انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی
ماشین های کشاورزی

دانشگاه فردوسی مشهد

جلد۱۳ شماره ۴
سال ۱۴۰۲
(شماره پیاپی: ۳۰)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

ارزیابی و بهینه‌سازی شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی با استفاده از ارزیابی چرخه حیات و تحلیل پوششی داده‌ها (مطالعه موردی: گاوداری‌های صنعتی شمال خوزستان) ۳۸۵
رستم فتحی، محمود قاسمی‌نژاد رائینی، رضا حسام‌پور

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه بادی (مطالعه موردی: کهک قزوین و آفکند میانه) ۴۰۷
ماریه نوروزی پور، رضا طباطبایی کلور، علی متولی

شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها بر پایه مطالعات تجربی توسعه‌یافته ۴۲۹
حمزه سلطانعلی، مهدی خجسته پور

تشخیص خودکار ردیف‌های کشت گیاه توسط ربات به کمک بینایی ماشین (مطالعه موردی: گیاه ریحان) ۴۵۵
مریم نداف زاده، احمد بناکار، سامان آبدانان مهدی‌زاده، محمد رضا زارع بوانی، سعید مینایی

بهینه‌سازی چندهدفه جهت تعیین الگوهای بهینه‌ی عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک با استفاده از الگوریتم NSGA-II ۴۷۹
محمد علی هرمزی، حسن ذکی دیزجی، هوشنگ بهرامی، نسیم منجزی

ادغام تصاویر چندطیفی و راداری به‌منظور افزایش دقت طبقه‌بندی و برآورد سطح زیر کشت محصولات زراعی ۴۹۵
مهدی سعدیخانی، محمدمهدی مهارلویی، محمدعلی رستمی، محسن عدالت

امکان‌سنجی تعیین بافت خاک با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی یک نفوذسنج مخروطی ۵۱۱
جعفر نصرالهی آذر، رحمان فرخی تیمورلو، وحید رستم پور

مطالعه تجربی و مدل‌سازی ریاضی حذف سولفید هیدروژن از بیوگاز با استفاده از بیوفیلتر ۵۲۳
محسن زارعی، محمدرضا بیاتی، محمدعلی ابراهیمی نیک، بیژن حجازی، عباس روحانی

نشریه ماشین های کشاورزی

با شماره پروانه ۸۹/۱۲۶۳۹ و درجه علمی – پژوهشی شماره ۳/۱۱/۳۷۸۱ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

۸۹/۶/۱۳ ۸۹/۳/۱۷

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

جلد ۱۳ شماره ۴ زمستان ۱۴۰۲

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

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

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

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
ابونجمی، محمد	دانشیار- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان (دانشگاه تهران)
پوررضا، علیرضا	گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی (دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا)
خوش تقاضا، محمدهادی	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه تربیت مدرس)
راجی، عبدالغنی	استاد- گروه مهندسی کشاورزی و محیطزیست، دانشکده فنی (دانشگاه ایبادان، نیجریه)
روحانی، عباس	دانشیار- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
سعیدی راد، محمدحسین	دانشیار- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
سوپاکیت، سایاسونثرن	استادیار- دانشکده کشاورزی (دانشگاه کاستسارت، تایلند)
عباسپور فرد، محمدحسین	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
علیمردانی، رضا	استاد- گروه ماشین‌های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)
عمادی، باقر	استاد مدعو- گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک (دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا)
غضنفری مقدم، احمد	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شهید باهنر کرمان)
کدخدایان، مهران	استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)
لغوی، محمد	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شیراز)
محتسبی، سید سعید	استاد- گروه ماشین‌های کشاورزی (دانشگاه تهران)
مدرس رضوی، محمدرضا	استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)
نصیراحمدی، ابوذر	گروه مهندسی کشاورزی (دانشگاه کاسل آلمان)

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مقالات این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

Scopus, AGRIS، CABI، DOAJ، EBSCO، Google scholar، Internet Archive، پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، سامانه نشریات علمی ایران، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)، مرجع دانش (CIVILICA)

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت http://jame.um.ac.ir به‌صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۴ شماره در سال و به‌صورت آنلاین منتشر می‌شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

ارزیابی و بهینه‌سازی شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی با استفاده از ارزیابی چرخه حیات و تحلیل پوششی داده‌ها (مطالعه موردی: گاوداری‌های صنعتی شمال خوزستان) ۳۸۵
رستم فتحی، محمود قاسمی‌نژاد رائینی، رضا حسام‌پور

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه بادی (مطالعه موردی: کهک قزوین و آقکند میانه) ۴۰۷
ماریه نوروزی پور، رضا طباطبایی کلور، علی متولی

شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها بر پایه مطالعات تجربی توسعه‌یافته ۴۲۹
حمزه سلطانعلی، مهدی خجسته پور

تشخیص خودکار ردیف‌های کشت گیاه توسط ربات به کمک بینایی ماشین (مطالعه موردی: گیاه ریحان) ۴۵۵
مریم نداف زاده، احمد بناکار، سامان آبدانان مهدی‌زاده، محمد رضا زارع بوانی، سعید مینایی

بهینه‌سازی چندهدفه جهت تعیین الگوهای بهینه‌ی عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک با استفاده از الگوریتم NSGA-II ۴۷۹
محمد علی هرمزی، حسن ذکی دیزجی، هوشنگ بهرامی، نسیم منجزی

ادغام تصاویر چندطیفی و راداری به‌منظور افزایش دقت طبقه‌بندی و برآورد سطح زیر کشت محصولات زراعی ۴۹۵
مهدی سعدیخانی، محمدمهدی مهارلویی، محمدعلی رستمی، محسن عدالت

امکان‌سنجی تعیین بافت خاک با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی یک نفوذسنج مخروطی ۵۱۱
جعفر نصرالهی آذر، رحمان فرخی تیمورلو، وحید رستم پور

مطالعه تجربی و مدل‌سازی ریاضی حذف سولفید هیدروژن از بیوگاز با استفاده از بیوفیلتر ۵۲۳
محسن زارعی، محمدرضا بیاتی، محمدعلی ابراهیمی نیک، بیژن حجازی، عباس روحانی

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 383-404

Evaluation and Optimization of Energy and Environmental Indicators Using Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis (Case Study: Industrial Cattle Farms in Northern Khuzestan)

R. Fathi[1], M. Ghasemi Nejad-Raeini[1*], R. Hesampour[1]

1- Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
(*- Corresponding Author Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir)

Received: 10 April 2022
Revised: 02 June 2022
Accepted: 09 June 2022
Available Online: 11 June 2022

How to cite this article:
Fathi, R., Ghasemi Nejad-Raeini, M., & Hesampour, R. (2023). Evaluation and Optimization of Energy and Environmental Indicators Using Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis (Case Study: Industrial Cattle Farms in Northern Khuzestan). *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 383-404. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.76155.1100

Introduction

Environmental crises and resource depletion have adversely affected environmental resources and food security in the world. Therefore, with the global population growth in the coming years and the rising need to produce more food, attention must be given to environmental issues, energy consumption, and sustainable production. The purpose of this study is to evaluate the pattern of energy consumption, environmental impacts, and optimization of the studied energy indicators in dairy cattle breeding industrial units in Khuzestan province, Iran.

Materials and Methods

This research was conducted in Khuzestan province, located in the southwest of Iran. Energy indicators including energy ratio, energy efficiency, specific energy, and net energy were used to determine and analyze the relationships between the output and input energy. Additionally, the life cycle assessment methodology was used to assess the environmental impact. Life cycle assessment includes a goal statement, identification of inputs and outputs, and a system for assessing and interpreting environmental impacts, and can be a good indicator for assessing environmental issues related to production. The life cycle assessment method used in this study was CML-IA baseline V3.05, which includes the four steps of (1) selecting and classifying impact categories, (2) characterizing effects, (3) normalizing, and (4) weighting. Overall, 11 impact groups were studied. The Data Envelopment Analysis (DEA) method with the Anderson-Peterson model was used for optimization. This method identifies the most efficient production unit and makes it possible to rank all of the farms in the region. In this study, each production unit (farm) was considered a decision-making unit (DMU), and its production efficiency was determined based on two models. Namely, the Charnes, Cooper, and Rhodes (CCR) model also known as Constant Return to Scale (CRS), and the Banker, Charnes, and Cooper (BCC) model also known as Variable Return to Scale (VRS).

Results and Discussion

The results showed that the input and output energies per cow per day were 173.34 and 166 MJ, respectively. Livestock feed and electricity accounted for 65.47% and 27.2% of the input energy, respectively, while the oil used for tiller-scraper lubrication of fertilizer collection accounted for only 0.01%, making it the lowest input energy. Energy efficiency, specific energy, and net energy were calculated as 0.95, 0.13 kg MJ^{-1}, 7.51 MJ kg^{-1},

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2022.76155.1100

and -7.20 MJ per cow, respectively. In the abiotic depletion impact group, animal feed, machinery, and livestock equipment had the highest environmental impacts. The results showed that animal feed had the highest environmental emissions in all impact groups except for abiotic depletion of fossil fuels where electricity had the greatest effect. CRS model determined that 7 units were efficient; with an average efficiency of 0.78. In the BCC model, 20 production units were calculated as highly efficient, and the average efficiency was computed to be 0.78.

Conclusion

In dairy farms in Khuzestan province, animal feed and electricity were found to have the highest energy consumption. In most impact groups, animal feed had the highest environmental effects. Specifically, in the abiotic depletion impact group, animal feed, livestock machinery, and equipment had the highest environmental effects. Considering the length of the heat period and the intensity of the solar flux, the installation of solar panels on the farm's roof to generate electricity can help reduce the consumption of non-renewable energy and mitigate radiation intensity under the roof.

Keywords: Data envelopment analysis, Environmental impacts, Industrial dairy farm, Life cycle assessment

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

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، ص ٤۰٤-۳۸۳

ارزیابی و بهینه‌سازی شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی با استفاده از ارزیابی چرخه حیات و تحلیل پوششی داده‌ها (مطالعه موردی: گاوداری‌های صنعتی شمال خوزستان)

رستم فتحی[۱]، محمود قاسمی‌نژاد رائینی[۱*]، رضا حسام‌پور[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹

چکیده

هدف از این پژوهش ارزیابی الگوی مصرف انرژی، اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی شاخص‌های انرژی در واحدهای صنعتی پرورش گاو شیری در استان خوزستان بود. برای تحلیل انرژی مصرفی، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی انرژی، به‌ترتیب از شاخص‌های انرژی، ارزیابی چرخه حیات و تحلیل پوششی داده‌ها با مدل اندرسون-پیترسون استفاده شد. تعداد ۳۰ واحد تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که خوراک دام و الکتریسیته به‌ترتیب با ۶۵/۴٪ و ۲۷/۲٪ بیشترین و روغن مصرفی برای روغن‌کاری تیلر-اسکریپر جمع‌آوری کود با ۰/۰۱ درصد کمترین انرژی ورودی را به خود اختصاص دادند. تعداد واحدهای کارا با استفاده از مدل بازگشت به مقیاس ثابت، ۷ واحد (و واحدهای ناکارا برابر ۲۳ واحد) تعیین شد و میانگین واحدهای تولید از نظر کارایی ۰/۷۸ به‌دست آمد. براساس مدل بازگشت به مقیاس ثابت یک واحد زمانی کارآمد است که کارایی آن برابر یک باشد، در غیر این‌صورت ناکارآمد است. هدف اصلی یافتن واحد مرجع برای یک واحد ناکارآمد نیز تشخیص میزان مازاد ورودی استفاده شده بود که براساس آن بتوان برای بهبود کارایی برنامه‌ریزی نمود. در اکثر گروه‌های اثر، خوراک دام و در گروه اثر پتانسیل تقلیل منابع غیرآلی، خوراک دام، ماشین‌ها و تجهیزات دامداری، بالاترین اثرات زیست‌محیطی را دارا بودند. در همه‌ی گروه‌های اثر غیر از پتانسیل تقلیل منابع غیرآلی مربوط به سوخت‌های فسیلی، خوراک دام بیشترین انتشارات زیست‌محیطی را دارا بود. با توجه به طول دوره گرما و شدت شار تابش خورشید، استفاده از صفحات خورشیدی روی سقف دامداری‌ها برای تامین برق مورد نیاز می‌تواند سبب کاهش مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر شود.

واژه‌های کلیدی: اثرات زیست محیطی، ارزیابی چرخه حیات، تحلیل پوششی داده‌ها، گاوداری صنعتی

مقدمه

بحران‌های زیست‌محیطی و تخریب منابع، بر امنیت غذایی در سراسر جهان تأثیر نامطلوب گذاشته است (Yadav *et al.*, 2019). ازاین‌رو هم‌زمان با اجرای برنامه‌ها برای تأمین امنیت غذایی و اهداف اقتصادی و اجتماعی، دستیابی به پایداری تولید، یک چالش بزرگ برای محققان و سیاست‌گذاران کشورها است (El Bilali, Callenius, Strassner, & Probst, 2019; Lindgren *et al.*, 2018). از این‌رو برای دستیابی به تولید پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده‌ی کارآمد از انرژی و به‌کارگیری سیستم‌ها و شیوه‌های کارآمد برای استفاده بهینه از منابع ضروری است (Fathollahi, Mousavi-Avval, Akram, & Rafiee, 2018). استفاده بهینه از انرژی در کشاورزی مشکلات زیست‌محیطی را کاهش داده و سبب تسهیل در دستیابی به کشاورزی پایدار می‌شود (Erdal, Esengün, Erdal, & Gündüz, 2007). از آن‌جا که موضوعات زیست‌محیطی و انرژی کاملاً به هم وابسته هستند، نیاز به درک جامعی برای مدیریت آن‌ها در تولید وجود دارد (Ciacci & Passarini, 2020). از مهم‌ترین عواملی که محیط‌زیست را تحت تاثیر قرار می‌دهد انتشار گازهای گلخانه‌ای است. انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر به اسیدی شدن اکوسیستم و مشکلات دیگری می‌شود که ممکن است گیاهان، حیوانات و انسان‌ها را تحت تأثیر قرار

۱- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.76155.1100

دهد (Audsley *et al.*, 1997). اکسید نیتروژن، دی‌اکسید کربن و متان، از آلاینده‌های اصلی در بخش کشاورزی بوده (Bhatta, Saravanan, Baruah, & Prasad, 2015) و سامانه‌های تولید لبنیات از منابع اصلی انتشار این آلاینده‌ها به‌شمار می‌آیند (FAO, 2018). نقش مزارع دامداری در انتشار گازهای گلخانه‌ای در درجه‌ی اول مربوط به انتشار متان و مونوکسید دی‌نیتروژن ناشی از فضولات دامی است (Chianese, Rotz, & Richard, 2009; Gerber *et al.*, 2013). تخمین زده شده است که بخش دامداری، تولید ۱۵٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان را به خود اختصاص می‌دهد (Philippe & Nicks, 2015).

پاترا و یو (Patra & Yu, 2015) بیان کردند که متان حاصل از تخمیر روده و کود دامی عامل انتشار ۲۷٪ از گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولیدات کشاورزی و ۸۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدشده در بخش دامداری است. سازمان خوار بار و کشاورزی سازمان ملل متحد نیز سهم بخش دامداری در انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در سراسر جهان را حدود ۷/۲٪ گزارش نموده است (FAO, 2010). بنابراین برای دولت‌ها و محققان، تدوین راهبردهای مؤثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اولویت زیادی قرار دارد (Pacheco, Waghorn, & Janssen, 2014; Philippe & Nicks, 2015).

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که انتشارات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت دامداری‌ها، بسته به شرایط مختلف از جمله سیستم تولید و شرایط بهره‌برداری متفاوت است. محققان بیان کرده‌اند که بیش‌تر عوامل موثر بر بهره‌وری که سبب افزایش تولید شیر می‌گردند، توسط بهره‌برداران واحدهای دامداری قابل مدیریت است (Siewert, Salfer, & Endres, 2018). محققان در مطالعه انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع دامی، گله‌های گاو و کود دامی، نتیجه گرفتند که اتخاذ بهترین شیوه‌های مدیریت تغذیه‌ای، زراعی و مدیریت کودی ممکن است میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را به مقدار قابل‌توجهی در کلیه سیستم‌های دامی کاهش دهد (Wattiaux, Uddin, Letelier, Jackson, & Larson, 2019). در تحقیقی چهار سیستم معمول تولید شیر در ایتالیا مقایسه شدند. در این تحقیق محققان افزایش فعالیت در واحدهای دامداری را نتیجه‌ی اتخاذ تدابیری برای رشد مقدار تولید شیر عنوان کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش فعالیت در دامداری‌ها منجر به کاهش اثرات زیست‌محیطی به‌ازای هر کیلوگرم شیر تولیدی برای آلاینده‌های اتروفیکاسیون دریایی، اتروفیکاسیون آب شیرین، استفاده از انرژی تجدیدناپذیر و از دست دادن تنوع زیستی می‌گردد. در مقابل، از بین رفتن تنوع زیستی محلی در هر متر مربع، با شدت تولید شیر ارتباطی مثبت داشت (Battini, Agostini, Tabaglio, & Amaducci, 2016). در پژوهشی ۱۸ واحد دامداری در جنوب کشور آلمان را مورد بررسی قرار گرفت. این مزارع مبتنی بر سه سناریو تحت عناوین تولید لبنیات با سیستم فشرده، سیستم توسعه‌داده‌شده و سیستم تولید ارگانیک دسته‌بندی شدند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان مصرف انرژی برای هر واحد محصول مربوط به سیستم تولید فشرده بود. بالاترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد تولیدی در سیستم توسعه‌یافته و بالاترین میزان اسیدی شدن در واحد سطح مزرعه، مربوط به سیستم ارگانیک بود (Haas, Wetterich, & Köpke, 2001). در پژوهشی دیگر پیامدهای زیست‌محیطی تشدید فعالیت دامداری‌ها در نیوزلند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش فعالیت در واحدهای دامداری در همه‌ی سطوح، سبب تشدید اثرات زیست‌محیطی در تمام زمینه‌ها (پتانسیل گرم شدن کره زمین، اسیدی شدن، اتروفیکاسیون، مصرف انرژی و غیره) هم در هکتار زمین مورد استفاده و هم در کیلوگرم شیر تولیدی گردید (Basset-Mens, Ledgard, & Boyes, 2009). در برخی تحقیقات به نقش نوع نهاده‌های مصرفی مورد استفاده در تغذیه دام در انتشارات زیست‌محیطی نیز اشاره شده است. در پژوهشی که به‌منظور ارزیابی زیست‌محیطی دو نوع علوفه‌ی ذرت سیلویی و یونجه مورد استفاده در دامداری‌ها، انجام شد، نتایج نشان داد که اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف ذرت سیلویی شامل پتانسیل گرم شدن کره زمین، اکسیداسیون فتوشیمیایی و اسیدی شدن، بالاتر از یونجه بود (Fathollahi *et al.*, 2018). تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده‌ی بیش‌تر از منابع، منجر به افزایش اثرات زیست‌محیطی در واحد سطح می‌شود (Jan, Repar, Nemecek, & Dux, 2019). بنابراین روش‌های مدیریت منابع باید بهبود یابد تا به افزایش پایداری تولید منجر شود. در استان خوزستان واحدهای متعدد پرورش صنعتی گاو شیری وجود دارد. در این سیستم‌ها، حیوانات از باقی‌مانده‌های محصولاتی که در مزارع تولید می‌شود و با استفاده از برخی محصولات خوراکی خریداری‌شده تغذیه می‌شوند. استفاده از فرآورده‌های فرعی برخی صنایع محلی به‌عنوان خوراک دام نیز یکی از ویژگی‌های مهم در تولید محصولات دامی است (Anzai *et al.*, 2016). با توجه به نقش مهم مدیریت مصرف انرژی در دستیابی به کشاورزی و دامداری پایدار، انجام پژوهش‌های علمی به‌منظور بهره‌برداری بهینه از منابع موجود، ضروری است. لذا هدف از این پژوهش ارزیابی الگوی مصرف انرژی، انتشارات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی شاخص‌های مربوطه در واحدهای صنعتی پرورش گاو شیری در شهرستان‌های شمال استان خوزستان بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در استان خوزستان واقع در جنوب‌غرب ایران با مساحت ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع انجام شده است. این استان بین ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و۴۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع گردیده است (Anonymous, 2017). براساس آمارنامه کشاورزی کشور، در سال ۱۳۹۸ تعداد ۲۶۹۸۳ واحد گاوداری صنعتی با تعداد ۱۷۰۰۰۰۰ راس گاو و گوساله در کشور وجود داشت که از این تعداد ۱۶۸۳۶ واحد مربوط به پرورش گاو شیری و مابقی، واحدهای پرواربندی بود (Anonymous, 2020). همچنین در سال ۱۳۹۹ تعداد گاوداری‌های صنعتی فعال استان خوزستان برابر ۵۲۶ واحد گزارش شد که از این تعداد ۲۴۷ واحد مربوط به گاوداری‌های شیری و ۲۷۹ واحد مربوط به پرواربندی بوده است (Anonymous, 2021b). علاوه بر این تولید کل شیر کشور در سال ۱۳۹۹ برابر با ۱۱۲۶۸۰۳ تن بود و استان خوزستان با تولید ۳۴۱۰۰۰ تن شیر، ۳۰٪ تولید شیر کشور را دارا داشت (Anonymous, 2021a). از این مقدار شیر تولیدی در استان خوزستان، ۱۰۹۱۰۶ تن آن (۵۱٪) از واحدهای پرورش گاو شیری تولید شد. این نشان می‌دهد که بخش اعظم تولید شیر در استان خوزستان در گاوداری‌ها تولید گردیده است (Anonymous, 2021b).

