



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۲

جلد ۱۵

سال ۱۴۰۴

(شماره پیاپی: ۳۶)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

۱۴۷..... بررسی، بهینه سازی مصرف انرژی و مدل سازی عملکرد دو رقم شلتوک با الگوریتم ژنتیک- کلونی زنبور عسل مصنوعی
سینا شریفی، نگار حافظی، محمد حسین آق خانی

۱۶۷..... ساخت و ارزیابی عملکرد یک جریان سنج مبتنی بر پالس حرارتی برای اندازه گیری دبی شیر گیاهی
در بافت های آوندی
مجید تیمورزاده، جلال برادران مطیع، عباس روحانی، یحیی سلاح ورزی

۱۸۱..... پایش سلامت دام با مدل سازی رفتار نشخوار بر اساس اطلاعات مبتنی بر شتاب سنج
الناز واحدی تکمه داش، حسین نوید، حمیدرضا قاسم زاده، هادی کریمی، مهسا جوانی هلان

۱۹۵..... طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش مکانی عمق زیر شکن در مزارع نیشکر
نعیم لویمی، آذرخش عزیزی، علی کعب، عادل نیسی

۲۱۳..... ارزیابی سطح توسعه سامانه های تولید قارچ خوراکی در ایران در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰
مرتضی زنگنه، احسان گودینی

۲۳۱..... بررسی ویژگی های عملکرد و آلاینده گی موتور حین آزمون سوخت های ترکیبی دیزل- بیودیزل حاصل از روغن های
گیاهی و مدل سازی آنها
سیدرضا موسوی سیدی، محمد عسکری، سید محمد رضا میری

۲۴۹..... مقایسه بهینه سازی مصرف انرژی و ارزیابی اثرات زیست محیطی در کارخانه تولید شکر با استفاده از
الگوریتم های فرا ابتکاری
میشم برون، محمد قهدریجانی، عبدعلی ناصری، بابک بهشتی

۲۶۵..... پیش بینی عمق شیار ایجاد شده توسط چرخ بر روی خاک با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی
تشمیل فرهادی، عارف مردانی، عادل حسین پور، بهزاد گلغبری

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."

تابستان ۱۴۰۴

جلد ۱۵ شماره ۲

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

سرمدیر: محمدحسین عباسپور فرد

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین	گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
ابونجمی، محمد	گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، ایران
پوررضا، علیرضا	گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی، دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا
خوش تقاضا، محمدهادی	گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
راجی، عبدالغنی	گروه مهندسی کشاورزی و محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه ایبادان، نیجریه
روحانی، عباس	گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سعیدی راد، محمدحسین	مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مشهد، ایران
سوپاکیت، سایاسونترن	دانشکده کشاورزی، دانشگاه کاستسارت، تایلند
عباسپور فرد، محمدحسین	گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
علیمردانی، رضا	گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس کرج، ایران
عمادی، باقر	گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک، دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا
غضنفری مقدم، احمد	گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
کدخدایان، مهران	گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
لغوی، محمد	گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز، ایران
محتسبی، سید سعید	گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مدرس رضوی، محمدرضا	گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
نصیراحمدی، ابودر	گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه کاسل، آلمان
ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد	

مقالات این نشریه در پایگاه های معتبر زیر نمایه می شود:

DOAJ, CABI, Web of Science: Emerging Sources Citation Index™ (ESCI), Scopus, AGRIS, Internet Archive, Google scholar, EBSCO, پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC), سامانه نشریات علمی ایران و پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

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

این نشریه به تعداد ۴ شماره در سال و به صورت آنلاین منتشر می شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۱۴۷ بررسی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدل‌سازی عملکرد دو رقم شلتوک با الگوریتم ژنتیک-کلونی زنبور عسل مصنوعی
سینا شریفی، نگار حافظی، محمد حسین آق‌خانی
- ۱۴۷ ساخت و ارزیابی عملکرد یک جریان‌سنج مبتنی بر پالس حرارتی برای اندازه‌گیری دبی شیر گیاهی در بافت‌های آوندی
مجید تیمورزاده، جلال برادران مطیع، عباس روحانی، یحیی سلاح‌ورزی
- ۱۸۱ پایش سلامت دام با مدل‌سازی رفتار نشخوار بر اساس اطلاعات مبتنی بر شتاب‌سنج
الناز واحدی‌تکمه‌داش، حسین نوید، حمیدرضا قاسم‌زاده، هادی کریمی، مهسا جوانی‌هلان
- ۱۹۵ طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش مکانی عمق زیرشکن در مزارع نیشکر
نعیم لویمی، آذرخش عزیزی، علی کعب، عادل نیسی
- ۲۱۳ ارزیابی سطح توسعه سامانه‌های تولید قارچ خوراکی در ایران در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰
مرتضی زنگنه، احسان گودینی
- ۲۳۱ بررسی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور حین آزمون سوخت‌های ترکیبی دیزل-بیودیزل حاصل از روغن‌های گیاهی و مدل‌سازی آن‌ها
سیدرضا موسوی سیدی، محمد عسکری، سید محمدرضا میری
- ۲۴۹ مقایسه بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در کارخانه تولید شکر با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری
میثم برون، محمد قهدریجانی، عبدعلی ناصری، بابک بهشتی
- ۲۶۵ پیش‌بینی عمق شیار ایجادشده توسط چرخ بر روی خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی
نشمیل فرهادی، عارف مردانی، عادل حسین پور، بهزاد گل‌عنبری

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 145-164

Investigation, Optimization of Energy Consumption and Yield Modeling of Two Paddy Cultivars with Genetic-Artificial Bee Colony Algorithm

S. Sharifi¹, N. Hafezi², M. H. Aghkhani^{1*}

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: aghkhani@um.ac.ir)

Received: 07 June 2022

Revised: 01 October 2022

Accepted: 29 October 2022

Available Online: 02 December 2024

How to cite this article:Sharifi, S., Hafezi, N., & Aghkhani, M. H. (2025). Investigation, Optimization of Energy Consumption and Yield Modeling of Two Paddy Cultivars with Genetic-Artificial Bee Colony Algorithm. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 145-164. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.77064.1108>

Introduction

Efficient use of energy in paddy production can lower greenhouse gas emissions, safeguard agricultural ecosystems, and promote the growth of sustainable agriculture. Meanwhile, intelligent agriculture has come to the aid of farmers and policy-makers by harnessing cutting-edge technologies, which will lead to sustainable welfare and the comfort of human society in the present and the future. Therefore, this study aimed to analyze energy consumption and production, as well as model and optimize the yield of two paddy cultivars using Artificial Bee Colony (ABC) and Genetic Algorithms (GA).

Materials and Methods

Extensive research data was collected by thoroughly examining documentary and library resources, as well as conducting face-to-face questionnaires with 120 paddy farmers and farm owners in Rezvanshahr city, located in the province of Guilan, Iran, during the 2019-2020 production year. The farms consisted of 80 high-grading and 40 high-yielding paddies. The independent variables were machinery, diesel and gasoline fuels, electricity, seed, compost and straw, biocides, fertilizers, and labor. The dependent variable was paddy yield per hectare [of the farm area]. In the first step, energy consumption and production were calculated by multiplying the variables by their corresponding coefficients. In the second step, all the variables that maximize paddy yield were entered into MATLAB software. An artificial bee colony (ABC) algorithm with a novel and straightforward elitism structure was utilized to enhance the fitness function of the genetic algorithm (GA). The Sphere, Repmat, and Unifrnd functions were employed to determine the objective function, define the position of the bee colony, and quantify the position of the bee colony, respectively. In each generation, 900 new solutions were created, and the algorithm iterated 200 times. For the genetic algorithm, the population was defined as a double vector with a size of 100.

Results and Discussion

The findings revealed that the Hashemi (high-grading) paddy cultivar had an average energy consumption and production of 55.973 and 30.742 GJ·ha⁻¹, respectively. The Jamshidi (high-yielding) paddy cultivar had an average energy consumption of 54.796 GJ·ha⁻¹ and double the energy production of the Hashemi at 62.522 GJ·ha⁻¹. In both cultivars, agricultural machinery consumed the highest amount of energy, while straw consumed the lowest amount. The average energy consumption of tractors in the Hashemi and Jamshidi cultivars was 25.111 and 25.865 GJ·ha⁻¹, respectively, accounting for 44.862% and 47.202% of the total average consumed energy. This undoubtedly demonstrates the significant effect of this input and reflects the operators' skill and experiential knowledge. The evaluation indexes, including R², RMSE, MAPE, and EF, as well as statistical



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.77064.1108>

comparisons such as mean, STD, and distribution, consistently demonstrated that the ABC algorithm provided the essential conditions for the fitness function. The results of the bee-genetic algorithm optimization revealed that the majority of the consumed resources could be effectively managed on the farm to closely match optimal conditions. Through this optimization, energy consumption in the Hashemi and Jamshidi cultivars was reduced by 53.96% and 39.41%, respectively.

Conclusion

Given its impressive performance and potential for minimizing energy consumption, the ABC-GA algorithm offers an opportunity for policymakers in energy resource management and rice industry managers to develop innovative strategies for significantly reducing energy usage in rice production. This approach could lead to more sustainable and efficient practices in the agricultural sector.

Keywords: Artificial Bee Colony Algorithm, Genetic Algorithm, Optimization, Paddy

بررسی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدل‌سازی عملکرد دو رقم شلتوک با الگوریتم ژنتیک-کلونی زنبور عسل مصنوعی

سینا شریفی^{۱*}، نگار حافظی^۲، محمد حسین آق‌خانی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

چکیده

استفاده کارآمد از انرژی در تولید شلتوک برنج، با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، از تخریب بوم‌نظام‌های کشاورزی جلوگیری نموده و سبب توسعه کشاورزی پایدار می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی، مقایسه، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدل‌سازی عملکرد محصول در تولید دو رقم شلتوک با الگوریتم ژنتیک-کلونی زنبور عسل مصنوعی بود. داده‌ها از طریق مصاحبه با ۱۲۰ کشاورز و صاحب مزرعه جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که در رقم مرغوب هاشمی و رقم پرمحصول جمشیدی میانگین کل انرژی مصرفی به ترتیب ۵۵/۹۷۳ و ۵۴/۷۹۶ گیگاژول بر هکتار بود و میانگین کل انرژی تولیدی به ترتیب ۳۰/۷۴ و ۶۲/۵۲ گیگاژول بر هکتار به دست آمد که نشان از افزایش ۲/۰۳ برابری انرژی تولیدی در رقم جمشیدی نسبت به رقم هاشمی داشت. ارزیابی شاخص‌های EF ، $MAPE$ ، $RMSE$ ، R^2 و مقایسه آماری میانگین، واریانس و توزیع آماری در مدل تلفیقی الگوریتم ژنتیک-کلونی زنبور عسل مصنوعی بیانگر نتایج مطلوب الگوریتم زنبور عسل مصنوعی به عنوان تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک بود. همچنین، نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی توسط الگوریتم ترکیبی ژنتیک-کلونی زنبور عسل مصنوعی نشان داد که بیشتر منابع مصرفی از حالت بهینه فاصله دارند که با مدیریت صحیح امکان صرفه‌جویی مصرف انرژی در رقم‌های هاشمی و جمشیدی به ترتیب ۵۳/۹۶ و ۳۹/۴۱ درصد وجود دارد. ارقام پرمحصول با هدف تأمین امنیت غذایی، آبی و انرژی اصلاح شده‌اند. نتایج پژوهش حاضر، می‌تواند در شناسایی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در صنعت برنج کشور کمک به‌سزایی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، بهینه‌سازی، شلتوک

مقدمه

بهینه‌سازی مصرف انرژی راهکاری است که علاوه بر امکان افزایش تولید محصولات کشاورزی، با بهبود شرایط اقتصاد کشاورزان و دسترسی به کشاورزی پایدار در جوامع روستایی می‌تواند در شناخت منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی اثربخش باشد؛ علاوه بر این، بهینه‌سازی به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند برای مدیریت منابع زیست‌محیطی، بهبود کارایی

انرژی، زمان و هزینه انجام کار در بخش‌های مختلف کشاورزی به کار گرفته شده است (Cubero et al., 2014; Gracia, Diezma-Iglesias, Barreiro, Gardini, & Aditya, 2013; Hosseinzadeh-Bandbafha, Safarzadeh, Ahmadi, & Nabavi-Pelesaraei, 2018; Mousavi-Avval, Rafiee, & Mohammadi, 2011).

به طور کلی در بهینه‌سازی از دو نوع الگوریتم قطعی و احتمالی استفاده می‌شود. در الگوریتم‌های احتمالی که با الهام از رفتار موجودات در طبیعت بهره گرفته شده، از روش‌هایی با تکرارهای تصادفی استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک^۴ (GA) و کلونی زنبور عسل مصنوعی^۵ (ABC) از روش‌های مهم بهینه‌سازی احتمالی هستند. الگوریتم ژنتیک با روش استقرایی جامع در انتخاب الگوریتم یادگیری مدل از پاسخ‌های مشابه دوری نموده و در حداقل‌های محلی

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*) نویسنده مسئول:

(Email: aghkhani@um.ac.ir)

 <https://doi.org/10.22067/jam.2022.77064.1108>

4- Genetic Algorithm

5- Artificial Bee Colony algorithm

که به لحاظ کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در اوج تقاضای برق به میزان ۱۷/۵ درصد نسبت به الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ (PSO) و تکامل تفاضلی^۴ (DE) کارایی بهتری دارد (Loganthurai, Rajasekaran, & Gnanambal, 2016). در پژوهشی دیگر، از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی جهت پیش‌بینی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۰۴۰ با توجه به متغیرهای نرخ رشد جمعیت، تولید ناخالص داخلی، تجارت و مصرف نفت، گاز طبیعی، زغال سنگ و مجموع تقاضای انرژی، استفاده شده است (Behrang, Assareh, Assari, & Ghanbarzadeh, 2011). استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی جهت بهبود کارایی پیش‌بینی انتشار دی‌اکسیدکربن با استفاده از اطلاعات سرانه تولید ناخالص داخلی، حجم سرمایه‌گذاری، مجموع استفاده از وسایل نقلیه و انرژی مصرفی نیز عملکرد مطلوبی را نشان داده است (Shabri, Samsudin, & Hezzam, 2021). همچنین، عملکرد مطلوب الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی در طبقه‌بندی شلتوک برنج (Wan, Chang, Peng, & Chen, 2017)، آموزش شبکه عصبی-فازی^۵ (ANFIS) با هدف بررسی کیفیت مزارع برنج توسط ربات پرند (Camci, Kripalani, Ma, Kayacan, & Khanesar, 2018)، آشکارسازی خطوط کشت گیاه برنج توسط الگوریتم خوشه‌بندی کلونی زنبور عسل مصنوعی (Zeng, Wu, Hu, Tang, & Liu, 2019) و بهینه‌سازی سیستم ترکیبی خورشیدی-بادی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سالانه (Geleta & Manshahia, 2021) اثبات شده است.

یکی از مهم‌ترین مراحل در اجرای بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک، به‌کارگیری تابع برازندگی (Fitness) کارا و دقیق در مرحله برازندگی است. در واقع، بدون این مرحله نمی‌توان ادعا کرد که بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک در بهترین وضعیت ممکن اجرا می‌شود. در مطالعه حاضر از نخیه‌گرایی (Elitism) با ساختاری ساده و بدیع الگوریتم زنبور عسل مصنوعی استفاده شد و با بررسی تحقیقات پیشین مشخص شد که تاکنون از مدل ترکیبی ژنتیک-زنبور عسل مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی مدل‌سازی عملکرد شلتوک و برنج استفاده نشده است و همین امر جنبه تمایز و نوآوری مطالعه حاضر را فراهم می‌نماید. هدف از این مطالعه بررسی، مقایسه، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدل‌سازی مقدار عملکرد تولیدی شلتوک در رقم‌های مرغوب هاشمی و پرمحصول جمشیدی با استفاده از مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک-زنبور عسل مصنوعی در شهرستان رضوانشهر می‌باشد.

متوقف نمی‌شود (Imani, Hosseinpour, Keyhani, & Azimzadeh, 2020). از سوی دیگر، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی از روش‌های بسیار کارآمدی است که با ماهیت تصادفی خود می‌تواند به راحتی راه‌حل مساله را استخراج کند و با پارامترهایی کنترل‌پذیر، توانایی زیادی در اکتشاف فضای جستجو و انعطاف‌پذیری بالایی در مسائل مختلف دارد. سهولت ترکیب الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی با روش‌های دیگر مانند الگوریتم ژنتیک به دلیل همگرایی سریع از مزایای الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی می‌باشد (Le Dinh, Vo Ngoc, & Vasant, 2013; Shukla, 2020).

بررسی و بهینه‌سازی جریان انرژی در تولید شلتوک در استان گیلان با استفاده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها^۱ (DEA) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۲ (MOGA) نشان داد که بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک چندهدفه، امکان صرفه‌جویی ۷۱/۶۳ درصدی (معادل ۳۶/۹۴۸ گیگاژول بر هکتار) را در مجموع انرژی مصرفی به دنبال داشت. همچنین بررسی اثرات زیست‌محیطی نشان از انتشار ۱/۱۱۶ تن دی‌اکسید کربن معادل در مزارع مورد بررسی داشت، به‌طوری که بیشترین میزان آلاینده‌گی در تولید شلتوک مربوط به سموم و کودهای شیمیایی بود (Nabavi-Pelesaraei, Rafiee, Mohtasebi, Hosseinzadeh-Bandbafha, & Chau, 2017). در تحقیقی دیگر، نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک چندهدفه در کارخانجات شالیکوبی برنج با اهداف بهینه‌سازی انرژی خروجی، حداقل‌سازی اثرات زیست‌محیطی و حداکثرسازی سود خالص نشان داد که امکان کاهش ۲۴ درصدی مصرف انرژی، ۹ درصدی اثرات زیست‌محیطی و افزایش ۴۱ درصدی سود خالص وجود دارد (Nabavi-Pelesaraei, Rafiee, Mohtasebi, Hosseinzadeh-Bandbafha, & Chau, 2019). کارایی مطلوب الگوریتم ژنتیک در تحقیقات مختلف مانند برنامه‌ریزی فازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت دستیابی به مدل تصمیم‌گیری بهینه منابع مغذی لازم برای بهینه‌سازی عملکرد برنج (Sharma & Jana, 2009)، بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن شلتوک با مادون قرمز در خشک‌کن بستر سیال (Pour-Bagher, Rohani, Rahmati, & Abbaspour-Fard, 2018)، بهینه‌سازی ترکیبات مختلف کود شیمیایی برای بهبود اقتصادی عملکرد برنج (Anissa, Mahmudy, & Widodo, 2019) و استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور افزایش دقت انتخاب ویژگی گیاه برنج در فناوری هوش لمسی (Chen, Mao, Ma, & Qi, 2020) نشان داده شده است.

در بهینه‌سازی و کاهش اوج تقاضای برق در کارخانه شالیکوبی برنج، استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی نشان داده است

3- Particle Swarm Optimization
4- Differential Evolution
5- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

1- Data Envelopment Analysis
2- Multi Objective Genetic Algorithm

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد پژوهش

مطالعه پیمایشی حاضر در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ (از دی ماه تا مرداد ماه) در شهرستان رضوانشهر در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی انجام شد. این شهرستان دارای میانگین بارندگی سالیانه ۱۱۹۷ میلی‌متر، میانگین رطوبت نسبی هوا ۸۵/۵ درصد، میانگین حداکثر دما ۲۰/۱۹ درجه سلسیوس و میانگین دما ۱۵/۷۴ درجه سلسیوس می‌باشد (Riahi & Javan, 2016). در استان گیلان، کشت رقم هاشمی به دلیل مرغوبیت بالا توسط شالبیکاران رواج بیشتری دارد. در سال‌های اخیر، رقم پرمحصول جمشیدی نیز در سطح شهرستان رضوانشهر کشت می‌شود. هر دو رقم جزء رقم‌های دانه‌بلند می‌باشند و دارای خصوصیات ابعادی مشابه یکدیگر هستند. نمونه آماری، از میان ۲۲۰ صاحب مزرعه و کشاورز شهرستان رضوانشهر که به کشت دو رقم هاشمی و جمشیدی می‌پرداختند، انتخاب شدند. بر اساس روابط (Cochran, 1977) (۱) و (Sarai, 1993) (۲)، ۴۰ کشاورز و صاحب شالیزار ۰/۲ تا ۱/۸ هکتاری به ترتیب برای رقم هاشمی و رقم جمشیدی برای مصاحبه حضوری و تکمیل پرسشنامه تعیین شدند (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017; Taheri-Rad, Khojastehpour, Rohani, & Khoramdel, 2017). در مرحله پیش‌آزمون بر اساس اطلاعات اسنادی و کتابخانه‌ای، ۲۰ صاحب مزرعه و کشاورز شهرستان رضوانشهر برای بررسی متغیرهای ورودی و جمع‌آوری اطلاعات، دعوت به مصاحبه شدند.

$$n = \frac{\frac{Z^2 \cdot p \cdot q}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\frac{Z^2 \cdot p \cdot q}{d^2} - 1 \right)} \quad (1)$$

$$n' = \frac{n}{1 + \frac{n}{N}} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، n حجم نمونه، N جامعه آماری تحقیق، p و $q=0.5$ به ترتیب احتمال بهینه بودن و نبودن متغیرها، $Z^2=3.84$ سطح اطمینان ۹۵ درصد و $d=0.05$ حداکثر دقت نمونه‌گیری بود. به دلیل محدودیت زمانی از تصحیح یتس^۱ (رابطه ۲) برای کاهش حجم نمونه آماری استفاده شد (Sarai, 1997).

در رابطه (۲)، n' تعداد نمونه‌های تصحیح‌شده بود.

نهادها و انرژی مصرفی

جدول ۱، ضرایب و واحدهای مربوط به نهادها و ستانده در مزارع تولید شلتوک را نشان داده است. اطلاعات عملیاتی مربوط به یک هکتار سطح زیر کشت شلتوک در مزارع منطقه که شامل عملیات آماده‌سازی زمین و خاک‌ورزی

اولیه (نیروی کار، استفاده از پادلر، تراکتور و سوخت آنان، برق و کمپوست)، عملیات خزانه‌گیری (نیروی کار، آب، بذر، سم شیمیایی و انرژی برق)، عملیات خاک‌ورزی ثانویه و کاشت (نیروی کار، استفاده از روتواتور، نشاء‌کار، تراکتور و سوخت آنان، کود و سم شیمیایی)، عملیات داشت (نیروی کار، کود و سم شیمیایی) و عملیات برداشت (نیروی کار، استفاده از خرمکوب، تراکتور و سوخت آنان) بوده است به تفکیک میزان استفاده در هر مرحله جمع‌آوری شد. محاسبات مصرف انرژی در عملیات خاک‌ورزی ثانویه، کاشت و داشت به دلیل همپوشانی فاصله زمانی، در یک مرحله مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس جدول ۱، میزان انرژی با ضرب‌نمودن مقدار مصرف نهاده‌ها و شلتوک تولیدی در ضرایب متناظر انرژی به‌دست آمد (Taheri-Rad et al., 2017). انرژی استفاده از ماشین‌های کشاورزی نیز بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2018).

$$ME = \frac{G \times M_p \times t}{T} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، ME انرژی کاربرد ماشین‌های کشاورزی (مگاژول در هکتار)، G جرم ماشین‌ها (کیلوگرم)، t مدت زمان کاربرد ماشین‌ها (ساعت در هکتار)، M_p انرژی مواد اولیه و T عمر مفید ماشین‌ها (ساعت) می‌باشد.

الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

استراتژی عملکرد زنبورها به این صورت است که یک سری زنبورهای پیشرو یا پیش‌آهنگ^۲ وظیفه پیدا کردن منابع غذایی را بر حسب مرغوبیت منابع غذایی (مقدار بیشینه متغیر پاسخ) از منطقه غذایی مورد نظر دارند و این منابع را به سایر زنبورها به زبان خود و به شکل حرکات مخصوص در قالب الگوریتم زنبور عسل (شکل ۱) منتقل می‌کنند. در مطالعه کنونی، موقعیت منطقه غذایی انتخاب شده توسط زنبورهای پیشرو و پیرو^۳ طبق رابطه (۴) در نظر گرفته شد (Yarpiz, 2021).

$$X_{goal} \sim U(X_0 - r, X_0 + r) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، X_0 و X_{goal} به ترتیب مختصات منطقه غذایی انتخاب شده توسط زنبورهای پیرو و پیشرو، U بیان‌گر توزیع یکنواخت در شعاع همسایگی r می‌باشد. مقدار U برابر با ۰/۱ تفاوت کران بالا و پایین متغیرها، در نظر گرفته شد. برای افزایش همگرایی شعاع همسایگی r ، طول گام‌ها، مرحله به مرحله در پایان هر تکرار با مقدار ۰/۹۹ میرا^۴ شدند. همچنین فرض شد، میانگین بی‌نهایت تعداد دفعات مسیره‌های طی شده توسط زنبورهای پیرو، مختصات X_0 را بازتولید کنند (رابطه ۵). تابع هدف الگوریتم بر اساس رابطه (۶) بود.

2- Scout Bee

3- Recruited Bee

4- Damp

1- Yates

جدول ۱- ضرایب انرژی ورودی‌ها و خروجی در تولید شلتوک

Table 1- Energy coefficients of inputs and output of the paddy production

نهادها Inputs	Unit	Energy-eq (Ref.)	نهادها و ستانده Inputs & Output	Unit	Energy-eq (Ref.)
الف) نهادها A) Inputs			سولفات روی Zinc sulphate	MJ.kg ⁻¹	20.9(1)
نیروی کار Labor			سوخت‌ها و برق Fuels & Electricity		
مرد Man	MJ.h ⁻¹	1.96(1)	دیزل Diesel	MJ.L ⁻¹	47.8(6)
زن Woman	MJ.h ⁻¹	1.57(1)	بنزین Gasoline	MJ.L ⁻¹	46.3(6)
ماشین‌های کشاورزی Agricultural Machinery			برق Electricity	MJ.kWh ⁻¹	10.7(3)
تراکتور Tractor	MJ.h ⁻¹	10.944(1)	مواد آلی Organic matter		
پادلر Puddler	MJ.h ⁻¹	2.508(1)	بذر برنج Rice seed	MJ.kg ⁻¹	14.70(2)
روتیواتور Rotivator	MJ.h ⁻¹	10.283(1)	کمپوست Compost	MJ.kg ⁻¹	5.08(7)
نشاء کار Transplanter	MJ.h ⁻¹	9.405(1)	کاه و کلش برنج Rice straw	MJ.kg ⁻¹	6.5(3)
دروگر Reaper	MJ.h ⁻¹	5.518(1)	سموم شیمیایی Biocides		
خرمنکوب Thresher	MJ.h ⁻¹	7.524(1)	علف‌کش Herbicide	MJ.kg ⁻¹	85(5)
کودهای شیمیایی Fertilizers			آفت‌کش Pesticide	MJ.kg ⁻¹	229(5)
نیتروژن Nitrogen	MJ.kg ⁻¹	58.7(4)	قارچ‌کش Fungicide	MJ.kg ⁻¹	115(5)
فسفات Phosphate	MJ.kg ⁻¹	17.1(4)	ب) ستانده B) Output		
پتاس Potash	MJ.kg ⁻¹	8.83(4)	شلتوک Paddy	MJ.kg ⁻¹	14.70(2)

1- Nassiri and Singh, 2009, 2- Ozkan, Akcaoz, and Fert, 2004, 3- Gummert *et al.*, 2020, 4- Van-hung *et al.*, 2019, 5- Yodkhum, Sampattagul, and Gheewala, 2018, 6- Kitani, Jungbluth, Peart, and Ramdani, 1999, 7- Salehi, Ebrahimi, Maleki, and Mobtaker, 2014

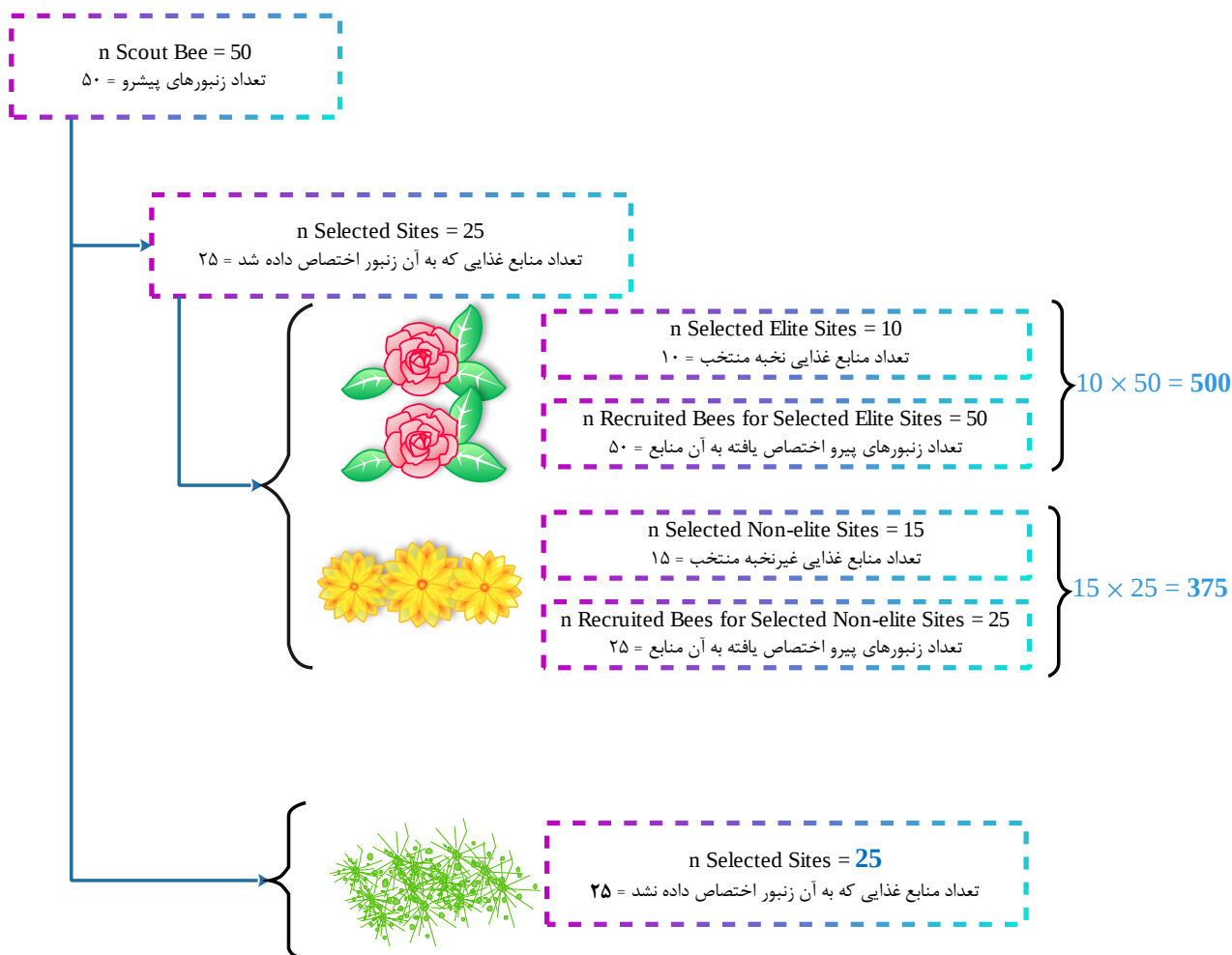
در نظر گرفته شد و متغیرهای مستقل شامل بذر، دیزل، بنزین، ماشین‌های کشاورزی، برق، نیروی کار، کمپوست، کاه و کلش، کودهای شیمیایی ازت، پتاس، فسفات و سولفات روی، سموم شیمیایی قارچ‌کش، آفت‌کش و علف‌کش و متغیر وابسته شامل عملکرد محصول برای ۱۲۰ مزرعه در نظر گرفته شد. بدین منظور، برای ایجاد نسل آغازین و تعریف موقعیت آغازین آرایه زنبورهای پیشرو از تابع repmat به ابعاد [n Scout Bee × 1] استفاده شد. نحوه اختصاص پاسخ‌های هر نسل در شکل ۱ آمده است. تعداد پاسخ‌های جدید ایجادشده در هر نسل برابر با ۹۰۰ عضو بود و تعداد تکرار الگوریتم زنبور عسل مصنوعی ۲۰۰ در نظر گرفته شد (شکل ۲).

$$E\{x_{goal}\} = x_0 \quad (5)$$

$$z = sph = f_{sph}(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (6)$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

نتیجه‌ی اعمال تابع Sphere به بردار x ، برابر با مجموع مربعات مؤلفه‌های $x_1, x_2, \dots, x_n$ بود و خروجی تابع، حد پایین تابع (x) Sphere بود. تعداد متغیرهای مجهول $nVar=20$ بود. در این مساله، عملکرد محصول تولیدی (تن بر هکتار) به‌عنوان خروجی مدل بهینه



شکل ۱- تخصیص پاسخ هر نسل

Fig.1. Response assignment of each generation

به خود گیرد (Karaboga & Akay, 2009).

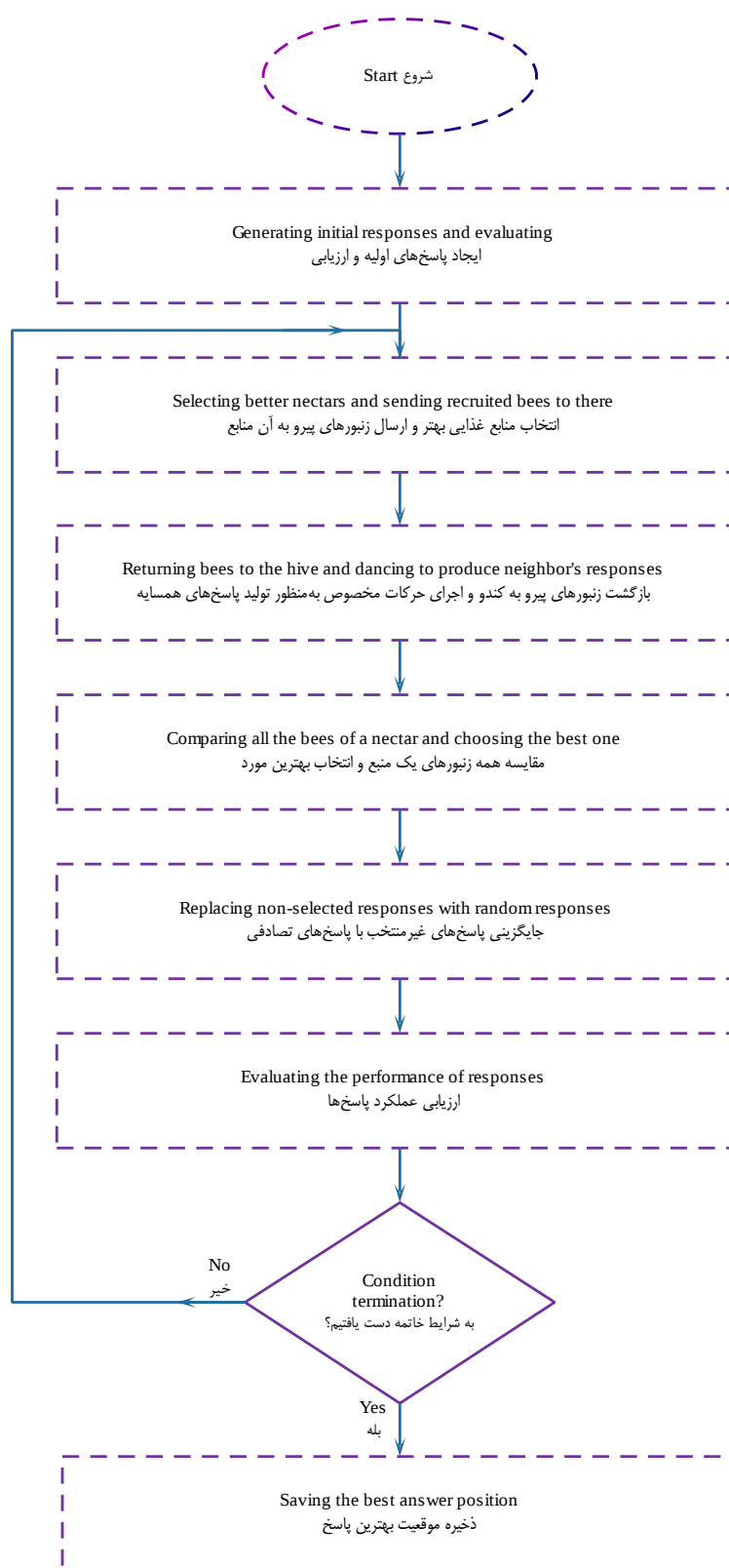
به مجموعه کروموزوم‌ها (به‌ازای مقادیر مختلف مصرف نهاده‌ها) جمعیت گفته می‌شود. ارزیابی مناسب بودن یک کروموزوم با معیاری که از تابع برازندگی به‌دست می‌آید، سنجش می‌شود و برای این‌که شانس بقای کروموزوم بیشتر باشد، احتمال بقای آن متناسب با مقدار برازندگی در نظر گرفته می‌شود. فعالیت عملگر انتخاب^۱، به گونه‌ای است که پاسخ‌های دارای برازندگی بهتر توسط تابع انتخاب با احتمال بیشتری انتخاب شوند. همین‌طور، به کمک عملگر تلفیق^۲، از دو پاسخ انتخاب‌شده، یک پاسخ تولید می‌شود و عملگر جهش^۳ یک متغیر از پاسخ را به‌صورت تصادفی انتخاب کرده و توسط تابع جهش برای حفظ تنوع جمعیت و تعمیم فضای جستجو، اطلاعات پاسخ را تغییر می‌دهد (Yang, 2013).

برای تعریف قیده‌های مسئله، تعداد مناطق غذایی که به آنان زنبور اختصاص داده شد (n Selected Sites) کمتر از تعداد مناطق نخبه منتخب (n Selected Elite Sites) بود. همچنین تعداد زنبورهای پیرو اختصاص‌یافته به یک منطقه غذایی نخبه‌ای انتخاب‌شده (n Selected Elite Site Bees) بیش‌تر از تعداد زنبورهای پیرو تخصیص یافته به منطقه غذایی انتخاب‌شده (n Selected Site Bees) قرار داده شد.

الگوریتم ژنتیک

پس از آن‌که مسئله بهینه‌سازی عملکرد شلتوک با الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی تشکیل شد، از آن به‌عنوان تابع برازندگی در الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی متغیرهای ورودی استفاده شد. هدف از بهینه‌سازی پیدا کردن بیشینه تابع هدف Z بود. در این حالت پیدا کردن مقادیری برای متغیر (ژن)های x_1 تا x_{19} مد نظر بود تا تابع Z به‌ازای آن‌ها بیشترین مقدار (پاسخ = کروموزوم) عملکرد محصول را

- 1- Selection
- 2- Crossover
- 3- Mutation



شکل ۲- الگوریتم زنبور عسل مصنوعی
Fig.2. Artificial Bee Colony algorithm

استنباط می‌شود که $p\text{-value} > 0.05$ باشد.

نتایج و بحث

میانگین انرژی ورودی و خروجی در تولید دو رقم شلتوک مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. میانگین انرژی ورودی و خروجی در رقم هاشمی به ترتیب ۵۵/۹۷۳ و ۳۰/۷۴۲ گیگاژول بر هکتار به دست آمد. این مقادیر برای رقم جمشیدی به ترتیب ۵۴/۷۹۶ و ۶۲/۵۲۲ گیگاژول بر هکتار بود. بیشترین سهم میزان مصرف انرژی در نهاده ماشین‌های کشاورزی حاصل شد. این میزان در رقم هاشمی ۵۳/۸۸ درصد و جمشیدی ۵۴/۹ درصد به دست آمد. کمترین میزان مصرف انرژی متعلق به نهاده کاه و کلش بود. در رقم جمشیدی انرژی مصرفی انواع کودها نسبت به رقم هاشمی کمتر بود؛ این در حالی است که در بررسی محققان فقط انرژی مصرفی کود شیمیایی فسفات در رقم مرغوب نسبت به رقم پرمحصول بیشتر بوده است (Taheri-Rad et al., 2017). علت تفاوت در مصرف کود شیمیایی فسفات دو رقم در این مطالعه نسبت به تحقیق ایشان را می‌توان گرایش کشاورزان و صاحبان مزرعه به استفاده هرچه بیشتر از نهاده‌های شیمیایی با توجه به ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک و مورفولوژیکی رقم‌های مختلف عنوان نمود. اگرچه، میزان انرژی مصرفی انواع سموم شیمیایی به جز قارچ کش در رقم مرغوب بیشتر گزارش شده است (Taheri-Rad et al., 2017). بیشترین بخش مصرف انرژی پس از انرژی ماشین‌های کشاورزی، مربوط به انرژی مصرفی سوخت دیزل بود، که در رقم هاشمی سوخت بیشتری مصرف شد. در مطالعات مشابه، مجموع انرژی مصرفی مزارع کشت رایج برنج در شهرستان‌های تالش از گیلان، بابل از مازندران و مینودشت از گلستان به ترتیب ۵۵، ۶۲/۴ و ۶۴/۲ گیگاژول بر هکتار بیان شده است به طوری که سهم نهاده‌های مصرفی سوخت دیزل و ماشین‌های کشاورزی به ترتیب با ۳۷/۲۵ و ۲۵/۷۵ درصد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند (Kazemi, Kamkar, Lakzaei, Badsar, & Shahbyki, 2015)، که از این منظر با نتایج تحقیق حاضر هم‌سو بود. همچنین، مقایسه دو رقم نشان داد در رقم جمشیدی میزان مصرف کود فسفات و مواد آلی در هر هکتار به ترتیب ۲۸/۲۴۳ و ۷۸/۳۵۷ درصد کمتر از مقدار مشابه در رقم هاشمی بود. بیشترین تفاوت در انرژی مصرفی، با توجه به میانگین مصرف انرژی نهاده‌های ورودی در مراحل مختلف تولید برنج ارقام هاشمی و جمشیدی در شکل ۳ نشان داده شده است.

بر این اساس، سهم مجموع عملیات زراعی آماده‌سازی زمین، خاک‌ورزی اولیه از میانگین کل انرژی مصرفی به ترتیب در ارقام هاشمی و جمشیدی برابر با ۱۷/۸۶ درصد (۹/۹۹ گیگاژول بر هکتار) و ۱۶/۴۱ درصد (۸/۹۹ گیگاژول بر هکتار) بود.

در تحقیق حاضر، نوع جمعیت بردار دوگانه و اندازه آن ۱۰۰ در نظر گرفته شد. همچنین، جهت مهاجرت پیشرو، مقدار فاصله‌ی مهاجرت برابر با ۲۰ و مقادیر کسر مهاجرت، جریمه اولیه و ضریب جریمه به ترتیب برابر با ۰/۱، ۱۰ و ۱۰۰ بودند (Imani et al., 2020). معیار توقف پس از ۲۰۰ تکرار بود. برای آزمون و آموزش مدل، از ۲۰ تا ۷۲ داده از مجموعه داده‌های آموزش یافته^۱ (TDS) به شکل تصادفی استفاده شد (Taki & Farhadi, 2021). برای رفع مشکل برون‌یابی حاصل از انتخاب تصادفی، روش اعتبارسنجی متقاطع k لایه^۲ استفاده شد. در این روش ابتدا کل داده‌ها، تصادفی شده و سپس به k (در اینجا ۵) زیر مجموعه تقسیم‌بندی شدند. ۱-k زیر مجموعه برای آموزش و یک زیر مجموعه برای آزمون مدل استفاده شد. این عمل ۲۰ بار تکرار شده و در انتها شاخص‌های عملکردی مدل در مرحله آموزش و آزمون مشخص شدند. همچنین از بین (۱۰۰=۵×۲۰) مجموعه داده مختلف، یک مجموعه به عنوان بهترین مجموعه انتخاب شد که دارای بیشترین ضریب تبیین، بازده مدل و نیز عملکرد قابل قبول خطای مدل در هر دو مرحله آموزش و آزمون بود (روابط ۷ تا ۱۰).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A}_i)^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right|}{n} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{P}_i)^2} \quad (10)$$

در روابط (۷) تا (۱۰)، A_i ، P_i ، $\bar{A}_i$ و $\bar{P}_i$ به ترتیب مقادیر پیش‌بینی، محاسباتی، میانگین مقدار محاسباتی و میانگین مقدار پیش‌بینی برای i-امین مزرعه بود.

همچنین از دیدگاه آماری، مدل برازش‌شده، از طریق آزمون برابری میانگین، واریانس و توزیع آماری ارزیابی شدند. فرض صفر نشان از تساوی میانگین، واریانس و توزیع آماری هر دو مجموعه داده محاسباتی و پیش‌بینی دارد. برای ارزیابی فرض‌های آماری به ترتیب از آزمون‌های t زوج^۳، آزمون F^4 و آزمون اندرسون-دارلینگ^۵ استفاده شد. هر فرضیه در سطح احتمال ۹۵ درصد با پارامتر p آزمون شد. بنابراین از تشابه دو مجموعه داده محاسباتی و پیش‌بینی زمانی

- 1- Training Data Set
- 2- K-fold cross validation
- 3- Paired t-test
- 4- F-test
- 5- Anderson-Darling test

جدول ۲- میانگین انرژی نهاده‌ها و ستانده در دو رقم شلتوک بر حسب مگاژول بر هکتار
Table 2- The average energy inputs and output of two cultivars of paddy (MJ.ha⁻¹)

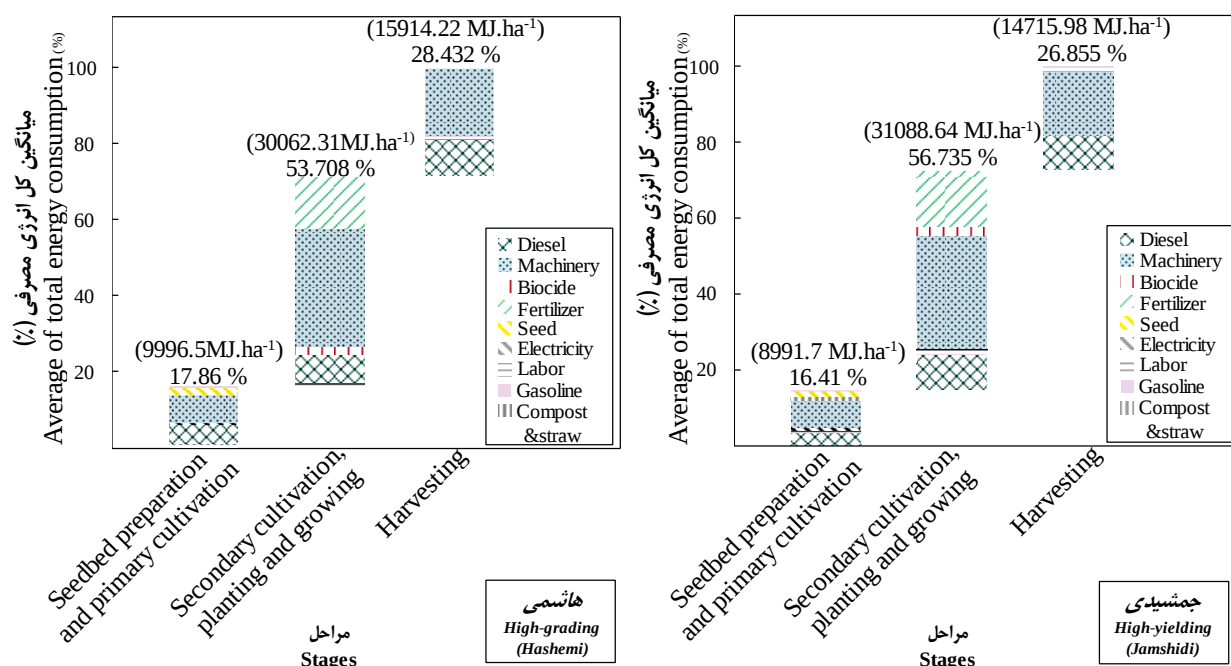
نهاده Input	هاشمی Hashemi	جمشیدی Jamshidi	تفاوت (%) Difference %	نهاده/ستانده Input/output	هاشمی Hashemi	جمشیدی Jamshidi	تفاوت (%) Difference %
نیروی کار Labor				سولفات روی ZincSulphate	1219.5	1081.61	12.748
نیروی کار مرد Male Labor	333.98	334.41	-0.13	سوخت‌ها و برق Fuels & Electricity			
نیروی کار زن Female Labor	168.5	166.01	1.5	دیزل Diesel	12979.04	12546.41	3.44
ماشین‌های کشاورزی Agricultural Machinery				بنزین Gasoline	42.3	49.54	-17.1
تراکتور Tractor	25111	25865.33	-3	برق Electricity	661.24	643.29	2.79
پادلر Puddler	787.67	596.72	32	مواد آلی Organic matter			
روتیواتور Rotavator	960.22	926.06	3.688	بذر برنج Seed	1591.00	1273.03	24.977
نشاءکار Planter	498.88	481.94	3.514	کمپوست Compost	390.89	309.59	26.26
دروگر Reaper	699.3	618.22	13.135	کاه و کلش Straw	38.2	30.05	27.12
خرمنکوب Thresher	1261.28	1262.77	-0.118	سموم شیمیایی Biocides			
کودهای شیمیایی Fertilizers				علف‌کش Herbicide	252.28	210.95	19.592
نیترژن Nitrogen	5955.98	5591.17	6.524	آفت‌کش Pesticide	1128.68	1143.55	-1.317
فسفات Phosphate	1092.11	851.58	28.243	قارچ‌کش Fungicide	253.22	206.62	22.553
پتاس Potash	507.74	491.96	3.207	مجموع مصرفی Total Consumed	55973.03	54796.32	
				(ب) ستانده B) Output	30742	62522	
				مجموع عملکرد Total yield			

(Shamsi, Pirdashti, Ebadi, Esfahani, & Raeini, 2017) نشان داد ارقام عملکرد شلتوک بالاتر مقدار صفات ریشه کمتری دارند. بر اساس شکل ۳، انرژی مصرفی در مرحله خاک‌ورزی ثانویه، کاشت و داشت در ارقام هاشمی و جمشیدی به ترتیب (۳۰/۰۶۲) گیگاژول بر هکتار (۵۳/۷۰۸) درصد و (۳۱/۰۸۸) گیگاژول بر هکتار (۵۶/۷۳۵) درصد از کل انرژی مصرفی را شامل شد که در این مرحله انرژی مصرفی ماشین‌های کشاورزی بیشترین سهم انرژی مصرفی را به خود اختصاص داد. در رقم هاشمی میزان استفاده از آفت‌کش، علف‌کش و قارچ‌کش به ترتیب ۱/۱۲۸ گیگاژول بر هکتار، ۲۵۳/۲۲ مگاژول بر هکتار و ۲۵۲/۲۸ مگاژول بر هکتار بود و این میزان در رقم جمشیدی به ترتیب ۱/۱۴۳ گیگاژول بر هکتار، ۲۰۶/۶۲ مگاژول بر

در مرحله آماده‌سازی زمین و خاک‌ورزی اولیه، میانگین انرژی سوخت دیزل مصرفی در رقم هاشمی نسبت به رقم جمشیدی ۱۴۵/۶۳ مگاژول بر هکتار بیشتر بود. علت این میزان افزایش را می‌توان در تعداد دفعات و ساعات بیشتر استفاده از ماشین‌های کشاورزی در مزارع رقم هاشمی به سبب پاسخگویی به احتیاجات بیشتر رشد رویشی نسبت به رقم جمشیدی دانست؛ در تحقیقات باروآه و همکاران، گوگوی و همکاران (Baruah, Gogoi, & Gogoi, 2010, Gogoi, Baruah, & Gupta, 2008) نیز به این موضوع اشاره شد که ارقام محلی دارای وزن خشک ریشه‌ای (صفات ریشه‌ای) بیشتر بوده و به دنبال آن اهتمام بیشتر در عملیات خاک‌ورزی نیاز است. همچنین نتایج تحقیق فلاح شمسی و همکاران (Fallah-

هفت روز پس از مشاهده ۸۰ درصد حالت شیرین سفت، مرحله برداشت محصول با داس آغاز می‌شود (Sharifi, Aghkhani, & Rohani, 2021). سهم مرحله برداشت از کل انرژی ورودی در رقم‌های جمشیدی و هاشمی به‌ترتیب برابر با ۲۶/۸۵۵ درصد (۱۴/۷۱۵ گیگاژول بر هکتار) و ۲۸/۴۳۲ درصد (۱۵/۹۱۴ گیگاژول بر هکتار) بود. مقاومت به ورس (خوایدگی) در رقم جمشیدی از دلایل مهم کاهش استفاده از نهاده‌های ماشین‌های کشاورزی و سوخت به لحاظ کاهش اضافه بار در این مرحله بود.

هکتار و ۲۱۰/۹۵ مگاژول بر هکتار به‌دست آمد که به‌جز مصرف آفت‌کش، سایر سموم در رقم هاشمی به‌طور چشم‌گیری افزایش استفاده وجود داشت. در تحقیق پیش‌گرم کومله و همکاران (Pishgar-Komleh, Sefeedpari, & Rafiee, 2011) میانگین استفاده از آفت‌کش، علف‌کش و قارچ‌کش در شهرستان لنگرود از گیلان به‌ترتیب ۷۰۳/۷۱ مگاژول بر هکتار (۱/۷۹ درصد)، ۱/۵ گیگاژول بر هکتار (۳/۸۲ درصد)، ۱۰۸/۹۸ مگاژول بر هکتار (۰/۴۶ درصد) از مجموع کل انرژی عنوان شده که علت تفاوت با نتایج تحقیق حاضر را می‌توان در نکات مدیریت عملیات زراعی دانست.



شکل ۳- سهم توزیع انرژی ورودی‌ها در سه مرحله (مگاژول بر هکتار)
 Fig.3. Share of energy input distribution across three stages (MJ.ha⁻¹)

مبسوط‌تری استفاده شد، می‌توان به برآورد مدل در شرایط جدید اطمینان بیشتری داشت (Baradaran Motie, Aghkhani, & Rohani, & Lakzian, 2019). بنابراین ۸۰ درصد داده‌های آموزش‌یافته شرط لازم جهت برآورد مقادیر بهینه عملکرد محصول دو رقم شلتوک را دارا بود.

در تحقیق بلندنظر و همکاران (Bolandnazar, Rohani, & Taki, 2019) مدل‌های توابع پایه شعاعی^۱ (RBF)، پرسپترون چندلایه^۲ (MLP) و ماشین بردار پشتیبان^۳ (SVM) در روش اعتبارسنجی متقاطع پنج لایه مورد مقایسه قرار گرفت که در بهترین حالت میانگین ضریب تبیین برابر با ۰/۹۸ در مدل RBF به‌دست آمد.

مدل GA-ABC

پنج سری داده متشکل از ۵۰ تا ۹۰ درصد داده‌های آموزش‌یافته، برای متغیرهای ورودی به کمک روش اعتبارسنجی متقاطع پنج لایه با ۲۰ تکرار ارزیابی شد که منجر به تشکیل ۱۰۰ مجموعه آموزش و آزمون متفاوت شد. نتایج میانگین شاخص‌های ارزیابی مدل GA-ABC در دو مرحله آموزش و آزمون برای رقم هاشمی در جدول ۳ و رقم جمشیدی در جدول ۴ آمده است. افزایش تخصیص داده‌های آموزش‌یافته (از ۵۰ تا ۷۰ درصد) موجب افزایش عملکرد (دقت و صحت) مدل منتج نشد، اما طبق نتایج جدول ۳ و ۴، پس از استفاده از ۸۰ و ۹۰ درصد داده‌های آموزش‌یافته برای شش مجموعه ورودی، ارزیابی شاخص‌ها نشان از برتری مدل GA-ABC با ۸۰ درصد داده‌های آموزش‌یافته در برآورد مدل برای مقادیر بهینه عملکرد محصول شلتوک داشت؛ به این معنی که هرچه از مجموعه

1- Radial Basis Functions
 2- Multi-layer Perceptron
 3- Support Vector Machine

جدول ۳- نتایج مدل GA-ABC با روش اعتبارسنجی متقاطع در مرحله‌های آموزش و آزمون برای رقم هاشمی**Table 3- Results of GA-ABC model with cross-validation method in training and test phases for the Hashemi cultivar**

متغیرهای ورودی Input variables	TDS	Test				Train			
		R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-3}$)	EF	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-3}$)	EF
نیروی کار	90	0.9090	1.0300	2.5500	0.8802	0.9032	1.0400	2.5561	0.9007
Labor	80	0.9091	1.0299	2.5498	0.8802	0.9032	1.0400	2.5560	0.9008
ماشین‌های کشاورزی	90	0.8905	1.1131	2.5771	0.8625	0.8940	1.1130	2.5551	0.8886
Agricultural machinery	80	0.8915	1.1128	2.5770	0.8625	0.8943	1.1129	2.5545	0.8893
سموم	90	0.9034	1.0980	2.4436	0.8895	0.9090	1.1037	2.4421	0.8980
Biocides	80	0.9038	1.0978	2.4436	0.8899	0.9096	1.1032	2.4419	0.8985
کودشیمیایی	90	0.9094	1.0400	2.2610	0.8893	0.9096	1.0224	2.2010	0.8905
Fertilizers	80	0.9098	1.0398	2.2610	0.8896	0.9099	1.0222	2.2009	0.8908
سوخت‌ها و برق	90	0.9115	1.0055	2.2805	0.8998	0.8956	1.1009	2.2906	0.9055
Fuels & Electricity	80	0.9119	1.0051	2.2805	0.8999	0.8959	1.1009	2.2901	0.9059
مواد آلی	90	0.9096	1.0087	2.0190	0.8993	0.9098	1.0599	2.2301	0.9088
Organic matters	80	0.9099	1.0084	2.0189	0.9003	0.9107	1.0595	2.2299	0.9098

جدول ۴- نتایج مدل GA-ABC با روش اعتبارسنجی متقاطع در مرحله‌های آموزش و آزمون برای رقم جمشیدی**Table 4- Results of GA-ABC model with cross-validation method in training and test phases for the Jamshidi cultivar**

متغیرهای ورودی Input variables	TDS	Test				Train			
		R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-3}$)	EF	R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-3}$)	EF
نیروی کار	90	0.9231	0.9775	1.2220	0.9413	0.9532	0.9668	1.0029	0.9509
Labor	80	0.9235	0.9774	1.2220	0.9415	0.9539	0.9662	1.0022	0.9509
ماشین‌های کشاورزی	90	0.9166	0.9634	1.4487	0.9309	0.9511	0.9619	1.0001	0.9333
Agricultural machinery	80	0.9177	0.9630	1.4474	0.9317	0.9512	0.9619	1.0000	0.9338
سموم	90	0.9090	0.9510	1.0243	0.9199	0.9469	0.9667	1.0442	0.9377
Biocides	80	0.9093	0.9510	1.0242	0.9199	0.9469	0.9667	1.0442	0.9379
کودشیمیایی	90	0.9128	0.9677	1.0020	0.9335	0.9502	0.9532	1.0201	0.9250
Fertilizers	80	0.9129	0.9677	1.0020	0.9341	0.9503	0.9532	1.0201	0.9256
سوخت‌ها و برق	90	0.9188	0.9851	1.0770	0.9228	0.9600	0.9335	1.0904	0.9508
Fuels & Electricity	80	0.9196	0.9850	1.0770	0.9233	0.9607	0.9331	1.0900	0.9518
مواد آلی	90	0.9102	0.9666	1.1047	0.9000	0.9441	0.8596	1.0412	0.9234
Organic matters	80	0.9112	0.9665	1.1037	0.9008	0.9451	0.8596	1.0403	0.9244

مصنوعی به‌عنوان تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک توانست صلاحیت لازم جهت برآورد مقادیر بهینه عملکرد محصول دو رقم شلتوک را به‌دست آورد.

در شکل ۴، چگونگی توافق بین عملکرد محاسباتی و عملکرد پیش‌بینی‌شده برای دو مرحله آموزش و آزمون آمده است. بر این اساس، شیب خط رگرسیونی و عرض از مبدأ در هر دو رقم به‌ترتیب نزدیک یک و صفر بود. توافق بین عملکرد محاسباتی و عملکرد پیش‌بینی‌شده در رقم هاشمی با مقایسه با رقم جمشیدی به خط ۴۵ درجه نزدیک‌تر بود و تعداد نقاط بیشتر در بازه دو خط ۱۰٪+ و ۱۰٪- انحراف از خط رگرسیون واقع شدند.

برای بررسی دقیق‌تر مدل از مقایسات آماری میانگین، واریانس و توزیع آماری دو مجموعه داده محاسباتی و پیش‌بینی شده استفاده شد. بهترین مدل از این دیدگاه، مدلی است که توانایی برآورد مجموعه داده‌های پیش‌بینی را با نداشتن اختلاف معنی‌دار با مجموعه داده‌های واقعی نشان دهد و یا به عبارت دیگر فرض صفر رد نشود ($p > 0.05$) (Rohani, Abbaspour-Fard, & Abdolahpour, 2011). جدول ۵، مقادیر p مقایسات آماری و شاخص‌های ارزیابی مرتبط را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۵، مقایسات آماری و شاخص‌های ارزیابی برحسب اینکه چه مجموعه داده‌ای برای آموزش و آزمون مدل پیشنهاد شد، نتایج نسبتاً ثابتی را بیان کرد. بدین صورت که برای هر دو مرحله آزمون و آموزش بین میانگین، واریانس و توزیع آماری هر دو سری داده در سطح یک درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارند. به عبارتی دیگر سازوکار نخبه‌گرایی الگوریتم زنبور عسل

جدول ۵- نتایج شاخص‌های ارزیابی و مقایسه آماری مقادیر محاسباتی و پیش‌بینی مدل GA-ABC

Table 5- Results of evaluation indexes and statistical comparison of the observed and predicted values

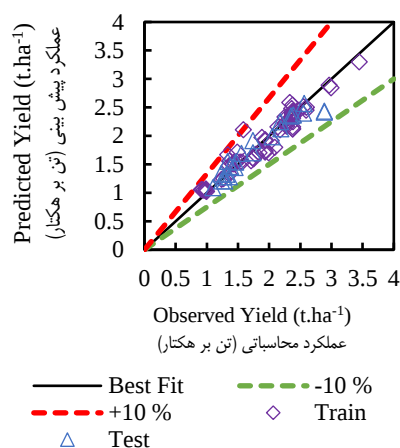
			P-value			R ²	RMSE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-3}$)	EF
			میانگین Mean	واریانس STD	توزیع Distribution				
هاشمی Hashemi	محاسباتی Observed	آزمون Test	0.9033	0.9440	0.8330	0.9411	0.0028	0.0051	0.9655
		آموزش Train	0.9385	0.9621	0.8640	0.9421	0.0022	0.0055	0.9669
		مجموع Total	0.9290	0.9660	0.8590	0.9441	0.0023	0.0045	0.9778
	پیش‌بینی Predicted	آزمون Test	0.8950	0.9322	0.9122	0.9207	0.0013	0.0017	0.9881
		آموزش Train	0.8989	0.9660	0.9220	0.9232	0.0019	0.0011	0.9887
		مجموع Total	0.9022	0.9610	0.9330	0.9265	0.0011	0.0009	0.9880
جمشیدی Jamshidi	محاسباتی Observed	آزمون Test	0.8828	0.9000	0.8655	0.9321	0.0018	0.001	0.9804
		آموزش Train	0.8810	0.9120	0.9533	0.9311	0.0040	0.0051	0.9807
		مجموع Total	0.8890	0.9880	0.9777	0.9312	0.0019	0.0090	0.9808
	پیش‌بینی Predicted	آزمون Test	0.8550	0.9040	0.9128	0.9204	0.0003	0.0009	0.9917
		آموزش Train	0.8960	0.9000	0.9260	0.9367	0.0026	0.0008	0.9940
		مجموع Total	0.9000	0.9010	0.9545	0.9357	0.0006	0.0007	0.9979

بهینه‌سازی عملکرد شلتوک

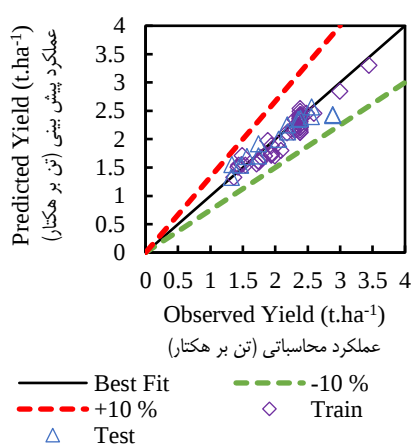
پس از به‌کارگیری ۸۰ درصد داده‌های آموزش‌یافته به‌عنوان مجموعه برتر، از این مجموعه برای بهینه‌سازی مقادیر محاسباتی استفاده شد. نتایج بهینه‌سازی منابع مصرفی ماشین‌های کشاورزی، سوخت، نیروی انسانی و کاه و کلش در شکل ۵ آمده است. نتایج بهینه‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای استفاده از ماشین‌های کشاورزی روتیواتور، نشاءکار، خرمکوب و تراکتور در رقم هاشمی به‌ترتیب ۷/۰۵ درصد، ۲۲/۳ درصد، ۸/۶۱ درصد و ۷/۳۲ درصد به‌دست آمد. این میزان در رقم جمشیدی به‌ترتیب ۱/۲۸ درصد، ۲۷/۲۱ درصد، ۸/۶ درصد و ۱۴/۴۶ درصد بود (شکل ۵) و بیانگر آن است که استفاده از اکثر ماشین‌های کشاورزی بیش از حد (مقدار) بهینه بوده است. البته استفاده از ماشین‌های کشاورزی پادلر و دروگر کمتر از مقدار بهینه است که به‌دلیل استفاده ناکارآمد از این ماشین‌ها بود. بنابراین مصرف انرژی در ماشین‌های پادلر و دروگر به صرفه نبود. مدیریت مصرف انرژی در مرحله خاک‌ورزی و آماده‌سازی بستر

کشت و به دنبال آن کاشت محصول، اصلاحات اولیه و بهینه‌سازی ماشین‌های کشاورزی، تطابق با شرایط زراعی هر محل و استفاده کارا از توان ماشین‌های کشاورزی می‌تواند موجب بهبود مصرف انرژی شود (Chauhan, Mohapatra, & Pandey, 2006).

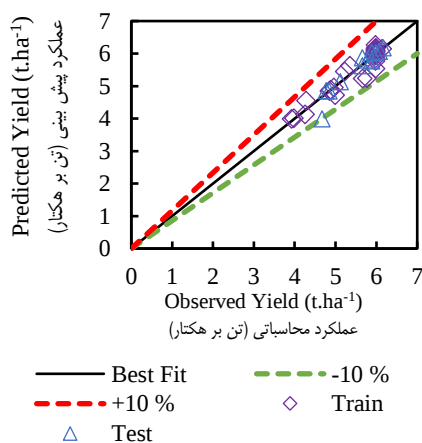
همچنین بر اساس شکل ۵، در رقم جمشیدی بر خلاف رقم هاشمی میانگین مصرف بهینه انرژی دیزل از میانگین مقدار مصرف، صرفه‌جویی بسیار ناچیزی (۰/۰۲ درصد) داشت؛ در حالی که این مورد صرفه‌جویی در رقم هاشمی به ۶/۸۶ درصد رسید. بر اساس نتایج انجام شده، در مزارع شهرستان رشت بیشترین صرفه‌جویی، در بخش مصرف سوخت دیزل بوده است (Nabavi-Pelesaraei, Abdi, Rafiee, & Taromi, 2014)؛ که لزوم توجه هرچه بیشتر به سوی افزایش کیفیت سوخت ضروری می‌باشد. میانگین صرفه‌جویی انرژی بنزین در رقم‌های هاشمی و جمشیدی به‌ترتیب به میزان ۶/۳ درصد و ۸/۴ درصد بود.



