{\text{وزن خاکستر (گرم)}}{\text{وزن زیست‌توده (گرم)}} \times ۱۰۰ \quad (۳)$$

محاسبه ارزش حرارتی

جهت تعیین ارزش حرارتی از بمب کالری‌متر سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان با مدل PARR ۱۲۶۶ استفاده گردید. برای این منظور نمونه‌گیری در دو تکرار به‌صورت تصادفی از باگاس، پوشال، پیت، ضایعات برش و سمباده‌زنی موجود در کشت و صنعت دعبل خزاعی و شرکت نئوپان‌سازی انجام شد. جهت کالیبراسیون بمب کالری‌متر از قرص‌های اسید بنزوئیک استاندارد مشخص استفاده شد.

نتایج و بحث

درصد رطوبت پسماند

باگاس حاصل از عصاره‌گیری در کارخانه حدود ۵۰ تا ۵۵ درصد رطوبت دارد که با توجه به وضعیت و شرایط جوی، رطوبت خود را به‌تدریج از دست می‌دهد. کاهش رطوبت تأثیر مثبت بر انرژی دریافتی از باگاس به‌عنوان منبع انرژی جهت سوزاندن و تولید گرما دارد. جدول ۲ درصد رطوبت باگاس کشت و صنعت دعبل خزاعی در زمان‌های مختلف پس از دپو شدن را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری نشان داد که میانگین رطوبت باگاس تازه در کشت و صنعت دعبل خزاعی برابر با ۵۱/۳ درصد است (۲۰ اسفندماه ۱۳۹۷) که با توجه به شرایط جوی، محتوای رطوبتی پس از ۴۵ روز به ۵/۳۲ درصد رسید. این موضوع نشان می‌دهد که بدون نیاز به سیستم خشک‌کننده خاصی، رطوبت باگاس به اندازه کافی و مناسب جهت سوزاندن مستقیم و تولید انرژی، کاهش می‌یابد. با گذشت پنج روز حدود ۵۰ درصد از رطوبت باگاس کاهش یافت و از ۵۱/۳ درصد به ۲۸/۹۸ درصد رسید. رطوبت باگاس در دو روز اول دپو شدن به مقدار ۱۶/۱۷ درصد کاهش یافت. روشن است که مقدار کاهش رطوبت به شدت وابسته به شرایط جوی و آب و هوایی است ولی با توجه به طولانی بودن فصل گرم (عمدتاً بدون بارش) در استان خوزستان، می‌توان نتیجه گرفت که با مدیریت صحیح، امکان خشک کردن باگاس به‌صورت طبیعی وجود دارد و برای استفاده شدن به‌عنوان منبع انرژی نیاز به سیستم خشک‌کن نیست.

درصد خاکستر

جدول ۳ درصد خاکستر و ارزش گرمایی خالص (ارزش گرمایی پایین) باگاس، پیت، پوشال و خرده چوب‌های سمباده و برش (با استفاده از بمب کالری‌متر) را نشان می‌دهد. پیت با داشتن ۲/۰۳۷ درصد، بیشترین مقدار خاکستر را بین نمونه‌های مورد بررسی دارد. مقدار خاکستر در طراحی کوره و سیستم تخلیه خاکستر بسیار مهم است. ارزش گرمایی پایین باگاس خشک (۵/۱ درصد رطوبت) برابر با ۱۷/۹۵ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد در حالی که با رطوبت حدود ۲۵ درصد برابر با ۱۵/۰۲ مگاژول بود. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2008) ارزش گرمایی باگاس خشک در ایالت پنجاب[2] کشور هند را ۲۰ مگاژول بر کیلوگرم بیان کردند. هالدر و همکاران (Halder *et al.*, 2014) در مطالعه‌ای که در کشور بنگلادش انجام دادند، ارزش گرمایی باگاس را ۱۹/۵۴ مگاژول بر کیلوگرم بیان کردند. ارزش گرمایی خالص نمونه پیت حاصل از ضایعات نئوپان‌سازی شرکت آریانا برابر با ۱۶/۲۳ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد. در واقع نمونه پیت شامل مخلوطی از اپیدرم و الیافی است که همراه پیت جدا شده‌اند. حدود ۴۵ درصد باگاس در شرکت نئوپان‌سازی به‌عنوان پیت دور ریخته می‌شود، در حالی که پیت ۳۰ درصد باگاس را تشکیل می‌دهد. از سوی دیگر جداسازی پیت از الیاف مناسب جهت تولید تخته نئوپان به‌صورت کامل انجام نمی‌گیرد و دو تا چهار درصد آن همراه الیاف

1- Low Heating Value

2- Punjab

مناسب باقی می‌ماند که در تولید تخته نئوپان به‌کار می‌رود. هر اندازه مقدار پیت باقی مانده در الیاف بیشتر باشد از کیفیت تخته نئوپان تولیدی کاسته می‌شود. این امر نشان می‌دهد که در مرحله پیت‌زدایی، مقدار زیادی الیاف مناسب و اپیدرم همراه پیت جدا می‌شود. در واقع بیش از یک سوم نمونه پیت، دارای اپیدرم و الیاف است. جدیدیان و همکاران (Jadidyan *et al*., 2016) ارزش گرمایی خالص پیت را ۱۰/۳ مگاژول بر کیلوگرم اندازه‌گیری کردند. در مطالعه کنونی ارزش گرمایی خالص خرده چوب سمباده و برش تخته نئوپان با استفاده از بمب کالری‌متر برابر با ۱۶/۴۳ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد (جدول ۳).

جدول ۲- درصد رطوبت باگاس و پسماند نئوپان‌سازی

Table 2- Moisture content of Bagasse and Chipboard waste (%)

باگاس Bagasse								پیت Pith	پوشال Straw	خرده چوب Wood chips
تازه Fresh	بعد از ۴۸ ساعت After 48 hours	بعد از ۵ روز After 5 days	پس از ۳۰ روز After 30 days	پس از ۴۵ روز After 45 days						
51.30	35.13	25.98	12.86	5.32				5.5	3.7	3.1

جدول ۳- درصد خاکستر و ارزش حرارتی پایین

Table 3- Ash percentage and lower heating value

	باگاس با رطوبت ۲۵٪ Bagasse with 25% moisture content	باگاس با رطوبت ۵/۱٪ Bagasse with 5.1% moisture content	پیت Pith	پوشال Straw	خرده چوب Wood chips
درصد خاکستر Ash (%)	1.652	1.652	2.037	1.908	1.53
ارزش گرمایی Lower heating value (MJ kg^{-1})	15.02	17.95	16.23	16.49	16.43

انرژی مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی

مقادیر حامل‌های انرژی مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی آریانا که شامل انرژی برق، گاز طبیعی و سوخت دیزل می‌باشند، در جدول ۴ نشان داده شده است. مصرف گاز طبیعی در سال ۱۳۹۶ برابر با ۶۴۴۸۴۲۰ مترمکعب بوده است که خشک‌کن‌ها با ۹۹/۴۸ درصد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. این امر نشان می‌دهد که جهت صرفه‌جویی در مصرف گاز باید بر خشک‌کن‌ها تمرکز داشت و افزایش بازدهی و یا کاهش تلفات انرژی در این بخش می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش مصرف گاز و حتی کل انرژی مصرفی در نئوپان‌سازی داشته باشد. گاز مصرفی ۷۸/۵۲ درصد کل انرژی مستقیم مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی را تشکیل می‌دهد. برق مصرفی کارخانه در سال ۱۳۹۶ برابر با ۱۶/۰۴ گیگاوات ساعت بود که ۱۸/۸۷ درصد کل انرژی مستقیم مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی را تشکیل می‌دهد. مصرف‌کننده‌های عمده برق در کارخانه نئوپان‌سازی شامل دیپیتر، آسیاب‌های خردکننده جهت پیت‌زدایی و خشک‌کننده نهایی هستند. در این دستگاه‌ها از الکتروموتورهای بزرگ جهت چرخاندن آسیاب‌ها و مکنده‌ها استفاده می‌شود. کل مصرف انرژی مستقیم در کارخانه نئوپان‌سازی شرکت آریانا در سال ۱۳۹۶ برابر با ۳۰۵۹۸۱ گیگاژول بوده است.

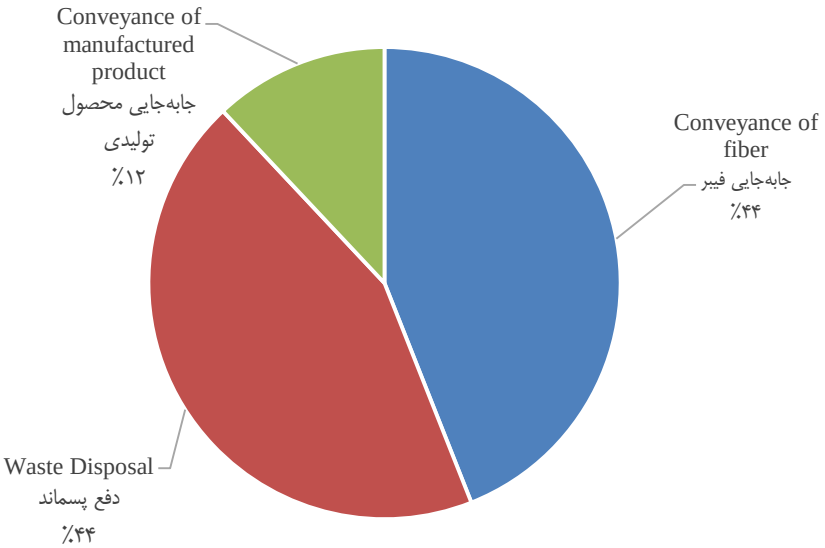
مصرف سوخت دیزل ماشین‌ها در سال ۱۳۹۶ برابر با ۲۰۶/۱ مترمکعب بود. شکل ۲ نشان می‌دهد، بخش قابل‌توجهی از مصرف سوخت دیزل (۴۴ درصد مصرف کل سوخت دیزل) برای دور ریختن و انتقال پسماند به خارج از کارخانه مصرف می‌شود که در صورت مصرف پسماند به‌عنوان منبع انرژی در داخل کارخانه می‌تواند صرفه‌جویی شود. جابه‌جایی فیبر در کارخانه ۴۴ درصد مصرف سوخت ماشین‌ها را تشکیل می‌دهد.

حجم تولید تخته نئوپان شرکت آریانا در سال ۱۳۹۶ برابر با ۵۲۴۹۱ مترمکعب بوده است. با توجه به مقدار تولید، مصرف انرژی ویژه در کارخانه نئوپان‌سازی آریانا محاسبه و در جدول ۴ نشان داده شده است. انرژی ویژه تولید تخته نئوپان در کارخانه آریانا برابر با ۵/۸۲۹ گیگاژول به ازای هر مترمکعب تخته به‌دست آمد که گاز مصرفی بیشترین سهم را دارد. مصرف ویژه گاز جهت تولید تخته نئوپان برابر با ۴/۵۷۷ گیگاژول بر مترمکعب محاسبه گردید. انرژی مصرفی برق و سوخت دیزل به‌ترتیب ۱/۱ و ۰/۱۵۲ گیگاژول بر مترمکعب به‌دست آمد.

جدول ٤– حامل‌های انرژی مستقیم کارخانه نئوپان‌سازی آریانا در سال ۱۳۹۶

Table 4- Direct energy carriers at Ariana chipboard Factory in 2017

نوع انرژی Energy type	مقدار مصرف Input	انرژی مصرفی Input energy GJ	درصد (%)	انرژی ویژه Energy intensity (GJ m^{-3})
انرژی الکتریکی Electricity	16038 MWh	57736.8	18.87	1.10
گاز طبیعی natural gas: خشک‌کن Dryer	6414658 m^3	239010.2	78.11	4.55
گاز طبیعی natural gas: پرس گرم Hot presser	24417 m^3	909.8	0.30	0.017
گاز طبیعی natural gas: ملامینه Melamine	9345 m^3	348.2	0.11	0.006
سوخت دیزل Diesel fuel	206100 lit	7976.1	2.61	0.152
مجموع Sum		305981	100	5.83



شکل ۲– سهم عملیات‌های مختلف در مصرف سوخت دیزل در کارخانه نئوپان‌سازی آریانا

Fig. 2. Contribution of different operations to diesel fuel Consumption at Ariana factory

پتانسیل تولید انرژی از ضایعات خشبی نیشکر

مواد خشبی مورد بررسی جهت پتانسیل‌سنجی تولید انرژی (به‌صورت سوختن مستقیم) شامل باگاس، پیت، پوشال و سر نی و خرده چوب‌های حاصل از سمباده و برش است. مقدار باگاس تولیدی، مصرف شده در تولید تخته نئوپان و کود کمپوست و مازاد کشت و صنعت دعبل خزاعی در جدول ۵ نشان داده شده است. در سال ۱۳۹۶ حدود ۲۲۰۰۰۰ تن باگاس (باگاس تازه) تولید شده است که ۱۷۶۰۰۰ تن آن به کارخانه نئوپان‌سازی آریانا تحویل داده شده و حدود ۳۸۰۰۰ تن باگاس مازاد بدون استفاده مانده است. بخشی هم جهت تولید کود کمپوست و مصارف دیگر استفاده شده است.

جدول ۵– وضعیت تولید و مصرف باگاس کشت و صنعت دعبل خزاعی در سال ۱۳۹۶ (هزار تن)

Table 5- Production and consumption of bagasse in Debal Khozaie agro-industry in 2017 (thousand tons)

باگاس تولیدی Bagasse production	باگاس تحویلی به نئوپان‌سازی Bagasse delivered to the chipboard factory	باگاس مازاد Surplus bagasse	سایر Others
220	176	38	6

در جدول ۶ مقادیر پسماندهای مختلف قابل استفاده جهت تولید انرژی مستقیم در فرآیند نئوپان‌سازی نشان داده شده است. از حدود ۱۷۶۰۰۰ تن باگاس تحویلی به شرکت آریانا، ۷۰۴۰۰ تن پیت از آن جدا شده است (پیت خشک) و با صرف هزینه و انرژی به خارج از کارخانه دفع شده است. همچنین در حدود ۹۵۰۰ تن ضایعات به‌صورت خرده چوب برش و سمباده در سال ۱۳۹۶ از کارخانه آریانا دفع شده است که می‌تواند به‌عنوان سوخت (سوختن مستقیم) جهت تولید گرما استفاده شود.

به دلیل فرسودگی ماشین‌های برداشت (هاروستر نیشکر[1]) و گرمی هوا، برداشت نیشکر بیشتر به‌صورت سوخته (سوزاندن مزارع قبل از عملیات برداشت) انجام می‌شود. در سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶ از ۸۸۵۰ هکتار مساحت برداشت شده (کل مساحت برداشت شده)، ۲۲۶۵ هکتار به‌صورت سبز برداشت شده است (۳۰/۱۱ درصد). در کشت و صنعت دعبل خزاعی، بخش کمی از پوشال مزارعی که به‌صورت سبز برداشت می‌شود، جمع‌آوری می‌شود که به مصارف مختلفی مانند خوراک دام می‌رسد. بخشی از پوشال حاصل از برداشت سبز در مزرعه سوزانده می‌شود و بخشی در مزارع آیش با خاک مخلوط می‌شود. با این وجود، مقداری از پوشال جمع‌آوری شده بدون استفاده می‌ماند و مشکلاتی را ایجاد می‌کند. حدود ۴۰۰۰ تن پوشال در سال ۱۳۹۶ جمع‌آوری شد که می‌تواند به‌عنوان منبع جهت سوختن و تولید گرما استفاده شود.

با در نظر گرفتن محتوای انرژی حرارتی محاسبه شده با بمب کالری‌متر مقدار انرژی قابل استحصال از ضایعات با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید. همان‌طور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، می‌توان از ۱۲۱۸۴۸ تن پسماند جامد کارخانه نئوپان‌سازی و کشت و صنعت دعبل خزاعی با استفاده از سامانه احتراق مستقیم جهت تولید حرارت حدود ۱۰۳۹۳۷۸ گیگاژول انرژی حرارتی تولید کرد. این مقدار انرژی ۴/۳۳ برابر کل انرژی گاز مصرفی در کارخانه نئوپان‌سازی (با فرض بازده ۱۰۰ درصد کوره برای گاز طبیعی) است. همچنین تنها با استفاده از پیت جدا شده از باگاس در کارخانه نئوپان‌سازی امکان تولید ۲/۸۵ برابر کل مصرف گاز کارخانه نئوپان‌سازی وجود دارد. حسنکی و همکاران (Hasanaki *et al*., 2019) در مطالعه‌ای که در کشت و صنعت کارون انجام دادند، بیان کردند که کوره‌های بخار موجود در کشت و صنعت علاوه بر گازسوز بودن، قابلیت سوزاندن باگاس و زیست‌توده را نیز دارند. از این رو، نیازی به خرید کوره بخار جدید نیست. آن‌ها بیان کردند که در کشت و صنعت کارون یک کوره با تغییرات جزئی، باگاس‌سوز شده است و تنها سرمایه‌گذاری در بخش انجام اصلاحات کوره و خرید تجهیزات جانبی آن مانند پمپ تخلیه خاکستر، تجهیزات ابزار دقیق و کنترل، پروانه‌های مکنده و دمنده صورت گرفته است. از نقاله‌هایی که برای انتقال باگاس به خارج از کارخانه استفاده می‌شد، جهت انتقال مواد به کوره استفاده شده است. آن‌ها بیان کردند که شرکت کارون دوره برگشت سرمایه کوره باگاس‌سوز شده را حدود هشت ماه اعلام کرده است، در حالی که بر اساس محاسبات آن‌ها حداکثر دوره برگشت سرمایه باگاس‌سوز کردن کوره‌ها با در نظر گرفتن همه هزینه‌های آشکار و پنهان برابر با ۱/۵ سال به‌دست آمد. با توجه به نتایج اقتصادی مطلوب باگاس‌سوز کردن کوره اول، برنامه باگاس‌سوز کردن کوره دوم کارخانه در دستور کار بهره‌برداری قرار گرفته است. در مطالعاتی که در کشورهای استرالیا (Evans *et al*., 2010) و برزیل (Dantas *et al*., 2013) انجام شده است، بیان گردید که سوزاندن باگاس در کوره‌های نیروگاه کارخانه‌های نیشکر جهت تولید انرژی، نسبت به سایر حامل‌های انرژی موجود، کمترین هزینه و بیشترین سودآوری را دارد. همچنین نتایج مطالعات در کشور اندونزی (Restutia and Michaelowa, 2007)، جزیره موریس (Ramjeawon, 2008) و افریقای جنوبی (Mohlala *et al*., 2016) نشان داد که سوزاندن باگاس در کوره‌های بخار به‌منظور تولید انرژی موجب کاهش آلاینده‌های هوا و هزینه‌های ناشی از آن می‌شود.

کوره‌ها و دیگ‌های بخار مورد استفاده در کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان شبیه به هم می‌باشند. همچنین در کارخانه نئوپان‌سازی تجهیزات و نقاله‌هایی برای جابه‌جایی و انتقال پیت به بیرون از محوطه کارخانه وجود دارند که می‌توانند جهت انتقال پیت به کوره‌ها مورد استفاده قرار گیرند. کشت و صنعت دعبل خزاعی مانند سایر کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان جهت تأمین انرژی گرمایی و برق خود دارای کوره‌های بخار و نیروگاه بخاری می‌باشد. نیروگاه بخاری به‌صورت موازی به شبکه برق سراسری متصل می‌باشد. منبع اصلی انرژی نیروگاه، گاز طبیعی می‌باشد. به‌طور کلی حرارت تولید شده در کوره‌های بخار کشت و صنعت در سه بخش اصلی توربین‌های نیروگاه بخاری تولید برق، آسیاب‌ها و فرآیندهای تولید شکر از شیره نیشکر استفاده می‌شود.

بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، در صورتی که کل گاز مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی با ضایعات خشبی کشت و صنعت و کارخانه نئوپان‌سازی جایگزین شود، حدود ۷۹۹۱۱۰ گیگاژول انرژی اولیه از مواد خشبی، اضافه می‌ماند که با بازده ۳۰ درصد تبدیل آن به انرژی برق (Karaj *et al*., 2009)، پتانسیل تولید ۲۳۹۷۳۳ گیگاژول یا ۶۶/۵۹ گیگاوات ساعت انرژی برق از آن وجود دارد. این مقدار انرژی ۴/۱۵ برابر مصرف کل برق جهت تولید تخته نئوپان در سال ۱۳۹۶ است. بازده نیروگاه متأثر از عوامل متعددی نظیر عمر نیروگاه،

1- Sugarcane Harvester

کیفیت و نوع سوخت مصرفی، جنس و مواد سازنده‌ی تجهیزات، بازده تجهیزاتی همچون کوره بخار، ژنراتور، سامانه‌ی خنک‌کننده و کندانسورها، شرایط محیطی، وضعیت بهره‌برداری و نسبت میزان تولید برق به ظرفیت اسمی است (Jezini, 2010).

جدول ٦– مقادیر پسماند خشبی و انرژی گرمایی قابل استحصال از آن‌ها بر حسب GJ

Table 6- Woody residues and their thermal energy (GJ)

نوع پسماند Type of waste	مقدار Quantity (tons per year)	محتوای انرژی Energy content (GJ)	پتانسیل تولید انرژی با ٦٠٪ راندمان کوره Potential of energy production by Furnaces with efficiency of 60%	
			(GJ)	%
باگاس با رطوبت ۵/۳۲٪ Bagasse (5.32% moisture)	20530	368514	221108	21.27
پیت Pith	70400	1142592	685555	65.69
پوشال Straw	4000	65960	39576	3.81
ضایعات سمباده و برش Waste of sawing and sanding	9448	155231	93138	8.96
جمع کل Sum	121848	1732296	1039378	100

با توجه به این‌که حدود دو دهه از تأسیس نیروگاه کشت و صنعت دعبل خزاعی می‌گذرد، نباید انتظار داشت بازده آن در حد نیروگاه‌های جدید و با فناوری روز دنیا باشد. همچنین اصلاح کوره‌ها جهت سوزاندن زیست‌توده، احتمالاً همراه با کاهش بازده کل نیروگاه خواهد بود. حسنکی (Hasanaki, 2018) بازده نیروگاه کشت و صنعت نیشکر کارون (با عمر بیش از چهار دهه) در تولید برق را ۱۳/۲۶ درصد بیان کرد، این در حالی است که انرژی بخار خروجی از توربین‌ها که جهت چرخاندن آسیاب‌های کارخانه عصاره‌گیری نیشکر و سایر فرآیندهای تولید شکر از شیره نیشکر استفاده می‌شود، در نظر گرفته نشده است. بازده نیروگاه بخاری تولید برق از باگاس (از طریق سوزاندن مستقیم در کوره‌ها) در کشور زیمباوه (Mbohwa and Fukuda, 2003) و کشور اتیوپی (Alena and Sahu, 2013) به‌ترتیب حدود ۱۲ و ۱۱ درصد بیان شده است. مبعو و فوکودا (Mbohwa and Fukuda, 2003) بیان می‌کنند که استهلاک تجهیزات و عدم بهره‌وری صحیح، تأثیر به‌سزایی در بازده نیروگاه‌ها دارد به‌طوری که استفاده از تجهیزات و دیگ‌های بخار جدید می‌تواند میزان تولید را تا ۲/۶ برابر افزایش دهد. در صورتی‌که بازده نیروگاه تولید برق پس از اصلاح و باگاس‌سوز شدن کوره‌ها، ۱۰ و ۵ درصد در نظر گرفته شود، به‌ترتیب امکان تولید ۲۲/۲۰ (۱/۳۸ برابر برق مصرفی کارخانه) و ۱۱/۱۰ گیگاوات ساعت (۶۹ درصد برق مصرفی کارخانه) انرژی برق، علاوه بر جایگزینی کل گاز مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی وجود دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که می‌توان کل گاز و بخش عمده برق مصرفی کارخانه تولید نئوپان آریانا را با ضایعات کشت و صنعت و کارخانه نئوپان‌سازی جایگزین کرد (بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی). حتی بدون استفاده از باگاس مازاد و پوشال و تنها با استفاده از ضایعات داخل خود کارخانه که شامل پیت و خرده چوب برش و سمباده است می‌توان کل گاز مصرفی را جایگزین و ۴۷ درصد برق مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی (با بازده ۵ درصد تبدیل باگاس به برق در نیروگاه بخاری) را تولید کرد.

کارخانه‌های تولید نئوپان از باگاس در استان خوزستان

همان‌طور که قبلاً بیان شد در استان خوزستان دو کارخانه تولید نئوپان از باگاس نیشکر وجود دارند. کارخانه آریانا (در کشت و صنعت دعبل خزاعی) از باگاس کشت و صنعت دعبل خزاعی به‌عنوان ماده اولیه نئوپان استفاده می‌کند. ظرفیت اسمی این کارخانه تولید ۱۱۰۰۰۰ مترمکعب تخته نئوپان در سال است. دومین کارخانه نئوپان‌سازی، شرکت تولید نئوپان کارون (وابسته به کشت و صنعت کارون) با ظرفیت اسمی تولید ۳۰۰۰۰ مترمکعب در سال است. کل انرژی مصرفی جهت تولید نئوپان از باگاس در کارخانه‌های مورد نظر سوخت‌های فسیلی می‌باشد و از ضایعات زیست‌توده موجود جهت تولید انرژی استفاده نمی‌شود. این در حالی است که هر دو شرکت جهت دفع ضایعات خود به خارج از شرکت متحمل هزینه‌های زیادی می‌شوند. مقدار و ظرفیت تولید شرکت‌های تخته نئوپان در جدول ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تولید شرکت آریانا بسیار کمتر از ظرفیت اسمی خود است (۴۷/۷۲ درصد ظرفیت اسمی). در این شرکت به ازای هر مترمکعب تخته نئوپان ۳/۱ تن

باگاس مصرف شده است. در سال ۱۳۹۶ باگاس مازاد کل کشت و صنعت دعبل خزاعی که با صرف هزینه دفع شده است برابر با ۳۸۰۰۰ تن بوده است (باگاس تازه) که با افزایش تولید شرکت به حدود ۶۴۷۲۸ مترمکعب تخته نئوپان در سال (۵۸/۸۴ درصد ظرفیت اسمی) می‌توان کل باگاس مازاد را مصرف کرد (با افزایش ظرفیت تولید حتی می‌توان از باگاس سایر کشت و صنعت‌ها نیز استفاده کرد) و علاوه بر رفع هزینه‌ها و مشکلات دفع آن، محصول با ارزشی نیز تولید می‌گردد که در صورت استفاده از ضایعات تولید آن می‌توان کل انرژی مصرفی مستقیم آن را نیز تأمین کرد.

جدول ۷- مقدار تولید نئوپان و مصرف باگاس در کارخانه‌های تولیدی خوزستان در سال ۱۳۹۶

Table 7- The amount of chipboard production and bagasse consumption in Khuzestan factory (2017)

نام کارخانه Factory name	ظرفیت اسمی سالانه (m^3) Annual nominal capacity	تولید روزانه (m^3) Daily production	تولید سالانه (m^3) Annual production	باگاس مصرفی (ton) Consumed bagasse
آریانا Ariana	110000	200	52491	163000
کارون Karun	30000	100	30000	93000

پتانسیل تولید زیست‌گاز از ویناس

میانگین سالانه تولید انواع الکل (طبی، صنعتی و روغن الکل) در کارخانه الکل و خمیرمایه رازی از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ برابر با ۳۴۱۴۲/۷ مترمکعب بوده است. بر اساس مقدار کل الکل تولیدی در سال و میانگین تولید نه لیتر ویناس به ازای هر لیتر الکل تولیدی، مقدار سالانه تولید ویناس برابر با ۳۰۷۲۸۴/۵ مترمکعب محاسبه گردید (جدول ۸) که با داده‌های به‌دست آمده از شرکت که بیش از ۳۰۰۰۰۰ مترمکعب بیان شده است، همخوانی دارد. پارسایی و همکاران (Parsaee *et al.*, 2018) در مطالعه‌ای که به تولید زیست‌گاز از ویناس کارخانه الکل‌سازی رازی پرداختند، بیان کردند با تولید زیست‌گاز به ازای هر لیتر ویناس می‌توان ۱/۰۷ مگاژول انرژی تولید کرد. بر این اساس و با در نظر گرفتن میانگین حجم ویناس تولیدی از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸، پتانسیل تولید انرژی از ویناس در شرکت رازی (با تخمیر بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز) برابر با ۳۲۸۷۹۴ گیگاژول در سال محاسبه گردید. این مقدار انرژی برابر با ۸۸۲۴۳۱۹ مترمکعب گاز طبیعی است که علاوه بر کاهش آلودگی ویناس می‌تواند با سوختن در کوره‌های نیروگاه کشت و صنعت دعبل خزاعی که هم‌اکنون از گاز طبیعی استفاده می‌کند، بخش زیادی از انرژی مورد نیاز کارخانه الکل‌سازی و حتی سایر صنایع تولید شکر را تأمین کند. از این زیست‌گاز تولیدی می‌توان در سامانه احتراق خشک‌کن‌های کارخانه نئوپان‌سازی به‌عنوان سوخت و یا در ژنراتور تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد. پتانسیل تولید زیست‌گاز از ویناس شرکت رازی ۱/۳۷ برابر کل انرژی گاز مصرفی در کارخانه نئوپان‌سازی آریانا است. در صورتی که بازده تبدیل گاز به برق در نیروگاه کشت و صنعت دعبل خزاعی برابر با ۱۳/۲۶ درصد در نظر گرفته شود (Hasanaki, 2018) پتانسیل زیست‌گاز تولیدی از ویناس (بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی) علاوه‌بر جایگزینی کل گاز طبیعی، می‌تواند ۳/۲۶ گیگاوات برق نیز تولید کند که برابر با ۲۰/۳۳ درصد برق مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی آریانا است. این در حالی است که کپوتو و همکاران (Caputo *et al.*, 2005) بازده تولید برق در نیروگاه با چرخه سیکل بخار- گاز را تا ۵۰ درصد بیان کرده است. بر اساس ترازنامه‌های انرژی کشور، میانگین بازده نیروگاه‌های بخاری کشور در حدود ۳۰ درصد است (Anonymous, 2016).