جامعه مورد مطالعه در این تحقیق واحدهای صنعتی پرورش گاو شیری در شهرستان‌های اندیمشک، دزفول، شوش و شوشتر بود. این شهرستان‌ها مجموعا دارای ۱۷۶۹ واحد بهره‌برداری از گاو و گوساله (صنعتی و سنتی) با تعداد ۳۸۴۵۱ راس گاو و گوساله بودند. اما تعداد مزارع پرورش صنعتی گاو شیری در این چهار شهرستان برابر تعداد ۱۱۲ واحد بود. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به وضعیت تعداد گاو و گوساله، تولید گوشت قرمز و شیر در کل کشور و استان خوزستان نشان داده شد (Anonymous, 2020).

جدول ۱– وضعیت موجودی گاو و گوساله در کشور و استان خوزستان بر اساس آمار سال ۱۴۰۰

Table 1- Status of cattle and calves in Iran and the province of Khuzestan based on data from 2020

عنوان Item	تعداد بهره‌بردار Number of personnel	تعداد گاو و گوساله Number of cows and calves	تولید گوشت Meat production (beef and veal) (Tonne)	تولید شیر Milk production (beef and veal) (Tonne)
Iran	619667	7986000	884300	1126803
Khuzestan	52700	331793	43960	341000

به‌منظور انتخاب واحدهای گاوداری و تکمیل پرسش‌نامه‌ها، از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده استفاده شد و تعداد نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) ۳۰ واحد صنعتی پرورش گاو شیری تعیین شد (Cochran, 1977).

$$n=\frac{\frac{z^2pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}(\frac{z^2pq}{d^2}-1)} \quad (۱)$$

در این رابطه 'n' حجم نمونه مورد نیاز، 'N' تعداد واحدهای گاوداری، "z" ضریب اطمینان (برابر با ۱/۹۶، نشان‌دهنده سطح اطمینان ۹۵٪)، "p" نسبت تخمینی یک ویژگی است که در جامعه وجود دارد (برابر با ۰/۵)، 'q' برابر 1- p (برابر ۰/۵) و 'd' نسبت انحراف خطای مجاز از میانگین جامعه (برابر با ۰/۰۵) است.

روش تحلیل انرژی مصرفی

برای تحلیل انرژی مصرفی ابتدا اطلاعات مربوط به همه‌ی نهاده‌ها و ستانده‌ها در هر واحد گاوداری صنعتی برآورد و با توجه به تعداد گاو موجود در هر واحد، مقدار نهاده‌ها و ستانده‌ها به‌ازای هر راس گاو محاسبه شد. در ادامه برای تبدیل مقدار نهاده‌ها و ستانده‌ها به انرژی ورودی و خروجی، از ضرایب هم‌ارز انرژی که بیان‌کننده میزان محتوای انرژی نهاده‌ها و ستانده‌ها برای تولید محصول است، استفاده شد. پس از محاسبه مقدار انرژی ورودی و خروجی، شاخص‌های انرژی به‌ازای یک راس گاو شیری محاسبه شد. علاوه بر این مقدار کل انرژی ورودی (انرژی نهاده‌ها) به‌ازای تولید یک تن شیر نیز به‌دست آمد. دلیل انجام گردآوری داده‌ها به‌صورت مقدار نهاده‌ها به‌ازای یک تن شیر این بود که برای انجام ارزیابی‌های زیست‌محیطی با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو، باید واحد کارکردی را براساس کیلوگرم یا تن بیان نمود و نرم‌افزار سیماپرو قادر است که اثرات زیست‌محیطی را به‌ازای یک مقدار مشخص از تولید انجام دهد. پس از برآورد مقدار انتشارات زیست‌محیطی بر حسب یک تن شیر در نرم‌افزار سیماپرو، این مقادیر به‌ازای یک گاو شیری تبدیل شد. لذا در این پژوهش شاخص‌های انرژی به‌ازای یک راس گاو شیری و اثرات زیست‌محیطی در ابتدا به‌ازای تولید یک تن شیر به‌دست آمد و سپس به مقدار اثرات زیست‌محیطی ایجاد شده به‌ازای یگ گاو شیری تبدیل شد. جدول ۲ هم‌ارز نهاده‌های ورودی و خروجی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان داده است.

جدول ۲- هم‌ارز نهاده‌های ورودی و خروجی در واحدهای صنعتی پرورش گاو شیری در استان خوزستان

Table 2- Inputs and outputs Equivalent in industrial units of dairy cattle in Khuzestan province

عنوان Item	واحد Unit	هم‌ارز انرژی Energy equivalent (MJ Unit^{-1})	منبع Reference
		نهاده‌ها (Input)	
نیروی انسانی Human labor	h	1.96	Bilalis *et al.* (2013)
ماشین‌ها و تجهیزات Machinery and equipment	h	62.7	Canakci, Topakci, Akinci, & Ozmerzi (2005)
سوخت دیزل Diesel fuel	L	56.31	Kitani, Jungbluth, Peart, & Ramdani (1999); De, Singh, & Chandra (2001)
روغن (روغنکاری ماشین و تجهیزات) Oil (lubrication machine and equipment)	L	47.8	Hamedani, Rajabi, Shabani, & Rafiee (2011)
الکتریسیته Electricity	kWh	11.93	Ozkan, Akcaoz, & Fert (2004)
ذرت سیلویی Silo corn	kg	2.2	Yaldiz, Ozturk, Zeren, & Bascetincelik (1993)
کاه گندم Wheat straw	kg	1	Komleh, Omid, & Keyhani (2011)
یونجه Alfalfa	kg	1.5	Shortall & Barnes (2013)
کنسانتره Concentrate	kg	6.3	Komleh *et al.* (2011)
آب مصرفی Consumption of water	m^3	1.02	Karimi, RajabiPour, Tabatabaeefar, & Borghei (2008)
		ستانده‌ها (Output)	
شیر Milk	kg	7.14	Average studies
کود دامی Manure	kg	0.3	Celik & Oztürkcan (2003)

جدول ۳- شاخص‌های انرژی در ارزیابی الگوی مصرف انرژی در واحدهای گاوداری شیری

Table 3- Energy indicators for evaluating the energy consumption pattern in dairy farming units

شاخص (Index)	واحد (Unit)	رابطه (Equation)	منبع (Reference)
نسبت انرژی Energy use efficiency	-	$\frac{\text{Output energy (MJ ha}^{-1})}{\text{Total input energy (MJ ha}^{-1})}$	Omid, Ghojabeige, Delshad, & Ahmadi, 2011
بهره‌وری انرژی Energy productivity	kg MJ^{-1}	$\frac{\text{Yield (kg ha}^{-1})}{\text{Total input energy (MJ ha}^{-1})}$	
شدت انرژی Specific Energy	MJ kg^{-1}	$\frac{\text{Total input energy (MJ ha}^{-1})}{\text{Yield (kg ha}^{-1})}$	
افزوده خالص انرژی Net energy	MJ ha^{-1}	Output energy (MJ ha^{-1}) - Total input energy (MJ ha^{-1})	

برای تعیین و تحلیل روابط بین انرژی ستانده و نهاده، از شاخص‌های انرژی شامل نسبت انرژی[1]، بهره‌وری انرژی[2]، شدت انرژی[3] و افزوده خالص انرژی[4] مطابق روابط جدول ۳ استفاده شد (Omid *et al.*, 2011).

1- Energy Ratio
2- Productivity Energy
3- Energy Specific
4- Net energy gain

تحلیل پوششی داده‌ها

به‌منظور انجام بهینه‌سازی وضعیت انتشارات زیست‌محیطی از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده گردید. افزایش بیش از حد استفاده از نهاده‌های مصرفی در فرآیند تولید، نه تنها باعث کاهش میزان محصول خروجی و کارایی سیستم‌های تولیدی می‌شود، بلکه باعث کاهش سودآوری اقتصادی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به هوا، خاک و آب می‌شود. با توجه به شکل ۱، در روش تحلیل پوششی داده‌ها هر واحد تصمیم‌گیری یک سازمان یا واحد منحصر به فرد است که در آن نهاده‌های ورودی از طریق انجام برخی فعالیت‌ها به خروجی سیستم تبدیل می‌شوند (Beiragh, Alizadeh, Beiragh, & Pamucar, 2021). هر واحد تصمیم‌گیری می‌تواند یک مزرعه، باغ، کارخانه و غیره باشد.

شکل ۱– واحدهای تصمیم‌گیری مختلف در تولید شیر

Fig.1. Decision-making units in milk production

در این پژوهش هر کدام از واحدهای تولیدی (هر کدام از گاوداری‌ها) به‌عنوان یک واحد تصمیم‌گیری[1] در نظر گرفته شد و کارایی واحدهای تولیدی براساس مدل‌های بازگشت به مقیاس و مدل بازگشت به مقیاس متغیر برای هر کدام از گاوداری‌ها تعیین شد (Huang, Shen, Sun, & Li, 2021). در این پژوهش شاخص کارایی فنی نیز محاسبه گردید. کارایی فنی یک شاخص است که کارایی هر واحد گاوداری را براساس مدل بازگشت به مقیاس محاسبه می‌کند. کارایی فنی یک عدد بین صفر و یک است. اگر میزان شاخص کارایی فنی برابر با یک باشد به معنی این است که سیستم تولیدی کارایی بسیار بالایی دارد. کارایی فنی از رابطه (۲) محاسبه شد (Singh, Singh, Sodhi, & Sharma, 2021).

$$\text{Efficiency}=\frac{u_1y_1^{j*}+u_2y_2^{j*}+\ldots+u_Ny_N^{j*}}{v_1x_1^{j*}+v_2x_2^{j*}+\ldots+v_Mx_M^{j*}} \qquad (۲)$$

که در آن $u_1, u_2, \ldots, u_N$ وزن خروجی‌ها است، $y_1^{j*}, y_2^{j*}, \ldots, y_N^{j*}$ خروجی واحد تصمیم‌گیری j است. $v_1, v_2, \ldots, v_M$ وزن ورودی‌ها است. $x_1^{j*}, x_2^{j*}, \ldots, x_M^{j*}$ ورودی واحد تصمیم‌گیری j است. این معادله به‌صورت خطی به رابطه (۳) تبدیل شد (Charnes, Cooper, & Rhodes, 1978).

1- Decision-making unit (DMU)

$$\max\theta=\sum_{n=1}^{N}u_ny_n^j \quad \text{subjected to} \quad \sum_{n=1}^{N}u_ny_n^j-\sum_{m=1}^{M}v_mx_m^j\le 0 \qquad (۳)$$

$$\sum_{m=1}^{M}v_mx_m^j=1 \text{ for all } j=1,2,\ldots,J$$

$$u_n\ge 0, v_m\ge 0 \text{ for all } n=1,2,\ldots,N \text{ and } m=1,2,\ldots,M$$

در این روابط θ نشان‌دهنده‌ی کارایی فنی، N و M به‌ترتیب تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها، u_n و v_m ضرایب برای ورودی Nام و خروجی Mام است. کارایی فنی خالص با استفاده از روش بازگشت به مقیاس متغیر محاسبه می‌شود که به‌عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی خطی باینری شناخته می‌شود (Huang *et al.*, 2021; Khoshroo & Singh, 2021).

$$\max Z=uy_i-u_i \quad \text{subjected to } Vx_i=1$$
$$-vX+uY-u_0\ e<0 \qquad (۴)$$
$$Z \text{ and } u_0 \text{ are free-sign}$$

در این روابط Z و u_0 متغیرهای عددی و بی‌بعد هستند، u و v ماتریس‌های وزنی ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند. Y و X ماتریس‌های

خروجی و ورودی هستند. y_i و x_i خروجی و ورودی واحد تصمیم‌گیری Jام می‌باشند. کارایی مقیاس از تقسیم کارایی مدل بازگشت به مقیاس ثابت به کارایی مدل بازگشت به مقیاس متغیر (رابطه ۵) محاسبه شد (Khoshroo & Singh, 2021).

$$SE^{1}=\frac{TE^{2}}{PTE^{3}} \qquad (۵)$$

ارزیابی کارایی با مدل اندرسون پیترسون[۴]

تحلیل پوششی داده‌ها با بهره‌گیری از تکنیک برنامه‌ریزی خطی و بهینه‌سازی، جهت تعیین کارایی هر واحد استفاده شده و به‌منظور هدف‌گذاری در افزایش کارایی برای هر یک از واحدها، یک مجموعه مرجع برای واحد ناکارا تعیین و کارایی واحدهای مختلف را نسبت به مرز کارایی مقایسه می‌نماید. مدل‌های پایه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها به دلیل عدم ایجاد رتبه‌های کامل بین واحدهای کارا، امکان مقایسهٔ واحدهای مزبور را به‌راحتی فراهم نمی‌آورند، زیرا در این مدل‌ها به همه‌ی واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ی کارا امتیاز کارایی یک اختصاص می‌یابد، در صورتی‌که نیاز به رتبه‌بندی واحدهای کارا و حفظ میزان عدم کارایی واحدهای ناکارا اجتناب‌ناپذیر است. در ارزیابی به روش AP (اندرسون- پیترسون) واحد تحت بررسی از ارزیابی حذف می‌شود و این باعث می‌شود عدد اختصاص یافته واحدهای کارا در مدل رتبه‌بندی کامل AP (اندرسون- پیترسون) بزرگ‌تر مساوی یک شده و رتبه‌بندی بین واحدهای کارا هم صورت پذیرد. این روش ارزیابی داده‌ها برای تعیین واحدهای فوق کارا می‌باشد که در سال ۱۹۹۳ توسط اندرسون و پیترسون ارائه شده است. این روش کارآمدترین واحد تولیدی را مشخص می‌کند و امکان رتبه‌بندی تمام گاوداری‌های منطقه را میسر می‌سازد. به عبارتی الگوی مناسب مصرف نهاده‌ها را در اختیار بخش مدیریت قرار می‌دهد. مدل رتبه‌بندی اندرسون پیترسون به‌صورت رابطه (۶) تعریف شد (Hosseinzadeh Lotfi *et al.*, 2013).

$$\begin{aligned} &\text{Min } Y_0=\theta-\varepsilon\left(\sum_{r=1}^{s} s_r^{+}+\sum_{i=1}^{m} s_i^{-}\right) \\ &St: \\ &\textstyle\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj}-s_r^{+}=y_{r0} && (r=1,2,\ldots,s) \\ &\textstyle\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij}+s_i^{-}=\theta x_{i0} && (I=1,2,\ldots,m) \\ &\lambda_j, s_r^{+}, s_i^{-}\geq 0 && (j=1,2,\ldots,n) \end{aligned} \qquad (۶)$$

که در آن s تعداد خروجی‌ها، m تعداد ورودی‌ها، n تعداد واحدها، ε یک مقدار بسیار کوچک، متغیر کمکی s_r^{+} کمبود در میزان تولید برای خروجی مشخص‌شده r را نشان داد و s_r^{-} متغیر کمکی دیگری بود که میزان ورودی i استفاده شده از آن را بیان کرد. در مدل رتبه‌بندی اندرسون- پیترسون، کارایی واحدهای کارا بزرگتر یا مساوی یک است و اصولاً رتبه‌بندی بین واحدهای کارآمد برای شناسایی بهترین واحدها انجام می‌شود.

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات یکی از روش‌های پذیرفته‌شده بین‌المللی برای بررسی اثرات زیست‌محیطی مرتبط با سامانه‌های تولید دامی است. این روش، اثرات زیست‌محیطی تمام فرآیندهای موجود در چرخه‌ی حیات یک فعالیت را ارزیابی می‌کند (Guinée & Lindeijer, 2002). به عبارتی دیگر ارزیابی چرخه حیات شامل بیان هدف، شناسایی ورودی و خروجی و سامانه‌ای برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیر آن‌ها است و می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی مسائل زیست‌محیطی مرتبط با تولید انواع محصولات کشاورزی باشد (Nabavi-Pelesaraei, Rafiee, Mohtasebi, Hosseinzadeh-Bandbafha, & Chau, 2019). راهنمایی‌های لازم برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی براساس روش ارزیابی چرخه حیات توسط ISO 14040 ارائه شده است (ISO, 2006). در این روش همه‌ی منابع و نهاده‌های ورودی به مزرعه و هم‌چنین مقادیر آلاینده‌هایی که با استفاده از انواع مختلف ورودی‌ها به محیط‌زیست رهاسازی می‌شوند، براساس واحد مرجع در نظر گرفته می‌شود (Guinée & Lindeijer, 2002). مراحل اصلی ارزیابی چرخه حیات شامل تعریف هدف و دامنه، آنالیز فهرست یا موجودی، ارزیابی اثرات و تفسیر نتایج است که در شکل ۲ نشان داده شده است. تعریف هدف و دامنه شامل تعیین واحد کارکردی، انتخاب روش تخصیص و مرز سیستم است. در مرحله آنالیز فهرست تجزیه و تحلیل موجودی منابع مورد استفاده و انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به هر فرآیند در تولید جمع‌آوری می‌شود. به این ترتیب برای هر محصول مصرف‌شده توسط یک واحد دامداری، یک موجودی چرخه حیات محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی ارزیابی اثرات، منابع استفاده‌شده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای موجود در چرخه حیات، به پیامدهای زیست‌محیطی برای هر دسته از اثرات ترجمه می‌شود و مرحله چهارم در ارزیابی چرخه حیات، تفسیر نتایج مرحله سوم می‌باشد (Nikkhah, Emadi, & Firouzi, 2015). این مراحل اغلب از این جهت با یکدیگر ارتباط متقابل دارند که نتایج یک مرحله می‌تواند مشخص کند که چگونه مراحل دیگر تکمیل می‌شوند.

1- SE= Scale efficiency
2- TE= Technical efficiency
3- PTE= Pure technical efficiency
4- Anderson & Peterson

شکل ۲- مراحل اصلی ارزیابی چرخه حیات

Fig.2. The main Phases of life cycle assessment methodology

روش مورد استفاده در ارزیابی چرخه حیات

روش‌های مختلفی مانند IMPACT 2002+, CML-IA V3.05، ReCePi2016، Eco-indicator99 و غیره برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی با روش چرخه حیات وجود دارد که براساس اهداف موردنظر پژوهش‌گر می‌توان از مدل‌های مختلف استفاده کرد (Rattanatum, Frauzem, Malakul, & Gani, 2018). روش ارزیابی چرخه حیات مورد استفاده در این پژوهش رویکرد پایه CML-IA V3.05 بود که اثرات زیست‌محیطی را در ۱۱ دسته مورد بررسی قرار می‌دهد (شکل ۳) (Chen, Habert, Bouzidi, Jullien, & Ventura, 2010).

توصیف سیستم و سناریوی پایه در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

تولید لبنیات در واحدهای دامداری صنعتی استان خوزستان تحت سیستم بهره‌برداری بسته یا نیمه‌باز بوده و بر تغذیه از طریق تهیه خوراک و بدون چرای مستقیم متکی است. بر این اساس، مرز سیستم در مدل ارزیابی چرخه حیات تعریف گردید (شکل ۴).

شکل ۳- توزیع ۱۱ دسته اثرات زیست‌محیطی براساس روش CML-IA V3.05

Fig.3. Distribution of 11 categories of environmental impacts based on the CML-IA V3.05 method

شکل ٤– مرز سامانه در ارزیابی چرخه حیات واحدهای گاوداری صنعتی

Fig.4. System boundary in life cycle assessment in units of Industrial dairy units

در این سیستم نهاده‌های ورودی شامل خوراک دام (کنسانتره، یونجه، جو، مکمل‌های غذایی و غیره)، الکتریسیته، انواع سوخت، نیروی کارگری و غیره بود. خروجی‌ها نیز شامل شیر و کود دامی بود که واحد کارکردی در این مطالعه یک تن شیر و یک تن کود دامی تعریف شد. اطلاعات مربوط به عملکرد شیر، کود و میزان و ترکیب خوراک‌ها از هر واحد گاوداری صنعتی با استفاده از پرسش‌نامه گردآوری شد. با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات، اثرات زیست‌محیطی برای کلیه فرآیندها تا لحظه‌ای که شیر تولید شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. با این حال مصرف سموم و داروها به‌دلیل عدم دسترسی دقیق به داده‌های معتبر و نیز تاثیر اندک آن‌ها از مطالعه حذف شدند. ساختمان‌ها نیز از این مطالعه حذف شدند، زیرا فرض شد که ساختمان‌ها در مزارع مختلف شبیه هم باشند (Erzinger, Dux, Zimmermann, & Badertscher Fawaz, 2004). انتشارات زیست‌محیطی به آب، خاک و هوا در طول فرآیند تولید محصولات دامی از گاوداری‌های شیری از طریق مصرف انواع نهاده‌ها اتفاق می‌افتد و باید در چرخه عمر شیر گنجانده شود. فاکتورهای زیست‌محیطی معمولا برای نشان دادن این انتشارات مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقادیر آن‌ها معمولا بسته به محل، مرزهای سیستم و سایر عوامل، متفاوت است. ارزیابی چرخه حیات منابع، براساس پایگاه داده‌های بین‌المللی صورت گرفت (Ecoinvent, 2021). در این پژوهش انتشارات مستقیم به هوا و خاک ناشی از مصرف سوخت دیزل با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴ در تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌کار گرفته شد. در نهایت نیز همه داده‌های گردآوری‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای اکسل و سیماپرو مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

در برخی از تحقیقات صورت گرفته در حوزه مدیریت منابع و تولید در گاوداری‌ها صرفا به بررسی و مطالعه‌ی جنبه‌هایی موردی از گاوداری‌ها پرداخته شده است. نوآوری این تحقیق در ارزیابی جامع واحدهای گاوداری صنعتی بود. این واحدها از نظر مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی بررسی شدند و بعد از برآورد شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی، تحلیل پوششی داده‌ها به‌منظور تعیین کارایی در هر کدام از واحدهای تولیدی و بهینه‌سازی مصرف منابع صورت گرفت. یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش استفاده از روش اندرسون–پیترسون برای ارزیابی واحدهای گاوداری صنعتی بود، زیرا مدل‌های پایه‌ای تحلیل پوششی داده‌ها به دلیل عدم ایجاد رتبه‌های کامل بین واحدهای کارا، امکان مقایسه واحدهای مزبور را به‌راحتی فراهم نمی‌آورند. ارزیابی به روش اندرسون– پیترسون کارآمدترین واحد تولیدی را مشخص می‌کند و امکان رتبه‌بندی تمام گاوداری‌های منطقه را میسر می‌سازد. لذا هدف از این پژوهش، انجام یک ارزیابی چندجانبه (انرژی، زیست‌محیطی و بهینه‌سازی با استفاده از روش اندرسون–پیترسون) بود.