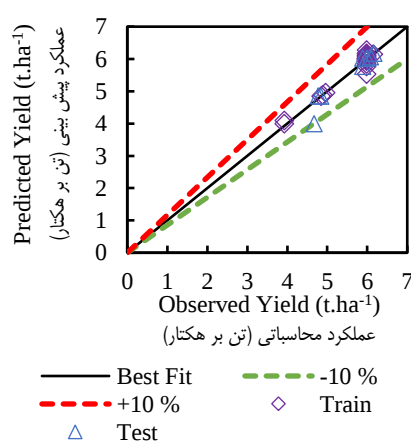
Hashemi 90%
 Train $y = 0.9281x + 1.066$,
 $R^2 = 0.93$
 Test $y = 0.9229x + 1.2007$,
 $R^2 = 0.918$



Hashemi 80%
 Train $y = 0.9409x + 0.0557$,
 $R^2 = 0.9204$
 Test $y = 0.955x + 0.0911$,
 $R^2 = 0.9132$



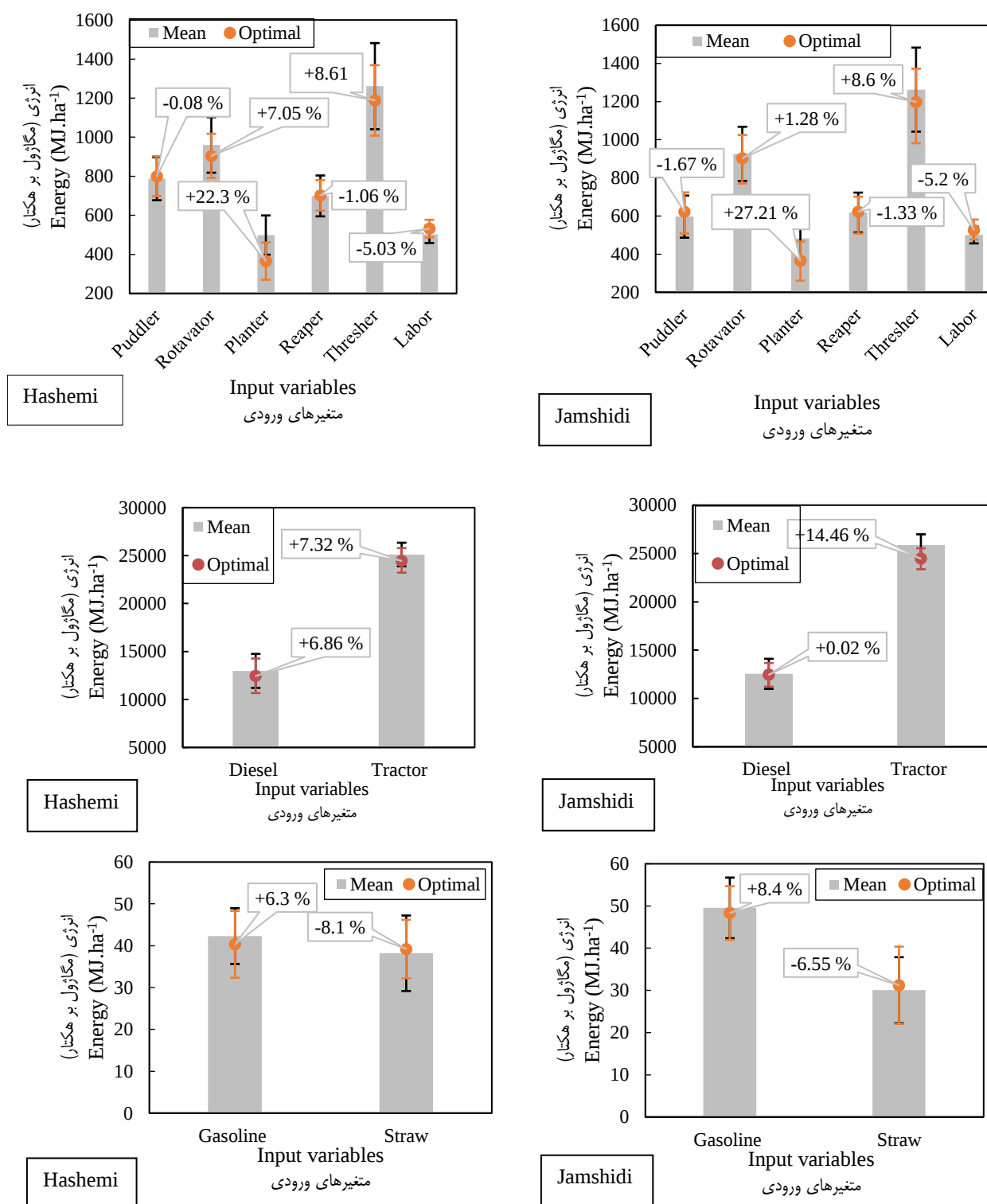
Jamshidi 90%
 Train $y = 0.9435x + 0.0779$,
 $R^2 = 0.952$
 Test $y = 0.9451x - 1.099$,
 $R^2 = 0.9123$



Jamshidi 80%
 Train $y = 0.9822x + 0.241$,
 $R^2 = 0.9511$
 Test $y = 1.122x - 1.8411$,
 $R^2 = 0.9175$

شکل ۴- پراکندگی مقادیر محاسباتی در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده عملکرد شلتوک

Fig.4. Cross correlation of the observed and predicted values of paddy yield



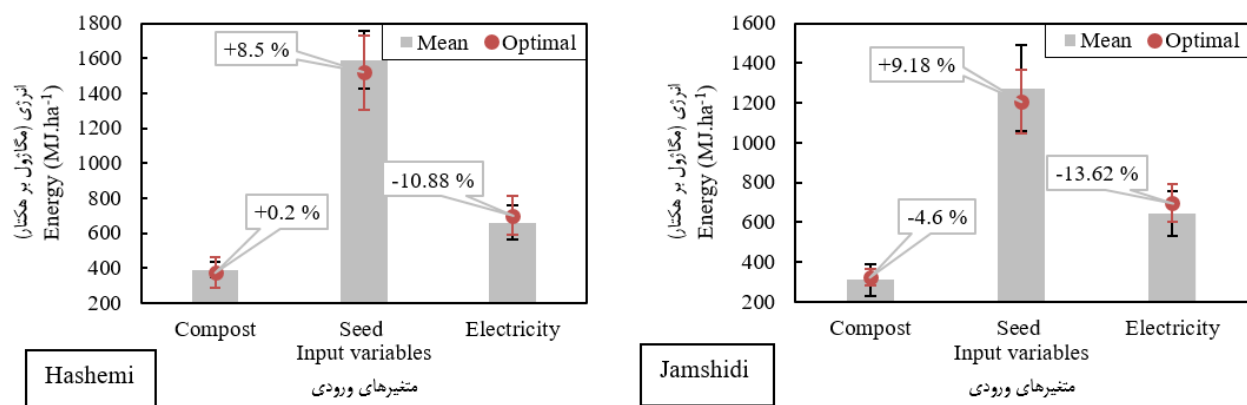
شکل ۵- مقایسه مقادیر انرژی مصرفی و بهینه متغیرهای ورودی (خطوط مشکی و قرمز به ترتیب نشانگر انحراف معیار مقدار میانگین و بهینه می‌باشند)

Fig.5. Comparison between the consumed and optimum energy input variables (The black and red bars represent the standard deviation of the mean and optimal, respectively)

جمشیدی به ترتیب ۵/۰۳ درصد و ۵/۲ درصد مشاهده شد. در تحقیق نبوی پله‌سرای و همکاران (Nabavi-Pelesaraei et al., 2019) این تفاوت، به میزان ۴۰/۷۵ درصد به دست آمد و از این لحاظ که، مصرف انرژی نیروی کار کمتر از مقدار بهینه بود می‌توان گفت با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. استفاده از کاه و کلش بر جای مانده از کشت سال قبل در هر دو رقم از مقدار بهینه کمتر بود. پیشنهاد می‌شود از فناوری ترسیب کربن استفاده شود تا با بازگرداندن بقایا، کاه و کلش بوته برنج به خاک و پوسیده شدن آن به مرور زمان سبب حفظ کربن در خاک، افزایش محتوای مواد آلی خاک، کاهش مصرف کودهای شیمیایی و در نهایت کاهش آلودگی محیط زیست شود (Wang et al., 2021).

در شکل ۶، نتایج مقادیر میانگین انرژی مصرفی و بهینه کمپوست، بذر و برق آمده است.

با توجه به این که فقط بنزین مصرفی نشاء کار مد نظر بود و از سایر موقعیت‌های مصرف بنزین در حمل و نقل صرف نظر شد، بنابراین لزوم نظارت و پایش واردات نشاء کار با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و تأثیر زیاد سوخت‌های فسیلی بر آلودگی محیط زیست، باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. همچنین، در مورد نیروی کار مقدار انرژی بهینه از میانگین انرژی مصرفی توسط نیروی کار کمتر بود؛ به عبارت دیگر صرفه جویی منفی شد. در بررسی نیروی کار مجموع ساعات کار افرادی که به طور مستقیم و غیر مستقیم در اجرای عملیات زراعی نقش داشتند، لحاظ شد. در رقم هاشمی در مراحل اول تا سوم به ترتیب ۵۴/۲۸، ۱۹۶/۶۵ و ۲۵۱/۵۵ مگاژول بر هکتار و در رقم جمشیدی ۵۰/۶۲، ۲۰۱/۵۱ و ۲۴۸/۲۹ مگاژول بر هکتار مصرف شد. طبق نتایج تحقیق حاضر در هر دو رقم صرفه جویی مصرف انرژی صورت نپذیرفت (شکل ۵). به این معنی که تفاوت در میانگین مصرف انرژی و مقدار بهینه مصرف انرژی در رقم هاشمی و

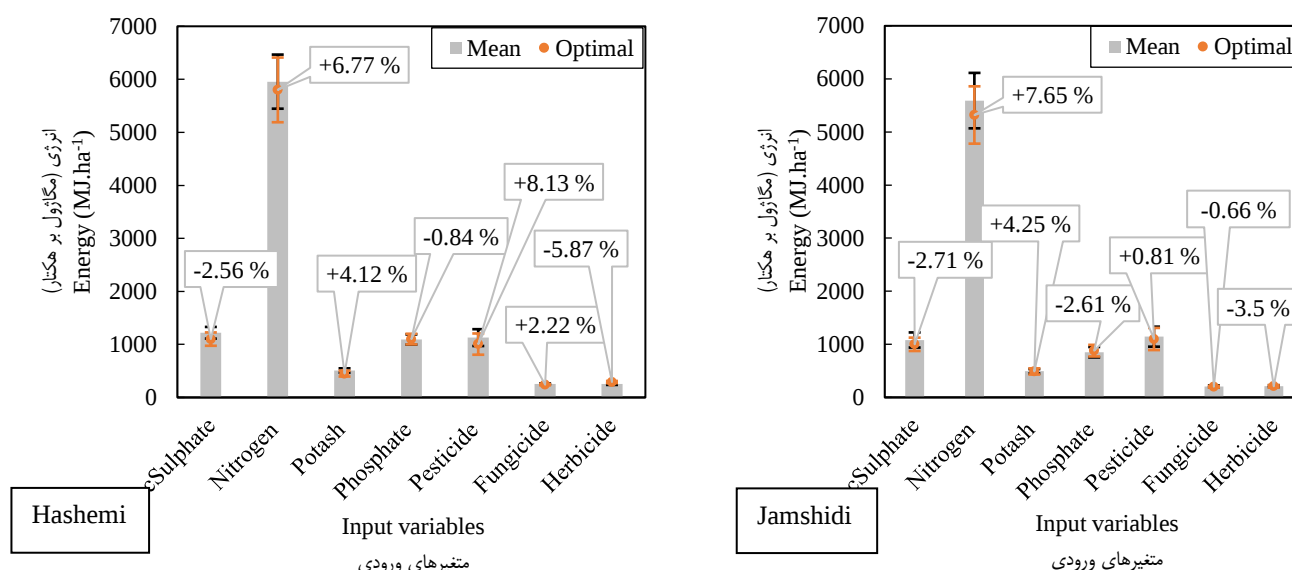


شکل ۶- مقایسه مقادیر انرژی مصرفی و بهینه متغیرهای ورودی (خطوط مشکی و قرمز به ترتیب نشانگر انحراف معیار مقدار میانگین و بهینه می‌باشند)

Fig.6. Comparison between the consumed and optimum energy input variables (The black and red bars represent the standard deviation of the mean and optimal values, respectively)

برق بیشترین سهم از مجموع صرفه جویی انرژی را به خود اختصاص داده است؛ علت تفاوت نتایج این پژوهش با پژوهش ایشان را می‌توان در میزان استفاده از دستگاه پمپاژ آب و چراغ‌های روشنایی جهت رشد خزانه‌ها دانست. میانگین مصرف انرژی بذر در هر دو رقم بهینه بود؛ که نشان از استفاده مؤثر از این نهاده داشت. در شکل ۷، نتایج مقادیر انرژی مصرفی و بهینه سموم و کودهای شیمیایی آمده است.

بر اساس شکل ۶، میانگین مصرف انرژی نهاده‌های کمپوست و بذر در رقم جمشیدی کمتر از مقدار مشابه در رقم هاشمی بود. کشت رقم پرمحصول و کم کربن همراه با کشت متراکم ضمن اطمینان از عملکرد بالا و پایدار محصول، نسبت به رقم محلی انتشار گاز گلخانه‌ای متان کمتری خواهد داشت (Jiang et al., 2017). در رقم هاشمی، صرفه جویی انرژی مصرفی کمپوست ناچیز (۰/۲ درصد) بود، ولی مصرف این نهاده در رقم جمشیدی صرفه جویی انرژی نداشت. همچنین، میانگین مصرف انرژی برق در هر دو رقم از مقدار بهینه کمتر بود. در تحقیق طاهری راد و همکاران (Taheri-Rad et al.,



شکل ۷- مقایسه مقادیر انرژی مصرفی و بهینه متغیرهای ورودی (خطوط مشکی و قرمز به ترتیب نشانگر انحراف معیار مقدار میانگین و بهینه می‌باشند)

Fig.7. Comparison between the consumed and optimum energy input variables (The black and red bars represent the standard deviation of the mean and optimal values, respectively)

بهینه‌سازی مصرف انرژی، در رقم هاشمی به‌ازای یک سطح زیر کشت، ۵۳/۹۶ درصد صرفه‌جویی مصرف انرژی را نشان داد. این میزان در رقم جمشیدی برابر با ۳۹/۴۱ درصد بود. با توجه به این که میانگین انرژی ورودی در رقم جمشیدی برابر با ۵۴/۷۹۶ گیگاژول بر هکتار به‌دست آمد و ۱/۱۱۷ گیگاژول بر هکتار کمتر از مقدار مشابه در رقم هاشمی بود و از سوی دیگر میانگین انرژی خروجی در رقم جمشیدی ۳۱/۷۸ گیگاژول بر هکتار بیشتر از مقدار مشابه در رقم هاشمی به‌دست آمد، بنابراین با توجه تأثیرپذیری شدید محیط‌زیست از مزارع برنج پیشنهاد می‌شود از رقم جمشیدی به‌عنوان جایگزین رقم هاشمی استفاده شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهتمام جهانی به مسئله انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیز گرایش به سمت مکانیزاسیون و انرژی محور شدن بخش کشاورزی، توازن و تعادل نهاده‌ها و محصولات کشاورزی امری بسیار ضروری است. از این رو، هدف از این مطالعه بررسی، مقایسه، مدل‌سازی عملکرد و بهینه‌سازی انرژی شلتوک رقم‌های مرغوب و پرمحصول در شهرستان رضوانشهر از استان گیلان بود. نتایج نشان داد که در رقم هاشمی و رقم جمشیدی میانگین کل انرژی مصرفی به‌ترتیب ۵۵/۹۷۳ و ۵۴/۷۹۶ گیگاژول بر هکتار به‌دست آمد. در هر دو رقم به‌ترتیب سهم مصرف انرژی ماشین‌های کشاورزی و دیزل

بر اساس شکل ۷، در بین کودهای شیمیایی، در هر دو رقم نهاده کود نیتروژن بیشترین صرفه‌جویی را از خود نشان داد. همین‌طور، از میان سموم شیمیایی، در هر دو رقم صرفه‌جویی مصرف انرژی آفت‌کش بیشینه بود. پیشنهاد می‌شود با کاهش مصرف کود نیتروژن، بهینه‌سازی روش‌های کوددهی و بهبود انواع کود ضمن افزایش عملکرد محصول، به‌طور مؤثری انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروز اکساید را کاهش داد. در مزارع کشور مالزی مقایسه صرفه‌جویی انرژی دو روش کشت نشاءکاری و پخش بذر نشان داد سهم صرفه‌جویی مصرف کود نیتروژن در هر دو روش بیشترین میزان بوده است (Elsoragaby et al., 2020). در مزارع کشور هند بیشترین صرفه‌جویی در مصرف مجموع کود شیمیایی به میزان ۳۲/۷ درصد بوده است (Chauhan et al., 2006). نتایج تحقیق نبوی پله‌سرای و همکاران (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017) نشان داد که در مزارع شهرستان رشت به‌طور میانگین می‌توان ۷۲ درصد اثرات آلاینده‌ی زیست‌محیطی را نسبت به شرایط کشت رایج کاهش داد که نسبت به سایر نهاده‌ها، صرفه‌جویی در مصرف سم حشره‌کش دارای بیشترین مقدار بود.

بر اساس این موضوع که، به‌ازای یک هکتار زیر کشت رقم شلتوک‌های هاشمی و جمشیدی به‌ترتیب ۳۰/۷۴۲ و ۶۲/۵۲۲ گیگاژول حاصل شد، بنابراین باید مجموع مقادیر انرژی مصرفی بهینه (مقادیر مثبت در شکل‌های ۵ تا ۷) و انرژی مصرفی غیر بهینه (مقادیر منفی در شکل‌های ۵ تا ۷) در نظر گرفته شود. از این رو، نتایج

مهم‌ترین نهاد در تغییر عملکرد محصول (تحلیل حساسیت)، مقایسه و برآورد سود خالص استفاده کرد. همین‌طور، از تلفیق الگوریتم‌های زنبور عسل مصنوعی، ژنتیک و ماشین‌های بردار پشتیبان می‌توان در طبقه‌بندی رقم‌های مختلف شلتوک استفاده کرد. همچنین، می‌توان از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی همراه با سایر الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌یابی الگوی تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه، بهینه‌سازی شاخص بهره‌وری آبیاری مزرعه، بهبود دقت مدل پیش‌بینی دمای آب مزرعه با هدف کاهش ریسک ضایعات برنج و ارائه مدل بهینه در زنجیره تأمین برنج بهره‌گرفت.

مشارکت نویسندگان

سینا شریفی: جمع‌آوری داده‌ها، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، خدمات نرم‌افزاری، پردازش داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن، اعتبارسنجی و تصویرسازی نتایج
نگار حافظی: خدمات نرم‌افزاری، پردازش داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه و ویرایش متن
محمدحسین آق‌خانی: نظارت و مدیریت و ویرایش متن

بیشترین مقدار بود و سهم مصرف انرژی در مرحله خاک‌ورزی ثانویه، کاشت و داشت بیشتر از مراحل دیگر بود. به‌منظور مدل‌سازی عملکرد محصول شلتوک و بهینه‌سازی مصرف انرژی از تلفیق الگوریتم زنبور عسل مصنوعی و الگوریتم ژنتیک استفاده شد و نتایج مقایسات آماری و شاخص‌های ارزیابی نشان داد که میانگین مصرف انرژی از مقادیر بهینه فاصله چشم‌گیری دارد. بیشترین صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ماشین‌های کشاورزی در رقم جمشیدی و از آن نهاد تراکتور بود. در رقم هاشمی در نهاد خرمنکوب مشاهده شد. در کنار عدم استفاده از ماشین‌های کشاورزی فرسوده و مستهلک و همین‌طور کاهش استفاده از ماشین‌های نامناسب وارداتی باید درصدد طراحی، ساخت، ارزیابی و بهینه‌سازی قطعات و ماشین‌های مخصوص ارقام شلتوک کشت شده کشور بود. در این زمینه، بهره‌گیری از هوش مصنوعی می‌تواند مؤثر واقع شود. با توجه به این‌که میانگین مصرف غیرقابل چشم‌پوشی نهاد کود نیتروژن در رقم هاشمی و جمشیدی به ترتیب ۵/۹۵۵ و ۵/۵۹۱ گیگاژول بر هکتار به‌دست آمد، می‌توان با مدیریت روش‌های نوین کوددهی، تولید و واردات کودهای با کارایی بالا ضمن افزایش عملکرد محصول به‌طور مؤثرتری انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را کاهش داد. بر اساس نتایج این تحقیق، می‌توان از تلفیق الگوریتم‌های زنبور عسل مصنوعی و ژنتیک در شناسایی

References

1. Anissa, R. D., Mahmudy, W. F., & Widodo, A. W. (2019). Optimisation of Rice Fertiliser Composition Using Genetic Algorithms. *Knowledge Engineering and Data Science*, 2(2), 72-81.
2. Baradaran Motie, J., Aghkhani, M. H., Rohani, A., & Lakzian, A. (2019). Modeling the Effective Parameters on Accuracy of Soil Electrical Conductivity Measurement Systems Using RBF Neural Network. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(1), 139-154. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i1.66489>
3. Baruah, K. K., Gogoi, B., & Gogoi, P. (2010). Plant Physiological and Soil Characteristics Associated with Methane and Nitrous Oxide Emission from Rice Paddy. *Physiology and Molecular Biology of Plants International. A Journal of Functional Plant Biology*, 16, 79-91. <https://doi.org/10.1007/s12298-010-0010-1>
4. Behrang, M. A., Assareh, E., Assari, M. R., & Ghanbarzadeh, A. (2011). Using Bees Algorithm and Artificial Neural Network to Forecast World Carbon Dioxide Emission. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(19), 1747-1759. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.493920>
5. Bolandnazar, E., Rohani, A., & Taki, M. (2019). Energy Consumption Forecasting in Agriculture by Artificial Intelligence and Mathematical Models. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(13), 1618-1632. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604872>
6. Camci, E., Kripalani, D. R., Ma, L., Kayacan, E., & Khanesar, M. A. (2018). An Aerial Robot for Rice Farm Quality Inspection with Type-2 Fuzzy Neural Networks Tuned by Particle Swarm Optimization-Sliding Mode Control Hybrid Algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 41, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.10.003>
7. Chauhan, N. S., Mohapatra, P. K. J., & Pandey, K. P. (2006). Improving Energy Productivity in Paddy Production through Benchmarking: An Application of Data Envelopment Analysis. *Energy Conversion and Management*, 47, 1063-1085. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.07.004>
8. Chen, X., Mao, Y., Ma, X., & Qi, L. (2020). A Tactile Method for Rice Plant Recognition Based on Machine Learning. *Sensors*, 20(18), 5135. <https://doi.org/10.3390/s20185135>
9. Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. John Wiley & Sons, New York.
10. Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., García-Navarrete, O., & Blasco, J. (2014). Optimised Computer Vision System for Automatic Pre-grading of Citrus Fruit in the Field Using A Mobile Platform. *Precision agriculture* 15, 80-94. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9324-7>

11. Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Nawi, N. M., Mairghany, M., Elhassan, S. M. M., & Kheiralla, A. F. (2020). Applying Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) to Optimize the Energy Inputs and Greenhouse Gas Emissions (GHG) in Wetland Rice Production. *Energy Reports*, 6, 2988-2998. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.010>
12. Fallah-Shamsi, S. A., Pirdashti, H., Ebadi, A., Esfahani, M., & Raeini, M. (2017). Response of Root Characteristics and Dry Matter Partitioning in 40 Improved and Local rice (*Oryza sativa* L.) Genotypes Under Deficit Irrigation. *Journal of Crop Breeding*, 9(22), 63-72. (in Persian). <https://doi.org/10.29252/jcb.9.22.63>
13. Geleta, D. K., & Manshahia, M. S. (2021). Artificial Bee Colony-Based Optimization of Hybrid Wind and Solar Renewable Energy System. *Research Anthology on Clean Energy Management and Solutions*. 819-842. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9420-8.CH017>
14. Gogoi, N., Baruah, K. K., & Gupta, P. K. (2008). Selection of Rice Genotypes for Lower Methane Emission. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 181-186. <https://doi.org/10.1051/agro:2008005>
15. Gracia, C., Diezma-Iglesias, B., Barreiro, P., Gardini, S. T., & Aditya, S. K. (2013). A Hybrid Genetic Algorithm for Route Optimization in the Bale Collecting Problem. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11, 603-614. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013113-3635>
16. Gummert, M., Cabardo, C., Quilloy, R., Aung, Y. L., Thant, A. M., Kyaw, M. A., Labios, R., Htwe, N. M., & Singleton, G. R. (2020). Assessment of Post-Harvest Losses and Carbon Footprint in Intensive Lowland Rice Production in Myanmar. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76639-5>
17. Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Safarzadeh, D., Ahmadi, E., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2018). Optimization of Energy Consumption of Dairy Farms Using Data Envelopment Analysis - A case study: Qazvin city of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.04.006>
18. Imani, A., Hosseinpour, S., Keyhani, A., & Azimzadeh, M. (2020). Modeling and Optimization of Oligonucleotide-Based Nanobiosensor Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm Based Procedure. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(1), 171-181. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.290631.665231>
19. Jiang, Y., Jan van Groenigen, K., Huang S., Bruce A. H., van Kessel C. H., Shuijin, Zhang, J., Wu, L., Yan, X., Wang, L., Chen, J., Hang, X., Zhang, Y., Horwath, W. R., Ye, R., Linquist, B. A., Song, Z., Zheng, C., Deng, A., & Zhang, W. (2017). Higher Yields and Lower Methane Emissions with New Rice Cultivars. *Global Change Biology*, 23(11), 4728-4738. <https://doi.org/10.1111/gcb.13737>
20. Karaboga, D., & Akay, B. (2009). A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214, 108-132. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.090>
21. Kazemi, H., Kamkar, B., Lakzaei, S., Badsar, M., & Shahbyki, M. (2015). Energy Flow Analysis for Rice Production in Different Geographical Regions of Iran. *Energy*, 84, 390-396. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.005>
22. Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and Biomass Engineering*, 5, 330.
23. Le Dinh, L., Vo Ngoc, D., & Vasant, P. (2013). Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Optimal Power Flow Problem. *The Scientific World Journal*. <https://doi.org/10.1155/2013/159040>
24. Loganthurai, P., Rajasekaran, V., & Gnanambal, K. (2016). Evolutionary Algorithm Based Optimum Scheduling of Processing Units in Rice Industry to Reduce Peak Demand. *Energy*, 107, 419-430. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.027>
25. Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., & Mohammadi, A. (2011). Optimization of Energy Consumption and Input Costs for Apple Production in Iran Using Data Envelopment Analysis. *Energy*, 36(2), 909-916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.020>
26. Nabavi-Pelesaraei, A., Abdi, R., Rafiee, S., & Taromi, K. (2014). Applying Data Envelopment Analysis Approach to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emission of Rice Production. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 7(4), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.06.001>
27. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2017). Energy Consumption Enhancement and Environmental Life Cycle Assessment in Paddy Production Using Optimization Techniques. *Journal of Cleaner Production*, 16(2), 586-571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.071>
28. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2019). Assessment of Optimized Pattern in Milling Factories of Rice Production Based on Energy, Environmental and Economic Objectives. *Energy*, 169, 1273-1259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.106>
29. Nassiri, S. M., & Singh, S. (2009). Study on Energy Use Efficiency for Paddy Crop Using Data Envelopment Analysis (DEA) Technique. *Applied Energy*, 86(7), 1320-1325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.10.007>
30. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable energy*, 29(1), 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
31. Pishgar-Komleh, S. H., Sefeedpari, P., & Rafiee, S. (2011). Energy and Economic Analysis of Rice Production under Different Farm Levels in Guilan Province of Iran. *Energy*, 36(10), 5824-5831.

- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.044>
32. Pour-Bagher, R., Rohani, A., Rahmati, M. H., & Abbaspour-Fard, M. H. (2018). Modeling and Optimization of Drying Process of Paddy in Infrared and Warm Air Fluidized Bed Dryer. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(3), 162-171.
 33. Riahi, V., & Javan, F. (2016). The Role of Climate Comfort in the Diversification of Livelihood in Rural Areas. *Geography, Civil Engineering and Urban Management Studies*, 2(4), 35-47. (in Persian with English abstract).
 34. Rohani, A., Abbaspour-Fard, M. H., & Abdolhpour, S. (2011). Prediction of Tractor Repair and Maintenance Costs Using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*, 38, 8999-9007. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.118>
 35. Salehi, M., Ebrahimi, R., Maleki, A., & Mobtaker, H. G. (2014). An assessment of energy modeling and input costs for greenhouse button mushroom production in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 64, 377-383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.005>
 36. Sarai, H. (1993). *An Introduction to Research Sampling*. The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Humanities (SAMT), Tehran.
 37. Shabri, A., Samsudin, R., & Hezzam, E. A. (2021). Short-term CO_2 emissions forecasting using multi-variable grey model and artificial bee colony (abc) algorithm approach. PP 856-598 in F. Saeed F. Mohammed A. Al-Nahari eds. *Innovative Systems for Intelligent Health Informatics. IRICT 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70713-2_54
 38. Sharifi, S., Aghkhani, M. H., & Rohani, A. (2024). Investigation of Brown Rice Losses in the Drying Process. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2). (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69208.1026>
 39. Sharma, D. K., & Jana, R. K. (2009). Fuzzy Goal Programming Based Genetic Algorithm Approach to Nutrient Management for Rice Crop Planning. *International Journal of Production Economics*, 1(1), 12. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.009>
 40. Shukla, A. K. (2020). Multi-Population Adaptive Genetic Algorithm for Selection of Microarray Biomarkers. *Neural Computing and Applications*, 32(15), 11897-11918. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04671-2>
 41. Taheri-Rad, A., Khojastehpour, M., Rohani, A., & Khoramdel, S. (2017). Assessing the Energy Consumption Efficiency of Different Long Grain Rice Varieties in Golestan Province. *Cereal Research*, 7(1), 51-66. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22124/c.2017.2428>
 42. Taki, M., & Farhadi, R. (2021). Application of Artificial Neural Network Models (MLP and RBF) and Support Vector Machine (SVM) to Estimate the Shadow in Flat-Plate Solar Collectors in Iran. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 52(2), 197-209. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2021.310127.665339>
 43. Van-Hung, N., Sander, B. O., Quilty, J., Balingbing, C., Castalone, A. G., Romasanta, R., Alberto, M. C. R., Sandro, J. M., Jamieson, C., & Gummert, M. (2019). An Assessment of Irrigated Rice Production Energy Efficiency and Environmental Footprint with In-field and Off-field Rice Straw Management Practices. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53072-x>
 44. Wan, S., Chang, S. H., Peng, C. T., & Chen, Y. K. (2017). A Novel Study of Artificial Bee Colony With Clustering Technique on Paddy Rice Image Classification. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(9), 215. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2992-2>
 45. Wang, Y., Wu, P., Mei, F., Ling, Y., Qiao, Y., Liu, C., Leghari, S. H., Guan, X., & Wang, T. (2021). Does Continuous Straw Returning Keep China Farmland Soil Organic Carbon Continued Increase? A Meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 288, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112391>
 46. Yang, X. S. (2013). Optimization and metaheuristic algorithms in engineering. PP 1-23 in A. H. Gandomi S. Talatahari and A. H. Alavi eds. *Metaheurstics in Water, Geotechnical and Transport Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398296-4.00001-5>
 47. Yarpiz. (2021). Bees Algorithm (BeA) in MATLAB: MATLAB Central File Exchange.
 48. Yodkhum, S., Sampattagul, S., & Gheewala, S. H. (2018). Energy and Environmental Impact Analysis of Rice Cultivation and Straw Management in Northern Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(18), 17654-17664. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1961-y>
 49. Zeng, S., Wu, T., Hu, L., Tang, L., & Liu, S. (2019). Crop Row Detection by ABC Clustering Algorithm in Paddy. *International Agricultural Engineering Journal*, 28(1), 304-309.

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 165-177

Construction and Performance Evaluation of a Flow Meter Based on Thermal Pulse to Measure Plant Sap Flow in Vascular Tissues

M. Teimorzadeh¹, J. Baradaran Motie^{1*}, A. Rohani¹, Y. Selahvarzi²

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: j.baradaran@um.ac.ir)

Received: 19 February 2023

Revised: 18 April 2023

Accepted: 20 April 2023

Available Online: 26 February 2025

How to cite this article:Teimorzadeh, M., Baradaran Motie, J., Rohani, A., & Selahvarzi, Y. (2025). Construction and Performance Evaluation of a Flow Meter Based on Thermal Pulse to Measure Plant Sap Flow in Vascular Tissues. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 165-177. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.81221.1150>

Introduction

Neglecting the water requirements of trees can result in inefficient irrigation practices, leading to either water wastage or drought stress. Effective irrigation management necessitates precise information on the quantity and pattern of water consumption by trees. To achieve optimal irrigation, a reliable method for quantifying plant water needs is crucial, ensuring that trees avoid drought stress. Current methods for assessing tree water requirements often focus on specific components, such as stems or leaves. These techniques typically require manual intervention, which is time-consuming and resource-intensive, thereby restricting their application mainly to research environments.

Materials and Methods

A sap-flow meter device was developed to generate a heat pulse in a tree trunk at 15-minute intervals. The device comprises measuring probes, a processing unit, and a data logger. For a comprehensive evaluation, device probes were positioned on the trunk of a *Ficus benjamina* tree within a controlled environment at two distinct heights. The resulting sap flow through the vascular tissue was then compared to data obtained using the lysimetric method. The *Ficus benjamina* tree, with a trunk diameter of 3.5 cm and a height of 196 cm, was prepared during the summer of 2022. By measuring the rate of heat pulse dissipation and applying heat transfer principles, sap flow is estimated under the assumption that heat transfer occurs primarily through the sap flow within the vascular tissue. This estimation was achieved using the heat ratio method (HRM).

The trunk was triple drilled with holes of 1.5 mm in diameter and 25 mm in depth. Following drilling, the probes were inserted into these holes (Figure 1). To prevent heat transfer from the probes to the surrounding environment, the trunk was wrapped with glass wool insulation. To assess the reliability of the device, the lysimetric method was employed to measure tree transpiration. For this purpose, the soil surface of the pot was covered with cellophane to ensure that evaporation and weight loss of the pot occurred exclusively through the tree's leaves. Hourly measurements of the pot's weight were taken using a digital scale. Changes in the pot's weight indicate the amount of water evaporated, which corresponds to the water transpired by the tree through its vascular tissue.

Results and Discussion

The results showed that the sap-flow meter device slightly overestimates the tree's water consumption compared to the values obtained using the lysimetric method. Sap flow and transpiration follow a similar trend, both escalating throughout the day and reaching their highest levels in the early afternoon. This value reached



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.81221.1150>

17.98 ml h⁻¹ for sap flow and 16 ml h⁻¹ for transpiration (by lysimetric method), followed by a rapid decrease in the late afternoon as the air cooled down. In addition, the results of device measurements showed that spraying water on the leaves lowers both the rate and volume of sap flow. When the canopy becomes wet, the evaporation of water from the leaf surface leads to a drop in the temperature, which in turn significantly slows down the flow of sap.

The v_1/v_2 ratio is not constant over time, making it crucial to choose the right starting point for measurements to ensure effective data acquisition during the device's operational cycle. It is essential to measure (by the device) the difference between temperature probes 40 seconds after heat pulse generation. The sap flow and transpiration followed a similar trend during the experiments. The sap flow and transpiration increased throughout the day, peaking in the early afternoon. On the first day, sap flow reached 17.98 ml h⁻¹, while the second day recorded an even higher rate of 19.75 ml h⁻¹. Correspondingly, the transpiration measured using the lysimetric method peaked at 16 ml h⁻¹, followed by a rapid decline in the late afternoon.

Conclusion

The results obtained from the developed device indicate several key findings. Sap flow and transpiration exhibit a similar trend during the test period, with the estimated sap flow value being approximately 30% higher than that obtained using the lysimetric method. The device effectively demonstrated the impact of surface irrigation; spray irrigation influences the sap flow rate such that when the canopy becomes wet, the sap flow rate decreases significantly. Additionally, sap flow and transpiration are positively correlated with air and canopy temperatures, and negatively correlated with relative humidity. Following calibration, the results show that the heat pulse method can accurately and effectively measure sap flow in the vascular tissue of trees.

Keywords: Heat ratio method, Lysimetric, Sap flow, Water tension

ساخت و ارزیابی عملکرد یک جریان‌سنج مبتنی بر پالس حرارتی برای اندازه‌گیری دبی شیره گیاهی در بافت‌های آوندی

مجید تیمورزاده^۱، جلال برادران مطیع^{۱*}، عباس روحانی^۱، یحیی سلاح ورزی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱

چکیده

آبیاری دقیق درختان مستلزم در دسترس بودن اطلاعاتی از میزان و نحوه مصرف آب توسط آن‌ها است. عدم توجه به نیاز آبی درختان می‌تواند منجر به هدررفت آب و یا بروز تنش آبی در آن‌ها شود که می‌توان با به‌دست آوردن سرعت جریان شیره در بافت آوندی درخت مقدار آب مصرفی گیاه را تخمین زد. در این پژوهش، دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای مبتنی بر روش نسبت گرمایی قابل‌نصب بر روی تنه درختان ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. دستگاه از بخش‌های کاوشگر اندازه‌گیری، واحد پردازنده داده و ثبت‌کننده داده تشکیل شده است. به‌منظور ارزیابی، کاوشگر بر روی تنه یک نمونه درخت فیکوس بنجامین در محیط کنترل‌شده دما و رطوبت، در دو ارتفاع متفاوت نصب شد. نتایج جریان شیره اندازه‌گیری‌شده توسط دستگاه با داده‌های به‌دست‌آمده از روش لایسیمیتری مقایسه گردید. همچنین، اثرات روز و شب، مرطوب کردن سطح برگ و آبیاری در تغییرات جریان شیره بررسی شد. نتایج نشان داد دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای میزان مصرف آب درخت را نسبت به مقدار به‌دست‌آمده از روش لایسیمیتری با ۳۰ درصد بیش برآوردی اندازه‌گیری می‌کند که این درصد اختلاف با کالیبره کردن دستگاه و اصلاح ضرایب اختصاصی درخت، قابل‌رفع می‌باشد. نمودار جریان شیره‌ای و تفرق از یک روند مشابه پیروی می‌کنند به‌طوری که در طول روز مقدار جریان شیره و تفرق افزایش‌یافته و در اواسط ظهر به اوج مقدار خود برای جریان شیره $17/98 \text{ ml h}^{-1}$ و برای تفرق 16 ml h^{-1} رسید و سپس در بعد از ظهر با خنک شدن هوا کاهش سریعی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، جریان شیره‌ای، روش نسبت گرمایی، لایسیمیتری

مقدمه

افزایش دما و یا هجوم آفات وقتی با تنش آبی ترکیب شود، اثر چند برابری بر کاهش رشد درخت بر جا می‌گذارد که بیشتر از اثر تنش آبی و یا حمله حشرات به‌تنهایی است (Deihimfard, Mahallati, & Koocheki, 2015; Heidari, Omid, & Mohammadi, 2012; Kalankesh, Zazouli, Susanto, & Babanezhad, 2021).

یکی از اثرات سوء تنش آبی بر درختان و گیاهان، رشد ضعیف و کاهش باروری در آن‌ها می‌باشد. لذا لازم است تنش آبی در درختان به‌موقع تشخیص داده شده و آبیاری انجام شود. با وجود خشکسالی‌های پی در پی به‌منظور کاهش مصرف آب در بخش باغی، روش‌هایی با عنوان کم‌آبیاری، با اعمال سطح مشخصی از تنش آبی پیشنهاد می‌شود (Alizadeh, Toudeshki, Ehsani, & Wang, 2021). مدیریت و کنترل دقیق سطح تنش آبی اعمال‌شده به گیاه، برای جلوگیری از افت شدید محصول، ضروری است. برنامه‌ریزی دقیق آبیاری می‌تواند ضمن حفظ آب در محصولات درختی، عملکرد را افزایش دهد. تنش آبی در درختان باعث کاهش فتوسنتز شده که خود موجب کاهش تفرق گیاه می‌گردد.

تنش آبی در اثر کمبود آبیاری یا عدم دسترسی آب به گیاهان به‌وجود می‌آید. به عبارتی دیگر کم و زیاد شدن میزان آب می‌تواند بر تمامی فعالیت‌های گیاهان تأثیرگذار باشد و ساختار گیاهان را مورد تغییر قرار دهد. زمانی که آب کافی در دسترس درخت باشد، افزایش دما می‌تواند اثر مثبتی بر رشد درخت داشته باشد. زمانی که درخت در تنش آبی نیست حشرات و آفات اثر غیرقابل‌توجهی بر درختان دارند یا به‌طور کلی فاقد اثر مشخصی بر درختان هستند زیرا سیستم دفاعی درخت در برابر آفات با وجود تنش آبی تضعیف می‌گردد. همچنین

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: j.baradaran@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.81221.1150>

تنش شدید آبی می‌تواند باعث رشد محدود درختان و کاهش بهره‌وری در آن‌ها شود. علائم مهم تنش آبی گیاه تغییر رنگ شاخ و برگ به سبز و زرد روشن، ریزش برگ‌ها و ریزش گل‌ها و میوه‌ها می‌باشد (Alizadeh et al., 2021).

عبور آب و مواد مغذی از بافت آوندی چوب^۱ گیاه را جریان شیریه گویند. سلامت گیاه و همچنین میزان فتوسنتز آن در ارتباط مستقیم با میزان تبخیر و تعرق می‌باشد، تبخیر و تعرق نیز مستلزم انتقال آب از طریق جریان شیریه‌ای از سمت ریشه گیاه به سمت برگ‌ها است. روش‌های تعیین جریان شیریه کاربردهای زیادی در کشاورزی، باغبانی و جنگل‌داری دارد که با به‌دست آوردن نرخ جریان شیریه می‌توان برای تشخیص بحران تنش آبی در درختان تصمیم گرفت (Smith & Allen, 1996). کمی کردن میزان جریان شیریه در گیاهان چوبی و علفی به درک بهتر روابط آب و گیاه کمک می‌کند (Alizadeh et al., 2021). الگوهای روزانه در مصرف آب باعث کوچک شدن قطر و تورم ساقه، روزنه‌های سطح برگ و میزان تبخیر سطحی برگ‌ها در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز می‌شود که بر همین اساس روش‌های غیرمستقیمی شامل پرومتری، مخزن فشار و دندرومتر در بررسی تنش آبی استفاده می‌شود. روش پرومتری و مخزن فشار به دلیل داده‌برداری گسسته و نیاز به تهیه نمونه و فعالیتی محدود، پر هزینه نیازمند کالیبراسیون برای هر نمونه و تنها کاربرد تحقیقاتی دارند. دندرومترها ریز تغییرات در قطر ساقه ناشی از چرخه‌های انقباض و تورم را اندازه‌گیری می‌کنند که نشان‌دهنده تغییرات در محتوای آب گیاه است. همان‌طور که گیاهان تعرق می‌کنند، آب از ذخایر در بافت ریشه جمع‌آوری شده و از طریق بافت آوندی به برگ‌ها منتقل می‌شود. با این اتفاق، تنه یا ساقه منقبض می‌شود. هنگامی که تعرق کاهش می‌یابد یا متوقف می‌شود، آب همچنان از طریق سیستم ریشه وارد گیاه می‌شود (به شرطی که آب کافی در دسترس باشد) و با توزیع مجدد در گیاه باعث تورم بافت می‌شود. دندرومترها دستگاه‌های اندازه‌گیری نواری یا نقطه‌ای هستند. نوارهایی در اطراف محیط درخت پیچیده شده‌اند که انقباض و انقباض را از طریق حسگر موقعیت تشخیص می‌دهند. دستگاه‌های نقطه‌ای یک نقطه را روی سطح اندازه می‌گیرند (Ginestar & Castel, 1995). یک میله برای پایداری در مرکز تنه سوراخ می‌شود و میله دوم برای اندازه‌گیری در مقابل پوست قرار می‌گیرد. تفسیر داده‌های دندرومتر حداکثر انقباض روزانه^۲ و سرعت رشد ساقه^۳ متداول‌ترین معیارهایی هستند که استفاده می‌شوند. MDS میزان انقباض و انقباض ساقه را در یک چرخه ۲۴ ساعته اندازه‌گیری می‌کند. گیاهی که تحت تنش نباشد،

MDS کمتری نسبت به گیاهی دارد که تحت تنش است، نمودارهای MDS میزان رطوبت از دست‌رفته (تعرق) و همچنین میزان بازیابی (از آب موجود در ناحیه ریشه) اندازه‌گیری می‌کند همچنین SGR میزان رشد ساقه را از طریق چرخه انقباض و انقباض (۲۴ ساعته) اندازه‌گیری می‌کند (Fernández & Cuevas, 2010). کواچووا و همکاران (Kováčová, Bárek, & Kišš, 2020) تاثیر فیزیولوژیکی تنش آبی در گل آفتابگردان و ذرت با تغییرات دندرومتریکی گیاه را بررسی کردند. در این پروژه دندرومترهای خودکار نصب و اثر دو دوز آبیاری ۵ میلی‌متر در روز و ۵ میلی‌متر در فاصله ۳ روزه بر رشد آفتابگردان و ذرت در شرایط آزمایشگاهی بررسی گردید. مقایسه آفتابگردان و ذرت آبیاری‌شده در فواصل مختلف نشان داد که قطر ساقه‌ها در آبیاری یک روزه در مقایسه با ۳ روز به میزان ۰/۸ میلی‌متر (آفتابگردان) و ۱۲ میلی‌متر (ذرت) افزایش یافته است و نتیجه گرفتند که در طول آبیاری ۳ روزه چروکیدگی بیشتر ساقه‌ها رخ داده که نشان‌دهنده شروع تنش آبی برای محصولات زراعی است.

با فرض این که نرخ انتقال گرما بین دوقطه در بافت آوندی درخت متناسب با نرخ جریان شیریه‌ای می‌باشد (Burgess & Downey, 2018) این پژوهش با هدف تعیین مقدار جریان شیریه‌ای در بافت آوندی درختان به روش پالس حرارتی انجام شد. از جمله معایب عموم روش‌های اندازه‌گیری تنش آبی گیاهان کالیبراسیون روزانه برای هر درخت است. با توجه به معایب روش‌های گفته‌شده روش پالس حرارتی می‌تواند مناسب‌ترین روش برای پایش مداوم وضعیت نیاز آبی درختان انتخاب شود. همچنین با توجه به گران بودن دستگاه اندازه‌گیری جریان شیریه^۴ در درختان و نبود نمونه داخلی، در این پژوهش اقدام به ساخت و ارزیابی نمونه بومی این دستگاه شد. با استفاده از این دستگاه می‌توان، جریان شیریه را به‌عنوان شاخص تعرق معرفی کرد و با اندازه‌گیری آن، وضعیت تنش آبی درخت را به‌طور پیوسته در تمام طول ۲۴ ساعت بررسی و به مدیریت آبیاری بهتر درختان کمک کرد.

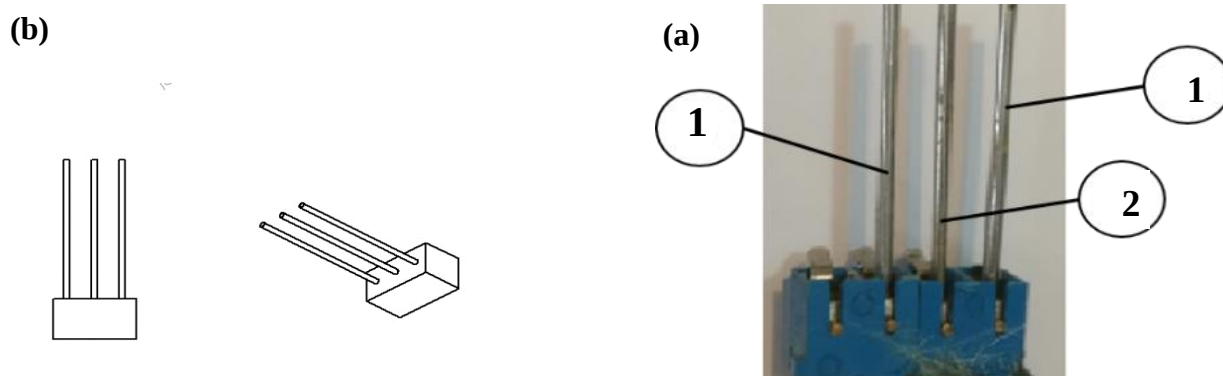
مواد و روش‌ها

اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه جریان‌سنج شیریه‌ای

دستگاه جریان‌سنج شیریه‌ای ساخته‌شده شامل مجموعه‌ای از سه کاوشگر^۵ اندازه‌گیری، واحد پردازش الکترونیکی و یک ثبت‌کننده داده می‌باشد. کاوشگر شامل سه بخش به طول ۳۵ میلی‌متر است که درون غلاف‌های از جنس فولاد ضدزنگ (استیل) به قطر ۱/۵ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. این مجموعه شامل دو کاوشگر اندازه‌گیری دما (شکل ۱-ا) و یک کاوشگر گرم‌کن (شکل ۱-ب) است.

- 1- Sap wood
- 2- Maximum Daily Shrinkage (MDS)
- 3- Stem Growth Rate (SGR)

4- Sap-flow meter
5- Probe



شکل ۱- (a) مجموعه کاوشگرها، (۱) ترموکوپل، (۲) گرم‌کن (b) شماتیکی از مجموعه کاوشگرها در نماهای متفاوت
Fig. 1. (a) The set of probes 1) thermocouples and 2) heater, and (b) the schematic of probes from different angles (values are in millimeters)

ورودی استفاده کند زیرا دارای یک رگلاتور داخلی برای تبدیل ولتاژ است. در این دستگاه برد پردازنده و ثبت‌کننده توسط کابل USB و یا منبع تغذیه داخلی دستگاه راه‌اندازی می‌شود. ولتاژ ورودی تغذیه برد از یک منبع تغذیه سوئیچینگ ۱۲ ولت ۵ آمپر مدل BS-037 برای تبدیل ولتاژ ۲۲۰ ولت برق شهری به ۱۲ ولت تامین شد. داده‌های اندازه‌گیری شده شامل دما هر کاوشگر، زمان و سرعت و دبی جریان شیره به‌طور مداوم روی یک کارت میکرو اس دی^۳ گیگابایتی ذخیره می‌شود. پردازنده دستگاه داده‌های دریافتی از کاوشگرها را که پس از ایجاد پالس گرمایی کوتاه‌مدت ایجاد شده‌اند به روش نسبت گرمایی مورد تحلیل قرار داده و سرعت جریان شیره و دبی جریان حجمی شیره در بافت آوندی را محاسبه می‌کند. روش نسبت گرمایی اصلاح‌شده روش پالس حرارت جبرانی است (Burgess & Downey, 2018). با اندازه‌گیری نسبت گرمای منتقل‌شده بین دو حسگر دما که به‌طور متقارن نسبت به گرم‌کن قرار گرفته‌اند، مقدار و جهت شار آب به‌دست می‌آید (Burgess & Downey, 2018). کاوشگرهای دستگاه می‌توانند بر روی تنه‌های چوبی با قطر بیشتر از ۳۰ میلی‌متر نصب شوند.

اندازه‌گیری و محاسبه سرعت پالس حرارتی

روش نسبت گرمای، نسبت افزایش دما را به دنبال انتشار یک پالس گرما که در نقاطی از پایین‌دست و بالادست یک گرم‌کن فاصله‌دارند را اندازه‌گیری می‌کند که از رابطه (۱) اندازه‌گیری می‌شود (Burgess & Downey, 2018).

برای ایجاد انرژی گرمایی لازم جهت افزایش دمای بافت آوندی به میزان ۲ درجه سلسیوس (Burgess & Downey, 2018)، در المان حرارتی از رشته سیم نیکل کروم به طول ۷۰ میلی‌متر در یک غلاف استیل به قطر ۱/۵ میلی‌متر استفاده شد. گرم‌کن به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با مقدار مقاومت ۱۵ اهم با ولتاژ ۱۲ ولت به مدت ۲ تا ۸ ثانیه تغذیه می‌شود و توانی به‌اندازه ۹/۶ وات ایجاد می‌کند. عموماً گرم‌کن‌ها به علت سایش و پارگی ناشی از گرما و سرمایش مکرر عمری محدود و غیرقابل‌پیش‌بینی دارند که برای برطرف کردن این مشکل و افزایش دوام گرم‌کن، سیم‌های گرم‌کن داخل غلاف فلزی قرار داده شد و با نوعی گچ مخصوص درون این غلاف فلزی محکم گردید. کاوشگرهای اندازه‌گیری دما شامل ترموکوپل نوع K می‌باشند و به‌طور مشابه درون غلاف استیل به قطر ۱/۵ میلی‌متر نصب شدند که جهت اندازه‌گیری دمای بالادست و پایین‌دست جریان شیره پس از اعمال پالس حرارتی استفاده می‌شوند. در شکل ۱ تصویر این کاوشگرها به شکل یک مجموعه سه عددی مشاهده می‌شود.

ثبت‌کننده داده^۱

در دستگاه جریان سنج شیره‌ای از یک برد آردینو^۲ مدل UNO R3 به‌عنوان پردازنده و ثبت‌کننده داده استفاده شد. برد آردینو یک برد متن‌باز مبتنی بر میکروکنترلر AVR است که مجهز به مجموعه‌ای از پین‌های ورودی و خروجی دیجیتال و آنالوگ می‌باشد. این برد با استفاده از نرم‌افزار Arduino IDE از طریق کابل USB قابل برنامه‌ریزی است. این برد ولتاژ بین ۵ تا ۲۰ را می‌تواند به‌عنوان

1- Data logger
 2- Arduino

3- Micro SD

علت آن این است که خواص حرارتی مواد حسگر با چوب متفاوت است. با قرار دادن دقیق کاوشگرها در تنه درخت این احتمال وجود دارد که فاصله کاوشگرها حداقل کمی نامتقارن باشد و باعث می‌شود که نسبت v_1/v_2 با زمان تغییر کند. در نتیجه زمان اندازه‌گیری بر نتایج حاصله تأثیر می‌گذارد. شکل ۲ نشان می‌دهد که نرخ تغییر نسبت v_1/v_2 به صورت تصاعدی با زمان (پس از پالس گرما) کاهش می‌یابد و نسبت‌های v_1/v_2 به صورت مجانبی به مقدار ایده‌آل نزدیک می‌شود. (Burgess & Downey, 2018).

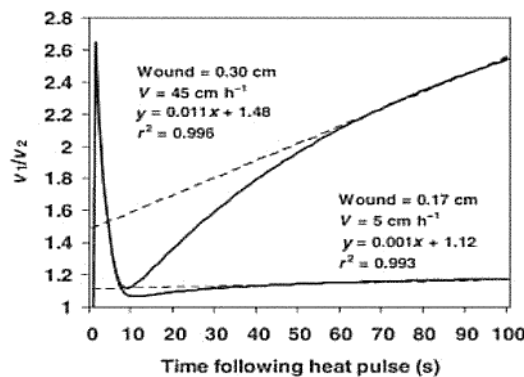
با توجه به پیش‌آزمون‌هایی که انجام شد نسبت v_1/v_2 در این نمونه درخت تقریباً بعد از ۴۰ الی ۱۰۰ ثانیه خطی است و در این آزمایش قرائت داده‌ها بعد از ۴۰ ثانیه انجام شد. برای این که سهم هر نویز سیگنال تصادفی در این آزمایش را به حداقل برسانیم در فاصله ۴۰ تا ۴۶ ثانیه بعد از خاموش شدن گرم‌کن داده‌ها هر ۰/۲ ثانیه قرائت کرده و در بازه‌های ۱ ثانیه ای میانگین گرفته شد.

$$v_h = \frac{k}{x} \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) 3600 \quad (1)$$

این رابطه اولین بار توسط مارشال (Marshall, 1958) بیان شد و در آن v_h سرعت پالس حرارتی (cm h^{-1})، k انتشار حرارتی در راستای الیاف چوب برحسب $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ و x فاصله بین گرم‌کن با هریک از کاوشگرهای دما برحسب cm است. v_1 و v_2 برحسب درجه سانتی‌گراد، افزایش دما (از دمای اولیه) در نقاط پایین‌دست و بالادست است که به فاصله برابر x سانتی‌متر از گرم‌کن می‌باشد. با توجه به فاصله ۰/۶ سانتی‌متری موقعیت کاوشگرهای دما نسبت به کاوشگر گرم‌کن، مقدار $x = 0.6$ سانتی‌متر و مقدار توصیه‌شده برای ضریب انتشار حرارتی $k = 0.0025 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1}$ است.

تأثیر زمان اندازه‌گیری

روند و مسیر انتقال حرارت در درخت با مسدود کردن و آسیب به آوندهای چوبی ناشی از قرار دادن کاوشگرها تغییر می‌کند. همچنین آشفته‌گی و برهم خوردن روند در انتقال حرارت نیز رخ می‌دهد که



شکل ۲- تغییرات مدل‌شده در نسبت‌های v_1/v_2 با گذشت زمان

Fig.2. The modeled changes in v_1/v_2 ratios over time (Burgess & Downey, 2018)

$$v_c = bv_h + cv_h^2 + dv_h^3 \quad (2)$$

که در آن v_c سرعت پالس حرارتی اصلاح‌شده (cm h^{-1})، b ، c و d ضرایبی هستند که می‌توان از جدول ۱ به‌دست آورد. مقدار دقیق قطر زخم یا قطر تایلوز پس از پایان آزمایشات با قطع تنه اندازه‌گیری شد.

تئوری اصلاح زخم

نصب کاوشگرها در بافت آوند چوبی باعث آسیب مکانیکی قابل توجهی می‌شود. علاوه بر قطع شدن مسیرهای جریان، مسیرهای دست‌نخورده هم ممکن است مسدود شوند، زیرا گیاه با تشکیل تایلوزها^۱ به زخم پاسخ می‌دهد. ناحیه حاصل از چوب نارسانا در اطراف محل کاوشگر بر اندازه‌گیری v_h با کاهش v_1/v_2 تأثیر می‌گذارد و رابطه (۲) برای v_h اصلاح می‌شود (Burgess & Downey, 2018).

۱- تایلوز یک سلول پارانشیمی بادکنکی شکلی است که از طریق منافذ سطح غشا به درون آوند راه می‌یابد و باعث کاهش هدایت آب در گیاه می‌شود.

جدول ۱- ضرایب تصحیح برای اثر تیلوزها

Table 1- Correction factor for the effect of tyloses (Burgess & Downey, 2018)

قطر زخم (سانتی‌متر) Wound diameter (cm)	b	c	d
0.17	1.6565	-0.0014	0.0002
0.18	1.7070	-0.0014	0.0002
0.19	1.7701	-0.0017	0.0002
0.2	1.8292	-0.0019	0.0003
0.21	1.8909	-0.0022	0.0003
0.22	1.9554	-0.0025	0.0004
0.23	2.0226	-0.0029	0.0004
0.24	2.0685	-0.0031	0.0005
0.26	2.1932	-0.0038	0.0006
0.28	2.3448	-0.0047	0.0008
0.3	2.4908	-0.0057	0.001

تعیین سرعت شیره

فقط بخشی از بافت آوند چوبی حاوی شیره متحرک است. کاوشگرهای پالس حرارتی به‌طور مؤثر میانگین وزنی سرعت شیره متحرک و چوب را اندازه‌گیری می‌کنند. سرعت شیره را می‌توان با اندازه‌گیری بخش‌های شیره و چوب در آوند چوبی و محاسبه چگالی‌های متفاوت و ظرفیت‌های حرارتی ویژه آن‌ها بر اساس مقادیر واقعی از رابطه (۳) تعیین کرد (Burgess & Downey, 2018).

$$v_s = \frac{v_c \rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} \quad (3)$$

که در این رابطه v_s سرعت جریان شیره ($cm \ h^{-1}$)، ρ_b چگالی چوب (چگالی بر پایه وزن خشک)، c_s و c_w به‌ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه ماتریس چوب $1200 \ J \ kg^{-1}$ در 20 درجه سانتی‌گراد و جریان شیره $4182 \ J \ kg^{-1}$ در 20 درجه سانتی‌گراد، m_c محتوای آب چوب، ρ_s چگالی آب و v_s سرعت جریان شیره ($cm \ h^{-1}$) است. همچنین جریان حجمی را می‌توان به‌راحتی به‌عنوان حاصل‌ضرب سرعت شیره و سطح مقطع قسمت بافت آوندی به‌دست آورد (رابطه ۴). چگالی چوب و محتوای آب چوب پس از پایان دوره آزمایش با قطع درخت و تهیه نمونه چوب در آزمایشگاه به‌ترتیب به روش غوطه‌وری و خشک کردن در آون اندازه‌گیری شد.

$$Q = v_s A \quad (4)$$

که در آن: v_s سرعت جریان شیره ($cm \ h^{-1}$)، A سطح مقطع بافت آوندی (cm^2) و Q جریان حجمی عبوری ($cm^3 \ h^{-1}$) از درخت است.

آماده‌سازی نمونه

گیاه فیکوس بنجامین (*Ficus Benjamina*) رقم وندی^۱ و میانگین قطر تنه $3/5$ سانتی‌متر با ارتفاع 196 سانتی‌متر از گلخانه

گروه باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در تابستان 1401 تهیه گردید. به‌منظور نصب دستگاه بر روی تنه درخت از یک صفحه تفلونی با سه سوراخ به فاصله $0/6$ سانتی‌متر به‌عنوان شابلون سوراخ‌کاری استفاده شد و تنه توسط مته‌ای به قطر $1/5$ میلی‌متر به اندازه طول کاوشگرها سوراخ گردید. بعد از سوراخ‌کاری، کاوشگرها توسط مقدار اندکی گریس چرب شد تا راحت‌تر وارد سوراخ‌ها شده و تنشی به بافت آوند وارد نکند. برای حذف هرگونه تبادل گرمایی بین کاوشگرها و محیط اطراف به‌منظور حداقل رساندن خطا، بخش محل نصب کاوشگرها توسط پشم شیشه عایق شد (شکل ۳). اعتبارسنجی نتایج جریان شیره و دبی حجمی با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج روش لایسیمتری انجام شد. در این روش تغییرات وزن گلدان حاوی درخت فیکوس بنجامین در طول دوره آزمون توسط ترازوی دیجیتال مدل ACS-30-JC31 ساخت کشور چین با دقت 1 گرم قرار گرفت و به فاصله زمانی هر یک ساعت گلدان وزن شد تا تغییرات آب گیاه که از طریق تبخیر و تعرق از برگ‌های درخت با محیط انجام می‌شود را اندازه بگیرد. بدین منظور ابتدا سطح خاک گلدان توسط سلفون کامل پوشانده شد تا از سطح خاک با محیط هیچ‌گونه تبخیری صوت نگیرد و فقط تغییرات وزن، ناشی تبخیر از برگ‌های درخت باشد (Uddin, Smith, Hancock, & Foley, 2014).

دستگاه جریان‌سنج شیره‌ای به قسمتی از تنه درخت وصل شد و شروع به داده‌برداری کرد این آزمایش در دو ارتفاع در قسمت‌های مختلف تنه انجام گردید و در هر بار به مدت 48 ساعت توسط دستگاه به فاصله زمانی 15 دقیقه یک‌بار سرعت پالس گرما ایجاد و داده‌ها ثبت گردید. اندازه‌گیری مستمر وزن درخت جهت تعیین میزان تبخیر به روش لایسیمتری انجام گرفت. سپس سرعت پالس حرارتی طبق رابطه‌های (۳) و (۴) به‌سرعت شیره و جریان شیره تبدیل شدند. به‌منظور آبیاری گلدان از روش قطره‌ای به زیر سلفون از طریق یک شلنگ انعطاف‌پذیر آب وارد شد.



شکل ۳- عایق کاری محل اتصال کاوشگرها توسط پشم‌شیشه

Fig.3. Glass wool insulation at the connection point of the probes with the tree

نتایج و بحث

الگوی روزانه جریان شیرهای و تعرق (لایسیمتری)

الگوی روزانه یک‌ساعته جریان شیرهای (دستگاه جریان‌سنج) و تعرق (روش لایسیمتری) در درخت فیکوس بنجامین در شکل ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. مطابق با این شکل‌ها، جریان شیرهای و تعرق از یک‌روند مشابه در طول دوره داده‌برداری پیروی می‌کنند به‌طوری‌که جریان شیرهای و تعرق در طول روز افزایش یافته و در اواسط ظهر به اوج مقدار خود می‌رسد. جریان شیر در روز اول ($1401/6/20$) برابر با $17/98 \text{ ml h}^{-1}$ و در روز دوم ($1401/6/21$) $19/75 \text{ ml h}^{-1}$ اندازه‌گیری شد. همچنین میزان تعرق به روش لایسیمتری در هر دو روز به مقدار 16 ml h^{-1} رسید و به دنبال آن در اواخر بعدازظهر کاهش سریعی داشته است. داده‌برداری برای تعرق در طول شب انجام نشد که به‌صورت گسستگی در نمودار دیده می‌شود (شکل ۴). شکل ۵ مقایسه جریان شیر و تعرق در ارتفاعی بالاتر از آزمایش اول است. همچنین این نمودار دارای دو قله می‌باشد به‌طوری‌که قله تشکیل شده در روز $1401/6/29$ (شکل ۵) بزرگ‌تر از قله تشکیل شده از قله در روز $1401/6/28$ (شکل ۶) می‌باشد این اختلاف به این دلیل است که در روز $1401/6/29$ درخت توسط آبیاری قطره‌ای آبیاری شده است و مقدار آب کافی برای تعرق داشته است. همچنین مقدار جریان شیر تخمین زده از مقداری واقعی کمی بیشتر است که این اختلاف به‌خاطر این است که جریان شیرهای در راستای شعاعی آوندهای چوبی یکنواخت نیست. مقدار جریان شیر از

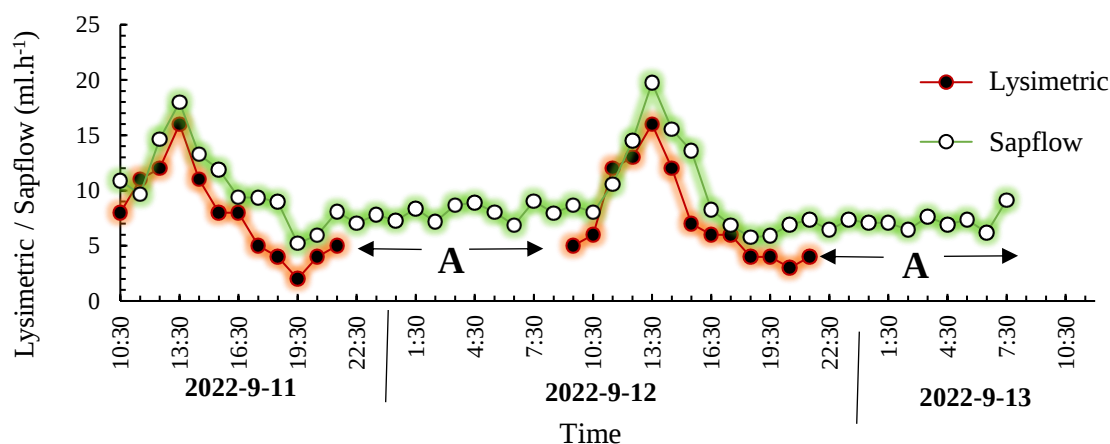
مقداری نزدیک به صفر در ناحیه پوست درخت شروع شده و حداکثر آن در حلقه آوندهای جدید می‌باشد، این مقدار به سمت مرکز تنه مجدد به صفر میل می‌کند. در این پژوهش محل قرارگیری حسگر دماسنج در بخشی قرار می‌گیرد که حداکثر نرخ جریان شیر را می‌سجد. لذا به دلیل این که روش نسبت گرمایی نرخ شعاعی جریان شیر ثابت فرض می‌شود، این اتفاق موجب بیش‌برآوردی نسبت به مقدار لایسیمتر می‌شود. دوگاس (Dugas, 1990) ضمن مقایسه جریان شیر در ساقه گیاه پنبه به روش پالس حرارتی جبرانی و روش لایسمتری در گلخانه نتایج مشابهی درخصوص افزایش میزان جریان شیر در طول روز و همچنین اختلاف جزئی بین دو روش اندازه‌گیری را گزارش کرد. برجس و همکاران (Burgess et al., 2001) با انجام روش مشابه (روش HRM) بروی درخت اکالیپتوس مارجیناتا^۱ به نتایج مشابهی رسیدند.

شکل ۶ سرعت پالس حرارتی در تنه درخت را در فاصله زمانی هر ۱۵ دقیقه نشان می‌دهد. تغییرات بدین گونه است که از یک‌روند مشابه در طول دوره (روز اول و دوم) پیروی می‌کند به‌گونه‌ای که سرعت پالس حرارتی در طول روز افزایش یافته و تا اواسط ظهر به بیشترین مقدار خود در روز $1401/6/20$ ، $14/21 \text{ cm h}^{-1}$ و روز $1401/6/21$ $17/81 \text{ cm h}^{-1}$ رسیده و به دنبال آن در اواخر بعدازظهر کاهش پیدا می‌کند. یکی از نقاط قوت این روش نسبت به سایر روش‌هایی مانند پالس حرارتی جبرانی، بهبود محدوده اندازه‌گیری (جریان‌های کم و

1- Eucalyptus marginata

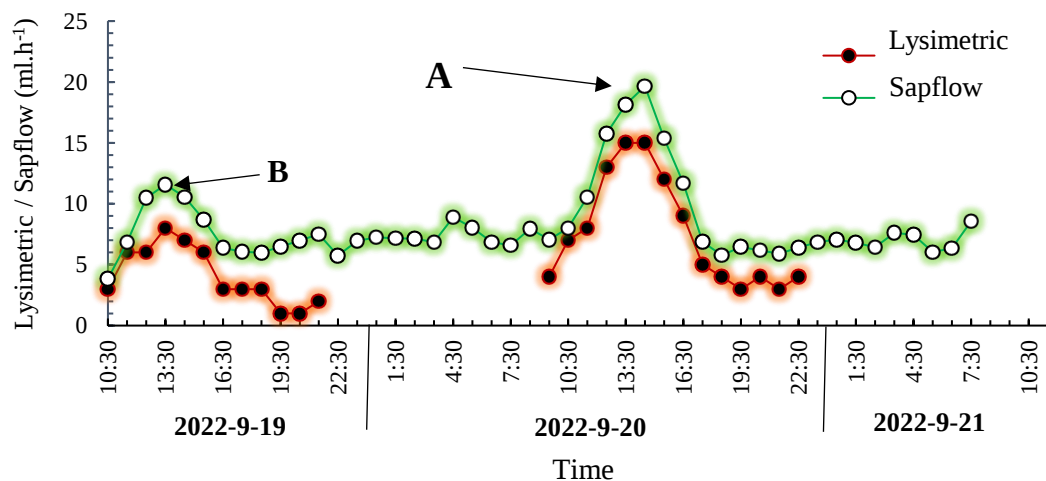
می‌تواند در روز نمایان شود به شرطی که درخت تحت تنش آبی باشد تا روزه‌های برگ مسدود شود و از تبخیر آب از سطح برگ جلوگیری کند.

معکوس) می‌باشد (Burgess et al., 2001). در شکل ۶ نقاط A و B محدوده‌هایی است که در شب مقدار سرعت پالس حرارتی منفی شده است و جریان معکوس شده را نشان می‌دهد. این بدین معناست که جهت شار جریان از سمت تنه به ریشه می‌باشد. البته مقدار منفی هم



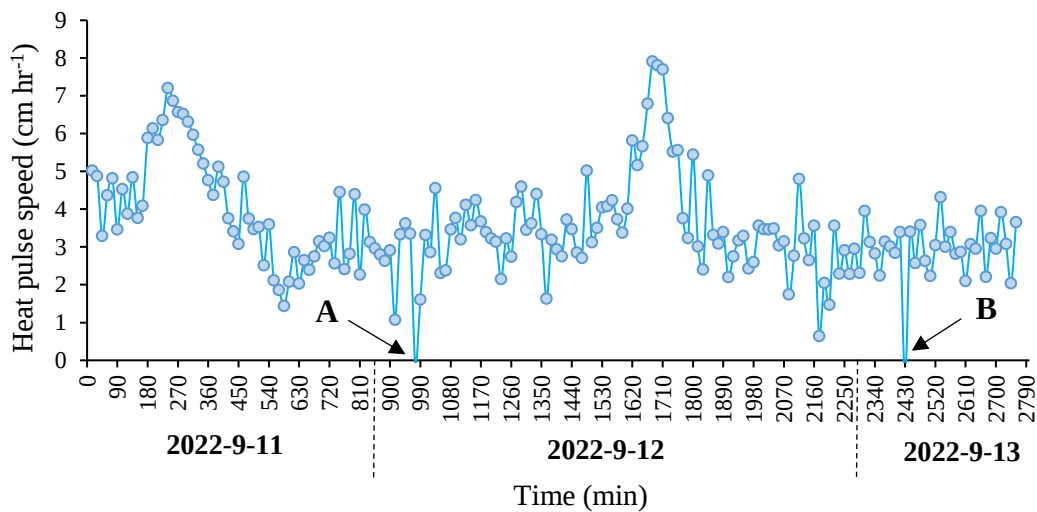
شکل ۴- الگوی روزانه جریان شیرهای اندازه‌گیری شده به روش نسبت گرمایی (HRM) و اندازه‌گیری لایسمتری در بازه زمانی یک ساعته و بازه‌ی A نبوده داده در زمان شب به علت عدم دسترسی به آزمایشگاه

Fig.4. The daily pattern of the sap flow measured by HRM and lysimetric measurement in a one-hour period; no lysimetric measurements for periods marked with A were recorded due to lack of access to the laboratory at night



شکل ۵- الگوی روزانه جریان شیرهای اندازه‌گیری شده به روش نسبت گرمایی (HRM) و اندازه‌گیری لایسمتری در بازه زمانی یک ساعته در ارتفاع نصب بالاتر روی تنه درخت، A و B اوج جریان شیره.

Fig.5. Daily pattern of sap flow, measured hourly using the HRM method and lysimetric measurement at higher installation place, A and B mark peak sap flow.