جدول ۸- حجم الکل، ویناس و پتانسیل تولید زیست‌گاز و انرژی حاصل از آن‌ها

Table 8- The volume of alcohol, vinasse and their potential for biogas and energy production

الکل تولیدی (m^3) Alcohol production	ویناس تولیدی (m^3) Vinasse production	انرژی (GJ) Energy
34142.7	307284.5	328794.4

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مصرف انرژی مستقیم در تولید تخته نئوپان از باگاس نیشکر و امکان جایگزینی آن با ضایعات کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی و صنایع جانبی آن بررسی گردید. انرژی برق، گاز طبیعی و سوخت دیزل انرژی مصرفی مستقیم در تولید تخته نئوپان را تشکیل می‌دهند. انرژی ویژه تولید تخته نئوپان در کارخانه

آریانا برابر با ۵/۸۲۹ گیگاژول به ازای هر مترمکعب تخته به‌دست آمد. میانگین رطوبت باگاس پس از ۳۰ و ۴۰ روز از تولید از حدود ۵۱ درصد به‌ترتیب به حدود ۱۲ و ۵ درصد رسید که نشان می‌دهد، رطوبت باگاس بدون نیاز به سیستم خشک‌کننده خاصی، به اندازه کافی و مناسب جهت سوزاندن مستقیم در کوره‌های بخار و تولید انرژی، کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد با استفاده از پسماند خشبی کارخانه نئوپان‌سازی و کشت و صنعت دعبل خزاعی می‌توان ۴/۳۳ برابر کل انرژی گاز مصرفی در کارخانه نئوپان‌سازی انرژی حرارتی تولید کرد و تنها با استفاده از پیت کارخانه نئوپان‌سازی امکان تولید ۲/۸۵ برابر کل مصرف گاز کارخانه وجود دارد. همچنین تنها با استفاده از ضایعات کارخانه نئوپان‌سازی می‌توان کل گاز مصرفی را جایگزین و ۴۷ درصد برق مصرفی کارخانه نئوپان‌سازی برق تولید کرد. بررسی حجم و پتانسیل تولید زیست‌گاز از ویناس شرکت الکل‌سازی در کشت و صنعت دعبل خزاعی نشان داد امکان تولید انرژی معادل ۸۸۲۴۳۱۹ مترمکعب گاز طبیعی در سال وجود دارد. در کل نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ضایعات شرکت نئوپان‌سازی و کشت و صنعت نیشکر پتانسیل جایگزینی کل گاز و برق مصرفی شرکت نئوپان‌سازی وجود دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (۲۶۲۴۷) تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

1. Alena, A., and O. Sahu. 2013. Cogenerations of energy from sugar factory bagasse. Energy Engineering 1 (2): 22-29.
2. Andekaizade, A., M. J. Sheikh Davoodi, and M. Byria. 2018. Qualitative and quantitative features evaluation of two methods of sugarcane harvesting (with aim of energy and sugar production). Journal of Agricultural Machinery 8 (1): 212-221. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v8i1.53629.
3. Anonymous. 2016. Energy Balance Sheet. Iran Ministry of Energy. Power and Energy Planting Department Publication. (In Persian).
4. Anonymous. 2018. Statistical Yearbook of agriculture. Statistical center of Iran. (In Persian).
5. Arshad, A., and S. Ahmed. 2016. Cogeneration through bagasse: A renewable strategy to meet the future energy needs. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54: 732-737.
6. Baguant, J. 1984. Electricity Production from the Biomass of the Sugarcane Industry in Mauritius. Biomass 5: 283-297.
7. Birru, B., A. Martin, and C. Erlich. 2016. Sugar Cane industry overview and energy efficiency considerations, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
8. Caputo, A. C., M. Palumbo, P. M. Pelagagge, and F. Scacchia. 2005. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. Biomass and Bioenergy 28: 35-51.
9. Dantas, G. A., L. Legey, and A. M. Mazzone. 2013. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. Renewable and Sustainable Energy Reviews 21: 356-364.
10. Demirbas, M. F., M. Balat, and H. Balat. 2009. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. Energy Conversion and Management 50: 1746-1760.
11. Evans, A., V. Strezov, and T. J. Evans. 2010. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 1419-1427.
12. Flausinio, B., A. Costa, R. Pinheiro, and A. Fortini. 2014. Theoretical Study about the Cogeneration Potential of the Bagasse Sugarcane at the Brazilian State of Minas Gerais. International Journal of Energy Science 4 (2): 35-42.
13. Fowler, P., G. Krajacic, D. Loncar, and N. Duic. 2009. Modeling the energy potential of biomass. International Journal of Hydrogen Energy 34: 7027-7040.
14. Halder, P. K., M. A. Hossain, N. Paul, and I. Khan. 2014. Agricultural residue for electricity generation in Bangladesh. Journal of Mechanical and Civil Engineering 11 (2): 89-95.
15. Haroni, S., M. J. Sheykhdavodi, and M. Kiani Deh Kiani. 2018. Application of artificial neural networks for predicting the yield and GHG emissions of sugarcane production. Journal of Agricultural Machinery 8 (2): 389-401. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v8i2.52870.
16. Hasanaki, N., Y. Mansoori, and A. Asakereh. 2019. Potential of substituting bagasse for natural gas in Karun sugar factory and its economic evaluation. Iranian Journal of Biosystem Engineering 51 (1): 11-21. (In Persian).
17. Hasanaki, N. 2018. Technical and Economic Feasibility Study of Heat and Power Production in Karoon Sugar Factory Using a Hybrid System of Biomass, Photovoltaic, and Natural Gas. MSc thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian).
18. Jadidyan, F., M. Talaeipoor, S. Mahdavi, and A. Hamasi. 2016. Evaluation of thermal energy and activated carbon

production from bagasse pith. Iranian journal of Wood and Paper Science Research 31 (2): 181-193. (In Persian).
19. Janghathaikul, D., and S. H. Gheewala. 2005. Environmental assessment of power generation from bagasse at a sugar factory in Thailand. Energy 6 (1): 57-66.
20. Jezini, M. 2010. Investigating the effect of environmental conditions and optimization measures affecting the efficiency of thermal power plants. Journal of Electrical Industry 161: 38-44. (In Persian).
21. Karaj, S. H., T. Rehl, H. Leis, and J. Muller. 2009. Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albania. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 493-499.
22. Kim, M., and D. F. Day. 2011. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology 38: 803-807.
23. Kitani, O. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol, V, Energy and Biomass Engineering. ASAE Publication, ST Joseph, MI.
24. Mashoko, L., C. Mbohwa, and V. M. Thomas. 2013. Life cycle inventory of electricity cogeneration from bagasse in the South African sugar industry. Cleaner Production 39: 42-49.
25. Mbohwa, C., and S. H. Fukuda. 2003. Electricity from bagasse in Zimbabwe. Biomass and Bioenergy 25: 197-207.
26. McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresource Technology 83: 47-54.
27. Mohlala, L. M., M. O. Bodunrin, A. A. Awosusi, M. O. Daramola, N. P. Cele, and P. A. Olubambi. 2016. Beneficiation of corncob and sugarcane bagasse for energy generation and materials development in Nigeria and South Africa: A short overview. Alexandria Engineering Journal 55: 3025-3036.
28. Mondal, M. A. H., and M. Denich. 2010. Assessment of renewable energy resources potential for electricity generation in Bangladesh. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 2401-2413.
29. Moreira, J. R. 2006. Global biomass energy potential. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11 (2): 313-342.
30. Parsaee, M., M. Kiani, and A. Takdastan. 2018. Biogas production from sugar cane vinasse using a Static Granual Bed Reactor (SGBR). Fuel and Combustion 11 (2): 69-78. (In Persian).
31. Pellegrini, L. F., and S. Junior. 2011. Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermo economic and environmental analysis and optimization. Energy 36: 3704-3715.
32. Pourasad, K., A. Zali, M. Ganjkhanlou, A. Emami, and A. Hatefi. 2015. Effects of replacing molasses with sugar beet vinasse on performance, blood and ruminal parameters in Mahabadi kids. Journal Management Systems 3 (3): 11-21. (In Persian).
33. Ramjeawon, T. 2008. Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. Journal of Cleaner Production 16: 1727-1734.
34. Rathnasiri, K., S. A. S. Senarath, A. G. T. Sugathapala, S. C. Bhattacharya, and P. A. Salam. 2005. Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Sri Lanka. Biomass and Bioenergy 29 (3): 199-213.
35. Restutia, D., and A. Michaelowa. 2007. The economic potential of bagasse cogeneration as CDM projects in Indonesia. Energy Policy 35: 3952-3966.
36. Seabra, J. E. A., and I. Macedo. 2011. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazi. Energy Policy 39: 421-428.
37. Singh, J., B. S. Panesar, and S. K. Sharma. 2008. Energy potential through agricultural biomass using geographical information system-A case study of Punjab. Biomass and Bioenergy 32: 301-307.
38. Soleymani, M., A. Keyhani, and M. Omid. 2018. Life cycle assessment, Ethanol, Sugarcane, Biofuel. Journal of Agricultural Engineering 40 (2): 13-27. (In Persian).
39. Tang, J., W. Zhu, K. Kookana, and A. Katayama. 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. Journal of Bioscience and Bioengineering 116 (6): 653-659.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 207-218

Energy and Exergy Analysis of Sour Cherry Evaporation Line

N. Sedaghat Herfeh[1], A. M. Nikbakht[2*], H. Mobli[3], A. R. Keyhani[3], A. Piri[4]

1- PhD of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Professor of Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran
3- Professor of Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, University of Tehran, Tehran, Iran
4- Research Fellow, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.nikbakht@urmia.ac.ir)

Received: 19-07-2020
Revised: 31-08-2020
Accepted: 30-09-2020

How to cite this article:
Sedaghat Herfeh, N., A. M. Nikbakht, H. Mobli, A. R. Keyhani, and A. Piri. 2022. Energy and Exergy Analysis of Sour Cherry Evaporation Line. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 207-218. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.87823.

Introduction

Sour cherry concentration is a significant agro-industry in the world. In 2016, world production was 13.8 million tons and most of which were processed in the form of concentrate or frozen products. Iran has the 6th rank among the producers of sour cherry and experienced a highly rise (45%) in production in 2016. A conventional energy system evaluation is performed using the energy analysis method. The thermodynamic inefficiencies occurring within the system (factors that cause a gap between performance and ideal state) are not identified and evaluated by energy analysis.

Materials and Methods

Pakdis concentrate production line includes a plate heat exchanger (HE) converter to preheat input juice using condensate water energy and crude juice heat outlet, four multipurpose falling evaporators (E1, E2, E3, E4), a distillation tower for raw juice aromatization (DT) and a juice cooling system (JC).

A thermographic camera (G120EXD, NEC Avio, Japan) was used for thermographic recording. Initial examination of the thermography results showed that the external surface temperature of the equipment except for the evaporators (E1, E2, E3, E4), the boilers (B1, B2, B3) and the condensation tank of the evaporation line (CT1) had very little difference with the ambient temperature around them, and therefore, their heat flux was ignored.

Due to limitations, the mass flow rates of the evaporation line (except for inlet juice) were not measurable, and therefore, energy analysis was used to calculate them. Energy analysis involves the simultaneous resolution of mass and energy balances for a system.

Results and Discussion

The heat loss rate from the first evaporator (E1) was calculated to be 21.23 kW from which mass/energy balances and mass flows were extracted. Also, heat loss rate from utilities E2, E3, E4, and CT1 were calculated from mass-energy balances. Streams 32, 49, 52, and 54 are not utilized and exit the system. Hence, they are assigned as heat loss streams within the evaporation line.

The total energy loss rate in the evaporation line was calculated to be 4920.82 kW which contributes 74.8% of total input energy to the line. However, 73.39% of this loss is assigned to the cooling tower (stream 54). Stream 29 from the 4th stage evaporator enters the condenser, mixes with water, and provides cold water goes to the cooling tower. In the tower, water evaporates and dissipates heat to the environment. Stream 32 is the second loss stream with 14.8%. Also, it should be noted that heat loss from the surface of utilities makes 3.06% of energy loss of the evaporation line which implies that insulations are done properly in utilities.

Evaporation performance may be rated simply and primarily by the steam economy. The value was calculated to be 2.63 in the evaporation line, i.e. 2.63 kg water is evaporated per 1 kg steam injected into the system

Exergy rate in several streams of evaporation line. The exergy rate of fuel and products, exergy efficiency, exergy destruction rate, and exergy destruction ratio for each element of the line were reported. Total input exergy to the evaporation line is 4832.03 kW from which 1045.85 kW is destructed due to irreversibility and 3786.19 kW is dissipated.

Major destruction occurs within barometric condenser (BC), pressure reducing valve (PR), a plate heat exchanger (HE), evaporators 1 and 2 (E1 and E2), cooling tower (CT), and then evaporators 3 and 4 (E3 and E4). The remaining destruction in other utilities is negligible.

Conclusion

Using the first and second laws of thermodynamics and instrumentation procedure, sub-systems of the evaporation unit of Pakdis Company were investigated and energy and exergy balances were coupled and solved. Thermographic assessment of likely zones to energy losses was employed. The whole process was monitored and mass-energy balances were developed. The steam economy as a reliable criterion for evaporation was calculated. To extract inefficiencies and possible optimizable unit operations exergetic analyses were carried out and subsequently the share of exergy loss and destruction and capital cost in the whole process was defined. It was found that capital cost is consistently ignorable compared to exergetic faults such as losses and destructions.

Keywords: Cherry, Concentrate, Energy loss, Exergy destruction

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۲۱۸-۲۰۷

تحلیل انرژی و اکسرژی خط تغلیظ آلبالو

نسیم صداقت حرفه[۱]، علی محمد نیکبخت[۲*]، حسین مبلی[۳]، علی‌رضا کیهانی[۳]، احمد پیری[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹

چکیده

صنعت تغلیظ یکی از بزرگ‌ترین و انرژی‌برترین صنایع تبدیلی در بخش کشاورزی است. در این مطالعه فرآیند تغلیظ آب آلبالو با استفاده از تحلیل انرژی و اکسرژی ارزیابی شد و علاوه بر تعیین هدررفت‌های انرژی، ناکارآمدی‌های ترمودینامیکی در هریک از زیرسامانه‌ها تعیین شدند. همچنین جهت دقیق بودن هرچه بیشتر محاسبات، تمام تجهیزات دمانگاری شدند. پارامتر اقتصاد بخار ۲/۶۳ و کل نرخ هدررفت انرژی از خط تغلیظ ۴۹۲۰/۸۲ کیلووات محاسبه شد. نتایج نشان داد که هدررفت انرژی از برج خنک‌کننده با ۷۳/۳۹ درصد از کل هدررفت‌ها، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. مقدار کل تخریب اکسرژی برای خط تغلیظ ۱۰۴۵/۸۵ کیلووات و بازده اکسرژی کل ۷۵/۷۶ درصد محاسبه شدند. بیشترین مقدار تخریب اکسرژی در چگالنده باروموتریک با مقدار ۳۴۶/۷۱ کیلووات به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، احیا و استفاده از سربخار مرحله‌ی آخر، به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش هدررفت‌های برج خنک‌کننده و کاهش نرخ تخریب اکسرژی در چگالنده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلبالو، اتلاف انرژی، تخریب اکسرژی، کنسانتره

مقدمه

تولید کنسانتره آلبالو یکی صنایع تبدیلی مهم در بخش کشاورزی است. در سال ۲۰۱۶ تولید جهانی آلبالو ۱۳/۸ میلیون تن بوده است که قسمت عمده‌ای از آن برای تولید کنسانتره مورد استفاده قرار گرفته است. ایران در بین تولیدکنندگان آلبالو در رده ششم قرار دارد و رشد چشمگیر ۴۵٪ را در سال ۲۰۱۶ تجربه کرده است (FAO, 2018). صنعت مواد غذایی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های صنعتی در جهان است و از این رو یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی می‌باشد (Ramedani *et al.*, 2018). فرآیند تغلیظ، یکی از واحدهای پرمصرف انرژی در خط تولید کنسانتره است که سهم بسیار بالایی از کل بخار تولیدی کارخانه در این فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل افزایش روزافزون مصرف انرژی و نیز کاهش مداوم منابع آن در جهان، بحث انرژی و راهکارهای استفاده‌ی بهینه از آن می‌تواند نقش مهمی را در حفظ ذخایر انرژی و محیطزیست کشور داشته باشد. افزون بر این مسائل، چنانچه مایل به ارائه‌ی محصولات خود به بازار جهانی باشیم، ناچار از داشتن تولیداتی قابل‌رقابت از نظر قیمت هستیم.

ارزیابی سامانه‌های انرژی در حالت مرسوم با روش تحلیل انرژی انجام می‌شود اما این تحلیل نمی‌تواند نزدیک بودن عملکرد سامانه به حالت ایده‌آل را نشان دهد. عملکرد ترمودینامیکی با استفاده از تحلیل اکسرژی به بهترین وجه ارزیابی می‌شود، زیرا بینش بیشتری از وضعیت عملکردی را ارائه می‌دهد (Dincer and Rosen, 2005). با این تحلیل می‌توان پتانسیل‌های بهبود را آشکار کرد و بازده واقعی اجزای خط تولید را محاسبه نمود، محل وقوع بیشترین ناکارآمدی‌ها را شناسایی و برای کاهش آن‌ها راه‌حل‌هایی را ارائه نمود.

تحلیل اکسرژی به‌طور گسترده‌ای برای طراحی، ارزیابی و بهینه‌سازی سامانه‌های تبدیل انرژی در صنایع مانند سیمان (Atmaca and Yumrutaş, 2014)، تولید توان (Kamate and Gangavati, 2009)، کاغذ و خمیر کاغذ (Assari *et al.*, 2014)، فولاد (Costa *et al.*, 2001) و شیمیایی (Hosseini *et al.*, 2015) مورد مطالعه قرار گرفته است. در زمینه‌ی تحلیل انرژی و اکسرژی صنعت کنسانتره کارهای بسیار اندکی انجام گرفته است. بالکان و همکاران یک خط تولید کنسانتره شامل سه عدد اواپراتور را با تحلیل

۱- دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴- پژوهشگر پسادکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.nikbakht@urmia.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.87823

اکسرژی بررسی کردند. دبی جرمی آب‌پرتقال ورودی به خط تغلیظ ۱/۲۲۲ کیلوگرم بر ثانیه و بریکس آن ۱۲ درصد بود که تا بریکس ۶۵ درصد تغلیظ می‌شد. بازده اکسرژی کل برای خط تغلیظ ۸۵ درصد محاسبه شد و اواپراتور اول با ۴۸/۲ درصد از تلفات اکسرژی کل، بیشترین سهم از تخریب اکسرژی را داشت. اواپراتورهای سوم و دوم به‌ترتیب با ۳۲/۰۴ و ۱۹/۷۶ درصد در رده‌های بعدی بودند (Balkan *et al.*, 2005). تحلیل اکسرژی فرآیند تغلیظ برای محصولات دیگری نیز انجام شده است. سوگوت و همکاران خط ۴ مرحله‌ای تغلیظ آب گوجه‌فرنگی را تحلیل اکسرژی کردند. آن‌ها دریافتند که بیشترین تخریب اکسرژی مربوط به اواپراتور اول است و برای کاهش آن باید دمای بخار ورودی را کاهش داد (Sogut *et al.*, 2010). باپات و همکاران اواپراتورهای خط تغلیظ تولید شکر را با استفاده از تحلیل اکسرژی بررسی کردند. آن‌ها بیشترین تخریب اکسرژی و کمترین بازده اکسرژی را برای اواپراتور اول محاسبه کردند (Bapat *et al.*, 2016).

تجهیزات اندازه‌گیری دما از اهمیت ویژه‌ای در فراهم آوردن اطلاعات لازم در تحلیل‌های انرژی و اکسرژی برخوردارند. محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (Carlomagno and Cardone, 2010; Carlomagno *et al.*, 2014; Simionescu *et al.*, 2015) محاسبه‌ی هدررفت حرارت برای انجام موازنه‌ی جرم و انرژی (Forero-Núñez and Sierra-Vargas, 2016) و محاسبه نرخ هدررفت انرژی و اکسرژی در خط تغلیظ شربت چغندرقند (Piri *et al.*, 2019) از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی تحلیل انرژی با استفاده از دمانگاری است.

مروری بر منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه کاملی بر روی خط تغلیظ آبمیوه و فرآیند تولید کنسانتره از محصول استراتژیک آلبالو انجام نشده است. با توجه به مصرف بالای انرژی در فرآیند تغلیظ و وجود تجهیزات مختلف نظیر چندین اواپراتور، پمپ، مبدل حرارتی، برج تقطیر و برج خنک‌کننده، انجام تحلیل‌های انرژی و اکسرژی به‌منظور بررسی دقیق هدررفت‌ها و شناسایی نقاط ناکارآمد ضروری است. همچنین در این تحقیق جهت دقیق بودن هرچه بیشتر نتایج از دوربین دمانگار برای محاسبات دمای سطح و تعیین هدررفت حرارتی با استفاده از روابط انتقال حرارت بهره گرفته شد. به‌منظور کاهش خطاهای گذرای ناخواسته در کارهای تجربی مربوط به داده‌برداری، جمع‌آوری داده‌ها در دو سال کاری متوالی انجام شد.

مواد و روش‌ها

توصیف فرآیند

خط تولید کنسانتره شرکت پاکدیس شامل یک عدد مبدل حرارتی صفحه‌ای (HE) جهت پیش‌گرم کردن آبمیوه‌ی ورودی با استفاده از انرژی آب کندانس و حرارت آبمیوه خام خروجی، چهار عدد اواپراتور فیلم ریزشی[1] (که به‌صورت چند اثره کار می‌کنند؛ E1, E2, E3, E4)، یک عدد برج تقطیر برای آروماگیری از آبمیوه خام (DT) و یک عدد خنک‌کن آبمیوه (JC) است. آب مورد نیاز برای خنک‌کاری آبمیوه و کندانس کردن بخار مرحله‌ی آخر در چگالنده بارومتریک توسط یک برج خنک‌کن (CT) تأمین می‌شود. طی فرآیند تولید کنسانتره، آبمیوه‌ی خام پس از طی چهار مرحله پیش‌گرمایش به‌ترتیب در مبدل HE و اواپراتورهای E4، E3 و E2 جهت آروماگیری وارد برج تقطیر می‌گردد و پس از انجام آروماگیری طی دو مرحله در اواپراتور E2 تغلیظ می‌شود. سپس با عبور مجدد از مبدل HE و با انتقال حرارت خود به آبمیوه خام ورودی از خط تغلیظ خارج می‌گردد. آبمیوه شفاف پس از طی چهار مرحله پیش‌گرمایش در مبدل HE (توسط کندانس خروجی از خط تغلیظ) و اواپراتورهای E3، E2 و E1 در اواپراتور E1 تغلیظ می‌شود. پس از خروج از E1 به‌ترتیب در اواپراتورهای E3 و E4 تغلیظ شده و در نهایت جهت کاهش دما وارد چیلر می‌گردد. از کندانس خروجی خط تغلیظ (جریان 40) نیز برای تولید بخار در دیگ‌خانه استفاده می‌شود.

فرضیات تحلیل

برای انجام تحلیل‌های انرژی و اکسرژی فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- شرایط حالت‌پایا نسبت به زمان برای کل خط تغلیظ و اجزای آن در نظر گرفته‌شده‌اند.
- دما و فشار حالت مرده به‌ترتیب 298.15K و 101.3kPa فرض شده‌اند.
- دما و فشار حالت مرجع به‌ترتیب 0°C و 101.3kPa فرض شده‌اند.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شده است.
- فقط از اکسرژی فیزیکی جریان برای محاسبات استفاده شده است.

دمانگاری

از دوربین دمانگار (G120EXD, NEC Avio, Japan) برای داده‌برداری‌های دمانگاری استفاده شد. نمونه‌ای از تصویر دمانگاری خط تغلیظ در شکل ۲ نشان داده شده است. نرخ هدررفت حرارت از اواپراتور اول (E1) به دلیل مشخص نبودن دبی بخار ورودی، از روش موازنه‌ی انرژی قابل محاسبه نبود؛ بنابراین از روابط انتقال حرارت برای محاسبه آن استفاده شد. از مقدار به‌دست آمده در تحلیل‌های ترمودینامیکی اواپراتور اول (E1) استفاده گردید.

یک رویکرد حالت‌پایا، طبق اصل بقای انرژی حرارت انتقال یافته رسانشی از بدنه، برابر با مجموع انتقال حرارت جابه‌جایی و انتقال

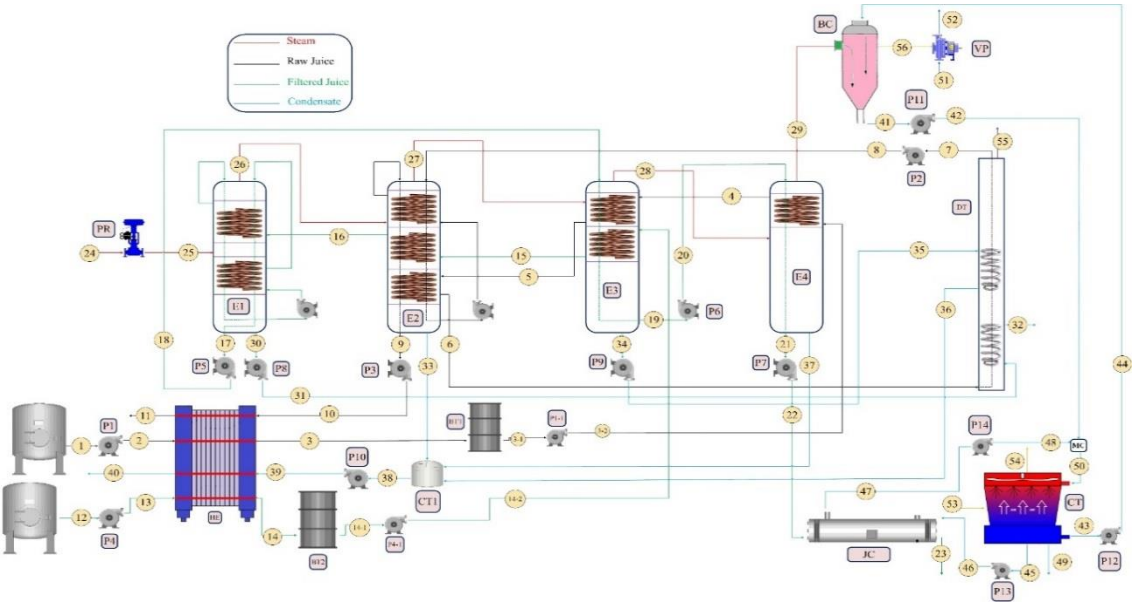
1- Falling film

حرارت تابشی از سطح تجهیزات است (Forero-Núñez and Sierra-Vargas, 2016):

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (۱)$$

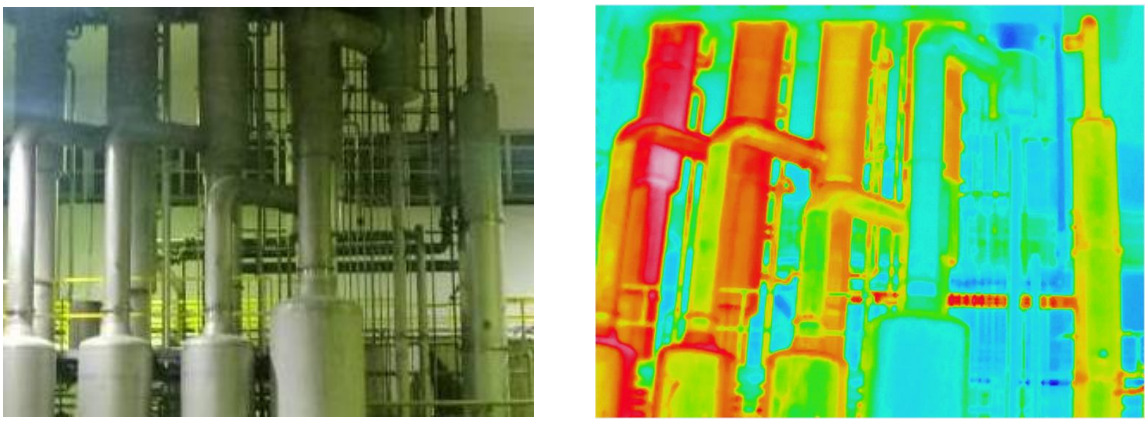
$$\dot{Q}_{conv} = hA\left(T_s - T_\infty\right) \quad (۲)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A\left(T_s^{\,4} - T_\infty^{\,4}\right) \quad (۳)$$



شکل ۱- روندنمای فرآیند تغلیظ آب آلبالو

Fig. 1. Flow diagram of cherry concentration process



(a) (b)

شکل ۲- الف) تصویر اصلی، ب) تصویر دمانگاری متناظر

Fig. 2. a) Main photo, b) Corresponding thermographic photo

در که h ضریب جابه‌جایی متوسط $\left(Wm^{-2}{}^{\circ}C^{-1}\right)$، A مساحت سطح (m^2)، T_s دمای میانگین سطح (K)، T_∞ دمای محیط (K)، ε ضریب صدور سطح و σ ثابت استفان-بولتزمن $(5.67\times10^{-8}\,Wm^{-2}K^{-4})$ است. با توجه به نبود جریان هوای اجباری، فرض انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محاسبات لحاظ شد. در انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، ضریب انتقال حرارت به‌عنوان تابعی از عدد بی‌بعد رایلی محاسبه می‌شود (Forero-Núñez and Sierra-Vargas, 2016):

$$Ra = \frac{g\beta\left(T_s - T_\infty\right)L^3}{\vartheta\alpha} \quad (۴)$$

g شتاب جاذبه (ms^{-2})، β ضریب انبساط حجمی (K^{-1})، L طول مشخصه (m)، ϑ لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1}) و α ضریب نفوذ

حرارتی (m^2s^{-1}) است. به‌طورکلی روابط تجربی جابه‌جایی طبیعی به‌صورت زیر است (Cengel, 2014):

$$Nu = cRa_L^{\,n} \quad (۵)$$

بسته به نوع هندسه و رژیم جریان، عدد ناسلت با استفاده از روابط تجربی متناظر پیشنهادشده در منابع، تعیین می‌شود و سپس با استفاده از تعریف آن، ضریب جابه‌جایی به‌دست می‌آید (Cengel, 2014):

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (۶)$$

k ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}°C^{-1}$) است. برای انجام محاسبات انتقال حرارت از نرم‌افزار EES استفاده شد. این نرم‌افزار با داشتن دمای سطح، دمای محیط، طول مشخصه و با استفاده از خواص ترموفیزیکی هوا که در کتابخانه نرم‌افزار موجود است، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را محاسبه می‌کند. با در اختیار داشتن این ضریب، مقدار حرارت اتلاف شده به روش جابه‌جایی از هر سطح محاسبه می‌شود. حرارت اتلافی از هریک از سطوح به روش تابش نیز توسط نرم‌افزار با لحاظ کردن ضریب نشر سطوح محاسبه شد.

تحلیل انرژی

دبی جریان‌های جرمی خط تغلیظ (به‌جز آبمیوه‌ی ورودی به خط؛ جریان‌های ۱ و ۱۲) به دلیل محدودیت‌های موجود قابل اندازه‌گیری نبود و از تحلیل انرژی برای محاسبه‌ی آن‌ها استفاده شد. تحلیل انرژی شامل حل هم‌زمان موازنه‌ی جرم و انرژی برای یک سامانه است. موازنه‌ی جرم و انرژی برای حجم کنترل در حالت‌پایا به‌صورت روابط (۷) و (۸) بیان می‌شود:

$$\sum_{in}\dot{m} = \sum_{out}\dot{m} \quad (۷)$$

$$\sum_{in}\left(\dot{m}h + \dot{Q} + \dot{W}\right) = \sum_{out}\left(\dot{m}h + \dot{Q} + \dot{W}\right) \quad (۸)$$

$\dot{m}$ دبی جرمی ($kg\,s^{-1}$)، $\dot{Q}$ نرخ انتقال حرارت (kW)، $\dot{W}$ نرخ انتقال کار (kW) و h انتالپی مخصوص ($kJ.kg^{-1}$) است. پارامتر اقتصاد بخار از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Bapat *et al.*, 2013):

$$SE = \sum \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_S} \quad (۹)$$

که $\dot{m}_V$ نرخ آب تبخیر شده از آبمیوه ($kg\,s^{-1}$) و $\dot{m}_S$ دبی جرمی بخار زندهٔ ورودی ($kg\,s^{-1}$) به خط تغلیظ است. برای محاسبهٔ انتالپی آبمیوه از رابطه (۱۰) استفاده شد (Cengel, 2011):

$$h = C_p\left(T - T_{ref}\right) + v\left(P - P_{ref}\right) \quad (۱۰)$$

C_p گرمای ویژه آبمیوه ($kJ\,kg^{-1}°C^{-1}$)، T دما (°C)، P فشار (kPa)، T_{ref} دمای حالت مرجع (°C) و P_{ref} فشار حالت مرجع است.