نتایج و بحث

شاخص‌های انرژی

در جدول ۵ مقدار انرژی‌های ورودی به‌ازای هر راس گاو در روز نشان داده شده است.

شاخص‌های مصرف انرژی نیز بر همین اساس با استفاده از روابطی که در جدول ۳ بیان گردید، محاسبه شد. جدول ۶ نتایج محاسبه شاخص‌های انرژی را نشان داده است. نتایج محاسبه شاخص‌های انرژی نشان داد که انرژی ورودی برای یک راس گاو در روز برابر ۱۷۳/۳۴ مگاژول بود. کل انرژی خروجی حاصل از تولید شیر و کود به‌ازای هر راس گاو در روز ۱۶۶ مگاژول برآورد شد. خوارک دام با ۶۵/۴۷ درصد و روغن مصرفی برای روغن‌کاری تیلر (اسکریپر جمع‌آوری کود) با ۰/۰۱ درصد به‌ترتیب بیشترین و کمترین انرژی ورودی را به خود اختصاص دادند.

شکل ۵ سهم انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر و سهم هر کدام از نهاده‌های ورودی را نشان داده است. سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر (۶۸٪) به دلیل استفاده از نهاده‌هایی که به‌عنوان خوراک دام مصرف شدند نسبت به انرژی‌های تجدیدناپذیر بیشتر بود. خوراک دام با ۶۵٪ بیشترین مقدار انرژی ورودی را دارا بود. پس از خوراک دام الکتریسته با ۲۷٪ بیشترین انرژی ورودی را به خود اختصاص داد. مصرف بالای الکتریسته به دلیل استفاده زیاد واحدهای گاوداری از سامانه‌های مه‌پاش و فن‌ها در طول فصل گرم سال بود. قیمت پایین الکتریسته از دیگر دلایل مصرف بالای الکتریسته و کم‌توجهی تولیدکنندگان به مصرف بهینه آن در فرایند تولید بود. در پژوهشی خانعلی و همکاران (Khanali, 2021) نیز بیان کردند که به دلیل قیمت پایین نهاده‌های انرژی‌بر و نبود سیاست‌های تشویقی و تنبیهی برای تولیدکنندگان، مصرف نهاده‌هایی مانند سوخت دیزل در فرآیند تولید محصولات کشاورزی در ایران زیاد است.

جدول ٤- ضرایب انتشارات ناشی از مصرف سوخت دیزل در مزارع گاوداری شیری

Table 4- Emission coefficients caused by the diesel fuel consumption in dairy farms

انتشارات زیست‌محیطی (Emission)	واحد (Unit)	مقدار Value ($kgMJ^{-1}$)
انتشارات از مصرف سوخت دیزل به هوا Emissions due to diesel fuel to air	kg	
کربن‌دی اکسید (Carbon dioxide (CO_2))	kg	74.5
سولفور دی‌اکسید (Sulfur dioxide (SO_2))	kg	2.41E-2
متان (Methane (CH_4))	kg	3.08E-3
بنزن (Benzene)	kg	1.74E-4
کادمیوم (Cadmium (Cd))	kg	2.39E-7
کروم (Chromium (Cr))	kg	1.19E-6
کاپر (Copper (Cu))	kg	4.06E-5
دی‌نیتروژن مونواکسید (Dinitrogen monoxide (N_2O))	kg	2.86E-3
نیکل (Nickel (Ni))	kg	1.67E-6
روی (Zink (Zn))	kg	2.39E-5
بنزو (Benzo (a) pyrene)	kg	7.16E-7
آمونیوم (Ammonia (NH_3))	kg	4.77E-4
سلنیوم (Selenium (Se))	kg	2.39E-7
نیتروژن اکسید (Nitrogen oxides (NOx))	kg	1.06
کربن مونواکسید (Carbon monoxide (CO))	kg	0.15
ذرات ریز (Particulates (b2.5 µm))	kg	0.107
انتشارات به خاک (Emissions to soil)	kg	
کادمیوم (Cadmium (Cd))	kg	3.98E-09
سرب (Lead (Pb))	kg	1.75E-08
روی (Zinc (Zn))	kg	1.07E-05

جدول ۵– مقادیر انرژی نهاده‌ها و ستانده به‌ازای هر راس گاو در روز

Table 5- Energy values of inputs and outputs per cow per day

عنوان Item	واحد Unit	مقدار نهاده و ستانده The amount of input and output	مقدار انرژی Energy value	درصد Percentage
نهاده‌ها (Inputs)				
نیروی انسانی (Human labor)	h	1.86	3.66	2.1
ماشین‌ها و تجهیزات (Machinery and equipment)	h	0.04	2.77	1.6
سوخت دیزل (Diesel fuel)	L	0.10	5.53	3.1
روغن (روغنکاری ماشین و تجهیزات Oil (lubrication machine and equipment)	L	0.01	0.25	0.01
الکتریسیته (Electricity)	kWh	3.96	47.20	27.2
آب مصرفی (Consumption of water)	M^3	0.43	0.44	0.2
خوراک دام (Animal feed)	kg	75.66	113.49	65.4
کل انرژی ورودی (Total input energy)	MJ	-	173.34	100
ستانده‌ها (Outputs)				
شیر (Milk)	kg	23.06	164.62	0.99
کود (Manure)	kg	5.02	1.51	0.01
کل انرژی خروجی (Total output energy)	MJ	-	166	100

جدول ٦– نتایج ارزیابی شاخص‌های انرژی به‌ازای یک راس گاو شیری در روز

Table 6- Results of evaluation of energy indices per dairy cow per day

شاخص‌های انرژی (Energy indicators)	واحد (Unit)	مقدار (Amount)	درصد (Percentage)
کارایی انرژی (Energy efficiency)	–	0.95	–
انرژی خالص (Net energy)	MJ	-7.20	–
شدت انرژی (Specific Energy)	MJ kg^{-1}	7.51	–
بهره‌وری انرژی (Energy productivity)	kg MJ^{-1}	0.13	–
انرژی مستقیم (Direct energy)	MJ kg^{-1}	56.64	33%
انرژی غیرمستقیم (Indirect energy)	MJ kg^{-1}	116.70	67%
انرژی تجدیدپذیر (Renewable energy)	MJ kg^{-1}	117.59	68%
انرژی تجدیدناپذیر (Non-renewable energy)	MJ kg^{-1}	55.74	32%

با توجه به بالا بودن طول دوره گرما در استان خوزستان و از طرفی بالا بودن شار تابش خورشید، استفاده از صفحات خورشیدی برای تامین برق مورد نیاز واحدهای گاوداری می‌تواند ضمن کاهش مصرف الکتریسته، سبب کاهش مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر شود. با توجه به امکان نصب صفحات خورشیدی روی بام سایبان‌های محل نگهداری دام، کاربرد این سیستم ضمن صرفه‌جویی در فضای مورد نیاز برای نصب صفحات خورشیدی و تولید انرژی تجدیدپذیر، ممکن است شدت تابش در زیر سقف محل نگهداری دام را نیز کاهش دهد، که در این راستا انجام تحقیقات می‌تواند اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری در این زمینه را فراهم کند.

در پژوهشی، محققان بیان کردند که بیشترین هزینه در واحدهای گاوداری شیری مربوط به هزینه خوراک است و ۶۲ درصد از هزینه‌های متغیر تولید را به خود اختصاص می‌دهد. آن‌ها پیشنهاد کردند که دامداران گاوداری‌های شیری برای دستیابی به سود بیشتر یا باید هزینه‌های خوراک را به حداقل برسانند یا نرخ تبدیل خوراک را افزایش دهند (Kumbar, 2015). رفیعی و همکاران (Rafiee, Khoshnevisan, Mohammadi, Aghbashlo, & Clark, 2016) نیز با ارزیابی جنبه‌های زیست‌محیطی تولید شیر پاستوریزه در ایران با استفاده از رویکرد چرخه حیات بیان کردند که مرحله‌ی تولید خوراک دام مهم‌ترین بخش از نظر مصرف انرژی، انتشارات زیست‌محیطی و

هزینه‌های اقتصادی در تولید شیر است. این محققان بیان کردند که بیشترین سهم از کل هزینه‌های تولید شیر مربوط به خوراک دام (۴۳٪) بود. بیشترین انرژی ورودی در تولید شیر خام مربوط به نهاده‌های یونجه (۳۰/۳٪)، کنسانتره (۲۴٪)، کاه (۱۷/۸٪) و ذرت (۱۰/۹٪) برآورد شد. همچنین پتانسیل گرمایش جهانی برای تولید ۱۰۰۰ کیلوگرم شیر خام معادل ۴۵۷ کیلوگرم کربن دی‌اکسید گزارش شد. این محققان بیان کردند که بیش از ۶۹٪ از کل اثرات زیست‌محیطی در بخش فرآوری شیر ناشی از دو زیر سیستم تولید خوراک و مزارع پروش دام شیری بود و مرحله تولید خوراک بیشترین بخش از انتشارات زیست‌محیطی را به خود اختصاص داد.

شکل ۵– سهم انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر و نهاده‌های ورودی به‌ازای یک گاو شیری

Fig.5. Share of direct, indirect, renewable, non-renewable energy, and inputs per dairy cow

نتایج حاصل از تحلیل اندرسون- پترسون در مطالعه حاضر نشان داد که از بین واحدهای گاوداری مورد بررسی، گاوداری شماره ۲۲ بیشترین کارایی را دارد. این واحد می‌تواند الگویی جهت افزایش کارایی دیگر واحدهای تولیدی در استان خوزستان باشد. میزان انرژی مصرفی در این واحد تولیدی مربوط به نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات مورد استفاده، سوخت دیزل، روغن مورد استفاده در تجهیزات، الکتریسیته، خوراک دام و آب به‌ترتیب برابر با ۴/۱۶، ۰/۷۸۷، ۵/۳۵، ۰/۰۵، ۲۹/۸۳، ۱۱۰/۹۰، ۰/۴۱ به‌ازای هر راس دام در روز بود. در بررسی واحدهای گاوداری با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها، تعداد واحدهای کارا با استفاده از مدل بازگشت به مقیاس ثابت ۷ واحد تعیین شد. این روش بهینه‌سازی نشان داد که میانگین واحدهای تولید از نظر کارایی ۰/۷۸ می‌باشد. این در حالی است که در مدل بازگشت به مقیاس متغیر تعداد ۲۰ واحد تولیدی با کارایی قوی وجود داشت. میانگین کارایی مقیاس نیز که از تقسیم کارایی فنی و کارایی فنی خالص محاسبه گردید برابر با ۰/۷۸ محاسبه شد. در پژوهش حاضر تعداد ۷ واحد گاوداری دارای کارایی مقیاس قوی بودند. کارایی با چگونگی عملکرد یک واحد اقتصادی در فرآیند تولید سر و کار دارد. به عبارتی کارایی میانگین چگونگی عملکرد اجزا در فرآیند تولید و ترکیب بهینه آن‌ها در جریان رسیدن به حداکثر میزان تولید است. به‌عنوان مثال اگر با یک واحد تولیدی سر و کار داشته باشیم که از یک سطح سرمایه و نیروی کار در تکنولوژی ثابتی به تولید کالا یا خدمات می‌پردازد، تولید زمانی کارا است که بتوان بهترین استفاده را از میزان نیروی کار و سرمایه در دسترس به‌منظور دستیابی به تولید داشت، به‌نحوی که نتوان با این امکانات در

دسترس، تولید را از نظر فنی افزایش داد یا این‌که نتوان با جایگزینی سرمایه و کار به طوری‌که هزینه تولید افزایش نیابد، تولید را افزایش داد. کارایی یک عدد بین صفر و یک است و هرچه میزان آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده مدیریت بهتر نهاده‌های مصرفی در فرایند تولید است. همچنین واحدهای کارا واحدهایی هستند که عدد کارایی آن‌ها برابر با یک محاسبه شده است. جدول ۷ میزان مصرف انرژی هر کدام از نهاده‌های ورودی قبل و بعد از بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های مدل بازگشت به مقیاس ثابت و مدل بازگشت به مقیاس متغیر را نشان داده است.

جدول ۷- بهینه‌سازی انرژی مصرفی با استفاده از روش‌های بازگشت به مقیاس متغیر و مدل بازگشت به مقیاس ثابت برای نهاده‌های ورودی

Table 7- Optimization of energy consumption using VRS and CRS methods for inputs

نهاده‌ها/ستانده‌ها Input/ Output	مصرف انرژی Energy consumption (cow per day)	بهینه‌سازی بعد از روش بازگشت به مقیاس متغیر Optimization after the VRS method		بهینه‌سازی بعد از روش بازگشت به مقیاس ثابت Optimization after the CRS method	
نیروی انسانی Human labor	3.66	3.09	15.58	3.15	14.05
ماشین‌ها و تجهیزات Machinery and equipment	2.76	2.51	9.23	2.43	12.07
سوخت دیزل Diesel fuel	5.53	5.04	8.75	4.59	16.88
روغن Oil (lubrication machine and equipment)	0.25	0.23	8.66	0.21	15.48
الکتریسیته Electricity	47.20	43.70	7.41	35.13	25.56
آب مصرفی Consumption of water	0.44	0.42	5.02	0.40	8.73
خوراک دام Animal feed	113.49	110.02	3.06	100.15	11.57

مدل CCR[1] یکی از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها است. در این مدل مجموعه‌ای به‌صورت T= {x,y} که در آن ورودی یا ورودی‌ها x هستند، منجر به تولیدی خروجی y می‌شوند. این مجموعه را مجموعه امکان تولید می‌نامند. این الگو دارای بازده ثابت به مقیاس است و سعی دارد با انتخاب وزن‌های بهینه برای متغیرهای ورودی و خروجی واحد تحت بررسی، کسر کارایی این واحد (واحد صفر) را به گونه‌ای بیشتر کند که کارایی سایر واحدها از حد بالای یک تجاوز نکند. مدل BCC[2] مدل دیگری از تحلیل پوششی داده‌ها است که برای تحلیل و بررسی مفهوم کارایی در تحلیل پوششی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل هم دارای ماهیت ورودی و هم دارای ماهیت خروجی است. در این مدل ماکزیمم فاصله‌ی واحد تصمیم‌گیرنده از مرز کارایی سنجیده می‌شود. به‌طور کلی همیشه مدل CCR تعداد واحدهای کارا را کمتر از مدل BCC نشان می‌دهد. هیچ‌گونه الزام و یا دستورالعملی مبنی بر برتری هر یک از دو روش ذکر شده وجود ندارد و بخش مدیریت بسته به صلاح‌دید می‌تواند براساس هر یک از دو روش ارائه شده عمل نماید.

1- Charnes, Cooper, and Rhodes (CCR)
2- Banker, Charnes, and Cooper (BCC)

شاخص‌های زیست‌محیطی و بهینه‌سازی

شکل ۶ انتشارات زیست‌محیطی در سامانه‌ی تولید به‌ازای هر راس گاو در روز را در ۱۱ گروه تاثیر نشان داده است. نتایج نشان داد در همه‌ی گروه‌های تاثیر، غیر از پتانسیل تقلیل منابع غیرآلی مربوط به سوخت‌های فسیلی، خوراک دام بیشترین انتشارات زیست‌محیطی را دارا بود. در گروه تاثیر پتانسیل تخلیه غیر زنده، خوراک دام، ماشین‌ها و تجهیزات دامداری بالاترین تاثیر زیست‌محیطی را دارا بودند. پتانسیل تخلیه غیرزنده عاملی است که به معیار استفاده از منابع تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی و مواد معدنی برای تولید انرژی اشاره دارد. این شاخص بر حسب کیلوگرم معادل آنتیموان (Sb) اندازه‌گیری می‌شود (Attia, 2018). در گروه پتانسیل تخلیه غیرزنده مربوط به سوخت‌های فسیلی، الکتریسیته دارای بالاترین تاثیر بود. این موضوع بیان‌کننده مصرف منابع فسیلی می‌باشد که جهت تولید

الکتریسیته به‌کار می‌رود. تولید انرژی الکتریسیته از پنل‌های خورشیدی و تولید انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نقش موثری در کاهش این گروه از اثرات زیست‌محیطی داشته باشد. نتایج تحقیق رمدانی و همکاران (Ramedani, Abdi, Omid, & Maysami, 2018) در مطالعه گاوداری‌های شیری استان کرمانشاه نشان داد که خوراک دام با ۴۵/۱۲٪ بیشترین و ماشین‌های کشاورزی با ۰/۹۲ مگاژول در ماه کمترین مقدار انرژی ورودی را داشتند. این محققان بیان کردند که بیشترین میزان انرژی ورودی به‌ترتیب مربوط مصرف انرژی توسط بویلرها و تراکتورها بود. نتایج نشان داد که مقدار انتشار کربن دی‌اکسید به‌ازای تولید ۱ کیلوگرم شیر در فصل سرد سال معادل ۲/۷۱ کیلوگرم کربن‌دی اکسید بود. واتوکس و همکاران (Wattiaux *et al.*, 2019) بیان کردند که اتخاذ بهترین شیوه‌های مدیریت تغذیه دام ممکن است باعث کاهش قابل‌توجه تولید گازهای گلخانه‌ای شود. آن‌ها بیان کردند که روش‌های مدل‌سازی و ارزیابی باید بهبود یابد تا بتواند به تعامل بین اجزای سیستم در فرایند تولید شیر کمک کند. در پژوهشی بتینی و همکاران (Battini *et al.*, 2016) چهار سیستم تولید شیر در ایتالیا را مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزایش تولید شیر در مزارع منجر به کاهش تاثیرات زیست‌محیطی در گروه‌های تاثیر مسمومیت دریایی، مسمومیت آب‌های شیرین، تخریب تنوع زیستی و از تصرف اراضی به‌ازای هر کیلوگرم شیر می‌شود. در پژوهشی دیگر شاخص‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحدهای پرورش گاو شیری در استان تهران مورد بررسی قرار گرفت. میزان کل انرژی‌های ورودی و کارایی انرژی به‌ترتیب ۵۳۱۰۱/۹۹ مگاژول به‌ازای هر راس گاو و ۱/۱۵ گزارش شد. بیش‌ترین نهاده انرژی مصرفی، نهاده خوراک دام و بعد از آن سوخت دیزل بود. این دو نهاده بیش‌ترین انتشار گازهای گلخانه‌ای را با سهمی حدود ۷۲ درصد داشتند و سهم الکتریسیته در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حدود ۲۲ درصد گزارش شد (Sefidpari, Rafiei, & Akram, 2012). در بررسی ۱۸ واحد دامداری در جنوب کشور آلمان که مبتنی بر سه سناریو تحت عناوین تولید لبنیات با سیستم فشرده، سیستم توسعه داده شده و سیستم تولید ارگانیک تقسیم‌بندی شدند، نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان مصرف انرژی در واحد سطح و برای هر واحد محصول، مربوط به سیستم اول (سیستم تولید فشرده) بود. بالاترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح و واحد تولیدی در سیستم دوم (سیستم توسعه‌یافته) و بالاترین میزان اسیدی شدن در واحد سطح مزرعه مربوط به سیستم سوم (سیستم تولید ارگانیک) بود (Haas *et al.*, 2001). بررسی تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که تشدید اثرات زیست‌محیطی در دامداری‌ها در مطالعات مختلف، بسته به نوع تاثیر زیست‌محیطی در نظر گرفته شده، واحد عملکردی مورد استفاده و سیستم تولیدی مورد بررسی، متفاوت است. اغلب مطالعاتی که با استفاده از کاربردهای مشخص انجام شده، نشان می‌دهد که استفاده‌ی بیش‌تر از منابع، منجر به افزایش اثرات زیست‌محیطی در واحد سطح می‌شود (Jan *et al.*, 2019). در جدول ۸ نتایج بهینه‌سازی شاخص‌های زیست‌محیطی در ۱۱ گروه تاثیر با استفاده از روش‌های بازگشت به مقیاس ثابت و بازگشت به مقیاس متغیر در مطالعه‌ی حاضر نشان داده شده است.

در پژوهشی که به بررسی کارایی فنی و کارایی زیست‌محیطی گاوداری‌های شیری شهرستان سراب پرداخته شد، نتایج نشان داد که گاوداری‌هایی که کارایی بالاتری دارند، آلایندگی‌های کمتری تولید کرده و از لحاظ زیست‌محیطی نیز وضعیت بهتری دارند. همچنین نتایج نشان داد که سطح تحصیلات تولیدکننده، عملکرد شیر هر راس گاو و سن آن، از عوامل موثر بر کارایی زیست‌محیطی گاوداری‌ها بودند (Molaei & Thani, 2015). در پژوهشی سلطانعلی و همکاران (Soltanali, Emadi, Rohani, Khojastehpour, & Nikkhah, 2015) با بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید شیر در استان گیلان، انتشارات زیست‌محیطی را در پنج دسته‌ی گرمایش جهانی، اسیدی شدن، اوتروفیکاسیون، اکسیداسیون فتوشیمیایی و کاهش منابع به‌ازای تولید یک تن شیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شاخص مشخصه برای این دسته‌های تاثیر به‌ترتیب ۱۸۳۱ کیلوگرم معادل کربن دی‌اکسید، ۷/۹۷ کیلوگرم معادل دی اکسید گوگرد، ۳/۴۲ کیلوگرم معادل فسفات، ۰/۲۱ کیلوگرم معادل اتیلن و ۸۳۸/۳۹ مگاژول انرژی بود. همچنین گزارش شد که بیشترین پتانسیل برای ایجاد اثرات زیست‌محیطی به‌ترتیب مربوط به اسیدی شدن و گرمایش جهانی بود. میزان انتشارات مستقیم به‌ازای هر راس گاو در روز در جدول ۹ بیان شد.