شکل ۶- الگوی تغییرات سرعت پالس حرارتی به روش نسبت گرمایی (HRM) در درخت فیکوس بنجامین در بازه زمانی ۱۵ دقیقه، A و B نقاطی که جریان شیرهای معکوس شده

Fig.6. The pattern of changes in the speed of the thermal pulse by the heat ratio method (HRM) in the Ficus Benjamina tree in a period of 15 minutes; A and B are the points where the sap flow is reversed

روشن شدن گرم‌کن دمای جریان شیره حدود ۱۱ الی ۲ درجه افزایش و به اوج خود می‌رسد و در انتها بعد حدود ۱۵ دقیقه به دمای اولیه خود باز می‌گردد.

یکی از علل انتخاب دوره زمانی داده‌برداری در هر ۱۵ دقیقه این است که در طول این ۱۵ دقیقه گرمای افزایش یافته به دمای اولیه خود باز می‌گردد و هیچ گرمای ماندی در چوب اطراف کاوشگرها باقی نمی‌ماند تا باعث ایجاد خطا در آزمایش گردد. نکته دیگری که در شکل ۸ به خوبی قابل نمایش نیست و می‌توان رسم نمودار دمای ترموکوپل پایین‌دست در دوره زمانی یک ثانیه در یک بازه زمانی یک‌ساعته (شکل ۹) به آن پی برد، این است که زمانی که گرم‌کن روشن می‌شود و تا پایان خاموش شدن گرم‌کن دمای حس شده توسط ترموکوپل کاهش می‌یابد و افزایش دما بعد از خاموش شدن گرم‌کن می‌باشد (شکل ۹). دلیل این امر می‌تواند این باشد که زمانی که گرم‌کن روشن می‌شود باعث ایجاد یک شوک به جریان شده و جریان با سرعت بیشتری به سمت برگ‌ها می‌رود و جریان خنک‌تر وارد محدوده کاوشگرها شده و دمای ترموکوپل‌ها را کاهش می‌دهد.

اثر خیس شدن تاج‌پوش بر جریان شیره

در طول آزمایش در ساعت‌های ۱۳:۳۰ هر روز تاج‌پوش درخت (در آزمایش اول) توسط اسپری آبیاری شد. این نوع آبیاری بر سرعت جریان شیره تأثیر می‌گذارد به‌طوری‌که با خیس شدن تاج‌پوش تبخیر آب از سطح برگ از همان آب سطحی صورت می‌گیرد و سرعت

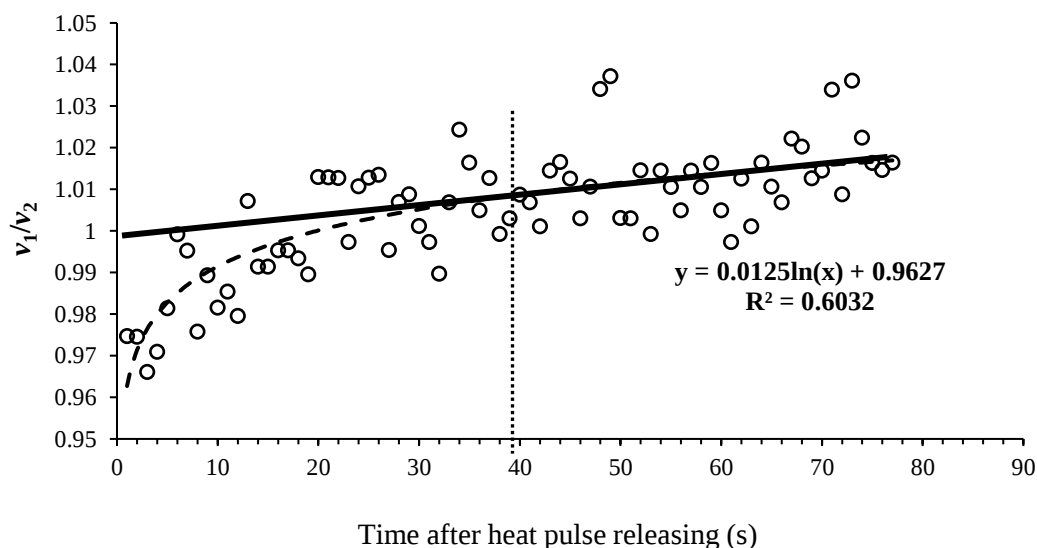
تأثیر زمان ثبت داده‌های دما

شکل ۷ تغییرات نسبت v_1/v_2 را به زمان بعد از آزادسازی پالس حرارتی نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتایج زیر را به‌دست آورد. نرخ تغییر در نسبت v_1/v_2 بعد از ۴۰ ثانیه بسیار کوچک می‌شود و روند نسبت v_1/v_2 به‌طور خطی خواهد بود. همچنین حداقل بعد از ۴۰ ثانیه بعد از آزادسازی پالس حرارتی اندازه‌گیری‌ها می‌تواند انجام شود. چراکه الگوی انتقال حرارت با مسدود کردن و آسیب به آوندهای چوبی ناشی از قرار دادن کاوشگرها تغییر می‌کند. اختلال اضافی در انتقال حرارت به‌خاطر متفاوت بودن خواص حرارتی مواد حسگر (جنس استیل) و چوب می‌باشد در نتیجه برای انتقال حرارت به حسگرها نیاز به زمان بیشتری است. برای این که سهم هر نویز از سیگنال تصادفی در اندازه‌گیری‌ها کم شود میانگین چند داده بعد از زمان ۴۰ ثانیه انجام ثبت شد. همچنین برجس و همکاران نتایج مشابه در مورد اهمیت زمان اندازه‌گیری گزارش کردند (Burgess et al., 2001).

اثر آزاد شدن انرژی پالس حرارتی بروی دمای جریان شیرهای

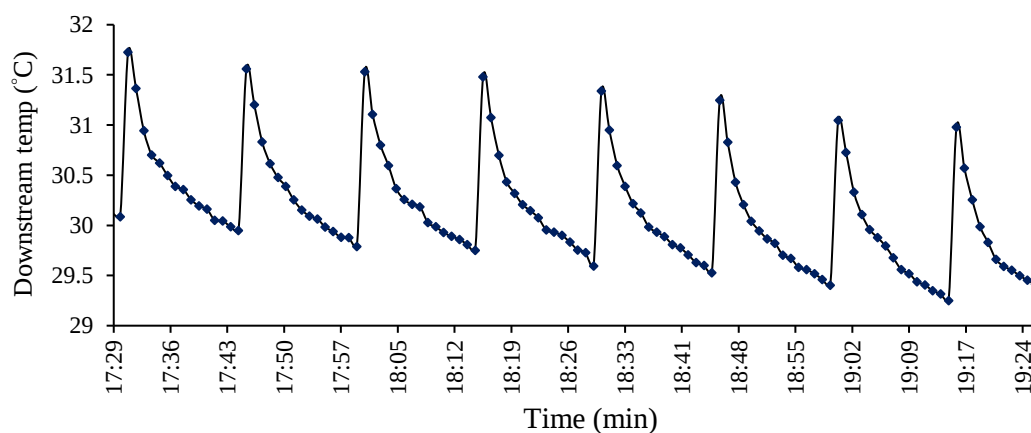
حداقل افزایش دما در اطراف کاوشگرها برای روش نسبت گرمایی ۰/۵ درجه سانتی‌گراد است (Burgess & Downey, 2018). شکل ۸ نمودار دمای ترموکوپل پایین دست جریان (از نظر ارتفاع ترموکوپل بالا) را در بازه زمانی دوساعته نمایش می‌دهد. بعد از

جریان شیره کاهش محسوسی پیدا می‌کند. در شکل ۱۰، نقاط A و B زمان‌های آبیاری می‌باشد. در نقاط A و B که تاج‌پوش آبیاری شده، شیب روند کاهش بیشتری پیدا کرده (مقدار جریان کاهش یافته) و در ساعت بعد به روند خود برگشته است.



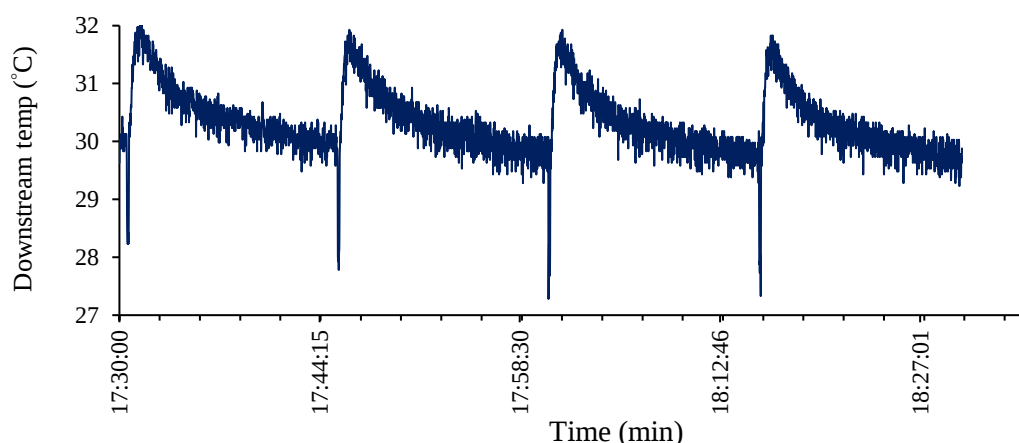
شکل ۷- تغییرات نسبت v_1/v_2 به روش نسبت گرمایی (HRM) برای درخت فیکوس بنجامین با عرض زخم ۰/۲۱ سانتی‌متر در زمان بعد از آزاد شدن پالس حرارتی

Fig.7. Changes in the v_1/v_2 ratio by the heat ratio method (HRM) for the Ficus Benjamina tree with a wound width of 0.21 cm in the time after the release of the thermal pulse



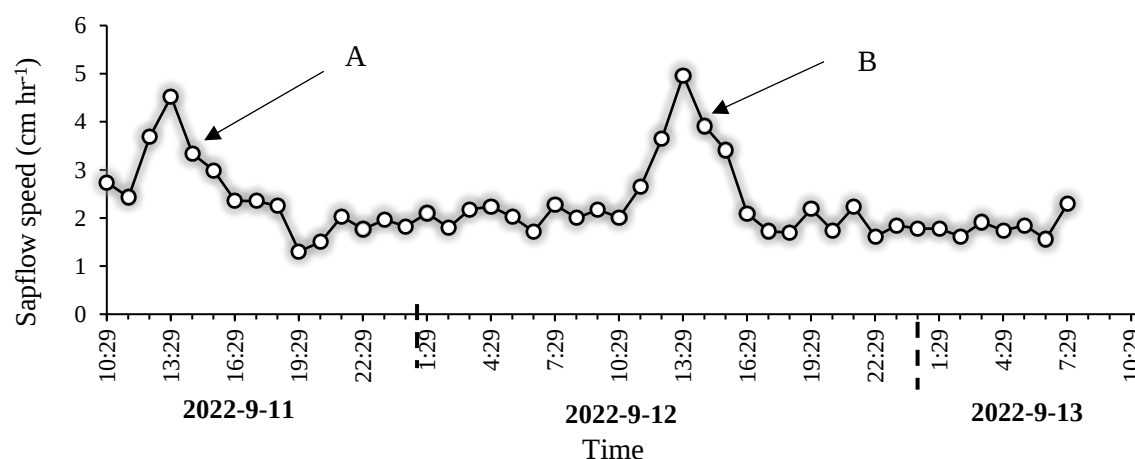
شکل ۸- نمودار دمای دماسنج پایین‌دست در یک بازه زمانی دوساعته در روز اول (۱۴۰۱/۶/۲۰)

Fig.8. Temperature graph of downstream thermometer over a two-hour period on the first day (September 11, 2022)



شکل ۹- تغییرات دمای دماسنج پایین دست در بازه یک ساعته با دوره یک ثانیه

Fig.9. Temperature of the downstream thermometer over a one-hour period with one-second intervals between the readings



شکل ۱۰- الگوی سرعت جریان شیره با دوره یک ساعته در بازه، A و B اثر آبیاری پاششی تاج پوش

Fig.10. Sap flow rate pattern with hourly readings, with A and B showing the effect of water moisture on the leaves

بعد از خاموش شدن گرم کن می باشد.

نتیجه گیری

دستگاه توانست اثر آبیاری سطحی را به خوبی نشان دهد، آبیاری توسط اسپری بر سرعت جریان شیره تأثیر می گذارد به طوری که با خیس شدن تاج پوش تبخیر آب از سطح برگ از همان آب اسپری شده است و سرعت جریان شیره کاهش محسوسی پیدا می کند. جریان شیره و تعرق با دمای هوا، دمای تاج پوش نسبت مستقیم و با رطوبت نسبی نسبت معکوس دارد.

مشارکت نویسندگان

مجید تیمورزاده: جمع آوری داده، پردازش داده، استخراج متن اولیه
جلال برادران مطیع: نظارت و مدیریت، مفهوم شناسی، تحلیل

با توجه به نتایج به دست آمده، موارد زیر از دستگاه ساخته شده استنتاج می شود، جریان شیره ای و تعرق از یک روند مشابه در طول دوره آزمایش پیروی می کنند و مقدار جریان شیره تخمین زده از مقدار واقعی به دلیل یکنواخت فرض کردن سرعت شیره در راستای شعاعی تنه، کمی بیشتر است. محدوده هایی که در شب مقدار سرعت پالس حرارتی منفی شده است و جریان معکوس شده، بدین معناست که جهت شار جریان شیره از سمت تنه به ریشه می باشد که در اثر بسته شدن روزنه های برگ و عدم مکش شیره از سمت تاج پوش است. همچنین زمانی که گرم کن روشن می شود و تا پایان خاموش شدن گرم کن دمای حس شده توسط ترموکوپل کاهش می یابد و افزایش دما

آماري، ويرايش متن، اعتبارسنجي
عباس روحاني: مفهوم شناسي، تحليل آماري، اعتبارسنجي،
ويچي سلاح ورزي: روش شناسي، مشاوره فني، اعتبارسنجي،
ويرايش متن

References

1. Alizadeh, A., Toudeshki, A., Ehsani, R., Migliaccio, K., & Wang, D. (2021). Detecting tree water stress using a trunk relative water content measurement sensor. *Smart Agricultural Technology*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100003>
2. Burgess, S., & Downey, A. (2018). SFM1 Sap Flow Meter Manual version 5. ICT International Pty Ltd, Australia.
3. Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., & Bleby, T. M. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21(9), 589-598. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.9.589>
4. Deihimfard, R., Mahallati, M. N., & Koocheki, A. (2015). Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modelling. *Field Crops Research*, 184, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.002>
5. Dugas, W. A. (1990). Comparative measurement of stem flow and transpiration in cotton. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 215-221. <https://doi.org/10.1007/BF00865981>
6. Fernández, J. E., & Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2), 135-151. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
7. Ginestar, C., & Castel, J. R. (1995). Use of stem dendrometers as indicators of water stress in drip-irrigated citrus trees. *II International Symposium on Sensors in Horticulture*, 421, 209-222. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.421.22>
8. Heidari, M. D., Omid, M., & Mohammadi, A. (2012). Measuring productive efficiency of horticultural greenhouses in Iran: a data envelopment analysis approach. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 1040-1045. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.104>
9. Kalankesh, L. R., Zazouli, M. A., Susanto, H., & Babanezhad, E. (2021). Variability of TOC and DBPs (THMs and HAA5) in drinking water sources and distribution system in drought season: the North Iran case study. *Environmental Technology*, 42(1), 100-113. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1621952>
10. Kováčová, M., Bárek, V., & Kišš, V. (2020). Dendrometric change as water stress indicator for sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.)- Basic research in laboratory conditions. *Acta Sci. Pol. Form. Circumiectus*, 19, 77-85. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2020.19.2.77>
11. Marshall, D. C. (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33(6), 385. <https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385>
12. Smith, D. M., & Allen, S. J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(12), 1833-1844. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.12.1833>
13. Uddin, J., Smith, R., Hancock, N., & Foley, J. (2014). Evaluation of sap flow sensors to measure the transpiration rate of plants during canopy wetting and drying. *Journal of Agricultural Studies*, 2(2), 105-119. <https://doi.org/10.5296/jas.v2i2.6134>

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 179-192

Monitoring Livestock Health by Modeling Rumination Behavior According to Accelerometer-Based Information

E. Vahedi Tekmehdash¹, H. Navid^{1*}, H. Gasemzadeh¹, H. Karimi², M. Javani Holan¹

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Agricultural Engineering Research Department, Kerman Agricultural and Resource Research and Education Center, AREEO, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: navid@tabrizu.ac.ir)

Received: 27 December 2023

Revised: 17 February 2024

Accepted: 02 April 2024

Available Online: 05 March 2025

How to cite this article:Vahedi Tekmehdash, E., Navid, H., Gasemzadeh, H., Karimi, H., & Javani Holan, M. (2025). Monitoring Livestock Health by Modeling Rumination Behavior According to Accelerometer-Based Information. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 179-192. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.86082.1216>

Introduction

The livestock sector excels in the production of dairy and meat products. These products, serving as vital sources of animal protein, hold a significant position in household diets. The significance of these two products in the food basket has heightened awareness around animal health. Regularly tracking rumination time serves as a vital and insightful measure to obtain information about the rest and overall health of an animal. This information enables prompt intervention for health or nutritional issues, allowing for earlier management adjustments and veterinary care to effectively combat the onset of disease. In the past, rumination was usually monitored through visual observation by on-site staff or through videos recorded by cameras installed on the livestock. Nowadays, the growing scale of livestock farms makes it impractical to effectively monitor the animals individually. The traditional method of visual observation demands the continuous presence of livestock professionals and is extremely time-consuming. Currently, sensors and digital technologies have become important tools for accurate animal husbandry, enabling real-time monitoring of rumination. A review of the research in the field of precision animal husbandry shows that many efforts are being made to develop precision monitoring sensors to overcome the mentioned problems. Continuous and automatic monitoring of animal behavior through sensors can offer valuable insights into nutrition, reproduction, health, and overall well-being of dairy cows.

Materials and Methods

In this research, an accelerometer-based sensor was developed and used in the precision agriculture laboratory of Tabriz University, Iran. The sensor was installed in three different positions on the cow's body to collect data. Important factors were calculated from the raw data, and the modeling was done using the logistic regression method. The logistic regression model was trained to distinguish rumination from the other cow's behaviors. The developed model was evaluated using the receiver operating characteristic (ROC) curve, and three other evaluation criteria: precision, sensitivity, and F-score. Finally, the performance of the final model and sensor was evaluated in the field for a few days.

Results and Discussion

After calculating the evaluation criteria for different calculation factors, four optimal factors were finally selected from the 50 arrays. Muzzle mode was found to be the best place to install the sensor. Logistic regression was the best modeling method for binary classification between rumination and other behaviors. The evaluation criteria of the model in the proposed sensor are the highest, and the values of sensitivity 88%, accuracy 94%, and

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).<https://doi.org/10.22067/jam.2024.86082.1216>

F-score 91% were obtained through logistic regression analysis. The final test results of the model revealed that the sensor demonstrated an impressive detection capability of 89.47%. Furthermore, the developed system exhibited strong alignment with the actual field observations, highlighting its effectiveness and reliability. Finally, the results of the current study were compared with other studies in the literature.

Conclusion

This study investigated recording and monitoring rumination behavior using an accelerometer, which can help prevent financial losses in cattle farms. After examining different mounting locations of the sensor, it was found that the muzzle position provided more accurate detections than the other mounting locations. The final model was created using the statistical factors and the calculation of the evaluation criteria. The results showed that the proposed model provided more correct diagnoses and achieved the optimal solution.

Acknowledgment

We would like to express our gratitude to the Khalat Poushan Cattle Farming Complex of the University of Tabriz, Iran, its professors and staff for supporting this project, and for their commitment to promote animal husbandry science.

Keywords: Accuracy, Classification, ROC curve, Sensitivity

پایش سلامت دام با مدل‌سازی رفتار نشخوار بر اساس اطلاعات مبتنی بر شتاب‌سنج

الناز واحدی تکمه‌داش^۱، حسین نوید^{۱*}، حمیدرضا قاسم‌زاده^{۱b}، هادی کریمی^{۱b}، مهسا جوانی هلان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

چکیده

تعاملات رفتاری حیوان با محیط باید به‌طور مداوم نظارت گردد تا مدیریت دقیق با موفقیت اجرا شوند. نشخوار نوعی رفتار دام است که از آن به‌عنوان شاخص سلامت و آسایش دام استفاده می‌شود. کاهش نشخوار دام نشانگر تغییراتی در بدن حیوان است. پایش فرآیند نشخوار کمک می‌کند تا بیماری‌هایی مثل کتوز، ورم پستان و غیره را پیش از بروز علائم تشخیص داده و سامانه‌های مدیریت دقیق، امکان نظارت و مدیریت هر دام را به‌صورت مجزا فراهم می‌کنند. با این روش می‌توان نشخوار گاو را پیوسته اندازه‌گیری کرده و از بروز مشکل مطلع شد. مولفه اصلی این سامانه‌ها، مدل‌های تحلیلی هستند که به‌طور خودکار داده‌های حسگر را به دسته‌های مختلف رفتاری تبدیل می‌کنند. هدف از این مطالعه، تفکیک رفتار نشخوار گاو با استفاده از تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از حسگر طراحی‌شده در آزمایشگاه کشاورزی دقیق دانشگاه تبریز و بررسی اثر موقعیت‌های مختلف نصب بود. الگوریتم رگرسیون لجستیک برای آموزش و توسعه مدل طبقه‌بند در نظر گرفته شد. پس از ارزیابی فاکتورهای مختلف و مدل‌سازی مربوطه، نهایتاً ۴ فاکتور بهینه از آرایه‌های ۵۰ تایی انتخاب شدند. ارزیابی مدل طبقه‌بند نهایی با به‌کارگیری شاخص‌های حساسیت، صحت و F-Score به‌ترتیب مقادیر ۰/۸۸، ۰/۹۴ و ۰/۹۱ را نتیجه داد که نشان از دقت بالای مدل بود. پس از تعیین مدل نهایی، ارزیابی میدانی سامانه با اعمال مدل در حسگر طی سه روز انجام شد. نتایج حاصل از آزمون نهایی مدل در مقایسه با مشاهدات بصری نشان از توانایی تشخیص ۸۹/۴۷٪ و سازگاری بالای برآورد سامانه با مشاهدات میدانی بود.

واژه‌های کلیدی: حساسیت، صحت، طبقه‌بندی، منحنی ROC

مقدمه

در سراسر جهان، اکثر کشورها در حال کاهش تعداد گاوداری‌های با تعداد کم هستند تا گاوداری‌های بزرگ بتوانند با در اختیار داشتن امکانات بیشتر، تولیدات دامی بیشتری داشته باشند (Fournel, Rousseau, & Laberge, 2017). گاوداری‌های کوچک، با مشکلاتی نظیر امکانات بازار جهانی و مشکلات اقتصادی مواجه هستند (Cavaliere & Ventura, 2018). در طی سال‌های اخیر، مصرف‌کنندگان فراورده‌های دامی علاقه روزافزون به رفاه حیوانات و کیفیت محصولات غذایی از خود نشان داده‌اند (Topp-Becker & Ellis, 2017; Eldesouky, 2018). از آنجایی که تحقیقات، تاثیر آسایش و مدیریت حیوانات بر جنبه‌های تولید را نشان داده‌اند، امروزه، گاوداران بیشتر مراقب حیوانات خود هستند (Meen et al., 2015).

در این زمینه، پشتیبانی فناورانه از کشاورزان یک قدم امیدوارکننده برای همه‌ی جنبه‌های مربوط به پرورش کارآمد و پایدار حیوانات است که در قالب دام‌داری مناسب و اقتصادی مطرح می‌شود. PLF^۳ پتانسیل زیادی برای حمایت از دامداران برای پرورش حیوانات در شرایط مناسب را دارا می‌باشد (Berckmans & Guarino, 2017). نظارت مداوم بر رفتار گاوها و پارامترهای فیزیولوژیکی یا پاتولوژیکی ممکن است امکان تشخیص زودهنگام بیماری‌ها را پیش از ظهور علائم بالینی آن‌ها فراهم کند. علاوه بر این، ممکن است بیماری‌های بدون علائم بالینی مانند کتوز، کبد چرب و اسیدوز تشخیص داده شود و سبب کاهش اثرات منفی آن‌ها بر باروری و تولید شود (Gusterer et al., 2020). فعالیت گاو یک شاخص ضروری برای پایش سلامتی و رفاه نشخوارکنندگان محسوب می‌شود. از این رو تغییر در رفتار دام، یک شاخص حیاتی برای تشخیص زودهنگام و پیشگیری از بیماری‌ها به حساب می‌آید (Ayadi et al., 2020). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که زمان و فعالیت نشخوار با اختلالات بالینی و تحت بالینی مرتبط است (Liboreiro et al., 2015; Stangaferro, Wijma, 2015).

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

* نویسنده مسئول: (Email: navid@tabrizu.ac.ir)doi <https://doi.org/10.22067/jam.2024.86082.1216>

KNN^۵ بودند، به تفکیک رفتار هر گاو نسبت به مابقی رفتارها پرداخته شد. بهترین روش برای رفتار نشخوار RFE شناسایی شد که دارای مقادیر صحت ۰/۸۴، حساسیت ۰/۸۸ و F-score ۰/۸۶ بود. در مطالعه دیگری که از حسگرهای بر مبنای فشار RWC برای اندازه‌گیری رفتارهای مختلف گاو استفاده شده، مشاهدات بصری ثبت گردید. الگوریتم تجزیه و تحلیل داده‌های فشار با توجه به فرکانس حرکات فک طبقه‌بندی شد. در این مطالعه برای اعتبارسنجی و طبقه‌بندی رفتارهای مختلف از دو نسخه نرم‌افزار RWC V0.7.3.2 و RWC V0.7.2.0 استفاده گردید و تمامی تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی نسخه‌های RWS از روش ماتریس مختلط استفاده شد و کاربرد این حسگر برای اندازه‌گیری فعالیت تغذیه و نشخوار گاو تایید شد با این حال درخصوص رفتار آشامیدن دارای مقدار پیش‌بینی درست پایینی بود (Zehner, Umstatter, Niederhauser, & Schick, 2017). از سویی دیگر محققان با طراحی یک دستگاه نظارت چندپارامتری، رفتار نشخوار گاو را به کمک شتاب‌سنج سه‌محوره و حسگر صدا مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها از الگوریتم SVM^۶ برای آنالیز و طبقه‌بندی داده‌ها استفاده کردند و چهار فاکتور میانگین، بیشینه، ضریب همبستگی و مجموع مقادیر قدرمطلق^۷ را محاسبه کردند. با به‌کارگیری درخت دودویی طبقه‌بند SVM^۸ به طبقه‌بندی چهار رفتار گاو و به کمک تابع smvtrain در MATLAB به آموزش و آزمون مدل پرداختند. نتایج طبقه‌بندی رفتارهای گاو برای عمل نشخوار دارای نرخ تشخیص ۹۰٪ و برای سایر فعالیت‌ها ۸۲/۵٪ بود (Wang, Xie, & Xu, 2017). روسکا و همکاران (Ruuska et al., 2018) از حسگرهای بر مبنای فشار RWS^۹ و ضبط‌کننده فیلم برای ثبت رفتارهای گاو استفاده کردند. در آنالیز رگرسیون خطی، رابطه رگرسیون با روش حداقل مربعات^{۱۰} تعیین شد و ضریب تعیین با نرم‌افزار اکسل محاسبه گردید. در آنالیز شاخص‌های خطای اساسی، خطای میانگین و قدرمطلق خطای میانگین محاسبه شدند. نتایج به‌دست‌آمده از فرآیند نشخوار برای تمامی داده‌های جمع‌آوری‌شده از گاوها به شرح زیر بود: شاخص خطا ۲/۱٪، قدرمطلق خطای میانگین ۳۱/۴٪، ضریب تعیین ۰/۷۱، صحت

(Caixeta, Al-Abri, & Giordano, 2016). کاهش زمان نشخوار می‌تواند برای تشخیص فحلی، زایمان و برخی بیماری‌ها کمک‌کننده باشد. گاوهای شیرده روزانه حدوداً ۴/۵ ساعت را برای تغذیه (محدوده ۲/۴ الی ۸/۵ ساعت) و ۷ ساعت را برای نشخوار (محدوده ۲/۵ الی ۱۰/۵ ساعت) صرف می‌کنند (Beauchemin, 2018) با توسعه فناوری سنجش بسیاری از سیستم‌های نظارت بر رفتار نشخوارکنندگان، مبتنی بر فناوری‌های حسگرهای مختلف پیشنهاد شده‌اند. اخیراً سیستم‌های نظارتی مبتنی بر حسگرهای پوشیدنی^۱ به‌جهت هزینه کم و آسانی یکپارچه کردن آن‌ها با شبکه‌های بی‌سیم، به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند (Shen, Zhang, Zhang, Wei, & Sun, 2020). در مطالعه‌ای دیگر به تعیین تاثیر اسیدوز و کتوز بر زمان نشخواری و برخی از پارامترهای بیوشیمیایی خون پرداختند که بنابر نتایج به‌دست‌آمده، کاهش زمان نشخوار و بروز تغییرات در پارامترهای بیوشیمیایی را می‌توان به‌عنوان نشانگرهای زیستی در تشخیص این دو بیماری بیان کرد (Antanaitis, Juozaitienė, Malašauskienė, & Televičius, 2019). ورم پستان و کتوز از بیماری‌های اصلی در اوایل شیردهی هستند که کاهش زمان نشخوار می‌تواند سبب تشخیص زودتر آن‌ها گردد که در این مطالعه با بررسی چندین گروه از گاوهای متفاوت متوجه شدند که کاهش زمان نشخوار یک فاکتور بسیار مهم برای تشخیص زود هنگام ورم پستان می‌باشد. با این حال برای تشخیص کتوز علاوه بر کاهش زمان نشخوار، نیاز به آزمایش خون مکرر نیز بود (Cocco, Canozzi, & Fischer, 2021). پال و همکاران (Pahl, Hartung, Mahlkow-Nerge, & Haeussermann, 2015) با استفاده از حسگر HR-Tag فعالیت‌های تغذیه‌ای و نشخوار را مورد مطالعه قرار دادند. در این آزمایش از برنامه PASW برای تحلیل استاتیک داده‌ها استفاده شد و از مدل مختلط خطی به‌منظور تحلیل میزان تولید شیر، تغذیه و زمان نشخوار استفاده گردید. کاهش قابل‌توجهی در زمان نشخوار در روزهای ۱- و روز صفر مشاهده شد و زمان نشخوار گاوها در روز ۱ به مقدار مرجع خود یعنی 389 ± 18 min رسید. در مقایسه با روز مرجع، کم‌ترین خوراک دریافتی در روز تلقیح بوده و مدت زمان تغذیه در روز ۱- و روز تلقیح کمینه‌ترین مقدار خود را داشتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که فحلی سبب کاهش نشخوار شده و حسگر انتخاب‌شده نیز توانایی تشخیص کاهش زمان را داشته است. اسمیف و همکاران (Smith et al., 2016) به طبقه‌بندی رفتارهای گاو با استفاده از گردن‌بندهای حرکتی^۱ پرداختند و مشاهدات رفتار گاو به‌طور هم‌زمان توسط چهار ناظر، ثبت گردید. در این مقاله از طریق طبقه‌بندی‌کننده‌های باینری که شامل SVM^۲، LR^۳، RFE^۴ و

- 3- Logistic regression
- 4- Random Forest Ensemble
- 5- K nearest neighbor
- 6- Support vector machine
- 7- Sum of absolute values
- 8- Binary tree SVM classifier
- 9- Rumi watch sensor
- 10- Least squares method

- 1- Inertial Measurement Unit (IMU)
- 2- Support vector machine

۷۹٪/۵، حساسیت ۷۷/۸٪، ویژگی^۱ ۹۲/۹٪ و دقت ۸۹٪. در این مطالعه به دلیل غیرخطی بودن داده های جمع آوری شده، محاسبه رگرسیون خطی پاسخ مناسبی نداشت با این حال در ماتریس مختلط و شاخص خطا نتایج قابل قبولی مشاهده گردید. سیاریف و همکاران (Syarif et al., 2019) مطالعه ای با هدف ایجاد سیستم مدیریت سلامت گاوهای شیری انجام دادند. در این مطالعه از سیستم های نظارت و سیستم های شناسایی با استفاده از اینترنت اشیا و فناوری های هوشمند استفاده شده بود. سیستم نظارت، اطلاعات مربوط به دما و ضربان قلب گاوها را از حسگر دریافت کرده و پس از پردازش و با توجه به خروجی سیستم شناسایی، وضعیت سلامتی گاوهای شیری از نظر طبیعی یا غیرطبیعی بودن را تعیین می کرد. در پژوهشی دیگر از حسگر BMC^۱ برای اندازه گیری زمان های نشخوار، تغذیه و استراحت گاوهای شیری و مقایسه آن ها با مشاهدات بصری استفاده گردید و از نرم افزار SAS برای انجام تمامی تحلیل ها در این پژوهش استفاده شد. در این تحقیق برای اعتبارسنجی دقت و صحت مشاهدات از همبستگی پیرسون^۲، ضریب همبستگی^۳، رگرسیون خطی^۴ و منحنی های bland-altman^۵ استفاده گردید. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۹ و ضریب تعیین^۶ ۰/۹۷ برای نشخوار به دست آمد و منحنی bland-altman هیچ گونه تمایلی به یک طرف نداشته و نتیجه قابل قبولی را برای نشخوار نشان داد (Grinter, Campler, 2019 Costa, & Benaisa et al., 2019). بنیسا و همکاران (Benaisa et al., 2019) از یک شتاب سنج سه محوره برای جمع آوری داده ها استفاده کرده و یک الگوریتم ساده DT جدید برای تشخیص رفتار تغذیه و نشخوار گاوها ایجاد کردند. این محققان عملکرد الگوریتم را با الگوریتم SVM و حسگر RWS مقایسه کردند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که هرچه تعداد دفعات نمونه برداری بیشتر باشد، دقت تشخیص بالاتر است. با این حال نیازهای فرکانس نمونه برداری بالاتر، بار ذخیره سازی دستگاه و حجم کار محاسباتی را افزایش داد. شن و همکاران (Shen et al., 2020) مطالعه ای مبنی بر تغییرات فشار پوزه بند^۷ برای تشخیص فرآیند نشخوار انجام دادند. آن ها از انحراف استاندارد برای اندازه گیری درجه تغییرات نوسانات سیگنال فشار پوزه بند در دامنه زمان و نیز طیف فرکانس برای آنالیز تفاوت بین سیگنال های رفتار نشخوار و تغذیه در دامنه فرکانس استفاده نمودند. داده ها در نرم افزار MATLAB پردازش شده و تعداد نشخوار، طول زمان نشخوار و تعداد باز و بسته شدن دهان برای هر گاو محاسبه

- 1- Specificity
- 2- Pearson correlation
- 3- Concordance Correlation Coefficient (CCC)
- 4- Linear regression
- 5- Bland-Altman plots
- 6- Coefficient Of Determination
- 7- Noseband pressure

گردید. دقت تشخیص روش های به کاررفته در این مقاله برای سه فاکتور مورد نظر به ترتیب ۱۰۰٪، ۹۴/۲٪ و ۹۴/۴۵٪ بودند که نشانگر این است که استفاده از انحراف استاندارد و طیف فرکانس برای شناسایی پارامترهای اصلی نشخوار معقول و موثر بودند. با این حال استفاده از لوله های هیدرولیک در حسگرهای فشار بر آسایش و راحتی گاوها اثر گذاشته و حتی ممکن است لوله های هیدرولیک آسیب دیده و باعث نشت مایع شوند. در مطالعه ای دیگر، محققان با استفاده از مجموعه ی حسگرهای الکترونیکی-زیستی^۸ که به صورت گردن بند و پابند طراحی شده بودند، به خودکار سازی هوشمند دامداری صنعتی پرداختند. انتقال داده های حسگر با استفاده از اینترنت اشیا صورت گرفت. این حسگر نشانه های حیاتی دامها شامل دمای بدن، میزان تحرک، میزان تغذیه و نشخوار، فعل بودن دامها و رفتار دامها را نظارت کرده و در اختیار دامداران قرار می دادند (Behneghar, Majidi, & Movaghar, 2021). چانگ و همکاران (Chang et al., 2022) به تشخیص رفتار نشخوار با استفاده از شتاب سنج های متصل به گوش پرداختند. آن ها از هفت الگوریتم متفاوت با طول دوره های مختلف استفاده کردند که الگوریتم درخت طبقه بندی و رگرسیون به عنوان دقیق ترین مدل انتخاب شدند که برای نشخوار دارای دقت ۸۶/۲٪، حساسیت ۷۵/۳٪ و ویژگی ۹۲/۵٪ بودند.

جوانی و همکاران (Javani, Navid, Karimi, Hosseinkhani, & Vahedi Tekmehdash, 2022) حسگر ثبت رفتار نشخوار گاو را در آزمایشگاه کشاورزی دقیق دانشگاه تبریز طراحی و نمونه سازی کرد که در مرحله اول شامل آردینو پرومینی، شتاب سنج ADXL345، مازول وای فای ESP8266، رگلاتور LF33CV3 و باتری لیتیومی بود. پس از ساخت حسگر و نصب قطعات، داده های X، Y و Z شتاب سنج دریافت گردید. برای تعیین بهترین حساسیت شتاب سنج، داده برداری با حساسیت های ۱۶g، ۸g و ۴g صورت گرفت. تعیین بهترین حساسیت شتاب سنج با آزمون t و کای مربع^۹ انجام شد و حساسیت ۸g انتخاب گردید. در مراحل بعدی حسگر توسعه یافته و با افزودن قطعات Sevensegment، SD card و RTC حسگر ثبت نشخوار گاو تکمیل گردید.

با توجه به مطالعات انجام شده، مشخص گردید که می توان از نشخوار گاو به عنوان شاخص سلامت استفاده نمود. با بررسی ساختار حسگرهای استفاده شده می توان بیان کرد که تشخیص زمان نشخوار هر گاو با استفاده از دوربین های تعبیه شده در گاو داری، روشی پرهزینه می باشد. همچنین در صورت استفاده از حسگرهای ضبط صدا برای تفکیک رفتار نشخوار از مابقی رفتارهای گاو، امکان تداخل صدای محیط با حسگر مورد نظر وجود داشته و این امر سبب کاهش دقت

8- Bio-electronic sensor

9- Chi square test

مکان نصب حسگر و زمان نمونه‌برداری

حسگر تهیه‌شده در اوایل تحقیق به‌صورت گردنی تعبیه شد که با قرارگیری شتاب‌سنج در غبغب و کنار گوش گاو تحلیل شده و سپس به حسگر پوزه‌بندی تغییر یافت و شتاب‌سنج روی عضله M.masseter گاو تعبیه شد. یک دوره زمانی مؤثر باید به‌اندازه کافی کوتاه باشد تا بتواند رفتارهای گذرای بیشتری را ثبت کند اما به اندازه کافی نیز طولانی باشد تا موارد تشخیص اشتباه را کاهش دهد. به‌عنوان مثال یک رفتار گذرا مثل انتقال حالت ایستاده به خوابیده در گاو، ممکن است با استفاده از یک دوره زمانی کوتاه‌تر تشخیص داده شود در حالی که رفتاری مانند تغذیه با استفاده از یک دوره زمانی طولانی‌تر قابل تشخیص خواهد بود. بنابراین زمان هر نمونه‌برداری ۲/۷ ثانیه و ۱۳/۵ ثانیه در مراحل مختلف تحقیق ارزیابی شدند.

ثبت رفتار نشخوار

با توجه به قیمت بالای دوربین‌های مدار بسته، امکان نصب آن‌ها در محیط نمونه‌برداری وجود نداشت و برای تعیین صحت عملکرد حسگر، نیاز به تایید داده‌ها و رفتارهای تعیین‌شده از منبع دیگری بود. بنابراین ثبت رفتارهای گاو به‌صورت دستی توسط دو نیروی انسانی حاضر در مکان نمونه‌برداری انجام شد. به‌طوری‌که در ابتدا تمامی رفتارهای گاو همراه با زمان آن، یادداشت و در مراحل بعدی آزمایش‌ها ثبت رفتار در هر ۵ دقیقه انجام می‌گردید. هدف پژوهش، ابتدا شناسایی و تفکیک رفتار نشخوار و غیرنشخوار از همدیگر بوده و پس از اطمینان از عملکرد حسگر مورد نظر شناسایی رفتار غیر نشخوار در نظر گرفته شد. رفتار غیر نشخوار شامل تغذیه، ایستادن، راه رفتن، نشستن گاو می‌شد.

آماده‌سازی داده‌ها

با توجه به مواردی چون زمان بالای داده‌برداری حسگر، بازه زمانی مورد نیاز برای دریافت اطلاعات یک رفتار ویژه مانند نشخواری و نیاز به خلاصه‌سازی و استخراج اطلاعات با اهمیت برای مدل‌سازی، تصمیم گرفته شد در دوره زمانی ۱۳/۵ و ۲/۷ ثانیه اطلاعات شتاب‌سنجی در محورهای x ، y و z به‌ترتیب در آرایه‌های ۵۰ و ۱۰ تایی ذخیره گردد. سپس فاکتورهای مختلف آماری شامل بیشینه^۲، میانگین حسابی و انحراف‌معیار برای ارائه‌ی فاکتورهای کلی برای یک آرایه در دوره زمانی مشخص، محاسبه و سپس برای مدل‌سازی استفاده شود. طبق شرایط آزمایش که موقعیت سر گاو و تغییرات آن تعیین‌کننده رفتار گاو بود در دوره زمانی ۲/۷ ثانیه و نصب حسگر در غبغب و کنار گوش گاو، ۶ فاکتور از داده‌های ده‌تایی stdv.10.stdv ، mean.10.max ، max.10.mean ، max.10.max ، stdv.10.mean و stdv.10.max محاسبه شدند.

آن می‌گردید. بنابراین حسگرهای بر مبنای شتاب‌سنج سه‌محوره، به‌دلیل تأثیرپذیری کم‌تر از شرایط محیطی، هزینه طراحی پایین، تفکیک بهتر رفتارهای گاو و دقت بالای تشخیص مورد توجه قرار گرفتند. استفاده از حسگری که بتواند نشخواری را تشخیص داده و زمان آن را اندازه‌گیری نماید، مستلزم استفاده از مدل‌های مناسب برای تبدیل داده‌های خام به اطلاعات قابل‌استفاده می‌باشد و لذا پروژه مدل‌سازی رفتار نشخوارکنندگی دام تعریف گردید. هدف این پژوهش مدل‌سازی داده‌های به‌دست‌آمده از حسگر توسعه‌داده‌شده، برای تشخیص رفتارهای مختلف حیوان به‌ویژه تمایز رفتار نشخوار از بقیه رفتارها است؛ به‌طوری‌که بتوان با استفاده از حسگر و نیز مدل‌های تعریف‌شده زمان نشخوار روزانه را تعیین نمود.

مواد و روش‌ها

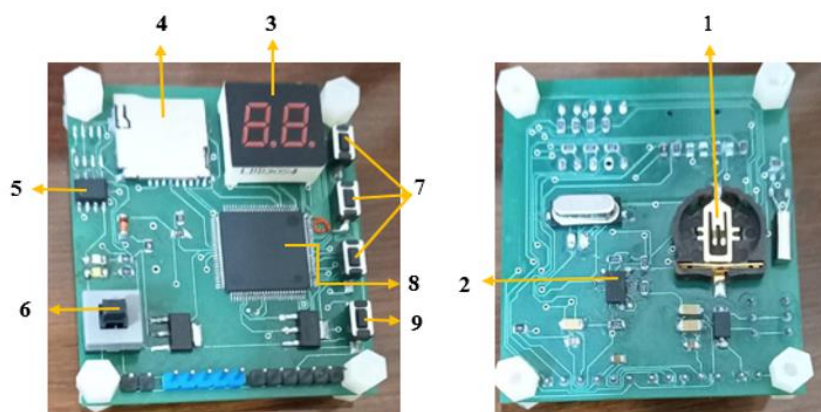
دام‌های مورد آزمون و مکان آزمایش‌ها

به‌منظور انجام این پژوهش از ۸ راس گاو در طی روزهای متفاوت استفاده گردید. میانگین تولید شیر روزانه دام‌ها برابر ۲۵ کیلوگرم و دارای تعداد زایش‌های متفاوت بودند. داده‌برداری در گاوداری ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان انجام شد. این ایستگاه در موقعیت جغرافیایی با طول ۴۶/۳۹ درجه، عرض ۳۸/۰۳ درجه و ارتفاع از دریا ۱۵۶۵ متر قرار دارد.

حسگر شتاب‌سنج

حسگر مورد استفاده در این تحقیق که در آزمایشگاه کشاورزی دقیق دانشگاه تبریز توسعه داده شده است در شکل ۱ مشاهده می‌شود. این حسگر شامل میکروکنترلر Atmega 2560، شتاب‌سنج ADXL345، RTC^۱، ماژول سون سگمنت و اس‌دی کارت می‌باشد (Javani et al., 2022).

روند عملکرد حسگر به‌گونه‌ای است که در ابتدا داده‌های شتاب در سه جهت x ، y و z از طریق شتاب‌سنج محاسبه شده و در اس‌دی کارت ذخیره می‌شود. میکروکنترلر پس از جمع‌آوری ۵۰ داده شتاب، فاکتورهای مورد نظر را برای آن سری داده محاسبه کرده و نشخوار یا غیرنشخوار بودن رفتار تعیین می‌گردد. به‌گونه‌ای که برای نشخوار برچسب یک و برای غیرنشخوار برچسب صفر ثبت می‌گردد. زمان نشخوار گاو از ابتدای روشن بودن حسگر محاسبه شده و با فشردن سه دکمه موجود می‌توان زمان نشخوار را در طی آزمایش در سون‌سگمنت مشاهده نمود. برای ثبت مداوم زمان نشخوار از RTC استفاده گردید تا در صورت قطع منبع تغذیه زمان حفظ گردد. پس از یک دوره اندازه‌گیری، انتقال داده‌ها از کارت حافظه به رایانه انجام می‌شد.



شکل ۱- حسگر توسعه داده شده در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز

۱- جابجایی RTC، ۲- شتاب سنج، ۳- سون سگمنت، ۴- اس دی کارت، ۵- RTC، ۶- دکمه روشن و خاموش، ۷- دکمه های نمایش ساعت، ۸- میکروکنترلر، ۹- دکمه ریست

Fig.1. Developed sensor in Biosystem Engineering Department of Tabriz University

1- RTC battery holder, 2- Accelerometer, 3- Seven segment, 4- SDcard, 5- RTC, 6- On and off button, 7- Clock display buttons, 8- Microcontroller, 9- Reset button

اشتباه بین رفتارهای مختلف، مدل سازی چندگانه انجام شد. در راستای انجام مدل سازی، نیاز به داده های آموزش و آزمایش مدل بود که این کار با اختصاص ۳۰٪ داده ها برای آزمایش و ۷۰٪ مابقی برای آموزش انجام گردید. برای تشخیص رفتار نشخوار از غیرنشخوار، داده های ثبت شده از دو گاو در طی ۴ روز با قرارگیری شتاب سنج در غنبد و داده های یک گاو دیگر در طی دو روز با قرارگیری شتاب سنج در کنار گوش استفاده شدند. مدل سازی با ۶ فاکتور و مدل سازی چندگانه برای هر دو گروه داده انجام شد. جهت اطمینان از صحت اطلاعات به دست آمده در مورد گاو دیگر، داده های گاو دیگری در طی ۲ روز ثبت و برای هر سری از داده، مدل سازی با ۶ فاکتور و مدل سازی چندگانه انجام شد. روش دیگری از مدل سازی با هدف بهبود عملکرد حسگر برای داده های ترکیب دو روز انجام شد که در این روش، حذف داده های پرت براساس داده های اصلی X ، Y و Z صورت گرفت. در راستای تعیین عملکرد مدل سازی جدید، داده برداری از یک گاو دیگر در طی دو روز انجام شد که برای آن نیز مدل سازی جدید، مدل سازی با ۶ فاکتور و مدل سازی چندگانه انجام شدند. در این مرحله با توجه به مدل سازی های متعدد، مقادیر ارزیابی مدل در حد مطلوبی نبوده و تشخیص با کمترین مقادیر اشتباه بین رفتار نشخوار و غیرنشخوار وجود نداشت. بنابراین راهکارهای تغییر محل نصب حسگر به حالت پوزه بندی و استفاده از ۴ فاکتور بر اساس داده های پنجاه تایی مطرح و عملی شد. برای تعیین عملکرد ۴ فاکتور، مدل سازی با آن انجام شده و نتایج بهتر رؤیت شد. داده برداری با حسگر پوزه بندی برای ۳ گاو و برای هر گاو در طی ۳ روز انجام شد.

پس از جمع آوری داده ها و انتقال به رایانه، برچسب گذاری داده های نشخوار و غیرنشخوار در محیط Excel انجام شده و بازبینی های لازم جهت حذف داده های پرت و انتخاب تصادفی داده ها با استفاده از برنامه نویسی R در محیط نرم افزار Rstudio انجام گرفت. حذف داده های پرت از طریق تعیین چارک اول و سوم و حد بالا و پایین انجام شد که در نمودار جعبه ای^۱ قابل مشاهده بودند. در راستای توسعه مدل و نصب حسگر به حالت پوزه بندی، پس از بازبینی در فاکتورها، ۴ فاکتور با داده های پنجاه تایی (max.50.mean, var.50.mean, stdv.50.sum, stdv.50.mean) استفاده و محاسبات از حالت سطری به حالت ستونی تغییر یافته و دوره زمانی ۱۳/۵ ثانیه در نظر گرفته شد. فاکتورهای استفاده شده در طی مراحل مختلف در جدول ۱ ذکر شده اند.

مدل سازی

رگرسیون لجستیک یکی از انواع مدل های خطی تعمیم یافته است که برای تجزیه و تحلیل وجود یا عدم وجود متغیر وابسته بسیار مناسب می باشد. نکته اصلی در رگرسیون لجستیک این است که متغیر وابسته، متغیری دو حالته است و تنها می تواند مقدار ۱ به معنی وقوع رویداد و مقدار صفر به معنی عدم وقوع رویداد را به خود اختصاص دهد. رگرسیون لجستیک از روش برآورد حداکثر احتمال برای پیدا کردن بهترین مجموعه پارامترهایی که مدل را بهتر برازش می کنند، استفاده می نماید. بنابراین، برای تشخیص رفتار نشخوار و غیرنشخوار گاو، این نوع مدل سازی انتخاب شد. برای تعیین تعداد تشخیص های

1- Boxplot

جدول ۱- فاکتورهای محاسباتی

Table 1- Calculation factors

ردیف Row	فاکتور Factor	روش محاسبه Calculation method
1	max.10.max	بیشینه هر ۱۰ داده مربوط به ستون بیشینه The maximum of every 10 data related to the maximum column
2	max.10.mean	میانگین هر ۱۰ داده مربوط به ستون بیشینه The average of all 10 data corresponding to the maximum column
3	mean.10.max	بیشینه هر ۱۰ داده مربوط به ستون میانگین The maximum of all 10 data corresponding to the average column
4	stdv.10.stdv	انحراف معیار هر ۱۰ داده مربوط به ستون انحراف معیار The standard deviation of all 10 data corresponding to the standard deviation column
5	stdv.10.mean	میانگین هر ۱۰ داده مربوط به ستون انحراف معیار The average of all 10 data corresponding to the standard deviation column
6	stdv.10.max	بیشینه هر ۱۰ داده مربوط به ستون انحراف معیار The maximum of every 10 data corresponding to the standard deviation column
7	max.50.mean	از هر ۵۰ داده مربوط به ستون‌های X، Y و Z به صورت ستونی، بیشینه محاسبه شده و سپس برای هر سه داده به دست آمده میانگین تعیین شد. The maximums of the 50 data for columns X, Y, and Z were calculated, and their average was determined.
8	var.50.mean	از هر ۵۰ داده مربوط به ستون‌های X، Y و Z به صورت ستونی، واریانس محاسبه شده و سپس برای هر سه داده به دست آمده میانگین تعیین شد. The variance of the 50 data for columns X, Y, and Z were calculated, and their average was determined.
9	stdv.50.sum	از هر ۵۰ داده مربوط به ستون‌های X، Y و Z به صورت ستونی، انحراف معیار محاسبه شده و سپس برای هر سه داده به دست آمده مجموع تعیین شد. The standard deviation of the 50 data for columns X, Y, and Z were calculated, and their sum was determined.
10	stdv.50.mean	از هر ۵۰ داده مربوط به ستون‌های X، Y و Z به صورت ستونی، انحراف معیار محاسبه شده و سپس برای هر سه داده به دست آمده میانگین تعیین شد. The standard deviation of the 50 data for columns X, Y, and Z were calculated, and their average was determined.

مشخص می‌شود. هرچه این مساحت کمتر باشد نشانگر قدرت ضعیف پیش‌بینی در مدل و هرچه مساحت افزایش یابد نشانگر قدرت بیشتر مدل و نزدیکی آن به مدل حقیقی می‌باشد. برای اندازه‌گیری اثربخشی مدل و عملکرد آن، از ماتریس مختلط استفاده و با ۴ ترکیب مختلف از مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی ساخته شد. ماتریس مختلط برای محاسبه معیارهای ارزیابی صحت^۱، فراخوانی^۲ یا حساسیت^۳ و F-Score لازم و ضروری بود. مقادیر صحت، فراخوانی و F-Score از رابطه (۱) محاسبه شدند.

$$\text{Sensitivity (TPR) or Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$F - \text{Score} = 2 \times \frac{\text{Recall} * \text{Precision}}{\text{Recall} + \text{Precision}}$$

که در آن،

TP مثبت صحیح (True Positives): پیش‌بینی شد یک باشد و

مدل‌سازی جدید با ۴ فاکتور برای داده‌های هر گاو و برای ترکیب داده‌های سه گاو صورت گرفت. برای افزایش تعداد داده‌های آموزش و آزمون، داده‌های سه روزه هر گاو به عنوان داده‌های آموزش و داده‌های حاصل از داده‌برداری دوباره در طی یک روز به عنوان داده‌های آزمون اختصاص داده شد. برای ارزیابی تکرارپذیری مدل در مورد سایر گاوها، از داده‌های ۱۲ روزه گاوهای قبلی برای آموزش استفاده شده و داده‌برداری از گاو متفاوتی در طی یک روز انجام شد تا به عنوان داده‌های آزمون مدل اختصاص داده شود. پس از اطمینان از عملکرد حسگر آزمایش‌های نهایی انجام شد. آزمایش‌های نهایی در دو مرحله انجام شدند. در مرحله اول عملکرد رابطه نهایی مدنظر بود که در مورد دو گاو متفاوت تحلیل شد.

ارزیابی مدل

برای مقایسه عملکرد مدل‌ها از تحلیل ROC به عنوان مقیاس اندازه‌گیری توانایی جداسازی یک مدل استفاده شد. منحنی ROC با ترسیم نرخ مثبت صحیح برحسب نرخ مثبت کاذب ایجاد می‌شود. مقدار بالای مساحت زیر منحنی ROC بیانگر عملکرد خوب پارامتر در ایجاد تمایز بین دو گروه تشخیصی است. بنابراین بر اساس مساحت بین منحنی ROC و خط $y=x$ قدرت منحنی‌های ROC

- 1- Precision
2- Recall
3- Sensitivity

درست بود.

FP مثبت کاذب (False Positives): پیش بینی شد یک باشد

ولی غلط بود.

FN منفی کاذب (False Negatives): پیش بینی شد صفر باشد

ولی غلط بود.

نتایج و بحث

ارزیابی توانایی فاکتورها در تشخیص نشخوار

برای تمامی فاکتورها پتانسیل تشخیص فرآیند نشخوار با استفاده از شاخص های حساسیت، صحت و F-Score مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). از بین فاکتورهای اولیه، انحراف معیار و بیشینه و از فاکتورهای ده تایی، تنها ۶ فاکتور دارای مقادیر F-score بالای ۶۰٪ بودند. بهترین برآوردها متعلق به فاکتورهای پنجاه تایی بودند که در آن ها تعداد تشخیص های اشتباه حداقل بوده و F-Score بیشترین مقدار خود را داشت. در انجام مدل سازی، داده های دارای احتمال بالاتر از مقدار آستانه به عنوان عدد یک و نشخوار و داده های دارای احتمال پایین تر از مقدار آستانه به عنوان عدد صفر و غیرنشخوار در نظر گرفته شدند.

مقایسه مکان نصب حسگر

مدل سازی با برآورد ۶ فاکتور برای داده های حاصل از نصب حسگر در مکان های متفاوت انجام و معیارهای ارزیابی مدل محاسبه شد (جدول ۳). بهترین نتایج مربوط به نصب حسگر در غنغب گاو حاصل شد. در نتیجه با انجام مدل سازی چندگانه در هر دو مکان نصب حسگر، می توان گفت که بیشترین تشخیص درست مربوط به رفتار تغذیه و سپس نشخوار بوده است. در حالی که تعداد زیادی از تشخیص های اشتباه نشخوار مربوط به ترکیب آن با سایر فعالیت های گاو بود. با توجه به نتایج به دست آمده فرضیه شباهت رفتارهای تغذیه و نشخوار و امکان تشخیص اشتباه آن ها با همدیگر رد شد.

منحنی ROC برای مدل سازی های انجام شده در شکل ۲ نشان داده شده اند. همان طور که مشخص است سطح زیر منحنی ROC در

موقعیت های نصب حسگر در غنغب بیشتر از کنار گوش بود.

در مدل سازی های انجام شده ابتدایی، همواره از داده های آموزش و آزمون مربوط به یک گاو استفاده شد ولی برای اثبات صحت عملکرد مدل، در طی یک مدل سازی از داده های دو گاو متفاوت برای آموزش و آزمون مدل استفاده شد که معیارهای ارزیابی به دست آمده عبارتند از: حساسیت (۰/۹۱)، صحت (۰/۷۳) و F-Score (۰/۸۱). نتایج نسبتاً قابل قبولی حاصل گشت.

توسعه حسگر و مدل

به دنبال بهبود عملکرد حسگر، فاکتورهای محاسباتی پنجاه تایی مورد استفاده قرار گرفتند. با ترسیم منحنی فاکتور مورد نظر برای داده ده تایی و پنجاه تایی، شاهد تفکیک بهتر رفتار نشخوار و غیرنشخوار از همدیگر بوده و تداخل کمتری را داشتیم. جهت مشاهده عملکرد این چهار فاکتور پنجاه تایی، مدل سازی داده های گاو آخر با استفاده از چهار فاکتور انجام شد که نشانگر مدل سازی موفق تر با چهار فاکتور نسبت به شش فاکتور در شرایط یکسان بود.

مدل سازی داده های حسگر پوزه بندی

نتایج مدل سازی انفرادی گاو ها و ترکیب سه گاو در جدول ۴ قابل مشاهده است. نتایج به دست آمده در مقایسه با سایر نتایج، بهتر بوده و معیارهای ارزیابی قابل قبول و سطح زیر منحنی ROC نیز زیادتر بود. منحنی ROC برای مدل سازی های انجام شده در شکل ۳ نشان داده شده است. خوشبختانه این منحنی دارای سطح زیر منحنی زیاد و تعداد تشخیص های اشتباه رفتار نشخوار به حداقل مقدار خود رسیده بود. در راستای ارزیابی رابطه مدل های حاصل شده برای هر گاو، داده های آزمون آن در رابطه جای گذاری شده و در مورد گاو ۴ داده های آزمون ۸۷/۷٪، در مورد گاو ۵ داده های آزمون ۹۷/۳۲٪ و در مورد گاو ۶ داده های آزمون ۹۷/۸۳٪ درست تشخیص داده شدند. با ترکیب داده های آموزش و آزمون سه گاو مورد نظر، نتایج سطر آخر جدول ۴ حاصل شد. مدل سازی با ترکیب داده های سه گاو حاصل از ۹ روز دارای نتایج مشابهی با مدل سازی کل داده های ۱۲ روز بود.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی فاکتورها

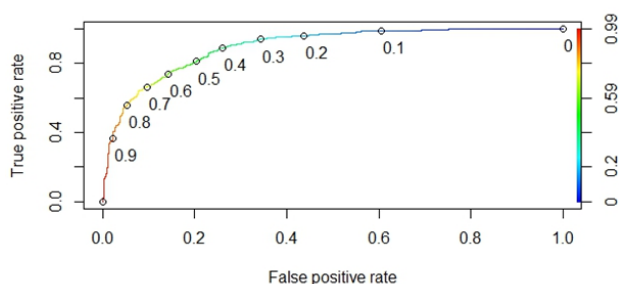
Table 2- Factors evaluation criteria

فاکتور Factors	آستانه Threshold	حساسیت Sensitivity	صحت Precision	F-Score
Mean.10.max	0.4	0.95	0.49	0.64
Max.10.max	0.3	1	0.57	0.72
Max.10.mean	0.3	0.98	0.57	0.72
Stdv.10.stdv	0.4	1	0.50	0.66
Stdv.10.max	0.4	1	0.54	0.70
Stdv.10.mean	0.3	0.95	0.53	0.68
Max.50.mean	0.4	0.88	0.77	0.82
Stdv.50.sum	0.4	0.94	0.82	0.88
Stdv.50.mean	0.4	0.94	0.82	0.88
var.50.mean	0.5	0.94	0.84	0.89

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مکان‌های نصب مختلف حسگر

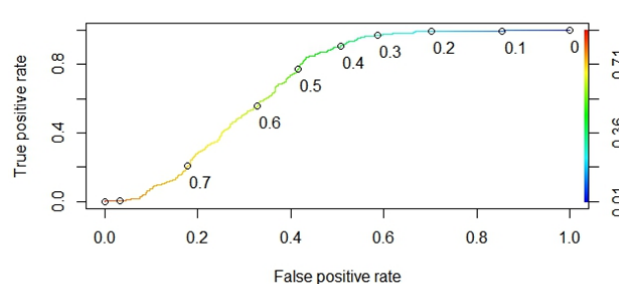
Table 3- Evaluation criteria for different sensor installation positions

موقعیت حسگر Sensor position	آستانه Threshold	حساسیت Sensitivity	صحت Precision	F-Score
غیغ Dewlap	0.4	0.91	0.75	0.82
کنار گوش Next to the ear	0.4	0.90	0.64	0.75



نصب حسگر در غیغ

Installing the sensor in dewlap



نصب حسگر در کنار گوش

Installing the sensor next to the ear

شکل ۲- منحنی‌های ROC برای دو حالت نصب حسگر

Fig.2. ROC curves for two sensor installation modes

$$Y = -2.31959 - 0.07270 \max. 50. mean - 5.79403 \text{ stdv. } 50. sum + 20.33501 \text{ stdv. } 50. mean - 0.30176 \text{ var. } 50. mean \quad (2)$$

ارزیابی عملکرد مدل نهایی

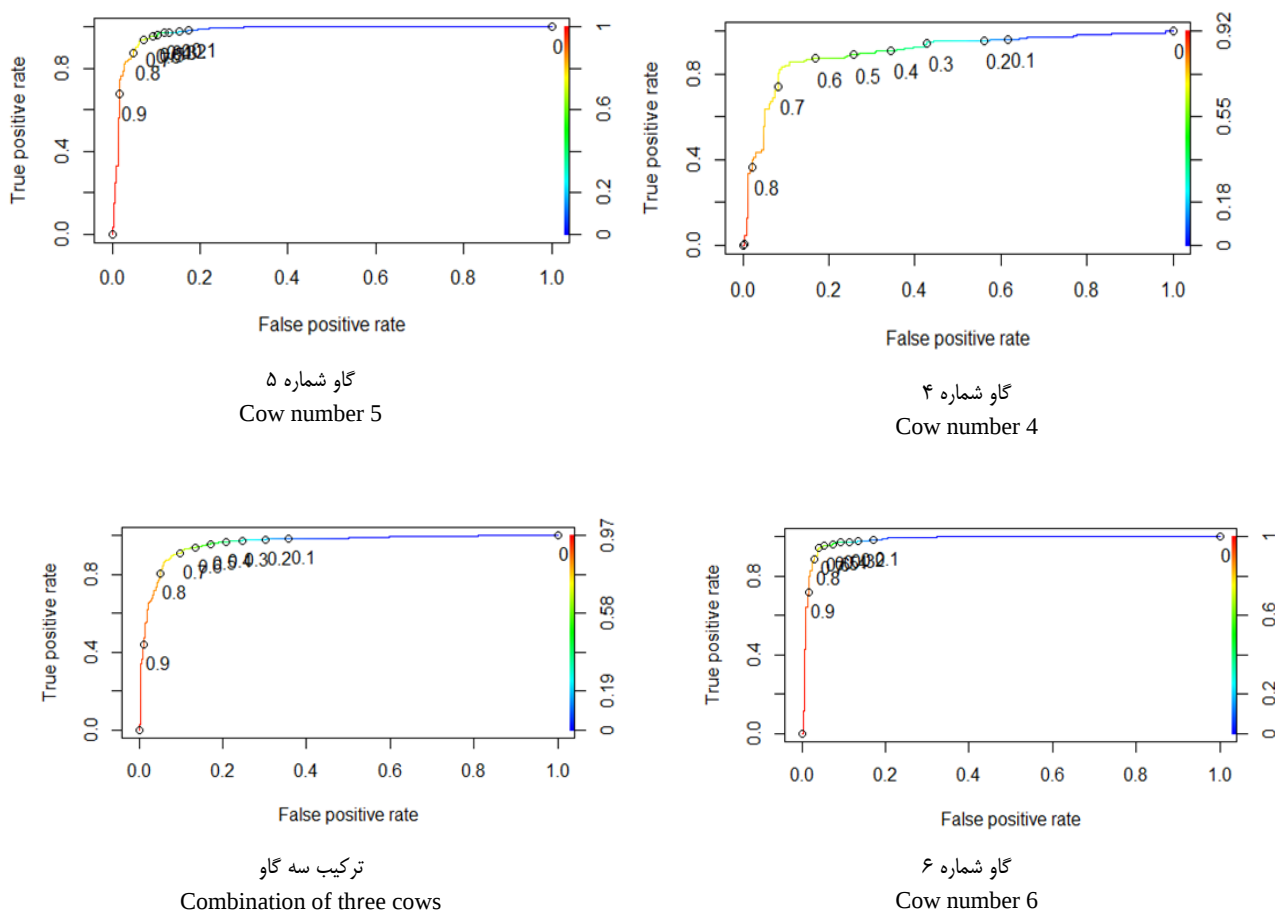
در این مرحله از پژوهش، برای ارزیابی مدل نهایی، داده‌برداری‌های جدیدی در طی دو روز انجام شد که ثبت داده‌ها به دو صورت برچسب‌گذاری رفتارهای مختلف در گوسه و ثبت دستی رفتارهای گاو در هر ۵ دقیقه انجام شد. نتایج تحلیل در جدول ۵ و معیارهای ارزیابی برای عملکرد حسگر در طی دو روز در جدول ۶ بیان شده‌اند.

در راستای سنجش میزان تشخیص درست فرآیند نشخوار از روابط مدل‌های حاصل شده برای گاوهای شماره ۴، ۵ و ۶ از داده‌های یک روزه گاو جدید استفاده شد و با جای‌گذاری داده‌ها در رابطه مدل گاو ۴ تشخیص درست ۷۴٪، رابطه مدل گاو ۵ تشخیص ۹۰/۴٪ و در رابطه مدل گاو ۶ تشخیص درست ۹۲/۵۳٪ حاصل شدند. همچنین برای اطمینان از عملکرد رابطه نهایی مدل حاصل شده برای تمامی گاوها، تشخیص درست ۸۵/۴۱٪ به دست آمد. شکل نهایی مدل در رابطه (۲) آمده است.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی حسگر پوزه‌بندی

Table 4- Muzzle sensor evaluation criteria

شماره گاو Cow number	موقعیت حسگر Sensor position	آستانه Threshold	حساسیت Sensitivity	صحت Precision	F-Score
4	Muzzle	0.6	0.84	0.87	0.85
5	Muzzle	0.6	0.91	0.95	0.93
6	Muzzle	0.6	0.95	0.95	0.95
ترکیب داده‌های سه گاو Combining data from three cows	Muzzle	0.7	0.90	0.91	0.91
کل داده‌ها All data	Muzzle	0.6	0.88	0.94	0.91



شکل ۳- منحنی ROC مدل سازی با چهار فاکتور برای گاوه های مختلف

Fig.3. ROC curve of modeling with four factors for different cows

Score برابر با ۹۱٪ بودند که نشانگر تطابق داده ها و درستی آن ها بوده و حسگر توانایی لازم برای تشخیص های درست بین نشخوار و سایر رفتارها را داشت.

با مقایسه داده های حسگر ثبت شده با برچسب های ثبت شده بصری از رفتارهای مختلف گاوه در هر ۵ دقیقه، رفتارها مقایسه شده و صحت داده ها تعیین شد. در نتیجه گیری کلی برای دو روز می توان گفت که مشاهدات بصری با داده های ثبت شده حسگر دارای مقدار F-

جدول ۵- نتایج آزمون عملکرد حسگر

Table 5- Sensor performance test results

تحلیل Analysis	درصد تشخیص Detection percentage (%)
تحلیل روز اول حسگر با استاندارد ۵ دقیقه ای Analysis of the first day of the sensor with a 5-minute standard	87.5
تحلیل روز دوم حسگر با استاندارد ۵ دقیقه ای Analysis of the second day of the sensor with a 5-minute standard	93
تحلیل روز اول حسگر با برچسب گذاری رفتار Analysis of the first day of the sensors with behavioral tagging	86
تحلیل روز دوم حسگر با برچسب گذاری رفتار Analysis of the second day of the sensors with behavioral tagging	87
تحلیل نتایج ترکیب کل دو روز Analysis of the results of the combination of two days	85

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل برای داده‌های هر روز

Table 6- Model evaluation criteria for each day's data

نتایج Results	حساسیت Sensitivity	صحت Precision	F-Score
روز اول عملکرد حسگر با برچسب‌گذاری رفتار First day of sensor performance with behavioral tagging	0.92	0.77	0.84
روز دوم عملکرد حسگر با برچسب‌گذاری رفتار Second day of sensor performance with behavioral tagging	0.86	0.90	0.88
ترکیب دو روز با برچسب‌گذاری رفتار Combining two days with behavior labeling	0.88	0.90	0.89
روز اول عملکرد حسگر با استاندارد ۵ دقیقه‌ای The first day of sensor performance with a 5-minute standard	1	0.66	0.80
روز دوم عملکرد حسگر با استاندارد ۵ دقیقه‌ای The second day of sensor performance with a 5-minute standard	0.94	0.94	0.94
ترکیب دو روز با استاندارد ۵ دقیقه‌ای Combination of two days with 5-minute standard	0.95	0.87	0.91

۷ حاصل شد.

با توجه به تعداد تشخیص‌های اشتباه و درست رفتارهای نشخوار و سایر رفتارها در هر روز، اجزای ماتریس مختلط محاسبه گردید. مقادیر صحت، حساسیت و F-Score حاصل شده برای داده‌های هر روز در جدول ۸ بیان شده‌اند.