تحلیل اکسرژی

با تعریف سوخت و محصول برای سامانه، موازنه اکسرژی برای فرآیند جریان پایدار را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۱) نوشت (Akbari, 2018):

$$\dot{E}x_F = \dot{E}x_P + \dot{E}x_D \quad (۱۱)$$

که $\dot{E}x_D$ نرخ تخریب اکسرژی، $\dot{E}x_F$ نرخ اکسرژی سوخت و $\dot{E}x_P$ نرخ اکسرژی محصول با واحد kW است. بازده اکسرژی برای یک سامانه به‌صورت نسبت اکسرژی محصول به اکسرژی سوخت تعریف می‌شود (Tsatsaronis, 1993):

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_P}{\dot{E}x_F} \quad (۱۲)$$

مقدار اکسرژی تخریب‌شده در جزء kام سامانه را می‌توان توسط نسبت تخریب اکسرژی، با کل اکسرژی تخریب‌شده در سامانه مقایسه کرد که از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (Xiang *et al.*, 2004):

$$y = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{D,total}} \times 100 \quad (۱۳)$$

که $\dot{E}x_{D,total}$ کل اکسرژی تخریب‌شده در خط تغلیظ است. اکسرژی فیزیکی مخصوص آب و بخار در نقاط مختلف خط تولید از رابطه (۱۴) تعیین می‌شود (Cengel, 2011):

$$ex = \left(h - h_0\right) - T_0\left(s - s_0\right) \quad (۱۴)$$

T_0 دمای حالت مرده (°C)، h انتالپی مخصوص ($kg\,s^{-1}$)، s آنتروپی مخصوص ($kJ\,kg^{-1}°C^{-1}$)، h_0 انتالپی مخصوص حالت مرده و s_0 آنتروپی مخصوص حالت مرده است. انتقال اکسرژی توسط حرارت و کار را می‌توان به‌صورت روابط (۱۵) و (۱۶) بیان کرد (Atmaca and Yumrutaş, 2014a):

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right)\dot{Q} \quad (۱۵)$$

$$\dot{E}x_{\dot{W}} = \dot{W} \quad (۱۶)$$

$\dot{Q}$ نرخ انتقال حرارت (kW)، T_0 دمای حالت مرده (°C)، T_s دمای سطح انتقال حرارت (°C) و $\dot{W}$ نرخ انتقال کار (kW) است. اکسرژی فیزیکی جریان هوای مرطوب را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۷) محاسبه کرد (Dincer, 2018):

$$ex = \left[(C_P)_a + \omega(C_P)_v\right](T - T_0) - T_0\left\{\left[(C_P)_a + \omega(C_P)_v\right]\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - (R_a + \omega R_v)\ln\left(\frac{P}{P_0}\right)\right\} + T_0\left\{(R_a + \omega R_v)\ln\left(\frac{1+1.607\omega_0}{1+1.607\omega}\right) + 1.607\omega R_a \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right\} \quad (۱۷)$$

که $(C_P)_a$ گرمای ویژهٔ هوای خشک $(kJ\ kg^{-1}{}^{\circ}C^{-1})$، $(C_P)_v$ گرمای ویژهٔ بخار آب $(kJ\ kg^{-1}{}^{\circ}C^{-1})$ ، T دمای هوا (K)، T_0 دمای حالت مرده (K)، ω نسبت رطوبت هوا $(kg_{\text{آب}}/kg_{\text{هوای خشک}})$، ω_0 نسبت رطوبت هوا در حالت مرده $(kg_{\text{آب}}/kg_{\text{هوای خشک}})$، R_a ثابت گازی هوای خشک $(kJ\ kg^{-1}K^{-1})$، R_v ثابت گازی بخار آب $(kJ\ kg^{-1}K^{-1})$، P فشار هوا (kPa) و P_0 فشار حالت مرده (kPa) است. برای محاسبه اکسرژی فیزیکی جریان آبمیوه از رابطه (۱۸) استفاده شد (Soufiyan *et al.*, 2017):

$$ex = C_p(T-T_0)+v(P-P_0)-T_0\left(C_p \ln\frac{T}{T_0}\right) \qquad (۱۸)$$

v حجم مخصوص آبمیوه (m^3kg^{-1}) است. گرمای ویژه و حجم مخصوص مواد غذایی را می‌توان به‌صورت روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه نمود (Yildirim and Genc, 2017):

$$v = \sum_i \frac{Y_i}{\rho_i} \qquad (۱۹)$$

$$C_p = \sum_i Y_i C_{p,i} \qquad (۲۰)$$

که Y_i کسر جرمی جزء i، $C_{p,i}$ گرمای ویژه جزء i $(kJ\ kg^{-1}{}^{\circ}C^{-1})$ و ρ_i چگالی جزء i $(kg\ m^{-3})$ است. گرمای ویژه و حجم مخصوص اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مواد غذایی به‌صورت تابعی از دما در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- گرمای ویژه و چگالی اجزای تشکیل‌دهنده محصولات کشاورزی (Yildirim and Genc, 2017)

Table 1- Specific heat and density values for the components of agricultural products

جزء Component	معادله ظرفیت گرمایی ویژه Specific heat capacity equation	معادله چگالی Density equation
پروتئین (Protein)	$C_p = 2.0082+\frac{1.2089}{10^3}T-\frac{1.3129}{10^6}T^2$	$\rho = 1.3299\times10^3-\frac{5.184}{10}T$
چربی (Fat)	$C_p = 1.9842+\frac{1.4733}{10^3}T-\frac{4.8008}{10^6}T^2$	$\rho = 9.2559\times10^2-\frac{4.1757}{10}T$
کربوهیدرات (Carbohydrate)	$C_p = 1.5488+\frac{1.9625}{10^3}T-\frac{5.9399}{10^6}T^2$	$\rho = 1.5991\times10^3-\frac{3.1046}{10}T$
خاکستر (Ash)	$C_p = 1.0926+\frac{1.8896}{10^3}T-\frac{3.6817}{10^6}T^2$	$\rho = 2.4238\times10^3-\frac{2.8063}{10}T$
آب (Water)	$C_p = 4.1762-\frac{9.0864}{10^3}T+\frac{5.4731}{10^6}T^2$	$\rho = 9.9718\times10^2+\frac{3.1439}{10^3}T-\frac{3.7574}{10^3}T^2$

برای یک سیستم پایا، محصول به‌صورت مجموع اکسرژی‌های خروجی و افزایش اکسرژی بین ورودی و خروجی یک جریان اکسرژی تعریف می‌شود. همچنین سوخت را می‌توان به‌صورت مجموع اکسرژی‌های ورودی و کاهش اکسرژی بین ورودی و خروجی یک جریان اکسرژی تعریف کرد (Lazzaretto and Tsatsaronis, 2006). پس از حل همزمان موازنه جرم و انرژی برای تمامی تجهیزات خط تغلیظ، دبی جرمی جریان‌ها محاسبه شد، سپس نرخ اکسرژی جریان‌ها از رابطه (۲۱) به‌دست آمد (Atmaca and Yumrutaş, 2014a):

$$\dot{E}x = \dot{m}(ex) \qquad (۲۱)$$

$\dot{m}$ دبی جرمی جریان $(kg\ s^{-1})$ و ex اکسرژی مخصوص فیزیکی $(kJ\ kg^{-1})$ است که از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه نرخ اکسرژی جریان‌ها، محاسبه سوخت و محصول برای هر یک از زیرسامانه‌های خط تغلیظ صورت پذیرفت. به‌عنوان نمونه موازنه جرم، موازنه انرژی، سوخت و محصول برای مبدل حرارتی (HE) به‌صورت روابط (۲۲) تا (۲۵) است:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad , \quad \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad , \quad \dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} \quad , \quad \dot{m}_{39} = \dot{m}_{40} \qquad (۲۲)$$

$$\dot{m}_2 h_2+\dot{m}_{10} h_{10}+\dot{m}_{13} h_{13}+\dot{m}_{39} h_{39} = \dot{m}_3 h_3+\dot{m}_{11} h_{11}+\dot{m}_{14} h_{14}+\dot{m}_{40} h_{40} \qquad (۲۳)$$

$$\dot{E}x_F = \left(\dot{E}x_{10}-\dot{E}x_{11}\right)+\left(\dot{E}x_{39}-\dot{E}x_{40}\right) \qquad (۲۴)$$

$$\dot{E}x_P = \left(\dot{E}x_3-\dot{E}x_2\right)+\left(\dot{E}x_{14}-\dot{E}x_{13}\right) \qquad (۲۵)$$

تحلیل انرژی و اکسرژی با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار EES انجام شد. این نرم‌افزار به دلیل داشتن کتابخانه خواص ترمودینامیکی مواد، کاملاً با محاسبات ترمودینامیکی سازگار است.

جدول ۲- فشار، دما، دبی جرمی و نرخ اکسرژی جریان‌های خط تغلیظ

Table 2- Pressure, temperature, mass flow rate and exergy rate of evaporation line flows

شماره جریان Flow no.	P(kPa)	$T(°C)$	$\dot{m}(kg\ s^{-1})$	$\dot{E}x(kW)$
1	101.33	15.00	3.50	2.35
2	301.33	15.02	3.50	3.01
3	231.33	55.00	3.50	19.87
3-1	101.33	55.02	3.50	19.45
3-2	701.33	55.09	3.50	21.59
4	621.33	64.00	3.50	34.07
5	551.33	71.00	3.50	45.89
6	531.33	79.00	3.50	61.74
7	146.33	87.00	3.50	78.50
8	301.33	87.03	3.50	79.11
9	171.33	115.60	2.62	117.13
10	490.33	115.70	2.62	118.21
11	441.33	62.60	2.62	22.87
12	101.33	50.00	3.50	13.40
13	301.33	50.02	3.50	14.10
14	251.33	70.00	3.50	42.34
14-1	101.33	70.02	3.50	41.87
14-2	451.33	70.07	3.50	43.15
15	401.33	77.00	3.50	56.20
16	381.33	85.00	3.50	73.41
17	241.33	126.70	2.31	123.75
18	401.33	126.72	2.31	124.17
19	126.33	106.90	1.45	47.72
20	401.33	107.00	1.45	48.19
21	81.33	95.80	0.63	11.00
22	401.33	95.90	0.63	11.18
23	351.33	45.00	0.63	1.07
24	801.33	180.00	1.43	1135.72
25	301.33	164.50	1.43	950.24
26	241.33	126.28	1.19	726.98
27	171.33	115.42	0.88	496.19
28	126.33	106.30	0.86	447.92
29	81.33	93.95	0.82	375.10
30	301.33	133.71	1.43	96.86
31	526.33	133.71	1.43	97.18
32	401.33	121.40	1.43	77.83
33	241.33	126.28	1.19	70.50
34	171.33	115.42	0.88	42.42
35	566.33	115.50	0.88	42.84
36	451.33	105.50	0.88	34.44
37	126.33	106.30	0.86	34.08
38	126.33	106.30	2.93	115.70
39	481.33	106.40	2.93	116.99
40	331.33	84.46	2.93	64.93
41	121.33	40.00	28.37	43.90
42	651.33	40.06	28.37	59.30
43	101.33	22.00	27.55	1.75
44	601.33	22.05	27.55	15.50
45	101.33	22.00	1.04	0.07
46	241.33	22.01	1.04	0.21
47	141.33	40.00	1.04	1.64
48	301.33	40.02	1.04	1.81
49	101.33	22.00	0.02	0.00
50	301.33	40.13	29.41	51.59
51	101.33	25.00	4.00	0.00
52	1801.33	25.16	4.00	6.82
53	101.33	25.00	27.18	18.06
54	101.33	35.00	27.98	22.19

نتایج و بحث

مشخصات ترمودینامیکی جریان‌های خط تغلیظ شامل فشار، دما و دبی به‌ترتیب در ستون سوم، چهارم و پنجم جدول ۲ آورده شده است. فشار و دمای جریان‌ها و دبی شربت ورودی اندازه‌گیری شده و سایر دبی‌های جرمی توسط تحلیل انرژی و استفاده از نتایج دمانگاری محاسبه شدند. برای ارزیابی عملکرد خط تغلیظ از پارامتر اقتصاد بخار استفاده شد. پارامتر اقتصاد بخار برای خط تغلیظ کارخانه پاکدیس ۲/۶۳ محاسبه شد بدین معنی که به‌ازای هر کیلوگرم بخار زنده‌ی واردشده به خط تغلیظ، ۲/۶۳ کیلوگرم آب از آب آلبالو تبخیر می‌شود. در پژوهش مشابهی بالکان و همکاران مقدار پارامتر اقتصاد بخار برای خط تغلیظ آب‌پرتقال را در شرایط عملکردی مختلف بین ۲/۰۵ تا ۲/۱۴ محاسبه کردند (Balkan *et al.*, 2005). در پژوهش دیگری مقدار این پارامتر در خط تغلیظ آب گوجه‌فرنگی ۱/۵۸ محاسبه شد (Sogut *et al.*, 2010). تحقیق‌های دیگری نیز در زمینه‌ی تغلیظ مواد غذایی انجام شده است. برای مثال باپات و همکاران مقدار پارامتر اقتصاد بخار برای تغلیظ شربت چغندرقند را ۱/۹۹ به‌دست آوردند (Bapat *et al.*, 2013). کارخانه پاکدیس ارومیه از لحاظ بازدهی تغلیظ در شرایط بهتری قرار دارد. پیش‌گرمایش آبمیوه ورودی به تغلیظ در مبدل حرارتی و کویل‌های موجود در اواپراتورها، باعث می‌شود که قسمت عمده‌ای از انتالپی بخار ورودی از دیگ‌خانه به اواپراتور مرحله اول، به‌جای افزایش دمای آن صرف گرمای نهان و تغلیظ آبمیوه گردد.

نتایج نشان داد که دمای سطح خارجی تجهیزات به‌جز اواپراتورها و مخزن کندانس، اختلاف بسیار اندکی با دمای محیط اطراف آن‌ها داشتند به‌طوری‌که از شار هدررفت حرارت آن‌ها چشم‌پوشی شد. نرخ هدررفت حرارت از سطح اواپراتور اول (E1) ۲۱/۲۳ کیلووات محاسبه شد. همچنین نرخ هدررفت حرارت از تجهیزات E2، E3، E4، و CT1 با استفاده از تحلیل انرژی محاسبه شد. انرژی اتلافی به هرگونه جریان انرژی گفته می‌شود که بدون هیچ استفاده‌ای از سیستم خارج شود. جریان‌های جرمی ۳۲، ۴۹، ۵۲ و ۵۴ بدون هیچ استفاده‌ای از سامانه خارج می‌شوند و جزو تلفات انرژی خط تغلیظ به‌شمار می‌آیند. نرخ هدررفت انرژی از خط تغلیظ به تفکیک جریان‌های انرژی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- نرخ هدررفت انرژی تجهیزات خط تغلیظ

Table 3- energy loss rate of evaporation line components

	state 32	state 49	state 52	state 54	E1	E2	E3	E4	CT1
هدررفت انرژی Energy loss (kW)	728.42	2.07	428.34	3611.54	21.23	16.66	10.02	4.75	97.80
هدررفت انرژی Energy loss (%)	14.80	0.04	8.70	73.39	0.43	0.34	0.20	0.10	1.99

کل نرخ هدررفت انرژی از خط تغلیظ ۴۹۲۰/۸۲ کیلووات محاسبه شد که این مقدار برابر است با ۷۴/۸ درصد از کل انرژی ورودی به خط تغلیظ. انرژی هدررفت جریان هوای خروجی از برج خنک‌کننده (جریان ۵۴) با ۷۳/۳۹ درصد از کل هدررفت انرژی خط تغلیظ، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. همچنین جریان ۳۲ با ۱۴/۸ درصد در جایگاه دوم قرار دارد. هدررفت انرژی از سطح تجهیزات خط تغلیظ تنها ۳/۰۶ درصد از کل هدررفت انرژی خط تغلیظ است.

از نکات قابل‌توجه در نتایج تحلیل انرژی، مقدار تلفات انرژی در برج خنک‌کننده است (جریان ۵۴) که ۷۳/۳۹٪ از کل هدررفت انرژی را شامل می‌شود. سربخار مرحلهٔ چهار (جریان ۲۹) وارد چگالنده شده و بعد از اختلاط با آب جهت تأمین آب سرد مصرفی به برج خنک‌کننده فرستاده می‌شود که حرارت آن با تبخیر شدن مقداری از آب گرم ورودی، از سامانه خارج می‌گردد.

تحلیل اکسرژی خط تغلیظ

نرخ اکسرژی هر یک از جریان‌های خط تغلیظ برای هر نقطه محاسبه و در ستون ششم جدول ۲ آورده شده است. جدول ۴ شامل نرخ اکسرژی جریان سوخت، نرخ اکسرژی جریان محصول، بازده اکسرژی، نرخ تخریب اکسرژی و نسبت تخریب اکسرژی برای هر جزء از خط تغلیظ است که با استفاده از اطلاعات جدول ۲ محاسبه شده است. کل اکسرژی ورودی به خط تغلیظ ۴۸۳۲/۰۳ کیلووات است که از این مقدار، ۱۰۴۵/۸۵ کیلووات در اثر بازگشت‌ناپذیری‌ها تخریب‌شده و ۳۷۸۶/۱۹ کیلووات از سامانه خارج می‌شود. همچنین بازده اکسرژی خط تغلیظ آبمیوه ۷۵/۷۶ درصد محاسبه شد.

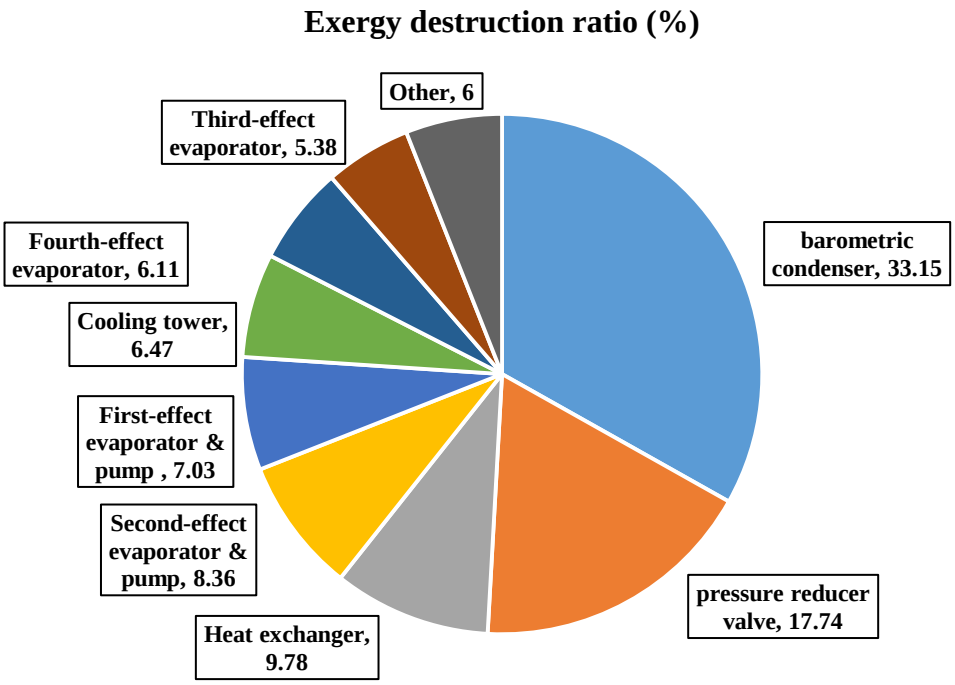
جدول ٤- نرخ اکسرژی جریان سوخت، نرخ اکسرژی جریان محصول، بازده اکسرژی، نرخ تخریب اکسرژی و نسبت تخریب اکسرژی برای هر جزء از خط تغلیظ

Table 4- Exergy rate of fuel, exergy rate of exergy, exergy efficiency, exergy destruction rate and exergy destruction ration for each component of evaporation line

Component	$\dot{E}x_F\,(kW)$	$\dot{E}x_P\,(kW)$	$\eta_{ex}\,(\%)$	$\dot{E}x_D\,(kW)$	$y(\%)$
Distillation Tower (DT)	27.75	16.76	60.40	10.99	1.05
Barometric Condenser (BC)	390.60	43.90	11.24	346.71	33.15
Balance Tank (BT1)	19.87	19.45	97.89	0.42	0.04
Balance Tank (BT1)	42.34	41.87	98.88	0.47	0.05
Juice Chiller (JC)	10.12	1.42	14.09	8.69	0.83
Mixing Chamber (MC)	61.11	51.59	84.42	9.52	0.91
Cooling Tower (CT)	91.64	24.01	26.20	67.63	6.47
Heat Exchanger (HE)	147.40	45.11	30.60	102.30	9.78
First-effect evaporator & pump (E1)	927.28	853.78	92.07	73.50	7.03
First-effect evaporator & pump (E2)	736.08	648.65	88.12	87.43	8.36
First-effect evaporator (E3)	577.94	521.72	90.27	56.22	5.38
First-effect evaporator (E4)	462.43	398.58	86.19	63.85	6.11
Condensate Tank (CT1)	139.02	123.27	88.67	15.75	1.51
Pump (P1)	1.00	0.67	66.62	0.33	0.03
Pump (P1-1)	1.00	0.61	60.98	0.39	0.04
Pump (P2)	1.50	1.08	71.70	0.42	0.04
Pump (P3)	1.00	0.69	69.49	0.31	0.03
Pump (P4)	1.70	1.28	75.24	0.42	0.04
Pump (P4-1)	0.50	0.42	83.67	0.08	0.01
Pump (P5)	0.50	0.48	95.34	0.02	0.00
Pump (P6)	0.20	0.18	90.27	0.02	0.00
Pump (P7)	0.50	0.32	63.48	0.18	0.02
Pump (P8)	0.50	0.41	82.48	0.09	0.01
Pump (P9)	1.50	1.29	85.68	0.21	0.02
Pump (P10)	22.00	15.41	70.03	6.59	0.63
Pump (P11)	2.90	2.14	73.66	0.76	0.07
Pump (P12)	18.50	13.75	74.34	4.75	0.45
Pump (P13)	0.20	0.15	73.13	0.05	0.01
Pump (P14)	0.22	0.17	78.04	0.05	0.00
Pressure Reducer (PR)	1135.72	950.24	83.67	185.49	17.74
Vacuum Pump (VP)	9.00	6.82	75.76	2.18	0.21

بیشترین مقدار تخریب اکسرژی در چگالنده بارومتریک BC (۳۴۶/۷۱ کیلووات) مشاهده می‌شود. پس‌ازآن به‌ترتیب شیر کاهش فشار PR (۱۸۵/۴۹ کیلووات)، مبدل حرارتی صفحه‌ای HE (۱۰۲/۳ کیلووات)، اواپراتور E2 (۸۷/۴۳ کیلووات)، اواپراتور E1 (۷۳/۵ کیلووات)، برج خنک‌کننده CT (۶۷/۶۳ کیلووات)، اواپراتور E4 (۶۳/۸۵ کیلووات) و اواپراتور E3 (۵۶/۲۲ کیلووات) قرار دارند. تخریب اکسرژی سایر اجزاء در مقایسه با کل تخریب اکسرژی خط تغلیظ ناچیز است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مجموع تخریب اکسرژی سایر اجزاء معادل ۶ درصد از کل تخریب اکسرژی خط تغلیظ است. چگالنده بارومتریک BC ۳۳/۱۵ درصد از تخریب اکسرژی کل را به خود اختصاص داده است. اختلاط و تغییر فاز از بخار به آب که از عوامل بازگشت‌ناپذیری هستند، باعث تخریب اکسرژی در چگالنده می‌شود. افت فشار شدید در شیر کاهش فشار باعث تولید آنتروپی بالا و در نتیجه تخریب اکسرژی بالا در این تجهیز شده است به طوری که ۱۷/۷۴ درصد از تخریب اکسرژی کل خط مربوط به این تجهیز است. مبدل حرارتی HE ۹/۷۸ درصد از کل تخریب اکسرژی خط تغلیظ را به خود اختصاص داده است. نرخ انتقال حرارت بالا باعث بالا بودن نرخ تخریب اکسرژی در این مبدل است. ۲۶/۸۸ درصد از تخریب اکسرژی مربوط به اواپراتورهاست. انتقال حرارت و تغییر فاز آب از حالت مایع به بخار از عوامل مهم تخریب اکسرژی در اواپراتورها به‌شمار می‌رود. بالا بودن شدت فرآیند و تولید آنتروپی در اثر تغییر فاز باعث بالا بودن نرخ تخریب اکسرژی در برج خنک‌کننده است (۶/۴۷ درصد).



شکل ۳- نسبت تخریب اکسرژی برای اجزای خط تغلیظ

Fig. 3. Exergy destruction rate for evaporation line components

کمترین بازده اکسرژی به‌ترتیب برای چگالنده بارومتریک BC با ۱۱/۲۴ درصد، خنک‌کن آب‌میوه JC با ۱۴/۰۹ درصد، برج خنک‌کن CT با ۲۶/۲ درصد و مبدل حرارتی صفحه‌ای با ۳۰/۶ درصد محاسبه شد. به علت اختلاط شدید و تولید آنتروپی بسیار بالا در چگالنده، این جزء کمترین بازده اکسرژی خط تغلیظ را به خود اختصاص داده است. هرچند خنک‌کن آبمیوه JC کمتر از یک درصد نرخ تخریب اکسرژی کل را دارد، ولی به علت ناکارآمدی‌های ترمودینامیکی بازده اکسرژی آن بسیار کم است و قسمت بسیار زیادی از اکسرژی جریان سوخت در آن تخریب می‌گردد.

بخار خروجی از اواپراتور E4 به علت دما و فشار نسبتاً پایین، قابلیت استفاده برای گرمادهی سایر فرآیندها را ندارد. با افزایش دما و فشار (درنتیجه افزایش انتالپی) با تجهیزاتی مانند کمپرسور یا ترموکمپرسور (Maroulis and Saravacos, 2003)، همچنین با افزایش مراحل تبخیر (۵ یا ۶ اثره کردن خط تغلیظ) می‌توان از انرژی این بخار استفاده کرده (Lorenz, 2008) و نرخ تخریب اکسرژی را کاهش داد. با استفاده از بخار مرحلهٔ آخر اکسرژی تخریب‌شده در چگالنده کاهش می‌یابد و پارامتر اقتصاد بخار افزایش پیدا می‌کند (Bapat *et al.*, 2016). همچنین تلفات انرژی و تخریب اکسرژی در برج خنک‌کننده نیز کاهش خواهد یافت. کاهش تخریب اکسرژی در خط تغلیظ باعث نزدیک‌تر شدن فرآیند به حالت ایده‌آل و در نتیجه کاهش مصرف انرژی خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور بررسی دقیق وضعیت عملکردی، تمامی اجزای خط تغلیظ دمانگاری شدند. با استفاده از داده‌های ترمودینامیکی و نتایج دمانگاری، موازنه جرم و انرژی انجام شد و تمامی جریان‌های انرژی و در نتیجه هدررفت‌های انرژی تعیین شدند. بازده خط تغلیظ در قالب پارامتر اقتصاد بخار محاسبه شد. به منظور تعیین مکان‌ها و بزرگی ناکارآمدی‌های ترمودینامیکی و ارزیابی نزدیک بودن شرایط کارکردی تجهیزات به حالت ایده‌آل، پارامترهای تحلیل اکسرژی محاسبه شدند و نقاط ناکارآمد شناسایی گردیدند. بیشترین تلفات انرژی در برج خنک‌کننده و بیشترین نرخ تخریب اکسرژی در چگالنده بارومتریک مشاهده شد. احیا و استفاده از سربخار مرحله آخر با استفاده از روش‌هایی مانند تراکم مکانیکی (استفاده از کمپرسور)، تراکم حرارتی (استفاده از ترموکمپرسور) و افزایش مراحل تبخیر باعث کاهش نرخ تخریب اکسرژی در چگالنده بارومتریک و در نتیجه نزدیک شدن فرآیند به حالت ایده‌آل شده و هدررفت انرژی در برج خنک‌کننده را کاهش خواهد داد.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مساعدت کارخانه پاکدیس ارومیه در حمایت مالی و مهندسی و در اختیار گذاشتن داده‌های فنی قدردانی کنند.

References

1. Akbari, N. 2018. Introducing and 3E (energy, exergy, economic) analysis of an integrated transcritical CO_2 Rankine cycle, Stirling power cycle and LNG regasification process. Applied Thermal Engineering 140: 442-454.
2. Assari, M. R., T. H. Basirat, E. Najafpour, A. Ahmadi, and I. Jafari. 2014. Exergy modeling and performance evaluation of pulp and paper production process of bagasse, a case study. Thermal Science 18 (4): 1399-1412.
3. Atmaca, A., and R. Yumrutaş. 2014a. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part I-Application. Energy Conversion and Management 79: 790-798.
4. Atmaca, A. and R. Yumrutaş. 2014b. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part II-Application. Energy Conversion and Management 79: 799-808.
5. Balkan, F., N. Colak, and A. Hepbasli. 2005. Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis. International Journal of Energy Research 29 (5): 455-470.
6. Bapat, S., V. Majali, and G. Ravindranath. 2013. Exergetic evaluation and comparison of quintuple effect evaporation units in Indian sugar industries. International Journal of Energy Research 37 (12): 1415-1427.
7. Bapat, S., V. Majali, and G. Ravindranath. 2016. Exergy and sustainability analysis of quintuple effect evaporation unit in a sugar industry-a case study. International Journal of Renewable Energy Technology 7 (1): 46-68.
8. Carlomagno, G. M., and G. Cardone. 2010. Infrared thermography for convective heat transfer measurements. Experiments in fluids 49 (6): 1187-1218.
9. Carlomagno, G. M., L. de Luca, G. Cardone, and T. Astarita. 2014. Heat flux sensors for infrared thermography in convective heat transfer. Sensors 14 (11): 21065-21116.
10. Cengel, Y. 2011. Thermodynamics an Engineering Approach. 5th Edition by Yunus A Cengel, Thermodynamics an Engineering Approach, Digital Designs.
11. Cengel, Y. 2014. Heat and mass transfer: fundamentals and applications, McGraw-Hill Higher Education.
12. Costa, M. M., R. Schaeffer, and E. Worrell. 2001. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems. Energy 26 (4): 363-384.
13. Dincer, I., and M. A. Rosen. 2005. Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews 9 (2): 169-189.
14. Dincer, I. 2018. Comprehensive energy systems, Elsevier.
15. FAO. 2018. https://www.fao.org/news/archive/news-by-date/2018/en/ (accessed April 25, 2020).
16. Forero-Núñez, C. A., and F. E. Sierra-Vargas. 2016. Heat Losses Analysis Using Infrared Thermography on a Fixed Bed Downdraft Gasifier. International Review of Mechanical Engineering 10 (4): 239-246.
17. Hosseini, S. S., M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, H. Younesi, and G. Najafpour. 2015. Exergy analysis of biohydrogen production from various carbon sources via anaerobic photosynthetic bacteria (Rhodospirillum rubrum). Energy 93: 730-739.
18. Kamate, S., and P. Gangavati. 2009. Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. Applied Thermal Engineering 29 (5-6): 1187-1194.
19. Lazaretto, A., and G. Tastasaronis. 2006. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems 31 (1): 1257-1289.
20. Lorenz, F. 2008. Improving energy efficiency in sugar processing Handbook of Water and Energy Management in Food Processing. Elsevier.
21. Piri, A., A. M. Nikbakht, and H. Janisarnavi. 2019. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery 8: 66-57
22. Ramedani, Z., R. Abdi, M. Omid, and A. Maysami. 2018. Evaluating the Energy Consumption and Environmental Impacts in Milk Production Chain (Case Study: Kermanshah City of Iran). Journal of Agricultural Machinery 8 (2): 435-447. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v8i2.63570.
23. Simionescu, Ş. M., Ü. Düzel, C. Esposito, Z. Ilich, and C. Bălan. 2015. Heat transfer coefficient measurements using infrared thermography technique. Paper presented at the Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 9th International Symposium.
24. Sogut, Z., N. Ilten, and Z. Oktay. 2010. Energetic and exergetic performance evaluation of the quadruple-effect evaporator unit in tomato paste production. Energy 35 (9): 3821-3826.
25. Soufiyan, M., M. Aghbashlo, and H. Mobli. 2016. Journal of Cleaner Production 1-18.
26. Tsatsaronis, G. 1993. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. Progress in Energy and Combustion Science 19 (3): 227-257.
27. Xiang, J., M. Cali, and M. Santarelli. 2004. Calculation for physical and chemical exergy of flows in systems

elaborating mixed-phase flows and a case study in an IRSOFC plant. International Journal of Energy Research 28 (2): 101-115.
28. Yildirim, N., and S. Genc. 2017. Energy and exergy analysis of a milk powder production system. Energy Conversion and Management 149: 698-705.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 219-229

Effect of Different Tillage Systems and Deficit Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Sugar Beet

A. Heidari[1*], A. Ghadami Firouzabadi[1]

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@gmail.com)

Received: 25-08-2020
Revised: 23-09-2020
Accepted: 19-10-2020

How to cite this article:
Heidari, A., and A. Ghadami Firouzabadi. 2022. Effect of Different Tillage Systems and Deficit Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Sugar Beet. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 219-229. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.88341.

Introduction: Conventional tillage is widely used in sugar beet growing areas. However, conventional farming uses more labour and machines that has a negative effect on soil and the environment. Due to limited water resources and recent droughts, proper use of modern tillage and irrigation methods can increase water efficiency and prevent soil degradation as a result of sustainable agriculture.

Materials and Methods: An experiment was conducted to investigate different methods of tillage and water requirements on quantitative and qualitative yield and sugar beet water productivity in the drip irrigation system in Ekbatan Research Station of Hamedan Province from 2018 to 2019. A strip plot experiment with sixteen treatments and three replications was used. Tillage methods in four levels, consisting of T_1- plowing with moldboard plow to a depth of 25-30 cm in autumn + power harrow to a depth of 15-20 cm in spring, T_2- subsoiling to a depth of 35-40 cm + plowing with moldboard plow to a depth of 25-30 cm in autumn + power harrow to a depth of 15-20 cm in spring, T_3- plowing with chisel plow equipped with roller packer to a depth of 25-30 cm in autumn + power harrow to a depth of 15-20 cm in spring and T_4- plowing with sweep plow equipped with roller packer to a depth of 25-30 cm in autumn + power harrow to a depth of 15-20 cm in spring and Irrigation factor consisting of I_1-100%, I_2- 90%, I_3- 80% and I_4- 70% sugar beet water requirement were considered. Soil penetration resistance (PR), the volume of water consumption, root yield, sugar yield, white sugar yield and molasses were measured. Water efficiency in tillage and irrigation treatments was also calculated. MSTAT-C software was used for statistical analysis of data. The Duncan's multiple range test at a 1% probability level was used to compare the means.