شکل ٦– انتشارات زیست‌محیطی از سامانه تولید در ۱۱ گروه تاثیر

Fig.6. Environmental publications from the production system in the 11 impact groups

جدول ۸– بهینه‌سازی شاخص‌های زیست‌محیطی در ۱۱ گروه تاثیر با استفاده از روش‌های بازگشت به مقیاس ثابت و بازگشت به مقیاس متغیر برای اثرات زیست‌محیطی

Table 8- Optimization of environmental indicators in 11 impact groups using VRS and CRS methods for environmental impacts

دسته‌های تاثیر Impact group	واحد Unit	وضعیت کنونی واحدهای تولیدی Current status of production units		بعد از بهینه‌سازی با روش بازگشت به مقیاس متغیر After optimization by VRS method		بعد از بهینه‌سازی با روش بازگشت به مقیاس ثابت After optimization by CRS method	
		نرمال‌شده Normalized	تعیین‌شده Characterized	نرمال‌شده Normalized	تعیین‌شده Characterized	نرمال‌شده Normalized	تعیین‌شده Characterized
Abiotic depletion	kg Sb eq	5.0084E-12	8.68008E-07	4.8166E-12	8.34765E-07	4.39343E-12	7.61427E-07
Global warming potential	kg CO_2 eq	1.14331E-12	4.0542787	1.07791E-12	3.82239142	9.32832E-13	3.307914269
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2.43285E-12	0.627022298	2.29265E-12	0.590889736	2.02734E-12	0.522510138
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2.35809E-14	2.42602E-08	2.25304E-14	2.31794E-08	2.02413E-14	2.08244E-08
Freshwater aquatic	kg 1,4-DB eq	5.62596E-13	0.105950207	5.39512E-13	0.101602958	4.89028E-13	0.092095694
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6.30071E-12	0.047373757	6.04598E-12	0.045458478	5.48303E-12	0.041225776
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DBeq	4.27705E-11	136.2117696	4.10079E-11	130.5983015	3.70821E-11	118.095708
Photochemical oxidation	kg C_2H_4 eq	1.92565E-12	0.001766652	1.85144E-12	0.00169857	1.68211E-12	0.001543218
Acidification	kg SO_2eq	8.44675E-13	0.000153857	8.03866E-13	0.000146424	7.10954E-13	0.0001295
Eutrophication	kg $P^{-3}{}_4$	9.70923E-12	0.00651626	9.28261E-12	0.006229942	8.32228E-12	0.005585424

جدول ۹- میزان انتشارات مستقیم به‌ازای هر راس گاو در روز

Table 9- Direct emissions per cow per day

انتشارات مستقیم Direct emission	سوخت دیزل Diesel fuel			نیروی انسانی Human labor			الکتریسیته Electricity			کل Total		
Emission to air and soil	**Current status of production units**	**After optimization by VRS method**	**After optimization by CRS method**	**Current status of production units**	**After optimization by VRS method**	**After optimization by CRS method**	**Current status of production units**	**After optimization by VRS method**	**After optimization by CRS method**	**Current status of production units**	**After optimization by VRS method**	**After optimization by CRS method**
1. Carbon dioxide (CO_2) کربن دی‌اکسید	0.41111931	0.373363455	0.339802695	0.987	0.833	0.847	0.0106812	2.1228	1.7052	3.69259931	3.329163455	2.892002695
2. Sulfur dioxide (SO_2) سولفور دی‌اکسید	0.000132993	0.000120779	0.000109923					0.009882	0.007938	0.010814193	0.010002779	0.008047923
3. Methane (CH_4) متان	1.69966E-05	1.54357E-05	1.40482E-05							1.69966E-05	1.54357E-05	1.40482E-05
4. Cadmium (Cd) کادمیوم	1.31889E-09	1.19777E-09	1.09011E-09							1.31889E-09	1.19777E-09	1.09011E-09
5. Chromium (Cr) کرومیوم	6.56687E-09	5.96379E-09	5.42772E-09							6.56687E-09	5.96379E-09	5.42772E-09
6. Copper (Cu) کاپر	2.24046E-07	2.03471E-07	1.85181E-07							2.24046E-07	2.03471E-07	1.85181E-07
7. Dinitrogen monoxide (N_2O) دی‌نیتروژن مونواکسید	1.57826E-05	1.43331E-05	1.30448E-05							1.57826E-05	1.43331E-05	1.30448E-05
8. Nickel (Ni) نیکل	9.21569E-09	8.36936E-09	7.61705E-09							9.21569E-09	8.36936E-09	7.61705E-09
9. Benzo (a) pyrene بنزو	1.31889E-07	1.19777E-07	1.09011E-07				0.00003956			1.31889E-07	1.19777E-07	1.09011E-07
10. Ammonia (NH3) آمونیاک	3.95116E-09	3.5883E-09	3.26575E-09					0.0000366	0.0000294	3.9564E-05	3.66036E-05	2.94033E-05
11. Selenium (Se) سلنیوم	2.63227E-06	2.39053E-06	2.17565E-06							2.63227E-06	2.39053E-06	2.17565E-06
12. PAH (polycyclic hydrocarbons) هیدروکربن های چند حلقه ای	1.31889E-09	1.19777E-09	1.09011E-09				0.00478676			1.31889E-09	1.19777E-09	1.09011E-09
13. Nitrogen oxides (NOx) اکسید نیتروژن	0.005849483	0.005312285	0.004834777					0.0044286	0.0035574	0.010636243	0.009740885	0.008392177

14. Carbon monoxide (CO) مونواکسید کربن	0.000827757	0.000751739	0.000684167		0.000827757	0.000751739	0.000684167
15. Particulates (b2.5 µm) ذرات	0.000590467	0.00053624	0.000488039	0.0106812	0.000590467	0.00053624	0.000488039
				Emission to the soil انتشارات به خاک			
Cadmium (Cd) کادمیوم	2.20E-11	1.99E-11	1.82E-11		2.20E-11	1.99E-11	1.82E-11
Lead (Pb) سرب	9.66E-11	8.77E-11	7.98E-11		9.66E-11	8.77E-11	7.98E-11
Zinc (Zn) روی	5.90E-08	5.36E-08	4.88E-08		5.90E-08	5.36E-08	4.88E-08

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که نهاده‌های خوراک دام، الکتریسیته و سوخت دیزل بیشترین سهم از انرژی ورودی را دارا بودند. سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر (۶۸٪) به دلیل استفاده از نهاده‌هایی که به‌عنوان خوراک دام مصرف شدند نسبت به انرژی‌های تجدیدناپذیر بیشتر بود. مصرف بالای الکتریسته به دلیل استفاده زیاد واحدهای گاوداری از سامانه‌های مه‌پاش و فن‌ها در طول فصل گرم سال بود. نسبت انرژی ۰/۹۵ و بهره‌وری انرژی ۰/۱۳ کیلوگرم بر مگاژول محاسبه شد. نتایج نشان داد در همه‌ی گروه‌های اثر، غیر از پتانسیل تقلیل منابع غیر آلی مربوط به سوخت‌های فسیلی، خوراک دام بیشترین انتشارات زیست‌محیطی را داشت. در گروه تاثیر پتانسیل تقلیل منابع غیرآلی، خوراک دام، ماشین‌ها و تجهیزات دامداری بالاترین اثرات زیست‌محیطی را دارا بودند.

پیشنهادات

- با توجه به مصرف زیاد الکتریسیته (۲۷٪ از انرژی ورودی) در واحدهای گاوداری به‌دلیل استفاده از سیستم فن و مه‌پاش در فصول گرم سال و از طرفی طولانی بودن طول دوره گرما و شار تابشی زیاد خورشید در استان خوزستان، پیشنهاد می‌شود از صفحات خورشیدی برای تامین انرژی مورد نیاز فن‌ها و سیستم مه‌پاش استفاده شود.
- اثر نصب صفحات خورشیدی روی سقف واحدهای گاوداری بر تغییرات دمایی زیر سقف دامداری‌ها در منطقه مورد مطالعه، بررسی شود.
- استفاده از دستگاه‌های تولید بیوگاز در واحدهای گاوداری برای تامین بخشی از انرژی می‌تواند راهکار مناسبی برای تامین انرژی مورد نیاز باشد.
- از آن‌جا که مقدار انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی به ترکیب نوع و مقدار نهاده‌های ورودی و همچنین مدیریت آن‌ها بستگی دارد، پیشنهاد می‌شود با مدیریت صحیح تولید از جمله بهبود کیفیت جیره غذایی، اصلاح نژاد دام‌ها و غیره در واحدهای گاوداری، ضمن کارآمد کردن تولید، انتشارات زیست‌محیطی به‌ازای شیر تولیدی کاهش داده شود.

سپاسگزاری

داده‌های این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی شماره ۹۸۱/۴۶ است. بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان برای تامین بخشی از هزینه‌های انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Anonymous. (2017). Economic, social and cultural report of Khuzestan province. *Management and Planning Organization of Khuzestan Province*, *2*(1), 251. (In Persian).
2. Anonymous. (2020). Khuzestan Agricultural Jihad Organization, Khuzestan Databases, Khuzestan Agricultural Statistics, Livestock Products Statistics 2020: 5. (In Persian).
3. Anonymous. (2021a). Management and Planning Organization of Khuzestan Province, Deputy of Statistics and Information, Statistical Yearbook of Khuzestan Province, Agriculture, Forestry and Fisheries 217-206. (In Persian).
4. Anonymous. (2021b). Program & Budget Organization. Statistics Center of Iran, Agricultural Statistics System, Agricultural Office, Deputy of Statistical Plans and Registration Statistics 18-19. (In Persian).
5. Anzai, H., Wang, L., Oishi, K., Irbis, C., Li, K., Kumagai, H., Inamura, T., & Hirooka, H. (2016). Estimation of nitrogen and phosphorus flows in livestock production in D ianchi L ake basin, C hina. *Animal Science Journal*, *87*(1), 37-45. https://doi.org/10.1111/asj.12390
6. Attia, S. (2018). *Net zero energy buildings (nzeb)*. Concepts Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812461-1.00012-5
7. Audsley, E., Alber, S., Clift, R., Cowell, S., Crettaz, P., Gaillard, G., Hausheer, J., Jolliet, O., Kleijn, R., Mortensen, B., & Pearce, D. (1997). Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. Final Report, Concerted Action AIR3-CT94-2028. *European Commission, DG VI Agriculture*, *139*(1).
8. Basset-Mens, C., Ledgard, S., & Boyes, M. (2009). Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecological Economics*, *68*(6), 1615-1625. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.11.017
9. Battini, F., Agostini, A., Tabaglio, V., & Amaducci, S. (2016). Environmental impacts of different dairy farming systems in the Po Valley. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 91-102. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.062
10. Beiragh, R. G., Alizadeh, R., Beiragh, M. G., & Pamucar, D. (2021). Energy production efficiency assessment using network data envelopment analysis. *Research Square* (preprint). https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-173973/v1

11. Bhatta, R., Saravanan, M., Baruah, L., & Prasad, C. S. (2015). Effects of graded levels of tannin-containing tropical tree leaves on in vitro rumen fermentation, total protozoa and methane production. *Journal of Applied Microbiology*, *118*(3), 557-564. https://doi.org/10.1111/jam.12723
12. Bilalis, D., Kamariari, P. E., Karkanis, A., Efthimiadou, A., Zorpas, A., & Kakabouki, I., (2013). Energy inputs, output and productivity in organic and conventional maize and tomato production, under Mediterranean conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *41*(1), 190-194. https://doi.org/10.15835/nbha4119081
13. Canakci, M. U. R. A. D., Topakci, M. E. H. M. E. T., Akinci, I., & Ozmerzi., A. (2005). Energy use pattern of some field crops and vegetable production: Case study for Antalya Region, Turkey. *Energy conversion and Management*, *46*(4), 655-666. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.008
14. Celik, L., & Oztürkcan, O. (2003). Effects of Dietary Supplemental L-Carnitine and Ascorbic Acid on Performance, Carcass Composition and Plasma L-Carnitine Concentration of Broiler Chicks Reared under Different Temperature. *Archives of Animal Nutrition*, *57*(1), 27-38. https://doi.org/10.1080/0003942031000086644
15. Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1979). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, *3*(4), 339-338. https://doi.org/10.1016/0377-2217(79)90229-7
16. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A., & Ventura, A. (2010). LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. *Resources, Conservation and Recycling 54*(12), 231-1240. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.04.001
17. Chianese, D. S., Rotz, C. A., & Richard, T. L. (2009). Whole-farm greenhouse gas emissions: A review with application to a Pennsylvania dairy farm. *Applied Engineering in Agriculture*, *25*(3), 431-442. https://doi.org/10.13031/2013.26895
18. Ciacci, L., & Passarini, F. (2020). Life cycle assessment (LCA) of environmental and energy systems. *Energies*, *13*(22), 5892. https://doi.org/10.3390/en13225892
19. Cochran, W. G. (1977). The Estimation of Sample Size. Sampl Tech. 3, 72-90.
20. De, D., Singh, R. S., & Chandra, H. (2001). Technological impact on energy consumption in rainfed soybean cultivation in Madhya Pradesh. *Applied Energy*, *70*(3), 193-213. https://doi.org/10.1016/s0306-2619(01)00035-6
21. Ecoinvent. (2021). https://www.Ecoinvent.Org/Database/Ecoinvent-371/Ecoinvent-371.Html. 2021
22. El Bilali, H., Callenius, C., Strassner, C., & Probst, L. (2019). Food and nutrition security and sustainability transitions in food systems. *Food and Energy Security*, *8*(2), e00154. https://doi.org/10.1002/fes3.154
23. Erdal, G., Esengün, K., Erdal, H., & Gündüz, O. (2007). Energy use and economical analysis of sugar beet production in Tokat province of Turkey. *Energy*, *32*(1), 35-41. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.01.007
24. Erzinger, S., Dux, D., Zimmermann, A., & Badertscher Fawaz, R. (2004). LCA of animal products from different housing systems in Switzerland: relevance of feedstuffs, infrastructure and energy use DIAS report: 55.
25. FAO. (2010). Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector, A Life Cycle Assessment. A Report Prepared by Food and Agriculture Organization of the United Nations Animal Production and Health Division, Rome, Italy.
26. FAO. (2018). Climate change and the global dairy cattle sector – The role of the dairy sector in a low-carbon future. Rome. 36 pp. Licence: CC BY-NC-SA- 3.0 IGO.
27. Fathollahi, H., Mousavi-Avval, S. H., Akram, A., & Rafiee, S. (2018). Comparative energy, economic and environmental analyses of forage production systems for dairy farming. *Journal of Cleaner Production*, *182*, 852-862. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.073
28. Gerber, P. J., Hristov, A. N., Henderson, B., Makkar, H., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J. & Rotz, A. (2013). Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*, *7*(s2), 220-234. https://doi.org/10.1017/s1751731113000876
29. Guinée, J. B., & Lindeijer, E. eds., (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
30. Haas, G., Wetterich, F., & Köpke, U. (2001). Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *83*(1-2), 43-53. https://doi.org/10.1016/s0167-8809(00)00160-2
31. Hamedani, S. R., Rajabi, S., Shabani, Z., & Rafiee, Sh. (2011). Energy Inputs and Crop Yield Relationship in Potato Production in Hamadan Province of Iran. *Energy*, *36*(5), 2367-71. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013
32. Hosseinzadeh Lotfi, F., Jahanshahloo, G. R., Khodabakhshi, M., Rostamy-Malkhlifeh, M., Moghaddas, Z., & Vaez-Ghasemi, M. (2013). A review of ranking models in data envelopment analysis. *Journal of Applied Mathematics*, 2013. https://doi.org/10.1155/2013/492421
33. Huang, D., Shen, Z., Sun, C., & Li, G. (2021). Shifting from production-based to consumption-based nexus governance: evidence from an input–output analysis of the local water-energy-food nexus. *Water Resources Management*, *35*(6), 1673-1688. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02797-4
34. ISO. (2006). 14040 International Standard. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 14040 International Standard.

Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
35. Jan, P., Repar, N., Nemecek, T., & Dux, D. (2019). Production intensity in dairy farming and its relationship with farm environmental performance: Empirical evidence from the Swiss alpine area. *Livestock Science, 224*, 10-19. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.03.019
36. Karimi, M., RajabiPour, A., Tabatabaeefar, A., & Borghei, A. (2008). Energy analysis of sugarcane production in plant farms a case study in Debel Khazai Agro-industry in Iran. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science, 4*(2), 165-171.
37. Khanali, M., Akram, A., Behzadi, J., Mostashari-Rad, F., Saber, Z., Chau, K., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2021). Multi-Objective Optimization of Energy Use and Environmental Emissions for Walnut Production Using Imperialist Competitive Algorithm. *Applied Energy, 284*, 116342. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116342
38. Khoshroo, A., & Singh, S. (2021). Measuring Economic Efficiency of Kidney Bean Production using Non-Discretionary Data Envelopment Analysis. *Advances in Mathematical Finance and Applications, 6*(2), 233-244.
39. Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and Biomass Engineering, 5*, 330.
40. Komleh, P. S., Omid, M., & Keyhani, A. (2011). Study on energy use pattern and efficiency of corn silage in Iran by using data envelopment analysis (DEA) technique. *International Journal of Environmental Sciences, 1*(6), 1094.
41. Kumbar, N. (2015). Trakya Bolgesinde Buyykbas Hayvancilik isletmelerinin Etkinlik Analizi.
42. Lindgren, E., Harris, F., Dangour, A. D., Gasparatos, A., Hiramatsu, M., Javadi, F., Loken, B., Murakami, T., Scheelbeek, P., & Haines, A. (2018). Sustainable food systems- a health perspective. *Sustainability Science, 13*(6), 1505-1517. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0586-x
43. Molaei, M., & Thani, F. (2015). Estimation of technical efficiency and environmental efficiency of dairy farms in Sarab city (data envelopment analysis approach). *Animal Science Research (Agricultural Science), 25*(4), 141-155. (In Persian).
44. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, Sh., 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, 1259-1273. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.106
45. Nikkhah, A., Emadi, B., & Firouzi, S. (2015). Greenhouse gas emissions footprint of agricultural production in Guilan province of Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 12*, 10-14. https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.08.002
46. Omid, M., Ghojabeige, F., Delshad, M., & Ahmadi, H. (2011). Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis. *Energy Conversion and Management, 52*(1), 153-162. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.054
47. 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
48. Pacheco, D., Waghorn, G., & Janssen, P. H. (2014). Decreasing methane emissions from ruminants grazing forages: a fit with productive and financial realities?. *Animal Production Science, 54*(9), 1141-1154. https://doi.org/10.1071/an14437
49. Patra, A. K., & Yu, Z. (2015). Effects of garlic oil, nitrate, saponin and their combinations supplemented to different substrates on in vitro fermentation, ruminal methanogenesis, and abundance and diversity of microbial populations. *Journal of Applied Microbiology, 119*(1), 127-138. https://doi.org/10.1111/jam.12819
50. Philippe, F. X., & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 199*, 10-25. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015
51. Rafiee, S., Khoshnevisan, B., Mohammadi, I., Aghbashlo, M., & Clark. S. (2016). Sustainability evaluation of pasteurized milk production with a life cycle assessment approach: an Iranian case study. *Science of the Total Environment, 562*, 614-627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.070
52. Ramedani, Z., Abdi, R., Omid, M., & Maysami, M. (2018). Evaluating the Energy Consumption and Environmental Impacts in Milk Production Chain (Case Study: Kermanshah City of Iran). *Journal of Agricultural Machinery, 8*(2), 435-447. (In Persian).
53. Rattanatum, T., Frauzem, R., Malakul, P., & Gani, R. (2018). LCSoft as a tool for LCA: New LCIA methodologies and interpretation. *In Computer Aided Chemical Engineering, 43*, 13-18. Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64235-6.50005-x
54. Sefidpari, P., Rafiei, Sh., & Akram, A. (2012). *Comparison of energy consumption indicators and greenhouse gas emissions in industrial units of dairy cattle and laying hens in Tehran province*. First National Conference on Strategies for Achieving Sustainable Development, Tehran, Ministry of Interior. (In Persian).
55. Shortall, O. K., & Barnes, A. P. (2013). Greenhouse gas emissions and the technical efficiency of dairy farmers. *Ecological Indicators, 29*, 478-488. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.022

56. Siewert, J. M., Salfer, J. A., & Endres, M. I. (2018). Factors associated with productivity on automatic milking system dairy farms in the Upper Midwest United States. *Journal of Dairy Science*, *101*(9), 8327-8334. https://doi.org/10.3168/jds.2017-14297
57. Singh, P., Singh, G., Sodhi, G. P. S., & Sharma, S. (2021). Energy optimization in wheat establishment following rice residue management with Happy Seeder technology for reduced carbon footprints in north-western India. *Energy*, *230*, 120680. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120680
58. Soltanali, H., Emadi, B., Rohani, A., Khojastehpour, M., & Nikkhah, A. (2015). Life cycle assessment modeling of milk production in Iran. *Information Processing in Agriculture*, *2*(2), 101-108. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.06.003
59. Wattiaux, M. A., Uddin, M. E., Letelier, P., Jackson, R. D., & Larson, R. A. (2019). Invited Review: Emission and mitigation of greenhouse gases from dairy farms: The cow, the manure, and the field. *Applied Animal Science*, *35*(2), 238-254. https://doi.org/10.15232/aas.2018-01803
60. Yadav, G. S., Das, A., Lal, R., Babu, S., Datta, M., Meena, R. S., Patil, S. B., & Singh, R. (2019). Impact of no-till and mulching on soil carbon sequestration under rice (*Oryza sativa* L.)-rapeseed (*Brassica campestris* L. var. rapeseed) cropping system in hilly agro-ecosystem of the Eastern Himalayas, India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 275, 81-92. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.001
61. Yaldiz, O., Ozturk, H. H., Zeren, Y., & Bascetincelik, A. (1993). October. *Energy usage in production of field crops in Turkey*. In 5th International Congress on Mechanisation and Energy Use in Agriculture. Turkey: Kusadasi 11-14.