نتایج عملکرد میدانی حسگر توسعه‌یافته

حسگر نهایی به مدت دوازده ساعت در طی سه روز مورد آزمون قرار گرفت. علاوه بر ثبت رفتار نشخوار یا سایر رفتارها گاو و زمان هر رفتار توسط حسگر، رفتارهای گاو در طی هر ۵ دقیقه به صورت بصری مشاهده و یادداشت گردید. پس از تطابق داده‌های ذخیره‌شده در اس‌دی کارت با داده‌های ثبت شده دستی، نتایج تحلیل به شرح جدول

جدول ۷- نتایج عملکرد حسگر نهایی

Table 7- Final sensor performance results

تحلیل Analysis	درصد تشخیص Detection percentage
تطابق داده‌های روز اول Match the first day's data	%86.08
تطابق داده‌های روز دوم Match the second day's data	%90.07
تطابق داده‌های روز سوم Match the third day's data	%91.95
تحلیل داده‌های نشخوار داده‌های سه روز Data analysis of rumination data of three days	%90.67
تحلیل داده‌های غیرنشخوار داده‌های سه روز Non-rumination data analysis of three days' data	%88.81
تحلیل کل داده‌های سه روز Total data analysis of three days	%89.47

جدول ۸- معیارهای ارزیابی مدل برای داده‌های حسگر نهایی

Table 8- Model evaluation criteria for final sensor data

نتایج Results	حساسیت Sensitivity	صحت Precision	F-Score
روز اول First day	0.92	0.72	0.81
روز دوم Second day	0.94	0.82	0.88
روز سوم Third day	0.89	0.91	0.90
ترکیب سه روز Three day composition	0.91	0.82	0.86

نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به تلفات دامی بر اثر بیماری‌ها و ضرر و زیان‌های مالی فراوان به دام‌دار، نیاز به حسگرهای تشخیص رفتارهای گاو بیش از پیش احساس می‌شود. با این حال حسگرهای تشخیص در مراحل آزمایشی بوده و به تولید انبوه نرسیده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های حسگر و مشاهدات مستقیم نشانگر درصد تشخیص ۸۹/۴۷٪ می‌باشد. استفاده از چهار فاکتور (stdv.50.sum, max.50.mean, stdv.50.mean و var.50.mean) در دستیابی به بالاترین درصد تشخیص موثر بودند. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی به بررسی فاصله زمانی بین هشدار کاهش زمان نشخوار در حسگر با بروز بیماری در گاو پرداخته شود. همچنین می‌توان در مورد نحوه نصب حسگر برای راحتی بیشتر گاو به ایده‌های جدیدی پرداخته شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مجموعه گاوداری خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز، اساتید و کارکنان آن به‌خاطر حمایت‌هایی که از این طرح داشتند و گامی در جهت حمایت از دانشگاه و علم برداشتند کمال تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

مشارکت نویسندگان

الناز واحدی تکمه‌داش: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، اعتبارسنجی، استخراج و تهیه متن اولیه
حسین نوید: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، تحلیل آماری، اعتبارسنجی و ویرایش متن
حمیدرضا قاسم‌زاده: مفهوم‌سازی، مشاوره فنی و ویرایش متن
هادی کریمی: روش‌شناسی، مشاوره فنی، پردازش داده‌ها و تصویرسازی نتایج
مهسا جوانی: جمع‌آوری داده‌ها و پردازش داده‌ها

بنا به نتایج حاصل‌شده از تحلیل آزمون نهایی حسگر، مقادیر به‌دست‌آمده از عملکرد حسگر قابل‌قبول بوده و این حسگر در تشخیص رفتارهای نشخوار بسیار خوب عمل کرده و آن را از سایر رفتارها به خوبی تفکیک کرده است. طبق نتایج وانگ و همکاران (Wang et al., 2017) که علاوه بر شتاب‌سنج سه‌محوره از حسگر صدا نیز استفاده کرده بودند، درصد تشخیص نشخوار کمتر از حسگر جدید بوده و دخالت صدای اطراف در ثبت داده‌های گاو از جمله معایب آن حسگر محسوب می‌شد. استفاده از حسگر پیشنهادی مقادیر مثبت کاذب را کاهش داده و سبب افزایش تشخیص‌های درست می‌گردد. همچنین در اعتبارسنجی حسگرهای بر مبنای فشار به همراه تعدادی دوربین ضبط‌کننده توسط روسکا و همکاران (Ruuska et al., 2018) می‌توان مشاهده کرد که مقادیر صحت و حساسیت حسگر برای سنجش رفتار نشخوار کمتر از حسگر پیشنهادی بوده و مقایسه مشاهدات بصری با داده‌های حسگر عملکرد بهتری را داشته است.

معیارهای ارزیابی مدل در حسگر پیشنهادی بالاترین میزان بوده و مقادیر حساسیت ۸۸٪، صحت ۹۴٪ و F-Score ۹۱٪ با آنالیز رگرسیون لجستیک به‌دست آمدند. در اکثر مقالات قبلی برای اعتبارسنجی حسگر از الگوریتم‌های طراحی‌شده قبلی استفاده کردند که در آن‌ها معیارهای ارزیابی مدل حساسیت، صحت و غیره بیان نشدند (Zambelis, Wolfe, & Vasseur, 2019). در معیارهای ارزیابی ارائه‌شده روسکا و همکاران (Ruuska et al., 2018) که توسط آنالیز رگرسیون خطی با روش حداقل مربعات بود، مقادیر حساسیت و صحت به ترتیب ۷۷/۸٪ و ۷۹/۵٪ حاصل شدند که در طی مطالعه‌ای دیگر توسط اسمیف و همکاران (Smith et al., 2016) معیارهای ارزیابی حساسیت، صحت و F-Score که با روش جنگل تصادفی (Random forest) محاسبه شدند به ترتیب برابر با ۸۴، ۸۸ و ۸۶٪ بودند. در مقایسه روش‌های بیان‌شده در مطالعات قبلی، آنالیز رگرسیون لجستیک می‌تواند به‌عنوان بهترین راهکار برای دستیابی به بالاترین معیارهای ارزیابی و کاهش تعداد تشخیص‌های اشتباه باشد.

References

- Antanaitis, R., Juozaitienė, V., Malašauskienė, D., & Televičius, M. (2019). Can rumination time and some blood biochemical parameters be used as biomarkers for the diagnosis of subclinical acidosis and subclinical ketosis? *Veterinary and Animal Science*, 8, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2019.100077>
- Ayadi, S., Ben Said, A., Jabbar, R., Aloulou, C., Chabbouh, A., & Achballah, A. B. (2020). Dairy cow rumination detection: A deep learning approach. In *Distributed Computing for Emerging Smart Networks: Second International Workshop, DiCES-N 2020, Bizerte, Tunisia, December 18, 2020, Proceedings 2* (pp. 123-139). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65810-6_7
- Beauchemin, K. A. (2018). Invited review: Current perspectives on eating and rumination activity in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101(6), 4762-4784. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13706>
- Behneghar, H., Majidi, B., & Movaghar, A. (2021). Design of Hardware and Software Platform for Intelligent Automation of Livestock Farming using Internet of Things. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 22(78), 107-126. <https://doi.org/10.22092/amsr.2021.352371.1367>
- Berckmans, D., & Guarino, M. (2017). From the Editors: Precision livestock farming for the global livestock sector. *Animal Frontiers*, 7(1), 4-5. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0101>
- Benaissa, S., Tuytens, F. A., Plets, D., De Pessemier, T., Trogh, J., Tanghe, E., ... & Sonck, B. (2019). On the use of on-cow accelerometers for the classification of behaviours in dairy barns. *Research in Veterinary Science*, 125,

- 425-433. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.10.005>
7. Cavaliere, A., & Ventura, V. (2018). Mismatch between food sustainability and consumer acceptance toward innovation technologies among millennial students: The case of Shelf Life Extension. *Journal of Cleaner Production*, 175, 641-650. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.087>
8. Chang, A. Z., Fogarty, E. S., Moraes, L. E., García-Guerra, A., Swain, D. L., & Trotter, M. G. (2022). Detection of rumination in cattle using an accelerometer ear-tag: A comparison of analytical methods and individual animal and generic models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106595. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106595>
9. Cocco, R., Canozzi, M. E. A., & Fischer, V. (2021). Rumination time as an early predictor of metritis and subclinical ketosis in dairy cows at the beginning of lactation: Systematic review-meta-analysis. *Preventive Veterinary Medicine*, 189, 105309. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105309>
10. Eldesouky, A., Mesias, F. J., Elghannam, A., & Escribano, M. (2018). Can extensification compensate livestock greenhouse gas emissions? A study of the carbon footprint in Spanish agroforestry systems. *Journal of Cleaner Production*, 200, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.279>
11. Fournel, S., Rousseau, A. N., & Laberge, B. (2017). Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming. *Biosystems Engineering*, 155, 96-123. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.005>
12. Grinter, L. N., Campler, M. R., & Costa, J. H. C. (2019). Validation of a behavior-monitoring collar's precision and accuracy to measure rumination, feeding, and resting time of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102(4), 3487-3494. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15563>
13. Gusterer, E., Kanz, P., Krieger, S., Schweinzer, V., Süß, D., Lidauer, L., ... & Iwersen, M. (2020). Sensor technology to support herd health monitoring: Using rumination duration and activity measures as unspecific variables for the early detection of dairy cows with health deviations. *Theriogenology*, 157, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.07.028>
14. Javani, M., Navid, H., Karimi, H., Hosseinkhani, A., & Vahedi Tekmehdash, E. (2022). Development of a method to measure cow rumination. Thesis.
15. Liboreiro, D. N., Machado, K. S., Silva, P. R., Maturana, M. M., Nishimura, T. K., Brandão, A. P., ... & Chebel, R. C. (2015). Characterization of peripartum rumination and activity of cows diagnosed with metabolic and uterine diseases. *Journal of Dairy Science*, 98(10), 6812-6827. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8947>
16. Meen, G. H., Schellekens, M. A., Slegers, M. H. M., Leenders, N. L. G., van Erp-van der Kooij, E., & Noldus, L. P. (2015). Sound analysis in dairy cattle vocalisation as a potential welfare monitor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 111-115. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.028>
17. Pahl, C., Hartung, E., Mahlkow-Nerge, K., & Haeussermann, A. (2015). Feeding characteristics and rumination time of dairy cows around estrus. *Journal of Dairy Science*, 98(1), 148-154. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8025>
18. Ruuska, S., Hämäläinen, W., Kajava, S., Mughal, M., Matilainen, P., & Mononen, J. (2018). Evaluation of the confusion matrix method in the validation of an automated system for measuring feeding behaviour of cattle. *Behavioural Processes*, 148, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2018.01.004>
19. Shen, W., Zhang, A., Zhang, Y., Wei, X., & Sun, J. (2020). Rumination recognition method of dairy cows based on the change of noseband pressure. *Information Processing in Agriculture*, 7(4), 479-490. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.01.005>
20. Smith, D., Rahman, A., Bishop-Hurley, G. J., Hills, J., Shahriar, S., Henry, D., & Rawnsley, R. (2016). Behavior classification of cows fitted with motion collars: Decomposing multi-class classification into a set of binary problems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 131, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.10.006>
21. Stangaferro, M. L., Wijma, R., Caixeta, L. S., Al-Abri, M. A., & Giordano, J. O. (2016). Use of rumination and activity monitoring for the identification of dairy cows with health disorders: Part I. Metabolic and digestive disorders. *Journal of Dairy Science*, 99(9), 7395-7410. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10907>
22. Syarif, I., Ahsan, A. S., Al Rasyid, M. U. H., & Pratama, Y. P. (2019, September). Health monitoring and early diseases detection on dairy cow based on internet of things and intelligent system. In 2019 International Electronics Symposium (IES) (pp. 183-188). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2019.8901527>
23. Topp-Becker, J., & Ellis, J. D. (2017). The role of sustainability reporting in the agri-food supply chain. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 6(1), 17-29. <https://doi.org/10.15640/jaes.v6n1a2>
24. Wang, L., Xie, Q., & Xu, Y. (2017). Recognition and analysis of ruminating behavior of dairy cows based on wearable device. *Animal Environment and Welfare*.
25. Zambelis, A., Wolfe, T., & Vasseur, E. (2019). Validation of an ear-tag accelerometer to identify feeding and activity behaviors of tiestall-housed dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 102(5), 4536-4540. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15766>
26. Zehner, N., Umstätter, C., Niederhauser, J. J., & Schick, M. (2017). System specification and validation of a noseband pressure sensor for measurement of ruminating and eating behavior in stable-fed cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.021>

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 193-209

Design, Construction, and Evaluation of a Spatial Depth Measurement System for Subsoiler in Sugarcane Fields

N. Loveimi^{1*}, A. Azizi¹, A. Kaab², A. Neisi³

1- Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran

2- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran and Mechanization and remote sensing expert of Imam Khomeini Sugarcane Agro-Industrial Company, Ahvaz, Iran

3- Department of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz and Head of Water, Soil and Meteorology Department of Imam Khomeini Sugarcane Agro-Industrial Company, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: n1584m@yahoo.com)

Received: 28 April 2024

Revised: 12 June 2024

Accepted: 19 June 2024

Available Online: 23 February 2025

How to cite this article:

Loveimi, N., Azizi, A., Kaab, A., & Neisi, A. (2025). Design, Construction, and Evaluation of a Spatial Depth Measurement System for Subsoiler in Sugarcane Fields. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 193-209. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.87809.1242>

Introduction

Subsoiling is a critical tillage operation for many crops, particularly sugarcane, due to the impact of agricultural machinery traffic and its significance in managing heavy-textured and compacted soils. Given the extensive size of sugarcane fields and the time-intensive nature of subsoiling operations, the application of intelligent control techniques for monitoring and managing these processes is of considerable importance. Currently, subsoiling operations are monitored using manual gauges. This approach involves collecting a limited number of samples per hectare, typically after the operation is completed, which makes it nearly impossible to implement real-time corrections. To address this limitation, the development and implementation of a depth measurement system offer a promising solution. Such a system enables real-time observation of working depth by both the operator, via an on-screen display, and by a remote observer through an online platform. This capability allows for immediate adjustments during the operation, ensuring greater precision and efficiency. Furthermore, by integrating recorded depth data with geospatial information, it becomes possible to generate detailed maps illustrating depth variations across the field. These maps can serve as valuable tools for further evaluations, such as performance monitoring in areas where subsoiling depth deviates from the desired range, either being too shallow or excessively deep. This technological advancement has the potential to significantly enhance the accuracy and effectiveness of subsoiling operations in modern agricultural practices.

Materials and Methods

This study focused on the design, development, and evaluation of a depth measurement system for a subsoiler attached to a track-type tractor, specifically tailored for sugarcane fields. The system not only provided real-time depth display but also recorded the location and transmitted it online. The research employed three distinct depth measurement techniques and was conducted using a randomized complete block design with split plots. The main plots are the three depth measurement techniques: based on the angles of the driving profiles of the subsoiler shanks (T_1), the laser distance measurement method (T_2), and the ultrasonic distance measurement



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.87809.1242>

method (T_3), and sub-plots are depth ranges at three levels: 0-30 cm (R_1 : surface range), 30-60 cm (R_2 : mid-range), and 60-90 cm (R_3 : deep range). Initially, we calculated the absolute difference between the depths recorded by the system and those measured manually with a rod at each location. Following this, we analyzed key statistical indicators, including the average, standard deviation, and the minimum and maximum of errors, for comparison.

Results and Discussion

The results showed that the depth measurement error was significantly influenced by the technique employed. The angle technique yielded the lowest average error of 1.91 cm, while the ultrasonic technique resulted in the highest average error of 3.83 cm. Across all depth ranges, statistical indicators for depth error were significant. Specifically, within these ranges, the deep range exhibited an average depth error of 2.33 cm, and the surface range had an average error of 3.65 cm. Statistical analysis revealed that only indices related to minimum and maximum errors for interactions between factors were significant. The lowest minimum error value (0.05 cm) was observed with the angle technique at deeper depths, whereas the highest minimum error (0.34 cm) occurred with ultrasonic measurements at shallower depths on surfaces. Similarly, maximum errors followed this trend: The lowest maximum error (3.21 cm) was associated with angle measurements at deeper depths, while ultrasonic measurements on surfaces yielded a higher maximum error (8.63 cm). Both laser and ultrasonic techniques consistently demonstrated greater errors across all three depth ranges compared to angle-based methods. This discrepancy may be attributed to inaccuracies inherent in rangefinders when their beams encounter obstacles like clods or pits during field operations. Notably, as working depths increased across all measurement techniques, errors in depth measurement decreased significantly due to reduced vibrations from subsoiler devices at greater depths, thereby minimizing vibration-related inaccuracies.

Conclusion

The results indicate that the depth measurement technique based on the angles of the driving profiles of subsoiler shanks exhibits superior accuracy in determining the working depth of subsoilers mounted on tractors, particularly during sugarcane field operations. The laser distance meter technique ranked second in terms of accuracy, while the ultrasonic distance meter method demonstrated the least precision. Notably, as working depths increased, reduced vibrations during operation were observed, leading to enhanced accuracy in depth calculations across all techniques. This improvement is attributed to decreased mechanical disturbances at greater depths. Overall, measurements within deeper ranges achieved higher levels of accuracy compared to those at shallower surface ranges. This trend suggests that operational conditions and device stability play significant roles in optimizing measurement accuracy.

Keywords: Angle sensor, Depth monitoring, Laser distance meter, Precision farming, Ultrasonic distance meter

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش مکانی عمق زیرشکن در مزارع نیشکر

نعیم لویمی^{۱*}، آذرخش عزیزی^۱، علی کعب^۲، عادل نیسی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

چکیده

زیرشکنی لایه زیرین خاک با توجه به رفت و آمد ماشین‌های کشاورزی و خصوصاً در شرایط بافت سنگین و فشردگی زیاد خاک، برای بسیاری محصولات خصوصاً نیشکر بسیار حیاتی است. در این تحقیق اقدام به طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش عمق بر روی زیرشکن متصل به بولدوزر در مزارع نیشکر گردید. برای ارزیابی عمق سامانه از قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به روش کرت‌های یک بار خرد شده استفاده گردید. کرت‌های اصلی در سه سطح روش‌های عمق‌سنجی بر مبنای زوایای شاسی‌های محرک شاخه‌های زیرشکن، فاصله‌سنج لیزری و فاصله‌سنج فراصوتی و کرت‌های فرعی در سه سطح عمق ۰-۳۰ (سطحی)، ۳۰-۶۰ (میانی) و ۶۰-۹۰ (عمیق) سانتی‌متری بودند. نتایج نشان داد که تمام شاخص‌های آماری خطای عمق در اثر نوع روش عمق‌سنجی معنی‌دار بود و کمترین و بیشترین میانگین خطای عمق به ترتیب با ۱/۹۱ سانتی‌متر در روش زوایا و ۳/۸۳ سانتی‌متر در روش فراصوتی به دست آمد. همچنین تمام شاخص‌های آماری خطای عمق در اثر دامنه‌های عمق معنی‌دار بود و کمترین و بیشترین میانگین خطای عمق به ترتیب با ۲/۳۳ سانتی‌متر در دامنه عمیق و ۳/۶۵ سانتی‌متر در دامنه سطحی به دست آمد. همچنین فقط شاخص‌های آماری حداقل و حداکثر خطا در اثر متقابل دو عامل معنی‌دار بودند و کمترین و بیشترین مقادیر حداقل خطا به ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۰/۰۵ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۰/۳۴ سانتی‌متر تعلق داشت در حالی که کمترین و بیشترین مقادیر حداکثر خطا به ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۳/۲۱ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۸/۶۳ سانتی‌متر تعلق داشت.

واژه‌های کلیدی: پایش عمق، حسگر زاویه، فاصله‌سنج لیزری، فاصله‌سنج فراصوتی، کشاورزی دقیق

مقدمه

استان خوزستان تنها استانی در کشور است که در آن محصول نیشکر کشت می‌شود. در سند الگوی کشت، نیشکر جزو کشت‌های مصوب استان خوزستان در نظر گرفته شده و سطح زیر کشت آن ۸۹ هزار هکتار پیشنهاد شده است (Anonymous, 2021). دوره تناوب محصول نیشکر دو تا پنج سال طول می‌کشد و در بعضی موارد با توجه به شرایط مساعد خاک و مزرعه تا هفت سال هم مزرعه می‌تواند عملکرد قابل قبول در هر سال داشته باشد. به مزارع نیشکری که سال اول کشت شده، پلنت و به مزارع سال‌های بعد، راتون می‌گویند (Kaab, Sharifi, & Mobli, 2019). عملیات تهیه زمین برای کشت نیشکر به دلیل تناوب بلندمدت بسیار مهم و در عمق‌های زیاد انجام می‌شود. دیسک اولیه جهت خراب کردن جویچه‌های^۴ محصول قبل، دو بار زیرشکنی، گاوآهن‌برگردان‌دار، چندین بار دیسک، و ایجاد جویچه‌ها، مجموعه عملیات تهیه زمین نیشکر است (Anonymous, 2023).

نیشکر مهم‌ترین محصولی است که برای تولید شکر کشت می‌شود. حدود ۶۰ درصد شکر جهان از نیشکر و حدود ۴۰ درصد آن از چغندر قند تولید می‌شود. علاوه بر تولید شکر، مواد دیگری نیز مانند علوفه، فیبر، خوراک دام، ملاس از نیشکر تولید می‌شود (TaheriGaravand, Asakereh, & Haghani, 2010).

- ۱- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
 - ۲- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران و کارشناس مکانیزاسیون و سنجش از دور، کشت و صنعت امام خمینی (ره)، اهواز، ایران
 - ۳- گروه خاکشناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز و رئیس اداره آب و خاک و هواشناسی، کشت و صنعت امام خمینی (ره)، اهواز، ایران
- (*)- نویسنده مسئول:
Email: n1584m@yahoo.com

doi <https://doi.org/10.22067/jam.2024.87809.1242>

میزان تردد ادوات کشاورزی، و مهم‌تر از همه وجود لایه سخت در خاک تعریف شده است (Mansourirad, 1993). نتایج تحقیقات در مورد تأثیر عملیات زیرشکن بر عملکرد چغندر قند در استان فارس نشان داد که زیرشکنی خاک باعث کاهش مقاومت به نفوذ خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک، کاهش درصد ریشه‌ای شدن، افزایش نفوذ ریشه، قطر ریشه، و عملکرد می‌شود (Solhjo, Dehghanian, Sepaskhah, & Niromand Jahormi, 2006).

لذا با توجه به اهمیت عملیات زیرشکنی و نقش آن در افزایش عملکرد، رصد عمق کار این عملیات مساله اساسی می‌باشد. در حال حاضر نظارت بر کار عمق زیرشکنی به صورت دستی و با به‌کارگیری میله مدرج دستی انجام می‌شود. این کار با تعداد نمونه‌های بسیار محدود از هر هکتار انجام می‌شود که غالباً بعد از اتمام عملیات صورت می‌پذیرد که عملاً امکان اصلاح وجود ندارد. لذا با ساخت و به‌کارگیری سامانه سنجش عمق و با مشاهده لحظه‌ای عمق کار توسط اپراتور در صفحه نمایشگر و هم‌زمان مشاهده آن توسط ناظر در سایت اینترنتی موردنظر امکان اصلاح کار در همان لحظه به‌سادگی ممکن خواهد بود. همچنین با استخراج داده‌های ثبت‌شده همراه با موقعیت مکانی از سامانه موردنظر، نقشه تغییرات عمق در سطح مزارع قابل مشاهده خواهد بود که جهت ارزیابی‌های بعدی از جمله رصد عملکرد در نقاط با عمق کمتر و یا بیشتر می‌تواند مفید باشد.

یک پروژه تحقیقاتی با هدف طراحی و ساخت سیستم عمق‌سنجی و اندازه‌گیری مقاومت برشی در عملیات زیرشکنی انجام شد. در اجرای این پروژه از یک میکروکنترلر با چند ورودی داده از حسگرهای^۲ خاصی که روی جک‌های زاویه و عمق زیرشکن بولدوزر نصب گردیده و یک سیستم موقعیت‌یاب مکانی جهت تعیین موقعیت نقاط اندازه‌گیری شده، استفاده گردید. در این پروژه با انتقال داده‌های به‌دست‌آمده از حداقل ۲۵۰۰ نقطه در یک مزرعه ۲۵ هکتاری نیشکر و تحلیل آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار نقشه توپوگرافی^۳ ترسیم عملیات زیرشکنی در سطح مزرعه حاصل شد (Ahmadizadeh & Charaghi, 2017).

در تحقیقی اقدام به طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه کنترل خودکار موقعیت ادوات کشاورزی نسبت به سطح زمین گردید. این دستگاه، موقعیت مناسب ادوات کشاورزی را نسبت به سطح زمین در هر نقطه از زمین کشاورزی محاسبه می‌کند و سپس وسیله کشاورزی را در موقعیت بهینه قرار می‌دهد. موقعیت بهینه ادوات توسط نرم‌افزار نوشته شده برای دستگاه و با استفاده از داده‌های ورودی محاسبه می‌شود (Fallahikoshali, Aghkhani, & Bayati, 2014).

به دلیل بافت سنگین خاک در استان خوزستان، دوره تناوب چندساله نیشکر، تردد سالیانه بسیاری از ماشین‌های کشاورزی از جمله ماشین سنگین برداشت نیشکر^۱، در طی این دوره، و فشردگی زیاد خاک بعد از اتمام این دوره، دو بار زیرشکنی، زیرشکنی دوم به صورت مورب نسبت به جهت زیرشکنی اول، به عنوان اولین عملیات اصلی تهیه زمین برای نیشکر صورت می‌گیرد (Naseri, Gholamiparshekuhi, Ranjbar, & Mohammad Zamani, 2022). زیرشکنی، عمیق‌ترین عملیات کشاورزی در خاک محسوب می‌شود. عمق زیرشکنی در زمان انجام عملیات تهیه زمین نیشکر ۸۰ تا ۹۰ سانتی‌متر توصیه شده است. زیرشکن همچنین در عملیات داشت به صورت سالیانه زمانی که ارتفاع نیشکر حدود ۵۰ سانتی‌متر است بین خطوط سبز، جهت هوادهی و مبارزه مکانیکی با علف‌های هرز به کار می‌رود و عمق آن در این مرحله در حدود ۴۵ تا ۵۰ سانتی‌متر انجام می‌شود (Mahohi & Khatinzadeh, 2021).

خاک‌ورزی شدید، استفاده از ماشین‌های سنگین برداشت و تردد کامیون‌های حمل و نقل نی در مزرعه که اغلب در شرایط رطوبتی نامناسب انجام می‌شود، از جمله عوامل مؤثر بر فشردگی لایه زیرین و تخریب ساختمان خاک در لایه بالایی می‌باشند (Pankhurst et al., 2003; Cheong, Kwong, & Preez, 2009; Torres, Pereira, Cunha, Martins, & Vieira, 2013). در اثر عبور چرخ‌های تراکتور هنگام اجرای عملیات زراعی، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه حرکت آب و هوا در اطراف ریشه کاهش یافته و عملکرد محصول نیز کم می‌شود (Cassel & Edwards, 1985; Mckyes, Nego, Douglas, Taylor, & Raghavan, 1979). تحقیقات نشان داده است که عملیات خاک‌ورزی، در ابتدا جرم مخصوص ظاهری را به مقدار زیادی کم می‌کند اما با گذشت زمان و به علت ساختمان توده‌ای در خاک و شسته شدن ذرات از افق‌های فوقانی و همچنین تردد بعدی ادوات و ماشین‌های کشاورزی، جرم مخصوص ظاهری را افزایش می‌دهد (Slowinska - Jurkiewicz, 1994). بررسی‌ها نشان داد که تولید محصول ذرت در اثر تراکم خاک حاصل از عبور یک بار محوری ۹ مگاگرم در حدود ۱۸-۵ درصد و در اثر بار محوری ۱۸ مگاگرم حدود ۱۳-۳۹ درصد کاهش می‌یابد (Al-Adawi & Reeder, 1996).

توسعه مکانیزاسیون کشاورزی با افزایش تردد و وزن ماشین‌های کشاورزی در مزارع همراه بود که این امر احتمالاً منجر به متراکم شدن خاک می‌شود. یکی از روش‌های مکانیکی برای حل مسأله فشردگی خاک، استفاده از خاک‌ورزی عمیق مانند نیمه‌زیرشکنی، زیرشکنی و گاوآهن قلمی است (Sharif-Nasab, Heydari, Mehdi-Niya, Sadegh Nejad, & Shahrbanunjad, 2014). میزان تأثیر زیرشکنی در افزایش عملکرد با توجه به بافت خاک،

2- Sensors

3- Surfer software

1- Sugarcane harvester

یافته است که در این پژوهش ارزیابی استفاده از فنون و ابزار مرتبط برای اندازه‌گیری عمق مورد توجه قرار گرفته است.

به‌طور مشخص با توجه به اهمیت عملیات زیرشکنی در تهیه زمین نیشکر در استان خوزستان و نبود سامانه پایش برخط عمق این عملیات، این مطالعه با هدف مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری عمق و طراحی و ساخت یک سامانه سنجش مکانی عمق با درجه قابل قبول از اعتبار، براساس دقیق‌ترین روش، ارائه گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲ اجرا گردید. در این تحقیق توسعه یک سامانه سنجش عمق برای دستگاه زیرشکن متصل به بولدوزر که دستگاه اصلی زیرشکنی در مزارع نیشکر مورد توجه قرار گرفت. نمای زیرشکن متصل به بولدوزر در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

این پروژه در سه فاز طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سنجش عمق زیرشکن برای محصول نیشکر برنامه‌ریزی شد. عملیات طراحی و ساخت سامانه در کارگاه فنی مرکز تحقیقات کشاورزی خوزستان، و ارزیابی مزرعه‌ای این سامانه در شرایط مزارع نیشکر شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) واقع در منطقه شعبیه شوشتر، صورت گرفت. در این پروژه سه روش عمق‌سنجی شامل روش عمق‌سنجی بر مبنای زوایای شاسی‌های محرک شاخه‌های زیرشکن، روش عمق‌سنجی بر پایه روش فاصله‌سنج لیزری و روش عمق‌سنجی بر مبنای روش فاصله‌سنج فراصوتی، برای ساخت سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت.

در فاز طراحی سامانه، با توجه به تعریف سه روش عمق‌سنجی، روش زوایا، روش فاصله‌سنج لیزری و روش فاصله‌سنج فراصوتی، ابتدا ورودی‌ها و خروجی‌های مدارهای هریک از روش‌ها مشخص گردید (شکل ۲). برای مشخص کردن ورودی‌ها جهت محاسبه عمق در سه روش عمق‌سنجی، با دقت، کار زیرشکنی با بولدوزر و چگونگی تغییرات عمق آن مورد مشاهده قرار گرفت. برای این کار علاوه بر بازدید از عملیات زیرشکنی، تصویر و فیلم از این عملیات اخذ شد. با دقت در تصاویر و فیلم‌های زیرشکنی، زوایای موثر در تغییر عمق جهت روش عمق‌سنجی بر مبنای زوایا مشخص گردیده، و به‌عنوان ورودی این روش در نظر گرفته شدند. همچنین فاصله یا فواصل متغیری که می‌تواند در ارتباط با تغییر عمق موثر باشد، مشخص شده و به‌عنوان ورودی روش‌های عمق‌سنجی لیزری و فراصوتی تعریف گردیدند (شکل ۲). پس از این، روابط ریاضی سنجش عمق براساس این متغیرهای ورودی تعریف شد. همچنین کدنویسی این روابط و تعریف داده‌های ورودی و خروجی برای هر یک از روش‌ها در محیط برنامه C انجام گردید.

طراحی و پیاده‌سازی سامانه تنظیم کشش الکتروهیدرولیکی برای تراکتور مسی فرگوسن با به‌کارگیری شیر کنترل الکترونیکی به‌عنوان هدف یک پروژه تحقیقاتی تعریف شد. در این تحقیق با به‌کارگیری شیر کنترل الکترونیکی اتصال سه نقطه جدید، سامانه کنترل کشش الکتروهیدرولیکی نصب شد. اجزای سامانه الکتروهیدرولیکی شامل حسگر نیروی کشش، شیر کنترل و نمایشگر می‌باشد. نتایج آزمون‌های کارگاهی نشان داد عملکرد سامانه در مورد عمق شخم در پاسخ به تغییرات پله‌ای نیروی کشش رضایت‌بخش بود و موقعیت گاواهن متناسب با نیروی اعمال‌شده، تغییر داده شد (Moradinejad, 2017).

در پژوهشی به توسعه و ارزیابی عملکرد یک سامانه کنترل الکتریکی-هیدرولیکی برای زیرشکن با عمق متغیر پرداخته شد. بنابراین یک سیستم کنترل الکتریکی-هیدرولیکی برای زیرشکن به‌صورت انعطاف‌پذیر ساخته شد و یک روش جدید برای تشخیص عمق خاک‌ورزی توصیف شد. عملکرد سیستم کنترل الکتریکی-هیدرولیکی در آزمایش خاک با تشخیص قابل قبول دقت عمق خاک‌ورزی و کیفیت عملیات (یکنواختی توزیع عمق خاک‌ورزی و کاهش نیروی کششی) ارزیابی شد (Wang et al., 2018).

حسگرهای لیزری برای تعیین مسافت و فاصله در بسیاری از پژوهش‌ها بکار رفته است. این حسگر برای شناسایی اشیاء بیشتر و نیز هرگونه مانع در مسیر نوابری برای ربات انسان‌نما با موفقیت مورد ارزیابی قرار گرفت (Bonaiuto & Zanela, 2022). به دلیل هزینه کم و سهولت ساخت، حسگر ترکیبی متشکل از یک دوربین و یک فاصله‌یاب لیزری یک‌بعدی در زمینه هوافضا، برای رصد زمین و اکتشافات اعماق فضا مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های داده‌های واقعی نشان داد که این روش در زمینه شناخت پدیده‌ها موفق بود (Tu et al., 2022). حسگرهای فراصوتی^۱ در شناخت وجود موانع در مسیر حرکت و نیز اندازه‌گیری فاصله‌ها کاربرد زیادی در وسایل نقلیه موتوری دارند (Carullo & Parvis, 2001). در زمینه کشاورزی یک سیستم با استفاده از حسگر فراصوتی برای ارزیابی عمق قرارگیری بذور در خاک توسعه یافت و عملکرد آن در شرایط مختلف از جمله در خاک خشک و مرطوب و نیز خاک صاف و ناهموار با نتایج رضایت‌بخش ارزیابی گردید (Kiani, Kamgar, & Raoufat, 2010).

براساس مرور منابع، عملیات کشاورزی و تردد ماشین‌ها در مزرعه موجب افزایش فشردگی خاک شده است. همچنین منابع بررسی‌شده بر بهبود عملکرد محصولات کشاورزی با انجام عملیات زیرشکنی دلالت می‌کند. ابزار و فنون مختلفی همچون الکتریکی، هیدرولیکی و انواع حسگرها برای اندازه‌گیری فاصله در زمینه‌های مختلفی توسعه



ب- زیرشکن و بولدوزر در حال انجام عملیات در مزرعه
B- The subsoiler and bulldozer on the farm

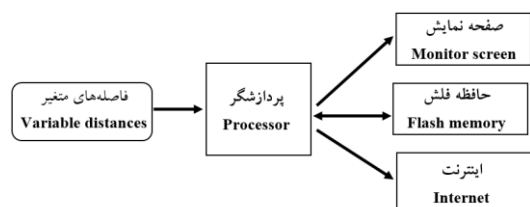


الف- زیرشکن و بولدوزر خارج از مزرعه
A- The subsoiler and bulldozer outside the farm

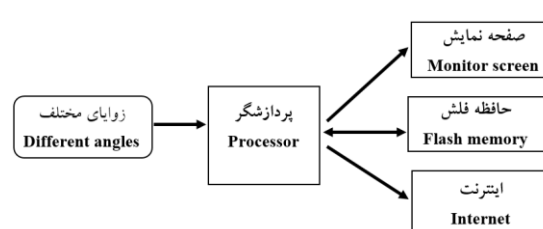
شکل ۱- نمایی از دستگاه زیرشکن متصل به بولدوزر
Fig.1. A view of the subsoiler device attached to the bulldozer

جدول ۱- مشخصات زیرشکن و بولدوزر این تحقیق
Table 1- Characteristics of subsoiler and bulldozer in this research

زیرشکن (Subsoiler)					بولدوزر (Bulldozer)			
حداکثر عمق تئوری Maximum theoretical depth (cm)	ارتفاع زیرشکن در حالت تراز The height in the level state (cm)	تعداد شاخه (شنگ‌ها) The number of shanks	عرض ناخن Nail width (cm)	طول ناخن Nail length (cm)	عرض کار Working width (cm)	تعداد جک‌های محرک زیرشکن The number of moving jacks of the subsoiler	توان موتور Engine power (hp)	مدل Model
130	168	3	9	51	330	4	306	D8N



ب- عمق‌سنجی با استفاده از روش فاصله‌سنج لیزری و فراصوتی
B- Depth measurement using laser and ultrasonic distance measuring techniques



الف- عمق‌سنجی با استفاده از روش زوایا
A- Depth measurement using angles technique

شکل ۲- شماتیک ورودی‌ها و خروجی‌های مدارهای مربوط به روش‌های مختلف عمق‌سنجی
Fig.2. Schematic of inputs and outputs of circuits related to different depth measurement techniques

قابل حمل (کارت حافظه) سامانه در نظر گرفته شد تا در صورت وجود مشکل در ارسال برخط داده‌ها، با جابه‌جایی این حافظه، داده‌ها به رایانه‌های کارشناسان منتقل شود. سامانه به زمان‌سنج برای ثبت زمانی هر داده عمق مجهز گردید. همچنین در این سامانه امکان ورود شماره هر مزرعه و کد اپراتور فراهم شد تا عملیات زیرشکنی با دقت و نظارت مستند صورت گیرد. سامانه طوری طراحی شد که فاصله زمانی اخذ داده و ارائه عمق قابل تغییر باشد، اما به صورت پیش‌فرض،

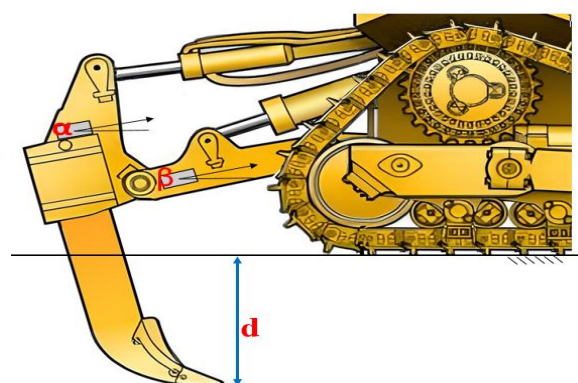
در هر سه روش عمق‌سنجی موقعیت‌یاب GPS تعریف شد تا علاوه بر نمایش عمق برای اپراتور بولدوزر، موقعیت جغرافیایی هر نقطه از اندازه‌گیری عمق ثبت شود. همچنین سامانه به فرستنده داده مجهز گردید و یک سایت خاص در اینترنت تعریف شد تا داده‌های عمق و موقعیت جغرافیایی به صورت برخط برای سایت مورد نظر ارسال شود و در دسترس کارشناسان ناظر قرار گیرد. علاوه بر این امکان ذخیره داده‌های عمق و موقعیت جغرافیایی در حافظه جانبی

کاهش عمق، و در مقابل افزایش زاویه (β) نسبت به افق باعث افزایش عمق می‌شود. لذا رابطه عمق‌سنجی براساس روش زوایا، طبق رابطه (۱) تعریف شد که در آن هر یک از زوایا به‌وسیله حسگرهای زاویه‌سنج محاسبه می‌گردد:

$$d = T(\alpha, \beta) \quad (1)$$

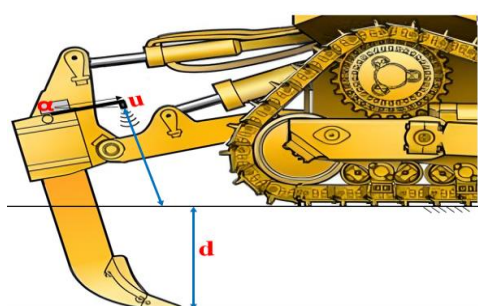
در این رابطه d ، عمق نفوذ زیرشکن در خاک (سانتی‌متر)؛ α ، زاویه چرخش شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن (درجه)؛ و β ، زاویه شاسی حامل شاخه‌ها (درجه) می‌باشد.

فاصله زمانی ۵ ثانیه برای این سامانه تعریف گردید. در روش عمق‌سنجی با به‌کارگیری روش زوایا، با توجه به مشاهده دقیق کار زیرشکنی، مشخص شد که کار تغییر عمق از جمله کاهش یا افزایش آن در دستگاه زیرشکن متصل به بولدوزر با تغییر زاویه چرخش شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن (α) و نیز تغییر زاویه شاسی حامل شاخه‌ها (β) که ارتفاع آن‌ها را نسبت به سطح زمین کم و زیاد می‌کند، صورت می‌گیرد (شکل ۳-الف). بدین شکل که میزان عمق زیرشکن (d) با زاویه (α) رابطه عکس، و با زاویه (β) رابطه مستقیم دارد؛ به عبارتی افزایش زاویه (α) نسبت به افق باعث

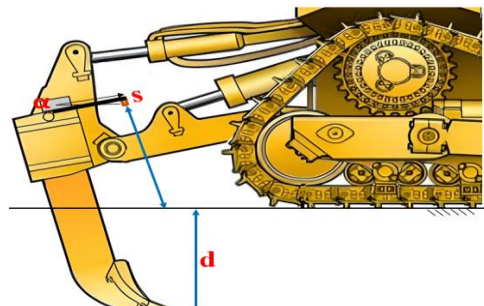


الف- سنجش عمق (d) با استفاده از حسگرهای زوایای شاسی‌ها نسبت به افق (α و β)

A- Measuring depth (d) with sensors based on the profiles' angle relative to the horizon (α and β)



ب- سنجش عمق (d) با استفاده از فاصله‌سنجی به‌وسیله حسگر لیزری (s) و زاویه این حسگر نسبت به افق (α)



ج- سنجش عمق (d) با استفاده از فاصله‌سنجی به‌وسیله حسگر فراصوتی (u) و زاویه متغیر این حسگر نسبت به افق (α)

ب- سنجش عمق (d) با استفاده از فاصله‌سنجی به‌وسیله حسگر لیزری (s) و زاویه این حسگر نسبت به افق (α)

B- Measuring depth (d) using distance measurement by a laser sensor (s) and the variable angle of the sensor relative to the horizon (α)

شکل ۳- محل استقرار حسگرها و اجزای موثر در روش‌های مختلف عمق‌سنجی زیرشکن

Fig.3. The placement of sensors and effective elements in different subsoiler depth measurement techniques

حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (α) رابطه عکس، و همچنین با فاصله لیزری (s) نیز رابطه معکوس دارد؛ به عبارتی برای داشتن عمق بیشتر باید زاویه (α)، کمتر و نیز شاسی نگهدارنده نسبت به زمین، پایین‌تر قرار گیرد. بنابراین رابطه عمق‌سنجی براساس روش فاصله‌سنج لیزری، طبق رابطه (۲) تعریف شد که در آن فاصله مورد نظر به‌وسیله حسگر فاصله‌سنج لیزری و زاویه مذکور به‌وسیله حسگر

در عمق‌سنجی با به‌کارگیری روش فاصله‌سنج لیزری و براساس مشاهده دقیق کار زیرشکنی، مشخص شد که علاوه بر فاصله (s)، فاصله شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن نسبت به زمین که فاصله‌سنج لیزری نصب‌شده بر این شاسی محاسبه می‌کند، تغییر زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (α) نیز در میزان عمق تاثیر دارد (شکل ۳-ب). بدین شکل که میزان عمق زیرشکن (d) با زاویه

زاویه سنج محاسبه می‌گردد:

$$d = T(\alpha, s) \quad (2)$$

در این رابطه d ، عمق نفوذ زیرشکن در خاک (سانتی‌متر)؛ α ، زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (درجه)؛ و s ، فاصله حسگر لیزری تا سطح رویی خاک (سانتی‌متر) که توسط این حسگر محاسبه شده، می‌باشد.

همچنین در عمق‌سنجی با به‌کارگیری روش فاصله‌سنج فراصوتی همانند روش فاصله‌سنج لیزری، مشخص گردید فاصله (u)، فاصله شاسی نگهدارنده شاخه‌های زیرشکن نسبت به زمین که فاصله‌سنج فراصوتی نصب‌شده بر این شاسی محاسبه می‌کند و نیز زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق، در تغییر عمق زیرشکن دخیل هستند (شکل ۳-ج). بدین شکل که میزان عمق زیرشکن (d) با زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (α)، رابطه عکس و همچنین با فاصله فراصوتی (u) نیز رابطه معکوس دارد؛ به عبارتی برای داشتن عمق بیشتر باید زاویه (α)، کمتر و نیز شاسی نگهدارنده نسبت به زمین، پایین‌تر قرار گیرد. در نتیجه رابطه عمق‌سنجی براساس روش فاصله‌سنج فراصوتی، به شکل رابطه (۳) تعریف شد که در آن فاصله مورد نظر به‌وسیله حسگر فاصله‌سنج فراصوتی و زاویه مذکور به‌وسیله حسگر زاویه‌سنج محاسبه می‌گردد:

$$d = T(\alpha, u) \quad (3)$$

در این رابطه d ، عمق نفوذ زیرشکن در خاک (سانتی‌متر)؛ α ، زاویه حسگر فاصله‌سنج نسبت به افق (درجه)؛ و u ، فاصله حسگر فراصوتی تا سطح رویی خاک (سانتی‌متر) که توسط این حسگر محاسبه شده، می‌باشد.

در فاز ساخت سامانه، پس از طراحی مدار برای هر یک از سه روش عمق‌سنجی، نیازهای سخت‌افزاری آن‌ها از جمله کارت حافظه، موقعیت‌یاب GPS، حسگرهای زاویه‌سنج، حسگر سنجش فاصله لیزری، حسگر سنجش فاصله فراصوتی و اتصالات و تبدیلات مربوطه تهیه شد و براساس نقشه مدارها عملیات بستن مدار صورت گرفت. البته ابتدا به‌صورت جداگانه کارایی هر یک از حسگرها مورد آزمون قرار گرفت و بعد از اطمینان از میزان صحت هر یک از حسگرها، در مدار قرار داده شدند. به عبارتی علاوه بر انتخاب حسگرها از برندهای معتبر، برای ارزیابی سالم و دقیق بودن هر یک از آن‌ها، حسگرهای زاویه‌سنج با مقایسه با زوایای ثابت گونیا همچون ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، و حسگرهای فاصله‌سنج لیزری و فراصوتی با مقایسه با چند فاصله مشخص خط‌کش مدرج، آزمون شدند.

مکان جای‌گذاری اجزای مدارها و موقعیت آن‌ها از جمله جعبه‌های حسگرهای زاویه‌سنج، فاصله‌سنج لیزری و نیز فاصله‌سنج فراصوتی روی دستگاه زیرشکن و نیز جعبه‌های پردازشگر و نیز

نمایشگر بر روی بولدوزر، براساس شکل و ابعاد زیرشکن و بولدوزر انتخاب گردید. ایمنی و سهولت نصب حسگرها و نیز امکان تنظیمات نیز در این مساله در نظر گرفته شد. جعبه‌ها طوری انتخاب شدند که نسبت به ورود آب و گرد و خاک و نیز ضربه‌های احتمالی مقاوم باشند و لذا با اطمینان، مدارهای الکترونیکی از جمله مدار حسگرها، پردازشگر و نیز نمایشگر در این جعبه‌ها جای‌گذاری گردید.

اجزای روش عمق‌سنجی بر مبنای زوایا، شامل دو حسگر زاویه‌سنج که در هریک از آن‌ها حسگرهای زاویه‌سنج و اتصالات مربوطه وجود دارد، مدار اصلی پردازشگر، و صفحه نمایش عمق برای اپراتور است (شکل ۴-الف). اجزای روش عمق‌سنجی لیزری نیز شامل یک حسگر زاویه‌سنج که در آن حسگر زاویه‌سنج و اتصالات مربوط به آن وجود دارد، حسگر فاصله‌سنج لیزری و اتصالات آن، مدار اصلی پردازشگر و صفحه نمایش عمق برای اپراتور، می‌باشد (شکل ۴-ب). اجزای روش عمق‌سنجی فراصوتی همانند فاصله‌سنج لیزری بوده با این تفاوت که به‌جای حسگر فاصله‌سنج لیزری، حسگر فاصله‌سنج فراصوتی، وجود دارد (شکل ۴-ج).

مکان نصب هریک از اجزای روش‌ها روی زیرشکن و بولدوزر طوری انتخاب گردید که کمترین آسیب و احتمال ضربه را داشته باشند و همچنین برای دسترسی برای نصب، ایمن و راحت باشند. همچنین با تعبیه کردن صفحات فلزی پیچ‌دار^۱، امکان باز کردن اجزا در فصل غیرکاری به‌سادگی ایجاد گردید.

در روش‌های عمق‌سنجی لیزری و فراصوتی، با توجه به این‌که این حسگرها باید در جایی مستقر شوند که صرفاً فاصله با سطح خاک را اندازه بگیرند و با هر نوع تغییر زوایای شاسی‌ها، تماس پرتو این حسگرها باید فقط با سطح خاک باشد و هیچ‌گونه برخوردی با قطعات زیرشکن حادث نشود تا خطاهای متاثر از این مساله به صفر برسد، بوم‌نگهدارنده‌ای برای منظور ساخته شد (بخش h در قسمت‌های ب و ج شکل ۴). این بوم، حسگرهای لیزری و فراصوتی را در هر شرایطی، در جایی که هیچ‌گونه برخوردی از پرتو این حسگرها با چیزی غیر از سطح خاک وجود نداشته باشد، نگه داشته است.

یادآور می‌شود برای هریک از حسگرهای زاویه‌سنج از حسگر مدل MPU-6500 ساخت شرکت چینی Microdevices استفاده شد. با استفاده از این حسگر می‌توان شتاب خطی و زاویه‌ای یک جسم را در سه محور مختصات (X ، Y ، Z) تعیین کرد. برای اندازه‌گیری فاصله به روش فراصوتی، از حسگر مدل SRF02 استفاده شد. این حسگر ساخت کارخانه چینی Robot Electronics می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری فاصله به روش لیزری از حسگر چینی مدل LS-03T استفاده گردید. نوع لیزر آن مرئی قرمز با طول موج ۶۳۵ نانومتر می‌باشد.



الف- سامانه ساخته شده بر پایه روش زوایا؛ (α و β): حسگرهای زوایای شاسی ها و (P): پردازشگر همراه با نمایشگر

A- The system constructed for the angles technique; (α and β): the angles sensors of the profiles, and (P): the processor with the monitor



ج- سامانه ساخته شده بر پایه فراصوتی؛ (α): حسگر زاویه بوم نگهدارنده حسگر فراصوتی نسبت به افق، (u): حسگر فراصوتی، (h): بوم نگهدارنده حسگر و (P): پردازشگر همراه با نمایشگر

C- The system constructed for the ultrasonic technique; (α): the angle sensor of the ultrasonic sensor holder relative to the horizon, (u): ultrasonic sensor, (h): holder boom, and (P): the processor with the monitor



ب- سامانه ساخته شده بر پایه روش لیزری؛ (α): حسگر زاویه بوم نگهدارنده حسگر لیزری نسبت به افق، (s): حسگر لیزری، (h): بوم نگهدارنده حسگر و (P): پردازشگر همراه با نمایشگر

B- The system constructed for the laser technique; (α): the angle sensor of the laser sensor holder relative to the horizon, (s): laser sensor, (h): holder boom, and (P): the processor with the monitor

شکل ۴- تصاویر ساخت سامانه بر پایه روش های مختلف عمق سنجی

Fig.4. Images of the construction of the system based on different depth measurement techniques

ایرادات مربوط به ورودی ها، کد نویسی و یا مشکل سخت افزاری مرتفع گردد. در این مرحله عمق اولیه ۵ سانتی متر و ۹ عمق با فاصله ۱۰ سانتی متر (از ۱۰ تا ۹۰ سانتی متر) به عنوان ده عمق مبنا در نظر گرفته شدند.

برای اجرای مرحله ارزیابی در شرایط حرکت در مزرعه، از طرح آماری بلوک های کامل تصادفی به روش کرت های یک بار خرد شده با سه تکرار استفاده شد. کرت های اصلی شامل روش های عمق سنجی سامانه در هنگام زیرشکنی در سه سطح روش های عمق سنجی بر مبنای زوایای شاسی های محرک شاخه های زیرشکن، روش فاصله سنج لیزری و روش فاصله سنج فراصوتی و کرت های فرعی شامل دامنه های مختلف عمق در سه سطح عمق ۳۰-۶۰، ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ سانتی متری بودند. در واقع انتظار می رفت که روش های مختلف عمق سنجی با توجه به حسگرهای متفاوت آن ها می توانند از

به منظور تعیین موقعیت دقیق مکانی از حسگر موقعیت یاب GPS مدل Ublox Neo M8N استفاده شد. این حسگر ساخت شرکت Unblox آلمان می باشد. برای ارسال داده ها همچون عمق اندازه گیری شده، موقعیت مکانی و زمان اندازه گیری، از فرستنده GPRS SIM800C استفاده شد. این فرستنده از مهم ترین و پرکاربردترین فرستنده های مخابراتی مبتنی بر سیم کارت به حساب می آید و توسط کمپانی چینی SIMCOM طراحی و عرضه شده است.

فاز ارزیابی سامانه، در دو مرحله قرارگیری روی سکوی ثابت و حرکت در شرایط مزرعه انجام شد. در مرحله استفاده از سکوی ثابت، بولدوزر و زیرشکن همراه با سامانه متصل به آن روی سکوی بلند قرار داده شدند و میانگین قدر مطلق تفاوت بین عمق های مبنا (واقعی) و عمق های منتج از سامانه جهت صحت سنجی اولیه محاسبه گردید تا

انحراف معیار خطاهای عمق

انحراف معیار (رابطه ۵)، یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور متوسط داده‌ها چه مقدار از میانگین فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها، نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. در این پروژه انحراف معیار قدر مطلق تفاوت بین عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج برای هر کرت مورد نظر است. با استفاده از این شاخص آماری میزان انحراف معیار خطاهای عمق برای روش‌های عمق‌سنجی در دامنه‌های مختلف عمق، نسبت به میانگین، قابل استخراج و مقایسه خواهد بود.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}} \quad (5)$$

در این رابطه S ، انحراف معیار قدر مطلق تفاوت عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج (سانتی‌متر)؛ $\bar{d}$ ، میانگین قدر مطلق تفاوت عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج (سانتی‌متر)؛ d_i ، قدر مطلق تفاوت عمق‌های سامانه و میله مدرج در نقاط مختلف (سانتی‌متر)؛ و n ، تعداد نمونه‌های هر کرت می‌باشد.

حداقل و حداکثر خطاهای عمق

حداقل و حداکثر داده‌ها دو مورد از شاخص‌های پراکندگی هستند که دامنه تغییرات داده‌ها را نشان می‌دهند. در این پروژه حداقل و حداکثر قدر مطلق اختلاف بین عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج برای هر کرت مورد نظر می‌باشد. این دو شاخص از این نظر مهم است که نشان می‌دهد بهترین دقت هر یک از روش‌های مورد ارزیابی و در دامنه‌های مختلف عمق مورد نظر چقدر است و همچنین حداکثر خطای آن‌ها چه میزان است. لذا کارشناسان با توجه به این شاخص‌ها می‌توانند دامنه تغییرات محتمل داده‌های ثبت شده را به‌دست بیاورند و قضاوت مستندی برای کل داده‌ها داشته باشند.

نتایج و بحث

ارزیابی سامانه روی سکوی ثابت

نتایج مربوط به ارزیابی صحت‌سنجی اولیه سامانه روی سکوی ثابت، بعد از چندین بار ارزیابی و رفع عیب‌های صورت گرفته، نشان داد که عمق‌های منتج از روش‌های مختلف عمق‌سنجی نزدیک به عمق‌های مبنای مورد ارزیابی می‌باشند. میانگین قدر مطلق تفاوت بین عمق‌های مبنای سامانه و میله به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۲ و ۱/۳۴ سانتی‌متر برای روش‌های زوایا، لیزری و فراصوتی به‌دست آمد (شکل ۵).

نظر میزان دقت اندازه‌گیری عمق اختلاف داشته باشند و نیز با توجه به شرایط کار از نظر میزان کشش و لرزش دستگاه در عمق‌های مختلف، دقت اندازه‌گیری در دامنه‌های عمق کار نیز متفاوت باشد، لذا ارزیابی این سه روش و در سه دامنه مختلف عمق مورد توجه قرار گرفت.

طول هر کرت برای رسیدن زیرشکن به دامنه عمق مورد نظر و نیز اخذ نمونه‌های کافی ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. در این حالت و جهت بررسی رسیدن زیرشکن به دامنه عمق مورد نظر، میله مدرج ملاک قرار گرفت. همچنین عرض کرت‌ها جهت جلوگیری از خطای همپوشانی کرت‌ها با توجه به انحراف به راست یا چپ بولدورز، کمی بیش از عرض کار زیرشکن و به میزان ۶ متر لحاظ شد.

شاخص مورد ارزیابی در این پروژه، عمق زیرشکنی است. جهت بررسی میزان دقت و ارزیابی روش‌های مختلف سامانه، در طول انجام عملیات، هم‌زمان میزان عمق اندازه‌گیری شده توسط سامانه و نیز عمق میله مدرج دستی ثبت گردید. برای هر کرت ۳۰ زوج عمق سامانه و میله مدرج ارزیابی شد. ابتدا تفاوت متناظر عمق‌های موردنظر در هر نقطه مکانی بین سامانه و میله مدرج دستی به‌صورت قدر مطلق به‌دست آمده و سپس شاخص‌های آماری میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر خطاهای عمق برای هر کرت محاسبه شدند. در نهایت با توجه به طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به روش کرت‌های یک بار خردشده، داده‌های شاخص‌های آماری ذکرشده توسط نرم‌افزار MSTATC تجزیه و تحلیل شدند. همچنین میانگین صفات به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

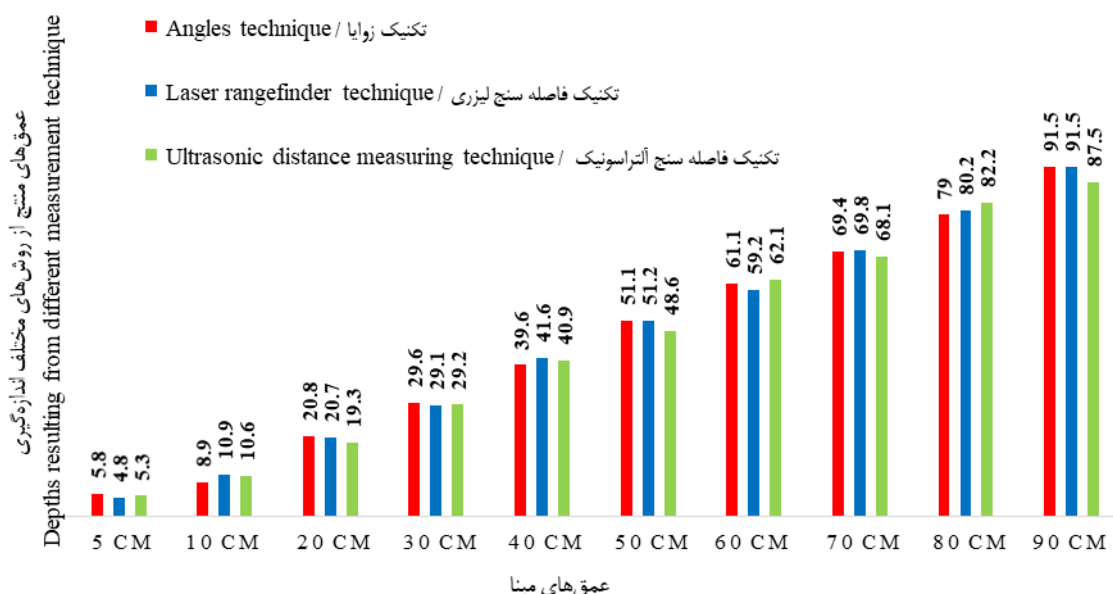
روش اندازه‌گیری شاخص‌ها

میانگین خطاهای عمق

میانگین (رابطه ۴)، یکی از شاخص‌های مرکزی در آمار است که نماینده‌ای از مجموع داده‌ها است که اگر به‌جای تک تک داده‌ها آن را ارائه دهیم در مجموع ارائه شده چیزی تغییر نمی‌کند. در این پروژه میانگین قدر مطلق اختلاف بین عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج در هر کرت موردنظر است. لذا با استفاده از این شاخص آماری میانگین خطاهای عمق برای روش‌های عمق‌سنجی در دامنه‌های مختلف عمق قابل استخراج و مقایسه خواهد بود.

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (4)$$

در این رابطه $\bar{d}$ ، میانگین قدر مطلق تفاوت عمق‌های متناظر سامانه و میله مدرج (سانتی‌متر)؛ d_1 ، d_2 ، ... و d_n ، قدر مطلق تفاوت عمق‌های سامانه و میله مدرج در نقاط مختلف هر کرت (سانتی‌متر)؛ و n ، تعداد نمونه‌های هر کرت می‌باشد.



شکل ۵- صحت‌سنجی سامانه بر روی سکوی ثابت

Fig.5. System calibration on a fixed platform

زاویه پرتو آن بیشتر از ۳۵ درجه باشد، خطای زیادی در اندازه‌گیری فاصله در آن مشاهده می‌شود و اگرچه در هنگام انجام عملیات زیرشکنی، زاویه موقعیت این حسگر به ۳۵ درجه نمی‌رسد ولی احتمالاً در هنگام کار و تغییر عمق و نیز لرزش‌های محتمل، مقادیر زاویه بیشتر رخ داده و در نتیجه در مجموع روی خطا اثر گذاشته است. البته همان‌طور که ذکر شد در مورد شاخص حداقل خطا روش فراصوتی با تفاوت ناچیزی بهتر از روش لیزری بود (جدول ۳)؛ به عبارتی حداقل خطا در شرایط ایده‌آل و بدون لرزش دستگاه و نیز در حالت عدم افزایش غیرمعمول زوایا رخ داده است و لذا نتیجه به‌دست‌آمده منطقی به نظر می‌رسد. همچنین تمام شاخص‌های خطای عمق در هر سه روش عمق‌سنجی مورد ارزیابی با افزایش عمق کار سامانه کاهش یافته است (جدول ۳) و این می‌تواند مربوط به کاهش لرزش دستگاه زیرشکن در عمق‌های بیشتر، و کم شدن خطاهای ناشی از لرزش‌ها باشد.

میانگین خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۱/۹۱ سانتی‌متر و روش فراصوتی با ۳/۸۳ سانتی‌متر به ترتیب کمترین و بیشترین میانگین خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و

ارزیابی سامانه در شرایط مزرعه

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ارزیابی سامانه در شرایط حرکت در مزرعه نشان داد که تمام شاخص‌های آماری خطای عمق شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و نیز حداکثر خطا در اثر نوع روش عمق‌سنجی معنی‌دار بود، همچنین همه این شاخص‌ها در اثر دامنه‌های مختلف عمق نیز معنی‌دار بودند، اما فقط شاخص‌های آماری حداقل و حداکثر خطا در اثر متقابل دو عامل اختلاف معنی‌داری نشان دادند (جدول ۲). در همه شاخص‌های آماری مورد ارزیابی روش زوایا کمترین مقادیر خطا را به خود اختصاص داد، و در مقابل، به‌جز شاخص حداقل خطا، که حداکثر آن متعلق به روش لیزری بود، در سایر شاخص‌ها روش فراصوتی بیشترین خطا را کسب نمود (جدول ۳). به‌طور کلی روش‌های عمق‌سنجی لیزری و فراصوتی در همه شاخص‌ها نسبت به روش زوایا خطای بیشتری داشتند و این می‌تواند مربوط به خطاهای ناشی از شرایط مزرعه باشد به‌طوری‌که حسگرهای فاصله‌سنج لیزری و فراصوتی موجود در این دو روش در هنگام برخورد کردن پرتو حسگرها به کلوخه‌ها عدد فاصله کمتر و در برخورد به گودی‌های عدد فاصله بیشتر را نشان می‌دهند و لذا در مجموع، میزان خطا زیاد می‌شود. همچنین دقت کمتر روش فراصوتی نسبت به روش لیزری را می‌توان به ماهیت حسگر فراصوتی نسبت داد. به عبارتی در آزمون کارایی حسگر فراصوتی مشخص شد که اگر

ملموس در این مطالعه است در هر سه روش با افزایش عمق، کمتر می‌شود و همچنین کمترین میزان میانگین خطا به ترتیب به روش‌های زوایا، لیزری و فراصوتی تعلق داشت. البته دلایل این موارد در بالا به‌طور کامل شرح داده شد، اما در این شکل این روند در همه روش‌ها و در عمق‌های مختلف به‌وضوح قابل مشاهده است که این مساله می‌تواند دلیلی بر قوت نتایج به‌دست آمده باشد.

بیشترین میانگین خطای عمق، به ترتیب در دامنه عمیق با ۲/۳۳ سانتی‌متر، و در دامنه سطحی با ۳/۶۵ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر میانگین خطای عمق به ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۱/۲۷ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۴/۵۱ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۶). با توجه به شکل ۶ میانگین خطاهای عمق که مهم‌ترین و گویاترین شاخص

جدول ۲- تجزیه واریانس میانگین مربعات (MS) شاخص‌های خطای اندازه‌گیری عمق
Table 2- Analysis of mean square (MS) variance of depth measurement error indices

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین خطای عمق Mean depth errors	انحراف معیار خطای عمق Standard deviation of depth error	حداقل خطای عمق Minimum of depth error	حداکثر خطای عمق Maximum of depth error
بلوک Block	2	0.61	0.04	0.006	5.19
روش عمق‌سنجی (T) Depth measuring technique (T)	2	8.32**	1.91**	0.028**	23.58**
خطای a Error a	4	0.03	0.01	0.001	0.69
دامنه‌های عمق (R) Depth range (R)	2	4.21**	0.54**	0.071**	11.61**
اثر متقابل (T*R) Interaction (T*R)	4	0.04	0.04	0.002**	0.08**
خطای b Error b	12	0.02	0.03	0.001	0.02
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variations (%)		5.1	18.3	2.2	2.61

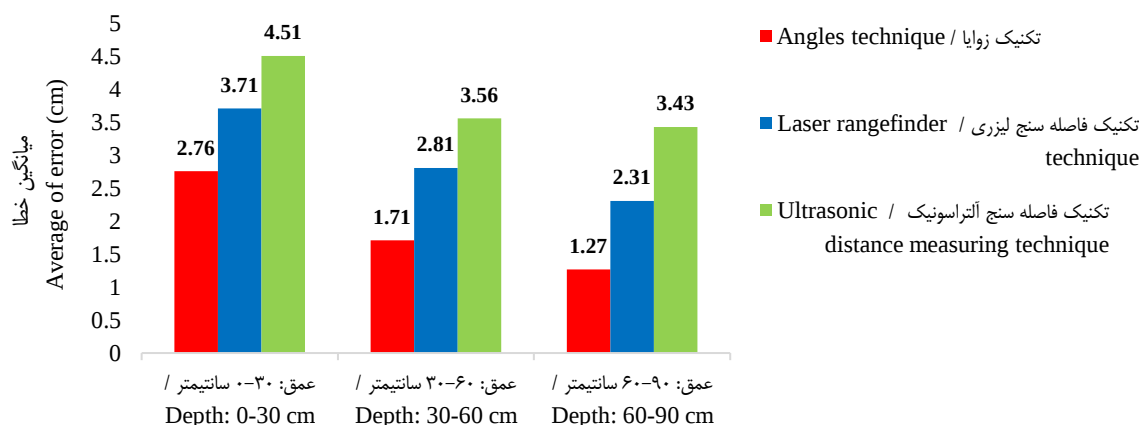
* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد * and **: Significant at 5%, and 1% probability levels, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین شاخص‌های خطای اندازه‌گیری عمق*
Table 3- The means comparison of depth measurement error indices*

تیمار Treatment	میانگین خطای عمق Mean depth error (cm)	انحراف معیار خطای عمق Standard deviation of depth error (cm)	حداقل خطای عمق Minimum of depth error (cm)	حداکثر خطای عمق Maximum of depth error (cm)
روش عمق‌سنجی Depth measuring technique (T)				
زوایا Angles (T ₁)	1.91 c	0.53 c	0.12 b	4.49 b
لیزری Laser (T ₂)	2.93 b	1.03 b	0.22 a	5.48 b
فراصوتی Ultrasonic (T ₃)	3.83 a	1.46 a	0.21 a	7.66 a
دامنه عمق Depth range (R) (cm)				
0-30 (R ₁)	3.65 a	1.29 a	0.28 a	6.97 a
30-60 (R ₂)	2.69 b	0.89 b	0.17 b	5.96 b
60-90 (R ₃)	2.33 c	0.83 b	0.11 c	4.71 c

*در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، در سطح ۵ درصد احتمال تفاوت معنی‌داری ندارند.

*In each column, the averages that have common letter(s) do not differ significantly at the 5% level.



شکل ۶- مقایسه میانگین خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق
Fig.6. The comparison the average of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges

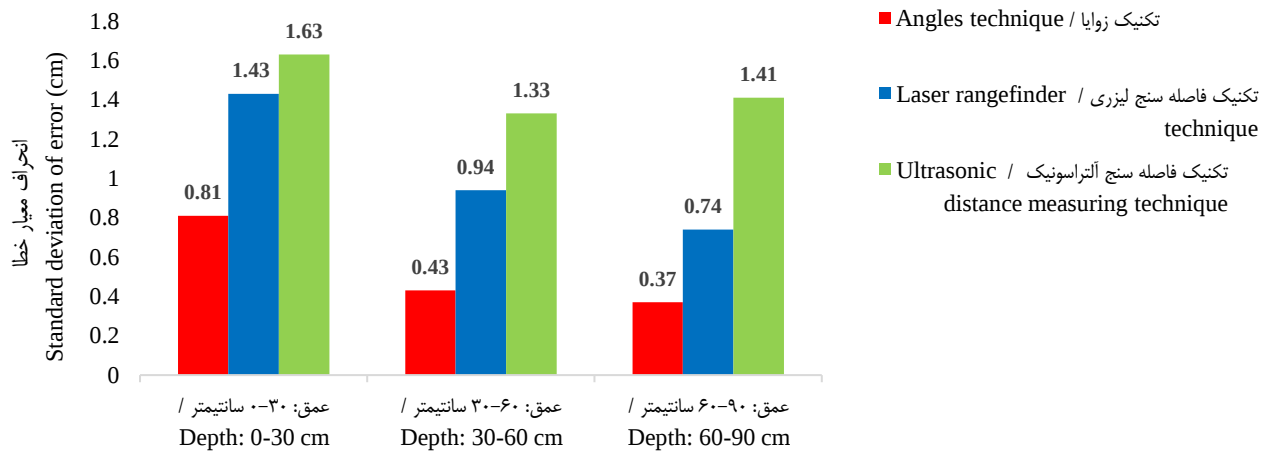
به‌ترتیب برای دو عمق مبنای ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متری گزارش شده است (Wang et al., 2018). نتایج پروژه مذکور را می‌توان با دقت ۲/۷۶ سانتی‌متر روش زوایا در محدوده سطحی این پروژه مقایسه نمود (شکل ۶). اگرچه در پروژه جاری عمق در دامنه سطحی از صفر تا ۳۰ سانتی‌متر متغیر است در حالی که در پروژه مورد اشاره صرفاً محدوده نزدیک به ۲۵ و نیز ۳۰ سانتی‌متر ملاک قرار گرفته است.