Result and Discussion: At a depth of 0-30 cm, no significant difference was observed between tillage methods on soil penetration resistance. At greater depths (35-40 cm) T2 treatment (subsoil + moldboard plow) had the greatest effect in reducing soil resistance. The results showed that the effect of different tillage methods, water requirement and their interactions at the 1% probability level on root yield; sugar yield and white sugar yield were significant. There was no significant difference between sugar beet yield in the T4 tillage treatment and the conventional method (T_1). Treatments T4 (with an average yield of 50686 kg ha^{-1}) and T1 (with an average yield of 50507 kg ha^{-1}) had the highest sugar beet root yield. Also, the tillage method (T_4) compared to the conventional tillage method (T1) reduced fuel consumption by 14.7% and increased field capacity by 52.4% respectively. In the T4 tillage method, irrigation treatments I_{100}, I_{90} and I_{80} with mean water productivity of 6.113, 6.087 and 5.523 kg m^{-3} of water consumption, respectively, had the greatest effect on increasing water productivity, while no significant difference was observed between them.

Conclusion: The tillage method (T_4) compared to the conventional tillage method (T_1) reduced fuel consumption by 14.7% and increased field capacity by 52.4%, respectively. There was no significant difference between sugar beet yield and water productivity in the T4 tillage treatment and the conventional method (T_1). Although full irrigation treatment (100% water requirement) has the highest water efficiency, there is no significant difference between 90 and 80% water requirement treatment. Therefore, in order to save water consumption, 80% water requirement is recommended. The result is that in the T4 tillage method with a supply of 80% water requirement of sugar beet after plant establishment (approximately from the middle of the growing season) about 12% (1207 m^{-3}) in water consumption without significant reduction in water productivity.

Keywords: Chisel plow, Drip irrigation, Power harrow, Soil penetration resistance, Subsoiler

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۲۲۹-۲۱۹

اثر سامانه‌های خاک‌ورزی و کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند

احمد حیدری[1*]، علی قدمی فیروزآبادی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

چکیده

خاک‌ورزی مرسوم به‌طور گسترده در مناطق چغندرکاری استفاده می‌شود. به هرحال خاک‌ورزی مرسوم کارگر و ماشین‌های بیشتری استفاده کرده و اثر منفی روی خاک و محیطزیست دارد. بدین‌منظور تحقیقی برای بررسی اثر روش‌های خاک‌ورزی و کم‌آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی و بهره‌وری آب چغندرقند در سامانه آبیاری قطره‌ای در خاکی با بافت متوسط در ایستگاه تحقیقاتی اکباتان استان همدان در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ به اجرا درآمد. این تحقیق به‌صورت طرح کرت‌های نواری در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل افقی، روش‌های خاک‌ورزی شامل: T_1- گاوآهن برگرداندار در پاییز+ سیکلوتیلر در بهار (شاهد)، T_2- زیرشکن و گاوآهن برگرداندار در پاییز + سیکلوتیلر در بهار، T_3- خاک‌ورز مرکب (گاوآهن قلمی + غلطک) در پاییز + سیکلوتیلر در بهار، T_4- خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چیزل با تیغه‌های پنجه غازی + غلطک) در پاییز+ سیکلوتیلر در بهار و عامل عمودی، تیمار آبی در چهار سطح شامل: I_{100}- تامین ۱۰۰ درصد، I_{90}- تامین ۹۰ درصد، I_{80}- تامین ۸۰ درصد و I_{70}- تامین ۷۰ درصد نیاز آبی بود. پارامترهای مقاومت به نفوذ در خاک (شاخص مخروطی خاک)، میزان حجم آب مصرفی، عملکرد ریشه، شکر، شکر سفید و قند ملاس اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی، تیمار آبی و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد بر عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید و بهره‌وری آب معنی‌دار شدند. از نظر آماری اختلاف معنی‌دار بین تیمار T_4 و روش مرسوم (T_1) و تیمار T_2 از نظر عملکرد ریشه چغندرقند مشاهده نشد. تیمارهای T_4 (با میانگین عملکرد ۵۰/۶۸۶ تن در هکتار) و T_1 (با میانگین عملکرد ۵۰/۵۰۷ تن در هکتار) بیشترین عملکرد ریشه چغندرقند را به خود اختصاص دادند. همچنین روش خاک‌ورزی (T_4) نسبت به روش رایج خاک‌ورزی (T_1) به‌ترتیب باعث کاهش۱۴/۷درصدی در مصرف سوخت و افزایش ظرفیت مزرعه‌ای به میزان۵۲/۴ درصد شد. در روش خاک‌ورزی T4، تیمارهای آبی I_{100}، I_{90} و I_{80} به‌ترتیب با میانگین بهره‌وری آب ۶/۱۱۳، ۶/۰۸۷ و ۵/۵۲۳ کیلوگرم به ازای یک متر مکعب مصرف آب بیشترین اثر را بر افزایش بهره‌وری آب بر اساس شاخص عملکرد ریشه داشتند. در حالی‌که تفاوت معنی‌دار بین آن‌ها مشاهده نشد. نتیجه این‌که در روش خاک‌ورزی T_4 با تامین ۸۰٪ نیاز آبی چغندرقند بعد از استقرار گیاه (حدوداً از اواسط فصل رشد) حدود ۱۲٪ (۱۲۰۷ متر مکعب) در مصرف آب بدون کاهش معنی‌دار در بهره‌وری آب بر اساس شاخص عملکرد ریشه صرفه‌جویی کرد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، زیرشکن، سیکلوتیلر، گاوآهن قلمی، مقاومت به نفوذ در خاک

مقدمه

خاک‌ورزی مرسوم به‌طور گسترده در مناطق چغندرکاری ایران استفاده می‌شود. خاک‌ورزی مرسوم شامل شخم با گاوآهن برگرداندار به همراه چند بار دیسک زدن و تسطیح برای تهیه یک بستر مناسب به‌منظور اطمینان از جوانه‌زنی و استقرار گیاه و در نهایت عملکرد بالا است. پشته‌سازی نیز می‌تواند با توجه به نوع سامانه آبیاری به لیست عملیات خاک‌ورزی اضافه شود. این حجم عملیات می‌تواند اثرات منفی بر خاک و محیطزیست داشته باشد (Hungria *et al.*, 2009). برای حل این مسائل محققان در حال مطالعه روی توانایی به‌کارگیری روش‌های نوین خاک‌ورزی در تولید چغندرقند هستند.

نتایج تحقیقات به آیین و همکاران (Behaeen *et al.*, 2012) نشان داد استفاده از گاوآهن برگرداندار در عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر در فصل پاییز به همراه روتوتیلر باعث افزایش درصد سبز شدن (۹۴/۴۲٪)، شاخص سرعت سبز شدن (۴/۹۳٪)، خلوص شربت خام (۸۲/۶۸٪)، عملکرد ریشه (۸۱/۸۱ تن در هکتار) و شکر سفید (۱۱/۸۴ تن در هکتار) در مقایسه با دیگر روش‌های خاک‌ورزی شد. جوانمرد و همکاران (Javanmard *et al.*, 2014) گزارش کردند که بیشترین عملکرد قند به میزان ۷/۶۳ تن در هکتار به تیمار زیرشکنی در عمق۴۰-۳۵ سانتی‌متر+ شخم با گاوآهن برگرداندار در عمق۲۰-۱۵ سانتی‌متر تعلق داشت. بدین ترتیب با توجه به نتایج آزمایش، پیشنهاد

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@gmail.com)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.88341

شد برای تهیه بستر مناسب برای کشت چغندرقند، خاک‌ورزی عمیق با گاوآهن برگرداندار در عمق ۳۰-۲۵ سانتی‌متر مدنظر قرار گیرد و در صورت وجود لایه سخت از زیرشکن استفاده شود. مطالعه دیگر نشان داد که تیمارهای مختلف آماده‌سازی بستر کاشت از نظر وزن مخصوص ظاهری خاک و شاخص مخروطی خاک با یکدیگر تفاوت نداشتند و بالاترین عملکرد قند سفید (۱۰/۲۳ تن در هکتار) در روش خاک‌ورزی پاییزه با شخم عمیق + دیسک + لولر و ایجاد ردیف‌های کاشت با پشته‌ساز به‌دست آمد (Mohamadian *et al.*, 2014). صلح‌جو و همکاران (Solhjou *et al.*, 2006) گزارش نمودند که زیرشکنی خاک باعث کاهش شاخص مخروطی و جرم مخصوص ظاهری خاک و افزایش عملکرد چغندرقند می‌شود. همچنین با افزایش دور آبیاری، عملکرد چغندرقند کاهش و درصد قند افزایش می‌یابد. در پژوهشی اثبات شد که خاک بعد از زیرشکنی به‌دلیل استفاده از عملیات زراعی دوباره متراکم می‌شود و درنتیجه فایده به‌کارگیری زیرشکن کاهش یافته و یا کاملاً از بین رفته است (Larney and Fortune, 1986).

برخی از مطالعات گزارش داده‌اند که خاک‌ورزی نواری اثر خوبی در تولید چغندرقند داشته است. به‌عنوان مثال تارکالسون و کینا (Tarkalson and Kina, 2007) گزارش کردند که عملکرد ریشه چغندرقند در خاک‌ورزی نواری مشابه خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد و خاک‌ورزی نواری در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم رواناب را کاهش داد. اِوانس و همکاران (Evans *et al.*, 2009) نشان دادند که در شرایط ایده‌ال، عملکرد چغندرقند در خاک‌ورزی نواری و مرسوم یکسان هستند. ولیکن در سالی که طوفان شدیدی وزید جمعیت گیاه به‌طور چشمگیری در خاک‌ورزی مرسوم کمتر از خاک‌ورزی نواری شد که در نتیجه باعث کاهش عملکرد چغندرقند در خاک‌ورزی مرسوم شد.

میلر و دکستر (Miller and Dexter, 1983) گزارش نمودند در صورت کنترل مناسب علف‌های هرز، عملکرد چغندرقند در سیستم بی‌خاک‌ورزی با سیستم خاک‌ورزی مرسوم برابر می‌شود.

بیشترین عملکرد چغندرقند در خاک‌ورزی مرسوم (Rusu, 2005; Tugrul and Dursum, 2007) و کمترین میزان علف‌هرز در خاک‌ورزی مرسوم (Rusu, 2005) و کمترین مصرف سوخت در کم‌خاک‌ورزی (Rusu, 2005) گزارش شد.

تحقیقات کمی در خصوص بی‌خاک‌ورزی در چغندرقند انجام شده است. یکی از نگرانی‌های مهم در خصوص بی‌خاک‌ورزی در تولید چغندرقند، تراکم خاک است که می‌تواند رشد ریشه را محدود کند. بعضی از مطالعات حساسیت ریشه چغندرقند به فشردگی خاک را اثبات کرده است (Breeton *et al.*, 1986). محققان دیگری اظهار داشتند که فشردگی بیشتر خاک می‌تواند علت کاهش عملکرد چغندرقند در سامانه بی‌خاک‌ورزی باشد (Koch *et al.*, 2009).

به‌علاوه مطالعه دیگری نشان داد که چغندرقند به تراکم خاک حساس نمی‌باشد (Arvidsson *et al.*, 2012). مطالعات کشاورز افشار و همکاران (Keshavarz Afshar *et al.*, 2019) نشان داد که روش خاک‌ورزی (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم) اثر معنی‌دار بر استقرار گیاه، عملکرد ریشه و عملکرد شکر نداشت. همچنین هزینه خاک‌ورزی در یک هکتار در روش بی‌خاک‌ورزی، ۱۱۱ دلار کمتر از خاک‌ورزی مرسوم بود. وان دن پوت و همکاران (Van den Putte *et al.*, 2010) با انجام یک تحقیق به روش فراتحلیل[1]، اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی را بر عملکرد محصول در اروپا بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که بی‌خاک‌ورزی باعث کاهش عملکرد چغندرقند می‌شود و از نظر اقتصادی قابل دوام نیست.

چغندرقند از نظر مصرف آب، گیاهی است که نسبت به گیاهانی چون غلات، سیب‌زمینی و پنبه، آب بیشتری مصرف می‌کند (Rahimian, 2002). در پژوهشی بالاترین میانگین عملکرد ریشه از تیمار آبیاری کامل و به میزان ۳۳/۸ تن در هکتار در مقایسه با آبیاری خشکی ناحیه ریشه به میزان ۲۶/۴۳ تن در هکتار به‌دست آمد. بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری از تیمار آبیاری خشکی ناحیه ریشه و ضریب تشتک ۰/۵ و به میزان ۴/۱۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب آب حاصل شد (Ustun *et al.*, 2014). بلوچ و همکاران (Bloch *et al.*, 2006) میزان کارایی مصرف آب چغندرقند را بر اساس کل ماده خشک تولیدی به ازای لیتر آب مصرفی در تیمارهای بدون تنش، تنش متوسط و شدید به‌ترتیب ۶، ۷/۳ و ۷/۴ گرم به‌دست آوردند. همچنین نتایج تحقیق جهاد اکبر و همکاران (JahadAkbar *et al.*, 2003) نشان داد که کم‌آبیاری موجب کاهش معنی‌دار عملکرد ریشه، قند ناخالص و سدیم ریشه شده و ازت مضره را افزایش می‌دهد. قدمی فیروزآبادی و میرزایی (Ghadami Firouzabadi and Mirzaei, 2006) گزارش کردند بالاترین کارایی مصرف آب نسبت به عملکرد شکر مربوط به تیمار قطره‌ای ۵۰٪ با ۰/۹۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین آن مربوط به تیمار قطره‌ای ۱۰۰٪ با ۰/۶۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود. مقایسه تیمار آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی و تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی نشان داد که با کاهش ۱۸ درصدی در مقدار آب مصرفی میزان کارایی مصرف آب ۲۷/۶ درصد افزایش یافت. نورجو و همکاران (Nourjou *et al.*, 2006) با بررسی سطوح مختلف آبیاری و دور آبیاری در زراعت چغندرقند با در نظر گرفتن کارایی مصرف آب بر اساس شکر قابل‌استحصال و پرهیز از سطح آبیاری ۵۰ درصد، آبیاری با دور ۱۰ روز و اعمال ۲۵ درصد کم‌آبیاری را توصیه کردند. بررسی‌های ابراهیمی پاک (Ebrahimipak, 2010) نشان داد مراحل اول، دوم و سوم رشد چغندرقند به‌ترتیب مراحل حساس تا نیمه‌حساس نسبت به تنش آبی هستند. به طوری‌که

1- Meta- analysis

حساس‌ترین آن‌ها، مرحله اول رشد چغندرقند است که اگر مقدار آب قابل دسترس خاک طی این مرحله کاهش یابد، افت شدید عملکرد ریشه و قند قابل استحصال را به دنبال خواهد داشت. جوزی و زارع ابیانه (Jouzi and Zare Abyaneh, 2015) استفاده از ۸۵ درصد نیاز آبی را نسبت به تامین ۱۰۰، ۷۵ و ۶۵ درصد نیاز آبی، برای حصول بیشترین بهره‌وری مصرف آب، در چغندرقند به روش آبیاری جویچه‌ای پیشنهاد دادند. در این پژوهش میزان بهره‌وری آب ریشه و شکر به‌ترتیب ۵ و ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شد.

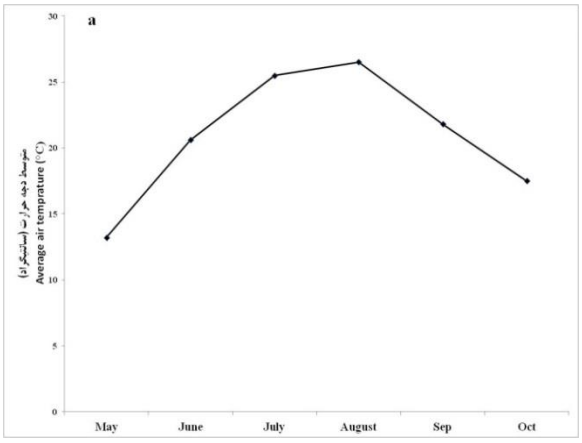
توپاک و همکاران (Topak *et al.*, 2010) در پژوهشی نشان دادند که شاخص بهره‌وری آب بر حسب عملکرد ریشه چغندرقند به‌ترتیب ۸/۲ و ۷/۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و آبیاری کامل به‌دست آمد.

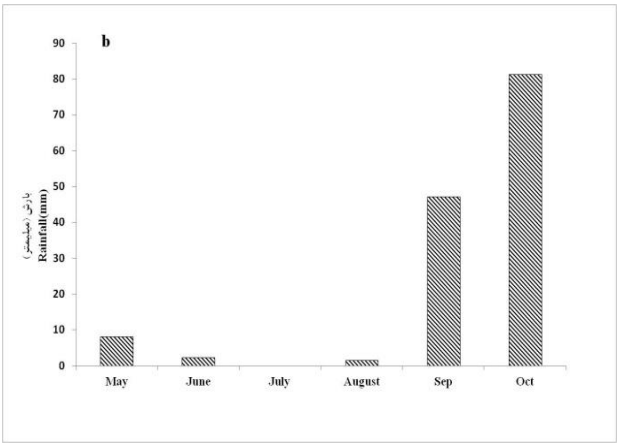
با توجه به مرور منابع و نتایج به‌دست آمده از بیشتر تحقیقات انجام شده (به‌خصوص پژوهش‌های انجام شده در داخل کشور)، استفاده از سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی را در محصول چغندرقند به دلیل اثر منفی بر عملکرد، توصیه نکرده‌اند. از طرف دیگر استفاده مدوام از گاوآهن‌های برگرداندار علاوه بر افزایش هزینه‌ها، در درازمدت باعث تخریب خاک و کاهش حاصلخیزی آن خواهد شد. بنابراین دستیابی به یک روش خاک‌ورزی که بتوان آن‌را جایگزین شخم با گاوآهن برگرداندار بدون کاهش معنی‌دار عملکرد محصول نمود ضروری است. همچنین با توجه به گسترش سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در محصول چغندرقند در استان همدان به دلیل خشک‌سالی‌های اخیر، بررسی اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی و کم‌آبیاری در این سامانه آبیاری حائز اهمیت است. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی روش‌های مختلف خاک‌ورزی و کم‌آبیاری در سامانه آبیاری قطره‌ای بر عملکرد کمی و کیفی و بهره‌وری آب چغندرقند بود.

مواد و روش‌ها

مکان آزمایش

آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در ایستگاه تحقیقاتی اکباتان مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان (۳۲َ و ۴۸ْ طول شرقی و ۵۲َ و ۳۴ْ عرض شمالی) انجام شد. بافت خاک در این مکان لوم رس و ماسه‌دار شامل ۲۵/۳ درصد رس، ۲۹/۲ درصد سیلت و ۴۵/۵ درصد شن و ماده آلی خاک ۰/۳۳ و pH برابر ۸/۰۹ در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک بود. متوسط درجه حرارت ماهانه و نیز میزان بارش ماهانه در طول فصل رشد چغندرقند (اردیبهشت تا مهر ۱۳۹۸) در شکل ۱ آورده شده است.





شکل ۱- متوسط درجه حرارت ماهانه هوا (الف) و میزان بارش ماهانه کل (ب) در طول فصل رشد چغندقند در سال ۱۳۹۸

Fig.1. Average monthly air temperature (a) and total monthly precipitation (b) during the sugar beet growing season in 2019

طرح آزمایشی

این تحقیق به‌صورت طرح کرت‌های نواری در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل افقی، روش‌های خاک‌ورزی در چهار سطح شامل: T_1- خاک‌ورزی با گاوآهن برگرداندار به عمق ۳۰- ۲۵ سانتی‌متر در پاییز + سیکلوتیلر به عمق ۲۰-۱۵ سانتی‌متر در بهار، T_2- زیرشکن به عمق ۴۰-۳۵ و گاوآهن برگرداندار به عمق ۳۰-۲۵ سانتی‌متر در پاییز + سیکلوتیلر به عمق ۲۰-۱۵ سانتی‌متر در بهار، T_3- خاک‌ورزی با خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چیزل با تیغه‌های قلمی و غلطک) به عمق ۳۰-۲۵ سانتی‌متر در پاییز + سیکلوتیلر به عمق ۲۰-۱۵ سانتی‌متر در بهار و T_4- خاک‌ورزی با خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چیزل با تیغه‌های پنجه غازی و غلطک) به عمق ۳۰-۲۵ سانتی‌متر در پاییز+ سیکلوتیلر به

عمق ۲۰–۱۵ سانتی‌متر در بهار و عامل عمودی، مقدار آبیاری در چهار سطح شامل: I_{100}– آبیاری کامل با تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، I_{90}– تامین ۹۰ درصد نیاز آبی، I_{80}– تامین ۸۰ درصد نیاز آبی و I_{70}– تامین۷۰ درصد نیاز آبی با استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای (تیپ) بود. ابتدا در سال ۱۳۹۷ قطعه زمینی به ابعاد ۳۰×۴۰ متر در ایستگاه اکباتان انتخاب شد. کشت سال قبل آن گندم آبی بود. در مهر ۱۳۹۷، تیمارهای خاک‌ورزی اولیه انجام شد (قبل از انجام خاک‌ورزی، مزرعه آزمایشی آبیاری شده و پس از گاورو شدن مبادرت به خاک‌ورزی شد). خاک‌ورزی ثانویه با سیکلوتیلر در بهار سال ۱۳۹۸ برای تمام تیمارها به‌طور یکسان انجام شد. تراکتور مورد استفاده در عملیات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه مسی فرگوسن ۳۹۹ بود. در تاریخ ۱۳۹۸/۲/۱۷، بذر چغندرقند (رقم شکوفا) به میزان ۲۵۰ هزار بوته در هکتار با بذرکار پنوماتیک شرکت تراشکده (با فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بذرها از یکدیگر در روی ردیف ۸ سانتی‌متر) کشت شد (مشخصات فنی ادوات استفاده شده در این پروژه درجدول ۱ ارائه شده است). ضمنا یک سوم کود اوره (معادل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و تمام کود سوپر فسفات تریپل (۲۵۰کیلوگرم در هکتار) قبل از کاشت (با کارگر) به زمین داده شد. مابقی کود اوره در دو نوبت قبل از گلدهی با تزریق در سامانه آبیاری قطره‌ای (تیپ) به محصول داده شد. اعمال تیمار آبیاری پس از استقرار کامل گیاه در اواسط تیرماه انجام شد. در طول فصل رشد، عملیات تنک کردن و چند نوبت سمپاشی بر علیه علف‌های هرز، آفات و قارچ‌ها انجام شد.

جدول ۱– مشخصات فنی ادوات مورد استفاده

Table 1- Technical specification of implements

نوع ماشین Machine type	عرض کار Working witdth	مشخصات فنی Technical specification
گاوآهن برگرداندار Moldboard plow	90	سوار شونده، سه خیش، عرض برش هر خیش ۳۰ سانتی‌متر Mounted, three bottom, cut width of each bottom is 30 cm
خاک‌ورز مرکب Combinated tiller	200	مجهز به تیغه‌های قلمی یا پنجه غازی و غلطک، ساخت شرکت ماشین زراعت همدان Equipped with chisel blades or sweep blades and roller, made by Hamedan Agriculture Machine Company
سیکلوتیلر Power harrow	250	مدلHRB 252D، مجهز به غلطک، ساخت شرکت ماشین برزگر همدان Model HRB 252D, equipped with rollers, made by Barzegar Machine Company of Hamadan
بذرکار پنوماتیک Pneumatic planter	150	ساخت شرکت تراشکده، ۴ ردیفه، فاصله بین شیاربازکن‌ها (۵۰سانتی‌متر) Made by Trashkadeh Company, number of furrow openers = 4, distance between furrow openers = 50 cm

اندازه‌گیری‌ها

مقاومت به نفوذ در خاک (شاخص مخروطی خاک)

مقاومت به نفوذ در خاک جهت ارزیابی فشردگی خاک در اواسط فصل رشد (اوایل تیرماه) با استفاده از دستگاه فروسنج، مدل Sp1000 ساخت کشور اسکاتلند با قطر مخروط ۱۲/۸۳ میلی‌متر و زاویه راس۳۰ درجه در ۱۰ نقطه و تا عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک اندازه‌گیری شد. رطوبت خاک در همان زمان برای استانداردسازی مقاومت به نفوذ در خاک اندازه‌گیری شد (رطوبت خاک بر پایه خشک، با روش اندازه‌گیری مستقیم (برداشت نمونه و سپس خشک کردن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) تعیین شد).

نیاز آبی و بهره‌وری آب

جهت محاسبه نیاز آبی، ابتدا داده‌های هواشناسی لازم از جمله حداقل و حداکثر دما، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی هوا، متوسط سرعت باد روزانه، ساعت آفتابی جهت محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مانتیث به‌صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی مستقر در ایستگاه اکباتان تهیه شد. سپس با در نظر گرفتن ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد و راندمان آبیاری، نیاز آبیاری با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد (Allen *et al*., 1998).

$$ET_C = ET_0 * K_c \quad (۱)$$

$$D_n = (\frac{ETc - Pe}{Ei}) \quad (۲)$$

ET_0: تبخیر و تعرق گیاه مرجع، Kc: ضریب گیاهی، Dn: میزان نیاز آبیاری (mm)، ET_c: تبخیر و تعرق گیاهی (mm)، Pe: میزان بارندگی موثر (mm)، Ei: راندمان آبیاری

تا زمان استقرار کامل گیاه (اواسط تیرماه)، انجام آبیاری در تمام تیمارها به‌صورت یکسان انجام شد. پس از استقرار کامل گیاه اعمال تیمار در تیمارهای کم‌آبیاری به‌صورت درصدی از نیاز آبیاری کامل گیاه (۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی کامل گیاه) اعمال شد. دور آبیاری در این پژوهش به‌صورت چهار روزه انجام و حجم آب آبیاری توسط کنتور برای هر یک از تیمارها اندازه‌گیری شد. شاخص بهره‌وری آب آبیاری با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Owies *et al*., 2004).

$$WP_{ir(y)} = \frac{Yield}{Irrigation} \quad (۳)$$

$WPir_{(y)}$: بهره‌وری آب آبیاری برای عملکرد ریشه یا شکر ($kg.\ m^{-3}$)
Yield: عملکرد ریشه یا شکر ($kg.\ ha^{-1}$)
Irrigation: میزان آب آبیاری (m^3)

عملکرد ریشه و شاخص‌های کیفی چغندرقند

محصول چغندرقند کرت‌ها در تاریخ ۲۱ مهر ۱۳۹۸ برداشت شد. از هر کرت دو خط میانی به طول ۱۲ متر (جمعاً ۶ مترمربع) با کارگر (به‌وسیله بیل) برداشت شد. سپس ریشه‌ها با ترازو وزن شدند. با احتساب نسبت جرم به سطح برداشت شده، عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم (تن) در هکتار به‌دست آمد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و بعد از شستشو و تمیز کردن، عملکرد شکر، شکر سفید و قند ملاس اندازه‌گیری شد (Cambell and Fugate, 2015).

تحلیل آماری

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C مورد تجزیه و تحلیل آماری قرارگرفته و از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ درصد جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

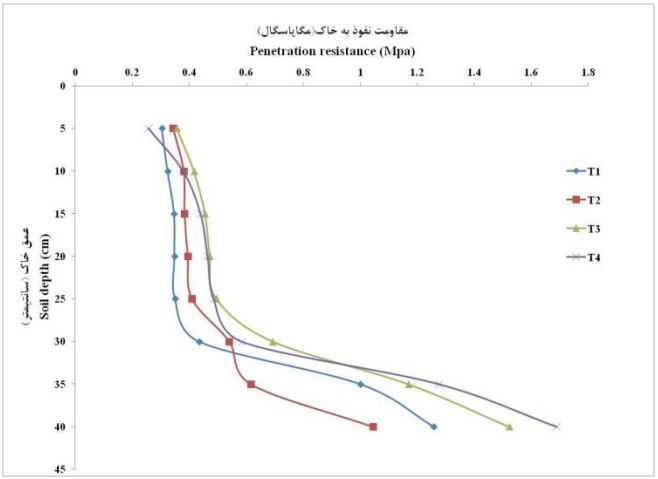
نتایج و بحث

مقاومت به نفوذ در خاک

اثرات روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر مقاومت به نفوذ در خاک در شکل ۲ نشان داده شده است. تا عمق ۳۰ سانتی‌متر اختلاف معنی‌داری بین روش‌های خاک‌ورزی بر مقاومت نفوذ به خاک مشاهده نشد. در اعماق بیشتر (۴۰-۳۵ سانتی‌متر) تیمار T_2 (زیرشکن+برگرداندار) بیشترین اثر را در کاهش مقاومت خاک داشته است که این می‌تواند به دلیل عمق کار زیرشکن باشد. مطالعات کشاورز افشار و همکاران (Keshavarz Afshar *et al.*, 2019) نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر مقاومت نفوذ به خاک در لایه‌های فوقانی خاک (۱۲-۰ سانتی‌متر) مشاهده نشد. در مقابل در لایه‌های عمیق‌تر، اثر روش‌های خاک‌ورزی بر مقاومت به نفوذ در خاک معنی‌دار بود. در لایه میانی ۲۲-۱۲ سانتی‌متر، مقاومت به نفوذ در خاک در خاک‌ورزی نواری بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم بود. در لایه‌های عمیق‌تر (۴۵-۲۲ سانتی‌متر) مقاومت نفوذ به خاک در خاک‌ورزی مرسوم بیشتر از خاک‌ورزی نواری و بی‌خاک‌ورزی بود.

صلح‌جو و همکاران (Solhjou *et al.*, 2006) و قاسمی عبدالملکی و همکاران (Ghasemi Abdolmaleki *et al.*, 2015) نیز گزارش کردند که زیرشکنی باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود. صرف‌نظر از روش خاک‌ورزی، مقدار مقاومت به نفوذ در خاک بیشتر از ۱/۷ مگاپاسکال نشد (شکل ۲) که این مقدار کمتر از آستانه ۲ مگاپاسکال می‌باشد که می‌تواند اثرات منفی روی جوانه‌زنی و توسعه ریشه چغندرقند داشته باشد (Bengough *et al.*, 2011). بنابراین خاک‌ورز مرکب نیز توانسته است حداقل گسیختگی لازم را در خاک برای توسعه ریشه و غده‌های چغندرقند ایجاد کند.

مطالعات طولانی مدت نیاز است که دقت اثر روش‌های خاک‌ورزی روی مقاومت به نفوذ در خاک اثبات شود (Keshavarz afshar *et al.*, 2019).