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 405-426

Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh)

M. Nowroozipour[1], R. Tabatabaei koloor[2*], A. Motevali[2]

1- MSc Student in Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir)

Received: 11 April 2022
Revised: 30 May 2022
Accepted: 06 June 2022
Available Online: 11 June 2022

How to cite this article:
Nowroozipour, M., Tabatabaei koloor, R., & Motevali, A. (2023). Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh). *Journal of Agricultural Machinery, 13*(4), 405-426. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

Introduction

The world's growing population has led to an inevitable increase in energy demand, and this, in addition to the depletion of non-renewable energy sources, can lead to several environmental issues. Wind power has proven to be a reliable and sustainable source of electricity, particularly in light of the pressing need to mitigate environmental impact and promote the use of renewable energy. The purpose of this research is to investigate and compare the environmental effects of electricity production from two wind power plants, Aqkand and Kahak, using wind turbines with a capacity of 2.5 megawatts for a period of three different lifetimes (20, 25, and 30 years).

Materials and Methods

The present study investigates the environmental effects of electricity generation during the life cycle of wind farms (Kahak and Aqkand) during the construction and operation of these power plants and the cumulative exergy demand index. The specifications of the wind turbines used in the current research are: turbine capacity of 2.5 MW, rotor diameter of 103 meters, rotor weight of 56 tonnes, three blades, each blade is 50.3 meters long and weighs 34.8 tonnes. The turbines are manufactured by Mapna and used in dry conditions. A functional unit of one kilowatt of electricity was selected and the data were analyzed in SIMAPRO software using IMPACT2002+ method with 15 midpoint indicators and four final indicators.

Results and Discussion

The results showed that the stage of raw materials and production has the highest impact on the creation of midpoint indicators, which is due to extraction, manufacturing, and production of parts such as steel casting using non-renewable energy and activities such as high-temperature welding. The total environmental index of Aqkand and Kahak wind power plants for 1 kWh of generated electricity was 5.84 and 4.45 µPt respectively, more than half of which belongs to the damage to human health category. The investigation of the ionizing radiation index showed that the use of diesel fuel in the installation phase resulted in the highest amount of emissions in both of the power plants, so the share of pollutant emissions in the raw materials and production phase is more than 40%, and in the installation phase due to diesel fuel consumption was more than 48%. The investigation of the eutrophication index showed that the raw materials and production stage accounted for more than 95% of the damage to the ecosystem quality category, and in the meantime, copper and electrical components had the highest amount of contribution to the raw materials and production stage. Additionally, diesel fuel accounted for the largest part of the result in the installation stage, and the transportation and maintenance stage included less than 1% of this result. The investigation of the renewable energy consumption

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

index showed that the stage of raw materials and turbine production in the Aqkand power plant with a share of 68% and the Kahak power plant with a share of 70% had the greatest effect on the category of resource damage. Also, the installation and commissioning phase was the second most effective factor in the category of resource damage due to the use of diesel fuel. The study of the cumulative exergy demand index showed that non-renewable-fossil resources had the largest share in exergy demand (0.15 MJ) to produce one kilowatt of electricity generated from power plants.

Conclusion

In this study, the results showed that in both plants, about 70% of various respiratory effects, 60% of human health issues, and 25% of acidification and global warming are caused in the raw materials and manufacturing phase. Furthermore, the installation phase is responsible for 17% and 16% of climate change in the Aqkand and Kahak power plants respectively, and between 14% and 26% of other environmental factors.

Keywords: Cumulative exergy demand, Environmental impact, Iran, Wind energy

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

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٤٢٦-٤٠٥

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه بادی (مطالعه موردی: کهک قزوین و آقکند میانه)

ماریه نوروزی پور[۱]، رضا طباطبایی کلور[۲]*، علی متولی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

چکیده

روند رو به رشد جمعیت جهان، افزایش اجتناب‌ناپذیر تقاضای انرژی را به همراه داشته و این امر به غیر از پایان‌پذیر بودن منابع انرژی تجدیدناپذیر می‌تواند مشکلات فراوان زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد. با توجه به اهمیت اثرات زیست‌محیطی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از باد می‌تواند منبعی بسیار مطمئن برای تولید انرژی الکتریسته باشد. مطالعه حاضر به بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در طول چرخه حیات نیروگاه‌های بادی (کهک و آقکند) در طول مراحل احداث تا بهره‌برداری این نیروگاه‌ها و شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی، پرداخته است. در مطالعه حاضر واحد کارکردی یک کیلووات الکتریسیته انتخاب شد و داده‌ها در نرم‌افزار سیماپرو به روش IMPACT2002+ در قالب ۱۵ شاخص میانی و چهار شاخص نهایی تحلیل شدند. نتایج نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید (از استخراج تا ساخت اجزا) بالاترین تاثیر را در ایجاد شاخص‌های میانی به همراه داشت که دلیل این امر استخراج، ساخت و تولید قطعات ازجمله ریخته‌گری فولاد با استفاده از انواع انرژی‌های تجدیدناپذیر و فعالیت‌هایی همچون جوشکاری در دمای بالا می‌باشد. همچنین میزان شاخص کل زیست‌محیطی دو نیروگاه بادی آقکند و کهک به‌ازای ۱ کیلووات ساعت الکتریسیته تولیدی به‌ترتیب برابر ۵/۸۴ و ۴/۴۵ (µPt) بود و از این مقدار به‌ترتیب ۳/۰۲ و ۲/۳۱ (µPt) مربوط به دسته خسارت سلامت انسان بود. همچنین بررسی شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی نشان داد که منابع تجدیدناپذیر-فسیلی بیشترین سهم در تقاضای اکسرژی (به میزان ۰/۱۵۳MJ) را به‌ازای تولید یک کیلووات الکتریسیته از نیروگاه‌های احداث شده به خود اختصاص دادند.

واژه‌های کلیدی: اثرات زیست‌محیطی، انرژی باد، ایران، تقاضای اکسرژی تجمعی

مقدمه

وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر، سرعت تخلیه این دست از انرژی‌ها را به دلیل افزایش اجتناب‌ناپذیر تقاضای جهانی انرژی تسریع می‌نماید. به‌غیر از پایان‌پذیر بودن انرژی‌های تجدیدناپذیر، با افزایش جمعیت کره زمین و تقاضای بیشتر برای انرژی، سایر مشکلات مرتبط با این منابع اعم از آلودگی هوا، بارش باران‌های اسیدی، گرم‌شدن کره زمین، تخریب لایه ازن، تخریب جنگل‌ها و انتشار مواد رادیواکتیو افزایش می‌یابد (Azarpour, Suhaimi, Zahedi, & Bahadori, 2013). یکی از راه‌حل‌های کمبود انرژی و وابستگی به منابع تجدیدناپذیر، افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است (Amani & Hosseini Shamachi, 2009). علی‌رغم تلاش‌ها و برنامه‌ریزی‌ها برای کاهش مصرف انرژی، مصرف انرژی‌های اولیه در سال ۲۰۱۹ به میزان ۱/۳٪ کاهش یافت که کمتر از نیمی از نرخ سال ۲۰۱۸ (۲/۸٪) بود. بررسی‌ها نشان داد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان در سال ۲۰۱۹ نسبت به سال ۲۰۱۸ افزایش یافت و در مجموع به سمت توسعه این فناوری‌ها قدم برداشته شد (British, 2006). همچنین بررسی‌های انجام‌شده در ایران نشان داد که میزان برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، ۵۴ درصد افزایش و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، ۵۲ درصد کاهش داشت. مطابق آمار وزارت نیرو

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، ۱۷ درصد رشد داشته به طوری که ظرفیت نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و الکتریسیته آبی کوچک در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷، به‌ترتیب ۶ ، ۳۹ و ۱۷ درصد افزایش داشته است. نتایج مطالعات در مورد استفاده احتمالی از انرژی تجدیدپذیر در ایران نشان می‌دهد که هدف ۲۰۰۰۰ مگاوات در سال ۲۰۲۵ عملی می‌باشد (Statistical, 2019). باد یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر بوده و کشور ایران به‌عنوان کشوری دارای مناطق بادخیز فراوان، در صورت استفاده از منابع این انرژی، می‌تواند بخش عظیمی از انرژی‌های مورد نیاز خود را تامین کند (Motahari, Ahmadian, Abedi, & Ghaffarzadeh, 2014). حدود ۱٪ از تابش خورشیدی دریافت‌شده به دلیل گرادیان دما منجر به همرفت قابل‌توجه و در نتیجه به انرژی باد تبدیل می‌شود (Le Gourieres, 2014). فناوری باد به‌عنوان ظرفیتی جدید در سیستم‌های قدرت در سراسر جهان رشد کرده است (Billinton & Gao, 2008). بررسی‌ها نشان می دهد که ظرفیت اسمی انرژی باد در کشور حدود ۶۰۰۰۰ مگاوات می‌باشد که میزان انرژی تولیدی تا ۱۸۰۰۰ مگاوات قابل‌استحصال است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای کشور در زمینه انرژی باد و به صرفه بودن سرمایه‌گذاری در این صنعت است (Aghahosseini, Bogdanov, Ghorbani, & Breyer, 2018). بررسی‌های زیست‌محیطی انجام شده در مورد انرژی باد نشان می‌دهد که مرحله‌ی تولید توربین و ساخت نیروگاه بادی، عامل مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های بادی می‌باشد که درصد انتشار تجمعی گازهای گلخانه‌ای در حدود ۷۳–۹۰ درصد و بقیه مراحل که شامل بهره‌برداری و نگهداری، تخریب نیروگاه، حمل و نقل حدود ۱۰–۲۸ درصد را به خود اختصاص می‌دهد (Joseph, Lucille, & Bruce, 2000). اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی با استفاده از باد، توجه زیادی را در جهان به خود جلب کرده و به دلیل ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی توسط ارزیابی چرخه حیات، به‌طور گسترده از این روش در ارزیابی زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Bidstrup, 2015). ارزیابی چرخه حیات یک روش مفید برای ارزیابی کمی اثرات زیست‌محیطی در طی یک فرایند، تولید یک محصول یا تکنولوژی، در سراسر مراحل مختلف چرخه حیات است که شامل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل ورودی‌ها، خروجی‌ها و پیامدهای بالقوه زیست‌محیطی است (Standardization, 2006).

پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر با استفاده از دانش بومی به تولید فناوری‌ها و تجهیزات مختلف نیروگاه‌های بادی (تولید ژنراتورها، ناسل، برج و غیره) پرداخته شد و این تجهیزات در نیروگاه‌های کهک قزوین و آقکند میانه نصب شدند. یکی از دغدغه‌های مهم در این نیروگاه‌ها، میزان اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریسته در نیروگاه‌های بادی با استفاده فناوری‌های بومی می‌باشد.

در پژوهشی محققان به بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در انواع مختلف نیروگاه‌های تولید الکتریسیته که شامل نیروگاه‌های هسته‌ای، نیروگاه‌های فتوولتائیک، نیروگاه‌های برق آبی، نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های سوخت فسیلی بود، در قالب ارزیابی چرخه حیات (LCA[1]) پرداختند. نتایج نشان داد که نیروگاه‌های سوخت فسیلی دارای بیشترین و نیروگاه‌های هسته‌ای و برق آبی دارای کمترین مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای بودند (Al-Muhammad, & Piriaei, 2013). در پژوهشی به بررسی اثرات زیست‌محیطی توربین‌های بادی ۲ مگاواتی دارای ژنراتورهای دو سویه القایی مدرن (که بیشترین استفاده را در مزارع بادی دارند) پرداخته شد. بر این اساس، یک ارزیابی چرخه زیستی گسترده روی توربین باد اجرا شد که تمام مراحل ساخت تا برچیدن و فرآوری ضایعات در پایان عمر مفید آن را پوشش می‌داد. نتایج نشان داد که آلودگی دی‌اکسیدکربن بر کیلووات ساعت الکتریسیته تولید شده با افزایش توان نامی توربین کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر آلودگی و اثرات زیست‌محیطی این انرژی، بسیار کمتر از سایر منابع تولید الکتریسیته است (Zare Thani & Nisari, 2016). در مطالعه‌ای دیگر به بررسی اثرات زیست‌محیطی نیروگاه بادی و برق آبی سفیدرود منجیل پرداخته شد. نتایج نشان داد که نیروگاه برق آبی منجیل نسبت به نیروگاه بادی دارای پیامدهای زیست‌محیطی بیشتری می‌باشد و در نیروگاه بادی، فاز احداث و در نیروگاه برق آبی فاز بهره‌برداری دارای بیشترین اثرات زیست‌محیطی است. همچنین نتایج نشان داد که انتشار آلاینده‌ها از توربین‌های بادی در زمان تولید الکتریسیته ناچیز بوده و در زمان ساخت توربین‌ها و احداث نیروگاه بادی نیز میزان انتشار آلاینده کم بوده است (Rezaei Kalaj & Oashk Sarai, 2014). در مطالعه‌ای دیگر اثرات‌زیست‌محیطی یک مزرعه بادی در کشور اتیوپی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که متوسط شاخص گرمایش جهانی در هر کیلووات ساعت الکتریسیته تولیدشده، برای تغییرات آب و هوایی $kg\ CO_2eq$ ۳۳/۶ گرم بود. مقادیر تقاضای انرژی تجمعی (CED[2]) و بازگشت انرژی (EROI[3]) برای سیستم انرژی بادی به‌ترتیب MJ ۰/۳۹۳ و ۹/۲ بود (Teffera, Assefa, Björklund, & Assefa, 2021). در پژوهشی دیگر به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید انرژی از باد و ذغال‌سنگ پرداخته شد. نتایج نشان داد که تولید انرژی با استفاده از باد اثرات زیست‌محیطی کمتری

1- Life Cycle Assessment
2- Cumulative Energy Demand
3- Energy Return on Investment

نسبت به انرژی ذغال‌سنگ دارد. با این حال، نتایج نشان داد که تولید انرژی از باد به زمینی با مساحت بسیار بیشتر از انرژی ذغال‌سنگ نیاز دارد (Moore, 2021). ارزیابی اثرات زیست‌محیطی دو نوع برج توربین بادی (lattice and tubular) با اندازه و ظرفیت تولید انرژی یکسان با کمک ارزیابی چرخه حیات صورت پذیرفت و نتایج نشان داد که میزان انتشار CO_2 با در نظر گرفتن چرخه حیات برج و پایه در برج lattice ۶۵٪ پایین‌تر بود (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). در پژوهشی دیگر به تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته از انرژی باد و ذغال‌سنگ در چین پرداخته شد. نتایج نشان داد که به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریسیته، انرژی باد تنها ۴٪ از کل میزان انتشار دی‌اکسید کربن و هزینه‌های زیست‌محیطی مربوط به ذغال‌سنگ را ایجاد می‌کند (Li, Jiang, Dong, Wei, & Liao, 2020). در پژوهشی دیگر یک توربین بادی ۵ کیلوواتی با هدف توسعه توربین‌های بادی محور عمودی در مقیاس کوچک‌تر با دیدگاه کاهش تغییرات آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اکثر اثرات زیست‌محیطی به جای خود توربین، مربوط به زیرساخت‌های پشتیبانی‌کننده، مانند دکل و پایه‌ها می‌باشد (Kouloumpis, Sobolewski, & Yan, 2020). در پژوهشی دیگر نتایج بررسی چرخه حیات برج‌های توربین بادی فولادی ترکیبی بلند و نصب‌شده در خشکی با ارتفاع ۱۸۵ متر، نشان داد که بیشترین اثرات زیست‌محیطی در مرحله تولید توربین و به دنبال آن مرحله نصب ایجاد می‌شود. برج با بیشترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی همراه است (Gkantou, Rebelo, & Baniotopoulos, 2020). در پژوهشی دیگر به بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توربین‌های بادی نصب‌شده در خشکی و دریا با ظرفیت اسمی ۲ مگاوات پرداخته شد. نتایج نشان داد که شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای برای توربین بادی خشکی $kg\ CO_2eq\ MJ^{-1}$ ۰/۰۸۲ و برای توربین بادی دریایی $kg\ CO_2eq\ MJ^{-1}$ ۰/۱۳۰ بود. همچنین نتایج نشان داد که توربین‌های بادی خشکی و دریایی دارای شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار کمتری نسبت به نیروگاه‌های ذغال‌سنگ بودند (Wang *et al.*, 2019). در تحقیقی دیگر اثرات زیست‌محیطی سه فناوری الکتریسیته آبی، هسته‌ای و انرژی باد با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کمترین میزان پتانسیل گرمایش جهانی متعلق به انرژی باد ($gCO_2eq\ kWh^{-1}$ ۳/۲±۲۸/۶) و در رتبه‌های بعدی انرژی هسته‌ای ($gCO_2eq\ kWh^{-1}$ ۱/۵±۱۲/۴) و برق آبی ($gCO_2eq\ kWh^{-1}$ ۰/۴±۳/۵) بود (Wang *et al.*, 2019). در پژوهشی دیگر به ارزیابی چرخه حیات ۲۰۰ توربین بادی (خرید مواد، ساخت، حمل و نقل، نصب، بهره‌برداری و نگهداری و پایان زندگی) مدل Gamesa 2-MW در تگزاس امریکا پرداخته شد. نتایج نشان داد که فاز تولید توربین بیشترین اثرات زیست‌محیطی را داشت. بررسی‌ها برای یک عمر ۲۰، ۲۵ و ۳۵ ساله نشان داد که توربین‌ها به‌ترتیب ۳/۴، ۴/۲ و ۵/۱ برابر بیشتر از انرژی مصرفی می‌توانند تولید انرژی داشته باشند (Alsaleh & Sattler, 2019). بررسی منابع صورت‌گرفته نشان داد که مطالعات زیادی به‌منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی خارج از کشور صورت گرفته است. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور نیز نشان داد که تاکنون پژوهشی در ارتباط با ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی انجام نشده است. از طرف دیگر پژوهش‌های انجام شده در سایر کشورها، بیشتر معطوف بر نیروگاه‌هایی بود که تجهیزات آن‌ها توسط شرکت‌های خارجی تولید شده است. از این رو در پژوهش حاضر، شاخص‌های زیست‌محیطی دو نیروگاه بادی داخل کشور که توسط شرکت‌های داخلی تولید و نصب شده است در بازه زمانی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال از منظر چرخه حیات و میزان انتشارات آلاینده‌های زیست‌محیطی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

موقعیت مطالعه

در مطالعه‌ی حاضر به ارزیابی چرخه حیات نیروگاه‌های بادی از مراحل احداث تا بهره‌برداری، در دو نیروگاه بادی واقع در کهک شهرستان قزوین و آقکند شهرستان میانه که توسط شرکت داخلی مپنا تولید و نصب گردیده بودند پرداخته شد. نیروگاه بادی کهک در استان قزوین با موقعیت جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۷ دقیقه و ۵۲ ثانیه عرض شمالی با وسعت چهار هزار و ۲۲۳ هکتار، توان تولید ۵۵ مگاوات الکتریسیته با به‌کارگیری ۲۲ عدد توربین ۵/۲ مگاواتی را دارا می‌باشد. همچنین نیروگاه بادی آقکند مجهز به ۲۰ توربین بادی ۵/۲ مگاواتی به ظرفیت مجموع ۵۰ مگاوات در منطقه آقکند از توابع شهرستان میانه واقع در استان آذربایجان شرقی با موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳ دقیقه و ۵۳ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه عرض شمالی با وسعت ۷۰۰ هکتار است.

تئوری تحقیق

به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسته از نیروگاه‌های بادی مورد مطالعه در پژوهش حاضر از روش ارزیابی چرخه حیات استفاده شد (Standardization, 2006). چرخه حیات به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های بررسی اثرات زیست‌محیطی با گردآوری ورودی‌ها و خروجی‌ها و اثرات محیطی بالقوه در طول چرخه زندگی معرفی شده است و کل مراحل تولید از گهواره تا گور مورد

بررسی قرار می‌دهد.

شکل ۱- نیروگاه بادی کهک قزوین

Fig.1. Kahak wind power plant in Qazvin, Iran

شکل ۲- نیروگاه بادی آقکند میانه

Fig.2. Aqkend wind power plant in Miyaneh, Iran

استخراج، فرآوری، ساخت‌وساز، تولید، دفع، نوسازی یا تخریب مراحلی هستند که در ارزیابی چرخه حیات تولید الکتریسیته مورد بررسی قرار می‌گیرند که مراحل نوسازی و تخریب بررسی نمی‌شود. ارزیابی چرخه حیات می‌تواند در مواردی مانند بررسی فرصت‌ها برای رسیدن به عملکرد زیست‌محیطی بهتر، افزایش آگاهی به تصمیم گیرندگان در صنایع گوناگون برای رسیدن به برنامه‌ریزی‌های بهتر، بازاریابی (هم‌چون اجرای یک طرح زیست‌محیطی) و برگزیدن شاخص‌ها در ارتباط با عملکرد زیست‌محیطی مانند فنون اندازه‌گیری یاری‌رسان باشد (Hendrickson, Lave, & Matthews, 2010).