انحراف معیار خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۰/۵۳ سانتی‌متر و روش فراصوتی با ۱/۴۶ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین انحراف معیار خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و بیشترین انحراف معیار خطای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۰/۸۳ سانتی‌متر و در دامنه سطحی با ۱/۲۹ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر انحراف معیار خطای عمق به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۰/۳۷ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۱/۶۳ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود انحراف معیار خطا با افزایش عمق، کمتر می‌شود و نیز کمترین میزان انحراف معیار خطا به‌ترتیب به روش‌های زوایا، لیزری و فراصوتی تعلق داشت، همچنین روند یک‌دست تغییرات مربوط به انحراف معیار خطا به‌وضوح در همه روش‌ها و در عمق‌های مختلف مشاهده می‌شود. در واقع انحراف معیار خطا همانند میانگین خطا از یک روند مشابه تبعیت کرده‌اند و همخوانی تغییرات انحراف معیار و میانگین علاوهر متاثر بودن از اخذ داده‌های زیاد در این پروژه که باعث افزایش دقت شده، نشان می‌دهد

نتایج پروژه کنترل خودکار عمق دستگاه زیرشکن، بر روند کلی کاهش خطای اندازه‌گیری عمق با افزایش عمق کار دستگاه دلالت می‌کند که با نتایج این تحقیق مشابهت دارد (Fallahikoshali et al., 2014). در پروژه مذکور ارزیابی‌ها با فاصله‌های ۵ سانتی‌متر (از ۵-۰ تا ۳۵-۳۰) انجام شده است. همچنین در آن پروژه برای اندازه‌گیری عمق از یک پتانسیومتر، براساس چرخش پتانسیومتر در اثر تغییر عمق زیرشکن و در نتیجه تغییر ولتاژ، استفاده شده است. در پروژه تحقیقاتی طراحی عمق‌سنج برای گاوآهن برگردان‌دار (Alimardani, Shahrbanunjad, & Borghee, 1998)، میانگین قدرمطلق خطا ۱/۱ سانتی‌متر در شرایط کار در مزرعه گزارش شده است. در پروژه مورد اشاره صرفاً چهار سطح ثابت شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری به‌عنوان مبنا مورد ارزیابی قرار گرفته و میانگین قدرمطلق خطا به‌ترتیب ۱/۶، ۰/۷، ۱ و ۱ سانتی‌متر برای این سطوح بوده است. ساخت عمق‌سنج در آن پروژه نیز با استفاده از پتانسیومتر و تغییرات ولتاژ انجام شده است. لذا اختلاف نتایج دو پروژه اخیر با پروژه جاری بیشتر می‌تواند به روش‌های متفاوت مورد استفاده، مرتبط باشد. همچنین در پروژه جاری، عمق در دامنه بزرگتر و تا ۹۰ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پروژه تحقیقاتی ارزیابی خودکار عمق زیرشکنی و با به‌کارگیری حسگر فراصوتی میانگین خطا ۸/۲۸ درصد، معادل ۳/۱ سانتی‌متر، گزارش شد (Lou et al., 2021). البته در تحقیق مذکور عمق مورد ارزیابی حداکثر تا ۴۰ سانتی‌متری بوده و نتایج آن قابل مقایسه با دقت ۴/۵۱ و ۳/۵۶ سانتی‌متری مربوط به دامنه سطحی و میانه این پروژه است (شکل ۶). در پروژه تحقیقاتی برای اندازه‌گیری عمق با استفاده از دو حسگر شیب‌سنج (زاویه‌سنج) نصب‌شده بر شاسی اصلی زیرشکن و چرخ الحاقی، دقت ارزیابی عمق زیرشکن ۳/۲ و ۱/۹ درصد (۰/۸ و ۰/۵۷ سانتی‌متر)

که تاثیر خطاهای زیاد و غیرمترقبه در کل پروژه بسیار ناچیز بوده است.



شکل ۷-۲ مقایسه انحراف معیار خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق
Fig.7. The comparison the standard deviation of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges

سانتی‌متر هفتم مورد ارزیابی، گزارش شده است. همان‌طور که ذکر شد در پروژه مذکور ارزیابی‌ها با فاصله‌های ۵ سانتی‌متر و از عمق صفر تا ۳۵ سانتی‌متر انجام شده است. در پروژه تحقیقاتی طراحی عمق‌سنج برای گاوآهن برگردان‌دار (Alimardani et al., 1998)، حداقل خطا صفر گزارش شده است. البته در پروژه مورد اشاره سطوح مورد ارزیابی، ثابت (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری) بوده و دقت در حد سانتی‌متر می‌باشد.

حداکثر خطاهای عمق

مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۴/۴۹ سانتی‌متر و روش فراصوتی با ۷/۶۶ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین حداکثر خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و بیشترین حداکثر خطای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۴/۷۱ سانتی‌متر و در دامنه سطحی با ۶/۹۷ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر حداکثر خطا به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۳/۲۱ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۸/۶۳ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۹). حداکثر خطا همانند حداقل خطا تا حدودی یک اتفاق می‌تواند باشد، اما میانگین تکرارهای آن‌ها از روند یک‌دست و مشابه میانگین و انحراف معیار تبعیت کرده‌اند. خطاهای زیاد در اثر لرزش و نیز گاه در زمان تغییر زوایا و عمق رخ می‌دهند. همچنین همان‌طور که گفته شد شرایط زمین و کلوخه‌های بزرگ و نیز گودی‌های عمیق، خطاهای زیادی در روش‌های لیزری و فراصوتی ایجاد می‌کنند، لذا روش زوایا کمترین

حداقل خطاهای عمق

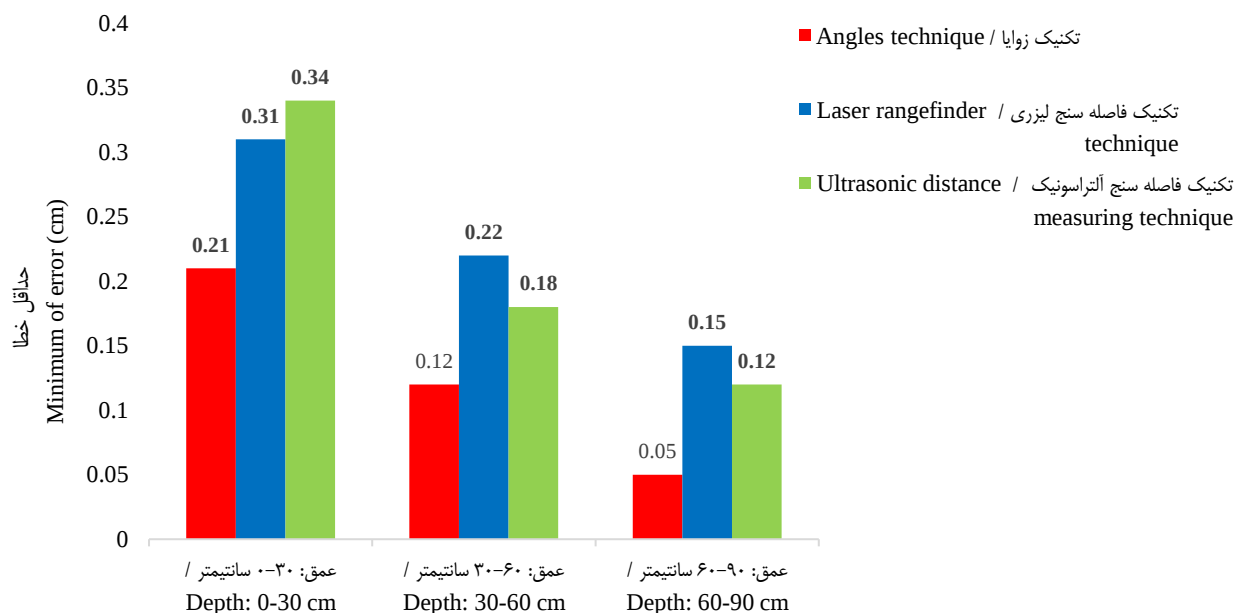
مقایسه میانگین شاخص‌های آماری مورد ارزیابی نشان داد که در بین روش‌های عمق‌سنجی، روش زوایا با ۰/۱۲ سانتی‌متر و روش لیزری با ۰/۲۲ سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین حداقل خطای عمق را کسب نمودند. در بین دامنه‌های عمق نیز کمترین و بیشترین حداقل خطاهای عمق، به‌ترتیب در دامنه عمیق با ۰/۱۱ سانتی‌متر و در دامنه سطحی با ۰/۲۸ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل دو عامل روش عمق‌سنجی و دامنه عمق نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر حداقل خطا به‌ترتیب به روش زوایا و دامنه عمیق با ۰/۰۵ و روش فراصوتی و دامنه سطحی با ۰/۳۴ سانتی‌متر تعلق داشت (شکل ۸). حداقل خطا اگرچه به نظر می‌رسد یک اتفاق باشد اما با توجه به تکرارهای صورت‌گرفته و گزارش میانگین آن‌ها، این اتفاق به‌عنوان نتیجه قابل بحث می‌شود. در واقع روند تغییرات یک‌دستی که در میانگین و انحراف معیار دیده شده، در حداقل خطا، فقط در روش فراصوتی دچار به‌هم‌ریختگی شده است، بدین شکل که در دو دامنه عمق میانه و عمیق، روش فراصوتی از نظر حداقل خطا کمتر از روش لیزری بود، البته اعداد بسیار نزدیک بوده و در دامنه میانه ۰/۱۸ در مقابل ۰/۲۲ و در دامنه عمیق ۰/۱۲ در مقابل ۰/۱۵ به‌ترتیب برای روش‌های فراصوتی و لیزری است (شکل ۸). لذا به نظر می‌رسد که این می‌تواند به ماهیت حسگر فاصله‌سنج فراصوتی و دقت آن نسبت به فاصله‌سنج لیزری باشد که این اعداد در شرایط حداقل لرزش و ثبات دستگاه صورت گرفته است.

در پروژه کنترل خودکار عمق دستگاه زیرشکن (Fallahikoshali et al., 2014)، حداقل خطا به میزان ۲/۳ میلی‌متر، مربوط به عمق ۵

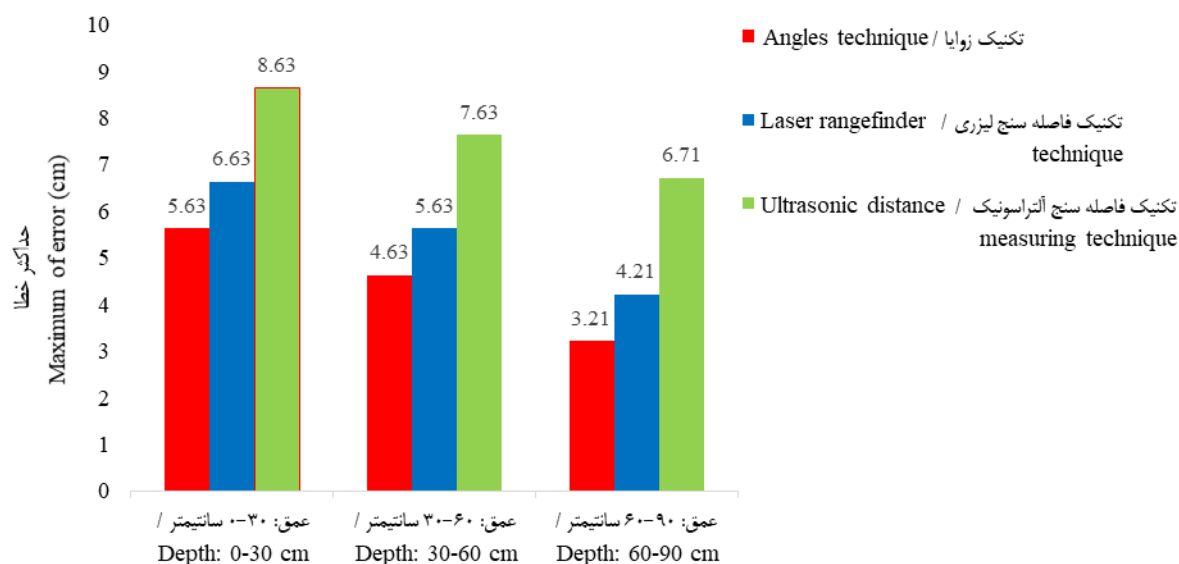
(*et al.*, 2014)، حداکثر خطا به میزان ۸/۳ میلی‌متر، مربوط به عمق ۵ سانتی‌متر دوم مورد ارزیابی، گزارش شده است. در پروژه تحقیقاتی طراحی عمق‌سنج برای گاواهن برگردان دار (*Alimardani et al.*, 1998)، حداکثر خطا ۲ سانتی‌متر گزارش شده است. یادآور می‌شود تفاوت روش‌ها و دامنه عمق مورد ارزیابی می‌تواند دلیل تفاوت نتایج این پروژه‌ها با پروژه جاری باشد.

مقدار حداکثر خطا را داشته و نیز بین روش‌های لیزری و فراصوتی، روش لیزری حداکثر خطای کمتری داشته است. البته دلیل خطای زیاد در روش فراصوتی در حدوث زوایای بالا قبلاً بحث شد. به‌هرحال در همه روش‌ها با افزایش عمق، لرزش‌ها به حداقل رسیده و در نتیجه حداکثر خطا کمتر شده است.

در پروژه کنترل خودکار عمق دستگاه زیرشکن (*Fallahikoshali*)



شکل ۸- مقایسه حداقل خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق
Fig.8. The comparison the minimum of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges



شکل ۹- مقایسه حداکثر خطاهای عمق مربوط به اثر متقابل روش‌های مختلف عمق‌سنجی و دامنه‌های متفاوت عمق
Fig.9. The comparison the maximum of depth errors related to the interaction effect of different depth measurement techniques and different depth ranges

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سامانه سنجش عمق زیرشکن نصب‌شده بر بولدوزر براساس نمایش برای اپراتور و ارسال داده اندازه‌گیری‌شده همراه با موقعیت آن به سایت اینترنتی، طراحی و ساخته شد و در شرایط مزارع نیشکر مورد ارزیابی قرار گرفت. طراحی و ساخت در سه روش زوایا، لیزری و فراصوتی، و ارزیابی در سه دامنه عمق ۳۰-۶۰ (سطحی)، ۶۰-۹۰ (میانی) و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری (عمیق) انجام شد. از نظر روش‌های عمق‌سنجی، به‌طور کلی روش زوایا کمترین و روش فراصوتی بیشترین مقادیر را در شاخص‌های میانگین، انحراف معیار و حداکثر خطا داشتند. خطای بیشتر در روش‌های لیزری و فراصوتی به شرایط زمین و وجود کلوخه‌ها و گودی‌ها می‌تواند مرتبط باشد که این مساله باعث ایجاد خطا در محاسبه فاصله واقعی توسط حسگرهای فاصله‌سنج موجود در این دو روش شده است. لذا به‌طور مشخص روش مبتنی بر استفاده از حسگرهای زوایا برای اندازه‌گیری عمق زیرشکن متصل به بولدوزر در زمین‌های نیشکر توصیه می‌شود. این روش با دقت قابل قبول و بدون تحت تاثیر قرار گرفتن از شرایط زمین می‌تواند عمق کار را اندازه‌گیری نماید. در روش لیزری برای افزایش دقت و کمتر تحت تاثیر قرار گرفتن از وجود پستی و بلندی و نیز کلوخه‌ها، می‌توان با کاهش فاصله زمانی اخذ داده، تعداد داده‌ها در واحد زمان را افزایش داد و البته در این شرایط حسگر دقیق‌تر و پردازشگر قوی‌تری مورد نیاز می‌باشد. در روش فراصوتی نیز علاوه بر لزوم افزایش داده‌برداری در واحد زمان و مساله نیاز به حسگر دقیق‌تر و پردازشگر قوی‌تر، باید مشکل وجود خطای اندازه‌گیری فاصله در صورت افزایش زوایای شاسی‌ها را نیز مرتفع نمود. البته این مساله به ماهیت حسگرهای فراصوتی مرتبط است که در حسگرهای

شرکت‌های سازنده دیگر باید مورد ارزیابی قرار گیرد که ممکن است این مشکل مرتفع شده باشد.

از نظر دامنه عمق مورد ارزیابی، در همه روش‌ها با افزایش عمق، تمام شاخص‌های میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر خطا کمتر شد و این می‌تواند مرتبط به کاهش لرزش دستگاه در عمق‌های بیشتر باشد. لذا به‌طور مشخص برای افزایش دقت در عمق‌های کمتر، هر نوع کاهش لرزش همچون کاهش سرعت پیشروی زیرشکنی با بولدوزر و نیز استفاده از دنده سنگین‌تر را می‌توان توصیه نمود.

سپاسگزاری

از مدیریت محترم شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) به‌خاطر پشتیبانی مالی و نیز در اختیار قرار دادن تمام امکانات فنی و مزرعه‌ای، تشکر و سپاسگزاری می‌شود. همچنین از مدیریت محترم مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان که با استفاده از امکانات آزمایشگاهی و کارگاهی آن مرکز، این پروژه به نتیجه عملیاتی رسید، قدردانی و تشکر می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

نعیم لویمی: روش‌شناسی، استخراج روابط ریاضی، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری و استخراج و تهیه متن اولیه
آذرخش عزیزی: خدمات نرم‌افزاری، اعتبارسنجی، شبیه‌سازی کامپیوتری و ساخت مدار
علی کعب: پشتیبانی فنی، عملیات کارگاهی و ویرایش متن
عادل نیسی: مشاوره فنی، جمع‌آوری داده‌ها و ارزیابی مزرعه‌ای

References

- Ahmadzadeh, M., & Charaghi, Sh. (2017). *Design and construction of depth measurement system and measurement of shear strength in sub-soiling operations and the importance of its application in monitoring the depth control of sub-soil*. 4th International Conference on Agricultural and Environmental Engineering with Sustainable Development Approach, Shiraz. (in Persian).
- Al-Adawi, S. S., & Reeder, R. C. (1996). Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yield and soil physical properties. *ASAE*, 39(5), 1641-1649. <https://doi.org/10.13031/2013.27680>
- Alimardani, R., Shahrbanunjad, M., & Borghee, A. (1998). Designing and construction a system for measuring the working depth of different plows. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 29(1), 19-26. (in Persian).
- Anonymous. (2021). Agricultural crop cultivation model program. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ministry of Jihad Agriculture. (in Persian).
- Anonymous. (2023). Sugarcane production technology in Iran. Guidelines for the production of agricultural products. Ministry of Jihad Agriculture. (in Persian).
- Bonaiuto, V., & Zanela, A. (2022). Improvement of the Sensor Capability of the NAO Robot by the Integration of a Laser Rangefinder. *Applied System Innovation*, 5(6), 105. <https://doi.org/10.3390/asi506105>
- Carullo, A., & Parvis, M. (2001). An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. *IEEE Sensors Journal*, 1(2), 143. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2001.936931>
- Cassel, D. K., & Edwards, E. C. (1985). Effects of subsoiling and irrigation on corn production. *Soil Science*

- Society of America Journal*, 49(4), 996-1001. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040041x>
9. Cheong, L. R. N., Kwong, K. F. K., & Preez, C. C. D. (2009). Soil compaction under sugarcane cropping and mechanization in Mauritius. *South African Journal of Plant and Soil*, 26, 199-205. <https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639955>
10. Fallahikoshali, E., Aghkhani, M., & Bayati, M. (2015). Design, construction and evaluation of the automatic depth control device for tillage tools. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 46(2), 117-123. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2015.55669>
11. Kaab, A., Sharifi, M., & Mobli, H. (2019). Analysis and optimization of energy consumption and greenhouse gas emissions in sugarcane production using data envelopment analysis. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(1), 19-30. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.251593.665035>
12. Kiani, S., Kamgar, S. T., & Raoufat, M. (2010). Automatic on-line depth control of seeding units using a non-contacting ultrasonic sensor. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 6(2), 39-42.
13. Lou, S., He, J., Lu, C., Liu, P., Li, H., & Zhang, Z. (2021). A Tillage Depth Monitoring and Control System for the Independent Adjustment of Each Subsoiling Shovel. *Actuators*, 10, 250. <https://doi.org/10.3390/act10100250>
14. Mahohi, A., & Khatinzadeh, H. (2021). Evaluation of Subsoiling Depth of Fields of Ratoon Cane on some Soil and Plant Indices. *Applied Soil Research*, 9(3), 134-146. (in Persian).
15. Mansourirad, D. (1993). *Tractors and agricultural machines*. Bouali Sina Publications. (in Persian).
16. Mckyes, E., Nego, S., Douglas, F., Taylor, F., & Raghavan, G. S. U. (1979). The effect of machinery traffic and tillage on the physical properties of clay and on yield of silage corn. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24, 143- 148. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(79\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(79)90048-9)
17. Moradinejad, N. (2017). Designing and implementing the electro-hydraulic tension adjustment system for the Massey Ferguson tractor using a new electronic control valve. *International Journal of Biosystems Engineering*, 48(1), 155-163. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61575>
18. Naseri, H., Gholamiparshekuhi, M., Ranjbar, I., & Mohammad Zamani, D. (2022). Evaluation of the effect of reduced and conventional tillage methods on machine performance parameters, soil properties and quantitative and qualitative efficiency of sugarcane. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 80(22), 17-32. (in Persian). <https://doi.org/10.22092/amsr.2021.353026.1373>
19. Pankhurst, C. E., Magarey, R. C., Sirling, G. R., Blair, B. L., Bell M. J., & Garside, A. L. (2003). Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. *Soil and Tillage Research*, 72, 125-137. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00083-7)
20. Sharif-Nasab, H., Heydari, A., Mehdi-Niya, H., Sadegh Nejad, R., & Shahrbanunjad, M. (2014). Investigating and determining the effect of using deep tillage tools on physical and chemical properties of soil and wheat yield. Research report of Agricultural Engineering and Technical Research Institute. Agricultural Research, Education and Extension Organization. (in Persian).
21. Slowinska-Jurkiewicz, A. (1994). Change in structure and physical properties of soil during spring tillage operations. *Soil and Tillage Research*, 29, 397-407. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90111-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90111-2)
22. Solhjo, A., Dehghanian, S. A., Sepaskhah, A., & Niromand Jahormi, J. (2006). Effect of subsoiling and Irrigation Fr3equencies on Soil Physical Properties and Sugarbeet Yield. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(4), 131-144. (in Persian).
23. TaheriGaravand, A., Asakereh, A., & Haghani, K. (2010). Energy elevation and economic analysis of canola production in Iran a case study: Mazandaran province. *International Journal of Environmental Sciences*, 1, 236-243.
24. Torres, J. L. R., Pereira, M. G., Cunha, M. A., Martins, M. E., & Vieira, D. M. S. (2013). Physicochemical properties of soil and biomass in sugarcane harvesting systems. *Agricultural Science Magazine*, 56, 311-318. <https://doi.org/10.4322/rca.2013.047>
25. Tu, Y., Song, Y., Liu, F., Zhou, Y., Li, T., Zhi, S., & Wang, Y. (2022). An accurate and stable extrinsic calibration for a camera and a 1D laser range finder. *IEEE Sensors Journal*, 22(10), 9832-9842. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3166243>
26. Wang, Y., Jing, H., Zhang, D., Cui, T., Zhong, X., & Yang, L. (2018). Development and performance evaluation of an electric-hydraulic control system for subsoiler with flexible tines. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.027>

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 211-228

Evaluation of the Development Level of Edible Mushroom Production Systems in Iran between 2016 and 2021

M. Zangeneh ^{1*}, E. Godini ¹

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

Received: 22 May 2024
Revised: 17 June 2024
Accepted: 29 June 2024
Available Online: 13 April 2025

How to cite this article:

Zangeneh, M., & Godini, E. (2025). Design, Evaluation of the Development Level of Edible Mushroom Production Systems in Iran between 2016 and 2021. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 211-228. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2024.88204.1252>

Introduction

In recent years, the lack of adequate regional assessment and classification has led to unequal investments and policies, resulting in polarization and disparities in the development of agricultural units. However, since agricultural products are produced, distributed, and consumed nationwide, analyzing production conditions across different agricultural systems can provide valuable insights for supply chain managers. A comprehensive evaluation of production system development across the country can enhance product quality, stabilize the supply chain, reduce costs, and improve overall efficiency and performance. These improvements are vital for advancing the agricultural sector and strengthening national competitiveness. In many regions, agriculture forms the backbone of the local economy, making regional equity and balanced development essential for sustainable agricultural growth.

Materials and Methods

This research was conducted with the aim of evaluating the development levels of different provinces of the country in the field of edible mushroom cultivation. The approach of this research is descriptive-analytical. The statistical population includes 31 provinces of Iran, and the required data are based on the results of the 2016 and 2021 censuses of the Statistical Center of Iran. Following the initial review, indicators that emphasize the aspects of human power, infrastructure, performance, waste, economy, and energy were collected. Weight estimation of indicators was done using Shannon's entropy method. The TOPSIS method was used to assess and rank the provinces based on their level of development within the mushroom cultivation industry. The ranking operation was done using eight different index groups: infrastructure, consumption of inputs, value of consumption inputs, types of products and waste, value of payment types, value of product categories, value of energy consumption, and the number of employees and payments to them.

Results and Discussion

Results show that in 2016, the provinces were classified into three levels: relatively deprived of development, medium development, and relatively developed. Apart from Alborz province, which was placed at a relatively developed level, other provinces were placed at lower levels. By 2021, all provinces had made significant progress compared to 2016, elevating their development status so that none were classified as relatively deprived. Furthermore, the number of provinces categorized as relatively privileged surged from just one in 2016 to eight by 2021. The findings revealed that the smaller, non-industrialized provinces exhibited greater development compared to their larger, industrialized counterparts.

Conclusion

The results showed that Alborz province had the highest level of development, and Semnan province had the lowest level of development of this industry in the country. The level of development and ranking of edible



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

 <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88204.1252>

mushroom cultivation units in the provinces was obtained by using different categories of indicators and the TOPSIS multi-criteria decision-making method. To enhance the production and productivity of cultivated edible mushrooms, it is essential to advance cultivation techniques and technologies through the expansion of research initiatives, educational programs, and extension activities.

Keywords: Capeland, Level of development, Multi-criteria decision making, Mushroom, Shannon's Entropy

ارزیابی سطح توسعه سامانه‌های تولید قارچ خوراکی در ایران در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰

مرتضی زنگنه^{۱*}، احسان گودینی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

چکیده

شناسایی مناطق توسعه‌یافته و یا محروم و توسعه‌نیافته در تولید یک محصول امری مهم و اساسی در جهت اتخاذ راهبردهای توسعه ملی و منطقه‌ای به شمار می‌رود که هدف عمده آن کاهش نابرابری بین منطقه‌ای و درون منطقه‌ای در تولید و دسترسی به محصولات کشاورزی است. رتبه‌بندی مناطق بر اساس درجه توسعه‌یافتگی صنایع کشاورزی آن اغلب به عنوان یک مسئله چندشاخصه مطرح می‌شود که روش‌های مختلفی برای مواجهه با آن وجود دارد. هدف از این پژوهش، ارزیابی سطح توسعه‌یافتگی سامانه‌های تولید قارچ خوراکی در استان‌های کشور و رتبه‌بندی آن‌ها در دو مقطع زمانی سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰ با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس است. بدین منظور ۷۷ شاخص مختلف مورد استفاده قرار گرفت. وزن این شاخص‌ها با بهره‌گیری از روش آنترپی شانون محاسبه شد. تحلیل شاخص‌های مختلف در این مطالعه، نابرابری میان استان‌ها از نظر سطح توسعه‌یافتگی سامانه‌های پرورش قارچ خوراکی را نشان می‌دهد. با توجه به فسادپذیری قارچ و هزینه بالای حمل آن، عدم توسعه متوازن سامانه‌های تولید قارچ در استان‌های کشور باعث ایجاد نابرابری در دسترسی مصرف‌کنندگان به این محصول در سطح کشور شده است. نتایج نشان می‌دهد به‌طور کلی وضعیت استان‌های تولیدکننده در طول بازه مورد بررسی بهبود یافته است. استان‌های شامل رتبه‌های پایین نیازمند اتخاذ سیاست‌ها و انجام اقدامات مناسب هستند تا بتوانند زمینه توسعه متعادل ملی و منطقه‌ای در تولید و توزیع این محصول را ایجاد کنند. ارزیابی سطح توسعه‌یافتگی استان‌ها می‌تواند به بهبود مدیریت سامانه‌های تولید این محصول کمک کند و این صنعت را به سمت توسعه و بهره‌وری بیشتر هدایت کند.

واژه‌های کلیدی: آنترپی شانون، تصمیم‌گیری چندشاخصه، سطح توسعه‌یافتگی، قارچ، کپ‌لند

مقدمه

قارچ به عنوان یک منبع غذایی و پروتئینی مناسب برای انسان‌ها و همچنین برای پیش‌گیری و درمان برخی از بیماری‌ها هم چون سرطان و بیماری‌های قلبی شناخته می‌شود (Nasimi, Maadi, Roudsari, & Tabi, 2017). تولید و پرورش قارچ خوراکی در ایران از سال ۱۳۳۷ آغاز شد و در سال ۱۳۵۳ به صورت صنعتی درآمد. بر اساس نتایج آخرین سرشماری واحدهای پرورش قارچ خوراکی توسط مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۹، در مجموع ۱۹۵۳ واحد پرورش قارچ خوراکی در کشور وجود داشته است که از این میزان، ۱۹۰۹ واحد قارچ دکمه‌ای، ۳۳ واحد قارچ صدفی و ۱۱ واحد نیز در زمینه پرورش هر دو نوع قارچ فعالیت داشته‌اند (Unknown, 2021). مقایسه تعداد واحدهای پرورش قارچ خوراکی نسبت به سال ۱۳۹۶ حاکی از افزایش ۲۱ درصدی است. ارزیابی سطح توسعه‌یافتگی استان‌ها از نظر پرورش قارچ خوراکی می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران کشاورزی کمک کند تا برنامه‌های مناسبی برای توسعه این صنعت در هر استان و ایجاد توازن در تولید آن در کل کشور ارائه دهند.

منبع تغذیه قارچ خوراکی مواد آلی موجود در کمپوست است که از

کشاورزی و امنیت غذایی در دنیای امروز شرط بقای انسان است. افزایش و تنوع بخشیدن به منابع غذایی سالم با توجه به رشد روزافزون جمعیت در جهان یک ضرورت است. بخش کشاورزی در بعد اقتصاد ملی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توسعه این بخش نه تنها از نظر اقتصادی بلکه از نظر اجتماعی و توسعه کلان کشور نیز دارای اهمیت است (Shams & Javadi, 2015). ایجاد تحول در کشاورزی به طوری که بتواند کمیت، کیفیت و تنوع محصولات کشاورزی را افزایش دهد، اجتناب‌ناپذیر است. متخصصان علم تغذیه بر این باورند که برای رفع نیاز بدن به پروتئین و به منظور حفظ تعادل کامل رژیم غذایی لازم است تا سه چهارم پروتئین ضروری از گروه پروتئین‌های گیاهی تأمین شود (Shahbazi & Amjadi, 2017).

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
(Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول: <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88204.1252>

برای اطمینان از پایداری و کارایی بلندمدت آن‌ها بسیار مهم است. مطالعات متعددی مانند پروژه‌های ارزیابی فائو برای سیستم‌های کشاورزی و غذایی پایدار (FAO, 2024)، روش‌های ارزشمندی را برای ارزیابی سطح توسعه و کارایی سامانه‌های کشاورزی ارائه می‌دهند. این مطالعات، تجزیه و تحلیل مفصلی از تعامل پیچیده بین عوامل اثرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی سیستم‌های کشاورزی و تأثیر آن‌ها بر توسعه کشاورزی ارائه می‌دهند (Nazarian, 2020). با توسعه سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی و بهبود فرآیندهای تولید آن‌ها، نه تنها کیفیت محصولات کشاورزی افزایش می‌یابد بلکه باعث افزایش تقاضا و بهبود دسترسی مصرف‌کنندگان به آن‌ها نیز می‌شود. توسعه متوازن سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی نیازمند توزیع متعادل امکانات و خدمات است. فو و همکارانش برای ارزیابی کارایی سیستم‌های کشاورزی از روش وزن‌دهی آنتروپی و TOPSIS کرده و یک چارچوب دقیق برای ارزیابی توسعه پایدار کشاورزی بر اساس کارایی استفاده از منابع کشاورزی ارائه دادند (Fu, Mao, Mao, & Wang, 2022). بهبود فناوری‌های کشاورزی احتمال افزایش تولید محصولات را بالا می‌برد و به نوبه خود سهم مهمی در افزایش دسترسی مصرف‌کنندگان به محصولات کشاورزی خواهد داشت. لذا ایجاد تعادل در فناوری‌های تولید محصولات کشاورزی مانند فناوری‌های مکانیزه، گامی در جهت از بین بردن عدم تعادل‌های منطقه‌ای است زیرا هرچه تفاوت‌های منطقه‌ای از ابعاد مختلف بیشتر باشد، منجر به حرکت جمعیت و سرمایه به سمت قطب‌های پرجاذبه می‌گردد (Khakpour, 2006). سطح‌بندی توسعه روشی برای سنجش توسعه مناطق است که اختلاف مکانی، فضایی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی مناطق را نشان می‌دهد و وضعیت هریک از مناطق را نسبت به یکدیگر از نظر سطح توسعه مشخص می‌کند. شناخت میزان توسعه‌یافتگی در سطح مناطق موجب بهبود خدمات‌رسانی و شناخت مشکلات و عوامل آن و تلاش در راستای برطرف کردن آن‌ها می‌شود (Fozouni Ardekani, Farhadian, & Pezeshki Rad, 2017). در سال‌های اخیر به علت نبود شناخت و رتبه‌بندی مناطق، سرمایه‌گذاری‌ها و سیاست‌گذاری‌ها موجب قطبی شدن و شکاف در سطح توسعه‌یافتگی واحدهای کشاورزی شده است (Fazayeli, 2007). از طرف دیگر با توجه به این‌که محصولات کشاورزی در کل پهنه کشور مصرف می‌شوند لذا بررسی وضعیت تولید در سامانه‌های مختلف کشاورزی در کل کشور می‌تواند اطلاعات مناسبی در اختیار مدیران زنجیره تأمین محصولات کشاورزی کشور قرار دهد. ارزیابی سطح توسعه سامانه‌های تولید یک محصول کشاورزی در کل کشور می‌تواند به بهبود کیفیت، پایداری زنجیره تأمین، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی و عملکرد زنجیره تأمین آن محصولات منجر شود. این امور می‌تواند به توسعه صنعت کشاورزی و افزایش رقابت‌پذیری

ترکیب کاه و کلش گندم، کود مرغی و افزودنی‌های دیگر و پس از یکسری فرآیندهای تخمیر در داخل کمپوست تولیدشده و قابل استفاده برای میسلیوم قارچ می‌شود. در حوزه مدیریت پسماند، مطالعاتی بر امکان استفاده از کمپوست (Ryahi, Vahid Afagh, & Shidaei, 2001) و ورمی کمپوست (Zokaei, Baziar, & Khaneh, 2011) به عنوان خاک پوششی در پرورش قارچ خوراکی دکمه‌ای انجام شده و نتایج مطلوبی داشته است. از طرفی، کمپوست مصرف شده در تولید قارچ نیز می‌تواند به عنوان منبع تغذیه ماهی‌های گونه‌های پرورشی گرمابی (Roshanfekr, Abdi, Salari, Aliabadi, & Basir, 2017) و غیره مورد استفاده قرار گیرد.

قارچ پس از برداشت به دلیل قهوه‌ای شدن آنزیمی، از دست دادن رطوبت و آلودگی میکروبی در عرض ۳-۴ روز ارزش تجاری خود را از دست می‌دهد (Ghorbani & Torabi, 2018). مطالعات زیادی در حوزه پس از برداشت قارچ، جهت افزایش طول دوره نگهداری قارچ با روش‌هایی مانند توسعه روش‌های بسته‌بندی پایدار و ماندگاری محصول (Aminzadeh, Amini, Ramin, & Mobli, 2014)، ایجاد پوشش‌های خوراکی برای افزایش طول دوره نگهداری (Ghorbani, Maghsoodlou, Alami, Ghorbani, & Sadeghi, 2016; Vaziri, Safekordi, Shekarabi, & Shamlou, 2019) فرآوری و خشک کردن (AmirNejat, Khoshtaghaza, & Pahlavanzadeh, 2011; Aslnezhadi & Peighambari, 2015; Khoshtaghaza, Hosseinzadeh, Fayyazi, & Amirnejat, 2016) در کشور انجام شده است. مطالعات بازاریابی (Rajaei, Pajohande, & Ketabian, 2016)، قیمت‌گذاری (Forghandoost Haghighi & Sayadi, 2010; Ghorbani & Torabi, 2018)، کارایی سنجی (Nadi, Horry, Sadaghe, & Shaban, 2016; Rasekh Jahromi, & Norani Azad, 2020) در بهبود عملکرد تولیدکنندگان در عرصه بازاریابی محصول قارچ مؤثر بوده است. با وجود تمام تلاش‌های صورت گرفته در بهبود عملیات پس از برداشت قارچ، اما همچنان عامل دسترسی به بازار مصرف به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید این محصول محسوب می‌شود. این محصول به دلیل تولید در محیط بسته و بسته‌بندی کمی به شرایط اقلیمی دارد و لذا قابلیت تولید در اکثر نقاط کشور را دارد. بررسی میزان تولید این محصول در نقاط مختلف کشور نشان می‌دهد توسعه متوازن در تولید این محصول در کل کشور وجود ندارد. لذا نیاز به بررسی بیشتر ابعاد مربوط به سامانه‌های تولید این محصول در کل استان‌های کشور وجود دارد.

بخش کشاورزی برای تأمین مطالباتی مانند تولید محصول بیشتر، آلودگی کمتر و تحقق خواسته‌های مصرف‌کنندگان باتوجه به کمیابی فزاینده منابع، تحت فشار است؛ بنابراین توسعه و افزایش کارایی واحدهای تولیدی مواد غذایی بسیار حائز اهمیت است (Zangeneh & Hasanpour, 2023). در عین حال، ارزیابی سامانه‌های کشاورزی

سیاست‌های ناکارآمد برای توسعه این صنعت در استان‌های کشور خواهد شد. در شرایطی که عامل اصلی عدم توسعه این صنعت در یک استان می‌تواند فقدان مواد اولیه کافی باشد، برای استان دیگر، این عامل ممکن است سطح پایین فناوری یا سرمایه یا نیروی متخصص باشد. بر این اساس پژوهش حاضر تلاش دارد تا وضعیت موجود در سامانه‌های تولید قارچ را بررسی کرده و با استفاده از شاخص‌های چندمعیاره، استان‌های ایران را از نظر میزان توسعه‌یافتگی سامانه‌های تولید این محصول رتبه‌بندی نماید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش باهدف ارزیابی میزان توسعه‌یافتگی استان‌های مختلف کشور در زمینه پرورش قارچ خوراکی انجام شده است. رویکرد این پژوهش توصیفی-تحلیلی است. جامعه آماری شامل ۳۱ استان ایران و داده‌های موردنیاز بر اساس نتایج سرشماری ۱۳۹۵ و ۱۳۹۹ مرکز آمار ایران است. پس از بررسی اولیه، شاخص‌هایی که بر جنبه‌های نیروی انسانی، زیربنایی، عملکرد، ضایعات، اقتصاد و انرژی تأکید داشته و قابل دسترس باشند جمع‌آوری شدند. تخمین وزن شاخص‌ها با استفاده از روش آنترپی شانون انجام گرفت. به‌منظور رتبه‌بندی از روش تاپسیس^۱ استفاده شد و رتبه‌بندی استان‌ها از نظر میزان توسعه‌یافتگی در صنعت پرورش قارچ مشخص شد. عملیات رتبه‌بندی با استفاده از هشت گروه شاخص مختلف شامل زیربنایی، مصرف نهاده، ارزش نهاده‌های مصرفی، انواع تولیدات و ضایعات، ارزش انواع پرداختی‌ها، ارزش انواع تولیدات، ارزش انرژی مصرفی و تعداد شاغلان و پرداختی به آن‌ها انجام شد. شکل ۱ مراحل اصلی تحقیق را نشان می‌دهد. در پایان به دلیل وجود نتایج رتبه‌بندی متفاوت در هر یک از مجموعه شاخص‌های مورد استفاده، از ماتریس کپ لند جهت ادغام نتایج رتبه‌بندی استفاده گردید.

روش آنترپی شانون

آنترپی شانون از مفهوم تئوری اطلاعات به‌دست‌آمده است، جایی که از آن برای اندازه‌گیری عدم اطمینان که به‌وسیله توزیع p_i بیان می‌شود و یافتن آن که چه‌قدر فضای ذخیره برای محاسبه همه اطلاعات دارای عدم اطمینان لازم است. محاسبات مربوط به این روش در ادامه آورده شده است:

کشور کمک کند. در بسیاری از مناطق کشور، کشاورزی رکن اصلی اقتصاد محسوب می‌شود. لذا عدالت و توازن منطقه‌ای در توسعه کشاورزی مناطق مختلف اهمیت بسیار زیادی دارد.

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) در بسیاری از زمینه‌ها از جمله مهندسی، مدیریت، اقتصاد و علوم محیطی به‌کار گرفته شده است، همان‌طور که در کشاورزی یک ابزار حیاتی محسوب می‌شود، زیرا امکان ارزیابی هم‌زمان عوامل و معیارهای متعدد را برای شناسایی بهترین جایگزین‌ها برای شیوه‌های کشاورزی پایدار فراهم می‌نماید (Cicciu, Scharmm, & Batista Scharmm, 2022).

این رویکرد در کشاورزی تضمین می‌کند که تصمیمات آگاهانه، شفاف و ساختارمند هستند و همه عوامل مرتبط مانند اثرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. روش‌های MCDM، مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تکنیک اولویت سفارش با شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)، به‌طور گسترده در تصمیم‌گیری کشاورزی برای ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی (Cicciu et al., 2022)، تحلیل الگوی مکانیزاسیون (Mirpanahi, Almassi, Javadi, & Bakhoda, 2023)، ارزیابی جایگزین‌های مدیریت آبیاری، و اولویت دادن به تخصیص آب برای سازگاری با تغییرات اقلیمی (Radmehr, Bozorg-Haddad, & Loáiciga, 2022) به‌کار گرفته شده‌اند، کشاورزان و سیاست‌گذاران به کمک روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توانند انتخاب‌های آگاهانه‌تری داشته باشند که منافع رقیب را متعادل کرده و پایداری بلندمدت را ارتقا دهد. هم‌چنین محققان در پژوهشی به رتبه‌بندی و سطح‌بندی استان‌ها با استفاده از تکنیک VIKOR پرداخته و بر اهمیت برنامه‌ریزی برای دستیابی به توسعه در کشور تأکید دارد (Zarabi & Izadi, 2013). رتبه‌بندی مناطق از نظر میزان توسعه بخش کشاورزی در برخی مطالعات انجام شده است. در پژوهشی که در استان گیلان انجام شد با استفاده از اطلاعات آمارنامه کشاورزی استان گیلان، با استفاده از روش آنترپی شانون و تاپسیس شهرستان‌های استان در سطوح مختلف از نظر میزان توسعه‌یافتگی بخش کشاورزی طبقه‌بندی شدند (Ghanbari, Dalvandi, & Riyahi, 2022). در پژوهش دیگری، برای بررسی وضعیت توسعه کشاورزی استان‌های مختلف از ۸۲ شاخص کشاورزی در زیر بخش‌های زراعت، باغبانی، دامپروری، مکانیزاسیون و خدمات زیربنایی در سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ بر اساس اطلاعات و آمار حاصل از وزارت جهاد کشاورزی استفاده شد (Mousavi & Sadighi, 2015).

در ایران با توجه به وجود شرکت‌های متعدد فعال در زمینه پرورش قارچ خوراکی، بازار این محصول رقابتی بوده شرکت‌های متقاضی ورود به آن نیز وجود دارد. از سوی دیگر، عدم توجه به توزیع متوازن منطقه‌ای درخصوص تولید این محصول، موجب اتخاذ

عدم اطمینان با درجهٔ انحراف داده‌ها برای شاخص d_j که نامیده می‌شود، بیان می‌کند که چه حجمی از اطلاعات هر معیار که توسط j اندیس شده است برای تصمیم‌گیری موجود است، یعنی چه قدر اطلاعات وجود دارد. این مقدار توسط رابطه (۴) به سادگی محاسبه می‌شود (Fu et al., 2022):

$$d_j = 1 - E_j \quad \forall j \quad (4)$$

سپس، وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad \forall j \quad (5)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n [P_{ij} \times \ln(P_{ij})] \quad \forall j \quad (1)$$

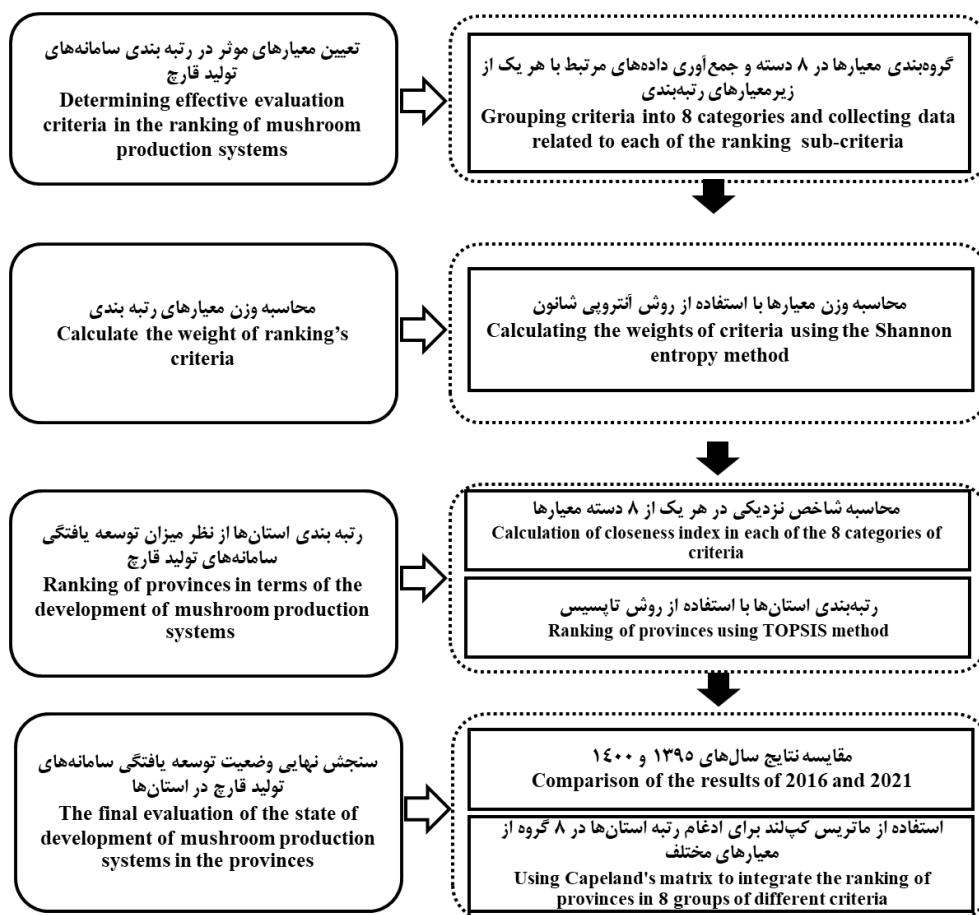
که در آن:

هر P_{ij} به عنوان یک برآورد از توزیع احتمالی مشخصه‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad \forall i, j \quad (2)$$

و k یک ضریب ثابت است که برابر است با:

$$k = \frac{1}{\ln(n)} \quad (3)$$



شکل ۱- مراحل اصلی تحقیق

Fig.1. Main steps of the research

بیشترین فاصله را با پاسخ ایده‌آل منفی^۲ داشته باشد (Banaeian, Mobli, Fahimnia, Ewa Nielsen, & Omid, 2018). در این تحقیق برای مشخصه‌های مثبت که مقادیر بیشتر برای هر مشخصه ترجیح داده می‌شود، بیشینه پاسخ متخصصان به هر مشخصه به عنوان

روش تاپسیس

روش تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است (Opricovic & Tzang, 2004). این روش بر پایهٔ این ایده است که بهترین پاسخ بهتر است کمترین فاصله را با پاسخ ایده‌آل مثبت^۱ و

2- Negative ideal solution

1- Positive ideal solution

موارد دیگری در ارزیابی میزان توسعه‌یافتگی می‌توانند دخیل باشند که به دلیل عدم دسترسی به داده‌های بیشتر حذف شدند. شاخص‌های از نظر ماهیت به دو نوع تقسیم شدند. یک گروه از شاخص‌ها مانند شاخص‌های گروه ۱، به گونه‌ای هستند که مقادیر بیشتر آن‌ها نشان از وضعیت مناسب‌تر در یک استان است، در حالی که گروه دیگری از شاخص‌ها برعکس هستند. بدین معنی که کمتر بودن مقادیر آن‌ها نشان از وضعیت مناسب‌تر است مانند شاخص میزان ضایعات بعد از تولید.

رتبه‌بندی بر اساس طبقه‌بندی شاخص‌ها

دو روش کلی برای مشخص کردن وزن شاخص‌ها وجود دارد: وزن‌دهی مستقیم وزن‌دهی غیرمستقیم. در روش وزن‌دهی مستقیم، وزن شاخص‌ها بر اساس دیدگاه‌های کارشناسان، نتایج پرسشنامه و سایر روش‌های مرسوم که در آن‌ها فرآیند وزن‌دهی شاخص‌ها بدون در نظر گرفتن داده‌های آماری گزینه‌ها انجام می‌شود، تعیین می‌گردد؛ به‌طوری که حتی قبل از گردآوری داده‌های مربوط به گزینه‌ها، می‌توان وزن شاخص‌ها را محاسبه کرد. ولیکن، در روش‌های غیرمستقیم، وزن شاخص‌ها از تحلیل داده‌ها به‌دست می‌آید. در مطالعه حاضر، وزن شاخص‌ها به‌صورت مستقل از روش غیرمستقیم محاسبه گردید سپس وزن‌های به‌دست‌آمده در روش آنتروپی وارد و مقادیر نرمال موزون شده محاسبه گردید. میزان انحراف و فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی (شاخص نزدیکی) که بر اساس ماهیت هر شاخص متفاوت است محاسبه گردید.

برای مشخص کردن وضعیت برخورداری و توسعه‌یافتگی واحدهای پرورش قارچ در ایران از دیدگاه پرسکات و آلن در زمینه برخورداری و پایداری مناطق استفاده شده است (Behmand, 2021).

روش ماتریس کپ لند

قطعاً در هریک از رتبه‌بندی‌ها استان‌ها عملکرد متفاوتی در این پژوهش به‌دست آورده باشند، که در این صورت برای رفع تفاوت و تعارض‌های به‌دست‌آمده بین رتبه‌های گوناگون می‌توان از روش‌های ادغام مانند میانگین رتبه‌ها، بردا و کپ لند استفاده کرد (Behmand, 2021). برای اجرای روش کپ لند یک ماتریس غیر قطری $m \times m$ شکل می‌گیرد که توضیح سطر i به ستون j از نظر تعداد برد و باخت برای هر گزینه مشخص می‌شود. قطر اصلی را صفر کرده و سپس به‌ترتیب هر گزینه را از ردیف اول به آخر با استان دیگر در ستون اول به آخر از نظر مسلط شدن (پیروز شدن) و مغلوب شدن از نظر فراوانی تعداد برد و باخت‌ها در هر شاخص با هم بررسی می‌کنیم (Razavi, Talebpour, Azimzadeh, & Mohammadkazemi, 2021).

پاسخ ایده‌آل مثبت و کمینه پاسخ به‌عنوان پاسخ ایده‌آل منفی در نظر گرفته شد. برای مشخصه‌های منفی که مقادیر کمتر برای آن‌ها ترجیح داده می‌شود برعکس حالت اول عمل می‌شود. برای شروع روش TOPSIS، ماتریس تصمیم تشکیل داده شد و سپس توسط روش نرمال‌سازی خطی نرمال شد.

برای نرمال‌سازی خطی از رابطه (۶) استفاده شد (Zangeneh & Hasanpour, 2023).

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (6)$$

سپس پاسخ ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-) تعیین شد. پس از محاسبه پاسخ‌های ایده‌آل، فاصله هر گزینه از A^+ و A^- به‌ترتیب به‌عنوان R^+ و R^- به شکل زیر محاسبه شد:

$$R_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, J \quad (7)$$

$$R_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

که در این روابط v_j^+ ایده‌آل مثبت و v_j^- ایده‌آل منفی برای معیار j است.

با استفاده از مقادیر محاسبه‌شده، می‌توان مقدار شاخص نزدیکی^۱ (C.I.) را برای هر یک از گزینه‌ها با استفاده از رابطه (۹) محاسبه نمود:

$$C.I. = \frac{(R^-)}{(R^+) + (R^-)} \quad (9)$$

شاخص نزدیکی می‌تواند مقادیری بین صفر و یک اختیار کند و گزینه‌هایی که شاخص نزدیکی آن‌ها مقادیر بزرگ‌تری دارد حائز رتبه بالاتری در بین سایر گزینه‌ها هستند (Banaeian et al., 2018).

انتخاب و ارزیابی شاخص‌ها

روش تحقیق این پژوهش توصیفی-تحلیلی است. نمونه‌های داده‌شده از درگاه ملی آمار، برای رتبه‌بندی بین داده‌های مربوطه واحدهای پرورش قارچ و داده‌های مورد نیاز پژوهش استخراج شده است. پس از مطالعه منابع مذکور (SCI, 2020) تعداد ۷۳ شاخص توسعه تدوین شد. شاخص‌های مذکور در ۸ بخش کلی مطابق جدول ۱ طبقه‌بندی شدند. بنابر جدول ۱، در این مطالعه، مجموعه‌ای از معیارها موردبررسی قرار گرفت. معیارهای مدنظر شامل موارد زیربنایی و ابعادی، مقدار نهاده‌ها، ارزش نهاده‌ها، تعداد شاغلان، ارزش انواع منابع انرژی مانند سوخت، برق و آب، ارزش انواع پرداختی‌ها، ارزش سرمایه‌گذاری بر حسب اموال سرمایه‌ای و ارزش سایر دریافتی‌ها بود.

جدول ۱- شاخص‌های موردبررسی در میزان توسعه‌یافتگی واحدهای پرورش قارچ خوراکی بر اساس معیارهای زیربنایی و ابعادی واحدهای پرورش قارچ خوراکی کشور ایران

Table 1- Investigation of development degree criteria in edible mushroom production units based on basic and dimensional criteria of edible mushroom production units in the country of Iran

روش رتبه‌بندی Ranking Method	معیارهای کلی ارزیابی General evaluation criteria	شاخص‌های توسعه Development indicators	واحد Unit
1	زیربنایی و ابعادی واحدهای پرورش قارچ خوراکی Infrastructure and dimensions of mushroom cultivation units	تعداد واحدهای پرورش قارچ خوراکی The number of edible mushroom cultivation units	-
		تعداد سالن‌های پرورش قارچ خوراکی The number of edible mushroom cultivation halls	-
		مساحت کل سالن‌های پرورش قارچ خوراکی The total area of edible mushroom growing halls	متر مربع (m ²)
		کمپوست آماده - Ready compost کود مرغی - Chicken manure خاک پرلیت - Perlite soil خاک پیت (پوششی) - Peat soil (covering) کاه و کلش - Straw اسپان (بذر) - Spawn (seed) کود ازته (اوره) - Nitrogen fertilizer (urea) گندم - Wheat	کیلوگرم (kg) تن (ton) مترمکعب (m ³) تن (tonne)
2	مقدار نهاده‌های مصرف‌شده واحدهای پرورش قارچ خوراکی The amount of inputs consumed by mushroom cultivation units	سنگ آهک - Limestone سنگ گچ - Gypsum stone ملاس - Molasses کیسه کشت - Planting bag سم جامد - Solid chemicals سم مایع - Liquid chemicals مواد ضدعفونی‌کننده - Disinfectants	کیلوگرم (kg) لیتر (L)
		ارزش نهاده کل - Total input value کمپوست آماده - Ready compost کود مرغی - Chicken manure خاک پرلیت - Perlite soil خاک پیت (پوششی) - Peat soil (covering) کاه و کلش - Straw اسپان (بذر) - Spawn (seed) کود ازته (اوره) - Nitrogen fertilizer (urea) گندم - Wheat سنگ آهک - Limestone سنگ گچ - Gypsum stone ملاس - Molasses کیسه کشت - Planting bag سم جامد - Solid chemicals سم مایع - Liquid chemicals مواد ضدعفونی‌کننده - Disinfectants	
		سایر - Other	
		قارچ دکمه‌ای فله‌ای - Bulk button mushroom قارچ دکمه‌ای بسته‌ای - Package button mushroom قارچ صدفی فله‌ای - Bulk oyster mushroom	هزار ریال (Thousand Rials)
3	ارزش نهاده‌های مصرف‌شده واحدهای پرورش قارچ خوراکی Value of consumed inputs of mushroom cultivation units		
4	مقدار انواع تولیدات و ضایعات واحدهای پرورش قارچ خوراکی Amount of products and wastes of		

	mushroom cultivation units	Bulk oyster mushroom- قارچ صدفی بسته‌ای- اسپان-Span Waste after production- ضایعات بعد از تولید Minor building repairs- تعمیرات جزئی ساختمان Minor machinery repairs- تعمیرات جزئی ماشین‌آلات Minor vehicles repairs- تعمیرات جزئی وسایل نقلیه- Building rent- اجاره ساختمان Communications- ارتباطات Commercial insurance premiums- حق بیمه‌های تجاری- Packaging materials- لوازم بسته‌بندی- Paper, stationery, and office supplies- کاغذ، نوشت‌افزار و لوازم دفتری- Agricultural services- خدمات کشاورزی- Legal services, auditing, and other business services- خدمات حقوقی، حسابرسی و سایر خدمات کسب و کار- Bank fees- کارمزدهای بانکی- Others- سایر	
5	ارزش انواع پرداختی‌های واحدهای پرورش قارچ خوراکی The value of various types of payments for mushroom cultivation units		
6	ارزش انواع تولیدات واحدهای پرورش قارچ خوراکی The value of various products of mushroom cultivation units	Bulk button mushroom- قارچ دکمه‌ای فله‌ای- Package button mushroom- قارچ دکمه‌ای بسته‌ای- Bulk oyster mushroom- قارچ صدفی فله‌ای- Bulk oyster mushroom- قارچ صدفی بسته‌ای- اسپان-Span Waste compost- کمپوست برگشته Bulk button mushroom- قارچ دکمه‌ای فله‌ای- Package button mushroom- قارچ دکمه‌ای بسته‌ای- Bulk oyster mushroom- قارچ صدفی فله‌ای- Bulk oyster mushroom- قارچ صدفی بسته‌ای- اسپان-Span Waste compost- کمپوست برگشته kerosene- نفت سفید Gasoline- گازوئیل Petrol- بنزین Liquid gas- گاز مایع- Natural gas- گاز طبیعی- Other fuels- سایر مواد سوختی- Electricity- برق Water- آب	هزار ریال (Thousand Rials)
7	ارزش سوخت مصرف‌شده و برق و آب خریداری‌شده واحدهای پرورش قارچ خوراکی Value of consumed fuel and electricity and water of mushroom cultivation units		
8	تعداد شاغلان و پرداختی‌های واحد پرورشی به شاغلان The number of employees and the payments of the mushroom cultivation unit to them	Wages and salaries paid- مزد و حقوق پرداختی- Other payments- سایر پرداختی‌ها- Total number of employees- تعداد کل شاغلان	نفر (Person)

جدول ۲- ارزیابی سطح کمی و کیفی توسعه از دیدگاه پرسکات و آلن

Table 2- The assessed quantitative and qualitative development levels from the perspective of Prescott and Allen

ضریب نزدیکی تاپسیس TOPSIS closeness index	0.8-1	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	0-0.2
وضعیت برخورداری از توسعه Status of development	کاملاً برخوردار از توسعه Fully developed	نسبتاً برخوردار از توسعه Relatively developed	متوسط (در حال توسعه) Moderately Developed (developing)	نسبتاً محروم از توسعه Relatively Undeveloped	کاملاً محروم از توسعه Completely deprived of development

گرفت تا بتواند مبنایی برای مقایسه بهتر وضعیت استان‌ها باشد. بر این اساس استان‌های البرز، اردبیل و خوزستان به‌ترتیب دارای بیشترین مقدار ضریب نزدیکی بر اساس داده‌های سال ۱۳۹۵ هستند. در پژوهشی که برای سطح‌بندی توسعه بخش کشاورزی در سال ۱۳۸۷ انجام شد استان‌های خراسان، فارس، مازندران، کرمان، اصفهان و تهران در زمره استان‌های توسعه‌یافته‌تر و سیستان و بلوچستان، هرمزگان، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد، قم، ایلام و چهارمحال و بختیاری نیز از محروم‌ترین استان‌ها شناخته شدند (Ana & Moradnezhad, 2008).

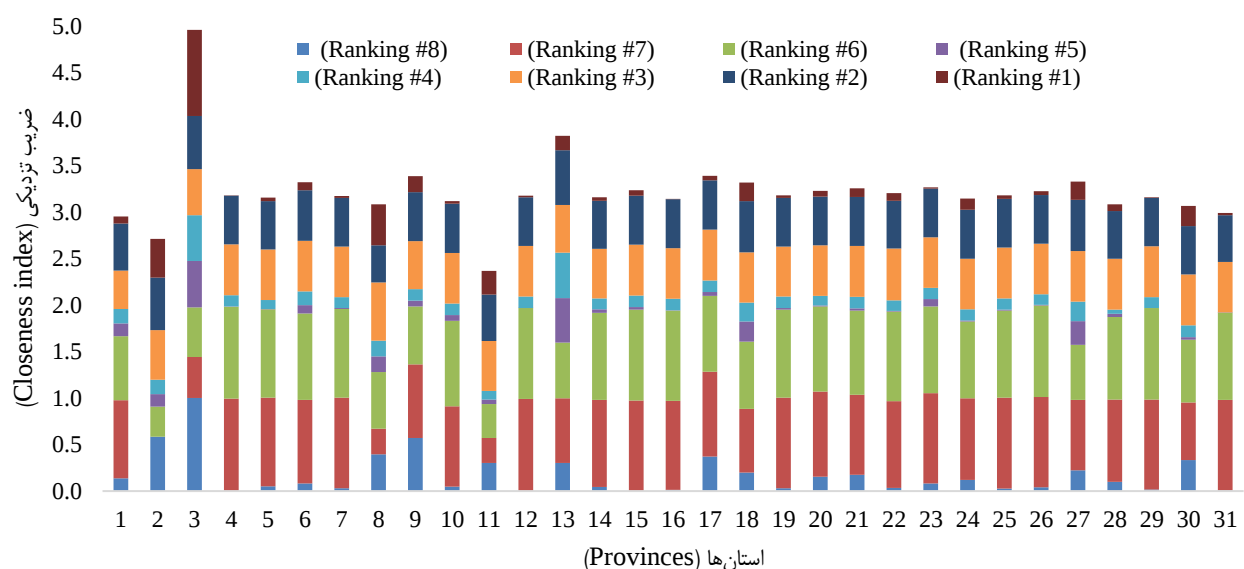
سینگ و همکاران نیز در بررسی مناطق و گونه‌های تولید قارچ در کشورهای تولیدکننده‌ی پیشرو ثابت کردند پنج استان چین (هنان، فوجیان، شاندونگ، هیلونگیانگ و هبی) ۵۰ درصد از کل تولید قارچ در این کشور را به خود اختصاص داده‌اند که نشان از تمرکز تولید و توسعه صنعت تولید قارچ در مناطق کلیدی خاصی از این کشور است (Singh, Kamal, & Sharma, 2021). همچنین ژانگ و همکاران در بررسی توسعه‌یافتگی تولید قارچ کشور چین نشان دادند انبوه کشاورزان از استان‌های داخلی مانند سیچوان به مناطق ساحلی فوجیان و ژجیانگ مهاجرت کرده‌اند تا شغلی در صنعت قارچ پیدا کنند. این نشان‌دهنده‌ی توسعه تولید قارچ در مناطق ساحلی است که احتمالاً تحت تأثیر عواملی مانند آب و هوای مطلوب و دسترسی به بازارها قرار دارد (Zhang, Geng, Shen, Wang, Dai, 2014).

اگر فراوانی تعداد بردها بیشتر بود عدد یک و اگر فراوانی تعداد باخت‌ها بیشتر بود عدد صفر و در صورت تساوی تعداد برد و باخت صفر می‌گذاریم. برای پر کردن زیر قطر اصلی نیز هر خانه را با توجه به اعداد بالای قطر به‌طور معکوس قرار می‌دهیم. پس از تکمیل شدن ماتریس، مجموع هر سطر ماتریس برابر مسلط شدن و مجموع هر ستون ماتریس برابر مغلوب شدن است. مقدار تفاضل مسلط شدن و مغلوب شدن معیاری برای رتبه‌بندی خواهد بود (Moghim & Taghizadeh Yazdi, 2017).

نتایج و بحث

با استفاده از هشت دسته متفاوت از معیارهای عملکردی، استان‌های کشور از نظر میزان توسعه سامانه‌های تولید قارچ خوراکی رتبه‌بندی شدند. عملیات رتبه‌بندی در دو مقطع زمانی ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰ انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از رتبه‌بندی سال ۱۳۹۵ در جدول ۳ آورده شده است. رتبه‌بندی انجام‌شده بر اساس شاخص نزدیکی (CI) روش تاپسیس است. تنوع معیارهای مورد استفاده در هشت روش رتبه‌بندی باعث شده رتبه هر یک از استان‌ها در هر یک از روش‌ها کاملاً متفاوت باشد.

به‌منظور نمایش بهتر وضعیت استان‌ها از نظر میزان توسعه‌یافتگی و در نظر گرفتن هم‌زمان همه معیارهای رتبه‌بندی، نمودار ستونی در شکل ۲ ترسیم شد. در این نمودار مجموع ضریب نزدیکی روش تاپسیس در هر استان از نظر هشت روش رتبه‌بندی مورد استفاده قرار



شکل ۲- ضریب نزدیکی بر اساس تحلیل تاپسیس بر اساس رتبه‌بندی مختلف در سال ۱۳۹۵

Fig.2. Closeness index based on different rankings using TOPSIS in 2016

جدول ۳- نتایج رتبه‌بندی استان‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف با استفاده از تاپسیس در سال ۱۳۹۵
Table 3- Ranking results of provinces based on different indicators using TOPSIS in 2016

ردیف No.	نام استان Province	رتبه‌بندی ۱ Ranking) (#1	رتبه‌بندی ۲ Ranking) (#2	رتبه‌بندی ۳ Ranking) (#3	رتبه‌بندی ۴ Ranking) (#4	رتبه‌بندی ۵ Ranking) (#5	رتبه‌بندی ۶ Ranking) (#6	رتبه‌بندی ۷ Ranking) (#7	رتبه‌بندی ۸ Ranking) (#8
1	اردبیل- Ardabil	14	28	31	7	6	23	22	13
2	اصفهان- Isfahan	3	3	25	6	7	31	31	2
3	البرز- Alborz	1	2	30	1	1	29	28	1
4	ایلام- Ilam	31	15	12	16	28	1	1	30
5	آذربایجان شرقی- E. Azarbaijan	20	24	22	28	27	9	12	18
6	آذربایجان غربی- W. Azarbaijan	12	6	20	8	8	15	17	16
7	بوشهر- Bushehr	26	19	11	24	22	8	5	24
8	تهران- Tehran	2	31	1	5	5	26	29	4
9	چهارمحال و بختیاری- Chaharmahal & Bakhtiari	8	14	28	10	10	25	23	3
10	خراسان جنوبی- S. Khorasan	24	9	6	18	11	16	20	19
11	خراسان رضوی- Razavi Khorasan	4	29	24	29	12	30	30	7
12	خراسان شمالی- N. Khorasan	27	16	13	17	30	4	2	31
13	خوزستان- Khuzestan	9	1	29	2	2	27	25	8
14	زنجان- Zanjan	22	25	27	22	14	12	13	20
15	سمنان- Semnan	17	10	5	12	16	5	9	29
16	سیستان و بلوچستان- Sistan & Baluchistan	30	13	9	15	26	6	11	27
17	فارس- Fars	18	7	16	14	13	21	16	5
18	قزوین- Qazvin	6	5	23	4	4	22	26	10
19	قم- Qom	23	21	26	11	19	10	6	23
20	کردستان- Kurdistan	16	20	21	27	20	17	15	12
21	کرمان- Kerman	11	8	8	13	18	18	21	11
22	کرمانشاه- Kermanshah	28	18	18	20	9	14	7	22
23	کهگیلویه و بویراحمد- Kohgiluyeh & Boyer-Ahmad	13	27	2	25	25	7	14	17
24	گلستان- Golestan	10	11	14	21	21	20	19	14
25	گیلان- Gilan	21	12	17	19	23	13	3	25
26	لرستان- Lorestan	19	17	10	26	24	3	8	21
27	مازندران- Mazandaran	7	4	19	3	3	28	24	9
28	مرکزی- Markazi	15	26	4	30	15	19	18	15
29	هرمزگان- Hormozgan	29	22	7	23	31	2	10	26
30	همدان- Hamedan	5	23	3	9	17	24	27	6
31	یزد- Yazd	25	30	15	31	29	11	4	28

جدول ۴- نتایج رتبه‌بندی استان‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف با استفاده از تاپسیس در سال ۱۴۰۰

Table 4- Ranking results of provinces based on different indicators using TOPSIS in 2021

ردیف No.	نام استان Province	رتبه‌بندی ۱ Ranking) (#1	رتبه‌بندی ۲ Ranking) (#2	رتبه‌بندی ۳ Ranking) (#3	رتبه‌بندی ۴ Ranking) (#4	رتبه‌بندی ۵ Ranking) (#5	رتبه‌بندی ۶ Ranking) (#6	رتبه‌بندی ۷ Ranking) (#7	رتبه‌بندی ۸ Ranking) (#8
1	اردبیل- Ardabil	9	20	21	20	20	23	11	8
2	اصفهان- Isfahan	2	29	27	31	3	30	31	2
3	البرز- Alborz	1	31	31	2	2	22	29	3
4	ایلام- Ilam	21	11	8	22	26	3	5	28
5	آذربایجان شرقی - E. Azarbaijan	17	23	10	17	19	11	13	23
6	آذربایجان غربی - W. Azarbaijan	20	2	14	6	11	19	18	16
7	بوشهر- Bushehr	27	10	4	1	28	4	7	24
8	تهران- Tehran	3	24	28	5	1	27	30	1
9	چهارمحال و بختیاری - Chaharmahal & Bakhtiari	4	19	16	28	14	18	24	10
10	خراسان جنوبی - S. Khorasan	23	7	3	10	16	9	20	26
11	خراسان رضوی - Razavi Khorasan	8	30	29	25	12	26	28	4
12	خراسان شمالی - N. Khorasan	29	18	11	12	29	8	4	25
13	خوزستان - Khuzestan	11	27	26	11	7	29	26	5
14	زنجان- Zanzan	24	15	13	24	24	15	9	20
15	سمنان- Semnan	19	8	9	13	15	7	12	18
16	سیستان و بلوچستان - Sistan & Baluchistan	31	12	1	18	31	1	1	31
17	فارس- Fars	5	26	25	27	5	28	27	7
18	قزوین- Qazvin	6	25	30	3	6	25	22	6
19	قم- Qom	25	13	6	15	17	14	10	14
20	کردستان - Kurdistan	10	5	15	30	9	31	15	12
21	کرمان- Kerman	18	6	12	9	22	20	14	19
22	کرمانشاه- Kermanshah	30	22	22	21	13	5	3	30
23	کهگیلویه و بویراحمد - Kohgiluyeh & Boyer-Ahmad	15	28	24	14	21	17	17	15
24	گلستان- Golestan	13	17	17	23	18	16	21	17
25	گیلان- Gilan	16	9	7	16	23	10	6	21
26	لرستان- Lorestan	22	14	2	26	27	12	8	22
27	مازندران - Mazandaran	7	4	20	7	10	24	25	11
28	مرکزی- Markazi	14	3	18	8	8	21	23	13
29	هرمزگان - Hormozgan	28	21	19	19	30	2	2	27
30	همدان- Hamedan	12	1	23	4	4	13	19	9
31	یزد- Yazd	26	16	5	29	25	6	16	29

در تولید قارچ در این کشور را نمایان می‌سازد (Rath & Mishra, 2024). این مطالعه همچنین خاطرنشان می‌کند که با وجود شرایط

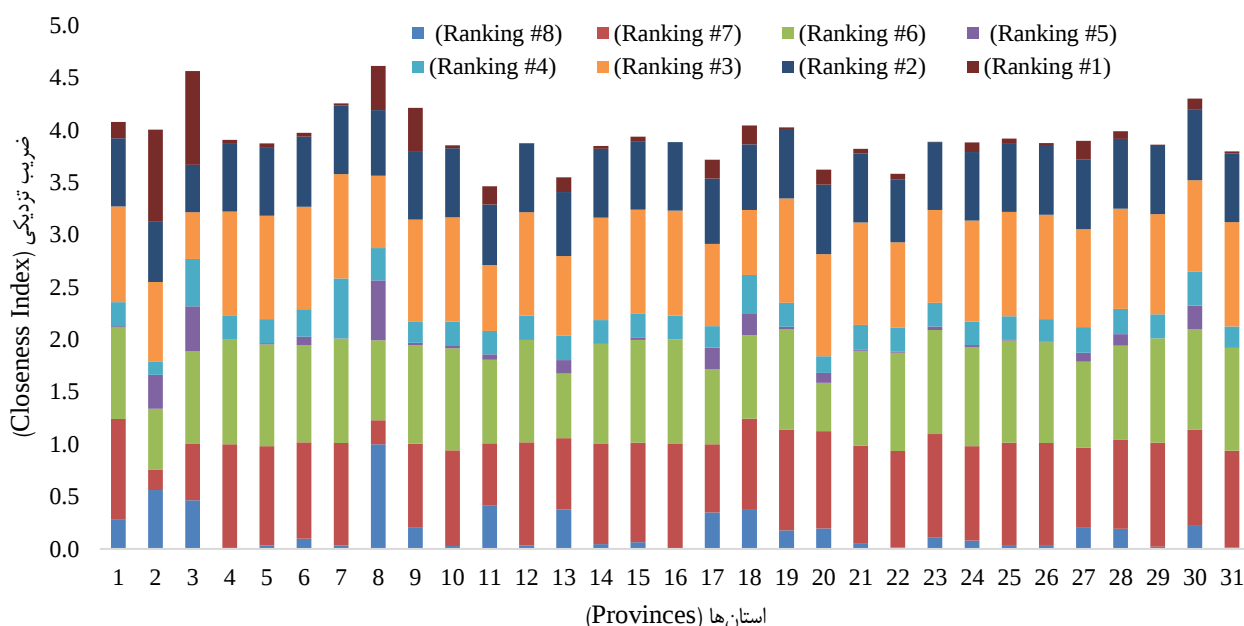
راس و میشر نشان دادند که اودیشا، بیهار و ماهاراشترا تقریباً یک سوم از کل تولید قارچ در هند را شامل می‌شوند که تغییرات منطقه‌ای

صنعت پرورش قارچ خوراکی در مقطع زمانی ۱۴۰۰ در جدول ۴ آورده شده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج رتبه‌بندی سال ۱۳۹۵ گویای وجود تفاوت در میزان توسعه این بخش است.