شکل ۲- اثر روش‌های خاک‌ورزی بر مقاومت به نفوذ در خاک در عمق‌های مختلف خاک در اواسط فصل رشد چغندرقند
(T_1- گاوآهن برگرداندار + سیکلوتیلر، T_2- زیرشکن + گاوآهن برگرداندار + سیکلوتیلر، T_3- خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چیزل با تیغه‌های قلمی و غلطک) + سیکلوتیلر و T_4- خاک‌ورز مرکب (گاوآهن چیزل با تیغه‌های پنجه غازی و غلطک) + سیکلوتیلر)

Table 2- Effect of tillage on soil penetration resistance at various soil depths measured in the middle of the sugar beet growing season
(T_1- Moldboard plow+Power harrow, T_2- Subsoiler+Moldboard plow+ Power harrow, T_3- Sweep plow equipped with roller+Power harrow and T_4- Chisel plow equipped roller+Power harrow)

عملکرد کمی و کیفی چغندرقند

اثر خاک‌ورزی و آبیاری و اثرات متقابل آن‌ها بر عملکرد ریشه، عملکرد شکر، عملکرد شکر سفید، عملکرد قند ملاس در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. از نظر اثر روش‌های خاک‌ورزی بر عملکرد ریشه، تیمارهای خاک‌ورزی T_4، T_1 و T_2 در یک کلاس آماری قرار گرفتند و تیمار T_4 و T_3 به‌ترتیب بیشترین (۵۰/۶۸۶ تن در هکتار) وکمترین (۴۱/۰۳۱ تن در هکتار) عملکرد ریشه را به خود اختصاص دادند (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین عملکرد کمی و کیفی چغندرقند در تیمارهای مختلف

Table 2- Mean comparison of quantitative and qualitative yield of sugar beet in different tillage treatments

خاک‌ورزی Tillage		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 (ملاس) Molasses yield (t.ha^{-1})
T_1		50.507^{a}	7.820 ^{a}	6.065 ^{a}	1.452^{a}
T_2		49.262 ^{a}	7.442 ^{b}	5.749 ^{ab}	1.397 ^{b}
T_3		41.031 ^{b}	4.920 ^{c}	4.609 ^{c}	1.065 ^{d}
T_4		50.686 ^{a}	7.380 ^{b}	5.642 ^{b}	1.267 ^{c}
آبیاری Irrigation					
I_{100}		54.051 ^{a}	8.067 ^{a}	6.209 ^{a}	1.534^{a}
I_{90}		50.821 ^{b}	7.685 ^{b}	5.899 ^{a}	1.481 ^{a}
I_{80}		45.918 ^{c}	6.675 ^{c}	5.084 ^{b}	1.149 ^{b}
I_{70}		40.695^{d}	6.134 ^{d}	4.872^{b}	1.017 ^{c}
خاک‌ورزی Tillage	آبیاری Irrigation				
T_1	I_{100}	55.828^{b}	9.211 ^{a}	7.381 ^{a}	1.496 ^{abcd}
	I_{90}	51.833^{cd}	7.671 ^{cd}	5.712 ^{cde}	1.648 ^{ab}
	I_{80}	49.467^{de}	7.123 ^{efg}	5.317 ^{e}	1.508^{abcd}
	I_{70}	44.900 ^{gh}	7.274 ^{def}	5.850 ^{cd}	1.154 ^{bcdefg}
T_2	I_{100}	52.237 ^{c}	7.759 ^{c}	5.793 ^{cd}	1.656 ^{ab}
	I_{90}	51.334 ^{cd}	7.572 ^{cd}	5.518 ^{de}	1.745 ^{a}
	I_{80}	47.278 ^{efg}	6.974 ^{fg}	5.697 ^{cde}	0.993 ^{defg}
	I_{70}	46.200 ^{fg}	7.461 ^{cde}	5.987 ^{c}	1.196 ^{bcdefg}
T_3	I_{100}	47.139^{efg}	6.270 ^{h}	4.624 ^{f}	1.362 ^{abcdef}
	I_{90}	43.011 ^{h}	6.817 ^{g}	5.462 ^{de}	1.096 ^{cdefg}
	I_{80}	38.495 ^{i}	5.678 ^{i}	4.573 ^{f}	0.874 ^{fg}
	I_{70}	35.478 ^{j}	4.914 ^{j}	3.775 ^{g}	0.926 ^{efg}
T_4	I_{100}	61.000 ^{a}	9.028 ^{ab}	7.039 ^{ab}	1.623 ^{abc}
	I_{90}	57.111^{b}	8.681 ^{b}	6.905^{b}	1.433 ^{abcde}
	I_{80}	48.433 ^{ef}	6.926 ^{fg}	4.748 ^{f}	1.220 ^{abcdefg}
	I_{70}	36.200 ^{ij}	4.887 ^{j}	3.877 ^{g}	0.793 ^{g}

اعداد هر ستون که دارای حرف‌های یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) have not significantly different at 1% of probability level– using Duncan's Multiple Rang Test.

تیمار T_3 نسبت به بقیه تیمارهای خاک‌ورزی کمتر باعث گسیختگی خاک شده است (شکل ۱) که می‌تواند از علل کمتر بودن عملکرد ریشه چغندرقند در این تیمار باشد. بیشترین عملکرد چغندرقند در مطالعات به آئین و همکاران (Behaeen *et al.*, 2012)، جوانمرد و همکاران (Javanmard *et al.*, 2014) و محمدیان و همکاران (Mohamadian *et al.*, 2014) با گاوآهن برگرداندار گزارش شده است. همچنین مطالعات روسو (Rusu, 2005) و تورگل و دورسام (Tugrul and Dursum, 2007) نشان داد که بیشترین عملکرد چغندرقند با روش خاک‌ورزی مرسوم حاصل شده است. در حالی‌که بیشترین عملکرد ریشه چغندرقند در تحقیق حاضر با خاک‌ورز مرکب (T_4) به‌دست آمد و آن می‌تواند به‌دلیل گسیختگی مناسب در خاک توسط این وسیله و نیز به‌کارگیری دستگاه سیکلوتیلر جهت تهیه بستر بذر باشد. جایگذاری دقیق بذر در تولید چغندرقند مرحله بحرانی می‌باشد و با توجه به این‌که عملیات کاشت توسط بذرکار پنوماتیک انجام شد و این دستگاه جهت کارآیی مناسب (جای‌گذاری دقیق بذر در خاک) نیاز به یک بستر مناسب دارد بنابراین استفاده از سیکلوتیلر توانست این شرایط را در خاک مهیا نماید. با توجه به این‌که در زراعت آبی، حجم بقایا زیاد است بنابراین برای موفقیت سامانه‌های

خاک‌ورزی حفاظتی نیاز به کارنده مناسب در این شرایط می‌باشد (Keshavarz Afshar *et al.*, 2019). تیمار خاک‌ورزی T_1 بیشترین عملکرد شکر (۷/۸۲۰ تن در هکتار) و شکر سفید (۶/۰۶۵ تن در هکتار) را به خود اختصاص داد. نتیجه به‌دست آمده با گزارشات به آئین و همکاران (Behaeen *et al.*, 2012)، جوانمرد و همکاران (Javanmard *et al.*, 2014) و محمدیان و همکاران (Mohamadian *et al.*, 2014) مبنی بر افزایش عملکرد شکر در روش خاک‌ورزی مرسوم (شخم با گاوآهن برگرداندار) هماهنگ است. آبیاری کامل (تامین ۱۰۰٪ نیاز آبی) نسبت به تیمارهای کم‌آبیاری، بیشترین عملکرد ریشه و شکر را داشت. نتایج به‌دست آمده با گزارش سایر محققین (Ustun *et al.*, 2004; Jahad Akbar *et al.*, 2003; Mirzaei and Rezvani, 2012; Noujou *et al.*, 2006; Solhjou *et al.*, 2006) مبنی بر بیشترین عملکرد چغندرقند با آبیاری کامل مطابقت دارد. یوکان و گِن‌کوگلان (Ucan and Gencoglan, 2004) نیز گزارش کردند که بین عملکرد چغندرقند و مقدار مصرف آب آبیاری رابطه خطی وجود دارد یعنی با افزایش مصرف آب، عملکرد چغندرقند نیز افزایش می‌یابد. تیمار T_4I_{100} بیشترین عملکرد ریشه را در بین تیمارها داشت (جدول ۲). همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار ۹۰ درصد نیاز آبی با تیمار آبیاری کامل از نظر میزان عملکرد شکر سفید تفاوت معنی‌داری نداشت. نتیجه به‌دست آمده با گزارش یوکان و گِن‌کوگلان (Ucan and Gencoglan, 2004) مبنی بر افزایش عملکرد شکر با کاهش مصرف آب منطبق است.

بهره‌وری آب

مقدار مصرف آب در تیمار آبیاری ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۷۰٪ به‌ترتیب ۹۹۸۱، ۹۳۷۷، ۸۷۷۴ و ۸۱۷۱ مترمکعب در هکتار بود. نتایج نشان داد اثر خاک‌ورزی، آبیاری و اثرات متقابل آن‌ها بر بهره‌وری آب بر اساس شاخص عملکرد ریشه، عملکرد شکر، شکر سفید و قند ملاس) معنی‌دار شدند (جدول ۳). روش‌های خاک‌ورزی T_1، T_2 و T_4 از نظر بهره‌وری آب بر اساس عملکرد ریشه و عملکرد شکر سفید در یک کلاس آماری قرار گرفتند. تیمار T_3 کمترین بهره‌وری آب بر اساس شاخص‌های عملکرد ریشه و شکر سفید را به خود اختصاص داد. این امر به علت عملکرد کمتر ریشه در تیمار T_3 می‌باشد.

تیمارهای آبی I_{100}، I_{90} و I_{80} به‌ترتیب بیشترین اثر را بر افزایش بهره‌وری آب بر اساس شاخص عملکرد ریشه داشتند (جدول ۳). در حالی‌که تفاوت معنی‌دار بین آن‌ها مشاهده نشد. بنابراین در صورت تامین ۸۰ درصد نیاز آبی بعد از استقرار گیاه کاهش معنی‌داری در بهره‌وری آب نسبت به تامین کامل نیاز آبی حاصل نمی‌شود. بالا بودن کارایی مصرف آب در شرایط تنش خشکی به این دلیل است که گیاه در شرایط تنش فقط در زمان‌هایی اقدام به باز کردن روزنه‌ها و انجام تثبیت دی‌اکسید کربن می‌کند که کمبود فشار بخار اتمسفر کاهش یافته باشد در این وضعیت گیاه برای تولید هر واحد ماده خشک آب کمتری را از دست می‌دهد (Clover *et al.*, 2001). قدمی فیروزآبادی و میرزایی (Ghadami Firouzabadi and Mirzaee, 2006) و توپاک و همکاران (Topak *et al.*, 2010) تیمار آبی تامین ۷۵ درصد نیاز آبی و جوزی و زارع آبیانه (Jouzi and Zare Abyane, 2014) تامین ۸۵ درصد نیاز آبی را برای حصول بیشترین بهره‌وری آب در چغندرقند پیشنهاد دادند. تیمار I_{70} کمترین بهره‌وری آب بر اساس این شاخص را داشت. دلیل آن کمتر بودن عملکرد ریشه در این تیمار می‌باشد. یوکان و گِن‌کوگلان (Ucan and Gencoglan, 2004) گزارش کردند که کارآیی مصرف آب آبیاری و کارآیی مصرف آب با مقدار آب آبیاری استفاده شده تغییر می‌کند.

اثر تیمارهای آبی بر شاخص‌های بهره‌وری آب بر اساس عملکرد شکر و عملکرد شکر سفید معنی‌دار بود. تیمارهای نیاز آبی I_{90} و I_{100} به‌ترتیب بیشترین بهره‌وری آب بر اساس شاخص‌های عملکرد شکر و شکر سفید را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). نورجو و همکاران (Noujou *et al.*, 2006) تامین ۷۵ درصد نیاز آبی را برای حصول بیشترین کارآیی مصرف آب بر اساس عملکرد شکر در سامانه آبیاری بارانی پیشنهاد دادند.

مصرف سوخت و ظرفیت مزرعه‌ای موثر

سامانه‌های خاک‌ورزی T_3 و T_4 کمترین مصرف سوخت و بیشترین ظرفیت مزرعه‌ای را به خود اختصاص دادند (جدول ۴). تیمار T_4 نسبت به روش مرسوم (تیمار T_1) باعث صرفه‌جویی در مصرف سوخت به میزان ۱۴/۷ درصد و افزایش ظرفیت مزرعه‌ای به مقدار ۵۲/۴ درصد شد (جدول ۴). ظرفیت مزرعه‌ای تابعی از سرعت، عرض کار وسیله و راندمان زراعی می‌باشد. ظرفیت مزرعه‌ای بیشتر در خاک‌ورزهای مرکب مربوط به سرعت و عرض کار بیشتر نسبت به گاوآهن برگرداندار و زیرشکن می‌باشد. خاک‌ورزهای مرکب به دلیل زمان مصرفی کمتر در واحد سطح و نیز مصرف توان مالبندی نسبتاً پایین‌تر انرژی کمتری را نسبت به گاوآهن برگردان‌دار و زیرشکن دارند. صرفه‌جویی در مصرف سوخت در خاک‌ورزهای حفاظتی نسبت به گاوآهن برگرداندار توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است (Rusu, 2005; Afzalinia *et al.*, 2019; Younesi Alamouti and Sharifi, 2011).

جدول ۳- مقایسه میانگین بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف

Table 3- Mean comparison of water productivity in different tillage treatments

خاک‌ورزی Tillage		بهره‌وری آب بر اساس عملکرد ریشه Water productivity based on root yield (kg. m^{-3})	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد شکر Water productivity based on sugar yield (kg. m^{-3})	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد شکر سفید Water productivity based on White sugar yield (kg. m^{-3})	بهره‌وری آب بر اساس عملکرد قند ناخالص (ملاس) Water productivity based on Molasses yield (kg. m^{-3})
T_1		5.563^{a}	0.863 ^{a}	0.668 ^{a}	0.160 ^{a}
T_2		5.429 ^{a}	0.823 ^{ab}	0.638 ^{a}	0.153 ^{a}
T_3		4.509 ^{b}	0.651 ^{c}	0.507 ^{b}	0.117 ^{c}
T_4		5.103 ^{a}	0.805 ^{b}	0.634 ^{a}	0.138 ^{b}
آبیاری Irrigation					
I_{100}		5.408^{a}	0.808^{ab}	0.622 ^{ab}	0.154 ^{a}
I_{90}		5.337 ^{ab}	0.820 ^{a}	0.629 ^{a}	0.158 ^{a}
I_{80}		5.233 ^{ab}	0.761 ^{bc}	0.599 ^{b}	0.131 ^{b}
I_{70}		4.980 ^{b}	0.751 ^{c}	0.596 ^{b}	0.124 ^{b}
خاک‌ورزی Tillage	آبیاری Irrigation				
T_1	I_{100}	5.593^{ab}	0.923 ^{a}	0.740 ^{a}	0.150 ^{def}
	I_{90}	5.530 ^{ab}	0.818 ^{b}	0.609 ^{bc}	0.176 ^{ab}
	I_{80}	5.633 ^{ab}	0.812 ^{b}	0.606 ^{bc}	0.172^{b}
	I_{70}	5.493 ^{ab}	0.890 ^{a}	0.716 ^{a}	0.141 ^{ef}
T_2	I_{100}	5.200 ^{bc}	0.777 ^{bc}	0.580 ^{c}	0.166 ^{bc}
	I_{90}	5.477 ^{bc}	0.807 ^{b}	0.588 ^{c}	0.186 ^{a}
	I_{80}	5.387 ^{b}	0.795 ^{bc}	0.649 ^{b}	0.113 ^{gh}
	I_{70}	5.653 ^{ab}	0.913 ^{a}	0.733 ^{a}	0.146 ^{ef}
T_3	I_{100}	4.723 ^{cd}	0.628 ^{d}	0.463 ^{e}	0.136 ^{f}
	I_{90}	4.587 ^{cd}	0.727 ^{c}	0.582 ^{c}	0.117 ^{g}
	I_{80}	4.387 ^{d}	0.647 ^{d}	0.521 ^{d}	0.099 ^{hi}
	I_{70}	4.340 ^{d}	0.601 ^{d}	0.462 ^{e}	0.113 ^{gh}
T_4	I_{100}	6.113 ^{a}	0.904 ^{a}	0.706 ^{a}	0.163 ^{bcp}
	I_{90}	6.087 ^{a}	0.926 ^{a}	0.737 ^{a}	0.153 ^{cde}
	I_{80}	5.523 ^{ab}	0.790 ^{bc}	0.617 ^{bc}	0.139 ^{ef}
	I_{70}	4.433 ^{d}	0.598 ^{d}	0.474 ^{de}	0.097 ^{i}

اعداد هر ستون که دارای حرف‌های یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) have not significantly different at 1% of probability level –using Duncan's Multiple Rang Test.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر روش های خاک‌ورزی بر مصرف سوخت و ظرفیت مزرعه‌ای موثر

Table 4- Mean comparison of the effect of tillage methods on fuel consumption and effective field capacity

خاک‌ورزی Tillage	مصرف سوخت Fuel consumption (L.ha^{-1})	ظرفیت مزرعه‌ای موثر Effective field capacity (ha.hr^{-1})
T_1	53^{b}	0.208^{b}
T_2	74.5^{a}	0.136^{a}
T_3	44.3^{c}	0.344^{c}
T_4	45.2^{c}	0.317^{c}

اعداد هر ستون که دارای حرف‌های یکسانی هستند تفاوت آماری بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ ندارند.

Numbers, in each column, followed by the same letter(s) have not significantly different at 1% of probability level –using Duncan's Multiple Rang Test.

نتیجه‌گیری

روش خاک‌ورزی (T_4) نسبت به روش رایج خاک‌ورزی (T_1) به‌ترتیب باعث کاهش۱۴/۷درصدی در مصرف سوخت و افزایش ظرفیت مزرعه‌ای به میزان۵۲/۴ درصد شد. عملکرد چغندرقند و

بهره‌وری آب در تیمار خاک‌ورزی T4 و روش مرسوم (T1) اختلاف معنی‌داری نداشتند. در روش خاک‌ورزی T4، تیمارهای آبی I_{100}، I_{90} و I_{80} به‌ترتیب با میانگین بهره‌وری آب ۶/۱۱۳، ۶/۰۸۷ و ۵/۵۲۳ کیلوگرم به ازای یک مترمکعب مصرف آب بیشترین اثر را بر افزایش بهره‌وری آب بر اساس شاخص عملکرد ریشه داشتند. در حالی‌که که تفاوت معنی‌دار بین آن‌ها مشاهده نشد. نتیجه این‌که در روش خاک‌ورزی T_4 با تامین ۸۰ ٪ نیاز آبی چغندرقند بعد از استقرار گیاه (حدودا از اواسط فصل رشد) حدود ۱۲٪ (۱۲۰۷ متر مکعب) در مصرف آب بدون کاهش معنی‌دار در بهره‌وری آب بر اساس شاخص عملکرد ریشه صرفه‌جویی کرد.

References

1. Afzalinia, S., A. Karami, and S. M. Alavimanesh. 2019. Effects of tillage systems on soil properties, fuel consumption and wheat yield in the wheat-sesame rotation. Journal of Soil Research 33 (4): 441-455.
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irriggation and Drainage Paper 56. 300 pp.
3. Arvidsson, J., E. Bolenius, and K. M. V. Cavalieri. 2012. Effects of compaction during drilling on yield of sugarbeet (*Beta vulgaris* L.). European Journal of Agronomy 39: 44-51.
4. Behaeen, M. A., G. R. Ashraf Mansouri, and F. Hamdi. 2012. Effect of different tillage methods in monogerm seedbed preparation on yield and quality of sugar beet. Journal of Sugar Beet 28: 123-135. (In Persian).
5. Bengough, G., B. M. Mckenzie, P. D. Hallett, and T. A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Journal of Experimental Botany 62 (1): 59-68.
6. Bloch, D., C. M. Hoffmann, and B. Märländer. 2006. Impact of water supply on growth, photosynthesis, water use and carbon isotope discrimination of sugar beet in relation to genotypic variability. European Journal of Agronomy 24: 218-225.
7. Brereton, J. C., M. McGowan, and T. C. K. Dawkins. 1986. The relative sensitivity of spring barley, spring field beans, and sugar beet crops to soil compaction. Field Crop Research 13: 223-237.
8. Campbell, L. G., and K. K. Fugate. 2015. Relationships among impurity components, sucrose, and sugar beet processing qulity. Journal of Sugar beet Research 52: 2-21.
9. Clover, G. R. G., K. W. Jaggard, H. G. Smith, and S. N. Azam-Ali. 2001. The use of radiation interception and transpiration to predict the yield of healthy, droughted and virus-infected sugar beet. Journal of Agricultural Science 136 (02): 169-178.
10. Ebrahimipak, N. A. 2010. Determination of yield response factor (Ky) of sugar beet to deficit irrigation at different growth stages. Journal of Sugar Beet 26 (1): 67-79. (In Persian).
11. Evans, R. G., W. B. Stevens, and W. M. Iversen. 2009. Development of strip tillage on sprinkler irrigated sugar beet. Applied Engineering in Agriculture 26 (1): 59-69.
12. Ghadami Firouzabadi, A., and M. R. Mirzaeai. 2006. Investigation effects of tricle irrigation (Tape) on quantity and quality of sugar beet. Pajouhesh & Sazandegi 71: 6-11. (In Persian).
13. Ghasemi Abdolmaleki, A., G. Sepanloo, and M. A. Bahmanyar. 2015. Investigating the effect of different tillage methods on some physical properties of soil. Journal of Soil Research 29 (3): 309-320. (In Persian).
14. Hungria, M., J. C. Franchini, O. Brandao-Junior, G. Kaschuk, and R. A. Souza. 2009. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil tillage and two crop-rotation systems. Applied Soil Ecology 42 (3): 288-296.
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. Journal of Sugar Beet 19: 81-100. (In Persian).
16. Javanmard, A., G. R. Gahramanian, K. Fotouhi, and A. Asadi Danalo. 2014. Evaluation of different tillage methods on soil physical properties and growth characteristics of sugar beet (*Beta vaulgaris* L.). Research in Crop Ecosystems 3: 83-94. (In Persian).
17. Jouzi, M., and H. Zare Abyaneh. 2015. Water productivity and water use efficiency indexes of sugar beet under different levels of water and nitrogen fertilizer. Journal of Water and Soil Conservation 22 (5): 117-133. (In Persian).
18. Keshavarz afshar, R., A. Nilahyane, C. Chen, H. He, W. B. Stevens, and W. M. Iversen. 2019. Impact of conservation tillage and nitrogen on sugar beet yield and quality. Soil & Tillage Research 191: 216-223.
19. Koch, H. J., J. Dieckmann, A. Buches, and B. Marlander. 2009. Yield decrease in sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling. European Journal of Agronomy 30 (2): 101-109.
20. Larney, F. J., and R. A. Fortune. 1986. Recompaction effects of moldboard ploughing and seedbed cultivations on four deep loosened soils. Soil & Tillage Research 8: 77-87.
21. Miller, S. D., and A. G. Dexter. 1983. No-tillage sugar beet production. Sugar beet Research and Extension Reports 21: 124-25.

22. 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. (In Persian).
23. Mohamadian, R., M. Younesi Alamouti, A. Nourozi, S. Abbasi, and H. Noushad. 2014. Effects of some seedbed preparation methods on the soil physical properties and sugar beet yield and quality. Seed and Plant Journal 30: 277-295. (In Persian).
24. 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. Journal of Sugar Beet 22: 53-66. (In Persian).
25. Oweis, T., A. Hachum, and M. Pala. 2004. Water use efficiency of winter- sown chickpea under supplemental irrigation in a Mediterranean environment. Agricultural Water Management 66: 163-179.
26. Rahimian, M. H. 2002. Determining the water requirement of sugar beet by lysimetric method. Agricultural Research, Education and Extension Organization. Journal No. 347/81. (In Persian).
27. Rusu, T. 2005. The influence of minimum tillage systems upon the soil properties, yield and energy efficiency in some arable crops. Journal of Central European Agriculture 6 (3): 287-294.
28. Solhjou, A. A., A. Dehghanian, A. Sepaskhah, and M. Niroman Jahromi. 2006. Effect of subsoiling physical properties and sugar beet yield. Journal of Agricultural Engineering Research 25: 131-144. (In Persian).
29. Tarkalson, D. D., and B. A. King. 2017. Effects of tillage and irrigation management on sugarbeet production. Agronomy Journal 109: 2396-2406.
30. Topak, R., S. Suheri, and B. Acar. 2010. Comparison of energy of irrigation regimes in Sugar beet production in a semi-arid region. Energy 35: 5464-5471.
31. Tugrul, K. M., and I. Dursun. 2007. Tillage effect on yield, quality, management and cost of sugar beet. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 38 (2): 38-41.
32. Ucan, K., and C. Gencoglan. 2004. The effect of water deficit on yield and yield components of sugar beet. Turk Journal Agricultural 28: 163-172.
33. Ustun, S., O. Selda, M. K. Fatih, and K. Yasemin. 2014. Evaluation of water use and yield responses of drip-irrigated sugar beet with different irrigation techniques. Chilean Journal of Agricultural Research 74 (3): 302-310.
34. Van den Putte, A., G. Govers, J. Diels, K. Gillijns, and M. Demuzere. 2010. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: a meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. European Journal of Agronomy 33: 231-241.
35. Younesi Alamouti, M., and A. Sharifi. 2011. Investigation and determination of power required fuel and some physical properties of soil in several tillage methods. Journal of Agricultural Machinery 2 (1):11-18. (In Persian).

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 231-240

Microscopic Investigation of Cold Plasma Effect on Chickpea Seed Germination

M. Fereydooni[1], H. Haji Agha Alizadeh[2*]

1- PhD student of Department of Biosystem, Faculty of Agriculture, BuAli Sina University, Hamedan, Iran
2- Accociate Professor, Department of Biosystem, Faculty of Agriculture, BuAli Sina University, Hamedan, Iran
(*- Corresponding Author Email: h-alizade@basu.ac.ir)

Received: 18-09-2020
Revised: 19-10-2020
Accepted: 25-11-2020

How to cite this article:
Fereydooni, M., and H. Haji Agha Alizadeh. 2022. Microscopic Investigation of Cold Plasma Effect on Chickpea Seed Germination. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 231-240. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.88718.

Introduction

As the world's population grows, more food need to be produced. Plasma technology is one of the methods that can improve plant growth. Cold plasma is effective in increasing growth and germination indices. In this article, the effect of cold plasma based on corona discharge was investigated on germination of Adel, Mansur, and Azad chickpea varieties.

Materials and Methods

In the corona discharge method, a relative vacuum should be used. Corona discharge is formed when there are pronounced spatial in-homogeneities in the electric field, in particular, when the electric field exceeds the breakdown threshold in a limited spatial region. This commonly occurs when highly asymmetric electrodes are employed, such as a point and a plane. Thermodynamically corona is a very non-equilibrium process, creating a non-thermal plasma. The avalanche mechanism does not release enough energy to heat the gas in the corona region generally and ionize it, as occurs in an electric arc or spark. Only a small number of gas molecules take part in the electron avalanches and are ionized, having energies close to the ionization energy of 1- 3 ev, the rest of the surrounding gas is close to ambient temperature. Corona discharge is a weakly ionized non-equilibrium plasma based on the avalanche mechanism. If it reaches a close distance with a conductive material or increase the electrical field, it can create longer breakdown streamers and eventually create sparks. The system is designed to convert 220V voltage with a frequency of 50 Hz to 12 kV voltage with a frequency of 9 kHz. Two electrodes with a 2 cm distance are in a vacuum chamber with a negative pressure of 20 pounds per square inch. And the samples are placed between two electrodes. Experiment was performed in form of a.factorial experimental design based on a CRD. In this plan, treatments are randomly placed in experimental units. The type of factorial experiment performed is 3×3×2×2 and multiplied numbers are factor levels. Seed production year factor in two levels, moisture factor in two levels, Seed variety factor in three levels, and exposure duration factor in three levels were examined. Plasma-exposed seeds and non-exposed seeds were grown under the same conditions. The samples were selected completely randomly. The samples were wetted 24 hours before exposure. Then all 18 chickpeas were placed in a dish in order to observe proper repetition. Samples from each dish were exposed to cold plasma under the same conditions between samples for a specified period of time. After exposing the samples to cold plasma, samples of all dishes under the same conditions at 30 °C and 300 lux environmental light were examined for germination evaluation. For this purpose, samples of each dish were placed in a cover of cotton cloth. They got wet every 4 hours. After 48 hours, all samples were examined and the root length of each sample was measured.

Results and Discussion

The results showed that seeds exposed to plasma for 60 seconds had a faster germination speed than those without exposure. Also, seeds that were exposed to plasma for 30 seconds had a longer root length than those without exposure. According to the results of statistical analysis, exposure to cold plasma for 30 seconds has increased root length in Adel chickpea variety up to 12.5% and in Mansour variety up to 18%

Conclusion

After statistical analysis, appear that root length under the same conditions, during 30 seconds of exposure to cold plasma, is significant at 5% level from non-exposure and 60 seconds of exposure. Microscopic images of samples were examined on the outer surface and inner tissue of seed cell. Studies have shown that the outer surfaces of seeds exposed to cold plasma are smoother, less prominent and smaller contact angle than those without exposure to plasma. This change can increase the hydrophilicity of seeds. But cold plasma had no effect on cell tissue in terms of size and number.

Keywords: Cold plasma, Microscopic image, Chickpea, Germination

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۲۴۰-۲۳۱

بررسی میکروسکوپی اثر پلاسمای سرد بر جوانه‌زنی بذر نخود

محسن فریدونی[۱]، حسین حاجی‌آقاعلیزاده[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

چکیده

با افزایش جمعیت جهان، نیاز به تولید مواد غذایی بیشتر نیز افزایش می‌یابد. فناوری پلاسما یکی از روش‌هایی است که می‌تواند رشد گیاه را بهبود بخشد. پلاسمای سرد در افزایش شاخص‌های رشد و جوانه‌زنی موثر است. در این مقاله، تأثیر پلاسمای سرد بر پایه تخلیه کرونا بر جوانه‌زنی ارقام نخود عادل، منصور و آزاد بررسی شد. در روش تخلیه کرونا، از خلا نسبی استفاده شد. پژوهش حاضر در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی انجام شد. بذرهای مواجه با پلاسما و بذرهای شاهد در شرایط یکسان برای جوانه‌زنی نگهداری شدند. نتایج نشان داد سرعت جوانه‌زنی در بذرهایی که به مدت ۶۰ ثانیه مواجهه با پلاسمای سرد داشتند، بیشتر از بذرهای بدون مواجهه بود. همچنین بذرهای ارقام عادل و منصور که به مدت ۳۰ ثانیه در مواجهه با پلاسمای سرد قرار گرفتند، دارای طول ریشه بیشتری نسبت به بذرهای بدون مواجهه بودند. پس از تجزیه و تحلیل آماری، مشخص شد که طول ریشه در شرایط یکسان، در مدت زمان مواجهه ۳۰ ثانیه در معرض پلاسمای سرد، دارای اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ نسبت به حالت‌های مواجهه ۶۰ ثانیه و بدون مواجهه با پلاسمای سرد دارد. تصاویر میکروسکوپی از سطح خارجی و بافت داخلی سلول بذر در نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان دادند که سطوح خارجی بذرهای در معرض پلاسمای سرد نسبت به شاهد هموارتر، دارای برجستگی کمتر و زاویه سطح تماس کمتری هستند. این تغییر می‌تواند خاصیت آب‌دوستی را افزایش دهد. اما در مواجهه بذر با پلاسمای سرد، تغییری در بافت داخلی سلول مشاهده نگردید.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای سرد، تصویر میکروسکوپی، جوانه‌زنی، نخود

مقدمه

افزایش تولید محصولات کشاورزی، از ضروریات زندگی بشر امروز است. از طرفی یکی از حبوبات پرمصرف نخود است و یکی از فناوری‌های به‌کار رفته در بهبود رشد گیاه، استفاده از پلاسمای سرد است. مطالعات مختلفی در مورد تأثیر پلاسما بر جوانه‌زنی بذر انجام شده است. در یک مطالعه، تیمار پلاسمای سرد برای بهبود جوانه‌زنی و افزایش محتوای فتوشیمیایی زیستی برنج قهوه‌ای جوانه‌زده بررسی شد (Yodpitak *et al.*, 2019). در مطالعه دیگری پیش‌بینی جوانه‌زنی در بسترهای بذر گیاهان غیر زراعی نیمه‌خشک مورد بررسی قرار گرفت (Rawlins *et al.*, 2012). برای پیش‌بینی جوانه‌زنی در کلزا از مدل ریاضی استفاده شد (Jian *et al.*, 2014). استفاده از پلاسمای مبتنی بر تخلیه الکتریکی کرونا بر تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نشاسته موز در تایوان بررسی شد (Wu *et al.*, 2018). پلاسمای سرد اتمسفری از طریق میدان متغیر باعث افزایش تخلیه کرونا نسبت به سد دی‌الکتریک برای کاربردهای مختلف گردید (Khamsen *et al.*, 2016a). پلاسمای کرونا و میدان‌های الکتریکی برای تصفیه آب استفاده شده‌اند (Banaschik *et al.*, 2016). توسعه سیستم پلاسمای کرونا با کنترل خودکار برای غیرفعال کردن پاتوژن در محیط کشت هیدروپونیک گوجه‌فرنگی بررسی شد (Takahashi *et al.*, 2018). توسعه دستگاه استریلیزاسیون با استفاده از جت پلاسمای غیرحرارتی بر پایه تخلیه کرونا با فشار هوا مورد مطالعه قرار گرفت (Kuwahara *et al.*, 2012). از جت پلاسمای تخلیه کرونا برای ضدعفونی میکروبی حوضچه خشک استفاده شد (Kim *et al.*, 2015). سطح ماده آلی و بیولوژیکی از طریق پلاسمای سرد جوی ناشی از تخلیه کرونا اصلاح شد (Khamsen *et al.*, 2016b). پیش‌تیمار پلاسمای سرد باعث بهبود جوانه‌زنی مارچوبه وحشی شد (Loporto *et al.*, 2019). اثر پلاسمای غیرحرارتی بر متغیرهای

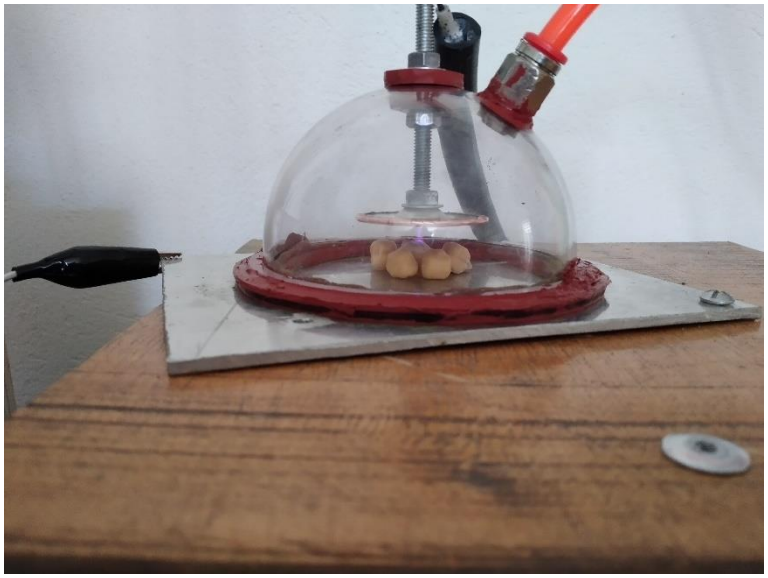
۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h-alizade@basu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.88718

جوانه‌زنی بذرهای سویا بررسی شد (Perez *et al.*, 2018). پلاسما بر پایه تخلیه سد دی‌الکتریک میکروارگانیسم‌های روی بذرهای جوانه‌زده را غیرفعال نمود (Butscher *et al.*, 2016). در پژوهشی صفات کمی و کیفی نشاسته در طول جوانه‌زنی بذر شنبلیله بررسی شد. سنجش کمی و تصویربرداری میکروسکوپی نشان داد که مقدار نشاسته در ۴۸ ساعت پس از جوانه‌زنی به بالاترین میزان رسیده است (Bakhshy *et al.*, 2020). اثر آب مغناطیسی بر پنج رقم گندم در سطوح مختلف دو تیمار مدت زمان مواجهه و میدان مغناطیسی، مورد بررسی قرار گرفت (Zarei *et al.*, 2020). اما تاکنون تحقیقی برای بررسی تأثیر پلاسمای سرد بر جوانه‌زنی نخود انجام نشده است. در این پژوهش، تأثیر پلاسمای سرد بر پایه تخلیه کرونا بر جوانه‌زنی ارقام نخود عادل، منصور و آزاد بررسی شد.