براساس استاندارد ISO 2006، تجزیه و تحلیل چرخه حیات از ۴ مرحله تعریف هدف و محدوده، آنالیز داده‌ها (سیاهه)، ارزیابی اثرات و تفسیر تشکیل شده است (Guinée & Lindeijer, 2002). هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسته از دو نیروگاه بادی آقکند و کهک با استفاده از فناوری داخلی (توربین‌های بادی با ظرفیت ۲/۵ مگاوات ساخت مپنا و استفاده شده در شرایط خشکی) در بازه زمانی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال بوده و واحد عملکردی در این پژوهش ۱ کیلووات ساعت الکتریسیته تولید شده از توربین‌ها در نظر گرفته شد. همچنین مرز سامانه در بررسی اثرات زیست‌محیطی در هر دو نیروگاه در شکل ۳ آورده شده است.

لازم به ذکر است که بررسی زمین و اکوسیستم (ایجاد مزاحمت برای زیست‌گاه گونه‌های در معرض خطر با نصب توربین‌ها) و اثرات مستقیم بر حیات‌وحش در طول عملیات توربین (به‌عنوان مثال برخورد پرندگان به پره‌های توربین) مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین غیرقابل دسترس بودن داده‌های مرحله‌ی انهدام نیروگاه بادی به دلیل کمبود امکانات کشور در حوزه‌ی بازیافت فراتر از محدوده مورد مطالعه بود.

اجزا و مولفه‌های توربین ۲/۵ مگاواتی مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل ظرفیت توربین ۲/۵ مگاوات، قطر روتور ۱۰۳ متر، وزن روتور۵۶ تن، تعداد پره ۳ تا، طول پره ۵۰/۳ متر، وزن هر پره ۳۴/۸ تن، وزن ناسل ۹۳ تن، وزن تاور ۲۰۷ تن، ارتفاع هاب تاور ۸۵ متر، نوع ژنراتور DFIG[1] و وزن ژنراتور ۸/۷ تن بود. در جدول ۱ سهم مواد اولیه در تمام فرآیند احداث نیروگاه بادی آقکند و کهک به‌ازای واحد عملکردی ۱ کیلووات ساعت الکتریسته تولیدی آورده شده است.

1- Doubly Fed Induction Generator

شکل ۳– مرز سامانه برای تولید الکتریسیته در دو نیروگاه بادی آقکند و کهک

Fig.3. System boundary for electricity generation in Aqkend and Kahak wind power plants

ارزیابی اثرات چرخه حیات به دلیل رسیدن به هدف و دامنه مطالعه ارزیابی باید با دقت برنامه‌ریزی و با دیگر مراحل ارزیابی چرخه حیات در هماهنگی باشد تا از قلم‌افتادگی‌های ممکن و عدم‌قطعیت منابع مورد توجه قرار گیرد (Standardization, 2006). در این پژوهش، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی براساس روش Impact2002+ با ۱۵ شاخص میانی (مواد سرطان‌زا و غیر سرطان زا، مواد غیرآلی تنفسی، تابش یونیزه، تخریب لایه ازن، اثرات تنفسی، مسمومیت آبزیان، مسمومیت زمین، اسیدی شدن خاک، اشغال اراضی، مسمومیت آبی، اتروفیکاسیون، گرمایش جهانی، مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج معادن) و ۴ رده آسیب (سلامتی انسان‌ها، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع) برای محاسبه انتشارات آلاینده‌ها در احداث و بهره‌برداری نیروگاه بادی استفاده شد (Jolliet *et al.*, 2018). علاوه بر روش Impact2002+ برای بررسی اثرات زیست‌محیطی در سه عمر متفاوت از روش اکسرژی تجمعی در آیکون Single issue استفاده شد و به‌منظور بررسی اثرات برخی از ورودی‌ها مانند فولاد، چدن، دیزل، گاز طبیعی و غیره، از پایگاه داده‌ای ELCD[1] در نرم‌افزار سیماپرو ۹/۱ داده‌های مورد نظر استخراج گردید.

تفسیر نتایج شامل پیامدهای زیست‌محیطی براساس نتایج داده‌های چرخه حیات و ارزیابی تاثیر چرخه حیات می‌باشد. تفسیر نتایج می‌تواند میزان سهم انتشار هرکدام از انتشارات زیست‌محیطی را در هر فاز (مواد اولیه و تولید، احداث، حمل و نقل و نگهداری و تعمیرات) بررسی و مورد مقایسه قرار دهد و عوامل تاثیرگذار در ایجاد شاخص‌های سوء زیست‌محیطی و میزان تاثیرگذاری هر یک از نهاده‌های ورودی در ایجاد این شاخص‌ها را مشخص نماید.

1- European Reference Life Cycle Database

جدول ۱- سهم مواد اولیه احداث نیروگاه بادی آقکند و کهک به ازای واحد عملکردی ۱ کیلو وات ساعت

Table 1- Share of raw materials used in the construction of Aqkend and Kahak wind power plants per 1 kWh operating unit

	مواد Materials	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
			۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
مواد اولیه و تولید Raw materials and production	فولاد کم آلیاژ Low-alloy steel	kg	1.43E-03	1.14E-03	9.52E-04	1.12E-03	8.93E-04	7.45E-04
	فولاد آلیاژ سنگین Chromium alloy steel	kg	2.52E-04	2.02E-04	1.68E-04	1.94E-04	1.55E-04	1.29E-04
	چدن Cast iron	kg	1.93E-04	1.54E-04	1.28E-04	1.48E-04	1.19E-04	9.88E-05
	مس Copper	kg	2.77E-05	2.22E-05	1.85E-05	2.18E-05	1.74E-05	1.45E-05
	الومینیوم Aluminium	kg	7.66E-05	6.13E-05	5.10E-05	5.84E-05	4.67E-05	3.89E-05
	پلیمر Polymer	kg	1.99E-04	1.59E-04	1.33E-04	1.53E-04	1.23E-04	1.02E-04
	بتن Concrete	kg	6.56E-03	5.25E-03	4.38E-03	5.05E-03	4.04E-03	3.37E-03
	سرامیک و شیشه Ceramics and glass	kg	1.09E-04	8.69E-05	7.24E-05	8.40E-05	6.72E-05	5.60E-05
	رنگ Color	kg	7.31E-08	5.85E-08	4.88E-08	5.64E-08	4.51E-08	3.76E-08
	قطعات الکتریکی Electrical components	kg	1.31E-05	1.05E-05	8.76E-06	1.02E-05	8.16E-06	6.80E-06
تعمیر و نگهداری Repair and maintenance	روغن Oil	kg	1.03E-04	1.42E-04	1.41E-04	1.65E-05	1.32E-05	1.10E-05
نصب Installation	دیزل Diesel	kg	3.59E-04	2.88E-04	2.40E-04	2.77E-04	2.21E-04	1.85E-04
	الکتریسیته Electricity	kWh	2.06E-03	1.65E-03	1.37E-03	1.44E-03	1.15E-03	9.60E-04
کل حمل‌ونقل Total transport	حمل‌ونقل Transportation	tkm	1.43E-03	1.39E-03	1.25E-03	2.09E-03	1.67E-03	1.39E-03

شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی

اکسرژی سامانه، بیشترین کار مفید ممکن طی یک فرآیند، پتانسیل سامانه برای ایجاد یک تغییر و انرژی موجود برای استفاده در زمان تعادل این سامانه با محیط است. شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به‌عنوان مجموع اکسرژی تمامی منابع مورد نیاز جهت تولید یک محصول و یا فراهم آوردن یک خدمت بیان می‌شود (Dewulf *et al.*, 2007). شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به هشت زیرگروه منابع فسیلی، هسته‌ای، آبی، زیست‌توده، سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، آب، مواد معدنی و فلزات تقسیم می‌شود (Bösch, Hellweg, Huijbregts, & Frischknecht, 2007). در این مطالعه احداث و بهره‌برداری نیروگاه بادی از لحاظ شاخص تقاضای اکسرژی در رده‌های اثر منابع تجدیدناپذیر-فسیلی، منابع تجدیدناپذیر-مواد معدنی، منابع تجدیدناپذیر-فلزات، منابع تجدیدپذیر-پتانسیل، منابع تجدیدپذیر آب، منابع تجدیدناپذیر اولیه مورد بررسی قرار گرفت. هدف بررسی تقاضای اکسرژی در احداث و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی براساس نهاده‌های مصرفی بود و واحد کارکردی برای محاسبات اکسرژی در احداث نیروگاه بادی، یک کیلووات ساعت در نظر گرفته شد. مرزهای سامانه مشابه با مرزهای سامانه در مطالعه ارزیابی چرخه حیات در نظر

گرفته شد. منابع استفاده شده با توجه به واحد کارکردی و مرز سامانه تعیین گردید و در نهایت تحلیل سیاهه با توجه به اطلاعات ورودی‌ها و خروجی‌های فیزیکی فرآیندهای سامانه‌ها (مشابه با مطالعات ارزیابی چرخه حیات)، تهیه شد. به دلیل نبود اطلاعات کافی در رابطه با تقاضای اکسرژی در تولید الکتریسیته از نیروگاه بادی، از اطلاعات موجود در پایگاه داده اکواینونت موجود در نرم‌افزار سیماپرو استفاده شد.

نتایج و بحث

انتشارات مستقیم نیروگاه‌ها

نتایج آلاینده‌های مستقیم (انتشارات مستقیم از نیروگاه‌های بادی در مراحل مختلف ساخت، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری) در دو نیروگاه آقکند و کهک در جدول ۲ بیان گردید.

جدول ۲- انتشارات زیست‌محیطی در کل مراحل چرخه حیات در دو نیروگاه بادی آقکند و کهک به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت الکتریسیته در طول سه عمر مختلف با روش Impact2002 در نرم‌افزار سیماپرو

Table 2- Environmental pollutant emissions in all stages of the life cycle of Aqkand and Kahak power plants for the production of one kilowatt hour of electricity in three lifetimes using Impact2002 in SIMAPRO software

انتشارات Emissions	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
		۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
آلومینیوم Aluminium	kg	1.22E-06	9.79E-07	8.17E-07	9.47E-07	7.58E-07	6.31E-07
آرسنیک Arsenic	kg	1.89E-08	1.52E-08	1.27E-08	1.48E-08	1.18E-08	9.87E-09
بنزن Benzene	kg	6.21E-07	4.99E-07	4.17E-07	4.81E-07	3.85E-07	3.21E-07
کربن دی‌اکسید Carbon dioxide	kg	9.53E-04	7.81E-04	6.58E-04	7.27E-04	5.82E-04	4.85E-04
دی‌سولفید کربن Carbon disulfide	kg	3.04E-07	2.44E-07	2.04E-07	2.38E-07	1.91E-07	1.59E-07
مونوکسید کربن، فسیل Carbon monoxide, fossil	kg	8.53E-05	6.84E-05	5.71E-05	6.63E-05	5.30E-05	4.42E-05
کلر Chlorine	kg	1.24E-08	1.03E-08	8.77E-09	9.29E-09	7.43E-09	6.19E-09
کروم Chromium	kg	3.97E-07	3.18E-07	2.65E-07	3.08E-07	2.46E-07	2.05E-07
کرومVI Chromium VI	kg	9.96E-09	7.97E-09	6.64E-09	7.72E-09	6.18E-09	5.15E-09
مس Copper	kg	6.71E-08	5.41E-08	4.52E-08	5.35E-08	4.28E-08	3.57E-08
مونوکسید دینیتروژن Dinitrogen monoxide	kg	3.73E-07	3.01E-07	2.52E-07	282E-07	2.26E-07	1.88E-07
اتان Ethane	kg	3.41E-07	2.77E-07	2.32E-07	2.62E-07	2.09E-07	1.75E-07
اتان، ۱، ۲-dichloro-۱۲، 1، 2، 2-tetrafluoro-، cfc-114 Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	kg	-8.56E-12	-7.22E-12	-6.16E-12	-6.81E-12	-5.45E-12	-4.54E-12
فرمالدئید Formaldehyde	kg	5.41E-08	4.36E-08	3.65E-08	4/.8E-08	3.35E-08	2./9E-08
کلرید هیدروژن Hydrogen chloride	kg	1.09E-06	8.75E-07	7.31E-07	7.96E-07	6.36E-07	5.30E-07
فلورایدهیدروژن Hydrogen fluoride	kg	1.92E-07	1.54E-07	1.29E-07	1.44E-07	1.15E-07	9.60E-08

سولفید هیدروژن Hydrogen sulfide	kg	6.40E-08	5.16E-08	4.31E-08	4.95E-08	3.96E-08	3.30E-08
سرب Lead	kg	6.42E-08	5.15E-08	4.30E-08	5.02E-08	4.02E-08	3.35E-08
جیوه Mercury	kg	4.80E-10	3.86E-10	3.23E-10	3.63E-10	2.91E-10	2.42E-10
متان، Bromochlorodifluoro-، Halon 1211 Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	kg	1.36E-11	1.13E-11	9.56E-12	1.01E-11	8.08E-12	6.73E-12
متان، Bromotrifluoro-، Halon 1301 Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	kg	5.55E-11	4.79E-11	4.12E-11	4.10E-11	3.28E-11	2.73E-11
متان، Chlorodifluoro-، HCFC-22 Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg	1.75E-09	1.40E-09	1.17E-09	1.36E-09	1.09E-09	9.06E-10
متان، dichlorodifluoro-، cfc-12 Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	3.57E-12	2.87E-12	2.39E-12	2.76E-12	2.21E-12	1.84E-12
متان، فسیل Methane, fossil	kg	3.68E-05	2.97E-05	2.49E-05	2.74E-05	2.20E-05	1.83E-05
متان، Tetrafluoro، CFC-14 Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg	7.17E-09	5.74E-09	4.79E-09	5.47E-09	4.38E-09	3.65E-09
نیترات Nitrate	kg	5.38E-10	4.60E-10	3.94E-10	5.16E-10	4.13E-10	3.44E-10
اکسید نیتروژن Nitrogen oxides	kg	2.26E-05	1.84E-05	1.54E-05	1.70E-05	1.36E-05	1.13E-05
PAH، هیدروکربن‌های آرومات یک چند حلقه‌ای PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	1.34E-08	1.08E-08	8.97E-09	1.02E-08	8.17E-09	6.81E-09
ذرات، <۲,۵ Particulates, < 2.5 um	kg	2.10E-05	1.70E-05	1.42E-05	1.61E-05	1.29E-05	1.08E-05
ذرات، > um۲,۵ ، و <um۱۰ Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg	1.25E-05	1.00E-05	8.38E-06	9.73E-06	7.79E-06	6.49E-06
فسفر Phosphorus	kg	2.80E-09	2.39E-09	2.05E-09	2.03E-09	1.62E-09	1.35E-09
دی‌اکسید گوگرد Sulfur dioxide	kg	3.01E-05	2.45E-05	2.05E-05	2.20E-05	1.76E-05	1.47E-05
سولفور هگزافلوئید Sulfur hexafluoride	kg	1.36E-09	1.10E-09	9.17E-10	9.99E-10	799E-10	6.66E-10
تولوئن Toluene	kg	4.78E-08	3.99E-08	3.38E-08	3.54E-08	2.83E-08	2.36E-08
زایلن Xylene	kg	5.48E-08	4.50E-08	3.79E-08	4.03E-08	3.22E-08	2.69E-08
روی Zinc	kg	5.89E-08	4.75E-08	3.97E-08	4.60E-08	3.68E-08	3.06E-08

جدول ۳ انتشارات آلاینده در اثر مصرف سوخت دیـزل در فرآینـد ساخت پروژه نیروگاه‌های بادی آقکنـد و کهـک را بـرای تولیـد یـک مگاژول انرژی در طول دوره ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سـال را نشـان مـی‌دهـد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد افزایش عمر نیروگاه‌ها سبب کاهش انتشارات سوخت دیزل می‌گردد.

جدول ۳- کل انتشارات مصرف سوخت دیزل برای تولید ۱ مگاژول انرژی

Table 3- Diesel fuel burning emissions per 1 MJ of produced energy (Saber, Esmaeili, Pirdashti, Motevali, & Nabavi-Pelesaraei, 2020)

Emissions انتشارات (gM^{-1}Diesel)	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
Carbon dioxide	1.19E+03	1.16E+03	1.04E+03	1.74E+03	1.39E+03	1.16E+03
Sulfur dioxide	3.85E-01	3.75E-01	3.37E-01	5.64E-01	4.51E-01	3.76E-01
Methane	4./2E-02	4.79E-02	4.31E-02	7.21E-02	5.77E-02	4.81E-02
Benzene	2.78E-03	2.71E-03	2.43E-03	4.07E-03	3.26E-03	2.71E-03
Cadmium	3./2E-06	3.72E-06	3.34E-06	5.59E-06	4.47E-06	3.73E-06
Chromium	1.90E-05	1.85E-05	1.66E-05	2.78E-05	2.23E-05	1.86E-05
cuprum	6.49E-04	6.31E-04	5.68E-04	9.50E-04	7.60E-04	6.33E-04
Nitrogen dioxide	4.57E-02	4.45E-02	4.00E-02	6.69E-02	5.35E-02	4.46E-02
Nickel	2.67E-05	2.60E-05	2.34E-05	3.91E-05	3.13E-05	2.61E-05
Zinc	3.82E-06	3.72E-06	3.34E-06	5.59E-06	4.47E-06	3.73E-06
Benzo(a)pyrene	1.14E-05	1.11E-05	1.00E-05	1.68E-05	1.34E-05	1.12E-05
Ammonia	7.62E-03	7.42E-03	6.67E-03	1.12E-02	8.93E-03	7.44E-03
Selenium	3.82E-06	3.72E-06	3.34E-06	5.59E-06	4.47E-06	3.73E-06
Polycyclic aromatic hydrocarbon	1.25E-03	1.22E-03	1.10E-03	1.84E-03	1.47E-03	1.22E-03
Hydro carbon	1.09E+00	1.06E+00	9.51E-01	1.59E+00	1.27E+00	1.06E+00
Nitrogen oxides	1.69E+01	1.65E+01	1.48E+01	2.8E+01	1.98E+01	1.65E+01
Carbon Monoxide	2.40E+00	2.33E+00	2.10E+00	3.51E+00	2.81E+00	2.34E+00
Particulates(<2.5µm)	1.71E+00	1.66E+00	1.50E+00	2.50E+00	2.00E+00	1.67E+00

بررسی اثرات زیست‌محیطی

بررسی شاخص‌های میانی زیست‌محیطی در روش IMPACT2002+ برای تولید یک کیلووات انرژی الکتریسته در نیروگاه‌های بادی آقکند و کهک نشان داد که اکثر این شاخص‌ها (به‌جز تابش یونیزه) به شدت تحت تاثیر تولید مواد اولیه هستند. همچنین بررسی‌ها نشان داد که نصب و راه‌اندازی دومین عامل ایجاد آلاینده‌های زیست‌محیطی بود. یکی از دلایل مهم اثرگذار بودن تولید مواد اولیه برای راه‌اندازی نیروگاه‌ها در ایجاد شاخص‌های مختلف، استفاده بسیار زیاد از عناصری مانند فولاد، مس و غیره می‌باشد. بررسی موردی دو شاخص مواد سرطان‌زا و غیرسرطان‌زا نشان داد که بیش از ۹۶٪ از سهم ایجاد شاخص سرطان‌زایی مربوط به فولاد کم آلیاژ و بیش از ۹۱٪ از سهم ایجاد شاخص غیرسرطان‌زایی متاثر از مس بود. تولید آهن و آلیاژهای مرتبط با آن از تبدیل سنگ آهن در یک کوره انفجاری شروع می‌شود. آهن تولیدی استفاده محدودی دارد و اکثر آن به یک آسیاب فولادی می‌رسد که با کاهش محتوای کربن و با افزایش عناصر دیگر مانند منگنز و نیکل به آلیاژهای فولادی مختلف تبدیل می‌شود. باید توجه داشت که در صنایع فولاد، استفاده از سوخت ذغال‌سنگ به‌عنوان یکی از منابع انرژی بسیار رایج است. سوزاندن ذغال‌سنگ آلاینده‌های فراوانی از جمله گاز کوره ذغال‌سنگ، نفتالین، ترکیبات آمونیوم، روغن خام، گرد و غبار گوگرد و ذغال‌سنگ را از کوره‌ها به هوا منتشر می‌کند. نتایج بررسی اثرات زیست‌محیطی در دو نیروگاه بادی احداث‌شده در خشکی و دریا در ایالت تگزاس آمریکا نشان داد که جایگزین نمودن گاز طبیعی به جای سوخت ذغال‌سنگ بر دسته‌های تاثیر زیست‌محیطی اثر قابل‌توجهی نداشت (Chipindula, Botlaguduru, Du, Kommalapati, & Huque, 2018). نتایج بررسی پژوهشگران مختلفی مانند سو و همکاران (Xu, Pang, Zhang, Poganietz, & Marathe, 2018) نشان داد که فولاد و مس و به‌عبارتی مرحله تولید مواد اولیه از موثرترین عوامل در افزایش اثر محیطی (چندین اثر مختلف) می‌باشند. نتایج تحقیق هاپالا و پرمپریدا (Haapala & Prempreeda, 2014) نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه و ساخت توربین بیش از ۷۸٪ و نتایج تحقیق چیپیندلا و همکاران (Chipindula *et al.*, 2018) نیز نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه بیش از ۷۲٪ از اثرات زیست‌محیطی در شاخص‌های میانی را تشکیل می‌دهند.