به‌منظور نمایش وضعیت استان‌ها در سال ۱۴۰۰ از نظر میزان توسعه‌یافتگی سامانه‌های پرورش قارچ خوراکی، مجموع ضریب نزدیکی محاسبه‌شده برای هر استان در هشت روش رتبه‌بندی در شکل ۳ به نمایش گذاشته شد. مقایسه استان‌ها نشان می‌دهد که در سال ۱۴۰۰ استان اردبیل بهترین رتبه را به‌دست آورده است.

آب و هوایی مطلوب، تولید قارچ در ایالت‌های شمال شرقی هند ناچیز بوده و نابرابری‌های منطقه‌ای در توسعه تولید قارچ در سراسر هند وجود دارد (Rath & Mishra, 2024). به‌طور خلاصه، منابع در مورد توسعه نابرابر تولید قارچ در استان‌ها و مناطق مختلف حاکی از آن است که برخی از مناطق به‌عنوان قطب اصلی تولید ظاهر می‌شوند در حالی که برخی دیگر از آن‌ها عقب مانده‌اند. این امر اهمیت درک عواملی که تغییرات منطقه‌ای در توسعه کشاورزی را هدایت می‌کنند را برجسته می‌کند.

نتایج رتبه‌بندی روش‌های هشت‌گانه از نظر میزان توسعه‌یافتگی



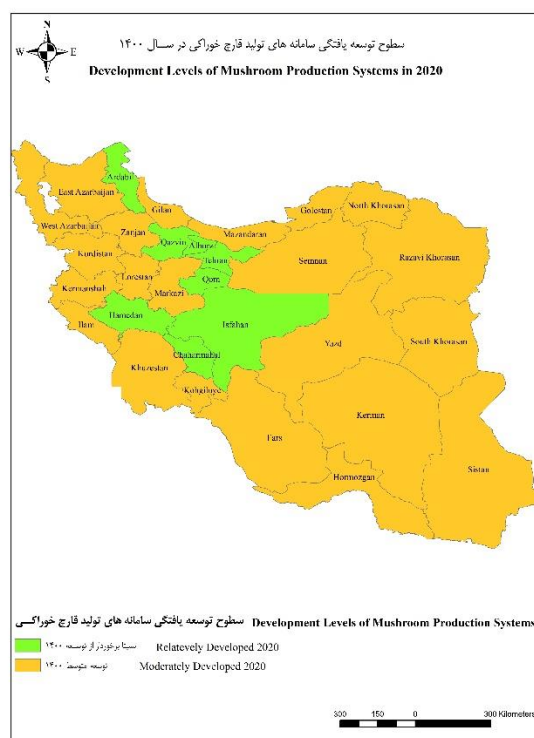
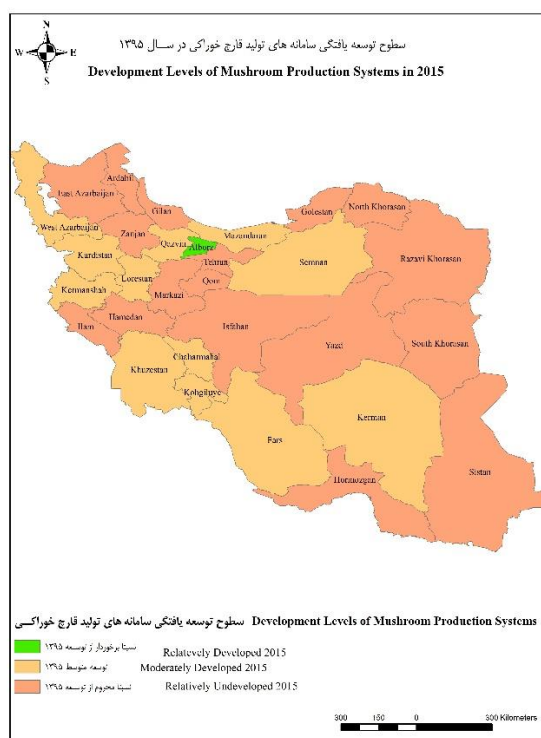
شکل ۳- ضریب نزدیکی بر اساس تحلیل تاپسیس بر اساس رتبه‌بندی مختلف در سال ۱۴۰۰
Fig.3. Closeness index based on different rankings using TOPSIS in 2021

استان‌های کشور از نظر سطح توسعه‌یافتگی اقتصادی در بخش شهری و کشاورزی در بخش روستایی در سال ۱۳۸۹ انجام شده است. در این مطالعه از ۶۸ شاخص اقتصادی و ۴۶ شاخص کشاورزی استفاده شد که نشان داد استان‌های اصفهان، تهران، مازندران، فارس، گلستان، یزد و قم در دسته استان‌های توسعه‌یافته از لحاظ کشاورزی در بخش روستایی قرار دارند (Sardar Shahraki, Karim, & Sheikhtabar, 2013). همانند مطالعه حاضر، پژوهشی در دو مقطع زمانی ۱۳۷۲ و ۱۳۸۲ درجه توسعه‌یافتگی بخش کشاورزی استان‌های کشور را مقایسه کرد (Fotros & Beheshtifar, 2009). نتایج این بررسی نشان داد که سطح توسعه کشاورزی استان‌ها طی سال‌های مورد مطالعه به‌طور متوسط افزایش و دوگانگی کشاورزی بین آن‌ها کاهش یافته است. در پژوهش دیگری از ۵۲ شاخص توسعه

به‌منظور ایجاد تصویری جامع از وضعیت توسعه‌یافتگی صنعت پرورش قارچ در سطح کشور در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰، با استفاده از GIS و دیدگاه روش پرسکات و آلن، میزان توسعه‌یافتگی بر مبنای میانگین ضریب نزدیکی به‌دست‌آمده برای هر استان مشخص شد (شکل ۴). بر این اساس، در سال ۱۳۹۵ استان‌ها به سه سطح نسبتاً محروم از توسعه، توسعه متوسط و نسبتاً برخوردار از توسعه طبقه‌بندی شدند. به غیر از استان البرز که در سطح نسبتاً برخوردار از توسعه قرار گرفت، سایر استان‌ها در سطوح پایین‌تر جای گرفتند. در سال ۱۴۰۰ در مقایسه با ۱۳۹۵ همه استان‌ها بهبود وضعیت داشته‌اند به شکلی که هیچ استانی در سطح نسبتاً محروم از توسعه قرار نگرفت و تعداد استان‌های حاضر در سطح نسبتاً برخوردار از یک استان در سال ۱۳۹۵ به ۸ استان در سال ۱۴۰۰ افزایش یافت. در پژوهشی، رتبه‌بندی

که به منظور مقایسه میزان توسعه‌یافتگی استان‌های کشور انجام شد (Mousavi & Sadighi, 2015)، یافته‌ها نشان داد که شکاف قابل‌ملاحظه‌ای بین استان‌های کشور از نظر سطح توسعه کشاورزی وجود دارد و استان‌های فارس، مازندران و آذربایجان غربی بهترین رتبه و استان‌های قم، هرمزگان و بوشهر کمترین رتبه را در توسعه کشاورزی دارند.

کشاورزی در زیربخش‌های گوناگون برای رتبه‌بندی سطح توسعه بخش کشاورزی شهرستان‌های استان کرمانشاه بهره‌گیری شد (Tavakkoli, 2013). پس از رفع اختلاف مقیاس و وزن‌دهی به هر شاخص با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شاخص ترکیبی نهایی به‌دست آمد. نتایج گویای آن است که بیشترین ضریب اختلاف بین شهرستان‌های استان در زمینه شاخص‌های ترکیبی نهادی، نیروی انسانی و زیرساختی وجود دارد. همچنین در پژوهش دیگری



شکل ۴- سطوح توسعه‌یافتگی سامانه‌های تولید قارچ خوراکی در ایران بر اساس میانگین هشت روش رتبه‌بندی تاپسیس در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰
Fig.4. Development levels of edible mushroom production systems in Iran for the years 2016 and 2021 using the average of eight TOPSIS rankings

رتبه‌بندی صنعت قارچ در مطالعات پیشین صورت نگرفته اما مطالعات کارایی‌سنجی در واحدهای پرورش قارچ استان‌ها نشان داده که استان اصفهان با ۱۵/۸ درصد در سال (رشد مثبت) بیشترین بهره‌وری را دارد و استان البرز با کاهش ۱/۶ درصدی در سال (رشد منفی) مواجه بوده است (Rasekh Jahromi & Norani Azad, 2020).

هیچ مطالعه‌ای در سطح بین‌المللی که به رتبه‌بندی استان‌ها یا مناطق تولیدکننده قارچ پرداخته باشد، یافت نشد. به نظر می‌رسد در سطح بین‌المللی، مطالعات رتبه‌بندی بیشتر بر کشورها متمرکز هستند تا مناطق داخل کشورها. برای مثال رتبه‌بندی کشورها از نظر تولید

ادغام رتبه‌بندی در ماتریس کپ لند

برای ادغام نتایج حاصل از رتبه‌بندی، از روش ماتریس کپ لند استفاده شد و هر استان به‌طور جداگانه با باقی استان‌ها از نظر مسلط شدن و مغلوب شدن در کلیه شاخص‌ها در معرض مقایسه قرار گرفت. پس از مقایسه زوجی، رتبه‌بندی کلی استان‌ها به‌دست آمد (جدول ۵). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، استان البرز، تهران و اصفهان دارای بیشترین میزان توسعه‌یافتگی و استان سمنان، کهگیلویه و بویر احمد و بوشهر دارای کمترین میزان توسعه این صنعت در کشور بودند.

قارچ یا سرانه مصرف قارچ، اما رتبه‌بندی مناطق داخلی هر کشور به‌طور خاص، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه میزان توسعه‌یافتگی استان‌ها از نظر سامانه‌های کشاورزی در برخی مطالعات مشاهده شده است. در پژوهشی که در سال ۱۳۸۷ به‌منظور بررسی درجه توسعه‌یافتگی استان‌های کشور در زمینه ۱۸ شاخص عمده بخش کشاورزی صورت گرفته، نتایج حاکی از آن است که شکاف نابرابری بین استان‌ها در زمینه فعالیت‌های کشاورزی در آن سال عمیق بوده و نسبت آن تا پنج برابر است (ANA Moradnezhad, 2008). مقایسه میزان توسعه‌یافتگی بخش کشاورزی در مقاطع زمانی مختلف در برخی مطالعات مشاهده شد.

جدول ۵- رتبه‌بندی نهایی بر اساس ادغام نتایج هشت روش رتبه‌بندی سامانه‌های تولید قارچ خوراکی در ماتریس کپ لند

Table 5- Final ranking based on the integration of eight ranking methods results of edible mushroom production systems in Capeland matrix

ردیف No.	نام استان Province	سال ۱۳۹۵ 2016			سال ۱۴۰۰ 2021		
		مسلط شدن Win	مغلوب شدن Lost	رتبه Rank	مسلط شدن Win	مغلوب شدن Lost	رتبه Rank
1	اردبیل- Ardabil	6	25	26	14	16	17
2	اصفهان- Isfahan	23	7	8	1	29	30
3	البرز- Alborz	30	3	2	19	11	12
4	ایلام- Ilam	12	10	14	17	13	14
5	آذربایجان شرقی- E. Azarbaijan	3	27	28	13	19	18
6	آذربایجان غربی- W. Azarbaijan	27	3	3	27	3	4
7	بوشهر- Bushehr	8	21	23	28	2	3
8	تهران- Tehran	24	4	5	21	9	10
9	چهارمحال و بختیاری- Bakhtiari & Chaharmahal	19	11	11	13	19	18
10	خراسان جنوبی- S. Khorasan	16	12	13	23	8	8
11	خراسان رضوی- Razavi Khorasan	0	29	31	0	30	31
12	خراسان شمالی- N. Khorasan	12	23	21	10	20	21
13	خوزستان- Khuzestan	24	5	7	9	22	22
14	زنجان- Zanjan	3	28	29	7	23	24
15	سمنان- Semnan	26	6	5	29	1	2
16	سیستان و بلوچستان- Baluchistan & Sistan	10	21	21	16	14	15
17	فارس- Fars	20	12	11	4	26	27
18	قزوین- Qazvin	27	5	4	18	12	13
19	قم- Qom	8	23	25	23	8	8
20	کردستان- Kurdistan	4	26	27	15	15	16
21	کرمان- Kerman	23	7	8	20	10	11
22	کرمانشاه- Kermanshah	10	19	20	6	24	25
23	کهگیلویه و بویراحمد- Buyerahmad & Kohgiluyeh	13	15	18	3	27	28
24	گلستان- Golestan	13	13	17	9	22	22
25	گیلان- Gilan	12	17	19	26	6	5
26	لرستان- Lorestan	15	14	15	13	19	18
27	مازندران- Mazandaran	29	1	1	26	6	5
28	مرکزی- Markazi	11	25	24	26	6	5
29	هرمزگان- Hormozgan	15	14	15	5	25	26
30	همدان- Hamedan	22	11	10	30	0	1
31	یزد- Yazd	0	28	30	2	28	29

سؤال پاسخ داده شد که آیا دوگانگی کشاورزی بین استان‌های ایران طی سال‌های مورد مطالعه کاهش یا افزایش یافته است؟ نتایج

بدین منظور در پژوهشی درجه توسعه‌یافتگی استان‌های کشور در بخش کشاورزی در دو مقطع زمانی ۱۳۷۳ و ۱۳۸۳ مطالعه و به این

مدیریت و سیاست‌گذاری متناسب و صحیح بر اساس پتانسیل مناطق و استان‌های کشور را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که در اتخاذ تصمیمات و برنامه‌ریزی توسعه، سرمایه‌گذاری و مدیریت واحدهای پرورش قارچ، به تفاوت‌های استانی در شاخص‌های موردبررسی و نیز رتبه‌بندی استان‌های کشور و پتانسیل هر استان در هر یک از شاخص‌های مذکور توجه گردد. نتایج نشان داد استان البرز دارای بیشترین میزان توسعه‌یافتگی و استان سمنان دارای کمترین میزان توسعه این صنعت در کشور بودند. سطح توسعه‌یافتگی و رتبه‌بندی واحدهای پرورش قارچ خوراکی استان‌ها با استفاده از دسته‌بندی متفاوت انواع شاخص‌ها و روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس به‌دست آمد. نتایج ادغام رتبه‌بندی‌ها در ماتریس کپ لند نشان داد که استان‌های کوچک‌تر و غیرصنعتی‌تر توسعه‌یافتگی بیشتری نسبت به استان‌های بزرگ‌تر و صنعتی‌تر داشته‌اند. جهت افزایش تولید و بهره‌وری قارچ‌های خوراکی پرورشی، ضروری است که روش‌ها و فناوری تولید و پرورش قارچ با توسعه هرچه بیشتر طرح‌های تحقیقاتی، آموزشی و ترویجی اصلاح گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، رتبه‌بندی توسعه این صنعت در مقیاس‌های کوچک‌تر و دقیق‌تر (مانند شهرستان‌های هر استان) و با توجه به ظرفیت هر استان در شاخص‌های بررسی‌شده انجام گردد.

مشارکت نویسندگان

مرتضی زنگنه: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه و نهایی، ویرایش متن
احسان گودینی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش و تحلیل داده‌ها

تحقیق نشان داد که سطح توسعه کشاورزی استان‌های کشور طی سال‌های مورد مطالعه تغییر چندانی نداشته است، اما ضریب شدت نابرابری به میزان ۱۸/۷ درصد افزایش یافته است (Moulaei, 2008). این مطالعات نشان می‌دهند که توسعه بخش کشاورزی در استان‌ها و مناطق مختلف از نظر عوامل مختلف اقتصادی، اجتماعی و فنی مورد توجه قرار گرفته و ارزیابی شده است اما میزان توسعه‌یافتگی سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی به‌طور خاص مورد توجه نبوده است که از این نظر اهمیت تحقیق حاضر را دوچندان می‌کند.

نسیمی و همکاران (Nasimi et al., 2017) نشان دادند توسعه و رشد تولید قارچ‌های خوراکی در برنامه‌ریزی‌های آتی کشور در زیربخش باغبانی ضروری بوده و با اتخاذ سیاست‌گذاری‌های لازم بایستی فرهنگ مصرف قارچ در کشور افزایش یابد. با این اقدام، میزان قابل‌ملاحظه‌ای مصرف گوشت واردات آن در مواقع کمبود از خارج کاهش یافته و به مقدار قابل‌توجهی در مصرف ارز صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین ضمن کمک به امنیت غذایی کشور از بیماری‌های مرتبط با مصرف زیاد گوشت قرمز نیز کاسته خواهد شد.

نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر، بررسی وضعیت موجود صنعت تولید قارچ و رتبه‌بندی استان‌های ایران از نظر میزان توسعه‌یافتگی با کمک ترکیبی از شاخص‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده است. صنعت تولید قارچ از جایگاه و پتانسیل ویژه‌ای در بخش کشاورزی و تغذیه جامعه برخوردار است. با توجه به این که بازار محصول قارچ، بازاری رقابتی است که متقاضیان ورود و سرمایه‌گذاری بسیاری دارد، لذا اهمیت

References

1. Aminzadeh, R., Amini, F., Ramin, A. A., & Mobli, M. (2014). Effect of Different Packaging Films on Storability of Mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Crop Production and Processing*, 3(10), 233-243. (in Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1392.3.10.20.5>
2. AmirNejat, H., Khoshtaghaza, M. H., & Pahlavanzadeh, H. (2011). A Determination of Thin Layer Drying Kinetics of Button Mushroom when Dried through an Infrared Applied Drying. *Iraninan Jorنال of Biosystem Engineering (Agricultural Sciences of Iran)*, 42(1), 53-61. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084803.1390.42.1.7.3>
3. Ana Moradnezhad, R. (2008). Development status of Iran's provinces in main agricultural sector indices. *Village and Development*, 11(3), 173-194. (in Persian with English abstract).
4. Aslnezhadi, S., & Peighambaridoost, S. H. (2015). Studying drying kinetics of button mushroom pretreated by osmotic dehydration. *Iraninan Jorنال of Biosystem Engineering (Agricultural Sciences of Iran)*, 47(3), 569-575. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084803.1395.47.3.19.4>
5. Banaeian, N., Mobli, H., Fahimnia, B., Ewa Nielsen, I., & Omid, M. (2018). Green supplier selection using fuzzy group decision making methods: A case study from the agri-food industry. *Computers & Operations Research*, 89, 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.015>
6. Behmand, D. (2021). Evaluation of Agricultural Development Status using Planning Methods: Case Study of Counties of Semnan Province. *Journal of Agricultural Economics Research*, 13(3), 150-166. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30495/jae.2021.21266.2012>

7. Cicciu, B., Scharmm, F., & Batista Scharmm, V. (2022). Multi-criteria decision making/aid methods for assessing agricultural sustainability: A literature review. *Environmental Science & Policy*, 138, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.09.020>
8. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (2024). *Evaluating projects for sustainable agrifood systems*. Available online at: <https://www.fao.org/evaluation/highlights/detail/evaluating-projects-for-sustainable-agri-food-systems/en>
9. Fazayeli, H. (2007). The role of rural animal husbandry system in agricultural ecologic. Proceeding of 2nd national conference in Iranian agricultural ecology. University of Gorgan, Golestan, Iran. (in Persian).
10. Forghandoost Haghighi, K., & Sayadi, M. (2010). Using Accounting and its Methods for Agriculture Products (Case of Edible Mushroom). *Financial Accounting and Audit Research*, 3, 117-148. (in Persian with English abstract).
11. Fotros, M. H., & Beheshtifar, M. (2009). Compare of development degree of agricultural sector of Iranian provinces during in two cross sections 1372 (1993/1994) -1382(2003/2004). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 17(1), 17-38. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30490/aead.2009.58825>
12. Fozouni Ardekani, Z., Farhadian, H., & Pezeshki Rad, Gh. R. (2017). Determine the Degree of Dairy Industry Development in Iran Provinces; Using Numerical Taxonomy Technique. *Journal of Food Science and Technology*, 64(14), 51-60. (in Persian with English abstract).
13. Fu, L., Mao, X. Mao, X. & Wang, J. (2022). Evaluation of Agricultural Sustainable Development Based on Resource Use Efficiency: Empirical Evidence from Zhejiang Province, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.860481>
14. Ghanbari, Y., Dalvandi, S., & Riyahi, M. (2022). Measuring the degree of development of the cities of gilan province in the agricultural sector. *Journal of Development Strategy*, 18(3 (71)), 50-77. (in Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352460.1401.18.71.2.5>
15. Ghorbani, A., Maghsoodlou, Y., Alami, M., Ghorbani, M., & Sadeghi, A. (2016). Effect of cress seeds mucilage on shelf life of Button Mushroom. *Innovative Food Technologies*, 3(4), 89-96. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22104/jift.2016.340>
16. Ghorbani, M., & Torabi, S. (2018). The Study of Effective Qualitative Factors on the Price of Edible Mushrooms (Case Study: District Six of Tehran Municipality). *Agricultural Economics and Development*, 25(99), 125-149. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30490/aead.2017.59088>
17. Khakpour, B. (2006). Evaluation of the extent of development in Shirvan villagesfor regional planning purposes. *Geography and Regional Development*, 4(2), 133-145. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/geography.v4i7.4202>
18. Khoshtaghaza, M. H., Hosseinzadeh, B. Fayyazi, E., & Amirnejat, H. (2016). Prediction of thin layer drying of edible mushroom moisture content by feed forward artificial neural networks method. *Journal of Food Science and Technology*, 50(13), 171-182. (in Persian with English abstract).
19. Mirpanahi, S., Almassi, M., Javadi, A., & Bakhoda, H. (2023). Applying multi-criteria decision making method to analyze stability and mechanization patterns in small farms. *Environmental and Sustainability Indicators*, 20, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100295>
20. Moghimi, M., & Taghizadeh Yazdi, M. (2017). Applying Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods for Economic Ranking of Tehran-22 Districts to Establish Financial and Commercial Centers (Case: City of Tehran). *Journal of Urban Economics and Management*, 5(20), 39-51. <https://doi.org/10.29252/ueam.5.20.39>
21. Moulaei, M. (2008). The study and comparison of agricultural development degree among Iran's provinces in 1994 and 2004. *Agricultural Economics and Development*, 16(3 (63)), 71-88. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30490/aead.2008.58864>
22. Mousavi, M., & Sadighi, H. (2015). Determining the level of agricultural development in Iran. *Rural Development Strategies*, 1(4), 55-71. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22048/rdsj.2015.9684>
23. Nadi, A. R., Horry, H. R. Sadaghe, Z., & Shaban, M. (2016). Evaluating the Effects of Environmental Variables on Technical Efficiency of Great Meadow Mushroom Producers in Iran using two-stage Analysis. *International Conference on Management and Economics in 21 century*. Tehran, Iran. (in Persian with English abstract).
24. Nasimi, A., Maadi Roudsari, M., & Tabi, A. (2017). A brief report on status of edible mushrooms production in Iran and world. Tehran, Iran: Islamic Council Research Center. (in Persian). <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/731140>
25. Nazarian, S. M., Zibaei, M., & Sheikhzeinoddin, A. (2020). Evaluating the Sustainability of Agricultural Systems by Compromise Programming: Lorestan Koohtasht Area. *Journal of Agricultural Economics and Developments*, 34(3), 239-257. <https://doi.org/10.22067/JEAD.2020.17730.0>
26. Opricovic, S., & Tzang, Gh. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 145-155. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
27. Radmehr, A., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H.A. (2022). Integrated strategic planning and multi-criteria

- decision-making framework with its application to agricultural water management. *Scientific Reports*, 12, 8406. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12194-5>
28. Rajaei, Y., Pajohande, E., & Ketabian, Sh. (2016). Review and analysis of marketing issues and marketing margin of edible mushroom product of Alborz province. *Iranian Journal of Applied Economics*, 5, 23-32. (in Persian).
29. Rasekh Jahromi, E., & Norani Azad, S. (2020). Productivity and Efficiency of Meadow Mushroom Cultivation in Selected Provinces of the Country: Data Envelopment Analysis Approach. *Economic and Planning Research*, 25(3), 145-166. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519092.1399.25.3.4.4>
30. Rath, S. S., & Mishra, S. N. (2023). A Study on Mushroom Production in India and Odisha Vis a Vis Global Level. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13 (1), 205-213. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i11791>
31. Razavi, S. M. J., Talebpour, M., Azimzadeh, S. M., & Mohammadkazemi, R. (2021). Identifying and Prioritizing Factors Involved in Human Capital Development in Iran's Sports Production Firms using Multi-Criteria Analysis and Copland's Approach. *Journal of Human Resource Management in Sport*, 8(1), 1-17. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22044/shm.2020.8079.1932>
32. Roshanfekr, Kh., Abdi, R., Salari Aliabadi, M. A., & Basir, Z. (2017). The Impact of Spent Mushroom Compost and Fertilizer on Changes of Intestinal Tissue of Cultured Warm Water Species. *Journal of Plasma and Biomarkers*, 43(11), 11-25. (in Persian with English abstract).
33. Ryahi, H., Vahid Afagh, H., & Shidaei, M. (2001). Recycling residual compost (SMC) and using it as cover soil in the cultivation of *Agaricus bisporus*. *Research and Construction*, 13(4), 27-29. (in Persian).
34. Sardar Shahraki, A., Karim, M. H., & Sheikhtabar, M. (2013). Determination of agricultural and economic development levels in rural sector of Iran. *Village and Development*, 16(1), 21-36. (in Persian). <https://doi.org/10.30490/rvt.2018.59096>
35. SCI (Statistical Centre of Iran). (2020). Edible mushroom production in the country by province, Available at: <https://amar.org.ir/statistical-information/statid/22173>
36. Shahbazi, H., & Amjadi, A. (2017). The effect of consumer protection policies on the development of demand in the livestock and poultry sub-sector. *Agricultural Economics and Development*, 23(94): 213-244. (in Persian). <https://doi.org/10.30490/aead.2016.59039>
37. Shams, A., & Javadi, A. (2015). The developmental levels of Zanjan province townships according to animal husbandry indicators. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 46(1), 95-105. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2015.54483>
38. Singh, M., Kamal, S., & Sharma, V. P. (2021). Species and region-wise mushroom production in leading mushroom producing countries - China, Japan, USA, Canada and India. *Mushroom Research*, 30(2), 99-108. <https://doi.org/10.36036/MR.30.2.2021.119394>
39. Tavakkoli, J. (2013). Evaluating the development level of agriculture in kermanshah province's townships. *Geography and Environmental Sustainability*, 2(5), 111-126. (in Persian with English abstract).
40. Unknown. (2021). Census results of edible mushroom cultivation units in the country. Iran Statistics Center, Tehran.Ian. Available at: www.amar.org.ir
41. Vaziri, A., Safekordi, A. A., Shekarabi, A., & Shamlou, S. (2019). Extending the shelf life of edible button mushroom (*Agaricus bisporus*) by edible coatings on the basis of natural polymers. *Journal of Food Science and Technology*, 16 (91), 243-256. (in Persian with English abstract). <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-28314-en.html>
42. Zanganeh, M., & Hasanpour, Kh. (2023). Evaluation of the development status of Iran's hatchery industries using the TOPSIS method. *Strategic Research Journal of Agricultural*, 2(8), 141-156. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2023.181000>
43. Zarabi, A., & Ezadi, M. (2013). Analysis of Iranian provinces development. *Spatial Planning*, 3(1), 101-116. (in Persian with English abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22287485.1392.3.1.6.3>
44. Zhang, Y., Geng, W., Shen, Y., Wang, Y., & Dai, Y-C. (2014). Edible Mushroom Cultivation for Food Security and Rural Development in China: Bio-Innovation, Technological Dissemination and Marketing. *Sustainability*, 6(5), 2961-2973. <https://doi.org/10.3390/su6052961>
45. Zokaei, M., Baziar, S., & Khaneh Bad, M. (2011). Advanced technology of producing cover soil using vermicompost for growing edible mushroom (*Agaricus bisporus*). *Animal Physiology and Development (Biological Sciences)*, 4(1), 19-26. (in Persian).

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 229-245

Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling

S. R. Mousavi Seyedi¹, M. Askari^{1*}, S. M. R. Miri²

1- Mechanics of Biosystem Engineering Department, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.askari@sanru.ac.ir)

Received: 30 June 2024

Revised: 07 September 2024

Accepted: 08 September 2024

Available Online: 15 April 2025

How to cite this article:

Mousavi Seyedi, S. R., Askari, M., & Miri, S. M. R. (2025). Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 229-245. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263>

Introduction

In Asia, two-wheeled agricultural tractors predominantly use single-cylinder two-stroke diesel engines, which are characterized by high fuel consumption and substantial air pollution. At the same time, the severe environmental impacts of energy production from diminishing fossil fuel reserves are increasingly evident. Therefore, it is essential to develop sustainable and clean energy sources to meet these needs. Biodiesel is an alternative fuel that can be blended with conventional diesel to help reduce environmental pollution. In this study, diesel-biodiesel blends produced from rapeseed, soybean, and palm oil were evaluated for their effects on engine performance metrics, including power (P), torque (T), and specific fuel consumption (SFC). Furthermore, the emissions of pollutants (NO_x, HC, CO, and CO₂) from these fuels were measured and modeled using linear and non-linear regression, as well as the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

Materials and Methods

To leverage the benefits of palm oil biodiesel, known for its high calorific value, along with the low kinematic viscosity of biodiesel derived from soybean and rapeseed oils, pure diesel was blended with 10% and 20% mixtures of rapeseed, soybean, and palm biodiesel, as well as 10% and 20% combinations of all three biodiesels. These nine fuel blends were tested at four engine speeds (1800, 2100, 2400, and 2700 rpm) under full load conditions. The diesel-biodiesel blends were produced at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) and transported to the engine laboratory at Tarbiat Modares University in Tehran, Iran, for detailed analysis. A total of 36 treatments were evaluated using a randomized complete block design (RCBD), incorporating four engine speeds and nine fuel types. The measured outputs included engine power, torque, specific fuel consumption, and pollutant emissions such as NO_x, HC, CO, and CO₂. The collected data were used as input for modeling through both linear and non-linear regression in SPSS software, as well as ANFIS in MATLAB software.

Results and Discussion

This study evaluated nine diesel-biodiesel blends derived from palm, rapeseed, and soybean oils using a diesel engine in a controlled laboratory setting. Tests were carried out at four engine speeds—1800, 2100, 2400, and 2700 rpm—under full load conditions to assess engine performance and exhaust emissions. The results showed that for all tested fuel blends, power, specific fuel consumption, and pollutant emissions increased with



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263>

engine speed, while torque decreased. Based on the findings, a blend containing 20% palm biodiesel can be used as an alternative fuel in diesel engines without requiring any modifications. The modeling results indicated that non-linear regression provided better accuracy than linear regression. However, ANFIS demonstrated a much higher correlation between actual and predicted values, with R^2 exceeding 0.98 for both performance parameters and emissions, compared to R^2 values below 0.47 for linear regression and below 0.92 for non-linear regression. The ANFIS model achieved its highest and lowest R^2 values at 0.99 for specific fuel consumption (SFC) and 0.98 for power (P), respectively; substantially higher than those from linear regression, which yielded 0.47 for torque (T) and 0.00 for power. Non-linear regression resulted in R^2 values of 0.92 for SFC and 0.60 for carbon monoxide (CO), still lower than those achieved by ANFIS. Overall, the highest R^2 value recorded was 0.7525 for torque, and the lowest was 0.6112 for power.

Conclusion

Single-cylinder diesel engines, which have high fuel consumption and contribute to air pollution, are commonly used in two-wheel agricultural tractors across Asia. One approach to reducing the environmental impact of fossil fuels is to use biodiesel in these engines without requiring any modifications. The results of this study showed that a 20% blend of palm biodiesel can be an effective alternative fuel for diesel engines, with no need for engine modification. Furthermore, the modeling results indicated a significantly higher correlation ($R^2 > 0.98$) between actual and predicted values of performance variables and emissions using ANFIS, compared to linear regression ($R^2 < 0.47$) and non-linear regression ($R^2 < 0.92$). Therefore, ANFIS can be effectively used to accurately predict engine performance and emission parameters.

Keywords: ANFIS, Engine efficiency, Palm oil, Rapeseed oil, Soybean oil

بررسی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور حین آزمون سوخت‌های ترکیبی دیزل- بیودیزل حاصل از روغن‌های گیاهی و مدل‌سازی آن‌ها

سیدرضا موسوی سیدی^۱، محمد عسکری^{۱*}، سید محمدرضا میری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

چکیده

در این تحقیق، پس از تولید سوخت‌های ترکیبی دیزل- بیودیزل روغن گیاهان کلزا، سویا و پالم، تأثیر آن‌ها بر عملکرد موتور (توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه) و آلاینده‌های خروجی (CO_2 ، CO ، HC ، NO_x) مدل‌سازی شد. دیزل خالص به همراه مخلوط‌های ۱۰ و ۲۰ درصد بیودیزل کلزا، سویا و پالم و مخلوط ۱۰ و ۲۰ درصد از ۳ بیودیزل مذکور در ۴ سرعت (۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه) تحت شرایط بار کامل موتور آزمایش شدند. داده‌ها به‌عنوان ورودی روش‌های مدل‌سازی رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس) استفاده شدند. نتایج نشان داد که در همه سوخت‌های ترکیبی مقادیر توان، مصرف سوخت ویژه و تمامی آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت. سوخت ترکیبی بیودیزل پالم ۲۰ درصد می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی بدون تغییر موتور استفاده شود. رگرسیون غیرخطی دقیق‌تر از نوع خطی بوده همچنین بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده متغیرهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور توسط انفیس، همبستگی بسیار بالاتری (ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۸) در قیاس با رگرسیون خطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۴۷) و غیرخطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۹۲) وجود دارد. بیشترین کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به‌ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین پیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰ به‌ترتیب مربوط به T و P) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰ به‌ترتیب مربوط به SFC و CO) است.

واژه‌های کلیدی: انفیس، بازدهی موتور، روغن پالم، روغن سویا، روغن کلزا

مقدمه

به‌تازگی، مشکلات قابل‌توجهی از جمله افزایش شدید تقاضا و قیمت جهانی، کمبود عرضه، تجدیدنظری و آلودگی محیط‌زیست در نتیجه استفاده از سوخت‌های رو به اتمام فسیلی که حدود ۸۰ درصد انرژی مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند، به‌وجود آمده است. این امر محققان را بر آن داشته است تا به دنبال سوخت پاک جایگزینی بوده که با توسعه پایدار، حفظ و مدیریت و بهره‌وری انرژی و تغییرات آب و هوایی رابطه هم‌زیستی داشته باشد (Al-Dawody, Jazie, & 2017).

(Abdulkadhim Abbas, 2019). از طرفی موتورهای تک‌سیلندر با چرخه دو زمانه یکی از انواع موتورهای درون‌سوز بوده و پتانسیل تولید توان دو برابر موتورهای چهار زمانه مشابه خود را دارند. این موتورها همچنان به خاطر طراحی ساده، وزن سبک با قابلیت روشن شدن سریع در دمای پایین و هزینه به نسبت کم، مورد تقاضا بوده و در نوع دیزلی خود به‌عنوان یک منبع توان شناخته‌شده در تراکتورهای دو چرخ (تیلر کشاورزی)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. جایگزینی سوخت‌های تجدیدپذیر مانند بیودیزل با سوخت دیزل در این موتورها، یک انتخاب در دسترس برای کاهش ناامنی انرژی و اثرات مضر استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد (Menacer & Bouchetara, 2014). بیودیزل به‌عنوان یک سوخت کمکی برای اختلاط با سوخت دیزل محبوبیت زیادی پیدا کرده است، زیرا سوختی پاک، تجدیدپذیر، زیست‌تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و غیرسمی است و می‌توان آن را به هر نسبتی با دیزل مخلوط کرد (Al-Dawudy, 2017). در زمینه عملکرد و آلاینده‌گی سوخت بیودیزل ترکیب‌شده با دیزل

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: m.askari@sanru.ac.ir)

*) نویسنده مسئول: <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263>

ذرات نانو به سوخت دیزل موجب افزایش قدرت و گشتاور و کاهش مصرف سوخت ویژه موتور شد. با افزایش غلظت ذرات نانو در سوخت، انتشار آلایندة CO₂ افزایش یافت. سیاد و همکاران (Sayyed, Kumar Das, & Kulkarni, 2021) ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی شش مجموعه از مخلوط دیزل و بیودیزل جاتروفا، کارانجا، ماهوا و پنبه با درصد حجمی ۱۰ و ۹۰ درصد روی یک موتور دیزل تک‌سیلندر به روش شبکه عصبی مصنوعی تحت بارگذاری کامل را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش در ویژگی‌های عملکردی راندمان حرارتی و بازده حجمی از ۰/۷۷ تا ۵/۶ درصد متغیر است. در مصرف سوخت ویژه کاهش قابل توجه ۸/۹۱ درصد مشاهده شد. ویژگی‌های احتراقی مخلوط‌های بیودیزل مشابه سوخت دیزل به‌دست آمد. از طرفی کاهش کلی در آلایندة CO به مقدار ۳۴/۰۵ و افزایش ۴۲/۵۴ درصد در آلایندة CO₂ برای همه مخلوط‌ها مشاهده شد.

در تحقیقی دیگر، ویژگی‌های آلایندگی یک موتور دیزل تک‌سیلندر با مخلوط بیودیزل جاتروفا حاوی ۳۰ درصد حجمی در ترکیب با دیزل به روش سطح پاسخ تحت نسبت تراکم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط B30، آلایندة‌های HC و CO را به‌ترتیب در حدود ۱۶/۷ و ۲۴ درصد در مقایسه با دیزل خالص کاهش داد. با این حال افزایش قابل‌توجهی در میزان آلایندگی‌های NO_x و CO₂ ثبت شد. از طرفی با افزایش بار و نسبت تراکم، آلایندة‌های HC و CO به‌طور قابل‌توجهی کاهش، اما CO₂ و NO_x افزایش یافتند (Singh et al., 2021). در بسیاری از پژوهش‌های مدل‌سازی، بیشتر از نوع خطی و بسیار کم از نوع غیرخطی روش رگرسیون به‌عنوان در دسترس‌ترین نوع مدل‌سازی در مقام مقایسه با سایر روش‌های کامپیوتری مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، انفیس و روش سطح پاسخ استفاده شده است (Sayyed et al., 2021).

تاکنون، آزمون ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور حین استفاده از مخلوط دیزل-بیودیزل حاصل از گیاهان کلزا، سویا و پالم به‌خصوص مخلوط سه‌گانه آن‌ها به دلیل تأثیرگذاری بیشتر این نوع روغن‌ها بر روی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل به‌علاوه استفاده هم‌زمان از رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی-عصبی (انفیس) به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های مذکور و مقایسه نتایج آن‌ها در تحقیقات مغفول مانده است. بنابراین، هدف اصلی تحقیق حاضر، ارزیابی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور تک‌سیلندر پاشش مستقیم با استفاده از شش مجموعه مخلوط تک‌گانه و دو مجموعه مخلوط سه‌گانه بیودیزل حاصل از روغن‌های کلزا، سویا و پالم در نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد با محدوده سرعت متغیر موتور از ۱۸۰۰ تا ۲۷۰۰ دور بر دقیقه با گام ۳۰۰ دور بر دقیقه در شرایط بار کامل و پیش‌بینی نتایج با استفاده از مدل‌های رگرسیون

تحقیقات زیادی انجام شده است. در پژوهشی، ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی ترکیبات سوخت بیودیزل حاصل از پلی‌اندرا به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی و دیزل خالص روی یک موتور دیزل شش سیلندر در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سوخت بیودیزل تولیدشده مشابه سوخت دیزل می‌باشد. همچنین مشخص شد که آلایندة‌های خروجی از احتراق مخلوط‌های بیودیزل، به‌جز آلایندة NO_x، کمتر از دیزل است. در نهایت مشخص شد که B10 مخلوط بهینه‌ای در بهبود عملکرد موتور از نظر سرعت، توان و بازده حرارتی و B30 مخلوط بهینه‌ای در جهت کاهش آلایندگی موتور بدون هیچ‌گونه تغییراتی در موتور دیزل است (Ogunkunle & Ahmed, 2020). در پژوهشی دیگر، ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند آشپزخانه با شرایط ۲۰ و ۴۰ درصد حجمی در ترکیب با دیزل خالص روی یک موتور دیزل تک‌سیلندر احتراق تراکمی در بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سوخت بیودیزل نسبت به دیزل مخصوصاً B40 مقدار بیشینه فشار داخل سیلندر ۲۴/۳۵ درصد افزایش اما مصرف سوخت ویژه ۲۲/۲۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین راندمان حرارتی ترمزی در مخلوط سوخت B40 کاهش قابل‌توجهی در حدود ۲۹/۹۱ درصد داشت. از طرفی در مخلوط سوخت B40، آلایندة‌های NO_x، HC و CO به‌ترتیب ۶۱/۸۹ درصد، ۴۲/۴۲ درصد و ۶۳/۹۳ درصد نسبت به سوخت دیزل کاهش یافت. در نتیجه مخلوط سوخت B40 به‌عنوان سوخت بهینه انتخاب شد (Elkelawy et al., 2021).

از سوی دیگر، روش‌های پیش‌بینی را در حالت کلی می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود. مدل‌های ریاضی، مدل‌های تحلیلی و مدل‌های کامپیوتری. مدل‌های کامپیوتری به چندین دسته از جمله شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، منطق فازی (FIS)، سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و روش سطح پاسخ (RSM) دسته‌بندی می‌گردد (Askari et al., 2021). با استفاده از این مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌سازی در تحقیقات علمی، پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در مدت زمان کوتاه‌تر و صرف هزینه پایین‌تر صورت می‌گیرد. در همین زمینه، هوسوز و همکاران (Hosoz, Ertunc, Karabektas, & Ergen, 2013) به مدل‌سازی توان و آلایندة‌های CO و CO₂ موتور دیزل با استفاده از انفیس پرداختند. نتایج نشان داد که انفیس با دقت بالا (ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۴) توانست نتایج تجربی را مدل‌سازی نماید. قنبری و همکاران (Ghanbari et al., 2015) به مدل‌سازی توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه موتور و آلایندة CO₂ در خروجی موتور دیزل حین آزمون سوخت دیزل در ترکیب با ذرات نانو با استفاده از انفیس پرداختند. نتایج نشان داد تابع عضویت منحنی گاوس (gaussmf) و ۲۰۰ دوره آموزش (تکرار) گزینه بهینه برای روند آموزش بود. افزودن

خطی، غیرخطی و سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

فرآیند استخراج روغن و تولید سوخت بیودیزل

باتوجه به مغفول ماندن استحصال بیودیزل از روغن گیاهان کلزا، سویا و پالم در تحقیقات و به دلیل تأثیرگذاری بیشتر این نوع روغن‌ها بر روی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل، از آن‌ها به عنوان روغن‌های پایه تولید سوخت بیودیزل در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استفاده شد (Khiraiya et al., 2021). روغن‌ها به کمک حلال N- هگزان به دلیل کم‌هزینه بودن و عملکرد نسبی بالای آن در برابر سایر انواع حلال‌ها از دانه‌های کلزا، سویا و پالم استخراج شد (Ogunkunle & Ahmed, 2019b; Lee, Yi, Cho, & Ahn, 2022). آزمایش به مدت ۵ ساعت در دمای

استخراج ۶۲ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نسبت دانه به حلال ۰/۰۴ گرم در میلی‌لیتر انجام شد. تضمین استفاده کاتالیز مستقیم قلیایی برای واکنش ترانس‌استریفیکاسیون مورد نیاز برای تبدیل روغن به بیودیزل، اسید چرب آزاد (FFA) روغن‌ها بود که به‌طور میانگین تقریباً ۰/۹۲ درصد اندازه‌گیری شد. لذا از شرایط بهینه گزارش‌شده اوگونکونله و احمد (Ogunkunle & Ahmed, 2019a) استفاده شد. بدین صورت که برای انجام واکنش ترانس‌استریفیکاسیون از متانول به دلیل واکنش سریع و زنجیره عملکردی کوتاه‌تر به‌عنوان الکل و از پتاسیم هیدروکسید با ۱ درصد وزنی روغن و نسبت مولی الکل به روغن ۱ به ۶ به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. برای بهبود عدد ستان و مقادیر گرمایش بیودیزل‌های تولیدشده از روغن‌های گیاهی و کاهش ویسکوزیته عموماً ترانس‌استریفیکاسیون مورد نیاز است. نمونه‌ای از سوخت‌های بیودیزل تولیدشده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ای از بیودیزل تولیدی پالم (سمت راست) و سویا (سمت چپ)

Fig. 1. Palm (right) and soybean (left) biodiesel samples

یخچال تعیین شد.

مشخصات موتور و روش آزمایش

به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور حین استفاده از مخلوط‌های سوخت تولیدشده، یک موتور دیزل تک‌سیلندر در چهار دور موتور شامل ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه تحت بارگذاری کامل در دانشگاه تربیت مدرس مورد بررسی قرار گرفت. اجزای اصلی مورد استفاده عبارتند از: موتور دیزل تک‌سیلندر، دینامومتر جریان گردابی D400، واحد کنترل برای اعمال بار همراه با نمایشگر دیجیتال، مخازن ذخیره سوخت برای مخلوط بیودیزل و دیزل، سیستم جمع‌آوری اطلاعات (کامپیوتر)، خروجی یا اگزوز، آلاینده‌سنج جهت تجزیه و تحلیل گاز و حسگرهای مختلف برای اندازه‌گیری سوخت. باتوجه به ۴ دور موتور و ۹ نوع سوخت مجموعاً ۳۶ آزمون انجام شد.

آماده‌سازی مخلوط‌ها

به‌منظور انجام آزمون‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور، ۹ نوع سوخت شامل دیزل خالص به‌عنوان شاهد به همراه ۶ مخلوط تک‌گانه و ۲ مخلوط سه‌گانه سوخت دیزل- بیودیزل حاصل از گیاهان کلزا (BC)، سویا (BS) و پالم (BP) با ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی مطابق با جدول ۱ تهیه شد. جرم مولی (جرم اتمی) آن‌ها به همراه نحوه تعریف در ترسیمه‌های انفیس نیز در جدول ۱ آمده است.

جدول ۲ بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوخت‌های تحت بررسی با استفاده از روابط استاندارد انجمن ایالات متحده آمریکا برای آزمایش و مواد (ASTM) تعیین شد. جرم مخصوص و ویسکوزیته نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر مویرگی شیشه‌ای مدرج تعیین شد. نقطه اشتعال با استفاده از آزمونگر فنجان بسته Pensky-Martens تعیین شد. نقطه ابری با استفاده از روش ASTM D2500 توسط بازرسی بصری برای نمایان شدن مه هنگام سرد شدن نمونه در

جدول ۱- مشخصات مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل مورد مطالعه به همراه جرم مولی و نحوه تعریف در ترسیمه‌های انفیس

Table 1- Properties of diesel and biodiesel fuel mixtures with the molar mass and description in ANFIS diagrams

نوع سوخت Fuel Type	B0 (D100)	BS10	BS20	BP10	BP20	BR10	BR20	BSRP10	BSRP20
مفهوم Description	دیزل خالص Pure diesel	۱۰ درصد بیودیزل سویا 10% soybean biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل سویا 20% soybean biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل پالم 10% palm biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل پالم 20% palm biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل کلزا 10% rapeseed biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل کلزا 20% rapeseed biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل سویا، کلزا، پالم 10% soybean, rapeseed, and palm biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل سویا، کلزا، پالم 20% soybean, rapeseed, and palm biodiesel
جرم مولی یا جرم اتمی Molar mass or atomic mass (g mol ⁻¹)	167	178.5	190	175.9	184.8	178.3	189.6	177.567	188.133
تعریف‌شده در ترسیمه‌های انفیس Described in ANFIS diagrams	1	2	3	4	5	6	7	8	9

جدول ۲- خصوصیات سوخت دیزل و بیودیزل‌های مورداستفاده طبق استاندارد ASTM

Table 2- Properties of used diesel and biodiesel fuels based on ASTM standard

خصوصیات Properties	روش آزمون Test method	حدود مجاز Permissible limit	دیزل خالص Pure diesel	بیودیزل کلزا Rapeseed biodiesel	بیودیزل سویا Soybean biodiesel	بیودیزل پالم Palm biodiesel	واحد Unit
نقطه اشتعال Flash point	D92	Min 130	62	176	161	174	°C
نقطه ابری Cloud point	D2500	-	-	-1	7	5	°C
آب و رسوبات Water and sediment	D2709	Max 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	%Vol
گرانروی سینماتیکی Kinematic viscosity	D445	1.6-9	3.35	4.68	4.73	4.5	mm ² s ⁻¹
ارزش حرارتی Thermal value	D240	-	46.8	37.74	37.66	41.3	MJ kg ⁻¹
چگالی Density	D4052	0.86-0.90	0.83	0.85	0.85	0.86	g cm ⁻³

از آنالیزگر MAHA MGT5 اندازه‌گیری شد. داده‌های عملکرد و آلایندگی ثبت شده در سه تکرار مدنظر قرار گرفت. توضیحات بیشتر در خصوص مشخصات موتور و طرح شماتیک آزمون آزمایشی در

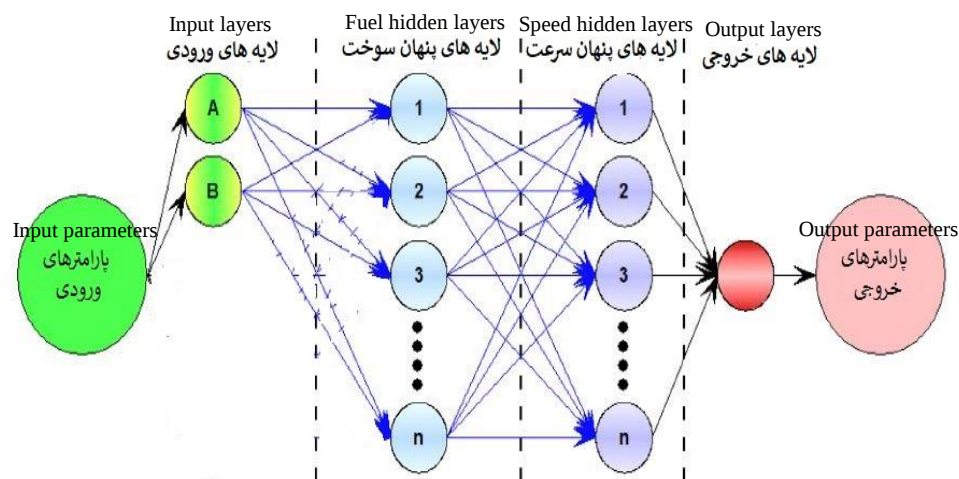
غلظت آلایندگی گازها، مانند هیدروکربن (HC) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) بر حسب ppm و آلایندگی دی‌اکسید کربن (CO₂) و مونواکسید کربن (CO) بر حسب درصد حجمی با استفاده

پژوهش موسوی سیدی و همکاران (Mousavi Seyed, Askari, & Miri, 2023) ارائه شده است.

استفاده از رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس به منظور پیش‌بینی

محققان به دلیل ناتوان بودن در پیش‌بینی متغیرهای خروجی در صورت آزمون کمیت‌های اندازه‌گیری نشده در ورودی، نیازمند روشی جایگزین جهت حل مسئله هستند. از روش‌های پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در تحقیقات علمی و مسائل پیچیده مهندسی، استفاده از رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) است که نتایج تحقیقات گذشته، تاحدودی مزیت گزینه سوم نسبت به گزینه اول را به عنوان یک روش قابل‌دوام برای چنین مسائلی اثبات نموده است. اما گزینه دوم بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. روش انفیس، قوی‌تر از رگرسیون خطی بوده و مجموعه‌ای از رویه‌های ریاضی مبتنی بر آمار است که عمدتاً برای توسعه مدل پیش‌بینی برای تجزیه و تحلیل پارامترهای خروجی مورد

نظر استفاده می‌شود که شامل سه لایه تحت عنوان لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی نام‌گذاری می‌شوند. در مطالعه حاضر، مدل انفیس با در نظر گرفتن نوع سوخت و سرعت به عنوان توابع ورودی برای پیش‌بینی پارامترهای عملکرد و آلاینده‌ی موتور تحت بار کامل (۱۰۰ درصد) به عنوان لایه خروجی انتخاب شده است که تابع هدف را برای همبستگی پاسخ‌های خروجی با تعداد پارامترهای ورودی انتخاب شده فراهم می‌کند که طبق طراحی آزمایشات، متغیرهای ورودی شامل ۹ مجموعه سوخت و ۴ سرعت موتور بوده و به صورت X1 تا X9 و Y1 تا Y4 در شکل ۲ نشان داده شده است. با تغییر تابع عضویت در ورودی، نتایج متفاوت با دقت‌های متفاوت در خروجی انفیس خواهیم داشت. پس باید از معیاری به منظور شناسایی بهترین تابع عضویت با کمترین خطا و بیشترین قرابت نتایج پیش‌بینی‌شده در خروجی نسبت به نتایج حاصل از آزمون تجربی استفاده شود. پس از مطالعه پژوهش‌های قبلی در این خصوص، دقت نتایج پیش‌بینی‌شده توسط انفیس و دقت نتایج پیش‌بینی‌شده توسط رگرسیون خطی و غیرخطی به کمک ضریب تبیین (R^2) ارزیابی و مقایسه شدند.



شکل ۲- نمایی از مدل شبیه‌سازی‌شده به کمک سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس)

Fig. 2. A view of simulated model using ANFIS

نتایج و بحث

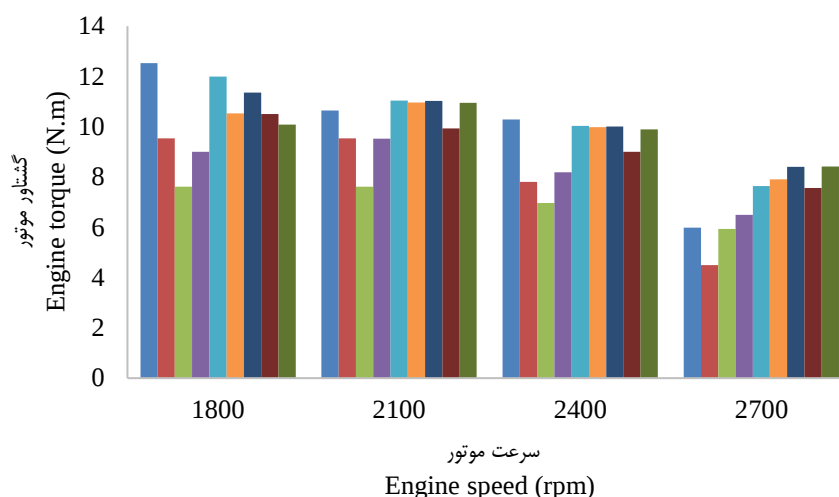
نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش سرعت موتور تا دور ۲۴۰۰ دور بر دقیقه، توان موتور در همه مخلوط‌ها از جمله دیزل افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش توان بعد از دور مذکور، افزایش تلفات اصطکاکی و کاهش راندمان حجمی موتور است. از طرفی در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه با افزایش بیودیزل نسبت به دیزل خالص، مقدار توان موتور به دلیل ویسکوزیته

سینماتیکی بالاتر بیودیزل نسبت به دیزل خالص، افزایش می‌یابد. درخصوص گشتاور مشخص شد که با افزایش دور موتور از ۱۸۰۰ به ۲۷۰۰ دور بر دقیقه، گشتاور موتور به صورت ثابت کاهش یافته و این گشتاور در سرعت بالا کاهش زیادی یافت. درخصوص مصرف سوخت ویژه مشخص شد که در همه مخلوط‌ها با افزایش سرعت موتور، مصرف سوخت ویژه افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش گشتاور و توان موتور مخصوصاً در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه باشد. در مجموع و در همه سوخت‌های ترکیبی، مقادیر توان و مصرف سوخت ویژه با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش

ویژه و آلاینده‌ها کاهش یافت. بر اساس نتایج، سوخت ترکیبی بیودیزل پالم می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزل بدون هیچ‌گونه تغییر در ساختار موتور استفاده شود. به‌عنوان نمونه، شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی تغییرات گشتاور مخلوط‌های مختلف سوخت دیزل و بیودیزل را به‌عنوان تابعی از سرعت موتور نشان می‌دهد.

یافت. همچنین مقادیر آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش یافت. سوخت‌های BS20، BP20، BP10 و BP20 به‌ترتیب برای آلاینده‌های HC، CO₂ و CO عملکرد بهتری از لحاظ کاهش آلاینده‌ها در سرعت پایین نسبت به سایر سوخت‌ها داشتند. در سرعت‌های بالا با افزایش درصد اختلاط بیودیزل و دیزل از ۱۰ به ۲۰ درصد، مقدار توان و گشتاور موتور افزایش اما میزان مصرف سوخت



■ B0 ■ Bs10 ■ Bs20 ■ Bp10 ■ Bp20 ■ Br10 ■ Br20 ■ Brsp10 ■ Brsp20

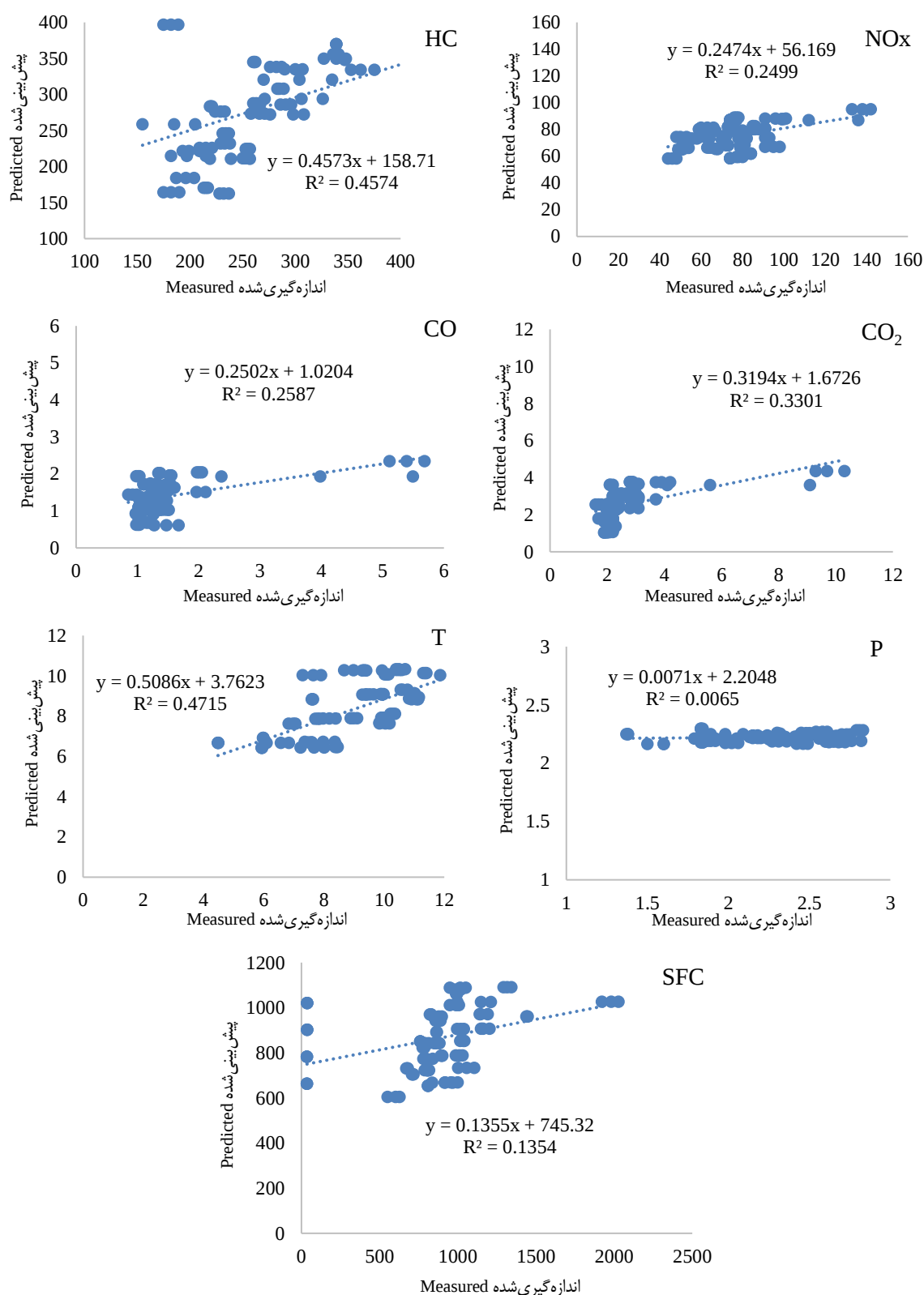
شکل ۳- تغییرات گشتاور موتور در سرعت‌های مختلف برای سوخت‌های آزمایش‌شده
Fig. 3. Changes in the engine torque at different speeds for the tested fuels

۱۸۰۰ دور بر دقیقه داشت. اطلاعات بیشتر درخصوص نتایج این بخش در پژوهش موسوی سیدی و همکاران (Mousavi Seyedi et al., 2023) در دسترس است.

نتایج مدل‌سازی توسط رگرسیون خطی

با استفاده از نرم‌افزار SPSS به تجزیه داده‌ها و تشکیل مدل‌های رگرسیون خطی پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده، در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. در این جدول، P=توان، T=گشتاور و SFC=مصرف سوخت ویژه موتور می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی پارامترهای تحت بررسی در هر سه روش رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیسی، برای تعریف انواع سوخت‌های تحت آزمون از جرم مولی یا جرم اتمی (بر حسب گرم بر مول) آن‌ها استفاده شد (جدول ۱). بنابراین به‌ترتیب برای تعریف سوخت دیزل خالص، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد سویا، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد پالم، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد کلزا و ترکیب ۳ بیودیزل مذکور در نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد از اعداد ۱۶۷، ۱۷۸/۵، ۱۹۰، ۱۷۵/۹، ۱۸۴/۸، ۱۷۸/۳، ۱۸۹/۶، ۱۷۷/۵۶۷ و ۱۸۸/۱۳۳ با توجه به فرمول شیمیایی مختص به هر سوخت، جرم اتمی (مولی) و تعداد اتم‌های هیدروژن، اکسیژن و کربن هریک از آن‌ها استفاده شد.

در همه مخلوط‌ها، گشتاور موتور با افزایش سرعت موتور کاهش یافت. در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است که در موتورهای تزریق مستقیم، مقادیر حداکثر سرعت موتور، باعث کاهش بازده حجمی و افزایش تلفات مکانیکی می‌گردد (Cihan, 2021). میانگین کاهش گشتاور در سرعت‌های ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر ۱۱/۳۵، ۱۰/۲۳، ۹/۸۶ و ۷/۵۲ نیوتن‌متر بود. با افزایش نسبت بیودیزل در مخلوط سوخت، گشتاور موتور کاهش یافت که این امر به دلیل ارزش حرارتی کمتر و ویسکوزیته بالاتر مخلوط‌های بیودیزل نسبت به دیزل بود. از طرف دیگر این امر می‌تواند مرتبط با دمای گاز خروجی به‌واسطه احتراق در سیلندر باشد. می‌توان گفت که هرچه درجه حرارت بالاتر باشد، عمل سوختن بهتر انجام می‌گردد (Chuah et al., 2015). لذا افزایش در گشتاور موتور برای مخلوط سوخت BP20 (۱۷/۷۲ درصد) در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیزل خالص مشاهده شد در حالی‌که کاهش قابل‌توجهی برای BS10 (۲۰/۱۱ درصد) در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیزل خالص مشاهده گردید. موتور مورد‌استفاده در تحقیق حاضر، بالاترین گشتاور را در هنگام کار با BP20 در سرعت



شکل ۴- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های رگرسیون خطی

Fig. 4. Correlation between measured and predicted data using linear regression models

نتایج مدل‌سازی توسط رگرسیون غیرخطی

به کمک جستجو در پژوهش‌های مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی و معادلات غیرخطی پیش‌فرض ارائه‌شده توسط نرم‌افزارهای Excel و SPSS، دو رابطه مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی پرتکرار به‌صورت روابط (۱) و (۲) تحت بررسی قرار گرفت.

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + c_1 X_1^2 + c_2 X_2^2 + d X_1 X_2 \quad (1)$$

$$Y = a \exp (b_1 X_1 + b_2 X_2) \quad (2)$$

در ادامه نمودارهای مربوط به پیش‌بینی مقادیر ارائه‌شده توسط مدل‌های رگرسیون خطی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است. محور افقی در شکل ۴ مقادیر واقعی (اندازه‌گیری‌شده در آزمون) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط معادلات رگرسیون خطی است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، ضرایب تبیین مدل‌های رگرسیون خطی مقادیر بالایی نیستند (۰/۰۰ الی ۰/۴۷) و در واقع این مدل‌ها نتوانستند با دقت بالایی به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی بپردازند.