مواد و روش‌ها

سامانه پلاسمای سرد

تخلیه کرونا زمانی ایجاد می‌شود که ناهمگنی مکانی در میدان الکتریکی ایجاد شود، به‌ویژه هنگامی که میدان الکتریکی از یک آستانه شکست در یک منطقه محدود فراتر رود (Raizer *et al.*, 2011). این امر معمولاً هنگامی اتفاق می‌افتد که از الکترودهای بسیار نامتقارن مانند نقطه و صفحه استفاده شود (Misra *et al.*, 2016). از نظر ترمودینامیکی، کرونا یک فرآیند غیرتعادلی بوده و پلاسمای غیرحرارتی ایجاد می‌کند. این فرآیند، انرژی کافی را برای گرم کردن گاز در منطقه کرونا و یونیزه کردن آن آزاد نمی‌کند، همان‌طور که در یک قوس الکتریکی یا جرقه اتفاق می‌افتد. فقط تعداد کمی از مولکول‌های گاز در فرآیند بهمن الکترونی شرکت کرده و یونیزه می‌شوند و دارای انرژی نزدیک به انرژی یونیزاسیون هستند. دمای بقیه گازهای اطراف آن نزدیک به دمای محیط است. تخلیه کرونا، پلاسمای غیرتعادلی یونیزه ضعیف و مبتنی بر فرآیند بهمن الکترونی است. تصویر سامانه بر پایه تخلیه کرونا در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر سامانه پلاسمای سرد بر اساس تخلیه کرونا

Fig. 1. Image of cold plasma reactor based on corona discharge

این سامانه به نحوی طراحی شده است که ولتاژ ۲۲۰ ولت شهری با فرکانس ۵۰ هرتز را به ولتاژ ۱۲ کیلوولت با فرکانس ۹ کیلوهرتز تغییر می‌دهد. دو الکترود نیز با فاصله ۲ سانتی‌متر از یکدیگر در محفظه خلاء با فشار منفی ۲۰ پوند بر اینچ مربع قرار گرفته‌اند و نمونه‌ها در بین دو الکترود قرار می‌گیرند.

آماده‌سازی نمونه‌ها برای جوانه‌زنی

از هر یک از رقم‌های نخود عادل، منصور و آزاد ۲۱۶ نمونه به‌طور تصادفی تهیه شد. سپس، در قالب یک طرح آزمایشی فاکتوریل، تأثیر پلاسما بر جوانه‌زنی بذر بررسی گردید. برای این منظور، آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. در این طرح، تیمارها به‌طور تصادفی در واحدهای آزمایشی قرار می‌گیرند. فاکتور سال تولید بذر در دو سطح، فاکتور رطوبت در دو سطح، فاکتور ارقام بذر در سه سطح و فاکتور مدت زمان مواجهه با پلاسما در سه سطح مورد بررسی قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶

استفاده شد.

محتوای رطوبتی بر پایه تر و خشک بذر ارقام نخود مورد آزمایش به‌ترتیب بر اساس روابط (۱) و (۲) محاسبه گردید (Mohsenin *et al.*, 1986):

$$M_w = \frac{W_w}{W_t} \times 100 = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100 \quad (۱)$$

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن‌ها M_w محتوای رطوبتی بر پایه تر، M_d محتوای رطوبتی بر پایه خشک، W_w وزن آب و W_d وزن ماده خشک می‌باشند.

قابلیت جوانه‌زنی یا درصد جوانه‌زنی، برای بذرهای موجود در هر ظرف بر اساس رابطه (۳) محاسبه شده است (Loporto *et al.*, 2019):

$$G = \frac{N}{N_t} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن

N تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر ظرف و N_t تعداد بذرهای موجود در هر ظرف است.

پتانسیل جوانه‌زنی به‌صورت درصد بیان شد و نسبت تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز دوم به تعداد بذرهای آزمایش شده است.

سرعت جوانه‌زنی برای بذور بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد (Amnuaysin *et al.*, 2018):

$$G_i = \sum \frac{G_t}{D_t} \quad (۴)$$

که در آن:

G_t تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز و D_t تعداد روزهای جوانه‌زنی است.

ابتدا بذر مادری ارقام نخود از مرکز تولید بذر در استان کرمانشاه تهیه شد. نمونه‌ها به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. نیمی از تعداد کل نمونه‌ها ۲۴ ساعت قبل از مواجهه با پلاسما مرطوب شدند. سپس هر ۱۸ نخود به‌منظور رعایت تکرار مناسب در یک ظرف قرار داده شد. نمونه‌های درون هر ظرف برای مدت زمان مشخصی در مواجهه با پلاسمای سرد قرار گرفتند. پس از مواجهه نمونه‌ها با پلاسمای سرد، نمونه‌های همه ظروف تحت شرایط یکسان در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و شدت روشنایی محیطی ۳۰۰ لوکس برای ارزیابی جوانه‌زنی مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، نمونه‌های هر ظرف در پوششی از پارچه نخی قرار داده و هر چهار ساعت، یک بار مرطوب شدند. پس از ۴۸ ساعت، تمام نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و طول ریشه هر نمونه، درصد و سرعت جوانه‌زنی در هر ظرف اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه زیست‌شناسی مورد بررسی سلولی قرار گرفتند. بدین منظور از میکروسکوپ نوری[1] ساخت کشور آلمان با نسبت بزرگ‌نمایی ۲۰ و ۴۰ استفاده شد. به‌منظور بررسی میکروسکوپی، لایه‌هایی از سطح خارجی و بافت داخلی نمونه‌های مختلف برش داده شد. برای تشخیص بافت‌های مختلف از یکدیگر، بافت‌های گیاهی با استفاده از معرف رنگی (کارمن زاجی) رنگ‌آمیزی و پس از شستشو در آب مقطر مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفتند. در نهایت با استفاده از یک دستگاه دوربین دیجیتال[2] که به میکروسکوپ متصل است، تصاویر با نسبت بزرگ‌نمایی هفت تهیه گردید. به‌منظور بررسی زاویه سطح تماس قطره آب با بذر، از میکروسکوپ نوری[3] ساخت کشور آلمان با نسبت بزرگ‌نمایی ۲۰ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس آزمایش فاکتوریل با متغیر وابسته طول ریشه، فاکتورهای مختلف و اثر متقابل آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر به‌دست آمده در ستون سطح معنی‌داری در جدول ۱، تفاوت معنی‌داری برای فاکتورهای رطوبت، زمان مواجهه و اثر متقابل سال تولید و فاکتورهای زمان مواجهه رشد ریشه با استفاده از مدل تحلیل واریانس دو طرفه قابل بررسی خواهد بود. دقت مدل پیاده‌سازی شده با $R^2 = 0.54$ بیان می‌شود. در ادامه نتایج بررسی اختلاف معنی‌دار بین گروه مدت زمان مواجهه با پلاسما، در ارتباط با متغیرهای وابسته سرعت جوانه‌زنی و طول ریشه به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به این که یکی از متغیرهای اصلی در این بررسی، مدت زمان مواجهه با پلاسمای سرد می‌باشد و فرض مساوی بودن میانگین نیز رد شده است، بنابراین اثر مدت زمان مواجهه برای مقایسه میانگین انتخاب گردید.

یکی دیگر از متغیرهای مؤثر در جوانه‌زنی بذرها، رطوبت می‌باشد. محتوای رطوبتی بذر ارقام نخود مورد آزمایش به شرح جدول ۴ اندازه‌گیری گردید.

تجزیه و تحلیل جوانه‌زنی بر اساس متغیر زمان مواجهه با پلاسما

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، متوسط طول ریشه پس از ۴۸ ساعت نگهداری نمونه‌ها در شرایط جوانه‌زنی، در مدت زمان مواجهه ۳۰ ثانیه با پلاسمای سرد، در ارقام عادل و منصور بیشترین مقدار را دارد. مواجهه با پلاسما به مدت ۳۰ ثانیه، طول ریشه در بذرهای رقم عادل ۱۲/۵٪ و رقم منصور، ۱۸٪ افزایش یافته است.

1- LEICA DMLS Model
2- Canon Powershot G11
3- Labomed Microscope CZM6

از آنجا که ذخیره کافی مواد مغذی برای رشد بذر ضروری است، افزایش متوسط طول ریشه به دلیل پلاسمای سرد می‌تواند باعث افزایش جذب و نفوذ ذخیره مواد مغذی به بذر شود. بنابراین احتمال تبدیل بذرهای بیشتری به گیاه و تولید محصول نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱- تجزیه واریانس آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی

Table 1- Factorial analysis of variance analysis table in a completely randomized design

Source منبع	Sum of squares مجموع مربعات	df درجه آزادی	Mean square میانگین مربعات	F شاخص
مواجهه Exposure	3680.194	2	1840.097	89.374**
رطوبت Moisture	142.617	1	142.617	6.927**
سال Year	2888.000	1	2888.000	140.271**
رقم Variety	3189.454	2	1594.727	77.456**
مواجهه × رطوبت Exposure × Moisture	2396.207	2	1198.103	58.192**
مواجهه × سال Exposure × Year	618.287	2	309.144	15.015**
مواجهه × رقم Exposure × Variety	744.019	4	186.005	9.034**
رطوبت × سال Moisture × Year	376.599	1	376.599	18.291**
رطوبت × رقم Moisture × Variety	499.318	2	249.659	12.126**
سال × رقم Year × Variety	380.028	2	190.014	9.229**
مواجهه × رطوبت × سال Exposure× Moisture× Year	8.485	2	4.242	0.206ns
مواجهه × رطوبت × رقم Exposure×Moisture×Variety	90.136	4	22.534	1.094ns
مواجهه × سال × رقم Exposure × Year × Variety	1057.574	4	264.394	12.842**
رطوبت × سال × رقم Moisture × Year × Variety	205.892	2	102.946	5.000**
مواجهه × رطوبت × سال × رقم Exposure × Moisture × Year × Variety	272.802	4	68.201	3.313*
خطا Error	12600.333	216	20.589	
کل Total	112518.000	323		

** در سطح ۱٪ و * در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی‌داراست. ns به معنای عدم معنی‌داری است.

** Significant at the 0.01 level and * significant at the 0.05 level. ns means insignificance.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بذرهای دارای مواجهه با پلاسما به مدت ۶۰ ثانیه دارای بیشترین سرعت جوانه‌زنی بوده‌اند. با افزایش طول ریشه، سرعت جوانه‌زنی نیز به سمت بیشترین مقدار همگرا شده است. بیشترین مقدار طول ریشه نیز مربوط به بذرهای دارای مواجهه با پلاسما می‌باشد.

میزان تأثیر پلاسما بر درصد جوانه‌زنی ارقام نخود مورد آزمایش در شکل ۴ نمایش داده شده است. در رقم منصور مواجهه با پلاسما به مدت ۳۰ ثانیه، موجب افزایش درصد جوانه‌زنی به میزان ۲٪ و مواجهه

۶۰ ثانیه، شاخص درصد جوانه‌زنی ۱۱٪ افزایش داشته است. در مجموع افزایش مدت زمان مواجهه در رشد شاخص درصد جوانه‌زنی مؤثر بوده است.

پیش‌تیمار بذر مارچوبه وحشی با پلاسمای سرد، موجب افزایش ۱۵٪ جوانه‌زنی، افزایش جذب آب در بذر و ضدعفونی سطح بذر گردیده است (Loporto *et al.*, 2019).

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین بین سرعت جوانه‌زنی و زمان مواجهه بر اساس روش LSD

Table 2- Multiple comparisons between germination speed and exposure time based on LSD method

(I) Exposure time زمان مواجهه	(J) Exposure time زمان مواجهه	Mean difference (I-J) اختلاف میانگین	Std. Error خطای استاندارد	Sig. سطح معنی‌داری	95% Confidence فاصله اطمینان	
					Lower bound حد پایین	Upper bound حد بالا
0	30	.417*	.097	.000	.23	.61
	60	-.083ns	.097	.392	-.27	.11
30	0	-.417*	.097	.000	-.61	-.23
	60	-.500*	.097	.000	-.69	-.31
60	0	.083ns	.097	.392	-.11	.27
	30	.500*	.097	.000	.31	.69

* در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی‌داراست و ns به معنای عدم معنی‌داری است.

* The mean difference is significant at the 0.05 level and ns means insignificance.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین بین طول ریشه و زمان مواجهه بر اساس روش LSD

Table 3- Results of comparison of mean between root length and exposure time based on LSD method

(I) Exposure time زمان مواجهه	(J) Exposure time زمان مواجهه	Mean difference (I-J) اختلاف میانگین	Std. Error خطای استاندارد	Sig. سطح معنی‌داری	95% Confidence فاصله اطمینان	
					Lower bound حد پایین	Upper bound حد بالا
0	30	.87*	.231	.000	.42	1.32
	60	.53*	.231	.022	.08	.99
30	0	-.87*	.231	.000	-.1.32	-.42
	60	-.34*	.231	.144	-.79	.12
60	0	-.53ns	.231	.022	-.99	-.8
	30	.34ns	.231	.144	-1.2	.79

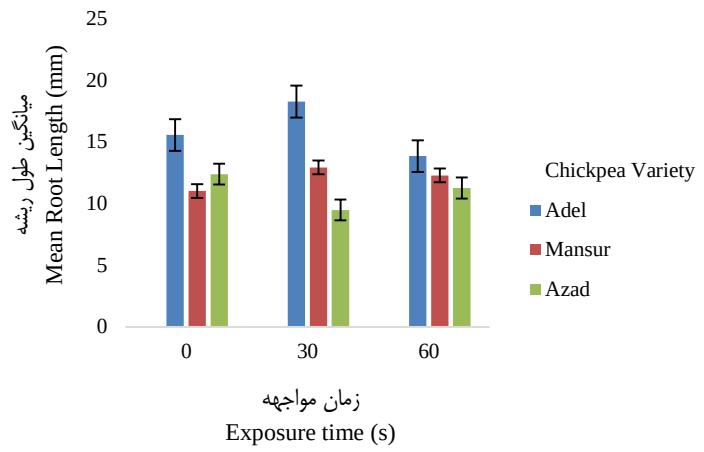
* در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار است و ns به معنای عدم معنی‌داری است.

* The mean difference is significant at the 0.05 level and ns means insignificance.

جدول ٤- مقادیر محتوای رطوبتی بذر ارقام نخود: ۱. عادل، ۲. منصور و ۳. آزاد

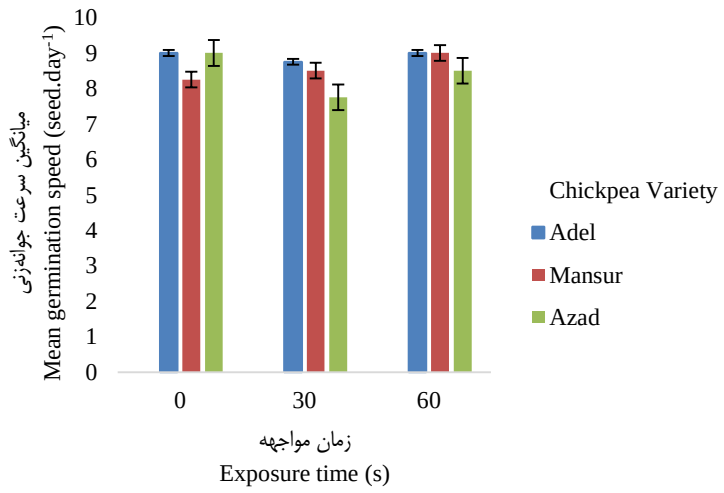
Table 4- Moisture content of chickpea varieties seed: 1. Adel, 2. Mansur and 3. Azad

Variable (%) متغیر (٪)	Max بیشینه	Min کمینه	Median میانه	Mean میانگین	SD انحراف معیار	CV (%) ضریب تغییرات (٪)
محتوای رطوبتی خشک ۱ Dry moisture content 1	15.80	2.85	7.41	7.49	2.37	31.64
محتوای رطوبتی خشک ۲ Dry moisture content 2	56.52	2.78	7.14	7.68	5.32	69.27
محتوای رطوبتی خشک ۳ Dry moisture content 3	11.11	3.33	7.32	7.22	1.83	25.35
محتوای رطوبتی تر ۱ Wet moisture content 1	13.04	2.78	6.78	6.89	1.99	28.82
محتوای رطوبتی تر ۲ Wet moisture content 2	36.11	2.70	6.67	6.96	3.40	48.85
محتوای رطوبتی تر ۳ Wet moisture content 3	10.00	3.22	6.86	6.71	1.60	23.84



شکل ۲- ارتباط میانگین طول ریشه با مدت زمان مواجهه با پلاسما

Fig. 2. Relationship between mean root length and plasma exposure time



شکل ۳- ارتباط بین سرعت جوانه‌زنی و مدت زمان مواجهه با پلاسما

Fig. 3. Relationship between germination speed and plasma exposure time

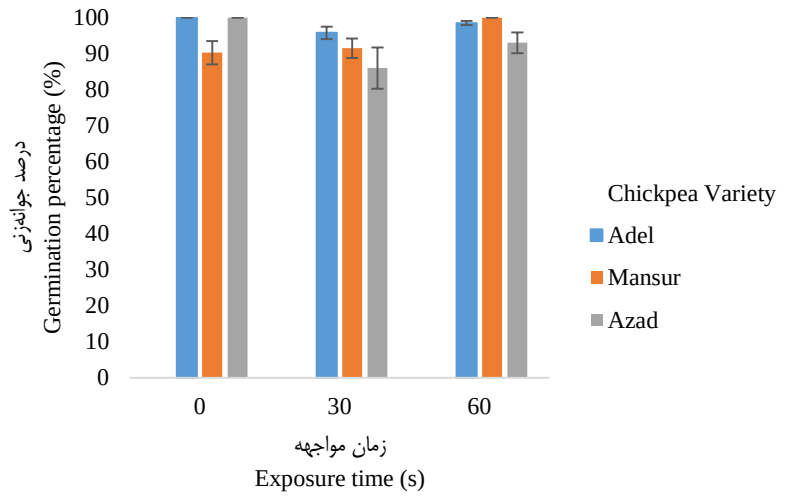
بررسی میکروسکوپی تغییرات سطح خارجی بذر در اثر قرار گرفتن در معرض پلاسمای سرد و اثر آن بر جوانه‌زنی بذر

در پلاسمای سرد، یون‌ها و الکترون‌ها وجود دارند. بنابراین، پلاسما می‌تواند سطح خارجی بذر را تحت تأثیر قرار داده و سطح بذر را هموار کند. در نتیجه هموار شدن سطح بذر و کاهش زاویه سطح تماس قطرات آب روی سطح بذر، آب‌دوستی[1] آن افزایش می‌یابد.

بر اساس تحقیق انجام شده بر روی بذر گندم، در اثر مواجهه با پلاسمای سرد، زاویه سطح تماس قطره آب کاهش یافته است (Shashikanthalu *et al.*, 2020). همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است تصاویر میکروسکوپی از پوسته خارجی بذر ارقام نخود در حالت‌های دارای مواجهه با پلاسما، نسبت به حالت بدون مواجهه، هموارتر هستند. از طرفی شکل ۶ نشان می‌دهد که زاویه سطح تماس قطره آب نیز نسبت به حالت شاهد، کاهش یافته است. قطره آب در تماس با سطح بذر شاهد، دارای زاویه بیشتر و سطح تماس کمتری با بذر است. در حالی‌که در حالت‌های تیمار با پلاسما زاویه کمتر و سطح تماس بیشتر گردیده است. این موضوع می‌تواند دلیلی بر افزایش رشد طول ریشه و دیگر شاخص‌های جوانه‌زنی باشد.

همان‌گونه که تیمار میدان الکتریکی ناشی از تخلیه کرونا، ساختار شیمیایی لایه‌های بذر یونجه را تغییر داده و در نتیجه تغییراتی در آب‌دوستی آن ایجاد کرده است (Xinyu *et al.*, 2020).

1- Hydrophilic



شکل ٤- تأثیر زمان مواجهه بذرهای انواع نخود با پلاسمای سرد بر درصد جوانه‌زنی

Fig. 4. The effect of exposure time of chickpea seeds to cold plasma on germination percentage

(ج) (ب) (الف)

شکل ٥- تصویر میکروسکوپ نوری از سطح خارجی بذر: الف. رقم نخود عادل مرطوب، تولید سال ۱۳۹۹ بدون مواجهه با پلاسما. ب رقم نخود عادل مرطوب، تولید سال ۱۳۹۹ با مواجهه پلاسما به مدت ۳۰ ثانیه. ج. رقم نخود عادل مرطوب، تولید سال ۱۳۹۹ با مواجهه پلاسما به مدت ۶۰ ثانیه.

Fig. 5. Microscopic images of outer surface of seeds: a. Wet Adel chickpea variety producted in 2020 without exposure. b. Wet Adel chickpea variety producted in 2020 with Corona for 30 seconds. C. Wet Adel chickpea variety producted in 2020 with Corona for 60 seconds

(ج) (ب) (الف)

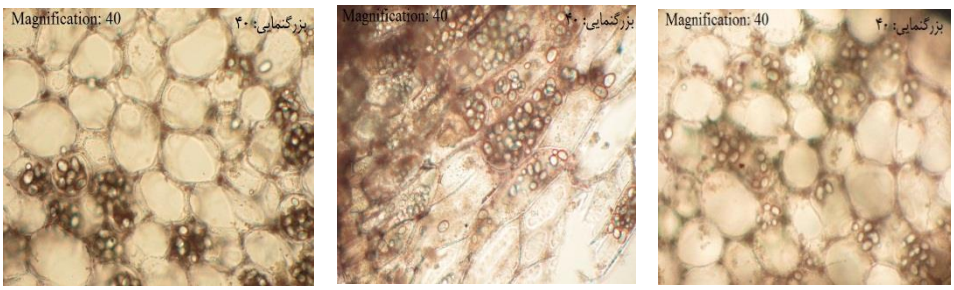
شکل ٦- تصویر میکروسکوپ نوری از زاویه سطح تماس قطره آب با بذر: الف. رقم نخود عادل خشک، تولید سال ۱۳۹۹ بدون مواجهه با پلاسما. ب رقم نخود عادل خشک، تولید سال ۱۳۹۹ با مواجهه پلاسما به مدت ۳۰ ثانیه. ج. رقم نخود عادل خشک، تولید سال ۱۳۹۹ با مواجهه پلاسما به مدت ۶۰ ثانیه

Fig. 6. Microscopic images of contact surface angle of water drop with seeds: a. Dry Adel chickpea variety producted in 2020 without exposure. b. Dry Adel chickpea variety producted in 2020 with Corona for 30 seconds. C. Dry Adel chickpea variety producted in 2020 with Corona for 60 seconds

بررسی تغییرات سلول‌های بذر نخود در اثر مواجهه با پلاسمای سرد

از آن‌جایی که جنس دیواره سلول‌های گیاهی در بافت‌های مختلف متفاوت است، پس سلول‌های مختلف رنگ‌های متفاوتی را جذب می‌کنند. بنابراین برای تشخیص بافت‌های مختلف از یکدیگر، رنگ‌آمیزی سلول‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بررسی سلولی نشان داد که تغییری در بافت سلول‌های داخلی نخود رخ نداده است. همچنین تغییری در سلول‌های بذر نخود در مواجهه با پلاسما از نظر تعداد و اندازه سلول صورت نگرفته است.

همچنین تحقیقاتی که بر روی بذرهای گیاهان گوجه‌فرنگی و فلفل انجام شده است نیز تغییر در ساختار DNA اولیه، فتوتیپ و فنولوژی گیاهان را در اثر تیمار بذرها قبل از جوانه‌زنی با پلاسما نشان نداده است (Shapira *et al.*, 2019).



(الف) (ب) (ج)

شکل ۷- تصویر میکروسکوپ نوری از بافت سلول بذر: الف. رقم نخود عادل مرطوب، تولید سال ۱۳۹۹ بدون مواجهه با پلاسما. ب رقم نخود عادل مرطوب، تولید سال ۱۳۹۹ با مواجهه پلاسما به مدت ۳۰ ثانیه. ج. رقم نخود عادل مرطوب، تولید سال ۱۳۹۹ با مواجهه پلاسما به مدت ۶۰ ثانیه

Fig. 7. Microscopic images of cell texture of seeds: a. Wet Adel chickpea variety producted in 2020 without exposure. b. Wet Adel chickpea variety producted in 2020 with Corona for 30 seconds. c. Wet Adel chickpea variety producted in 2020 with Corona for 30 seconds

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل آماری، مواجهه با پلاسمای سرد به مدت ۳۰ ثانیه، طول ریشه را در نخود رقم عادل تا ۱۲/۵٪ و در رقم منصور تا ۱۸٪ افزایش داده است. از طرفی در مواجهه به مدت ۶۰ ثانیه، ارقام مورد آزمایش دارای بیشترین سرعت جوانه‌زنی بوده‌اند. این تغییرات دارای اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ می‌باشند. از سوی دیگر در بررسی میکروسکوپی سطح خارجی بذر، مشخص گردید ارقام مختلف در مواجهه با پلاسمای سرد دارای سطحی هموارتر و زاویه سطح تماس کمتری هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یکی از تأثیرات پلاسمای سرد بر جوانه‌زنی بذر نخود، افزایش آب‌دوستی و گسترش بیشتر و بهتر ریشه گیاه است. این موضوع می‌تواند باعث افزایش جذب آب و حتی کاهش آب آبیاری شود. همچنین باعث جذب مواد مغذی و بهبود تغذیه گیاه خواهد شد. ریشه‌های قوی‌تر به مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی کمک می‌کنند. از سوی دیگر، استفاده از فناوری پلاسمای سرد ساده است و تغییری در سلول‌های داخلی بذر نخود ایجاد نمی‌کند.

References

1. Amnuaysin, N., H. Korakotchakorn, S. Chittapun, and N. Poolyarat. 2018. Seed germination and seedling growth of rice dielectric barrier discharge plasma. Songklanakarin Journal of Science & Technology 40: 819-823.
2. Bakhshy, E., F. Zarinkamar, and M. Nazzari. 2020. Structural and quantitative changes of starch in seed of Trigonella persica during germination. International Journal of Biological Macromolecules 164: 1284-1293.
3. Banaschik, R., G. Burchhardt, K. Zocher, S. Hammerschmidt, J. F. Kolb, and K. Weltmann. 2016. Comparison of pulsed corona plasma and pulsed electric fields for the decontamination of water containing Legionella pneumophila as model organism. Bioelectrochemistry 112: 83-90.
4. Butscher, D., H. Van Loon, A. Waskow, P. Rudolf von Rohr, and M. Schuppler. 2016. Plasma inactivation of microorganisms on sprout seeds in a dielectric barrier discharge. International Journal of Food Microbiology 238: 222-232.
5. Jian, F., K. Sun, V. Chelladurai, D. S. Jayas, and N. White. 2014. Quality changes in high and low oil content canola during storage: Part II – Mathematical models to predict germination. Journal of Stored Products Research

59: 328-37.
6. Khamsen, N., A. Akkarachanchainon, K. Fookiat, J. Srisala, S. Chomchuen, W. Kanokbannakorn, and S. Srisonphan. 2016a. Atmospheric Cold Plasma via Fringe Field Enhanced Corona Discharge on Single Dielectric Barrier for Large-volume Applications. Procedia Computer Science 86: 321-24.
7. Khamsen, N., A. Akkarachanchainon, N. Teerakawanich, and S. Srisonphan. 2016b. Organic and Bio Material Surface Modification Via Corona Discharge Induced Atmospheric-cold Plasma. Procedia Computer Science 86: 325-28.
8. Kim, J., P. Puligundla, and Ch. Mok. 2015. Microbial decontamination of dried laver using corona discharge plasma jet (CDPJ). Journal of Food Engineering 161: 24-32.
9. Kuwahara, T., T. Kuroki, K. Yoshida, N. Saeki, and M. Okubo. 2012. Development of sterilization device using air nonthermal plasma jet induced by atmospheric pressure corona discharge. Thin Solid Films 523: 2-5.
10. LoPorto, Ch., L. Sergio, F. Boari, A. F. Logrieco, and V. Cantore. 2019. Cold plasma pretreatment improves the germination of wild asparagus (*Asparagus acutifolius* L.) seeds. Scientia Horticulturae 256: 108554.
11. Misra, N. N., O. K. Schluter, and P. J. Cullen. 2016. Cold plasma in food and agriculture. Elsevier Inc.
12. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials.
13. Perez, P., M. Cecilia, L. Prevosto, C. Zilli, E. Cejas, H. Kelly, and K. Balestrasse. 2018. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. Innovative Food Science & Emerging Technologies 49: 82-91.
14. Raizer, Y. 2011. Gas discharge physics. Springer. New York.
15. Rawlins, J. K., B. A. Roundy, D. Egget, and N. Cline. 2012. Predicting germination in semi-arid wildland seedbeds II. Field validation of wet thermal-time models. Environmental and Experimental Botany 76: 68-73.
16. Shapira, Y., E. Bormashenko, and E. Drori. 2019. Pre-germination plasma treatment of seeds does not alter cotyledon DNA structure, nor phenotype and phenology of tomato and pepper plants. Biochemical and Biophysical Research Communications 1: 100259.
17. Shashikanthalu, S. P., L. Ramireddy, and M. Radhakrishnan. 2020. Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum Cyminum* L. seeds by cold plasma. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants 519: 512-517.
18. Takahashi, K., Y. Saito, R. Oikawa, T. Okumura, K. Takaki, and T. Fujio. 2018. Development of automatically controlled corona plasma system for inactivation of pathogen in hydroponic cultivation medium of tomato. Journal of Electrostatics 91: 61-69.
19. Wu, T., N. Sun, and Ch. Chau. 2018. Application of corona electrical discharge plasma on modifying the physicochemical properties of banana starch indigenous to Taiwan. Journal of Food and Drug Analysis 26: 244-51.
20. Xinyu, L., Z. Song, W. Xu, Y. Li, Ch. Ding, and H. Chen. 2020. Spectral characteristics on increasing hydrophilicity of alfalfa seeds treated with alternating current corona discharge field. Biomolecular Spectroscopy. 236: 118350.
21. Yodpitak, S., S. Mahatheeranont, D. Boonyawan, Ph. Sookwong, S. Roytrakul, and O. Norkaew. 2019. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. Food Chemistry 289: 328-39.
22. Zarei, S., M. Kasraei, and M. A. Nematollahi. 2020. Investigating the impact of the magnetized water on the growth and germination of five wheat grain seeds. Journal of Agricultural Machinery 10 (2): 289-298. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v10i2.76707.