بررسی شاخص تابش یونیزه نشان داد که استفاده از سوخت دیزل در مرحله نصب در هر دو نیروگاه مورد بررسی بالاترین میزان انتشارات را به همراه داشت به طوری که سهم انتشارات آلاینده‌ها در مرحله مواد اولیه و تولید بیش از ۴۰ درصد و در مرحله نصب به دلیل

مصرف سوخت دیزل بیش از ۴۸ درصد بود. از طرفی در نیروگاه کهک به دلیل رفت وآمدهای بیشتر در احداث نیروگاه، پیامد تابش یونیزه در مرحله حمل‌ونقل نیروگاه کهک (۱/۱۸E- ۰۳ BqC-14eq) بیشتر از نیروگاه آقکند (۸/۰۵E-۰۴ BqC-14eq) بود. بررسی‌ها نشان داد که میزان حمل‌ونقل و به دنبال آن مصرف سوخت دیزل یکی از موثرترین عوامل در ایجاد شاخص تابش یونیزه بود. یکی از دلایل مهم این وضعیت این است که احتراق سوخت دیزل سبب تولید گرما و انتشار آلاینده‌ها شده و سبب تخریب لایه ازن می‌شود و به‌واسطه آن تابش‌هایی با قابلیت یونیزاسیون بیشتری به سطح زمین می‌رسد. وسایل نقلیه بر پایه سوخت دیزل، مقادیر زیادی NOx[1] تولید کرده که به تشکیل دود کمک می‌کنند. برخلاف نیروگاه‌های الکتریکی، که NOx را با استفاده از کنترل کاتالیزوری انتخابی یا کنترل کاتالیزوری غیرانتخابی حذف می‌کنند، خودروهای دیزلی معمولاً هیچ کنترلی برای حذف این گاز ندارند. استفاده از دیزل طی فرآیند احداث نیروگاه سبب ایجاد ترکیبی از واکنش‌های پیچیده مواد شیمیایی مانند دی‌اکسید گوگرد و اکسید نیتروژن می‌شود و این امر منجر به تخریب لایه ازن می‌گردد (Chipindula *et al.*, 2018). نتایج بررسی گلریا و همکاران (Guleria, Bhushan, Guleria, Bhushan, & Dulari, 2019) نشان داد که قرار گرفتن در معرض تابش‌های یونیزه باعث ایجاد ناهنجاری‌های شدید در انسان‌ها از قبیل آسیب DNA[2]، سرطان، ناباروری، حساسیت الکتریکی و غیره می‌شود که البته با توجه به گروه سنی انسان‌ها شدت متفاوتی دارد و در این زمینه کودکان و جنین، به دلیل داشتن سیستم ایمنی نابالغ، در معرض بیشترین آسیب هستند. همچنین بررسی‌ها نشان داد که اثرات تخریب لایه ازن بر سلامت انسان ناشی از افزایش اشعه فرابنفش خورشیدی (UV-R) به سطح زمین است. اشعه فرابنفش ناشی از خورشیدی دارای اثرات مضر زیادی بر سلامت پوست، چشم و غیره انسان است (Solomon, 2008).

بررسی اثرات زیست‌محیطی در دسته‌های میانی و در شرایط عمر مختلف نیروگاه‌ها

بررسی‌های زیست‌محیطی انجام‌شده در طول دوره ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال از احداث یک نیروگاه بادی به‌ازای تولید یک کیلووات انرژی الکتریسته (جدول ۴) نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه و احداث نیروگاه دارای بالاترین اثرات زیست‌محیطی بودند. در هر سه دوره مورد بررسی، اثرات زیست‌محیطی برای تمام مراحل به‌جز حمل‌ونقل و عملیات تعمیر و نگهداری کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن بود که با افزایش طول عمر نیروگاه‌ها، تجهیزات فرسوده‌تر شده و نیاز به سرویس، نگهداری و تعمیرات بیشتری وجود دارد. از طرف دیگر با افزایش طول عمر نیروگاه‌ها، آلاینده‌های تولیدی طی سال‌های بیشتری توزیع شده و در نهایت سهم مواد اولیه و احداث در میزان شاخص‌های میانی به‌طور جزیی کاهش می‌یابد. مرحله تعمیر و نگهداری شامل تعویض روغن، روغن‌کاری دنده‌ها و ژنراتور و تعمیر توربین‌ها در هنگام خرابی است. معمولا سازنده‌ها توصیه می‌کنند توربین‌ها را هر ساله روغن‌کاری کنید. هر توربین در هر بار روغن کاری ۳۷۵ کیلوگرم معادل ۴۰۰ لیتر روغن روان‌کننده مصرف می‌کند (Konstantinos *et al.*, 2014). با توجه به این‌که با افزایش طول عمر میزان نیاز به نگهداری نیز افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار روغن مصرفی با افزایش طول عمر نیروگاه بیشتر می‌شود. با توجه به توصیه اکثر کارخانه‌های سازنده، توربین‌های بادی، به‌طور متوسط در طول عمر ۲۰ سال هر شش ماه یکبار و در عمر بیش از ۲۰ سال هر سه تا شش ماه یکبار نیازمند روغن‌کاری هستند. با افزایش عمر نیروگاه شاخص‌های تابش یونیزه، انرژی‌های تجدیدناپذیر و گرمایش جهانی دارای افزایش چشم‌گیری بودند و این اختلاف نتیجه‌ی افزایش تعمیر و نگهداری و حمل‌ونقل با افزایش سال‌های عمر نیروگاه است. با این حال این اثرات در مقابل اثرات زیست‌محیطی مرحله تولید ناچیز بوده و با طولانی‌تر شدن عمر نیروگاها، آلاینده‌های تولیدی بین سال‌های عمر توزیع شده و مقادیر متوسط آن‌ها کاهش می‌یابد. بررسی نتایج بازسازی مزارع بادی نشان داد که افزایش طول عمر و تولید الکتریسیته از این نیروگاه‌ها نسبت به سایر انرژی‌های تولیدی مزایای زیست‌محیطی را به دنبال دارد. بنابراین افزایش تعمیر و نگهداری جهت افزایش طول عمر نیروگاه برای مزارعی که نزدیک به پایان عمر مفید خود هستند می‌تواند یک گزینه مفید و موثر در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در فرآیند تولید انرژی باشد (Martínez, Latorre-Biel, Jiménez, Sanz, & Blanco, 2018).

ارزیابی دسته خسارت‌ها

سلامت انسان‌ها

بررسی شاخص سلامت انسان‌ها به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت انرژی الکتریسیته در دو نیروگاه آقکند و کهک نشان داد که کمترین میزان اثر بر روی سلامت انسان‌ها در نیروگاه آقکند مربوط به فرآیند حمل‌ونقل به میزان ۱/۴۷E-۱۰ DALY[3] بود، در حالی‌که در نیروگاه کهک، کمترین اثر روی سلامت انسان‌ها مربوط به فرآیند نگهداری و تعمیرات به میزان ۸/۲۶E-۱۲ DALY محاسبه شد.

1- Nitrogen Oxides
2- Deoxyribonucleic Acid

3- Disability-Adjusted Life Years (DALY)
دالی سال‌های زندگی با ناتوانی تعدیل‌شده می‌باشد. انتشار ۱ دالی برابر است با: نداشتن ۱ سال زندگی ۱ شخص، یا ۱ نفر ۴ سال از ناتوانی با وزن ۰/۲۵ رنج می‌برد.

شکل ٤– سهم اثرات زیست‌محیطی در تولید الکتریسیته نیروگاه بادی آقکند در طول عمر ۲۰ سال

Fig.4. Contribution of environmental effects in electricity generation of Aqkand wind power plant during the life of 20 years

شکل ۵– سهم اثرات زیست‌محیطی در تولید الکتریسیته نیروگاه کهک در طول عمر ۲۰ سال

Fig.5. Contribution of environmental effects in electricity generation of Kahak wind power plant during the life of 20 years

جدول ٤- شاخص‌های زیست‌محیطی در دسته‌های میانی در طول عمر مختلف نیروگاه‌ها

Table 4- Midpoint environmental categories and values for different lifetimes

شاخص میانی Midpoint categories	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
		۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
مواد سرطان‌زا Carcinogens	kg C_2H_3Cleq	4.25E-04	3.42E-04	2.86E-04	3.26E-04	2.61E-04	2.17E-04
مواد غیرسرطان‌زا Non-carcinogens	kg C_2H_3Cleq	6.39E-04	5.14E-04	4.29E-04	4.94E-04	3.95E-04	3.29E-04
مواد غیرآلی تنفسی Respiratory inorganics	kg PM2/5eq	2.63E-05	2.13E-05	1.78E-05	2.01E-05	1.61E-05	1.34E-05
تابش یونیزه Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1.96E-02	1.70E-02	1.47E-02	1.44E-02	1.15E-02	9.62E-03
تخریب لایه ازن Ozone layer depletion	kg CFC-11eq	8.60E-10	7.32E-10	6.27E-10	6.39E-10	5.11E-10	4.26E-10
تاثیرات تنفسی Respiratory organics	kg C_2H_4eq	7.83E-06	7.11E-06	6.24E-06	5.26E-06	4.21E-06	3.50E-06
مسمومیت آبزیان Aquatic ecotoxicity	kg TEG Water	2.66E+00	2.15E+00	1.80E+00	2.03E+00	1.62E+00	1.35E+00
مسمومیت زمین Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	8.61E-01	6.96E-01	5.82E-01	6.66E-01	5.33E-01	4.44E-01
اسیدی شدن خاک Terrestrial acidification	kg SO_2eq	1.67E-04	1.6E-04	1.14E-04	1.25E-04	1.00E-04	8.35E-05
اشغال اراضی Land occupation	M2org.arable	5.86E-04	4.75E-04	3.98E-04	4.59E-04	3.67E-04	3.06E-04
مسمومیت آبی Aquatic contamination	kg SO_2eq	4.89E-05	3.98E-05	3.34E-05	3.62E-05	2.89E-05	2.41E-05
اتروفیکاسیون Aquatic eutrophication	kg PO4P-lim	8.48E-06	6.83E-06	5.71E-06	6.59E-06	5.27E-06	4.39E-06
گرمایش جهانی Global warming	kg CO_2eq	1.21E-02	9.80E-03	8.21E-03	9.24E-03	7.39E-03	6.16E-03
مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر Non-renewable energy	MJ primary	1.52E-01	1.26E-01	1.07E-01	1.13E-01	9.02E-02	7.52E-02
استخراج معادن Mineral extraction	MJ surplus	5.38E-03	4.31E-03	3.59E-03	4.19E-03	3.35E-03	2.79E-03

دلیل این امر آن بود که انتقال برخی از اجزا نیروگاه کهک از مبدا اصفهان و بندرعباس به مقصد کهک قزوین بوده و افزایش میزان مصرف سوخت دیزل، اثر بیشتری روی دسته‌ی سلامت انسان گذاشته است. همچنین بالاترین میزان اثرات زیست‌محیطی بر روی سلامتی انسان‌ها در نیروگاه آقکند مربوط به مواد اولیه و تولید به میزان ۱/۸۰E-۰۸ DALY و در نیروگاه کهک ۱/۳۹E-۰۸ DALY بود. مرحله تولید مواد اولیه شامل فرایندهای پیچیده می‌باشد، به‌عنوان مثال برج بزرگ‌ترین قسمت در نیروگاه‌های بادی بوده و کاملاً از فولاد پوشیده شده و از روی ساخته شده است. ساخت برج یک فرایند دشوار است، زیرا قطر آن هرچه از پایین به بالا می‌رود کاهش می‌یابد. بنابراین، به چندین قسمت تقسیم می‌شود. هر قسمت دارای یک قالب خاص است که در آن فولاد تا دمای بسیار بالا (۲۵۰۰ درجه فارنهایت) گرم می‌شود و در قالب ثابت می‌شود تا شکل مورد نیاز را به‌دست آورد. دمای بالای مورد نیاز در این فرآیند، مصرف سوخت‌های فسیلی را در پی داشته و سبب انتشار آلاینده‌های زیادی می‌شود. پس از ریخته‌گری، تمام قطعات به هم جوش داده شده و سپس برای محافظت توسط روی پوشانده می‌شوند. فرایند جوشکاری سبب آزاد شدن آلاینده‌های مختلفی، از جمله اجزای ذرات معلق مانند سرب، نیکل، روی، اکسید آهن، مس، کادمیوم، فلوریدها، منگنز و کروم و گازهایی مانند مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت می‌شود (Golbabaei & Khadem, 2015) که انتشار آن‌ها سلامت انسان را به خطر می‌اندازند.

کیفیت زیست‌بوم

نتایج بررسی اثرات زیست‌محیطی نشان داد که کیفیت اکوسیستم تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند اسیدی شدن محیط‌های آبی و خاکی، یوتریفیکاسیون، سمیت محیط‌های آبی و خاکی و تغییر کاربری زمین می‌باشد. نتایج نشان داد که تولید مواد اولیه و نصب تجهیزات نیازمند مقادیر زیادی فولاد و الکتریسیته (با منشا سوخت‌های تجدیدناپذیر) بوده و همچنین میزان آب زیادی نیز در این مراحل مصرف می‌گردد. فولاد در مرحله ریخته‌گری بسیار آبگیر بوده و این عامل سبب آلودگی محیط‌های آبی و خاکی می‌شود. در حقیقت، اکثر فلزات سنگین و مواد مغذی حاصل از مصرف و احتراق سوخت‌ها می‌توانند با رسوب گرانشی و جذب شیمیایی به رسوبات سطحی منتقل شوند. بنابراین، فلزات سنگین و مواد مغذی یک منبع مضر و نامطلوب در محیط آبزی هستند (Peng *et al.*, 2020)، که در نتیجه منجر به مسمومیت آبزیان و محیط‌های خاکی می‌گردند. عامل اصلی اسیدی شدن خاک در هر دو نیروگاه (آقکند: ۲/۶۴E-۰۵ و کهک: ۲/۰۱E-۰۵) مربوط به میزان آلومینیوم مصرفی در مرحله اولیه و تولید بود. بیشترین مقدار مس در سیم‌ها و کابل‌های نیروگاه و سیستم داخلی توربین استفاده می‌گردد که به نحوی با تولید و عبور الکتریسیته همراه است. همچنین بررسی شاخص اسیدی شدن محیط‌های خاکی که عامل اثرگذار بر کیفیت اکوسیستم است نشان داد که فرآیند تولید فولاد (به‌جز آهن خام مذاب) که مقداری گوگرد غیرقابل جداسازی به‌صورت محلول در آن وجود دارد بنابراین فولاد کم‌آلیاژ علاوه بر این‌که انتشار SO_2 ندارد بلکه SO_2 در خود نگه می‌دارد. از این رو با بررسی نقش فولاد و چدن در ایجاد مسمومیت محیط‌های آبی مقادیر منفی، در نیروگاه آقکند ۶/۰۲E-۰۶ – ۱/۲۳E-۰۶kgSO$_2$eq– و در نیروگاه کهک ۴/۷۱E-۰۶– ۹/۴۷E-۰۷ kgSO$_2$eq– به‌ازای تولید یک کیلووات الکتریسیته به‌دست آمد. از طرف دیگر انتشارات آبی به دلیل خنک کردن فلزات با آب پس از اتمام پخت، ناشی می‌شود. طبق مطالعه‌ای در مرحله ساخت بتن و فلزات از یون نیکل برای جلوگیری از خوردگی و آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت محصول استفاده می‌شود. یون نیکل موجود در این فرایند به آب‌ها منتقل می‌شود. نیکل به‌راحتی می‌تواند در زیستگاه، به‌ویژه در فیتوپلانکتون یا سایر گیاهان آبزی که به آلودگی آب حساس هستند، جمع شود و با رسوب کردن خود منجر به آلودگی آب گردد (Yuan *et al.*, 2021). بیش از ۹۰ درصد عناصر فلزی با ذرات معلق و رسوبات، از طریق جذب، پیچیدگی و بارش با آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از منابع فلزی احداث نیروگاه بادی ترکیب می‌شوند (Wang & Wang, 2015) و با نفوذ به منابع آبی سبب آلودگی آن می‌گردند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که احداث نیروگاه‌های بادی به زمین با وسعت زیاد نیازمند است. بنابراین اشغال زمین (تغییر کاربری زمین) و از بین بردن محیط‌زیست آن منطقه از پیامدهای زیست‌محیطی احداث نیروگاه بادی است. بررسی‌ها نشان داد که فولاد کم‌آلیاژ، پرکاربردترین نهاده ورودی در ساخت توربین در دو نیروگاه (آقکند: ۳/۱۱E-۰۴ و کهک: ۲/۴۳E-۰۴) بود و به دلیل حجم و وزن زیاد، بخش عظیمی از کل پیامد اشغال اراضی (آقکند: ۵/۸۶E-۰۴ و کهک: ۴/۵۹E-۰۴) را به خود اختصاص داد. بتن مورد استفاده برای پی توربین‌ها نیز در دو نیروگاه (آقکند: ۳/۵۷E-۰۵ و کهک: ۲/۷۵E-۰۵) به اشغال اراضی منجر می‌شود. تجهیزات الکتریکی-الکترونیکی نیروگاه‌های بادی با سایزهای کوچک و بزرگ که در بخش‌های مختلف موجود و عملیات تولید و انتقال الکتریسیته را برعهده دارند نیز به افزایش پیامد اشغال اراضی در دو نیروگاه (آقکند: ۱/۸۳E-۰۵ و کهک: ۱/۴۲E-۰۵) منجر شد. چدن نیز در مرحله مواد اولیه و تولید (آقکند: ۳/۹۴E-۰۵ و کهک: ۳/۰۳E-۰۵) به دلیل وزن و حجم بالا، سبب افزایش این پیامد می‌گردد. حذف پوشش گیاهی طبیعی، تکه‌تکه شدن زیستگاه، اختلال در اکوسیستم و تهدید حیات‌وحش از جمله اثرات اشغال زمین است که در نتیجه‌ی احداث نیروگاه بادی در خشکی ایجاد می‌شود (Turkovska *et al.*, 2021).

در نهایت بررسی شاخص یوتریفیکاسیون در ایجاد دسته‌ی آسیب کیفیت اکوسیستم نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید، بیش از ۹۵ درصد این پیامد را به خود اختصاص داد و در این میان مس و تجهیزات الکتریکی-الکترونیکی بالاترین میزان مواد اولیه و تولید را دارا بودند. همچنین سوخت دیزل بیشترین بخش پیامد در مرحله‌ی نصب را به خود اختصاص داد و مرحله حمل‌ونقل و تعمیرو نگهداری، کمتر از ۱ درصد از این پیامد را شامل شد. بررسی‌ها نشان داد که مرحله تولید مواد اولیه بیشترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به اتمسفر را دارا بود و با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در اتمسفر، احتمال شکوفایی جلبک‌ها افزایش می‌یابد و می‌توانند محیط‌های سمی را در آب ایجاد کرده و در نتیجه کیفیت آب را کاهش دهد (Paerl & Otten, 2013).

تغییر اقلیم

تغییرات اقلیم پیامد گرمایش جهانی بوده و هرچه مقدار دی‌اکسید کربن منتشرشده به جو بیشتر شود، دما و گرمایش جهانی افزایش می‌یابد (Raadal, Gagnon, Modahl, & Hanssen, 2011). نتایج نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید توربین‌ها در گرمایش جهانی، رتبه نخست را در نیروگاه آقکند و نیروگاه کهک به‌ترتیب با ۸۰ درصد و ۸۲ درصد را به خود اختصاص داد. فولاد کم‌آلیاژ، آلیاژ سنگین و آلومینیوم سه رتبه برتر انتشارات مرحله مواد اولیه و تولید را در برمی‌گیرند. تأثیر گرم شدن کره زمین عمدتاً از سوخت‌های فسیلی

مصرف‌شده در هنگام ساخت انواع مختلف فولاد برای برج و ناسل و تیغه‌های روتور ناشی می‌شود. میزان الکتریسیته که در مرحله نصب و راه‌اندازی مصرف می‌شود، در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی به‌دست‌آمده است که سبب افزایش گرمایش جهانی می‌شوند. مرحله حمل‌ونقل نیز رتبه سوم این پیامد را داشت. بخش حمل و نقل به علت استفاده از سوخت دیزل و انتشار دی‌اکسید کربن یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش گرمایش جهانی در سطح جهان است. مرحله تعمیر و نگهداری با کمتر از ۱ درصد، کمترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن در تمام مراحل احداث نیروگاه بادی را به خود اختصاص داد. رادال و همکاران (Raadal *et al.*, 2011) چرخه حیات انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع تجدیدپذیر و فناوری سوخت‌های فسیلی را مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در مقایسه با فناوری‌های تولید الکتریسیته از منابع فسیلی، تولید برق با استفاده از نیروگاه بادی و نیروگاه آبی، سبب انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای شد.

نتایج نشان داد که در دسته‌ی اثرات زیست محیطی مربوط به تغییر اقلیم، استخراج مواد اولیه و تولید در نیروگاه آفکند و کهک به‌ترتیب با ۹/۷۲E-۰۳ و ۷/۵۴E-۰۳، بیشترین مقدار را دارا بودند. مجموع انتشارات مربوط به تغییر اقلیم برای این دو نیروگاه نیز به‌ترتیب برابر ۱/۲۱E-۰۲ و ۹/۲۴E-۰۳ بود. نتایج پژوهشی بر روی اثرات زیست‌محیطی نیروگاه بادی و الکتریسیته‌آبی سفیدرود نشان داد که بیشترین انتشار آلاینده از توربین‌های بادی در مرحله تولید و ساخت توربین‌ها و بعد احداث نیروگاه بادی منجیل بوده است (Rezaei Kalaj & Oashk Sarai, 2014). گرچه حمل‌ونقل ۵۹٪ موجب مصرف سوخت فسیلی می‌گردد اما کمتر از ۳٪ به تغییرات آب و هوایی کمک می‌کند. بررسی پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی در مقایسه با انرژی تولید شده از سوخت‌های فسیلی نشان داد که انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های بادی کمتر است، اما در نیروگاه‌های بادی نیز همچنان برخی از گازهای گلخانه‌ای ساطع می‌شوند که بیشتر آن‌ها از تولید بتن و فولاد برای پایه‌های توربین بادی ناشی می‌شود. این نتایج با نتایج تحقیق وانگ و وانگ (Wang & Wang, 2015) مطابقت دارد.