جدول ۳- مدل‌های رگرسیون خطی درخصوص پارامترهای تحت بررسی

Table 3- Linear regression models of the studied parameters

پارامتر Parameter	مدل رگرسیونی Regression model
NO _x (ppm)	Y= 150.405 - 0.703 Fuel + 0.023 Speed
HC (ppm)	Y= 587.144 - 4.186 Fuel + 0.206 Speed
CO ₂ (%Vol)	Y= 9.977 - 0.066 Fuel + 0.002 Speed
CO (%Vol)	Y= 5.654 - 0.036 Fuel + 0.001 Speed
P (kW)	Y= 2.851 - 0.004 Fuel + 0.00004198 Speed
T (N.m)	Y= 21.220 - 0.021 Fuel - 0.004 Speed
SFC (gkW h ⁻¹)	Y= -1051.232 + 5.633 Fuel + 0.397 Speed

جدول ۴- ضرایب رابطه ۱

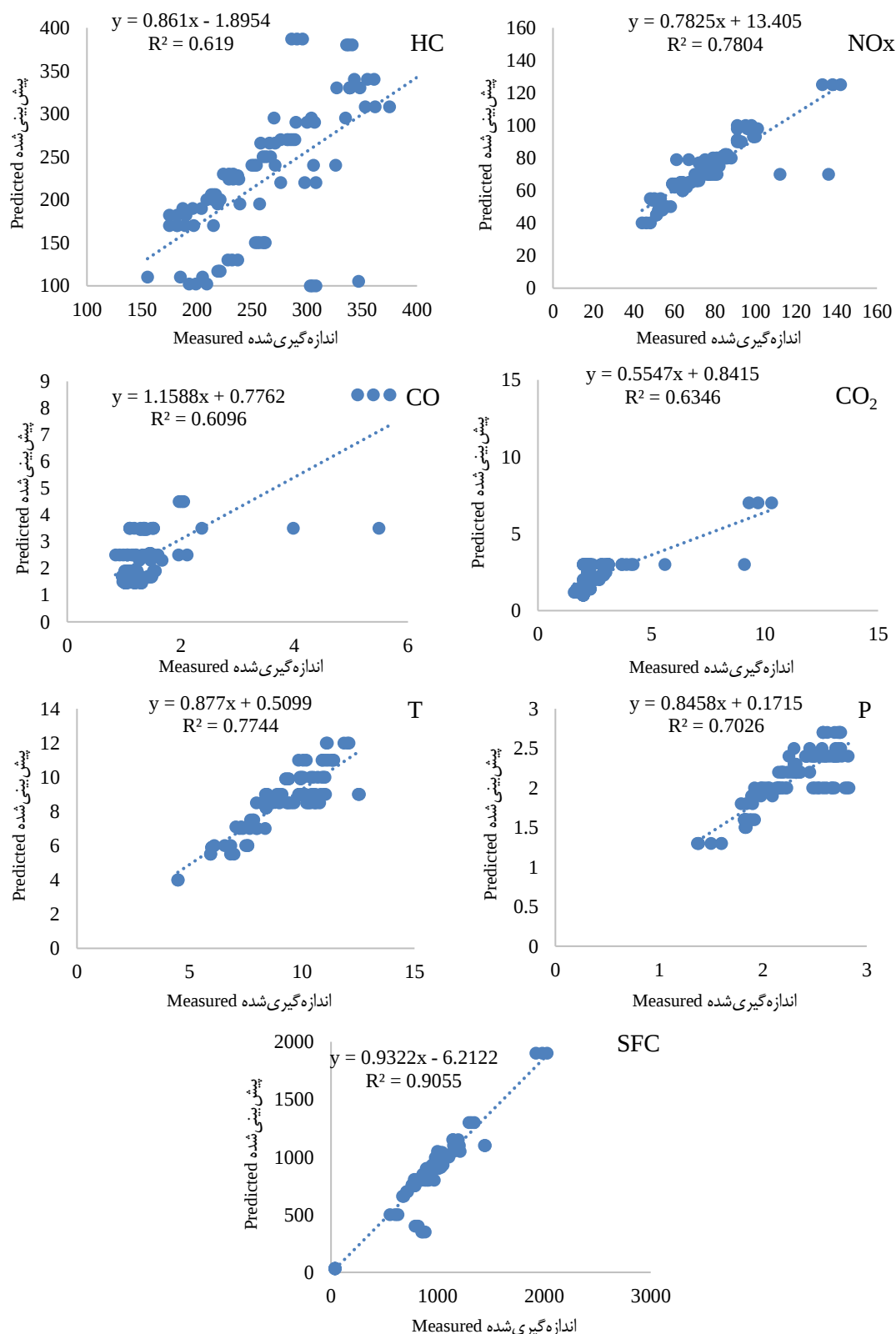
Table 4- Coefficients of relation 1

ضریب Coefficient	مقدار Amount						
	NO _x	HC	CO ₂	CO	P	T	SFC
a	2.00E-03	5.12E-09	4.02E-07	0.01	1.58E-06	0.01	0.99
b ₁	2.52	0	0.04	0.01	5.16E-05	0.099	0.97
b ₂	0.0835	0	0.098	0	3.14E-06	0.0021	0.39
c ₁	3.81E-06	1.21E-09	2.64E-05	0	3.36E-06	0.098	0.03
c ₂	4.33E-06	4.43E-05	6.48E-07	0.01	0	0.01	5.99E-04
d	0.01	5.15E-05	1.10E-06	0.01	0.002	0.02	0.03

جدول ۵- ضرایب رابطه ۲

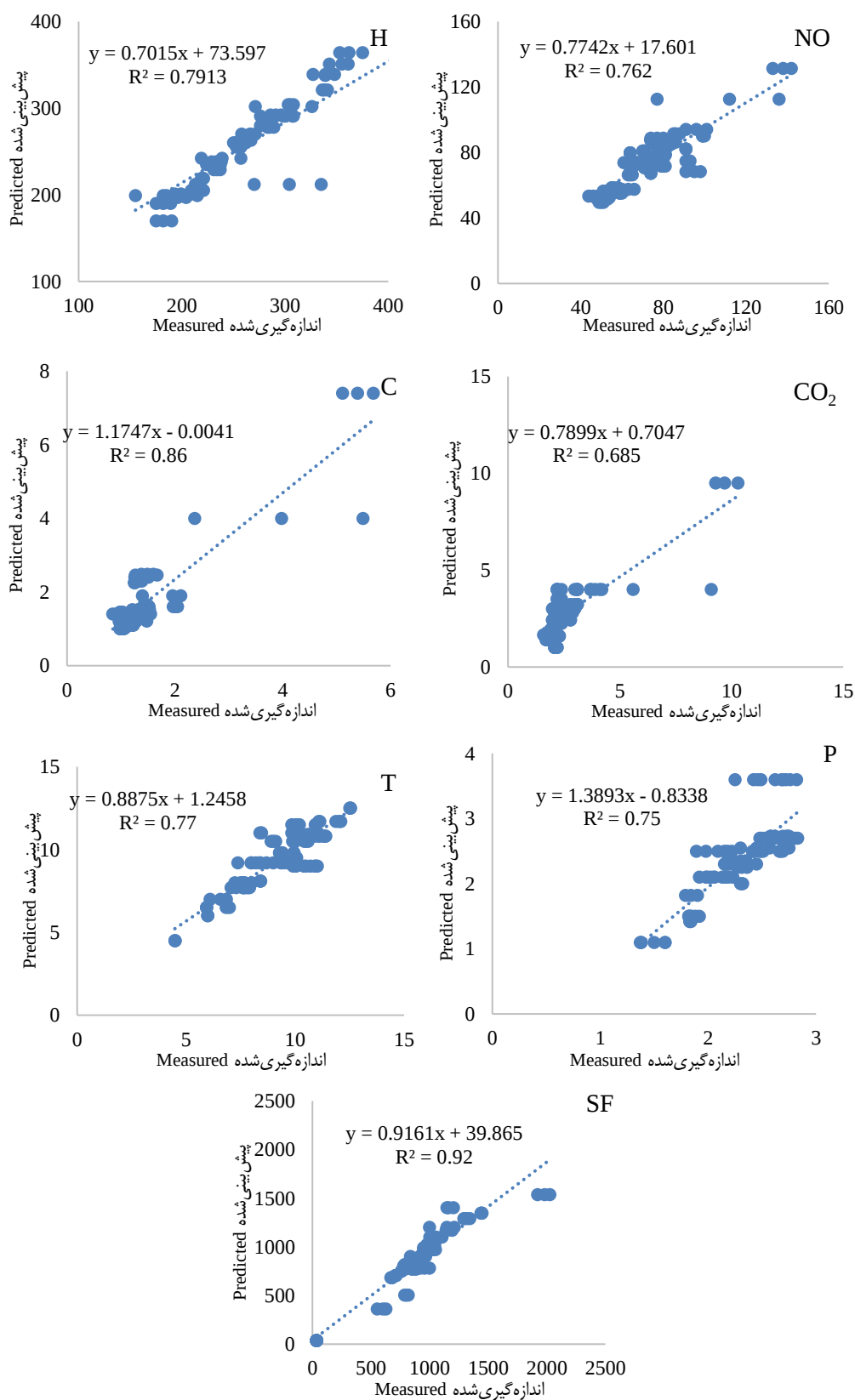
Table 5- Coefficients of relation 2

ضریب Coefficient	مقدار Amount						
	NO _x	HC	CO ₂	CO	P	T	SFC
a	30.75	36.727	0.39	0.225	3.1167	5.749	171.09
b ₁	0.016	0	0.002	0.001	0.9463	0.022	0.003
b ₂	0.0504	0.0919	0.873	0.0912	3.21E-03	0.00231	0



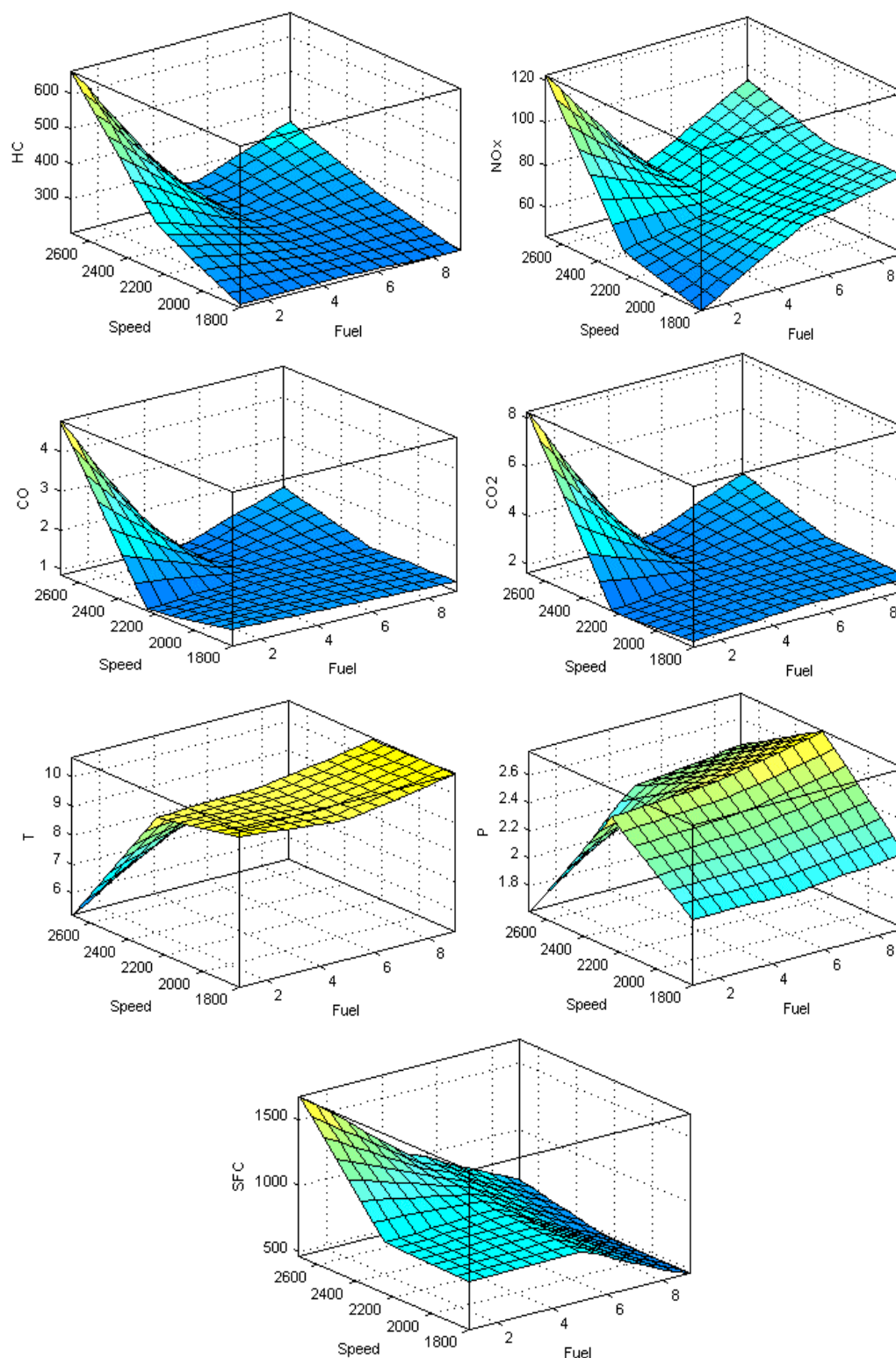
شکل ۵- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱ رگرسیون غیرخطی

Fig. 5. Correlation between measured and predicted data using relation 1 Non-linear regression

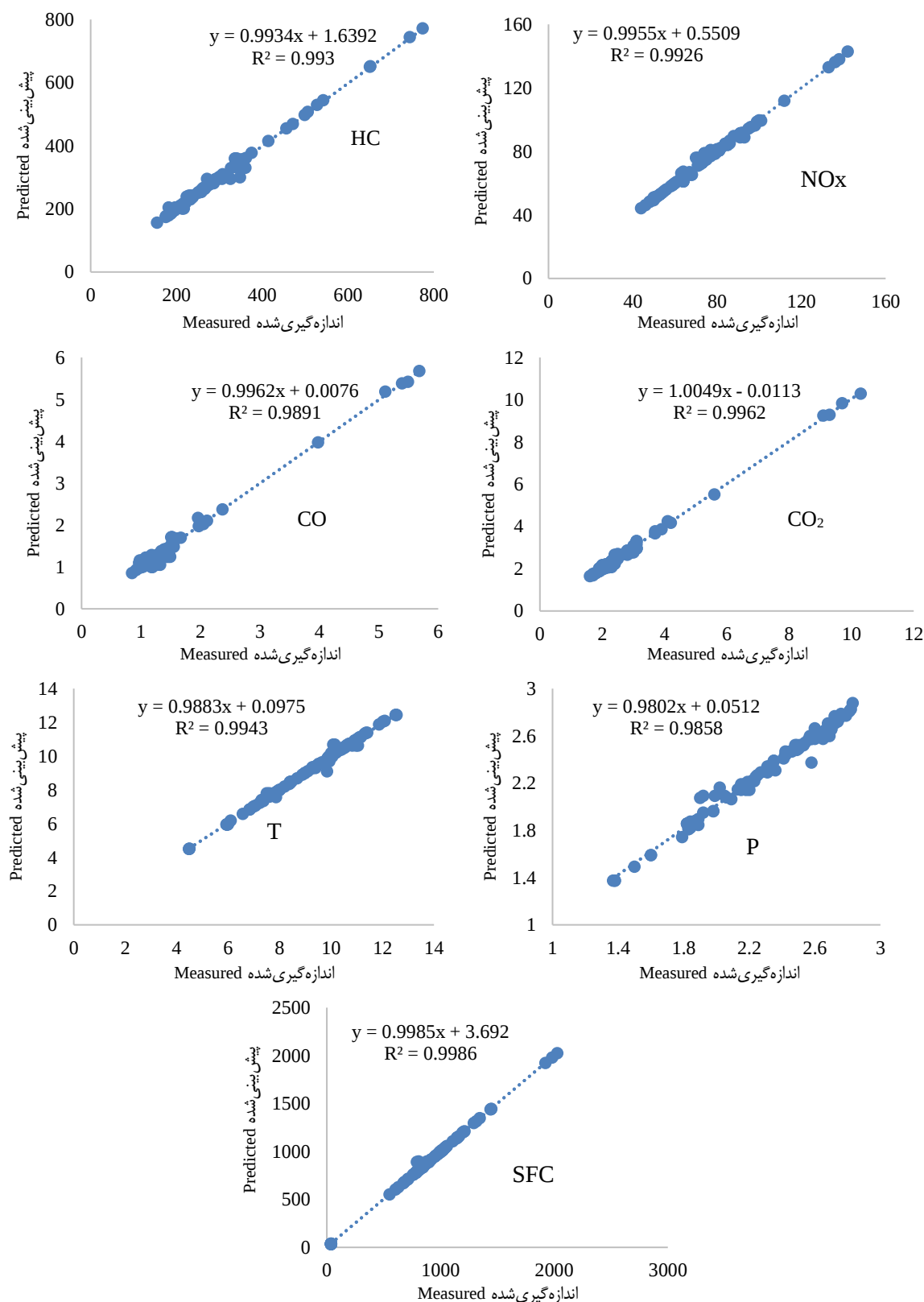


شکل ۶- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط رابطه ۲ رگرسیون غیرخطی

Fig. 6. Correlation between measured and predicted data using relation 2 Non-linear regression



شکل ۷- سطوح سه‌بعدی بهترین مدل‌های انفیس به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی
Fig. 7. 3D surfaces of best ANFIS models for predicting the studied parameters



شکل ۸- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده (محور افقی) و پیش‌بینی شده (محور عمودی) توسط مدل‌های انفیس
Fig. 8. Correlation between measured (horizontal axis) and predicted (vertical axis) data using ANFIS models

رگرسیون خطی و غیرخطی است.

همان گونه که ملاحظه می‌گردد، انفیس با دقت بسیار بالاتری در مقایسه با رگرسیون خطی و غیرخطی توانسته است که پارامترهای تحت بررسی را پیش‌بینی نماید. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰) است. در مجموع و در میان تمامی پارامترهای بررسی‌شده در پژوهش حاضر و تمامی مدل‌های رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس، بیشترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور ($T=0.7525$) و کمترین ضریب متوسط تبیین مربوط به توان موتور ($P=0.6112$) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج بخش آزمایشگاهی نشان داد که در همه سوخت‌های ترکیبی مقادیر توان، مصرف سوخت ویژه و تمامی آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت. بر اساس نتایج، سوخت ترکیبی بیودیزل پالم ۲۰ درصد می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی بدون هیچ گونه تغییر موتور استفاده شود. نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد که معادلات رگرسیون غیرخطی نسبت به نوع خطی با دقت بیشتری به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی پرداختند. همچنین مشخص شد که بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده متغیرهای عملکرد و آلاینده‌ی موتور توسط انفیس، همبستگی بسیار بالاتری (ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۸) در قیاس با رگرسیون خطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۴۷) و رگرسیون غیرخطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۹۲) وجود دارد. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰) و به ترتیب مربوط به T و P) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰) به ترتیب مربوط به SFC و CO) است. در مجموع، بیشترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور ($T=0.7525$) و کمترین ضریب متوسط تبیین مربوط به توان موتور ($P=0.6112$) می‌باشد. به علاوه، با استفاده از سطوح ترسیمه‌های سه‌بعدی انفیس می‌توان خروجی مدل مورد نظر برای ورودی خاصی که داده‌برداری نشده است را محاسبه کرد. در نتیجه می‌توان از انفیس به‌منظور پیش‌بینی بسیار دقیق پارامترهای عملکرد و آلاینده‌ی موتور استفاده نمود. با استفاده از این روش پیش‌بینی مطمئن، کار آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که در مدت زمان و هزینه امور آزمایشگاهی،

در روابط فوق، a, b_1, b_2, c_1, c_2 و d ضرایب ثابت بهینه‌ای هستند که در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. همچنین متغیر X_1 مربوط به نوع سوخت تحت بررسی که توسط جرم مولی یا جرم اتمی (بر حسب گرم بر مول) آن‌ها (مطابق با جدول ۱) به صورت کمی (عددی) تعریف شده و متغیر X_2 دور موتور ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه است.

با جای‌گذاری ضرایب بهینه و مقادیر مرتبط با نوع سوخت و دور موتور، مقادیر پیش‌بینی‌شده برای هر داده ورودی به‌دست آمد. به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نمودارهای مربوط به پیش‌بینی مقادیر ارائه‌شده توسط مدل‌های رگرسیونی غیرخطی ۱ و ۲ در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است.

ضرایب تبیین (R^2) میان داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط معادلات رگرسیون غیرخطی بیشتر از همین ضرایب در معادلات رگرسیون خطی است. در نتیجه معادلات رگرسیون غیرخطی ارائه‌شده با دقت بیشتری به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی پرداختند. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات رگرسیون خطی مربوط به پارامترهای T و P به ترتیب به میزان ۰/۴۷ و ۰/۰۰ است در حالی که بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات رگرسیون غیرخطی مربوط به پارامترهای SFC و CO به ترتیب به میزان ۰/۹۲ و ۰/۶۰ است.

نتایج مدل‌سازی توسط انفیس

نتایج مربوط به بهترین مدل‌های انفیس در خصوص پارامترهای تحت بررسی در شکل ۷ آمده است. این بخش شامل ترسیمه‌های سه‌بعدی انفیس است. با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل مورد نظر را برای ورودی خاصی که داده‌برداری نشده است را محاسبه کرد (Askari & Abbaspour-Gilandeh, 2019; Shafaei, Loghavi, & Kamgar, 2019). در محور مربوط به نوع سوخت در این ترسیمه‌ها مطابق با جدول ۱، به ترتیب برای تعریف سوخت دیزل خالص، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد سویا، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد پالم، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد کلزا و ترکیب ۳ بیودیزل مذکور در نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد از اعداد ۱ الی ۹ استفاده شده است.

در ادامه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط بهترین (دقیق‌ترین) مدل‌های انفیس برای تمامی پارامترهای تحت بررسی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمون‌ها ترسیم گردید. محور افقی در شکل ۸ مقادیر واقعی (اندازه‌گیری‌شده در آزمون) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط بهترین مدل‌های انفیس در خصوص پارامترهای تحت بررسی است. نتایج نشان داد که ضریب تبیین (R^2) به‌عنوان معیار دقت پیش‌بینی مدل‌های انفیس بسیار بیشتر از مدل‌های

سیاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که فرصت تصویب و انجام این طرح پژوهشی با کد طرح ۱۱-۱۴۰۰-۰۲ را فراهم نمودند، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

سیدرضا موسوی سیدی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، نظارت و مدیریت، روش‌شناسی
محمد عسکری: خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، شبیه‌سازی کامپیوتری، ویرایش متن
سیدمحمدرضا میری: استخراج و تهیه متن اولیه، مفهوم‌سازی، مشاوره فنی

References

1. Al-Dawudy, M. F. T. (2017). Theoretical study for the influence of biodiesel addition on the combustion, performance and emissions parameters of single cylinder diesel engine. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 25(5), 1830-1839. <https://search.emarefa.net/detail/BIM-918202>
2. Al-Dawody, M. F., Jazie, A., & Abdulkadhim Abbas, H. (2019). Experimental and simulation study for the effect of waste cooking oil methyl ester blended with diesel fuel on the performance and emissions of diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 58, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.009>
3. Askari, M., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2019). Assessment of adaptive neuro-fuzzy inference system and response surface methodology approaches in draft force prediction of subsoiling tines. *Soil and Tillage Research*, 194, 104338. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104338>
4. Askari, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., El Shal, A. M., Hegazy, R., & Okasha, M. (2021). Applying the response surface methodology (RSM) approach to predict the tractive performance of an agricultural tractor during semi-deep tillage. *Agriculture*, 11, 1043. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111043>
5. Chuah, L. F., Aziz, A. R. A., Yusup, S., Bokhari, A., Klemeš, J. J., & Abdullah, M. Z. (2015). Performance and emission of diesel engine fueled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 2229-2241. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0957-2>
6. Cihan, O. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of fig seed oil methyl ester biodiesel blends on combustion characteristics and performance in a diesel engine. *Energy Reports*, 7, 5846-5856. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.180>
7. Elkelaw, M., Alm-Eldin Bastawissi, H., El Shenawy, E. A., Taha, M., Panchal, H., & Kumar Sadasivuni, K. (2021). Study of performance, combustion, and emissions parameters of DI-diesel engine fueled with algae biodiesel/diesel/n-pentane blends. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100058>
8. Ghanbari, M., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Noor, M. M., & Moosavian, A. (2015). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict CI engine parameters fueled with nano-particles additive to diesel fuel. *3rd International Conference of Mechanical Engineering Research*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 100: 012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/100/1/012070>
9. Hosoz, M., Ertunc, H. M., Karabektas, M., & Ergen, G. (2013). ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends. *Applied Thermal Engineering*, 60(1-2), 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.040>
10. Khiraiya, K., Ramana, P. V., Panchal, H., Kumar Sadasivuni, K., Doranehgard, M. H., & Khalid, M. (2021). Diesel-fired boiler performance and emissions measurements using a combination of diesel and palm biodiesel. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101324. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101324>
11. Lee, S., Yi, E., Cho, Y., & Ahn, K. (2022). The path to a sustainable palm oil futures market. *Energy Reports*, 8, 6543-6550. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.048>
12. Menacer, B., & Bouchetara, M. (2014). Parametric study of the performance of a turbocharged compression ignition engine. *Simulation*, 90(12), 1375-1384. <https://doi.org/10.1177/0037549714557046>
13. Mousavi Seyedi, S. R., Askari, M., & Miri, S. M. R. (2023). Laboratory Investigation of the performance and emissions of biodiesel-diesel fuel blends from rapeseed, soybean and palm oil biodiesels. *Modares Mechanical Engineering*, 23(06), 347-356. <https://doi.org/10.22034/mme.23.6.347>
14. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019a). A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*, 5, 1560-1579. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.028>
15. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019b). Performance evaluation of a diesel engine using blends of optimized yields of sand apple (*Parinari polyandra*) oil biodiesel. *Renewable Energy*, 134, 1320-1331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>

16. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2020). Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel-diesel blends. *Energy Reports*, 6, 2999-3007. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.070>
17. Sayyed, S., Kumar Das, R., & Kulkarni, K. (2021). Performance assessment of multiple biodiesel blended diesel engine and NOx modeling using ANN. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101509. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101509>
18. Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2019). Prognostication of energy indices of tractor-implement utilizing soft computing techniques. *Information Processing in Agriculture*, 6, 132-149. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.08.001>
19. Singh, A., Sinha, Sh., Kumar Choudhary, A., Sharma, D., Panchal, H., & Kumar Sadasivuni, K. (2021). An experimental investigation of emission performance of heterogenous catalyst jatropha biodiesel using RSM. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100876>

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 247-261

Comparison of Energy Consumption Optimization in Sugar Factory Using Meta-Heuristic Algorithms

M. Boroun¹, M. Ghahderijani^{1*}, A. A. Naseri², B. Beheshti¹

1- Department of Agricultural Systems Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: Ghahderijani@srbiau.ac.ir)

Received: 17 August 2024
Revised: 29 September 2024
Accepted: 09 November 2024
Available Online: 28 April 2025

How to cite this article:

Boroun, M., Ghahderijani, M., Naseri, A. A., & Beheshti, B. (2025). Comparison of Energy Consumption Optimization in Sugar Factory Using Meta-Heuristic Algorithms. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 247-261. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.89450.1278>

Introduction

Energy analysis offers significant benefits by establishing a foundation for resource conservation, quantifying the energy consumed at each stage of production, identifying processes that require minimal energy input, and supporting sustainable management practices. In sustainable agricultural systems, maximizing the productivity of input energies is a key objective. This study aims to assess energy consumption patterns within the sugar industry and to compare the optimization of energy consumption indicators using two meta-heuristic algorithms, ultimately seeking to enhance resource efficiency and promote sustainable production methods.

Materials and Methods

This study evaluated energy efficiency and environmental impacts in sugarcane-based sugar production at Dehkhoda Sugarcane Agro-Industry Company (in Khuzestan Province, Iran), during the 2019-2020 agricultural cycle. Data collection integrated field questionnaires, expert interviews, operational records from the facility, and national agricultural databases (Ministry of Agriculture Jihad statistics and energy balance sheet). Energy flow were analyzed using MATLAB statistical software and the Equinonet database, with comparative optimization through genetic algorithms and imperialist competitive algorithms to identify efficiency improvements.

Results and Discussion

The results showed that, for the majority of indicators evaluated, the imperialist competitive algorithm outperformed the genetic algorithm in optimizing energy consumption. In addition to reducing the environmental impacts of this profitable industry in the country, it has a high potential for energy savings. The total energy input reduction with the genetic algorithm was 17.05%, while the imperialist competitive algorithm achieved a higher reduction of 26.40%. Natural gas consumption decreased by 3.82% using the genetic algorithm, and by 27.60% with the imperialist competitive algorithm. Direct energy savings were 16.97% for the genetic algorithm and 27.48% for the imperialist competitive algorithm. Soil acidification reduction was 23.03% with the imperialist competitive algorithm and 19.19% with the genetic algorithm, compared to conditions before optimization.

Conclusion



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.89450.1278>

In general, it can be concluded that, given the growing demand for sugar production and related industries, as well as the high efficiency of the sugar production sector, it is advisable to utilize expert knowledge and apply meta-heuristics methods to optimize energy consumption and available inputs with the aim of reducing harmful environmental impacts.

Keywords: Imperialist competitive, Genetic algorithm, Meta-heuristics, Sugarcane

مقایسه بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در کارخانه تولید شکر با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

میثم برون^۱، محمد قه‌دریجانی^{۱*}، عبدعلی ناصری^۲، بابک بهشتی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

چکیده

از مزایای تحلیل انرژی، فراهم آوردن مبنا و اساسی برای محافظت از منابع، تعیین انرژی مصرف‌شده در هر فرآیند تولید و مدیریت پایدار منابع می‌باشد. افزایش بهره‌وری نهاده‌های تولید (انرژی‌های ورودی)، هدف نهایی سامانه‌های کشاورزی پایدار می‌باشد. هدف از انجام این مطالعه، بررسی وضعیت مصرف انرژی در صنعت تولید شکر و مقایسه میزان بهینه‌سازی شاخص‌های مصرف انرژی با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری می‌باشد. بر همین اساس به ارزیابی شاخص‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی آن در صنعت تولید شکر در شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا پرداخته شد. بدین منظور جمع‌آوری اطلاعات در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به روش‌های مختلفی از جمله تکمیل پرسشنامه، گفتگو و مصاحبه با کارشناسان، استفاده از آمار موجود در کتابخانه‌ها و برخی پایگاه داده انجام شد و در مراحل مختلف از آمار و اطلاعات موجود در شرکت مورد مطالعه و همچنین آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی و ترازنامه انرژی استفاده گردید. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری متلب و پایگاه داده اکواینونت ارزیابی و به دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری، مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد در اغلب شاخص‌های مورد مطالعه در روش الگوریتم رقابت استعماری، بهینه‌سازی مصرف انرژی نسبت به روش الگوریتم ژنتیک ارجحیت داشته است و علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، توان بالایی جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی را دارا خواهد بود. به‌طوری‌که در بخش کل انرژی نهاده‌ها در الگوریتم ژنتیک، ۱۷/۰۵ درصد و در الگوریتم رقابت استعماری، مقدار بهینه‌سازی ۲۶/۴۰ درصد محاسبه گردید. میزان کاهش مصرف گاز طبیعی در روش الگوریتم ژنتیک ۳/۸۲ درصد و در روش الگوریتم رقابت استعماری ۲۷/۶۰ درصد گزارش شد. میزان صرفه‌جویی در انرژی مستقیم در روش الگوریتم ژنتیک، ۱۶/۹۷ درصد و در روش الگوریتم رقابت استعماری، ۲۷/۴۸ درصد ارزیابی گردید. در روش الگوریتم رقابت استعماری میزان کاهش در اسیدی شدن خاک، ۲۳/۰۳ درصد و در روش الگوریتم ژنتیک، ۱۹/۱۹ درصد نسبت به شرایط قبل از بهینه‌سازی بود. در حالت کلی می‌توان این گونه نتیجه‌گیری نمود که با توجه به نیاز روزافزون به تولید شکر و سایر صنایع تکمیلی و وابسته به این صنعت ارزشمند و نیز بازدهی بالای صنعت تولید شکر، بهتر است با استفاده از دانش متخصصین امر، از روش‌های فراابتکاری جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و نهاده‌های موجود با هدف کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، رقابت استعماری، فراابتکاری، نیشکر

مقدمه

عمران و توسعه مناطق روستایی دارد. این موضوع سبب توزیع بهتر درآمد و رفاه و در نتیجه برقراری عدالت اجتماعی خواهد شد (Najafi, Fehrest, Sani, Nazari, & Neshat, 2018).

تحلیل انرژی با هدف مدیریت کارایی منابع کمیاب به‌منظور بهبود تولید کشاورزی ضروری بوده و از این طریق فعالیت‌های تولیدی کارآمد و اقتصادی مشخص می‌گردند. از عوامل مهم و تأثیرگذار در تولید پایدار محصولات غذایی و کشاورزی، مقدار انرژی ورودی به‌ازای تولید یک واحد از محصول می‌باشد. انرژی نقش تأثیرگذاری در توسعه بخش‌های مهم اقتصادی از قبیل حمل و نقل،

صنایع تبدیلی کشاورزی، محل هم‌افزایی صنعت و کشاورزی است. این صنعت نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی، اشتغال‌زایی،

۱- گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*- نویسنده مسئول:

(Email: Ghahderijani@srbiau.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.89450.1278>

ساخته است (Mousavi-Avval, Rafiee, & Mohammadi, 2011). بر این اساس استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی، یکی از فاکتورهای مهم به‌منظور استفاده درست از مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. بهینه‌سازی در یک سامانه، فرآیندی است که در طی آن، با تغییر مقادیر ورودی یا خروجی می‌توان به بیشترین میزان سود یا کمترین میزان زیان دست یافت (Elhami, Akram, & Khanali, 2016). ازجمله روش‌های بهینه‌سازی می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک^۱ (الهام‌گرفته از تکامل بیولوژیکی انسان و سایر موجودات)، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها^۲ (بر مبنای حرکت بهینه مورچه‌ها)، الگوریتم رقابت استعماری^۳ و روش بازپخت شبیه‌سازی‌شده^۴ (با الهام‌گیری از فرآیند تبرید فلزات) اشاره نمود. الگوریتم‌های بهینه‌سازی معرفی‌شده، به‌طور عمده الهام‌گرفته از فرآیندهای طبیعی می‌باشند و در ارائه این الگوریتم‌ها به سایر نمودهای تکامل انسانی توجهی نشده است (Kochenderfer & Wheeler, 2019). الگوریتم رقابت استعماری یک مدل ریاضیاتی قوی بوده است که به‌صورت گسترده در جهت نیل به اهداف عالی سازمان و اندازه‌گیری کارایی یک سامانه تولیدی به‌کار برده می‌شود (Jacobs, Smith, & Street, 2006).

در تحقیقی به بهینه‌سازی مصرف انرژی و انتشارات زیست‌محیطی در تولید هندوانه در استان کرمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه پرداخته شد. نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی با تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چندهدفه به‌وضوح نشان داد که میزان مصرف بهینه نهاده‌ها که از بهینه‌یابی چندهدفه حاصل شده به‌طور معناداری کمتر از نتایج تحلیل پوششی داده‌ها می‌باشد (Shamshirband et al., 2015). در پژوهشی دیگر، به‌ترتیب ۳/۱۲ درصد و ۵/۱۱ درصد از کل انرژی ورودی عدس و نخود زراعی در تحلیل پوششی داده‌ها و در بهینه‌یابی چندهدفه به‌ترتیب ۱۷/۴۵ درصد و ۱۸/۵ درصد کل میزان انرژی ورودی برای این دو محصول، قابلیت ذخیره‌سازی داشتند (Elhami et al., 2016). در مطالعات دیگری نیز از الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی در محصولات زراعی و گلخانه‌ای در استان اصفهان (Khoshnoisan, Rafiei, Omid, Kihani, & Movahedi, 2012) و تولید بادام زمینی در استان گیلان (Nabavi Pelesarai, Pakrovan Cherudeh, & Ghasemi Mobatkar, 2022) استفاده شد و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شد.

با توجه به بررسی منابع و تحقیقات انجام‌شده در زمینه مصرف انرژی و مسایل زیست‌محیطی مرتبط با آن در تولید محصولات

صنعت و کشاورزی دارد. ارزیابی انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی در یک فرآیند تولیدی از نظر ارائه راهکارهای کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها، دارای اهمیت می‌باشد. به این دلیل تحقیقات بسیاری از محققان به سمت مدیریت انرژی معطوف می‌باشد (Soleimani & Ghafarzadeh, 2022).

هرچه مقدار انرژی تولیدی نسبت به انرژی مصرفی بیشتر باشد، یا به عبارت دیگر، میزان بهره‌وری انرژی بیشتر باشد، توسعه پایدار کشاورزی بیشتر بوده و هرچه این نسبت کوچک‌تر باشد، تخریب محیط‌زیست و ناپایداری اکولوژیکی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، استفاده بیش از حد انرژی باعث بروز برخی از مشکلات مربوط به سلامتی انسان و محیط‌زیست می‌شود؛ بنابراین بررسی انتشار آلاینده‌ها در فرآیندهای تولید مواد غذایی امری ضروری به نظر می‌رسد (Kouchaki-Penchah, Sharifi, Mousazadeh, Zarea-, Hosseinabadi, & Nabavi-Pelesaraei, 2016).

نیشکر مهم‌ترین محصولی است که برای تولید شکر کشت می‌شود. حدود ۶۰ درصد شکر جهان از نیشکر و ۴۰ درصد آن از چغندر قند تولید می‌شود. علاوه بر تولید شکر، مواد دیگری نیز مانند علوفه، فیبر، خوراک دام، ملاس از نیشکر تولید می‌شود (TaheriGaravand, Asakereh, & Haghani, 2010). کارخانجات قند و شکر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جوامع صنعتی ایفای نقش می‌نمایند. میزان مصرف انرژی در این واحدهای تولیدی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و می‌بایست این میزان مصرف انرژی، بهینه و هدفمند گردد (Malek, Hashemian, & Mehrgan, 2018).

شدت و میزان مصرف انرژی در کارخانه‌های قند و شکر در وضعیت بحرانی قرار دارد. این صنعت به‌دلیل زیرساخت‌های ضعیف فن‌آوری و فرسودگی آن‌ها، یکی از صنایع پرمصرف انرژی است. از آنجایی‌که تولید انرژی با استفاده از سوخت‌های فسیلی در محیط‌زیست از اهمیت زیادی برخوردار است، بنابراین مسئله‌های اقتصادی و محیط‌زیستی و تعهدات این صنعت می‌تواند حرکتی به‌سوی شرایط بهتر را به همراه داشته باشد. پس، نیاز به پیگیری یک سیاست جدید برای تولیدکنندگان و انجام شیوه‌های انرژی نو و کارآمد برای ایجاد نظام‌های تولید پایدار و بدون اخلاف در منابع طبیعی دارد (Talabi & Goshaihi, 2015).

استفاده بهینه از منابع انرژی و بهبود بهره‌وری مصرف انرژی یک مسیر ممکن برای کاهش زیان‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف نهاده‌های انرژی در تولید مواد غذایی محسوب می‌شود که صرفه‌جویی مالی، حفظ منابع فسیلی و کاهش آلودگی هوا را به ارمغان می‌آورد. منابع طبیعی محدود و اثرات سوءاستفاده نامناسب از منابع مختلف انرژی روی سلامتی انسان و محیط‌زیست، ضرورت بررسی الگوهای مصرف انرژی برای استفاده مؤثر از آن را در بخش کشاورزی ضروری

- 1- Genetic algorithms
- 2- Ant colony optimization
- 3- Imperialist Competitive Algorithm
- 4- Simulated Annealing

مقادیر آلاینده‌هایی که با استفاده از انواع مختلف ورودی‌ها به محیط‌زیست رهاسازی می‌شوند، بر اساس واحد مرجع در نظر گرفته می‌شود (Guinee & Lindeijer, 2002). واحد مرجع، یک تن شکر تولیدی در کارخانه استحصال شکر شرکت کشت و صنعت دهخدا می‌باشد. در این مطالعه، روش ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی براساس مدل IMPACT 2002+ انجام شد. با استفاده از این روش، ارتباط بین تحلیل سیاهه چرخه زندگی و دسته‌های نقطه میانی^۲ (مواد سرطان‌زا، مواد غیرسرطان‌زا، مواد معدنی تنفسی، تابش یونیزه، تخریب لایه اوزن، تأثیرات تنفسی، مسمومیت آبزیان، مسمومیت زمین، اسیدی شدن خاک، اشغال اراضی، مسمومیت آبی، اتروفاکسیون، گرمایش جهانی، مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج معادن) با چهار دسته خسارت^۳ (سلامت انسان، کیفیت زیست‌بوم، تغییرات اقلیم و منابع) بررسی شد. جهت ارزیابی اثرات چرخه زندگی محصول تحت مطالعه، داده‌های به‌دست‌آمده از مرحله سیاهه چرخه زندگی وارد نرم‌افزار سیماپرو^۴ نسخه ۹.۱.۱.۱ شد.

در این پژوهش از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده برای تعیین حجم نمونه استفاده شد. حجم نمونه با استفاده از رابطه کوکران^۵، ۳۰ نمونه برآورد گردید (Kizilaslan, 2009).

$$n = \frac{Nt^2S^2}{Nd^2 + t^2S^2} \quad (1)$$

که در آن:

N: اندازه جامعه آماری،

t: ضریب اطمینان قابل قبول که با فرض نرمال بودن توزیع صفت مورد نظر از جدول t- استیودنت به‌دست می‌آید.

S: برآورد واریانس صفت مورد مطالعه در جامعه

d: دقت احتمالی مطلوب

n: حجم نمونه است.

برای تخمین انحراف معیار جامعه، یک نمونه اولیه از ۳۰ مزرعه به‌طور تصادفی انتخاب شد. سپس نسبت انرژی به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی در این تحقیق انتخاب شد و انحراف معیار آن به‌دست آمد؛ سپس اندازه نمونه مورد نیاز برآورد گردید.

همچنین شاخص‌های انرژی در سامانه تولیدی مورد نظر، با استفاده از محتوای انرژی نهاده‌ها و ستاده در تولید نیشکر و شکر تولیدی، بررسی شد که یکی از مهم‌ترین اقدامات در فرآیند تحلیل انرژی محسوب می‌شود (جدول ۱).

کشاورزی، مشخص شد که نتایج متفاوتی در تولید محصولات کشاورزی حاصل شده است. در مسئله‌های بهینه‌سازی، شناسایی روشی که بالاترین عملکرد را برای حل مسئله مورد بررسی، داشته باشد، ضروری است. بنابراین در این تحقیق علاوه‌بر بررسی روند مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی در تولید شکر در بخش صنعت نیشکر در استان خوزستان، به مقایسه دو روش الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک جهت بهینه‌یابی آن نیز پرداخته شده و راهکارهای مؤثری جهت بهینه‌سازی در بخش صنعت به‌منظور بهبود کارایی انرژی و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بهینه در نهاده‌ها، ارائه شد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، به ارزیابی شاخص‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی آن در صنعت تولید شکر در کارخانه شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا که یکی از شرکت‌های هفت‌گانه وابسته به شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان است، پرداخته شد.

به‌منظور دستیابی به اطلاعات مورد نیاز جهت تکمیل این مطالعه، روش‌های مختلفی از جمله تکمیل پرسشنامه، استفاده از داده‌های ثبت‌شده در شرکت، گفتگو و مصاحبه با کارشناسان، استفاده از آمار موجود در کتابخانه‌ها و برخی پایگاه داده استفاده شد. جهت تکمیل آمار و اطلاعات مربوط به وضعیت صنعت تولید شکر در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ جهت تکمیل آمار و اطلاعات مربوطه در مراحل مختلف پژوهش، با کارشناسان شرکت کشت و صنعت دهخدا، مصاحبه به‌عمل آمد و نظرات آن‌ها در قالب پرسش‌نامه جمع‌آوری گردید. همچنین از آمار و اطلاعات موجود در کشت و صنعت مورد مطالعه و آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی و ترازنامه انرژی استفاده شد.

از آنجایی که ارزیابی چرخه زندگی یک محصول تمامی مراحل حیات آن محصول را از استخراج مواد اولیه تا دفع نهایی ضایعات به‌جامانده در برمی‌گیرد، بنابراین جهت دسترسی به برخی اطلاعات لازم همانند فرآیند تولید و استخراج مواد اولیه و میزان آلاینده‌ی منتشرشده از این فرآیندها از برخی از پایگاه‌های داده‌های معتبر استفاده شد که مهم‌ترین آن پایگاه داده اکواینونت^۱ بود که در بیشتر پژوهش‌های ارزیابی چرخه حیات مورد استفاده قرار می‌گیرد. راهنمایی‌های لازم برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی براساس روش ارزیابی چرخه زندگی توسط ISO14040 ارائه شده است (ISO, 2006). در این روش همه منابع و نهاده‌های ورودی و همچنین

2- Midpoint categories

3- Damage categories

4- SimaPro

5- Cochran

1- Ecoinvent

جدول ۱- محتوای انرژی نهاده‌ها و ستانده در تولید نیشکر و شکر استحصالی

Table 1- Energy content of inputs and outputs in the production of sugarcane and sugar

عنوان Title	واحد Unit	محتوای انرژی Energy content (MJ unit ⁻¹)	مرجع Reference
نهاده‌ها Inputs			
نیروی انسانی Manpower	H	1.96	(Nabavi-Pelesaraei, Rafiee, Saeid Mohtasebi, Hosseinzadeh-Bandbafha, & Chau, 2019)
ماشین‌ها Machines	kg	142.7	(Kitani, 1999)
ماشین‌ها و تجهیزات ثابت Machines and fixed equipment	kg	9.00	(Kitani, 1999)
سوخت دیزل Diesel fuel	L	56.31	(Kaab, Sharifi, Mobli, Nabavi-Pelesaraei, & Chau, 2019b)
الکتریسیته Electricity	kWh	12.00	(Nabavi-Pelesaraei, Abdi, Rafiee, & Taromi, 2014)
آب Water	L	1.02	(Kitani, 1999)
گاز طبیعی Natural gas	m ³	49.50	(Mohseni, Borghei, & Khanali, 2018)
آهک Lime	kg	499.26	(Kaab et al., 2019b)
نیشکر Sugar cane	kg	1.20	(Kaab et al., 2019b)
ستانده Outputs			
شکر Sugar	kg	15.40	(Kaab et al., 2019b)

SE: شدت انرژی

Input: انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)

Y: عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)

NEG=Output-Input (۵)

NEG: انرژی خالص افزوده

Output: انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)

Input: انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)

نسبت انرژی بیانگر نسبت بین کالری گرمایی محصولات خروجی و کل انرژی صرف شده در نهاده‌های تولید است؛ فاقد واحد می‌باشد و مقدار انرژی به‌دست‌آمده به‌ازای هر واحد مصرف انرژی برای تولید را نشان می‌دهد.

شدت انرژی بسته به نوع محصول کشاورزی، موقعیت و زمان، متفاوت است و می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی کارایی مصرف انرژی در سامانه‌های مختلف تولید محصول موردنظر باشد. شدت انرژی نشان‌دهنده مصرف انرژی برای تولید یک واحد از محصول است. واحد شدت انرژی مگاژول بر کیلوگرم است.

بهره‌وری انرژی عکس شدت انرژی است و بیان‌کننده مقدار تولید

در ادامه، بعضی از شاخص‌ها که امکان شناخت جامع از وضعیت انرژی در کشاورزی را ارائه می‌دهند، شامل نسبت انرژی^۱، بهره‌وری انرژی^۲، انرژی ویژه^۳ (شدت انرژی) و افزوده خالص انرژی^۴ طبق روابط (۲) تا (۵) محاسبه شد (Kaab et al., 2019b).

$$ER = \frac{Output}{Input} \quad (۲)$$

ER: نسبت انرژی

Output: انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)

Input: انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)

$$EP = \frac{Y}{Input} \quad (۳)$$

EP: بهره‌وری انرژی

Y: عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)

Input: انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)

$$SE = \frac{Input}{Y} \quad (۴)$$

1- Energy Ratio (ER)

2- Energy Productivity (EP)

3- Specific Energy (SE)

4- Net Energy Gain (NEG)

ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌عنوان روش‌های هوشمند بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب (Matlab 2019b) انجام شد.

نتایج و بحث

براساس نتایج حاصله، متوسط مصرف انرژی برای تولید یک تن شکر در کارخانه، قبل از بهینه‌سازی ۷۴۴۱۵/۱۶ مگاژول بر تن ارزیابی شد که در روش الگوریتم ژنتیک به میزان ۶۱۷۲۸/۰۳ مگاژول بر تن (۱۷/۰۵ درصد) و در روش الگوریتم رقابت استعماری به میزان ۵۴۷۶۷/۸۳ مگاژول بر تن (۲۶/۴۰ درصد) کاهش یافت. قبل و پس از بهینه‌سازی، گاز طبیعی بیشترین سهم از کل نهاده‌ها را به خود اختصاص داد در صورتی که سهم نیروی انسانی از سایر نهاده‌ها کمتر بود (جدول ۲).

محصول به‌ازای هر واحد انرژی مصرف‌شده است (Yang et al., 2022).

افزوده خالص انرژی یا انرژی خالص، تفاضل بین انرژی ناخالص تولیدشده و کل انرژی موردنیاز برای تولید است. واحد افزوده خالص انرژی مگاژول بر هکتار است.

انرژی نهاده‌های تولیدشده در کشاورزی در اولین تقسیم‌بندی خود به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. انرژی غیرمستقیم شامل نیشکر، آب، ماشین‌ها و آهک و انرژی مستقیم شامل نهاده‌های نیروی انسانی، گاز طبیعی و الکتریسیته مصرفی می‌باشد. در تقسیم‌بندی دیگر این انرژی به دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می‌شوند. نیروی انسانی، نیشکر و آب جزو انرژی تجدیدپذیر و الکتریسیته، گاز طبیعی، ماشین‌ها و آهک جزو انرژی تجدیدناپذیر می‌باشند (Kosemani & Bamgboye, 2020).

جدول ۲- انرژی مصرفی نهاده‌ها و ستانده در کارخانه تولید شکر قبل و پس از بهینه‌سازی

Table 2- Energy consumption of inputs and outputs in the sugar factory before and after optimization

عنوان Title	قبل از بهینه‌سازی Before optimization			الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm			الگوریتم رقابت استعماری Imperialist competitive algorithm		
	مقدار Amount (units ton ⁻¹)	مقدار Amount (MJ ton ⁻¹)	درصد Percentage	مقدار Amount (units ton ⁻¹)	مقدار Amount (MJ ton ⁻¹)	درصد Percentage	مقدار Amount (units ton ⁻¹)	مقدار Amount (MJ ton ⁻¹)	درصد Percentage
نهاده‌ها Inputs									
نیروی انسانی Manpower	76.23	149.42	0.20	69.62	136.46	0.22	64.03	125.51	0.23
ماشین‌ها Machines	40.07	360.60	0.48	35.65	320.89	0.51	33.52	307.71	0.55
گاز طبیعی Natural gas	1209.23	59857.05	80.44	1003.12	49654.89	80.44	875.48	43336.50	79.13
الکتریسیته Electricity	24.67	296.00	0.40	23.36	280.37	0.45	22.31	267.76	0.49
آب Water	342.37	349.21	0.47	329.28	335.87	.54	316.07	322.39	0.59
آهک Lime	330.67	525.76	0.71	308.71	490.86	0.79	273.06	434	0.79
نیشکر Sugar cane	10730.93	12877.12	17.30	8757.24	10508.69	17.02	8316.47	9979.76	18.22
کل انرژی نهاده‌ها Total input energy		74415.16			61728.03			54767.83	
ستانده Output									
شکر Sugar	1000	15400		1000	15400		1000	15400	

مدل‌های بازگشت به مقیاس ثابت و متغیر و روش اندازه‌گیری ورودی محور، میانگین کارایی فنی، کارایی فنی خالص و کارایی مقیاس به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۸ و ۰/۹۷ به‌دست آمد. نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

در پژوهشی که با هدف بهینه‌سازی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای محصول پرتقال در شهرستان دزفول، با کمک دو روش بهینه‌یابی تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چندهدفه اجرا شد. با توجه به نتایج حاصل از روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس

کاهش میزان مصرف انرژی نهاده‌های تولید شکر در بخش صنعت را نشان داده است.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد گاز طبیعی با کاهش ۱۶۵۲۰/۵۵ مگاژول بر هکتار به میزان ۲۷/۶۰ درصد بیشترین کاهش مصرف انرژی را در روش ارزیابی الگوریتم رقابت استعماری را داشت. این در حالی است که به روش الگوریتم ژنتیک بیشترین کاهش مصرف انرژی در ماشین‌ها (۱۸/۳۹ درصد) مشاهده شد. کمترین میزان کاهش انرژی مصرفی در روش الگوریتم ژنتیک مربوط به گاز طبیعی (۳/۸۲ درصد) و در روش الگوریتم رقابت استعماری مربوط به مصرف آب (۷/۶۸ درصد) بود. در حالت کلی کاهش انرژی در الگوریتم ژنتیک به میزان ۱۷/۰۴ درصد و الگوریتم رقابت استعماری ۲۶/۴۰ درصد در کارخانه تولید شکر مشاهده شد (جدول ۳).

نشان داد که حدود ۴/۳۶ درصد از انرژی پرتقال، پتانسیل ذخیره شدن دارد که کودهای شیمیایی و سوخت دیزل بیشترین مقدار انرژی ذخیره شده را از کل انرژی ذخیره شده دارا می‌باشند. همچنین تحلیل پوششی داده‌ها قادر به کاهش ۳۴/۳۸ کیلوگرم کربن دی‌اکسید بر هکتار از گازهای گلخانه‌ای در محصول پرتقال گردید. نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نشان داد اگر تمامی نهاده‌ها به صورت کاملاً بهینه مصرف شود، می‌تواند انرژی مصرفی در تولید پرتقال در منطقه مورد مطالعه را به میزان ۲۶/۱ درصد کاهش دهد که در نتیجه کاهش این عامل ورودی، انتشار گاز گلخانه‌ای می‌تواند به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کند. همچنین نتایج نشان داد که میزان انرژی ورودی برای تولید پرتقال در حالت ایده‌آل می‌تواند ۳۲۸۱۰/۶۱ مگاژول در هکتار باشد (Sabz Alipour & Bagherpour, 2022)، که با نتایج اخیر همسو بوده و نقش الگوریتم‌های فراابتکاری در صرفه‌جویی و

جدول ۳- انرژی ذخیره شده نهاده‌ها در کارخانه تولید شکر پس از بهینه‌سازی

Table 3- The stored energy of the inputs in the sugar factory after optimization

عنوان Title	الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm		الگوریتم رقابت استعماری Imperialist competitive algorithm	
	مقدار Amount (MJ ton ⁻¹)	درصد Percentage	مقدار Amount (MJ ton ⁻¹)	درصد Percentage
نیروی انسانی Manpower	12.95	8.67	23.90	16.00
ماشین‌ها Machines and tools	39.71	18.39	58.88	16.33
گاز طبیعی Natural gas	10202.16	3.82	16520.55	27.60
الکتریسیته Electricity	15.63	5.28	28.23	9.54
آب Water	13.34	17.04	26.81	7.68
آهک Lime	34.90	11.01	91.58	17.42
نیشکر Sugar cane	2368.43	6.63	2897.35	22.50
کل انرژی ذخیره شده نهاده‌ها The total stored energy of the inputs	12687.13	17.04	19647.34	26.40

مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی در تولید محصولات کشاورزی پیشنهاد شده است تا به کشاورزان آموزش‌های لازم جهت استفاده صحیح از ماشین‌های کشاورزی در زمینه‌های مختلف آن داده شود تا با استفاده صحیح و اصولی از ماشین‌های کشاورزی در مصرف سوخت فسیلی صرفه‌جویی‌های لازم صورت گیرد (Ismail Portroujani, 2013). در این تحقیق اگرچه در تولید شکر از گاز طبیعی، بیش از سایر سوخت‌ها استفاده می‌شود؛ اما نتایج حال از بهینه‌سازی گویای این است که امکان کاهش مصرف و بهینه‌سازی آن وجود دارد.

انرژی کودهای شیمیایی در محصولات زراعی (Ghadrijani, 2016)، مصرف سوخت در گلخانه‌ها (Taki, Ajab Shirchi, Abdi, Akbarpur, 2012) و الکتریسیته در محصولات باغی (Mahmoudi, Almasi, & Burqai, 2013) بیشترین مقدار انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. در تحقیق حاضر انرژی گاز طبیعی در صنایع تبدیلی نیشکر بیشترین مقدار انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده است. اصلاح خطوط انتقال برق و تولید انرژی الکتریکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند تا حد زیادی راندمان تولید و انتقال انرژی الکتریکی را افزایش دهد. با توجه به بالا بودن

مگاژول محاسبه شد، در حالی که پس از بهینه‌سازی این مقدار تغییری نکرد. همچنین افزوده خالص انرژی از ۵۹۰۱۵/۱۶- مگاژول بر هکتار به ۴۶۳۲۸/۰۳- مگاژول بر هکتار با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ۳۹۳۶۷/۸۲- مگاژول بر هکتار با استفاده از رقابت استعماری افزایش داشت (جدول ۴).

براساس نتایج شاخص‌های انرژی در کارخانه تولید شکر قبل و بعد از بهینه‌سازی، نسبت انرژی تولید شکر قبل از بهینه‌سازی ۰/۲۱ برآورد شده است که بعد از بهینه‌سازی مصرف انرژی در الگوریتم ژنتیک ۰/۲۴ و در الگوریتم رقابت استعماری ۰/۲۸ به‌دست آمد. همچنین بهره‌وری انرژی قبل از بهینه‌سازی ۰/۰۱ کیلوگرم بر

جدول ۴- شاخص‌های انرژی در کارخانه تولید شکر قبل و بعد از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Table 4- Energy indicators in sugar factory before and after optimization using genetic algorithm

شاخص انرژی Energy index	واحد Unit	قبل از بهینه‌سازی Before optimization	بعد از بهینه‌سازی After optimization	
			الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm	الگوریتم رقابت استعماری Imperialist competitive algorithm
نسبت انرژی Energy ratio	-	0.21	0.24	0.28
بهره‌وری انرژی Energy efficiency	کیلوگرم بر مگاژول kg MJ ⁻¹	0.01	0.01	0.01
انرژی ویژه Specific energy	مگاژول بر کیلوگرم MJ kg ⁻¹	74.42	61.72	54.72
افزوده خالص انرژی Net energy gain	مگاژول بر تن MJ ton ⁻¹	-59015.16	-46328.03	-39367.82

ژنتیک ۵۰۷۴۷/۰۱ مگاژول بر تن و با روش رقابت استعماری با مقدار عددی ۴۴۳۴۰/۱۵ مگاژول بر تن بیشترین مصرف انرژی را داشتند که در تمامی اشکال انرژی، میزان مصرف بر اثر بهینه‌سازی کاهش نشان داد (جدول ۵).

اشکال مختلف انرژی در کارخانه تولید شکر قبل و بعد از بهینه‌سازی با دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری ارزیابی گردید. انرژی مستقیم با روش الگوریتم ژنتیک دارای مقدار عددی ۵۰۷۱/۷۲ مگاژول بر تن و با روش الگوریتم رقابت استعماری با ۴۳۷۲۹/۷۸ مگاژول بر تن و نیز انرژی تجدیدناپذیر با روش الگوریتم

جدول ۵- اشکال مختلف انرژی در کارخانه تولید شکر قبل و بعد از بهینه‌سازی

Table 5- Different forms of energy in the sugar factory before and after optimization

اشکال انرژی Forms of energy	واحد Unit	قبل از بهینه‌سازی Before optimization	بعد از بهینه‌سازی After optimization	
			الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm	الگوریتم رقابت استعماری Imperialist competitive algorithm
انرژی مستقیم Direct energy	مگاژول بر تن MJ ton ⁻¹	60302.47	50071.72	43729.78
انرژی غیرمستقیم Indirect energy	مگاژول بر تن MJ ton ⁻¹	14112.69	11656.31	11038.05
انرژی تجدیدپذیر Renewable energy	مگاژول بر تن MJ ton ⁻¹	13375.75	1098.02	10427.67
انرژی تجدیدناپذیر Non-renewable energy	مگاژول بر تن MJ ton ⁻¹	61039.41	50747.01	44340.15

نهادها بوده و شاخص‌های انرژی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد (Namdari, Rafiei, & Hosseinpour, 2015). که با یافته‌های اخیر همسو بوده است.

یکی از مهم‌ترین رده‌های اثر زیست‌محیطی مورد بررسی در مطالعات ارزیابی چرخه زندگی، شاخص گرمایش جهانی است که

در تحقیقی که با هدف بهینه‌سازی تولید چغندر قند با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و ارزیابی چرخه عمر تولید شکر انجام شد، میزان اشکال مختلف انرژی پس از بهینه‌سازی کاهش محسوس را نشان داد، به‌طوری که روش تحلیل پوششی داده‌ها قادر به شناسایی واحدهای ناکارا و ارایه الگوی مناسب از نظر مقیاس یا میزان مصرف

نتایج این مطالعه نشان داد که در ازای تولید هر تن شکر قبل از بهینه‌سازی ۱۹۳۳/۴۲ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل به اتمسفر وارد شده است که پس از بهینه‌سازی این مقدار در الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری به ترتیب ۱۶۰۷/۶۷ و ۱۵۳۱/۱۱ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل کاهش یافت (جدول ۶).

جدول ۶ - شاخص‌های ارزیابی چرخه زندگی در کارخانه تولید شکر (به‌ازای تولید یک تن شکر) قبل و بعد از بهینه‌سازی
Table 6- Life cycle assessment indicators in the sugar factory (per one ton of sugar production) before and after optimization

رده‌های اثر Effect Category	واحد Unit	قبل از بهینه‌سازی Before optimization	بعد از بهینه‌سازی After optimization	
			الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm	الگوریتم رقابت استعماری Imperialist competitive algorithm
مواد سرطان‌زا Carcinogenic substances	kg C ₂ H ₃ Cl eq.	1785.74	1452.39	1383.23
مواد غیرسرطان‌زا Non-carcinogenic substances	kg C ₂ H ₃ Cl eq.	11666.68	9490.33	9038.41
مواد معدنی تنفسی Respiratory minerals	kg PM _{2.5} eq.	2.85	2.30	2.19
تابش یونیزه Ionizing radiation	Bq C-14 eq.	1472.19	1198.52	1141.45
تخریب لایه اوزون Depletion of the ozone layer	kg CFC-11 eq.	0.0003	0.0002	0.0002
تأثیرات تنفسی Respiratory effects	kg C ₂ H ₄ eq.	1.67	1.34	1.27
مسمومیت آبریان Aquatic poisoning	kg TEG water	591034.41	479603.11	456764.87
مسمومیت زمین Earth poisoning	kg TEG soil	351216.27	285493.93	271898.98
اسیدی شدن خاک Soil acidification	kg SO ₂ eq.	64.21	51.89	49.42
اشغال اراضی Land occupation	m ² org/arable	1449.86	1179.80	1123.62
مسمومیت آبی Water poisoning	kg SO ₂ eq.	11.76	9.42	8.97
اتروفیکاسیون Eutrophication	kg PO ₄ P-lim	0.24	0.19	0.18
گرمایش جهانی Global warming	kg CO ₂ eq.	1923.42	167.67	1531.11
مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر Non-renewable energy consumption	MJ primary	50889.10	39279.08	37408.64
استخراج معادن Mining	MJ surplus	69.61	59.54	56.71

کلوچه تولیدی ارتباط دارد. طبق نتایج ارزیابی چرخه زندگی، شاخص گرمایش جهانی برای تولید هر تن کلوچه ۳۷۳۲/۰۹ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل تعیین گردید. بر اساس نتایج مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها، میزان کل انرژی موردنیاز در حالت مصرف بهینه نهاده‌ها، درصد صرفه‌جویی انرژی و کاهش شاخص گرمایش جهانی به ترتیب برابر ۳۰۲۲۱/۵۸ مگاژول در تن، ۱/۰۲ درصد و ۱۹۰/۳۷ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل به‌ازای تولید یک تن کلوچه به‌دست

در پژوهشی که به بررسی میزان مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در تولید کلوچه در استان گیلان پرداخته شد. روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی به‌منظور کاهش آلاینده‌های محیط‌زیست با استفاده از دو روش تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه گردید. نتایج نشان داد که ۳۰۵۳۳/۶۶ مگاژول انرژی برای تولید هر تن کلوچه مصرف می‌شود که بیشترین سهم انرژی مصرفی به گاز طبیعی با ۱۶۹۴۵/۲۸ مگاژول به‌ازای هر تن

شد (Khanali, Mohammadnia Galshaklami, Akram, & Hosseinzadeh Bandbafha, 2018).

کاهش تأثیرات به‌ازای یک‌تن پس از بهینه‌سازی در رده‌های اثر همان‌طور که مشاهده شد، بعد از فرآیند بهینه‌سازی در تمام رده‌های اثر کاهش محسوسی نشان دادند (جدول ۷).

آمد. اجرای الگوی پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه مصرف انرژی را ۲۱/۶۲ درصد کاهش داد که بیشترین درصد صرفه‌جویی در انرژی در مصرف گردو در تولید کلوچه دیده شد. براساس نتایج بهینه‌سازی چندهدفه، میزان شاخص گرمایش جهانی به‌ازای تولید یک تن کلوچه برابر ۲۹۲۳/۷۴ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل تعیین

جدول ۷- کاهش شاخص‌های ارزیابی چرخه زندگی در کارخانه تولید شکر بعد از بهینه‌سازی

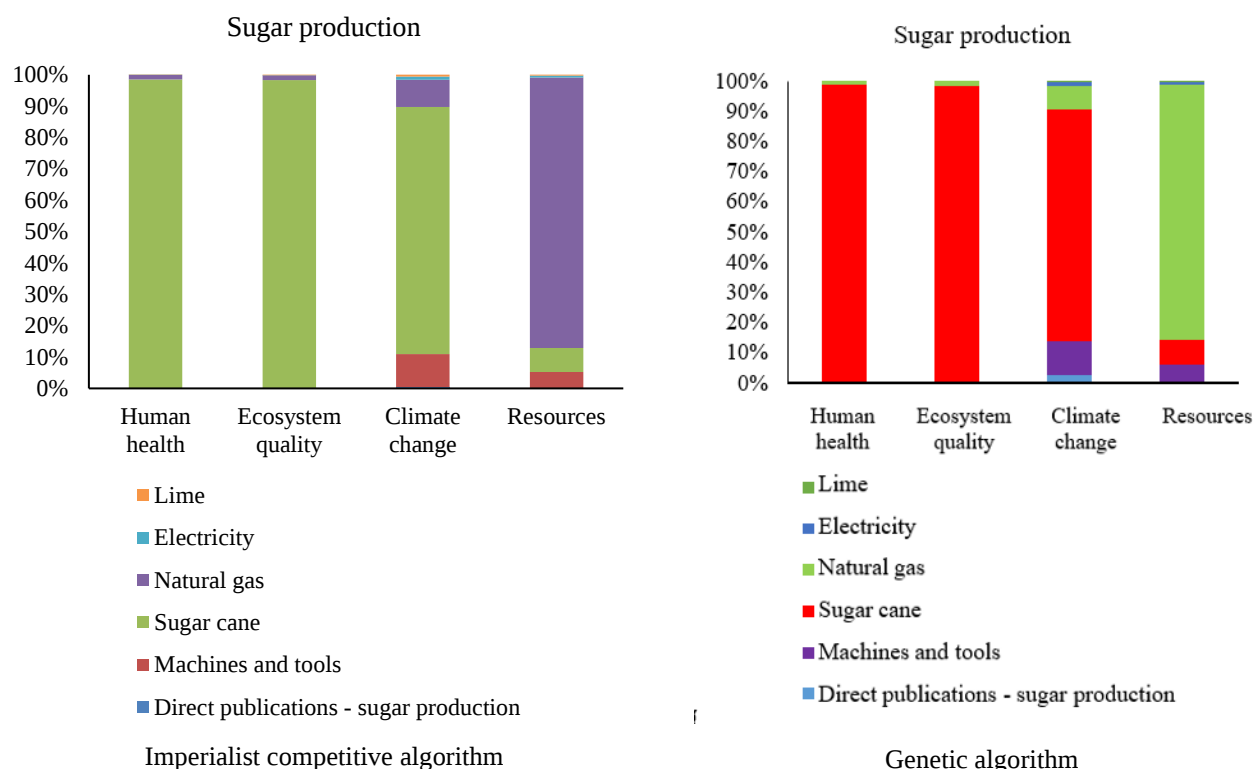
Table 7- Reduction of life cycle evaluation indicators in the sugar factory after optimization

رده‌های اثر Effect Category	واحد Unit	کاهش تأثیرات به‌ازای یک تن پس از بهینه‌سازی Reduction of impacts per ton after optimization	
		الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm	الگوریتم رقابت استعماری Imperialist competitive algorithm
مواد سرطان‌زا Carcinogenic substances	kg C ₂ H ₃ Cl eq.	333.35	402.51
مواد غیر سرطان‌زا Non-carcinogenic substances	kg C ₂ H ₃ Cl eq.	2176.35	2628.27
مواد معدنی تنفسی Respiratory minerals	kg PM ₂ /5 eq.	0.54	0.65
تابش یونیزه Ionizing radiation	Bq C-14 eq.	273.66	330.73
تخریب لایه اوزون Depletion of the ozone layer	kg CFC-11 eq.	0.0000766	0.0000871
تأثیرات تنفسی Respiratory effects	kg C ₂ H ₄ eq.	0.33	0.39
مسمومیت آبریان Aquatic poisoning	kg TEG water	111431.30	134269.54
مسمومیت زمین Earth poisoning	kg TEG soil	65722.33	79317.28
اسیدی شدن خاک Soil acidification	kg SO ₂ eq.	12.32	14.79
اشغال اراضی Land occupation	m ² org/arable	270.06	362.24
مسمومیت آبی Water poisoning	kg SO ₂ eq.	2.33	2.78
اتروفیکاسیون Eutrophication	kg PO ₄ P-lim	0.04	0.05
گرمایش جهانی Global warming	kg CO ₂ eq.	315.74	392.30
مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر Non-renewable energy consumption	MJ primary	11610.02	13480.45
استخراج معادن Mining	MJ surplus	10.06	12.90

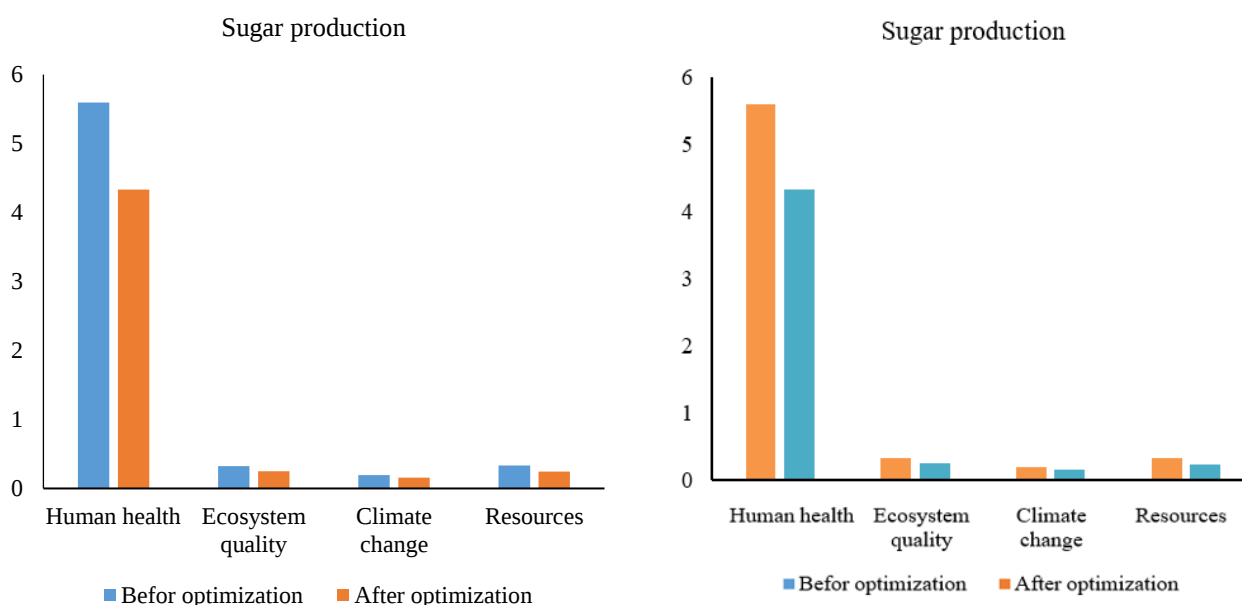
راه‌های مهم مدیریت بهتر انرژی در تولید نیشکر در مزارع معرفی شده است (Kaab, Sharifi, & Mobli, 2018).