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 241-252

Development of an Electronic System for Determining Vertical Loads on the Rear Axle of Cereal Combine Harvesters in Motion

A. Rezaei[1], H. Masoudi[2*], H. Zaki Dizaji[3], M. E. Khorasani Ferdavani[2]

1- Former M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: hmasoudi@scu.ac.ir)

Received: 24-09-2020
Revised: 15-12-2020
Accepted: 18-01-2021

How to cite this article:
Rezaei, A., H. Masoudi, H. Zaki Dizaji, and M. E. Khorasani Ferdavani. 2022. Development of an Electronic System for Determining Vertical Loads on the Rear Axle of Cereal Combine Harvesters in Motion. Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 241-252. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.2021.58832.0.

Introduction

The cereal combine harvester is one of the agricultural machines that works in difficult conditions and its parts are constantly under various static and dynamic loads. For the optimal design of vehicle parts, types and values of loads applied to them must be determined correctly. The purpose of this study was to design and fabricate an electronic system that could instantly measure and store the amount of vertical load exerted on the rear axle of grain combine harvester in various conditions to be used in the design and optimization of the axle.

Materials and Methods

Main components of the designed system included a steel coupling, a disc loadcell (H2F-C2-10t ZEMIC model), an electronic board for amplifying loadcell output voltage, a data logger (AdvanTech DAQ Navi model), a 12-volt battery, and a laptop. A special steel coupling was designed in CATIA software for connecting the loadcell to the axle. The loadcell was placed between the coupling plates and then the coupling was installed on the center point of the rear axle of a JD 955 combine harvester. A standard tensile-compression testing machine (Cantam STM-150) was used to calibrate the loadcell. The relationship between the input load and the loadcell output voltage was linear and had a high coefficient of determination (R^2 = 0.9991). In the static test, the vertical load exerted on the axle was recorded by the electronic system while the combine was stopped and the combine engine was in ON/OFF modes. In the dynamic test, the combine was driven in three positions including asphalt road, dirt road, and wheat field at three different forward speeds, and loads on the rear axle were recorded by the electronic system. Finally, the data obtained from the tests were analyzed as a factorial experiment in a completely randomized design with five replications in Excel and SPSS software.

Results and Discussion

The average static loads on the combine rear axle in ON and OFF modes were 14.908 and 14.905 kN, respectively. The results of the Student's t-test of paired samples to compare the values of axle vertical loads in two modes of static load measurement showed that there is no significant difference between the axle loads in ON and OFF mode of the engine at 1% probability level. The average vertical loads on the rear axle of the combine were equal to 15.20, 15.27, and 15.28 kN, while driving on asphalt roads at speeds of 10, 15, and 20 km h^{-1} respectively. These values were equal to 17.57, 17.99, and 18.15 kN, while driving on the dirt road at speeds of 2, 4, and 6 km h^{-1} respectively, and they were equal to 16.47, 18.01, and 17.78 kN when harvesting wheat in the field at speeds of 3, 4, and 5 km h^{-1} respectively. The average load applied on the axle in the turning path was more than the load applied in the straight path, which indicates load transfer to the rear axle during turning. The effect of forward speed and path type on the amount of axle load was significant at a 1% probability level, but their interaction was not significant. Therefore, the critical conditions for applying load on the rear axle of combine harvester are occurred while combine turns with high forward speed, and the design of the axle should be based on these conditions. The maximum load on the axle was obtained equal to 50 kN on the dirt road, which was due to the combine movement on a steep uphill at the end of the path.

Conclusion

Evaluation of the system in different conditions showed that the performance and accuracy of the system are acceptable and the data of this system can be trusted and used to measure the vertical load on the rear axle of the combine. The current rear axle of the JD955 combine harvester looks relatively safe, but at some very rugged elevations, especially steep uphills, it suffers from a lot of stress that may cause damage. So, optimizing the axle such as increasing the thickness of the triangular piece in the middle of axis and using a stronger alloy for the middle areas of the axle are recommended.

Keywords: Cereals combine harvester, Coupling, Electronic system, Load cell, Rear axle

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۲۵۲-۲۴۱

توسعه سامانه الکترونیکی برای تعیین بار عمودی وارده بر اکسل عقب کمباین غلات در حین حرکت

اعظم رضایی[۱]، حسن مسعودی[۲*]، حسن ذکی دیزجی[۳]، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

چکیده

برای طراحی بهینه و اصلاح ساختار اکسل وسایل نقلیه دانستن بارهای وارده بر آن در شرایط کاری ضروری است. این پژوهش به دنبال اعلان نیاز پژوهشی شرکت کمباین‌سازی ایران مبنی بر تحلیل و محاسبه نیروهای وارد بر بدنه، محورها و چرخ‌های کمباین انجام شد. سامانه‌ی الکترونیکی ساخته‌شده شامل کوپلینگ فولادی، نیروسنج فشاری، مدار تقویت‌کننده ولتاژ، دیتالاگر و رایانه بود. نیروسنج به کمک کوپلینگ بر میانه اکسل عقب کمباین جاندیر ۹۵۵ نصب گردید. آزمون‌های ارزیابی عملکرد سامانه در حالت‌های سکون و حرکت کمباین در جاده آسفالت، جاده خاکی و مزرعه با سرعت‌های پیشروی متفاوت به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در پنج تکرار انجام شد. مطابق نتایج میانگین بارهای استاتیکی وارده بر اکسل در حالت موتور روشن و موتور خاموش به‌ترتیب ۱۴/۹۰۸ و ۱۴/۹۰۵ کیلونیوتن بود که تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد نداشتند. میانگین بارهای عمودی وارده بر اکسل حین حرکت در جاده آسفالت با سرعت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلومتر بر ساعت به‌ترتیب ۱۵/۲۰، ۱۵/۲۷ و ۱۵/۲۸ کیلونیوتن، حین حرکت در جاده خاکی با سرعت‌های ۲، ۴ و ۶ کیلومتر بر ساعت به‌ترتیب ۱۷/۵۷، ۱۷/۹۹ و ۱۸/۱۵ کیلونیوتن و هنگام دروی گندم با سرعت‌های ۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت به‌ترتیب ۱۶/۴۷، ۱۸/۰۱ و ۱۷/۷۸ کیلونیوتن به‌دست آمد. بیشینه بار وارده بر اکسل حدود ۵۰ کیلونیوتن و در جاده خاکی بود. در مجموع نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که عملکرد سامانه ساخته‌شده قابل قبول بوده و می‌توان از آن برای اندازه‌گیری بارهای عمودی وارده به اکسل عقب کمباین استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اکسل عقب، سامانه الکترونیکی، کمباین غلات، کوپلینگ، نیروسنج

مقدمه

دانش رابطه بین بارهای دینامیکی و مشخصات فنی وسیله نقلیه برای تصمیم‌گیری مهندسان، سازمان‌های راهداری و مدیران در موارد مختلفی مانند طراحی قطعات، تعیین محدودیت بار وسایل نقلیه سنگین، طراحی و تحلیل فرسایش سطح جاده و مدیریت تعمیر سیستم‌های تعلیق لازم است (Germanchev *et al.*, 2008). مطالعات رفتار دینامیکی وسایل نقلیه می‌تواند از طریق تحلیل‌های تئوری و تجربی انجام شود. استفاده از معادلات فیزیکی حاکم که غالباً مفروضات ساده‌کننده‌ای دارند از دقت نتایج می‌کاهد. روابط تجربی نیز که غالباً در شرایط معین استخراج شده‌اند، قابلیت تعمیم چندانی ندارند. لذا به‌کارگیری سامانه‌هایی که قادر به اندازه‌گیری لحظه‌ای مؤلفه‌های نیرو و گشتاور وارد بر وسایل نقلیه باشند موجب سهولت انجام مطالعات می‌گردد (Hajiahmad *et al.*, 2014).

شکستگی‌های مکرر اجزای مکانیکی ماشین‌ها و تجهیزات در اثر بارهای وارده، اهمیت بهینه‌سازی یا بازطراحی آن‌ها را آشکار می‌سازد. برای طراحی بهینه اکسل وسایل نقلیه نوع بارهای وارده بر آن و محل و نحوه اعمال بارها به اکسل باید به درستی مشخص شود. لذا اندازه‌گیری بارهای واقعی وارده بر اکسل در شرایط کاری مختلف برای اصلاح ساختار و بهینه‌سازی طراحی آن ضروری است. اکسل در عمل با انواع تحریک‌ها مانند رزونانس، خستگی و دیگر تنش‌هایی که

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hmasoudi@scu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.58832.0

در تخریب آن نقش دارند، روبه‌رو است. پس فرآیند طراحی اکسل علاوه بر تجزیه و تحلیل استاتیکی به تجزیه و تحلیل ارتعاشی و دینامیکی نیز نیاز دارد. روش‌های مختلفی مانند مبدل نیروی توپی چرخ[1]، مبدل فشار تایر[2] و حسگر نوری تعیین خوابیدگی تایر[3] (Blanksby *et al.*, 2009)، تعیین بار اکسل با حسگرهای پلیمری، پیزوالکتریکی، خازنی، فیبر نوری و کرنش‌سنجی (Foster, 2003; Sroka *et al.*, 2019) و استفاده از ترازوهای سیار[4] (Annonymous, 2019) برای اندازه‌گیری بار دینامیکی روی چرخ و اکسل وسایل نقلیه سنگین ارائه شده‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌هایی می‌باشند.

پژوهشگران در استرالیا سیستمی را برای برآورد بار دینامیکی چرخ وسایل نقلیه سنگین توسعه دادند. این سیستم شامل یک حسگر لیزری نصب شده بر روی توپی چرخ بود که تغییرشکل تایر و در نتیجه بار چرخ را اندازه‌گیری می‌نمود. منابع خطا در این نوع مبدل‌ها شامل خطای حسگر و مبدل، خطای هم مرکز نبودن و خطای ناهمواری سطح زمین می‌باشد (Germanchev *et al.*, 2008; Blanksby *et al.*, 2009). وان و همکاران (Van *et al.*, 2009) روشی ساده برای پایش بار دینامیکی اکسل یک تراکتور دو چرخ محرک در حال حرکت با استفاده از مبدل کرنش‌سنج دار ارائه دادند و تأثیرات شکل تایر و پروفیل زمین بر تغییرات بار اکسل را تحلیل کردند. آزمایش‌های انجام شده در فشارهای مختلف باد تایر بر روی جاده آسفالت و زمین لوم شنی نشان دادند که روش پیشنهادی قادر به پایش بار عمودی چرخ وسیله نقلیه در حال حرکت است و ابزاری را برای مطالعات بیشتر در مورد دینامیک وسیله نقلیه و تعامل دینامیکی چرخ و خاک فراهم می‌کند. طریقی و همکاران (Tarighi *et al.*, 2011) تجزیه و تحلیل استاتیکی و دینامیکی پوسته محور جلوی تراکتور میتسوبیشی مدل MT 250D را با استفاده از روش المان محدود انجام دادند. برای افزایش ضریب ایمنی طراحی، بیشترین مقدار بار دینامیکی، شش برابر بار استاتیکی کاربردی در نظر گرفته شد. از مقادیر تنش بیشینه و تنش مجاز، ضریب ایمنی به اندازه ۱/۰۵ به‌دست آمد که کمتر از مقدار مورد نیاز بود. بنابراین تغییراتی همچون طراحی یک بیل مکانیکی بسیار سبک وزن و کم ظرفیت، افزایش ضخامت جعبه بالایی محور و افزایش ضخامت هوزینگ در نقاط پر تنش پیشنهاد شد. حاجی احمد و همکاران (Hajiahmad *et al.*, 2014) یک سامانه دینامومتری برای اندازه‌گیری بارهای وارده بر چرخ‌های غیرمحرک فرمان‌پذیر ارائه دادند. از چهار لودسل S شکل برای به‌دست آوردن مؤلفه‌های گشتاور و نیروی عمودی وارد بر چرخ هادی، از یک شمارنده مادون قرمز برای تعیین سرعت دوران چرخ و از یک پتانسیومتر برای تعیین زاویه فرمان‌گیری چرخ استفاده شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که سامانه ساخته شده با ضرایب تبیین بالاتر از ۰/۹۹ قابلیت به‌کارگیری در مطالعات تعیین رفتار دینامیکی وسایل نقلیه چهار چرخ را دارد. سامانه توزین ارائه شده توسط شرکت Golstein قادر است که به‌طور مستقل بارهای دینامیکی اکسل وسایل نقلیه را به‌صورت تکی و وزن کل وسیله نقلیه را با دقت تقریباً ۱۰۰ درصد تعیین کند. بارهای اعمالی به کمک حسگرهای دقیق نصب شده روی اکسل‌های سمت چپ و راست تعیین می‌شوند و به‌صورت بی‌سیم تا فاصله ۱۵۰ متری به واحد نمایشگر ارسال می‌شوند. نصب این سامانه خیلی ساده بوده و اجازه می‌دهد وسایل نقلیه را تا آستانه بیشینه بار مجاز برای دستیابی به بالاترین سود بارگذاری نمود (Annonymous, 2018).

برخی از محققین به تجزیه و تحلیل نیروها و تنش‌های وارده بر اکسل کمباین پرداخته اند. جعفری و همکاران (Jafari *et al.*, 2006) اکسل جلوی کمباین جاندیر مدل ۹۵۵ را در بارگذاری استاتیکی با نرم‌افزار المان محدود آنسیس[5] تحلیل کردند تا استحکام مکانیکی آن را در بارگذاری‌های جدید بسنجند. نتیجه‌گیری شد که محور جلوی کمباین جاندیر ۹۵۵ به اندازه کافی مستحکم نیست و نیاز به بهینه‌سازی دارد. تغییراتی همچون افزایش ضخامت جعبه بالایی و جعبه پایینی، استفاده از پوسته‌های افقی به جای پوسته‌های عمود بر بدنه برای پشتیبانی از محور و کاهش نقاط جوش به‌منظور کاهش رهایی از تنش و هزینه پیشنهاد شد. خانعلی و همکاران (Khanali *et al.*, 2010) تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی محور جلوی کمباین جاندیر مدل ۹۵۵ را با نرم‌افزار المان محدود آنسیس انجام دادند. مشخص شد که طرح موجود محور جلوی این کمباین به اندازه کافی قوی نیست تا بر روی کمباینِ اصلاح شده سوار شود و نیاز به بهینه‌سازی دارد. اندازه‌گیری فشارها با نصب چند کرنش‌سنج بر روی اکسل انجام شد. نتایج محاسبه فشار با استفاده از روش عددی، هماهنگی خوبی با داده‌های تجربی داشت. بین کرنش‌های اندازه‌گیری شده در شرایط تجربی و کرنش‌های محاسبه شده در شرایط تئوری درصدی خطا مشاهده شد. درصد کم خطا به روشنی نشان داد که مقادیر کرنش‌های محاسبه شده با روش المان محدود در هماهنگی خوبی با داده‌های تجربی بودند. یائومینگ و همکاران (Yaoming *et al.*, 2013) سامانه‌ای الکترونیکی برای آزمون بار اکسل کمباین چرخ زنجیری با استفاده از حسگرهای کرنش‌سنجی و ماژول تعیین گشتاور ارائه نمودند. در ارزیابی‌های مزرعه‌ای سامانه ساخته شده نشان داد که داده‌های به‌دست آمده از آن قابل اعتماد است و توانست مقادیر گشتاور و سرعت چرخش اکسل کمباین را

1- Wheel hub force transducer
2- Tyre pressure transducer
3- Non-contact optical sensor
4- Portable scales
5- ANSYS 9.0

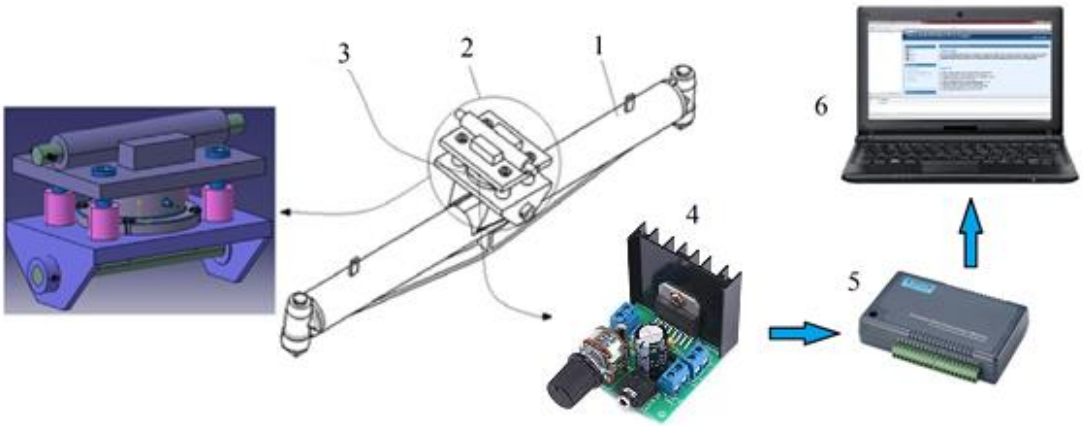
تعیین کرده و به‌صورت بی‌سیم برای کاربر ارسال نماید. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2018) آزمون و تحلیل بار اعمالی به اکسل چرخ زنجیر کمباین برداشت برنج را در شرایط کاری مختلف انجام دادند. مصرف توان اکسل‌های چپ و راست با ازدیاد بار کمباین افزایش یافت. با افزایش زاویه شیب، گشتاور اکسل‌های چپ و راست افزایش یافت. حین گردش، جهت گشتاور اکسل‌های چپ و راست مخالف یکدیگر بود. مقدار مطلق گشتاور بیرونی بزرگ‌تر از گشتاور داخلی بود.

اکسل عقب کمباین غالات به‌عنوان پشتیبانی برای چرخ‌های عقب، سیلندر هیدرولیک فرمان کمباین و بدنه کمباین در نظر گرفته شده است. اکسل کمباین را بدون فنربندی طراحی کرده‌اند تا تکان‌های ناشی از پیشروی کمباین در زمین‌های گوناگون به کمترین مقدار خود برسد. از آن‌جایی که آزمایش استاتیکی معمولاً در شرایط کارگاهی انجام می گیرد و تنها دارای داده هایی است که واکنش محور به بخشی از تنش‌ها و کرنش ها را نشان می دهد، لازم است برای داشتن یک تحلیل بهتر شرایط کاری واقعی در مزرعه نیز بررسی شود. زیرا در حرکت کمباین در مزرعه و هنگام دروی محصول، احتمالاً بار بیشتری به اکسل وارد می شود و تنش بحرانی و تخریب احتمالی در آن شرایط رخ می‌دهد. بنابراین لازم است که آزمون میدانی نیز صورت گیرد و بارهای دینامیکی وارده بر اکسل تعیین شوند تا تحلیل واقعی‌تری از تنش‌ها و کرنش‌های پدید آمده در اکسل به‌دست آید. این داده‌ها را می‌توان در نرم‌افزارهای طراحی مکانیکی وارد کرده و با انجام تحلیل گذرای خطی و هارمونیک و سپس دینامیکی، تنش‌های بحرانی را به‌دست آورده و طراحی اکسل را بهینه نمود.

این پژوهش به دنبال اعلام نیاز پژوهشی شرکت کمباین‌سازی ایران مبنی بر بهینه‌سازی و بازطراحی اکسل عقب کمباین جاندیر ۹۵۵ با هدف دست‌یابی به دانش فنی طراحی اکسل کمباین در داخل کشور انجام شد. از آن‌جایی‌که برای طراحی بهینه و اصلاح ساختار اکسل وسایل نقلیه دانستن مقدار بارهای وارده بر آن در شرایط کاری ضروری است، لذا ابتدا ساخت سامانه‌ای الکترونیکی که بتواند بارهای عمودی وارده به اکسل عقب کمباین جاندیر مدل ۹۵۵ را به‌طور مستقیم در دو حالت استاتیکی (در کارگاه) و دینامیکی (در جاده و مزرعه) تعیین نماید، مدنظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مطابق شکل ۱، اجزای اصلی سامانه ساخته شده برای اندازه‌گیری بار عمودی وارده به اکسل عقب کمباین شامل یک کوپلینگ ویژه، یک نیروسنج، یک برد تقویت‌کننده ولتاژ خروجی نیروسنج، یک داده‌بردار، یک باتری ۱۲ ولت و یک لپ‌تاپ بود. نیروسنج توسط کوپلینگ به میانه اکسل سوار شد. سیگنال های خروجی از نیروسنج از مدار تقویت‌کننده‌ای عبور کرده و به‌صورت ولتاژ به داده بردار (مدل AdvanTech DAQ navi ساخت کشور تایوان) منتقل شدند. برای نمایش و ذخیره‌سازی داده‌های دریافت شده از داده‌بردار، از یک رایانه استفاده شد.



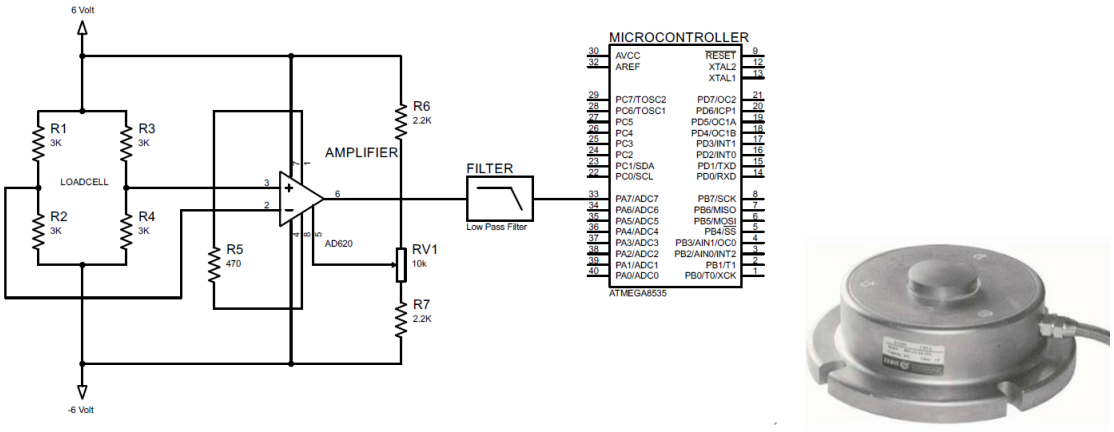
شکل ۱– سامانه اندازه‌گیری بار عمودی وارده به اکسل عقب کمباین (۱– اکسل، ۲– کوپلینگ، ۳– نیروسنج، ۴– ماژول تقویت‌کننده ولتاژ AD620، ۵– داده‌بردار و ۶– رایانه)

Fig. 1. Vertical load measuring system for the rear axle of combine harvester (1- Axle, 2- Coupling, 3- Loadcell, 4- AD620 voltage amplifier module, 5- Data logger and 6- Computer)

نیروسنج فشاری

با توجه به حداکثر بار روی دو چرخ عقب کمباین در حالت توقف

(برابر با ۱۶۱۰ کیلوگرم نیرو) که در کاتالوگ شرکت سازنده کمباین ذکر شده بود، نیروسنج ZEMIC مدل H2F-C2-10t ساخت کشور چین که از نوع دیسکی فشاری با ظرفیت ۱۰ تن، دقت کلاس C2 و حساسیت ۲ ± ۰/۰۱ mV/V FS است برای حس کردن بارهای عمودی وارده بر اکسل استفاده شد (شکل ۲-الف). از یک مدار تقویت‌کننده ولتاژ برای تقویت ولتاژ خروجی نیروسنج استفاده شد (شکل ۲-ب). با این مدار تقویت‌کننده، سیگنال‌های خروجی نیروسنج تا ۴۰۰۰ برابر تقویت شدند، به گونه‌ای که نیروسنج به بارهای کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم نیز حساس بود.



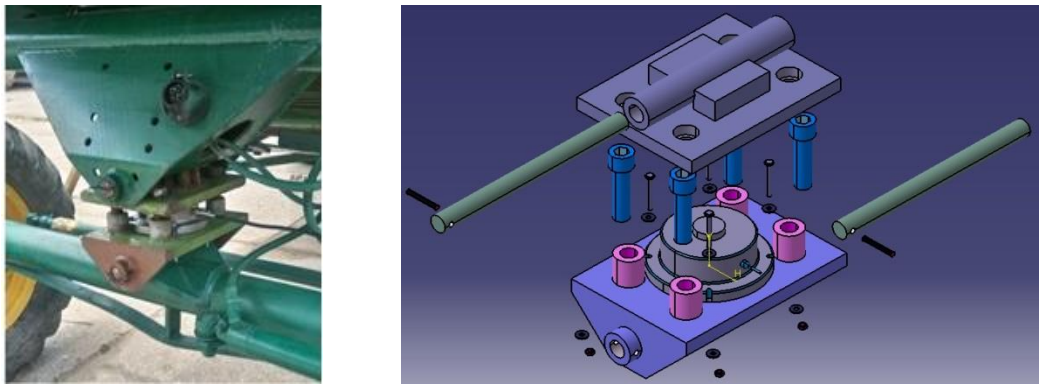
(ب) (الف)

شکل ۲- الف) نیروسنج دیسکی فشاری و ب) مدار تقویت‌کننده و فیلترکننده ولتاژ خروجی نیروسنج

Fig. 2. a) Disc type compression loadcell and b) Amplifier and filter circuit for the loadcell output voltage

مکانیزم انتقال بار به نیروسنج (کوپلینگ)

برای اتصال نیروسنج به میانه اکسل، کوپلینگی مناسب به کمک نرم‌افزار کتیا نسخه ۲۰۱۵ طراحی شد (شکل ۳-الف). جنس و ابعاد کوپلینگ به‌گونه‌ای انتخاب شد که بتواند بارهای وارده در حین نصب بر روی کمباین را تحمل کند. اجزای تشکیل‌دهنده کوپلینگ شامل صفحه پایینی، صفحه بالایی، بوش‌های صفحه پایینی، پیچ‌های رابط دو صفحه و پیچ های اتصال نیروسنج به کوپلینگ بودند. نیروسنج در میانه کوپلینگ و بین دو صفحه افقی آن قرار گرفته و با پیچ‌های ویژه بر صفحه پایینی نصب شد. سپس کوپلینگ بر قسمت میانی اکسل و بالای بخش مثلث‌وار آن نصب گردید (شکل ۳-ب)، به‌گونه‌ای که وزن بدنه کمباین از طریق کوپلینگ به نیروسنج و سپس به اکسل منتقل شد.



(ب) (الف)

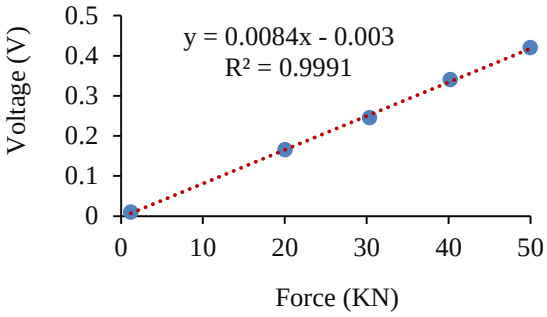
شکل ۳- الف) کوپلینگ طراحی شده در نرم‌افزار کتیا و ب) نحوه نصب کوپلینگ و نیروسنج بر بخش میانی اکسل

Fig. 3. a) Designed coupling in CATIA software and b) The coupling and loadcell installation method on the axle

کالیبراسیون نیروسنج

از دستگاه آزمون کشش- فشار استاندارد شرکت سنتام مدل STM-150 ساخت ایران برای کالیبره کردن نیروسنج استفاده شد (شکل ۴-الف). با قرار دادن نیروسنج در میان دستگاه، آزمون فشار در بارهای گوناگون انجام شد. برای داشتن دقت هرچه بیشتر در باردهی، سرعت اعمال بار ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد (Kargar Moghadam, 2017). مطابق شکل ۴-ب رابطه بین بار وارده و ولتاژ خروجی نیروسنج به‌صورت خطی بود و ضریب تبیین بالایی (R^2 = 0.9991) داشت که با داده‌های پژوهش‌های قبلی انطباق دارد (Fernando *et al.*, 2007).

a



b

شکل ٤- الف) نحوه باردهی به نیروسنج در دستگاه آزمون کشش- فشار و ب) نمودار کالیبراسیون نیروسنج

Fig. 4. a) Loading method of loadcell in a universal testing machine and b) Loadcell calibration curve

ارزیابی عملکرد سامانه

به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه ساخته شده، با نصب مجموعه کوپلینگ و نیروسنج بر بخش میانی اکسل (محل اتصال آن به بدنه کمباین)، اندازه‌گیری نیروی عمودی وارده به اکسل در حالت‌های استاتیکی (در کارگاه) و دینامیکی (میدانی) انجام شد (شکل ۵). داده‌بردار به‌گونه‌ای تنظیم شد که به‌طور خودکار در هر ثانیه، ۱۰ داده ذخیره شود. مقادیر خروجی نیروسنج با اعمال ضریب کالیبراسیون به نیرو تبدیل شدند.

(الف)

(ب)

شکل ۵- داده‌برداری در شرایط مختلف کار کمباین در الف) جاده و ب) مزرعه

Fig. 5. Data collection in the combine harvester different working conditions a) on the road and b) in the field

در آزمون استاتیکی کمباین ساکن بود و در وضعیت‌های موتور خاموش و موتور روشن، بارهای عمودی وارده بر اکسل توسط سامانه الکترونیکی ثبت گردید. در آزمون دینامیکی، کمباین در سه موقعیت و با سرعت‌های پیشروی نزدیک به شرایط کار واقعی شامل جاده آسفالت (۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلومتر بر ساعت)، جاده خاکی (۲، ۴ و ۶ کیلومتر بر ساعت) و زمین کشاورزی (۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت) و در پنج تکرار رانده شد و بارهای عمودی وارده به اکسل عقب توسط سامانه الکترونیکی ثبت گردید. در آزمون مزرعه‌ای، بارهای عمودی وارده بر اکسل حین حرکت کمباین در راستای شیارهای شخم (با سکوی برش پایین) و هنگام دور زدن‌های کمباین در انتهای مسیر

(با سکوی برش بالا) ذخیره شدند. همچنین داده‌برداری حین حرکت کمباین عمود بر شیارهای شخم (با سکوی برش بالا) با کمترین سرعت پیشروی کمباین در مزرعه (۲ کیلومتر بر ساعت) و به تعداد پنج تکرار انجام شد. داده‌های به‌دست آمده از آزمون‌های مختلف به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند و نمودارهای مورد نیاز در نرم‌افزار Excel ترسیم شدند. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون‌های کارگاهی

جدول ۱ بارهای عمودی وارده به اکسل عقب کمباین در حالت بارگذاری استاتیکی را نشان می دهد. مقادیر اعلام شده برای بار وارده به دو چرخ عقب در حالت سکوی برش پایین از سوی شرکت سازنده کمباین ۱۲/۶۵ کیلونیوتن و در حالت بدون سکوی برش ۱۵/۷۹ کیلونیوتن می‌باشد. هنگام اندازه‌گیری‌ها، سکوی برش به کمباین متصل شده و بر روی زمین قرار گرفته بود، لذا اندکی انتقال بار ایجاد شده است (کم‌تر بودن مقدار بار از حالت بدون سکوی برش گویای این مطلب است)، لیکن قرار گرفتن سکوی برش بر روی زمین، میزان انتقال بار را از حالتی که سکوی برش پایین ولی بر روی زمین نیست، کمتر نموده است.

جدول ۱- بارهای عمودی وارده به اکسل عقب کمباین در حالت بارگذاری استاتیکی (kN)

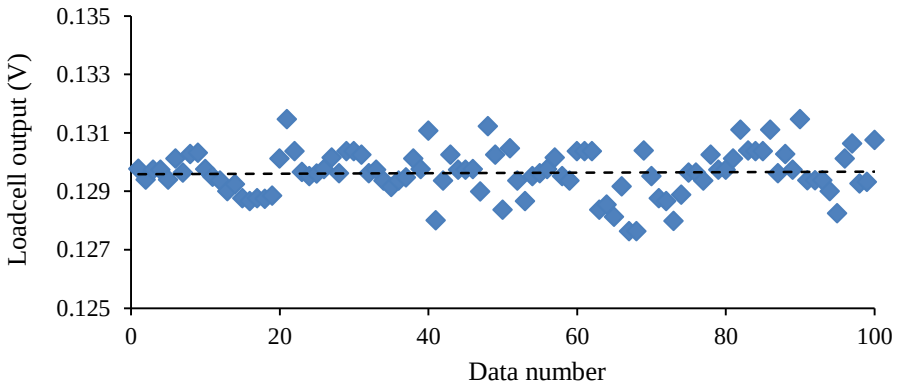
Table 1- Vertical loads applied to the rear axle of combine in static loading mode (kN)

	حالت موتور خاموش Turn off	حالت موتور روشن Turn on
کمینه بار (Minumum load)	14.74	14.75
میانگین بار (Average load)	14.905	14.908
بیشینه بار (Maximum load)	15.07	15.07
واریانس (Variance)	26.316	25.696

نتایج آزمون t استیودنت نمونه‌های جفت شده، برای مقایسه بار وارده به اکسل در دو حالت اندازه‌گیری بار استاتیکی نشان داد که بین مقادیر بارهای عمودی وارده در حالت موتور روشن و موتور خاموش تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد وجود ندارد. همچنین ضریب همبستگی پیرسون (r=0.999) گویای همبستگی مثبت و بسیار بالا بین مقادیر نتایج در دو حالت بود. در مجموع مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر اعلامی شرکت سازنده نزدیک بوده و می‌توان به صحت کارکرد سامانه الکترونیکی ساخته شده اعتماد نمود.