با توجه به محاسبات انجام‌شده، میزان تأثیر پس از بهینه‌سازی در هر دو روش الگوریتم فراابتکاری کمتر از حالت عادی (قبل از بهینه‌سازی) می‌باشد (شکل ۲).

تأثیر هریک از نهاده‌ها در اثرات زیست‌محیطی به‌ترتیب قبل و پس از بهینه‌سازی در کارخانه تولید شکر نشان می‌دهد که نیشکر و گاز طبیعی بیشترین تأثیر را در سلامت انسان دارند. همچنین گاز طبیعی بیشترین تأثیر را در دسته خسارت منابع داشتند (شکل ۱). در تحقیقی که بر روی نیشکر انجام شد مصرف الکتریسیته و کودهای شیمیایی به‌طور عمده نیتروژن و آب برای آبیاری بیشترین تأثیر را در دسته خسارت منابع دارا بودند که کاهش مصرف نهاده‌های مذکور از



شکل ۱- سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی و تأثیر آن‌ها در دسته خسارات در کارخانه تولید شکر پس از بهینه‌سازی
Fig.1. The contribution of each of the consumption inputs and their effect in the category of damages in the sugar factory after optimization



شکل ۲- مقایسه تأثیر بر دسته خسارات در کارخانه تولید شکر قبل و بعد از بهینه‌سازی
Fig.2. Comparison of the impact on the category of damages in the sugar factory before and after optimization

(Vatani Nezafat, & Golroo, 2017).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری به بررسی وضعیت مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی آن در صنعت تولید شکر در شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا پرداخته شد. در بخش کل انرژی نهاده‌ها در الگوریتم رقابت استعماری مقدار بهینه‌سازی ۲۶/۴۰ درصد محاسبه گردید. میزان کاهش مصرف گاز طبیعی در این روش ۲۷/۶۰ درصد و میزان صرفه‌جویی در انرژی مستقیم ۲۷/۴۸ درصد ارزیابی گردید. براساس نتایج به‌دست‌آمده، در اغلب شاخص‌های مورد مطالعه در روش الگوریتم رقابت استعماری، بهینه‌سازی مصرف انرژی نسبت به روش الگوریتم ژنتیک ارجحیت داشته است و علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی را دارا خواهد بود. در حال حاضر، روش‌های متعددی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت‌های کشت و صنعت نیشکر وجود دارد که بهینه‌سازی بیشتر مصرف انرژی و تولید آلاینده‌های کمتر با استفاده از روش‌های فراابتکاری از جمله الگوریتم رقابت استعماری را در ارجحیت قرار می‌دهد که می‌توان با کاربرد ماشین‌هایی با بازدهی بالا و مصرف سوخت کمتر، به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نایل شد. همچنین پیشنهاد می‌شود در صنعت تولید شکر از سوخت‌های زیستی مانند بیواتانول و بیوگاز که می‌تواند از پسماندهای حاصل از نیشکر تولید شود، استفاده گردد تا بار آلاینده‌گی کاهش یابد.

مشارکت نویسندگان

میثم برون: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه
محمد قه‌دیریجانی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، ویرایش متن
عبدعلی ناصری: مشاوره فنی
بابک بهشتی: شبیه‌سازی عددی/ کامپیوتری، اعتبارسنجی، ویرایش متن

امروزه یکی از مهم‌ترین بحث‌های مطرح‌شده در توسعه پایدار کشاورزی مقدار انرژی تولیدی به‌ازای مقدار انرژی مصرفی می‌باشد. در کشاورزی به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی سعی بر حداقل کردن میزان ورودی انرژی است (Jacobs et al., 2006). در پژوهشی از دو الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات و ژنتیک برای شبیه‌سازی بار هیدرولیکی مزارع نیشکر دعبل خزاعی در چهار عمق استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بالاتر از مدل‌های الگوریتم ژنتیک است. به‌طوری‌که مقدار RMSE و MAE اعماق مختلف در الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات دارای کمترین مقدار و ضریب R^2 در بین مدل‌ها بیشترین مقدار را دارا بود (Sayadishahraki, Naseri, & Soltani Mohammadi, 2018).

نتایج تحقیقی دیگر نیز نشان داد، ضمن حفظ و بهبود شرایط هیدرولیکی مجاز در شبکه توزیع آب، هزینه انرژی مصرفی روزانه در روش‌های الگوریتم ژنتیک با آشفستگی سریع و الگوریتم ژنتیک ساده به‌ترتیب به میزان حدود ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش پیدا کرد. همین‌طور استفاده از دو سناریوی مذکور به‌ترتیب، موجب کاهش ۲۰ الی ۶۰ درصدی ساعات کار پمپ‌ها شد که تاثیر به‌سزایی در کاهش استهلاک و افزایش طول عمر ایستگاه پمپاژ دارد (Karami, Moghadam, Faridhosseini, Sanainijad, & Ziaei, 2016). همچنین در تحقیق اکرم و همکاران (Akram, Khanali, Mohammadnia Galshaklami, & Hosseinzadeh Bandabafha, 2018) الگوی مصرف انرژی بیان‌شده توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه منجر به کاهش ۳۶/۳۰ درصدی در مصرف انرژی شد که بیشترین درصد صرفه‌جویی در انرژی مربوط به نیروی کارگری بود. بر اساس نتایج بهینه‌سازی چندهدفه، میزان گرمایش جهانی به‌ازای تولید یک تن کیک برابر $10038/44 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ تعیین شد.

مقایسه عملکرد دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به‌منظور بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات روسازی در حالت تک‌هدفه توسط طیبی و همکاران صورت گرفت و نشان داده شد الگوریتم ازدحام ذرات در زمان کمتر جواب‌های بهتری ارائه می‌دهد (Tayebi, Moghadas Nejad, & Mola, 2013). در پژوهش دیگری مقایسه دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات در دو حالت تک‌هدفه و چندهدفه صورت گرفت و نشان داده شد که در حالت تک‌هدفه، الگوریتم ازدحام ذرات و در حالت چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب عملکرد بهتری دارند (Gerami Matin, 2018).

References

1. Akram, A., Khanali, M., Mohammadnia Galshaklami, M., & Hosseinzadeh Bandabafha, H. (2018). Optimizing energy consumption and reducing environmental emissions in cake production using data overlay analysis and genetic algorithm. *Environmental Science Quarterly*, 17(2), 103-124. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/envs.17.2.103>

2. Elhami, B., Akram, A., & Khanali, M. (2016). Optimization of energy consumption and environmental impacts of chickpea production using data envelopment analysis (DEA) and multi objective genetic algorithm (MOGA) approaches. *Information Processing in Agriculture*, 3(3), 190-205. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.07.002>
3. Ghadriyani, M. (2016). Determining the energy consumption of wheat and potato production at different levels of cultivation in west Isfahan. Master's thesis. University of Tehran. (in Persian with English abstract).
4. Gerami Matin, A., Vatani Nezafat, R., & Golroo, A. (2017). A comparative study on using meta-heuristic algorithms for road maintenance planning: Insights from field study in a developing country. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4, 477-486. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.06.004>
5. Guinee, J. B., & Lindeijer, E. (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards (Vol. 7). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/bf02978897>
6. Ismail Portroujani, M., Emadi, B., Khojastepour, M., & Vahidi, A. (2013). *Optimizing energy consumption in the production of agricultural products, a review study*. National Conference on Optimizing Energy Consumption in Science and Engineering, Babol. (in Persian with English abstract). <https://civilica.com/doc/300243>
7. ISO. (2006). 14040 International Standard. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.1065/lca2005.03.001>
8. Jacobs, R., Smith, P., & Street, A. (2006). *Measuring efficiency in health care: Analytic techniques and health policy*, Cambridge University Press: Cambridge. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511617492>
9. Kaab, A., Sharifi, M., & Mobli, H. (2018). Analysis and optimization of energy consumption and greenhouse gas emissions in sugarcane production using data overlay analysis. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 50(1), 19-30. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.251593.665035>
10. Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. W. (2019a). Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. *Science of The Total Environment*, 664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.004>
11. Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. W. (2019b). Use of optimization techniques for energy use efficiency and environmental life cycle assessment modification in sugarcane production. *Energy*, 181, 1298-320. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.002>
12. Kitani, O. (1999). Energy and biomass engineering, CIGR handbook of agricultural engineering. ASAE Publications, St Joseph, MI.
13. Karami, J., Moghadam, A. R., Faridhosseini, A. R., Sanainijad, H., & Ziaei, A. N. (2016). Optimization of energy consumption in pumping stations using Darwin Scheduler tool. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 2(1), 12 p. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.87910.1006>
14. Khanali, M., Mohammadnia Galshaklami, M., Akram, A., & Hosseinzadeh Bandbafha, H. (2018). Optimizing energy consumption and reducing environmental pollutants in the production of cookies using data envelopment analysis techniques and genetic algorithm. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 20(72), 162-143. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/erams.2018.115061.1215>
15. Khoshnoisan, B., Rafiei, Sh., Omid, M., Kihani, A., & Movahedi, M. (2012). Assessing of energy indices and environmental impacts of potato production (Case study: Fereydoonshahr region, Isfahan province). *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 44(1), 66-57. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2013.36164>
16. Kizilaslan, H. (2009). Input-output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. *Apply Energy*, 86, 1354-1358. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.009>
17. Kochenderfer, M. J., & Wheeler, T. A. (2019). *Algorithms for optimization*. Mit Press.
18. Kosemani, B. S., & Bamgboye, A. I. (2020). Energy input-output analysis of rice production in Nigeria. *Energy*, 207, 118258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118258>
19. Kouchaki-Penchah, H., Sharifi, M., Mousazadeh, H., Zarea-Hosseiniabadi, H., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2016). Gate to gate life cycle assessment of flat pressed particleboard production in Islamic Republic of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 112, 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.056>
20. Mahmoudi, N., Almasi, M., & Burqai, S. A. M. (2013). Estimation of energy consumption indicators in pistachio production in Khatam city, Yazd province. The first national conference on sustainable development in arid and semi-arid regions. Abarkooh. (in Persian with English abstract).
21. Malek, R., Hashemian, S. M., & Mehrgan, M. (2018). Energy and exergy analysis of the simultaneous production system in the sugar production process in Shahrood sugar factory and the feasibility of improving the technical and economic conditions. Master's thesis. Shahrood University of Technology. (in Persian with English abstract).
22. Mohseni, P., Borghei, A. M., & Khanali, M. (2018). Coupled life cycle assessment and data envelopment analysis for mitigation of environmental impacts and enhancement of energy efficiency in grape production. *Journal of Cleaner Production*, 197, 937-947. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.243>
23. Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., & Mohammadi, A. (2011). Optimization of energy consumption and input costs for apple production in Iran using data envelopment analysis. *Energy*, 36(2), 909-916.

- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.020>
24. Nabavi-Pelesaraei, A., Abdi, R., Rafiee, Sh., & Taromi, K. (2014). Applying data envelopment analysis approach to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emission of rice production. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 7(4), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.06.001>
 25. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Saeid Mohtasebi, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2019). Assessment of optimized pattern in milling factories of rice production based on energy, environmental and economic objectives. *Energy*, 169, 1259–1273. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.106>
 26. Nabavi Pelesarai, A., Pakrovan Cherudeh, M.R., & Ghasemi Mobatkar, H. (2022). Forecasting energy output and greenhouse gas emissions in peanut production: a case study of Astana Ashrafieh city, Gilan province. *Quarterly Journal of Economic Research and Agricultural Development of Iran*, 53(1), 145-162. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2021.306056.668924>
 27. Najafi, P., Fehrest Sani, M., Nazari, M. R., & Neshat, A. (2018). Investigating the economic and environmental effects of optimizing the sugar beet distribution network in Iran's sugar supply chain. *Environmental Science Quarterly*, 17(2), 31-42. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/envs.17.2.31>
 28. Namdari, M., Rafiei, Sh., & Hosseinpour, S. (2015). Decreasing Environmental Burden by improving efficiency of sugar beet production using data envelopment analysis approach. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(2), 361-353. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58785>
 29. Sabz Alipour, F., & Bagherpour, H. (2022). Optimizing energy and reducing greenhouse gas emissions in orange production using data envelopment analysis and genetic algorithm (case study: Dezful city). *Environmental Science and Technology Quarterly*, 23(8), 223-233. (in Persian with English abstract).
 30. Sayadishahraki, A., Naseri, A. A., & Soltani Mohammadi, A. (2018). Simulation of hydraulic load using particle accumulation optimization algorithm and genetic algorithm (case study: Daabl Khaza'i sugarcane agro-industry fields). *Journal of Water Resources Engineering*, 12(43), 13-24. (in Persian with English abstract). [20.1001.1.20086377.1398.12.43.2.4](https://doi.org/10.220086377.1398.12.43.2.4)
 31. Shamshirband, S., Khoshnevisan, B., Yousefi, M., Bolandnazar, E., Anuar, N. B., Wahab, A. W. A., & Khan, S. U. R. (2015). A multi-objective evolutionary algorithm for energy management of agricultural systems—a case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.038>
 32. Soleimani, A. N., & Ghafarzadeh, H. R. (2022). Measuring the effects of household economic status on energy consumption (case study: Yazd city). *Sustainability, Development and Environment*, 2(4), 75-51. (in Persian with English abstract).
 33. TaheriGaravand, A., Asakereh, A., & Haghani, K. (2010). Energy elevation and economic analysis of canola production in Iran a case study: Mazandaran province. *International Journal of Environmental Sciences*, 1, 236-243.
 34. Taki, M., Ajab Shirchi, Y., Abdi, R., & M. Akbarpur. (2012). Analyzing the energy efficiency of the greenhouse cucumber product by data envelopment analysis method: a case study (Shahreza city), Isfahan province. *Journal of Agricultural Machinery*, 2(1), 27-37. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v2i1.14291>
 35. Talabi, S. A., & Goshaishi, H. R. (2015). Analysis of the problems of sugar industry in Iran and comparison of production and imports in Iran and the world. *Second National Conference on Science and Technology*. 15th December, Tehran.
 36. Tayebi, N. R., Moghadas Nejad, F., & Mola, M. (2013). Comparison between GA and PSO in Analyzing Pavement Management Activities. *Journal of Transportation Engineering*, 140, 130613024931003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000590](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000590)
 37. Yang, Z., Zhu, Y., Zhang, J., Li, X., Ma, P., Sun, J., Sun, Y., Ma, J., & Li, N. (2022). Comparison of energy use between fully mechanized and semi-mechanized rice production in Southwest China. *Energy*, 245, 123270. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123270>

Research Article

Vol. 15, No. 2, 2025, p. 263-274

Prediction of Rut Depth in Soil Caused by Wheels Using Artificial Neural Networks

F. Nashmil¹, A. Mardani^{1*}, A. Hosainpour¹, B. Golanbari¹

1- Department of Mechanics Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran

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

Received: 16 October 2024

Revised: 04 November 2024

Accepted: 11 November 2024

Available Online: 24 February 2025

How to cite this article:

Nashmil, F., Mardani, A., Hosainpour, A., & Golanbari, B. (2025). Prediction of Rut Depth in Soil Caused by Wheels Using Artificial Neural Networks. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 263-274. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2024.90273.1295>

Introduction

The formation of ruts induced by vehicle traffic poses a significant challenge for agricultural soils due to soil compaction both at the surface and deeper layers. This phenomenon compromises vehicle performance increases energy consumption, and leads to long-term environmental degradation, such as soil erosion and fertility reduction. To enhance vehicle performance and reduce soil damage, it is crucial to accurately predict how factors such as vehicle speed, vertical load, and the number of passes impact rut depth. The findings of this study hold significant practical implications, facilitating the development for the creation of more efficient agricultural practices, while simultaneously minimizing environmental impact. The complexity of these interactions necessitates using machine learning models, especially artificial neural networks (ANNs), to predict rut depth based on input parameters. In this study, two machine learning models, namely the multilayer perceptron (MLP) and the radial basis function (RBF) networks, were employed to predict rut depth.

Materials and Methods

Experiments were conducted using a soil bin that allows for precise control of independent parameters, measuring 24 meters in length, 2 meters in width, and 0.8 meters in depth. The soil used was agricultural soil, comprising 35% sand, 22% silt, and 43% clay, with a moisture content of 8%. The tests included three independent parameters: vertical load (2, 3, and 4 kN), forward speed (1, 2, and 3 km h⁻¹), and number of wheel passes (up to 15). Two types of traction devices, including a rubber wheel and a track wheel, were tested. A caliper was used to measure the rut depth after each pass with an accuracy of 0.02 mm. The data collected from soil bin tests were used to train neural network models in MATLAB 2021-b software. The MLP model had a topology with two hidden layers and included three inputs and one output. In the RBF model, the network topology had a single hidden layer. The trial-and-error method was used to adjust the hyperparameters of the neural networks, including the number of neurons in the hidden layers, the learning rate, and momentum for the MLP network, as well as the spread rate and regularization rate for the RBF network.

Results and Discussion

Experimental data confirmed that increasing the vertical load and the number of passes resulted in deeper ruts. Conversely, an increase in speed led to a reduction in rut depth, particularly during the initial pass. Both artificial neural network (ANN) models accurately predicted rut depth, with the multilayer perceptron (MLP) neural network outperforming the radial basis function (RBF) neural network. Specifically, the root mean square error (RMSE) for the optimal MLP model, which utilized a learning rate of 0.001 and a momentum of 0.67, was 0.10. In contrast, the optimal RBF model, with an expansion rate of 0.23456, yielded an RMSE of 0.12. The findings indicate that the MLP artificial neural network model surpasses the RBF neural network model in terms of accuracy and overall performance. However, the RBF neural network exhibits a faster response time, making it particularly suitable for real-time applications.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.90273.1295>

Conclusion

This study demonstrates the efficacy of machine learning techniques, particularly artificial neural networks (ANNs), in predicting rut depth caused by off-road vehicle traffic. Both multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) neural networks exhibited robust predictive capabilities, with the MLP model providing slightly superior accuracy and the RBF model offering better computational efficiency. These findings highlight the potential of machine learning in modeling complex interactions between soil and vehicles, which can enhance vehicle performance, mitigate soil erosion, and guide the design of off-road vehicles. Future research directions could include investigating additional soil parameters, various vehicle configurations, and the real-world implementation of autonomous off-road vehicles to promote more environmentally sustainable operations.

Keywords: Multiple passes, Soil bin, Terramechanics, Vertical load, Vehicle speed

پیش‌بینی عمق شیاریجادشده توسط چرخ بر روی خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

نشمیل فرهادی^۱، عارف مردانی^{۱*}، عادل حسین پور^۱، بهزاد گلغبری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

چکیده

پرداختن به چالش‌های وسایل نقلیه خارج از جاده در زمین‌های غیرمتعارف، مدل‌های پیش‌بینی بر پایه‌ی یادگیری ماشین را برای تعاملات چرخ و خاک ضروری می‌کند. علی‌رغم علاقه فزاینده به یادگیری ماشین برای مطالعات تعامل چرخ و خاک، پژوهش‌های محدودی بر روی استفاده از رویکردهای مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تشکیل شیاری ناشی از چرخ متمرکز شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر پیش‌بینی تأثیر تایرهای بادی کشاورزی تحت بارها، سرعت‌ها و عبورهای متعدد بر تشکیل شیارهای خاک در شرایط انبارهای خاک کنترل شده است. در این تحقیق شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم پس‌انتشار، برای پیش‌بینی عمق شیاری مورد استفاده قرار گرفت و مدل به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. علاوه بر این، از روش آزمون-خطا برای بهینه‌سازی فرآیندسازی شبکه عصبی استفاده شد. پیکربندی بهینه برای شبکه پرسپترون چندلایه با تکانه ۰/۹ و نرخ یادگیری ۰/۳۵ به خطای جذر میانگین مربعات ۰/۱۰ دست یافت. شبکه عصبی تابع شعاعی پایه، با پهنای تابع گوسی برابر ۳/۹۰ و نرخ نرمال‌سازی برابر ۰/۰۲، جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۱۲ را نشان داد. درحالی‌که شبکه پرسپترون چندلایه دقت بالایی را نشان داد، شبکه تابع شعاعی پایه هزینه‌های محاسباتی کمتر و زمان پاسخ‌دهی سریع‌تری را ارائه می‌دهد که آن را برای کاربردهای بلادرنگ مناسب می‌سازد. شبکه‌های عصبی بر روی داده‌های تجربی نادیده اعتبارسنجی شدند و قابلیت‌های قوی و تعمیم آن‌ها را تأیید کردند.

واژه‌های کلیدی: انبارهای خاک، بار عمودی، ترامکانیک، سرعت وسیله نقلیه، عبور چندگانه

مقدمه

شیارهای ایجادشده بر اثر عبور وسایل نقلیه می‌تواند به‌طور مستقیم بر عملکرد وسیله نقلیه تأثیرگذار باشد. عمق شیاری تحت تأثیر تعداد دفعات عبور وسیله نقلیه از روی خاک قرار دارد، به‌گونه‌ای که با تکرار عبور از یک مسیر مشخص، میزان فشردگی خاک افزایش‌یافته و در نتیجه عمق شیاری با تکرار عبور بیش‌تر می‌شود (Calleja-Huerta, Lamandé, Green, & Munkholm, 2023; Vennik, Keller, Kuk, Krebstein, & Reintam, 2017). وزن وسایل نقلیه از دیگر عوامل تأثیرگذار بر عمق شیاری ایجاد شده بر روی خاک است (Mardani, 2014; Taghavifar & Mardani, 2014).

سرعت حرکت وسایل نقلیه به‌عنوان یک عامل مؤثر در عمق شیاری ایجادشده در سطح خاک شناخته می‌شود. در مطالعات قبلی رابطه‌ی معکوسی بین سرعت حرکت و عمق شیاری مشاهده شده است به این صورت که با کاهش سرعت وسیله نقلیه، مدت زمان تماس و اعمال نیرو توسط چرخ‌ها بر سطح خاک افزایش می‌یابد (Golanbari, Mardani, Hosainpour, & Taghavifar 2025). این افزایش زمان تماس منجر به تغییر شکل بیش‌تر خاک و در نتیجه، افزایش عمق شیاری می‌گردد (Mardani & Golanbari, 2024). مطالعه‌ای که توسط کالجا-هورتا و همکاران (Calleja-Huerta et al., 2023) به بررسی تأثیر بار و تعداد عبور یک ربات خودکار سبک وزن بر

در اثر تردد وسایل نقلیه خارج جاده بر سطوح نرم ازجمله خاک، نیروهای کششی و عمودی ناشی از تعامل چرخ-زمین منجر به ایجاد شیاریهایی در بستر خاک می‌گردد. شیاری ایجادشده توسط چرخ که به فرورفتگی چرخ معروف است، نتیجه تغییر شکل پلاستیک خاک تحت تأثیر تنش‌های برشی و فشاری اعمال شده توسط وسیله نقلیه هست (Cambi, Certini, Neri, & Marchi, 2015).

پارامترهایی مانند وزن وسایل نقلیه، سرعت حرکت آن، مشخصات هندسی و مکانیکی چرخ‌ها (قطر، عرض و فشار باد)، تعداد عبور مکرر از یک مسیر مشخص و خصوصیات فیزیکی خاک (میزان رطوبت، تراکم‌پذیری و مقاومت برشی) روی شیاری ایجادشده تأثیر دارند. تعامل پیچیده این عوامل، عمق و شکل شیارهای ایجادشده را تعیین می‌کند (Machuga et al., 2023; Sadeghi, Solgi, & Tsioras, 2022; Toivio et al., 2017).

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(Email: a.mardani@urmia.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

 <https://doi.org/10.22067/jam.2024.90273.1295>

(2017, & Pieczarka).

با وجود مطالعات مختلفی که به استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در زمینه‌ی تعامل وسیله نقلیه با خاک پرداخته‌اند، هنوز مطالعات بسیار محدودی به بررسی و پیش‌بینی عمق شیار ایجادشده توسط این تعامل، با استفاده از این روش‌ها، اختصاص داده شده است. در این راستا، هدف از این تحقیق پیش‌بینی عمق شیار ناشی از عبور وسیله نقلیه بر روی خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی تحت شرایط مختلف از بار عمودی، تعداد عبور و سرعت حرکت است. با توجه به اهمیت موضوع، این تحقیق تلاش می‌کند تا شکاف‌های موجود در روش‌شناسی‌های فعلی را پر کند و با استفاده از رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین، مدلی ارائه دهد که قادر به پیش‌بینی عمق فرورفتگی خاک به‌طور دقیق‌تری باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف، از جمله کشاورزی و صنایع داشته باشد و به توسعه مدل‌هایی کارآمدتر برای پیش‌بینی رفتار خاک در برابر عبور وسیله نقلیه کمک کند.

مواد و روش‌ها

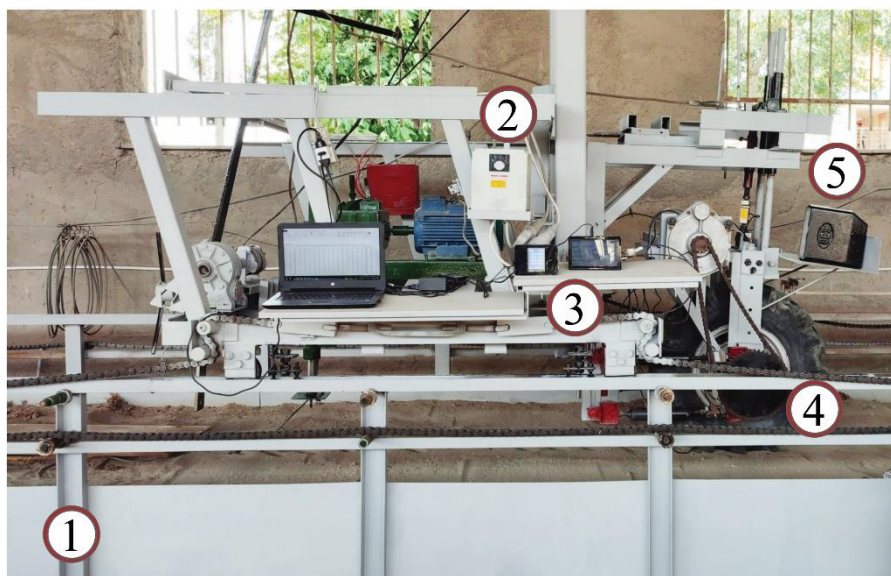
آزمایش‌های میدانی و تحصیل داده

برای انجام آزمایش‌ها به‌منظور ارزیابی اثر متغیرهای تعداد عبور، بار عمودی و سرعت پیش‌روی بر روی عمق شیار ایجادشده توسط چرخ از یک واحد انباره خاک استفاده شد. انباره خاک مورد استفاده از نوع ثابت است که به‌صورت یک سازه فلزی بر روی سطح زمین قرار گرفته و محیط خاک کاملاً به‌صورت جدا از سطح زمین و در قالب یک کانال خاک طراحی شده است. انباره خاک شامل شاسی، کانال خاک، حامل، سامانه‌های کنترل و واحد تولید توان برای حرکت حامل است. این کانال دارای طولی معادل ۲۴ متر است. عرض کانال ۲ متر و عمق لایه خاک ۰/۸ متر است. این انباره خاک مجهز به آزمونگر تک‌چرخ باقابلیت نصب انواع چرخ است. استفاده از انباره خاک در آزمایش‌ها امکان کنترل کامل شرایط آزمایش را فراهم می‌سازد. شمای کلی سیستم در شکل ۱ نمایش داده شده است.

خاک مورد استفاده در انباره خاک از خاک‌های کشاورزی منطقه جمع‌آوری شد و بعد از انتقال به انباره خاک مراحل آماده‌سازی آن برای آزمایش‌ها انجام شد. این آماده‌سازی به دلیل فراهم کردن شرایط نسبتاً یکنواخت و همگن برای محیط آزمایش است که شامل چنگه‌زنی و تسطیح خاک بود. طول و عرض مناسب انباره خاک امکان انجام همه‌ی آزمایش‌ها با یک‌بار آماده‌سازی خاک را فراهم کرد. برای این منظور کل فضای انباره خاک به ۹ کرت تقسیم شد. مشخصات خاک مورد استفاده پس از آماده‌سازی در جدول ۱ آمده است.

ویژگی‌های فیزیکی خاک شنی-لومی پرداخته است، تأثیر تعداد عبور و بارگذاری مکرر بر روی خاک را روشن نموده است. نتایج نشان داد که عمق شیار با افزایش تعداد عبورهای ربات افزایش می‌یابد. همچنین، تخلخل مؤثر هوا و قابلیت نفوذپذیری هوا با افزایش تعداد عبورها کاهش می‌یابد. تحقیق انجام‌شده توسط طباطبایی‌کلور (Tabatabaekoloor, 2016) به بررسی تأثیر رطوبت خاک، تعداد عبور و وزن تراکتور بر فرورفتگی خاک پرداخته است؛ نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش وزن تراکتور، تعداد عبور و رطوبت خاک به‌ترتیب باعث افزایش ۴۷٪، ۳۱٪ و ۲۸٪ در میزان فرورفتگی خاک می‌شود. در مطالعه‌ای توسط لیو و همکاران (Liu, Ayers, 2010, & Anderson, Howard)، اثر پنج تیمار شامل بافت خاک، رطوبت، نوع وسیله نقلیه، شعاع و سرعت چرخش، بر روی تشکیل عمق شیار مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که تمامی پارامترهای وسیله نقلیه (نوع وسیله نقلیه، وزن، سرعت و شعاع گردش) و پارامترهای خاک (بافت خاک و رطوبت) از نظر آماری بر تشکیل شیارها معنی‌دار هستند. در یک مطالعه دیگر، اثر تعداد عبور بر روی عمق شیار ایجادشده توسط وسیله نقلیه مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه عمق شیار در تردد اول و دهم اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بیشترین تغییر شکل خاک در تردد اول ایجاد می‌شود، همچنین در این مطالعه به ضرورت انجام تحقیقات بیشتر بر روی رفتار مکانیکی خاک به‌ویژه خاک‌های نرم در اثر عبور وسیله نقلیه تأکید شد (Vennik, Kuk, Krebstein, Reintam, & Keller, 2019).

استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در پرداختن به چالش‌های پیش روی وسایل نقلیه برون‌جاده‌ای در زمین‌های غیرمتعارف به دلیل توانایی آن در پردازش داده‌ها، تشخیص الگوها و پیش‌بینی روابط پیچیده در تعاملات چرخ و خاک بسیار مهم است (Golanbari, Mardani, Hosainpour, & Taghavifar, 2024). در سال‌های اخیر مطالعاتی با روش‌های مبنی بر یادگیری ماشین در مطالعات تعامل وسیله نقلیه با خاک انجام شده است. در یک مطالعه تأثیر نرخ نفوذ صفحات بر ویژگی‌های مکانیکی خاک با ابزار بومتر و پیش‌بینی پارامترهای خاک با شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت (Golanbari et al., 2024). نتایج این تحقیق نشان داد تغییر در سرعت نفوذ صفحات باعث تغییر در پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در این روش می‌شود، با این حال شبکه عصبی با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی پارامترهای مکانیکی خاک بود. در تحقیق دیگری برای بررسی اثرات بافت خاک، رطوبت، فشردگی خاک و همچنین تغییر شکل افقی و بار عمودی بر نیروی کششی و راندمان کششی، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. یافته‌های این مطالعه نتایج قابل توجهی برای قدرت تخمین شبکه‌های عصبی ارائه کرد (Pentoş)



شکل ۱- انباره خاک و اجزای آن: ۱- شاسی، ۲- اینورتر، ۳- سیستم جمع‌آوری اطلاعات، ۴- عامل کشش، ۵- بار عمودی استاتیک
Fig.1. Soil bin and its components: 1- Chassis, 2- Inverter, 3- Data logger, 4- Traction device, and 5- Static vertical load

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده در انباره خاک.

Table 1- Physical and mechanical characteristics of the soil in soil bin.

فاکتور Parameter	مقدار Value	منبع Reference
شن Sand	35%	Golanbari and Mardani, 2024
لای Silt	22%	
رس Clay	43%	
محتوای رطوبت Moisture content	8%	اندازه‌گیری شده
چگالی ظاهری Bulk density	1460 kg cm ⁻³	
مدول یانگ Young's modulus	0.3 MPa	Golanbari and Mardani, 2024
ضریب پواسون Poisson's ratio	0.29	
ضریب اصطکاک داخلی Angle of internal friction	32	

می‌شود (شکل ۱). نیروی محرکه برای جابه‌جایی حامل توسط یک عدد الکتروموتور با توان ۲۲ کیلووات (۳۰ اسب بخار)، تأمین می‌شود. به‌منظور کنترل سرعت دورانی الکتروموتور که سرعت پیشروی حامل را تعیین می‌کند، از یک عدد اینورتر با نام تجاری LS ساخت شرکت LG محصول کشور کره جنوبی با محدوده فرکانس ۰ تا ۵۰ هرتز با گام تغییر ۰/۰۱ هرتز استفاده شد.

پارامترهای آزمایش شامل ۱۵ سطح عبور، ۳ سطح بار عمودی ۲، ۳ و ۴ کیلونیوتن و ۳ سطح سرعت پیشروی ۱، ۲ و ۳ کیلومتر در ساعت می‌شود. دلیل انتخاب ۱۵ سطح عبور این بود که اطمینان حاصل شود که خاک به حداکثر نشست خود تحت بارگذاری‌های مختلف برسد.

عامل کشش مورد استفاده یک چرخ تراکتور لاستیکی با مشخصات Barez 8.25-16 (8) P.R HL ساخت ایران هست که توسط یک شفت فولادی و دو یاتاقان در دو سر به قاب چرخ متصل

جمع‌آوری داده‌ها

انتخاب شد، در هر بار عبور عمق شیار در این سه نقطه اندازه‌گیری و ثبت شد و در نهایت میانگین اندازه‌گیری‌های ثبت‌شده در این سه نقطه، به عنوان عمق شیار در تردد مشخص ثبت گردید. داده‌های ثبت شده به منظور تجزیه و تحلیل به نرم‌افزار متلب انتقال داده شد.

برای اندازه‌گیری داده‌ها پس از عبور چرخ، عمق شیار ایجادشده توسط چرخ، توسط یک کولیس ساعتی با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۲). برای اطمینان از صحت داده‌های ثبت‌شده، اندازه‌گیری عمق شیار سه نقطه در انباره خاک و در مسیر حرکت



شکل ۲- اندازه‌گیری عمق شیار ایجادشده توسط چرخ

Fig.2. Measuring the rut depth caused by the wheel

مقادیر واقعی در یک مجموعه داده را محاسبه می‌کند که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

n تعداد کل مشاهدات در مجموعه داده است، y مقدار واقعی متغیر هدف برای مشاهده نام است و $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شده متغیر هدف برای مشاهده نام است.

ضریب تعیین نشان‌دهنده نسبت واریانس در متغیر وابسته شاخص دیگر مورد استفاده است که توسط متغیرهای مستقل در مدل توضیح داده می‌شود. مقدار ضریب تعیین از ۰ تا ۱ متغیر است، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده تناسب بهتر مدل است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (2)$$

SS_{res} مجموع مجذور باقی‌مانده‌ها است که خطای کل مدل رگرسیون و SS_{tot} مجموع مجذورات است که کل تغییرات متغیر وابسته را نشان می‌دهد.

میانگین قدر مطلق خطا به میانگین تفاوت‌های مطلق بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مدل اشاره دارد و نشان می‌دهد که مدل، به‌طور میانگین، چقدر با مقدار واقعی اختلاف دارد. میانگین قدر مطلق خطا همیشه غیرمنفی است و مقدار کمتر آن به معنای عملکرد بهتر

معرفی شبکه‌های عصبی

در سال‌های اخیر، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، برای مطالعات تعامل چرخ-خاک به وجود آمده است. پیش‌بینی این تعاملات با ورودی‌ها (متغیرهای مستقل) با شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای مزیت غیرقابل انکاری نسبت به روش‌های مرسوم است. روابط غیرخطی بین متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل را می‌توان با دقت بالایی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی استخراج کرد. در این مطالعه از یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۱ با الگوریتم پس‌انتشار^۲ و همچنین از شبکه عصبی شعاعی پایه^۳ در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی از شاخص جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین و میانگین قدر مطلق خطا استفاده شد. این شاخص‌ها جزو شاخصه‌ای متداول در بررسی عملکرد شبکه عصبی هستند. جذر میانگین مربعات خطا یک معیار رایج برای ارزیابی دقت یک مدل پیش‌بینی، به‌ویژه در تحلیل رگرسیون است. این شاخص میانگین بزرگی خطاهای بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و

- 1- Multi-layer perceptron
- 2- Backpropagation algorithm
- 3- Radial basis function

مدل است و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

برای آموزش شبکه عصبی نیاز است که فرآپارامترهای شبکه تنظیم شود. فرآپارامترها تنظیماتی هستند که شبکه آن‌ها را از داده‌ها یاد نمی‌گیرد بلکه قبل از شروع فرآیند آموزش توسط کاربر مشخص می‌شوند. اهمیت فرآپارامترها در تأثیر آن‌ها بر عملکرد، همگرایی و توانایی تعمیم شبکه‌های عصبی است.

فرآپارامترهای شبکه عصبی پرسپترون چندلایه شامل تعداد نورون‌های لایه پنهان، تکانه^۱ و نرخ یادگیری^۲ و فرآپارامترهای شبکه عصبی شعاعی پایه شامل پهنای تابع گوسی^۳ و نرخ نرمال‌سازی^۴ است. برای تنظیم مناسب و بهینه فرآپارامترها هر دو شبکه از روش آزمون و خطا استفاده شد. پس از انتخاب بهترین معماری از نظر کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا انتخاب و به‌عنوان معماری شبکه انتخاب شد. ورودی‌های شبکه شامل سرعت پیشروی چرخ، بار عمودی روی تایلر و تعداد تردد است. از طرفی خروجی شبکه عمق شیار ایجاد شده است.

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

معماری شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شده در این مطالعه شامل یک شبکه با دو لایه پنهان بود که در آن از تابع انتقال سیگموئید برای نگاشت داده‌ها از لایه‌های پنهان استفاده شد. تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری شده برای عمق شیار برابر ۱۳۵ داده بود که از این بین، یک مجموعه داده جدا شد و به‌عنوان داده‌های دیده‌نشده بعد از آموزش شبکه عصبی برای بررسی تعمیم‌پذیری شبکه به کار برده شد. از کل داده‌های باقی‌مانده ۷۰ درصد برای داده‌های آموزش، ۱۵ درصد برای داده‌های اعتبارسنجی و ۱۵ درصد برای داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از ۳ تابع آموزشی به‌عنوان الگوریتم آموزش استفاده گردید که کمترین جذر میانگین مربعات خطا به‌عنوان بهترین عملکرد تابع آموزش برای شبکه برگزیده شد. همچنین از روش آزمون و خطا برای تعیین تعداد بهینه نورون‌ها در لایه‌های پنهان و همچنین پارامترهای تکانه و نرخ یادگیری برای شبکه عصبی استفاده شد. بدین منظور تعداد نورون‌ها از ۱ تا ۱۵ نورون به‌ترتیب افزایش یافت و همچنین نرخ یادگیری و تکانه در بازه صفر تا یک با گام ۰/۰۵ برای هر مقدار تعداد نورون لایه پنهان افزایش یافت. بعد از به‌دست آمدن مقادیر بهینه فرآپارامترها شبکه عصبی در ۵۰۰ دوره و ۳۰۰ تکرار آموزش داده شد.

شبکه عصبی شعاعی پایه

شبکه‌های عصبی تابع شعاعی پایه مدل‌های قدرتمندی هستند که به دلیل توانایی خود در تقریب توابع پیچیده و مدیریت روابط غیرخطی در داده‌ها شناخته شده‌اند. شبکه‌های عصبی شعاعی پایه به‌طور معمول دارای یک لایه پنهان هستند که تعداد نورون‌های لایه پنهان آن توسط خود شبکه در هر تکرار تنظیم می‌شود. با این حال، عملکرد شبکه‌های شعاعی پایه به انتخاب مناسب فرآپارامترها مانند پهنای تابع گوسی و نرخ نرمال‌سازی بستگی دارد. پارامتر پهنای تابع گوسی توابع پایه شعاعی، پهنای تأثیر آن‌ها بر خروجی شبکه را کنترل می‌کند، درحالی‌که پارامتر نرمال‌سازی پیچیدگی و ظرفیت مدل را تعیین می‌کند. بهینه‌سازی نرخ نرمال‌سازی و پهنای تابع گوسی شبکه عصبی تابع پایه شعاعی با استفاده از روش آزمون و خطا انجام شد. پارامترهای نرخ نرمال‌سازی در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۱۰ با گام ۰/۰۰۵ و پهنای تابع گوسی برای شبکه عصبی در بازه ۱ تا ۱۰ با گام ۰/۱۰ افزایش یافت. شبکه با ۱۰۰ تکرار، برای هر مقدار از پارامترهای نرخ نرمال‌سازی و پهنای تابع گوسی آموزش داده شد.

نتایج و بحث

شبکه‌های عصبی مصنوعی، شامل مدل‌های پرسپترون چندلایه و تابع شعاعی پایه، برای پیش‌بینی عمق شیار بر اساس پارامترهای ورودی (سرعت وسیله نقلیه، بار عمودی و عبورهای متعدد)، توسعه و آموزش داده شدند. عملکرد مدل‌های شبکه عصبی با استفاده از معیارهای ارزیابی مانند جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین مورد ارزیابی قرار گرفت.

ارزیابی عملکرد شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

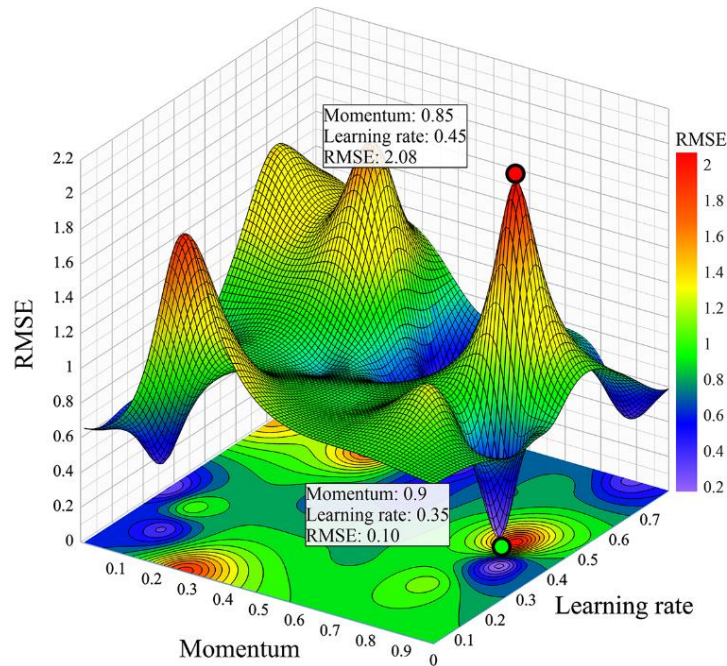
نمودار شکل ۳ ارتباط بین تکانه و نرخ یادگیری با جذر میانگین مربعات خطا در یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه را نمایش می‌دهد. تغییرات در مقادیر جذر میانگین مربعات خطا بر اساس تنظیمات مختلف تکانه و نرخ یادگیری نمایانگر پیچیدگی تأثیر این دو پارامتر کلیدی بر فرآیند بهینه‌سازی شبکه عصبی است. هرکدام از این پارامترها می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر عملکرد شبکه عصبی داشته باشند و بهینه‌سازی این پارامترها اهمیت بالایی در بهبود دقت و عملکرد مدل دارد.

نرخ یادگیری، سرعت به‌روزرسانی وزن‌ها در هر گام از فرآیند آموزش را نشان می‌دهد. اگر نرخ یادگیری بسیار بالا باشد، مدل به‌سرعت وزن نورون‌ها را تغییر می‌دهد و ممکن است از مقدار بهینه عبور کند و شبکه به جواب جهانی همگرا نشود. در مقابل، اگر نرخ یادگیری خیلی پایین باشد، فرآیند یادگیری آهسته‌تر شده و شبکه ممکن است در حداقل‌های محلی گرفتار شود. تکانه به الگوریتم

- 1- Momentum
- 2- Learning Rate
- 3- Spread
- 4- Regularization

یک پارامتر اساسی مؤثر بر عملکرد شبکه عصبی پرسپترون چندلایه انتخاب یک الگوریتم یادگیری مناسب است. برای شناسایی مناسب‌ترین الگوریتم یادگیری پس‌انتشار، سه الگوریتم یادگیری پس‌انتشار مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. عملکرد شبکه عصبی با هر الگوریتم یادگیری مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۲ معیارهای عملکرد شبکه عصبی را برای الگوریتم‌های یادگیری مختلف ارائه می‌دهد.

کمک می‌کند تا از تاریخچه گرادینان برای به‌روزرسانی وزن‌ها استفاده کند، به‌طوری‌که تغییرات در وزن‌ها به‌تدریج انجام شده و از نوسانات زیاد جلوگیری شود. اگر تکانه به‌درستی تنظیم نشود، ممکن است شبکه دچار نوسانات شدید شود. بدترین عملکرد شبکه با تکانه $0/85$ و نرخ یادگیری $0/45$ است که به خطای جذر میانگین مربعات $2/08$ منجر شده است. در مقابل بهترین عملکرد شبکه عصبی با تکانه $0/9$ و نرخ یادگیری $0/35$ با خطای جذر میانگین مربعات $0/10$ و میانگین قدر مطلق خطا $0/08$ به‌دست آمد.



شکل ۳- تأثیر تکانه و نرخ یادگیری بر میزان خطای جذر میانگین مربعات در مدل یادگیری شبکه پرسپترون چندلایه

Fig.3. The effect of momentum and learning rate on the RMSE in the MLP learning model

جدول ۲- توابع انتقال و الگوریتم‌های آموزشی پس‌انتشار در شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه

Table 2- Transfer functions and backpropagation training algorithms in the multilayer perceptron artificial neural network

الگوریتم آموزشی Training algorithm	R ²	RMSE	MAE
لونیگ-مارکوارت پس‌انتشار Levenberg-Marquardt backpropagation (trainlm)	0.999982	0.10	0.08
پس‌انتشار ارتجاعی Resilient backpropagation (trainrp)	0.999501	0.71	0.43
پس‌انتشار بیزی Bayesian regularization backpropagation (trainbr)	0.999969	0.17	0.10

به‌عنوان الگوریتم یادگیری انتخاب شد. جدول ۳ نشان‌دهنده نتایج آموزش با چیدمان بهینه شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و فرآیندهای آموزش است. در معماری بهینه، مقادیر مربوط به نرخ یادگیری، تکانه، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب

همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود از بین الگوریتم‌های یادگیری پس‌انتشار، الگوریتم یادگیری لونیگ-مارکوارت با خطای جذر میانگین مربعات معادل $0/13$ ، ضریب تعیین برابر $0/99834$ و میانگین قدر مطلق خطا برابر $0/10$ بهترین عملکرد را داشت؛ بنابراین

تعیین در جدول ارائه شده‌اند.

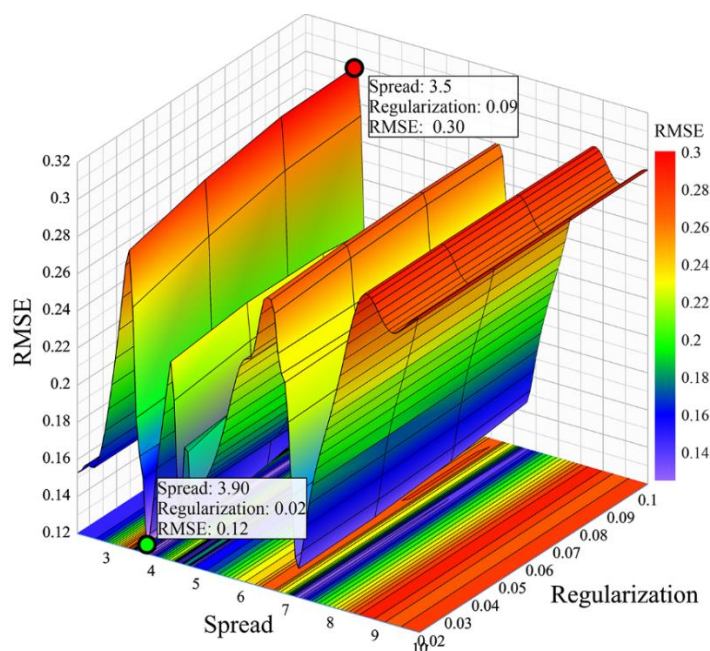
جدول ۳- ویژگی‌های به‌دست‌آمده در آموزش پرسپترون چندلایه با

پیکره‌بندی بهینه‌شده

Table 3- Features obtained in multi-layer perceptron training with optimized topology

پیکره‌بندی Topology	3-14-12-1
نرخ یادگیری Learning Rate	0.35
تکانه Momentum	0.90
جذر میانگین مربعات خطا RMSE	0.10
ضریب تعیین R-square	0.999982
میانگین قدر مطلق خطا MAE	0.08

در جدول ۳، معماری ۳-۱۴-۱۲-۱ با خطای جذر میانگین مربعات برابر ۰/۱۰ و میانگین قدر مطلق خطا ۰/۰۸، با کمترین مقدار خطا، در بین سایر معماری‌ها بهترین عملکرد را در کاهش خطا داشته است. همچنین ضریب تعیین با مقدار برابر ۰/۹۹۹۸۴ نشان می‌دهد



شکل ۴- تأثیر پارامترهای پهنای تابع گوسی و نرخ نرمال‌سازی بر میزان خطای جذر میانگین مربعات در مدل یادگیری شبکه تابع شعاعی

Fig.4. The effect of spread and regularization rate on the RMSE in the RBF network learning model

شبکه در این نقطه منجر به عملکرد ضعیف‌تری شده است. این می‌تواند به این معنا باشد که مدل به دلیل مقادیر نامناسب فراپارامترها دچار بیش‌برازش یا کم‌برازش شده است. نقطه دوم که در پهنای تابع گوسی برابر ۳/۹۰ و نرخ نرمال‌سازی برابر ۰/۰۲ قرار دارد، جذر

در نمودار شکل ۴ دو نقطه خاص برجسته شده‌اند. اولین نقطه در پهنای تابع گوسی برابر ۳/۵۰ و نرخ نرمال‌سازی برابر ۰/۰۹ قرار دارد که در آن مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۳ است. این مقدار جذر میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که تنظیمات فراپارامترهای

که مدل می‌تواند به‌خوبی روند داده‌های تجربی را شناسایی و پیش‌بینی کند.

ارزیابی عملکرد شبکه عصبی شعاعی پایه

پهنای تابع گوسی بر نحوه تأثیرگذاری هر نود (نورون) در لایه مخفی شبکه بر داده‌های ورودی تأثیرگذار است. مقادیر کمتر پهنای باعث می‌شود که هر نورون فقط به محدوده کوچکی از ورودی‌ها حساس باشد و این ممکن است موجب ایجاد مدل‌های پیچیده‌تر و بیش‌برازش شبکه شود. پارامتر نرمال‌سازی به کنترل پیچیدگی مدل کمک می‌کند. نرمال‌سازی از بیش‌برازش مدل به داده‌های آموزشی جلوگیری می‌کند.

نمودار شکل ۳ نشان‌دهنده رابطه بین پهنای تابع گوسی و پارامتر نرمال‌سازی با جذر میانگین مربعات خطا در شبکه عصبی شعاعی پایه است. عملکرد بهینه شبکه عصبی با اندازه پهنای ۳/۹۰ و نرخ نرمال‌سازی ۰/۰۲ به‌دست آمد که منجر به خطای جذر میانگین مربعات ۰/۱۲ و میانگین قدر مطلق خطا ۰/۱۱ شد. شکل ۴ عملکرد شبکه عصبی را به‌ازای مقادیر مختلف فراپارامترها نشان می‌دهد.

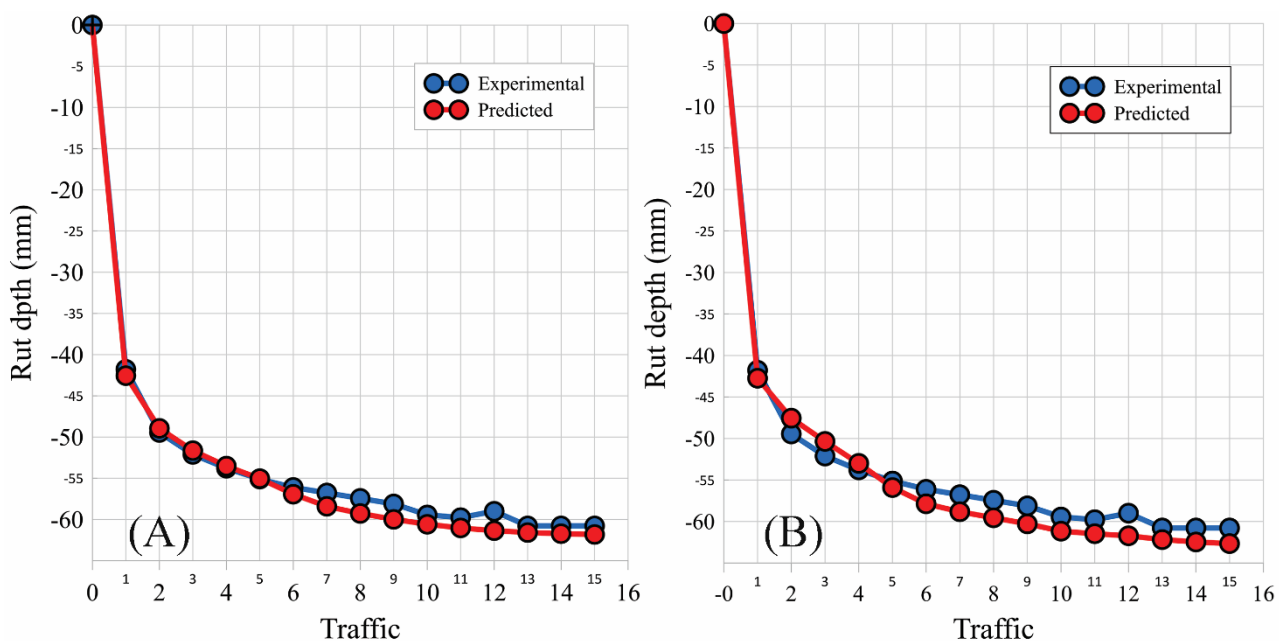
شیار وابسته به عملکرد شبکه‌های عصبی روی داده‌های دیده‌نشده است. داده‌های دیده‌نشده، اشاره به داده‌هایی دارند که در مرحله آموزش استفاده نمی‌شوند. این امکان ارزیابی تعمیم مدل را فراهم می‌کند و اطمینان حاصل می‌کند که مدل به جای تطبیق بیش‌ازحد با داده‌های آموزشی، الگوهای اساسی را یاد گرفته است. علاوه بر این، ارزیابی مدل بر روی داده‌های آزمایشی دیده‌نشده، معیارهای عملکردی شبکه را ارائه می‌کند که برای کاربردی بودن مدل در دنیای واقعی و اطمینان از آمادگی استقرار قوی ضروری است. در شکل ۵ عمق شیار اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌های میدانی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و شعاعی پایه نمایش داده شده است.

میانگین مربعات خطا برابر $0/12$ را نشان می‌دهد که مقدار بسیار کمتری است. این مقدار کم جذر میانگین مربعات خطا بیانگر دقت بیشتر مدل و تنظیم بهینه‌تر این دو پارامتر است. با توجه به ساختار نمودار شکل ۴، می‌توان مشاهده کرد که مقدار پهنای تابع گوسی به تنهایی نمی‌تواند تعیین‌کننده اصلی دقت مدل باشد. تعامل بین پهنای تابع گوسی و نرخ نرمال‌سازی نقش کلیدی در کاهش خطا و بهبود عملکرد شبکه ایفا می‌کند.

مقایسه نتایج رگرسیون در شبکه‌های عصبی پرسپترون

چندلایه و شعاعی پایه

عملکرد نهایی شبکه‌های عصبی، مستلزم بررسی پیش‌بینی عمق



شکل ۵- مقایسه داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده از عمق شیار به‌دست‌آمده از مدل‌های شبکه عصبی

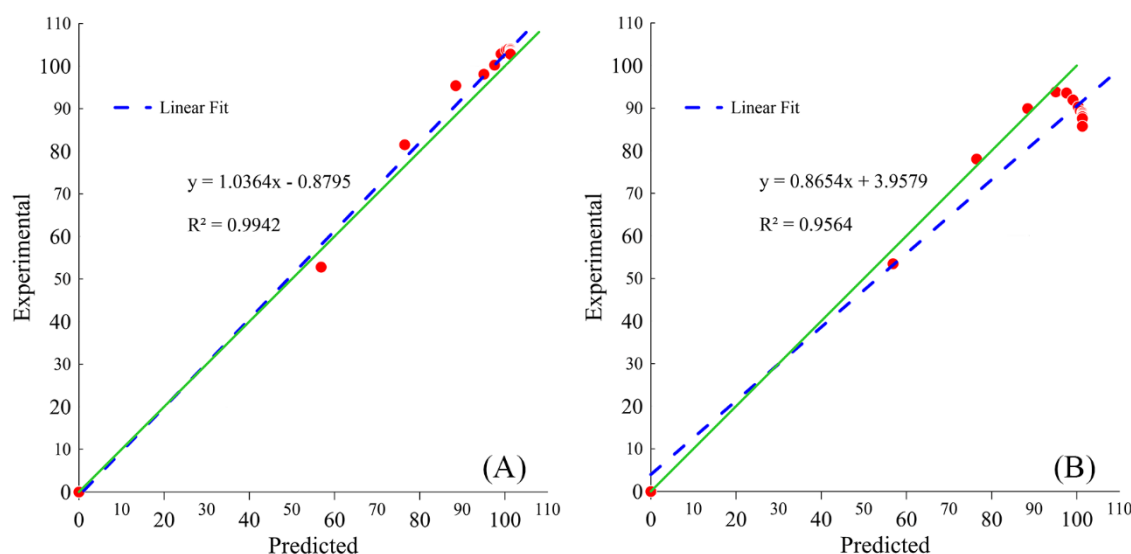
Fig.5. Comparison of experimental data and predicted values of rut depth obtained from (A) MLP and (B) RBF models

داده‌های دیده‌نشده ارائه می‌دهد. اگرچه شبکه عصبی پرسپترون چندلایه پیش‌بینی‌های کمی دقیق‌تر ارائه می‌دهد، با این حال شبکه عصبی شعاعی پایه هزینه‌های محاسباتی کمتر و زمان‌های پاسخ سریع‌تری دارد. این ویژگی‌ها شبکه عصبی شعاعی پایه را برای کاربردهای بلادرنگ مناسب‌تر می‌کند.

ارزیابی عملکرد رگرسیون بین شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه و تابع پایه شعاعی مشخص می‌کند کدام شبکه عصبی قابلیت بهتری در پیش‌بینی عمق شیار ارائه می‌دهد. شکل ۶ نمایش رگرسیون داده‌های دیده‌نشده را بعد از آموزش شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (الف) و شعاعی پایه (ب) نمایش می‌دهد.

شکل ۵-الف پیش‌بینی تغییرات در عمق شیار را با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه نشان می‌دهد. شکل ۵ نشان می‌دهد که شبکه عصبی به‌طور مؤثر تغییرات در داده‌های تجربی را ردیابی می‌کند. ترددهای اولیه بسیار مهم هستند زیرا بالاترین سطوح تغییر شکل خاک، مقاومت در برابر غلتش چرخ و فشردگی خاک همراه است؛ بنابراین توانایی شبکه برای پیش‌بینی دقیق این تغییرات اولیه از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

شکل ۵-ب پیش‌بینی تغییرات عمق شیار ایجادشده توسط عوامل کششی با استفاده از شبکه عصبی شعاعی پایه را نشان می‌دهد. مشاهدات نشان می‌دهد که این شبکه عصبی نیز به‌طور مؤثر فرآیند تغییرات در عمق شیار را یاد می‌گیرد و عملکرد مناسب را روی



شکل ۶- نتایج رگرسیون برای داده‌های دیده‌نشده شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه و تابع شعاعی پایه
Fig.6. Regression results for unseen data of (A) MLP and (B) RBF neural networks

توسط تایرهای کشاورزی لاستیکی را فراهم می‌کند. عملکرد شبکه‌های عصبی آموزش‌دیده با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین ارزیابی شد. هر دو شبکه پرسپترون چندلایه و شعاعی پایه دقت بالایی در پیش‌بینی عمق شیار نشان دادند. شبکه پرسپترون چندلایه عملکرد کمی بهتری از شبکه شعاعی داشت. از طرفی، شبکه شعاعی پایه هزینه‌های محاسباتی کمتر و زمان پاسخ سریع‌تر را نشان داد که آن را برای کاربردهای بلادرنگ که در آن سرعت پاسخ بسیار مهم است به ابزار مناسب‌تری تبدیل می‌کند. قابلیت‌های تعمیم و استحکام شبکه‌های عصبی با ارزیابی عملکرد آن‌ها بر روی داده‌های تجربی دیده‌نشده تأیید شد. نتایج کارایی مدل‌های آموزش‌دیده را در گرفتن الگوهای زیربنایی و پیش‌بینی دقیق تشکیل عمق شیارها در شرایط کشتش مختلف تأیید کرد. این مطالعه ظرفیت روش‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی، در مدل‌سازی دقیق و پیش‌بینی تعاملات خاک و خودرو را نشان می‌دهد. این یافته‌ها به درک دینامیک تشکیل شیار کمک می‌کند و پایه‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد خودرو، کاهش فرسایش و تراکم خاک و بهبود طراحی خودروهای برون‌جاده را فراهم می‌کند.

مشارکت نویسندگان

نشمیل فرهادی: روش‌شناسی، مفهوم‌سازی، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه
 عارف مردانی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، اعتبارسنجی، ویرایش متن
 عادل حسین پور: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، اعتبارسنجی،

نمودار رگرسیون شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و شبکه عصبی شعاعی پایه به‌ترتیب با ضریب تعیین 0.9942 و 0.9564 همبستگی بالایی را بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد، همان‌طور که با مقدار ضریب تعیین نشان داده شده است. این همبستگی مناسب نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل دقیق هستند. معادله خطوط رگرسیون از این نتیجه‌گیری پشتیبانی می‌کنند.

عملکرد شبکه عصبی MLP و RBF بستگی به نوع مسئله دارد. شبکه عصبی پرسپترون چندلایه از نظر مقدار ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا دقت پیش‌بینی، از شبکه تابع پایه شعاعی بهتر عمل می‌کند. یافته‌های این مطالعه از نظر عملکرد شبکه عصبی با یافته‌های چامپاتی و همکاران (Champati et al., 2023) و کاشانی‌نژاد و همکاران (Kashaninejad, Dehghani, & Kashiri, 2009)، همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه یک تحقیق جامع در مورد کاربرد روش‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی، برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تشکیل عمق شیار ناشی از تردد وسایل نقلیه خارج از جاده ارائه می‌کند. دو معماری شبکه عصبی متمایز، پرسپترون چندلایه و تابع پایه شعاعی، با استفاده از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انبار خاک، توسعه و آموزش داده شدند. انبار خاک امکان ارزیابی سازمان‌یافته اثرات مولفه‌های مختلف، از جمله سرعت وسیله نقلیه، بار عمودی و عبورهای متعدد، بر تشکیل عمق شیارها

References

1. Calleja-Huerta, A., Lamandé, M., Green, O., & Munkholm, L. J. (2023). Impacts of load and repeated wheeling from a lightweight autonomous field robot on the physical properties of a loamy sand soil. *Soil and Tillage Research*, 233, 105791. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105791>
2. Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
3. Champati, B. B., Padhiari, B. M., Ray, A., Jena, S., Sahoo, A., Mohanty, S., Patnaik, J., Naik, P. K., Panda, P. C., & Nayak, S. (2023). Implementation of multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) neural networks for predicting Shatavarin IV content in *Asparagus racemosus* accessions. *Industrial Crops and Products*, 191, 115968. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115968>
4. Golanbari, B., & Mardani, A. (2024). An analytical model for stress estimation at the soil-tire interface using the dynamic contact length. *Journal of Terramechanics*, 111, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.08.006>
5. Golanbari, B., Mardani, A., Farhadi, N., & Reina, G. (2024). Machine learning applications in off-road vehicles interaction with terrain: An overview. *Journal of Terramechanics*, 116, 101003. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2024.101003>
6. Golanbari, B., Mardani, A., Hosainpour, A., & Taghavifar, H. (2024). Modeling Soil Deformation for Off-Road Vehicles Using Deep Learning Optimized by Grey Wolf Algorithm. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(1), 69-82. <https://doi.org/10.22067/jam.2023.84339.1188>
7. Golanbari, B., Mardani, A., Hosainpour, A., & Taghavifar, H. (2025). Predicting terrain deformation patterns in off-road vehicle-soil interactions using TRR algorithm. *Journal of Terramechanics*, 117, 101021. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2024.101021>
8. Kashaninejad, M., Dehghani, A. A., & Kashiri, M. (2009). Modeling of wheat soaking using two artificial neural networks (MLP and RBF). *Journal of Food Engineering*, 91(4), 602-607. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.012>
9. Liu, K., Ayers, P., Howard, H., & Anderson, A. (2010). Influence of soil and vehicle parameters on soil rut formation. *Journal of Terramechanics*, 47(3), 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2009.09.001>
10. Machuga, O., Shchupak, A., Styrnivskiy, O., Krilek, J., Helexa, M., Kováč, J., Kuvik, T., Mancel, V., & Findura, P. (2023). Field and Laboratory Research of the Rut Development Process on Forest Roads. *Forests*, 15(1), 74. <https://doi.org/10.3390/f15010074>
11. Mardani, A. (2014). On-the-move monitoring of tire rut depth on deformable soil using an instrumented inclinometer. *Transactions of the ASABE*, 57(5), 1291-1295. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10563>
12. Mardani, A., & Golanbari, B. (2024). Indoor measurement and analysis on soil-traction device interaction using a soil bin. *Scientific Reports*, 14(1), 10077. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59800-2>
13. Pentoś, K., & Pieczarka, K. (2017). Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions. *Soil and Tillage Research*, 165, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.005>
14. Sadeghi, S., Solgi, A., & Tsioras, P. A. (2022). Effects of traffic intensity and travel speed on forest soil disturbance at different soil moisture conditions. *International Journal of Forest Engineering*, 33(2), 146-154. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2055442>
15. Tabatabaekoloor, R. (2016). *Field evaluation of soil sinkage under different moisture content, traffic and loading rate*. International Conference on Agricultural Engineering, CIGR- AgEng 2016, Aarhus, Denmark, 26- 29 June.
16. Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(1), 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.004>
17. Toivio, J., Helmisaari, H. S., Palviainen, M., Lindeman, H., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M., & Uusitalo, J. (2017). Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 405, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.022>
18. Vennik, K., Keller, T., Kuk, P., Krebstein, K., & Reintam, E. (2017). Soil rut depth prediction based on soil strength measurements on typical Estonian soils. *Biosystems Engineering*, 163, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.016>
19. Vennik, K., Kuk, P., Krebstein, K., Reintam, E., & Keller, T. (2019). Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. *Soil and Tillage Research*, 186, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.011>

Contents

Research Articles

Investigation, Optimization of Energy Consumption and Yield Modeling of Two Paddy Cultivars with Genetic-Artificial Bee Colony Algorithm	145
S. Sharifi, N. Hafezi, M. H. Aghkhani	
Construction and Performance Evaluation of a Flow Meter Based on Thermal Pulse to Measure Plant Sap Flow in Vascular Tissues	165
M. Teimorzadeh, J. Baradaran Motie, A. Rohani, Y. Selahvarzi	
Monitoring Livestock Health by Modeling Rumination Behavior According to Accelerometer-Based Information	179
E. Vahedi Tekmehdash, H. Navid, H. Gasemzadeh, H. Karimi, M. Javani Holan	
Design, Construction, and Evaluation of a Spatial Depth Measurement System for Subsoiler in Sugarcane Fields	193
N. Loveimi, A. Azizi, A. Kaab, A. Neisi	
Evaluation of the Development Level of Edible Mushroom Production Systems in Iran between 2016 and 2021	211
M. Zangeneh, E. Godini	
Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling	229
S. R. Mousavi Seyedi, M. Askari, S. M. R. Miri	
Comparison of Energy Consumption Optimization in Sugar Factory Using Meta-Heuristic Algorithms	247
M. Boroun, M. Ghahderijani, A. A. Naseri, B. Beheshti	
Prediction of Rut Depth in Soil Caused by Wheels Using Artificial Neural Networks	263
F. Nashmil, A. Mardani, A. Hosainpour, B. Golanbari	

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 15

No. 2

2025

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Director-in-Charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editor-in-Chief: Prof. M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Abbaspour-Fard, M. H.	Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Aboonajmi, M.	Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
Aghkhani, M. H.	Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Alimardani, R.	Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Emadi, B.	Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
Ghazanfari Moghaddam, A.	Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
Kadkhodayan, M.	Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Khoshtaghaza, M. H.	Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Loghavi, M.	Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
Modarres Razavi, M.	Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Mohtasebi, S. S.	Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, 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.	Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
Rohani, A.	Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Saiedirad, M. H.	Agricultural Engineering Research Institute, Mashhad, Iran
Sayasoonthorn, S	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: <https://jame.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 15

No. 2

2025

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

- Investigation, Optimization of Energy Consumption and Yield Modeling of Two Paddy Cultivars with Genetic-Artificial Bee Colony Algorithm.....145**
S. Sharifi, N. Hafezi, M. H. Aghkhani
- Construction and Performance Evaluation of a Flow Meter Based on Thermal Pulse to Measure Plant Sap Flow in Vascular Tissues165**
M. Teimorzadeh, J. Baradaran Motie, A. Rohani, Y. Selahvarzi
- Monitoring Livestock Health by Modeling Rumination Behavior According to Accelerometer-Based Information179**
E. Vahedi Tekmehdash, H. Navid, H. Gasemzadeh, H. Karimi, M. Javani Holan
- Design, Construction, and Evaluation of a Spatial Depth Measurement System for Subsoiler in Sugarcane Fields.....193**
N. Loveimi, A. Azizi, A. Kaab, A. Neisi
- Evaluation of the Development Level of Edible Mushroom Production Systems in Iran between 2016 and 2021.....211**
M. Zangeneh, E. Godini
- Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling.....229**
S. R. Mousavi Seyedi, M. Askari, S. M. R. Miri
- Comparison of Energy Consumption Optimization in Sugar Factory Using Meta-Heuristic Algorithms247**
M. Boroun, M. Ghahderijani, A. A. Naseri, B. Beheshti
- Prediction of Rut Depth in Soil Caused by Wheels Using Artificial Neural Networks263**
F. Nashmil, A. Mardani, A. Hosainpour, B. Golanbari