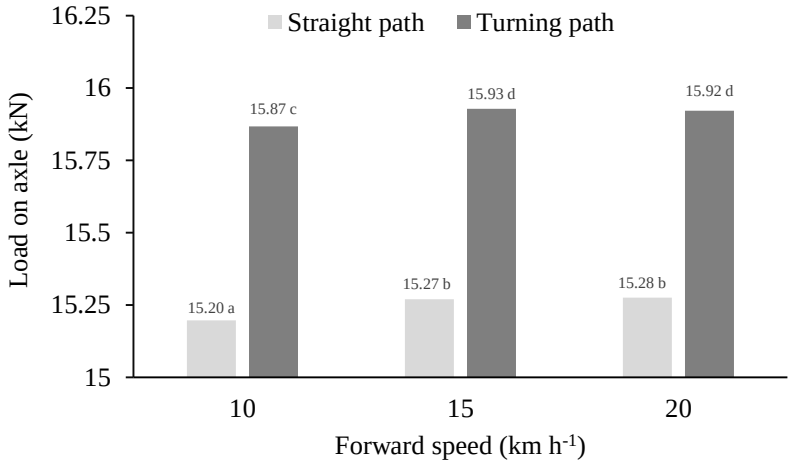
نتایج آزمون‌ها در جاده آسفالت

شکل ۶ نمونه‌ای از ولتاژ خروجی نیروسنج در حالت داده‌برداری دینامیکی حین حرکت مستقیم در جاده آسفالت است. خروجی نیروسنج تقریباً بین ۰/۱۲۷۶ تا ۰/۱۳۱۵ ولت (معادل ۱۵/۰۳۶ تا ۱۵/۴۹۶ کیلونیوتن) در نوسان بوده است. بخش اعظم این نوسانات ناشی از بارهای ارتعاشی وارده به اکسل حین حرکت در جاده و برخی ناشی از نوسانات ذاتی خروجی حسگر نیروسنج می‌باشد.



شکل ٦- نمونه‌ای از ولتاژ خروجی نیروسنج حین داده‌برداری در جاده آسفالت

Fig. 6. A sample of loadcell output voltage during data collection on asphalt road



شکل ۷- میانگین بارهای عمودی وارده بر اکسل عقب کمباین در جاده آسفالت

Fig. 7. Average vertical loads on the rear axle of combine in the asphalt road

میانگین مقادیر به‌دست آمده برای نیروهای عمودی وارده به اکسل در جاده آسفالت مطابق شکل ۷ می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی کمباین، میانگین بار وارده به اکسل عقب افزایش یافته است. که دلیل آن می‌تواند ناشی از افزایش ارتعاشات وارده به اکسل در اثر افزایش سرعت پیشروی باشد. از طرفی دیگر در وسایل نقلیه نیروی مقاومت هوا[1] در برابر حرکت رابطه مستقیمی با توان دوم سرعت پیشروی دارد (Kharazan, 2011)، لذا با افزایش سرعت پیشروی، نیروی مقاومت هوا به شدت افزایش می‌یابد. با توجه به موقعیت مرکز ثقل کمباین (که در فاصله بین چرخ‌های جلو و عقب و پایین‌تر از کابین راننده قرار دارد)، افزایش نیروی مقاومت هوا باعث افزایش نیروی عمودی اعمالی به اکسل عقب می‌شود، لذا زیاد شدن بار اعمالی به اکسل عقب با افزایش سرعت پیشروی کمباین قابل‌توجیه است. همچنین میانگین بار اعمالی به اکسل عقب هنگام دور زدن بیشتر از بار اعمالی در مسیر مستقیم بوده است. بالا آوردن سکوی برش در حین دور زدن باعث جابه‌جایی مرکز ثقل سکوی برش به‌طرف بالا و عقب‌تر می‌شود، در نتیجه انتقال بار از محور عقب کمباین به محور جلو نسبت به حالت پایین بودن سکوی برش در داخل مزرعه کمتر می‌شود، که این پدیده نتایج به‌دست آمده را توجیه می‌کند.

نتایج تجزیه واریانس دو عاملی با پنج تکرار در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر سرعت پیشروی و نوع مسیر حرکت بر مقدار بار عمودی وارده به اکسل عقب کمباین در سطح یک درصد معنی‌دار است، لیکن اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نیست. لذا شرایط بحرانی اعمال بار بر اکسل عقب کمباین، حین دور زدن با سرعت پیشروی بالا می‌باشد و طراحی اکسل بر اساس این شرایط باید صورت گیرد. مقایسه میانگین مقادیر نیروهای اعمالی به اکسل (که در شکل ۷ آمده است) نشان داد که در هر دو مسیر مستقیم و چرخش بین بارهای عمودی اعمالی به اکسل در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت با مقادیر بارهای عمودی در سرعت‌های ۱۵ و ۲۰ کیلومتر بر ساعت اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد.

نتایج آزمون‌ها در جاده خاکی

میانگین مقادیر به‌دست آمده برای نیروهای عمودی وارده به اکسل در جاده خاکی مطابق شکل ۸ می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی کمباین، میانگین بار عمودی وارده به اکسل افزایش یافته است که می‌تواند به‌دلیل افزایش ارتعاشات اعمالی به اکسل و نیروی مقاومت هوا باشد که در بالا تشریح شد. در این آزمایش بیشینه بار وارده بر اکسل حدود ۵۰ کیلونیوتن به‌دست آمد. دلیل این افزایش ناگهانی بار، به خاطر حرکت کمباین در یک سربالایی با شیب زیاد بوده که در انتهای مسیر وجود داشت. زیرا در آن شرایط، ناگهان انتقال وزن بسیاری از جلوی کمباین به عقب آن رخ داده و بار عمودی روی اکسل در یک لحظه زیاد شد. این مقدار، بیشترین بار ثبت شده در کل زمان داده‌برداری‌ها بود و حتی حین برداشت محصول هم چنین باری به‌دست نیامد. زیرا در مزرعه تنها مقدار کمی پستی و بلندی و ناهمواری در سطح زمین وجود داشت، اما فاقد سربالایی و یا سراشیبی بود.

نتایج تجزیه واریانس تک عاملی با پنج تکرار در جدول ۳ نشان می‌دهد که اثر سرعت پیشروی بر مقدار بار عمودی وارده به اکسل عقب کمباین در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است، لذا شرایط بحرانی اعمال بار بر اکسل عقب کمباین در جاده خاکی، هنگام

1- Drag force

حرکت با سرعت پیشروی بالا می‌باشد و طراحی اکسل بر اساس این شرایط باید صورت گیرد. مقایسه میانگین مقادیر نیروهای اعمالی به اکسل (که در شکل ۸ آمده است) نشان داد که بین بارهای اعمالی به اکسل در سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت با مقادیر بارها در سرعت ۶ کیلومتر بر ساعت اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد.

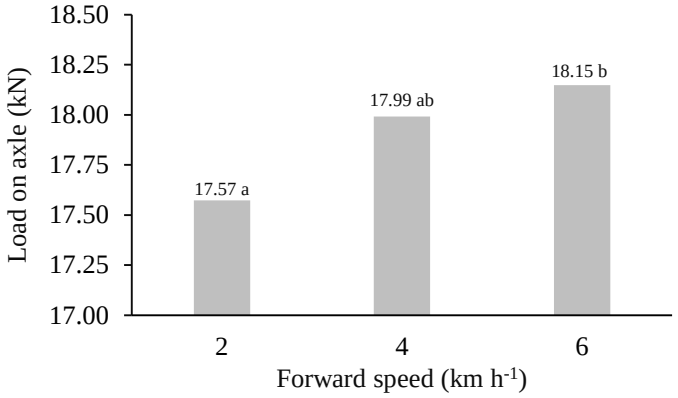
جدول ۲- تجزیه واریانس (دو عاملی با تکرار) برای بار عمودی وارده به اکسل در جاده آسفالت

Table 2- Anova (Two-Factor with Replication) for vertical loads on axle in asphalt road

منابع تغییرات (Source of variation)	SS	df	MS	F	Sig.
نوع مسیر (Path type)	3.251	1	3.251	7349.508	0.000 **
سرعت پیشروی (Forward speed)	0.030	2	0.015	33.720	0.000 **
سرعت × مسیر (Interaction)	0.001	2	0.000	0.879	0.428 ns
خطا (Within)	0.011	24	0.000		
کل (Total)	3.292	29			

** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد و ns غیر معنی‌دار

** Significant difference at 1% level, * Significant difference at 5% level and ns Non-significant



شکل ۸- میانگین بارهای عمودی وارده بر اکسل عقب کمباین در جاده خاکی

Fig. 8. Average vertical loads on the rear axle of combine in the dirt road

جدول ۳- تجزیه واریانس (تک عاملی با تکرار) برای بار عمودی وارده به اکسل در جاده خاکی

Table 3- Anova (Single Factor with Replication) for vertical loads on axle in dirt road

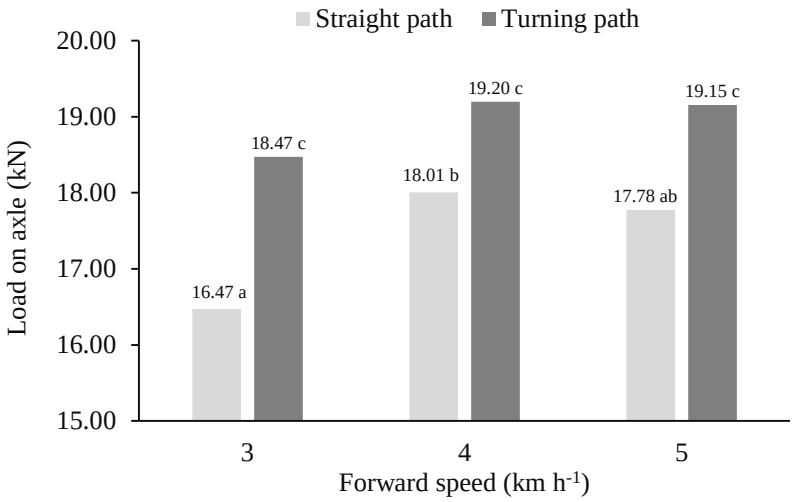
منابع تغییرات (Source of variation)	SS	df	MS	F	Sig.
سرعت پیشروی (Forward speed)	0.883	2	0.442	8.978	0.004 **
خطا (Within)	0.590	12	0.049		
کل (Total)	1.474	14			

** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد و ns غیر معنی‌دار

** Significant difference at 1% level, * Significant difference at 5% level and ns Non-significant

نتایج آزمون‌ها در مزرعه

میانگین مقادیر به‌دست آمده برای نیروهای عمودی وارده به اکسل حین دروی گندم در مزرعه مطابق شکل ۹ می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی کمباین، میانگین بار عمودی وارده به اکسل افزایش یافته است که می‌تواند به‌دلیل افزایش ارتعاشات اعمالی به اکسل ناشی از ناهمواری‌های درون مزرعه و نیز افزایش نیروی مقاومت هوا باشد. همچنین میانگین بار اعمالی موقع دور زدن بیشتر از بار اعمالی در مسیر مستقیم بوده است که بیانگر انتقال بار کمتر از اکسل عقب به اکسل جلو هنگام دور زدن به دلیل بالا آمدن سکوی برش است.



شکل ۹- میانگین بارهای عمودی وارده بر اکسل عقب کمباین به هنگام دروی گندم در مزرعه

Fig. 9. Average vertical loads on the rear axle of combine during wheat harvesting in the field

نتایج تجزیه واریانس دو عاملی (شامل نوع مسیر در دو سطحِ مسیر مستقیم و دور زدن و سرعت پیشروی در سه سطحِ ۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت) با پنج تکرار در جدول ۴ نشان می‌دهد که اثر سرعت پیشروی و نوع مسیر حرکت بر مقدار بار عمودی وارده به اکسل عقب کمباین در سطح یک درصد معنی‌دار، لیکن اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود. لذا شرایط بحرانی اعمال بار بر اکسل عقب کمباین، موقع دور زدن با سرعت پیشروی بالا می‌باشد و طراحی اکسل بر اساس این شرایط باید صورت گیرد. مقایسه میانگین مقادیر نیروهای اعمالی به اکسل (که در شکل ۹ آمده است) نشان داد که در مسیر مستقیم بین بارهای اعمالی به اکسل در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت با مقادیر بارها در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد. هنگام دور زدن اختلاف معنی‌داری بین بارهای اعمالی به اکسل وجود ندارد که به‌نظر می‌رسد به‌دلیل تفاوت اندک در سرعت‌های پیشروی انتخابی و مسطح‌تر بودن دوربرگردان نسبت به داخل مزرعه باشد.

جدول ٤- تجزیه واریانس (دو عاملی با تکرار) برای بار عمودی وارده به اکسل در مزرعه

Table 4- Anova (Two-Factor with Replication) for vertical loads on axle in the field

منابع تغییرات (Source of variation)	SS	df	MS	F	Sig.
نوع مسیر (Path type)	17.379	1	17.379	42.952	0.000 **
سرعت پیشروی (Forward speed)	7.615	2	3.807	9.410	0.001 **
سرعت × مسیر (Interaction)	0.901	2	0.450	1.113	0.345 ns
خطا (Within)	9.711	24	0.405		
کل (Total)	35.605	29			

** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد و ns غیر معنی‌دار

** Significant difference at 1% level, * Significant difference at 5% level and ns Non-significant

در این آزمون بیشینه بار عمودی وارده بر اکسل در مسیر مستقیم ۲۱/۴۳ کیلونیوتن (در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت) و هنگام دور زدن ۲۷/۸۶ کیلونیوتن (در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت) و هنگام حرکت عمود بر شیارهای کشت ۲۷/۰۷ کیلونیوتن (در سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت) به‌دست آمد. بر خلاف تصور اولیه که گمان می‌رفت بدترین شرایط باردهی به اکسل عقب کمباین به هنگام دروی محصول باشد، بیشینه بارهای وارده بر اکسل به هنگام دور زدن در انتهای زمین بیش از حالت حرکت عمودی بر شیار کشت در مزرعه بود و این حالت نیز به نوبه خود بیش از حالت دروی محصول توسط کمباین بود. اگرچه مقادیر این دو حالت اخیر بسیار به یکدیگر نزدیک بود. دلیل

این موضوع می‌تواند این باشد که کمباین برای دروی محصول، هم‌راستا با خط شیار شخم و بر روی خط ردیف‌های کشت حرکت می‌کند که ناهمواری‌های زمین در آن شرایط، تقریباً یکنواخت هستند. در حالی که در حرکت عمود بر شیار شخم، ناهمواری‌ها بیشترند. به هنگام دور زدن در انتهای زمین نیز دو عامل موجب اعمال بار بیشتر به اکسل عقب می‌شوند؛ یکی گردش کمباین که باعث اندکی انحراف در زاویه اکسل عقب نسبت به بدنه می‌شود و دیگری بالارفتن سکوی برش که باعث کاهش انتقال وزن از اکسل عقب به اکسل جلو کمباین می‌شود.

مقایسه بارهای بحرانی اعمالی به اکسل در جاده آسفالت (حین دور زدن با سرعت ۲۰ کیلومتر در ساعت)، جاده خاکی (حرکت مستقیم با سرعت ۶ کیلومتر در ساعت) و مزرعه (حین دور زدن با سرعت ۵ کیلومتر در ساعت) انجام شد. تجزیه و تحلیل واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان داد که مقدار بار بحرانی در سه محیط از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال یک درصد دارند. مزرعه بحرانی‌ترین محیط از لحاظ اعمال بار عمودی به اکسل عقب کمباین به دلیل داشتن ناهمواری‌های بیشتر است.

نتیجه‌گیری

سامانه ساخته شده به‌خوبی توانست در شرایط مختلف کاری کمباین، بارهای عمودی استاتیکی و دینامیکی وارده بر میانه اکسل عقب کمباین را اندازه‌گیری و ثبت نماید، لذا برای اهداف طراحی و بهینه‌سازی اکسل‌های عقب کمباین‌ها مناسب است. بیشتر بارهای عمودی وارده بر میانه اکسل عقب کمباین جاندیر ۹۵۵ در بازه ۱۰ تا ۲۰ کیلونیوتن بودند. تنها بار عمودی بیشینه‌ای که به‌طور غیرعادی بر اکسل وارد شد به هنگام بالا رفتن از یک سربالایی و حدود ۵۰ کیلونیوتن بود. از آنجا که کمباین جاندیر ۹۵۵ یک کمباین جلگه است، اکسل عقب کنونی آن حین کار در زمین‌های مسطح نسبتاً ایمن می‌باشد، لیکن هنگام دور زدن با سرعت بالا در مزرعه و به‌ویژه سربالایی‌های تند، تنش زیادی را متحمل می‌شود که ممکن است موجب آسیب دیدن آن گردد، لذا به‌نظر می‌رسد توصیه برای بهینه‌سازی طراحی اکسل با افزایش ضخامت تکه مثلثی شکل در میانه اکسل و یا استفاده از آلیاژی مقاوم‌تر از لحاظ استحکام نهایی برای نواحی میانی اکسل به‌ویژه تکه مثلثی شکل لازم باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب اعتبار ویژه پژوهشی به شماره پیگیری ۹۴/۳/۰۲/۳۱۵۷۹ قدردانی می‌نمایند.

References

1. Annonymous. 2018. Axle load weighing system. Golstein Weighing Systems, The Netherlands. Available at: http://www.aslast.nl. Accessed 30 October 2020.
2. Annonymous. 2019. Portable Truck Weighing Scales. Galoce Company, Shaanxi, China. Available at: https://www.galoce.com. Accessed 30 October 2020.
3. Blanksby, Ch., R. George, B. Peters, A. Ritzinger, and L. Bruzsa. 2009. Measuring dynamic wheel loads on tri and quad axle groups. Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles. Wiley Online Library, Editor(s): Bernard Jacob and Eugene O'Brien. pp. 223-236.
4. Fernando, E., G. Harrison, and S. Hilbrich. 2007. Truck instrumentation for dynamic load measurement. Report 0-4863-1, Project 0-4863. Texas Transportation Institute, the Texas A&M University System, College Station, Texas, USA.
5. Foster, J. D. G. 2003. Measurement of central or offset axle load by axle-mounted strain gauges. Strain 39: 21-26.
6. Germanchev, A., Ch. Blanksby, A. Ritzinger, S. Patrick, B. Peters, L. Bruzsa, and J. Perovic. 2008. Measuring the dynamic wheel loads of heavy vehicles. 23rd ARRB Conference- Research Partnering with Practitioners. Adelaide, Australia.
7. Hajiahmad, A., A. Jafari, A. Keyhani, H. Goli, and B. Nodust. 2014. Development of a mechanism for measuring forces and aligning moment acting on the steering wheels of a four-wheel vehicle. Journal of Agricultural Machinery 4 (2): 141-153. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v4i2.20641.
8. Jafari, A., M. Khanali, H. Mobli, and A. Rajabipour. 2006. Stress analysis of front axle of JD 955 combine harvester under static loading. Journal of Agriculture & Social Sciences 2 (3): 133-135.
9. Kargar Moghadam, V. 2017. Tozin education set. Part Sanat Company, Tehran, Iran. Available at: http://www.partsanat.co. (In Persian).
10. Khanali, M., A. Jafari, H. Mobli, and A. Rajabipour. 2010. Analysis and design optimization of a frontal combine harvester axle using finite element and experimental methods. Journal of Food, Agriculture and Environment 8 (2): 359-364.
11. Kharazan, M. 2011. Motion Theory of Vehicle. Nema Publications. Mashhad, Iran. (In Persian).
12. Sroka, R., P. Burnos, and J. Gajda. 2019. Vehicle's axle load sensors in weigh-in-motion systems. PP 49-67 in S.

Y. Yurish eds. Physical and Chemical Sensors: Design, Applications & Networks (Book Series: Advances in Sensors: Reviews, Vol. 7). International Frequency Sensor Association (IFSA) Publishing, Barcelona.
13. Tarighi, J., S. S. Mohtasebi, and R. Alimardani. 2011. Static and dynamic analysis of front axle housing of tractor using finite element methods. Australian Journal of Agricultural Engineering (AJAE) 2 (2): 45-49.
14. Van, N. N., T. Matsuo, T. Koumoto, and Sh. Inaba. 2009. Transducers for measuring dynamic axle load of farm tractor. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Saga University 94: 23-35.
15. Wang, H., Z. Tang, X. Liu, B. Zhang, Z. Fu, and Y. Li. 2018. Test and analysis of half axle load of crawler chassis of rice combine harvester. International Agricultural Engineering Journal 27 (4): 255-262.
16. Yaoming, L., Y. Xiaofei, X. Lizhang, P. Jing, and M. Zheng. 2013. Construction and performance experiment of load test system for half axle of combine harvester. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) 29 (6): 35-41. (In Chinese with English abstract).

نحوه نگارش مقالات فارسی در نشریه علمی ماشین‌های کشاورزی

متن کامل مقاله نوشته شده در نرم‌افزار MS-Word و کاملاً مطابق با فرمت درخواستی زیر، از طریق سایت نشریه به آدرس http://jame.um.ac.ir ارسال گردد.

صفحه مشخصات مقاله علاوه بر وارد کردن اسامی و مشخصات تمام نویسندگان در سایت نشریه، یک صفحه به‌صورت فایل word که شامل: اسامی نویسندگان، مرتبه علمی و وابستگی سازمانی آن‌ها به دو زبان فارسی و انگلیسی و ایمیل و شناسه ارکید نویسنده مسئول باشد نیز به‌صورت جداگانه در زمان ارسال مقاله در سایت بارگذاری شود.

تذکر: در عنوان فایل اصل مقاله و داخل متن آن به هیچ عنوان نام نویسندگان مقاله درج نشود.

بخش‌های مقاله: هر مقاله باید به‌ترتیب دارای عنوان، چکیده، واژه‌های کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، سپاسگزاری و لیست علائم (در صورت نیاز) به زبان فارسی باشد و رفرنس‌ها فقط به‌صورت لاتین درج شوند.

همچنین عنوان، **چکیده مبسوط** و کلمات کلیدی به زبان لاتین نیز در انتهای مقاله قید شود.

- عنوان مقاله کوتاه، روان و گویای کامل موضوع تحقیق باشد و از ۱۵ کلمه تجاوز نکند.
- 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.برای واژه‌های کلیدی از کلمات به‌کار رفته در عنوان مقاله، استفاده نشود.
- مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری کلی و فهرست منابع کاملاً تفکیک‌شده 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.

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).
- تمامی اسامی علمی به‌صورت ایتالیک درج شوند.

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 شماره‌گذاری در متن شکل فقط با اعداد لاتین، 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 به صورت دوزبانه و اعداد داخل جداول فقط 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 زیرنویس 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.

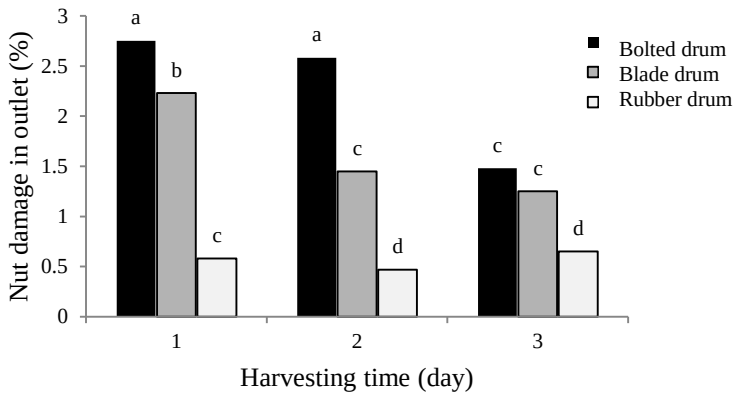
جدول ۱– نهاده‌های مصرف شده در سال اول مزرعه زعفران

Table 1- Consumption of inputs during the first year of saffron cultivation

نوع نهاده **Type of inputs**	میزان مصرف **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 ترجیحاً 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.
- **تمامی ارجاعات داخل متن باید به رفرنس مربوطه لینک شوند.**

- مثال برای ارجاع به منبعی که فقط یک نویسنده دارد:(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)

- زمان ارجاع به رفرنس در ابتدا یا وسط جمله مشابه مثال زیر استفاده شود:
- لغوی و همکاران (Loghavi *et al.*, 2010)
- کلیه منابع فارسی و انگلیسی به زبان انگلیسی و با قلم Times New Roman اندازه ۱۲در فهرست منابع نوشته شوند.
- همواره در نوشتن نام نشریات و منابع اسم، کامل آن‌ها آورده شود و از اسامی کوتاه شده آن‌ها استفاده نشود.
- از ذکر منابع بی‌نام و غیر قابل دسترس خودداری شود.

درج شناسه DOI (درصورت وجود) در انتهای هر رفرنس الزامی است.

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 DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.04.013

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 Persian) 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 Persian).

مؤکداً توصیه می‌شود برای تهیه لیست منابع و ارجاع به منابع در داخل متن از پایگاه‌های اطلاعاتی مربوط و همراه با نرم‌افزار EndNote استفاده شود تا از ایجاد خطای نگارشی به‌خصوص برای اسامی اشخاص و اسامی خاص جلوگیری شود. این امر برای صحت استنادات ضروری است. فایل راهنمای درج منابع، در سایت نشریه قرار دارد.

دستورالعمل نگارش **چکیده مبسوط انگلیسی** (Extended Abstract):

چکیده انگلیسی مقاله باید به‌صورت مبسوط (حداقل ۶۰۰ کلمه) و دارای تمام بخش‌های زیر به شکل تفکیک شده باشد.

1. Title
2. Introduction
3. Materials and Methods
4. Results and Discussion
5. Conclusion
6. Acknowledgement
7. Keywords

سایر موارد

۱- مقالات توسط هیأت تحریریه و با همکاری متخصصان، داوری شده و درصورت تصویب بر طبق ضوابط خاص نشریه به نوبت چاپ خواهد شد.

۲- نشریه در رد یا قبول مقالات آزاد است.

۳- مقالات باید در مرحله بازنگری، به دقت و کاملاً بدون اشتباه ارسال شود. بدیهی است هرگونه تغییر پس از آن قابل قبول نخواهد بود.

۴- نشریه ماشین‌های کشاورزی برای بررسی اولیه مقالات هیچ وجهی از نویسندگان دریافت نمی‌کند، اما درصورت پذیرش، هزینه چاپ مقاله برای مقالات فارسی **۱۵۰ هزار تومان** می‌باشد. در صورتی‌که مقاله دارای حداقل یک نویسنده با وابستگی سازمانی غیرایرانی باشد، هیچ وجهی برای چاپ مقاله دریافت نخواهد شد.

Contents

Research Articles

Identification of *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) Using Image Processing and Artificial Neural Networks 107
Z. Azizpour, H. Vahedi, A. N. Lorestani

Exergy Analysis of the Steam Generation System to Explore the Potential for Optimizing Energy Consumption 119
I. Golpour, P. Ahmadi Moghaddam, A. M. Nikbakht

Developing the Computational Simulator to Control the Ventilation Condition of Poultry House and Optimize the Production 131
H. Farzanpour, S. S. Seiiedlou, H. Nalbandi

Investigation of the Co-digestion of Chicken Manure with Chicken Intestine and Its Contents and Rumen Contents 147
A. Mirzaee, M. Soleymani, H. Bahrami, M. Norouzi Masir

Spectral Feature Selection from the Hyperspectral Dataset to Identify Pistachio Leaves Infected by Psylla 159
A. Moghimi, A. Sazgarnia, M. H. Aghkhani

Development and Optimization a Threshing Unit for Sunflower Grain with Response Surface Methodology (RSM) 169
E. Chavoshgholi, Sh. Abdollahpour, H. Ghasemzadeh

Design, Construction and Evaluation of a Measuring Device for Rice Picker Combine Losses Based on Piezoelectric Sensor at Lab Scale 181
M. Hasannia Samakoush, S. R Mousavi Seyedi, A. Mahdavian

Potential Assessment of Energy Providing for Bagasse-Based Chipboard Industry Using Sugarcane Waste (A case study: Debal Khozaie Agro-Industry) 193
E. Alboativi, A. Asakereh, H. Zaki Dizaji, Y. Mansoori

Energy and Exergy Analysis of Sour Cherry Evaporation Line 207
N. Sedaghat Herfeh, A. M. Nikbakht, H. Mobli, A. R. Keyhani, A. Piri

Effect of Different Tillage Systems and Deficit Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Sugar Beet 219
A. Heidari, A. Ghadami Firouzabadi

Microscopic Investigation of Cold Plasma Effect on Chickpea Seed Germination 231
M. Fereydooni, H. Haji Agha Alizadeh

Development of an Electronic System for Determining Vertical Loads on the Rear Axle of Cereal Combine Harvesters in Motion 241
A. Rezaei, H. Masoudi, H. Zaki Dizaji, M. E. Khorasani Ferdavani

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 12 No. 2 2022

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:

Abbaspour-Fard, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Aboonajmi, M.	Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
Aghkhani, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Alimardani, R.	Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Emadi, B	Adjunct Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
Ghazanfari Moghaddam, A.	Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
Kadkhodayan, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Khoshtaghaza, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
Loghavi, M.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
Modarres Razavi, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Nasirahmadi, A.	Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
Pourreza, A	Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States of America
Raji, A	Professor, Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
Saiedirad, M. H.	Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institue, Mashhad, Iran
Sayasoonthorn, S	Assistant Professor, Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: 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. 12 No. 2

2022

Journal of Agricultural Machinery

Iranian Society of Mechanical Engineers (ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

Identification of *Idiocerus stali* (Hem.: Cicadellidae) Using Image Processing and Artificial Neural Networks 107
Z. Azizpour, H. Vahedi, A. N. Lorestani

Exergy Analysis of the Steam Generation System to Explore the Potential for Optimizing Energy Consumption 119
I. Golpour, P. Ahmadi Moghaddam, A. M. Nikbakht

Developing the Computational Simulator to Control the Ventilation Condition of Poultr y House and Optimize the Production 131
H. Farzanpour, S. S. Seiiedlou, H. Nalbandi

Investigation of the Co-digestion of Chicken Manure with Chicken Intestine and Its Contents and Rumen Contents 147
A. Mirzaee, M. Soleymani, H. Bahrami, M. Norouzi Masir

Spectral Feature Selection from the Hyperspectral Dataset to Identify Pistachio Leaves Infected by Psylla 159
A. Moghimi, A. Sazgarnia, M. H. Aghkhani

Development and Optimization a Threshing Unit for Sunflower Grain with Response Surface Methodology (RSM) 169
E. Chavoshgholi, Sh. Abdollahpour, H. Ghasemzadeh

Design, Construction and Evaluation of a Measuring Device for Rice Picker Combine Losses Based on Piezoelectric Sensor at Lab Scale 181
M. Hasannia Samakoush, S. R Mousavi Seyedi, A. Mahdavian

Potential Assessment of Energy Providing for Bagasse-Based Chipboard Industry Using Sugarcane Waste (A case study: Debal Khozaie Agro-Industry) 193
E. Alboativi, A. Asakereh, H. Zaki Dizaji, Y. Mansoori

Energy and Exergy Analysis of Sour Cherry Evaporation Line 207
N. Sedaghat Herfeh, A. M. Nikbakht, H. Mobli, A. R. Keyhani, A. Piri

Effect of Different Tillage Systems and Deficit Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Sugar Beet 219
A. Heidari, A. Ghadami Firouzabadi

Microscopic Investigation of Cold Plasma Effect on Chickpea Seed Germination 231
M. Fereydooni, H. Haji Agha Alizadeh

Development of an Electronic System for Determining Vertical Loads on the Rear Axle of Cereal Combine Harvesters in Motion 241
A. Rezaei, H. Masoudi, H. Zaki Dizaji, M. E. Khorasani Ferdavani