منابع

دسته‌ی اثرات زیست‌محیطی آسیب به منابع، تحت تاثیر دو عامل مهم مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی است. بررسی شاخص میزان مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر نشان داد که مرحله مواد اولیه و تولید توربین در نیروگاه آفکند با سهم ۶۸ درصد و در نیروگاه کهک با سهم ۷۰ درصد، بیشترین اثر را بر دسته‌ی آسیب به منابع داشتند. همچنین مرحله نصب و راه‌اندازی به دلیل استفاده از سوخت دیزل، دومین عامل موثر بر دسته‌ی آسیب به منابع بود. این نتایج دلیل خوبی برای سوق دادن جوامع به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. بررسی مرحله تعمیر و نگهداری نشان داد که میزان مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر در نیروگاه آفکند MJ primary ۶/۲۳E-۰۳ و در نیروگاه کهک MJ primary ۲/۴۰E-۰۴ بود که این اختلاف در دو نیروگاه، به دلیل میزان الکتریسیته تولیدی بالاتر در نیروگاه کهک بود بنابراین نشان‌دهنده این امر است که هرچه الکتریسیته تولیدی نیروگاهی بیشتر باشد میزان مصرف انرژی به‌ازای یک کیلووات الکتریسیته تولیدی در آن کمتر می‌گردد. همچنین بررسی شاخص استخراج مواد معدنی نشان داد که تقریبا صد درصد این پیامد مربوط به مرحله‌ی مواد اولیه و تولید توربین است. دلیل این امر آن است که برای ساخت توربین از موادی همچون فولاد، چدن، آلومینیوم، پلیمر، مس و غیره استفاده شده است که به‌دست آوردن هرکدام از این مواد نیازمند استخراج اجزای آن‌ها از معادن می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که سهم مرحله نصب و حمل‌ونقل و نگهداری در مقایسه با مرحله تولید تقریبا صفر درصد بوده و دلیل آن این است که نسبت پیامدهای سوخت فسیلی و روغن استفاده شده در این مراحل با پیامدهای مواد ورودی مرحله تولید که اکثرا متشکل از فلزات است قابل قیاس نیست. چو و همکاران با بررسی اثرات زیست‌محیطی یک نیروگاه بادی به این نتیجه رسیدند که اثرات زیست‌محیطی نسبتا زیاد در دسته‌ی آسیب به منابع، ناشی از استفاده از مواد اولیه و سوخت بود همچنین فرآیند تولید فولاد مقدار زیادی سوخت مصرف کرد و در نتیجه منجر به آسیب منابع شد (Chu, Zhao, Li, Fan, & Qin, 2017).

بررسی‌ها نشان داد که سهم تولید مواد اولیه در هر دو نیروگاه آفکند و کهک بیش از ۷۰ درصد از اثرات زیست‌محیطی مربوط به دسته‌ی آسیب به منابع را به خود اختصاص داد. نتایج پژوهش الصالح و ستلر (Alsaleh & Sattler, 2019) در بررسی اثرات زیست‌محیطی توربین‌های بادی بزرگ ساحلی نشان داد که مرحله تولید بیشترین اثرات بر دسته خسارات از جمله منابع را داشت و بعد از آن نصب، حمل‌ونقل و نگهداری به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

شکل ٦– دسته خسارات زیست‌محیطی در نیروگاه اقکند در تمام مراحل چرخه حیات در طول عمر ۲۰ سال

Fig.6. Environmental damage in the Aqkand power plant at all stages of the life cycle during the life of 20 years

شکل ۷– دسته خسارات زیست‌محیطی در نیروگاه کهک در تمام مراحل چرخه حیات در طول عمر ۲۰ سال

Fig.7. Environmental damage in Kahak power plant at all stages of the life cycle during the life of 20 years

مقایسه رده‌های آسیب در دو نیروگاه آقکند و کهک در دوره‌های زمانی مختلف

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مقدار کل آلاینده‌های زیست‌محیطی دو نیروگاه بادی آقکند و کهک در دوره ۲۰ ساله برای ۱ کیلوات ساعت الکتریسیته تولیدی به‌ترتیب برابر ۵/۸۴ و ۴/۴۵ ($\mu Pt\ kWh^{-1}$) بود و از این مقدار به‌ترتیب ۳/۰۲ و ۲/۳۱ ($\mu Pt\ kWh^{-1}$) به دسته‌ی خسارت سلامت انسان اختصاص داشت. سهم مواد اولیه و تولید، نصب و راه‌اندازی، تعمیر و نگهداری و حمل‌ونقل در نیروگاه آقکند به‌ترتیب ۸۰/۲۳، ۱۷/۲۵، ۱/۵۲ و ۱ درصد و در نیروگاه کهک به‌ترتیب ۸۱/۷۲، ۱۶/۲۷، ۰/۰۸ و ۱/۹۳ درصد از مقدار کل آسیب‌های زیست‌محیطی بود. از میان دسته‌ی خسارات مورد مطالعه، سلامت انسان در دو نیروگاه آقکند و کهک به‌ترتیب با ۵۱/۷۲ و ۵۱/۸۹ درصد، دسته اصلی انتشارات زیست‌محیطی بود. تغییر اقلیم در نیروگاه‌های آقکند و کهک به‌ترتیب با ۲۰/۹۲ و ۲۰/۹۶

درصد و منابع به‌ترتیب با ۱۷/۶۷و۱۷/۳۰ درصد در رده‌های دوم و سوم قرار داشتند.

بررسی دسته‌ی خسارات در دو نیروگاه آقکند و کهک در دوره زمانی ۲۰، ۲۵ و ساله (جدول ۴) نشان داد که میزان دسته‌های آسیب با افزایش طول عمر نیروگاه‌ها روند کاهشی داشت. بررسی‌ها در طول ۲۵ تا ۳۰ سال نسبت به ۲۰ سال طول عمر نشان داد که منابع لازم از جمله تعویض روغن توربین‌ها و همچنین عملیات نگهداری و تعمیرات برای حفظ کارکرد مفید توربین هر ۴ ماه یکبار مورد نیاز بود، در حالی‌که در شرایط کمتر از ۲۰ سال این دوره به ۶ ماه رسید. بررسی‌های میدانی نشان داد که در هر سال ۲ تا ۳ سفر اضافی به توربین‌ها برای انجام خدمات نگهداری وجود دارد. بنابراین، منابع بیشتری از جمله آب مورد نیاز است. عملیات‌های ذکرشده شامل حمل و نقل به نیروگاه‌ها و برگشت از آن‌ها می‌باشد که در این شرایط مصرف دیزل، بنزین و غیره افزایش می‌یابد. براساس مطالعه الصالح و ستلر (Alsaleh & Sattler, 2019)، عمر طولانی‌تر توربین‌ها ممکن است راهی برای افزایش درآمد باشد، اما سبب افزایش تعمیر و نگهداری می‌شود. دلیل این امر آن است که قسمت‌های مختلف توربین مسن‌تر از حد معمول، دارای قطعات فرسوده‌تر بوده و نیازمند نگهداری و تعمیرات بالاتری می‌باشد.

جدول ۵- دسته خسارات نیروگاه آقکند و کهک در سه طول عمر مختلف نیروگاه

Table 5- Damage categories and values for Aqkand and Kahak power plants in three different lifetimes

دسته خسارات Damage category	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
		۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
سلامت انسان Human health	µPt	3.02E+00	2.44E+00	2.05E+00	2.31E+00	1.85E+00	1.54E+00
کیفیت زیست‌بوم Ecosystem quality	µPt	5.67E-01	4.58E-01	3.83E-01	4.38E-01	3.51E-01	2.92E-01
تغییر اقلیم Climate change	µPt	1.22E+00	9.90E-01	8.29E-01	9.33E-01	7.46E-01	6.22E-01
منابع Resources	µPt	1.03E+00	8.57E-01	7.26E-01	7.70E-01	6.16E-01	5.13E-01

ارزیابی شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی

بررسی شاخص‌های مختلف در تقاضای اکسرژی تجمعی برای تولید یک کیلووات ساعت الکتریسته تولیدی در دو نیروگاه آقکند و کهک نشان داد که شاخص‌های ایجادشده در نیروگاه آقکند بالاتر از نیروگاه کهک بود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۵ نشان داد که منابع تجدیدپذیر-فسیلی بیشترین تقاضای اکسرژی تجمعی را برای تولید یک کیلووات برق تولیدی از هر دو نیروگاه احداث شده به خود اختصاص دادند. بررسی‌ها نشان داد که سهم به‌سزایی از ایجاد شاخص‌های تجدیدناپذیر-فسیلی، تجدیدپذیر-زیست‌توده، تجدیدناپذیر-فلزات مربوط به مرحله مواد اولیه و تولید بود. از طرفی دیگر بخش قابل‌توجهی از CExD متعلق به تجدیدناپذیر-فسیلی است، که مصرف دیزل یکی از اجزای اصلی در فرآیندهای مختلف راه‌اندازی نیروگاه (شامل مرحله تولید، نصب و راه‌اندازی، حمل و نقل و نگهداری و تعمیرات) است. همچنین استفاده از سوخت‌ها و روغن‌ها در تهیه فلزات مختلف منجر به مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر-فسیلی، فلزات و مواد معدنی شد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از ورودی‌های بالاو منابع فسیلی در معرض خطر قرار خواهند گرفت. کنترل میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی در مرحله مواد اولیه و تولید توربین بسیار ضروری است. کمترین میزان مصرف انرژی در استخراج مواد اولیه و تولید توربین مربوط به تجدیدپذیر-جنبشی بود، زیرا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح وسیع و صنعتی ایران مخصوصا در کارخانه‌های تولید اجزای توربین بسیار پایین است و انرژی‌های تجدیدناپذیر هنوز هم سهم بالایی از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی اثرات زیست‌محیطی و تقاضای اکسرژی تجمعی تولید الکتریسته در نیروگاه‌های بادی کهک و آقکند در طول سه دوره عمر ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سال پرداخته شد. نتایج نشان داد که مرحله استخراج مواد اولیه و تولید در دو نیروگاه حدود ۷۰٪ در ایجاد انواع اثرات تنفسی، ۶۰٪ در ایجاد پتانسیل سلامتی انسان، ۲۵٪ در ایجاد گروه‌های اسیدی شدن و گرم شدن کره زمین اثرگذار بود.

جدول ٦- تقاضای اکسرژی نیروگاه آقکند و کهک در سه طول عمر مختلف نیروگاه

Table 6- Exergy demand of Aqkand and Kahak power plants in three different lifetimes

شاخص‌های اکسرژی Exergy categories	واحد Unit	آقکند Aqkend			کهک Kahak		
		۲۰ سال 20Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years	۲۰ سال 20 Years	۲۵ سال 25 Years	۳۰ سال 30 Years
تجدیدناپذیر-فسیلی Non-renewable, fossil	MJ	1.53E-01	1.27E-01	1.08E-01	1.14E-01	9.09E-02	7.58E-02
تجدیدناپذیر-هسته‌ای Non-renewable, nuclear	MJ	2.97E-05	-7.98E-06	-1.85E-05	-1.94E-05	-1.55E-05	-1.29E-05
تجدیدپذیر-جنبشی Renewable, kinetic	MJ	-4.36E-03	-3.56E-03	-3.00E-03	-3.32E-03	-2.66E-03	-2.21E-03
تجدیدپذیر-خورشیدی Renewable, solar	MJ	5.33E-06	4.59E-06	3.95E-06	4.03E-06	3.22E-06	2.68E-06
تجدیدپذیر-پتانسیل Renewable, potential	MJ	6.79E-03	5.42E-03	4.51E-03	5.14E-03	4.11E-03	3.43E-03
تجدیدناپذیر-اولیه Non-renewable, primary	MJ	1.17E-03	9.38E-04	7.82E-04	9.13E-04	7.30E-04	6.09E-04
تجدیدپذیر-زیست‌توده Renewable, biomass	MJ	1.43E-02	1.17E-02	9.81E-03	1.10E-02	8.79E-03	7.32E-03
تجدیدپذیر-آبی Renewable, water	MJ	3.43E-03	2.71E-03	2.25E-03	2.66E-03	2.13E-03	1.77E-03
تجدیدناپذیر-فلزات Non-renewable, metals	MJ	2.81E-02	2.26E-02	1.88E-02	2.19E-02	1.75E-02	1.46E-02
تجدیدناپذیر-مواد معدنی Non-renewable, minerals	MJ	2.23E-03	1.80E-03	1.50E-03	1.73E-03	1.39E-03	1.16E-03

همچنین مرحله نصب تجهیزات در نیروگاه آقکند ۱۷٪ و در نیروگاه کهک ۱۶٪ در ایجاد تغییرات آب و هوایی و بین ۱۴ تا ۲۶٪ در ایجاد سایر گروه‌های زیست‌محیطی اثرگذار بود. مرحله‌ی تعمیر و نگهداری شامل رانندگی بین توربین‌ها دو بار در سال برای روان‌کاری، تعویض قطعات و بازرسی آن‌ها می‌شود، که اثرات آن برای همه دسته‌ها کمتر از ۸٪ در هر دو نیروگاه محاسبه شد. مرحله‌ی حمل‌ونقل به دلیل مصرف سوخت دیزل، در نیروگاه آقکند ۳٪ و نیروگاه کهک ۶٪ به تخریب لایه ازن کمک می‌کند. ارزیابی دسته‌ی خسارات مربوط به دسته‌ی سلامت انسان نشان داد که استخراج مواد اولیه و تولید در نیروگاه آقکند به میزان ۱/۰۸E-۰۸ DALY و در نیروگاه کهک با ۱/۳۹E-۰۸ DALY بیشترین اثرات را دارا بودند. همچنین میزان کل انتشارات زیست‌محیطی در دسته‌ی کیفیت زیست‌بوم در نیروگاه آقکند ۷/۷۶E-۰۳ PDF*m2*yr و در نیروگاه کهک ۶/۰۰E-۰۳PDF[1]*m^2*yr بود. بررسی تغییرات شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی نشان داد که بخش قابل‌توجهی از این شاخص متعلق به انرژی تجدیدناپذیر-فسیلی از جمله مصرف سوخت دیزل بود که به‌عنوان یکی از منابع اصلی مصرفی در فرآیندهای مختلف راه‌اندازی نیروگاه (شامل مرحله تولید، نصب و راه‌اندازی، حمل و نقل، نگهداری و تعمیرات) مصرف بالایی داشت. حساسیت افزایش طول عمر نیروگاه‌ها نشان داد که افزایش عمر توربین سبب کاهش اثرات زیست‌محیطی و شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی گردید. با افزایش طول عمر اثرات زیست‌محیطی مرحله‌ی حمل‌ونقل و تعمیر و نگهداری افزایش یافت. با افزایش ۵ تا ۱۰ سال عمر توربین‌ها، منابع لازم برای حفظ توربین‌ها حداکثر هر شش ماه مورد استفاده قرار گرفته و روند فازهای حمل‌ونقل و تعمیر و نگهداری رو به افزایش بود.

1- Potentially Disappeared Fraction of Species

PDF*m^2*year: انتشار ۱ برابر است با ناپدید شدن همه گونه‌ها از ۱ مترمربع در طول ۱ سال، یا ناپدید شدن ۱۰٪ گونه‌ها از ۱ مترمربع در طول ۱۰ سال، یا ناپدید شدن ۱۰٪ از گونه‌ها از ۱۰ مترمربع در طول ۱ سال.

پیشنهادات

در مطالعات آینده می‌توان علاوه بر پارامترهای زیست‌محیطی سایر پارامترهای تولید پایدار مانند هزینه/اقتصادی و اجتماعی هم بررسی شود تا بتوان تصمیم‌گیری کلان‌تری برای احداث و نگهداشت نیروگاه‌ها در کشور گرفت. مطالعات آینده می‌تواند با همکاری شرکت‌های بازیافت در این زمینه، اثرات زیست‌محیطی فاز دفع را نیز مدنظر بگیرند. مدل ارزیابی چرخه حیات در این تحقیق IMPACT2002+ می‌باشد اما می‌توان از دیگر مدل‌های ارزیابی چرخه حیات مانند ILCD یا Recipe یا TRACI در مباحث زیست‌محیطی استفاده شده و نتایج حاصله با نتایج این تحقیق مقایسه شود. همچنین پیشنهاد می‌شود توربین‌ها با ظرفیت متفاوت و حتی بیشتر مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد و میزان انتشارات با کاهش یا افزایش ظرفیت مقایسه گردد.

References

1. Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Ghorbani, N., & Breyer, C. (2018). Analysis of 100% renewable energy for Iran in 2030: integrating solar PV, wind energy and storage. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *15*, 17-36. https://doi.org/10.1007/s13762-017-1373-4
2. Al-Muhammad, S., & Piriaei, M. (2013). Use life cycle assessment to compare greenhouse gas emissions from power plants. Third Conference on Environmental Planning and Management. University of Tehran, Iran.
3. Alsaleh, A., & Sattler, M. (2019). Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*, 887-903. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01678-0
4. Amani, A., & Hosseini Shamachi, A. (2009). The study of wind energy in the stations of the catchment area of the South Aras River. *Journal of Geographical Space*, *10*, 1-26. (In Persian).
5. Azarpour, A., Suhaimi, S., Zahedi, G., & Bahadori, A. (2013). A review on the drawbacks of renewable energy as a promising energy source of the future. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *38*, 317-328. https://doi.org/10.1007/s13369-012-0436-6
6. Bidstrup, M. (2015). Life cycle thinking in impact assessment—Current practice and LCA gains. *Environmental Impact Assessment Review*, *54*, 72-79. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.05.003
7. Billinton, R., & Gao, Y. (2008). Multistate wind energy conversion system models for adequacy assessment of generating systems incorporating wind energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *23*, 163-170 https://doi.org/10.1109/tec.2006.882415
8. Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A., & Frischknecht, R. (2007). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *12*, 181-190. https://doi.org/10.1065/lca2006.11.282
9. British, P. (2006). BP Statistical Review of World Energy. Retrieved from: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf. Accessed 2020
10. Chipindula, J., Botlaguduru, V. S. V., Du, H., Kommalapati, R. R., & Huque, Z. (2018). Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in Texas. *Sustainability*, *10*, 2022. https://doi.org/10.3390/su10062022
11. Chu, Z., Zhao, T., Li, L., Fan, J., & Qin, Y. (2017). Characterization of antimicrobial poly (lactic acid)/nano-composite films with silver and zinc oxide nanoparticles. *Materials*, *10*, 659. https://doi.org/10.3390/ma10060659
12. Dewulf, J., Bösch, M. E., De Meester, B., Van der Vorst, G., Van Langenhove, H., Hellweg, S., & Huijbregts, M. A. J. (2007). Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): a comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting. *Environmental Science & Technology*, *41*, 8477-8483. https://doi.org/10.1021/es0711415
13. Gkantou, M., Rebelo, C., & Baniotopoulos, C. (2020). Life cycle assessment of tall onshore hybrid steel wind turbine towers. *Energies*, *13*, 3950. https://doi.org/10.3390/en13153950
14. Golbabaei, F., & Khadem, M. (2015). Air pollution in welding processes—assessment and control methods. *Current Air Quality Issues*, 33-63. https://doi.org/10.5772/59793
15. Guinée, J. B., & Lindeijer, E. (2002). Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Springer Science & Business Media.
16. Guleria, R., Bhushan, B., Guleria, A., Bhushan, A., & Dulari, P. (2019). Harmful effects of ionizing radiation. I*nternational Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *7*, 887-889. https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.12141
17. Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, *3*(2), 170-185. https://doi.org/10.1504/ijsm.2014.062496
18. Hendrickson, C. T., Lave, L. B., & Matthews, H. S. (2010). *Environmental life cycle assessment of goods and services: an input-output approach*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781936331383
19. Jolliet, O., Antón, A., Boulay, A., Cherubini, F., Fantke, P., Levasseur, A., McKone, T. E., Michelsen, O., Canals,

L. M., Motoshita, M., Pfister, S., Verones, F., Vigon, B., & Frischknecht, R. (2018). Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *23*, 2189-2207. https://doi.org/10.1007/s11367-018-1443-y

20. Joseph, V. S., Lucille, L., & Bruce, H. (2000). Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generation Chain. IAEA Bulletin 42
21. Konstantinos, V., Karras, Y., Kohlhammer, J., Steiger, M., Tzovaras, D., & Gounopoulos, E. (2014). *Enhanced Visual Analytics Services for the Optimal Planning of Renewable Energy Resources Installations*. Pages 330-339. IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations: Springer.
22. Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A., & Yan, X. (2020). Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. *Journal of Cleaner Production*, *247*, 119520. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119520
23. Le Gourieres, D. (2014). Wind power plants: theory and design. Elsevier.
24. Li, H., Jiang, H. D., Dong, K. Y., Wei, Y. M., & Liao, H. (2020). A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power. *Evidence from China. Journal of Cleaner Production*, *248*, 119192 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119192
25. Martínez, E., Latorre-Biel, J., Jiménez, E., Sanz, F., & Blanco, J. (2018). Life cycle assessment of a wind farm repowering process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *93*, 260-271. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.044
26. Moore, J. (2021). A Comparison of the Environmental Effects of Renewable and Non-Renewable Energies.
27. Motahari, A., Ahmadian, M., Abedi, Z., & Ghaffarzadeh, H. (2014). Economic evaluation of wind power plants in Iran considering the effect of energy price liberalization policy. *Iranian Journal of Energy Economics (Environmental and Energy Economics)*, *3*, 179-200. (In Persian).
28. Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, *65*, 995-1010. https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y
29. Peng, C., Shen, Y., Wu, X., Yuan, P., Jiang, L., Chen, S., Ze, S., Wang, X., & Song, X. (2020). Heavy metals, nitrogen ,and phosphorus in sediments from the first drinking water reservoir supplied by Yangtze River in Shanghai, China: Spatial distribution characteristics and pollution risk assessment. *Water, Air, & Soil Pollution*, *231*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s11270-020-04651-6
30. Raadal, H. L., Gagnon, L., Modahl, I. S., & Hanssen, O. J. (2011). Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. R*enewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 3417-3422. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.001
31. Rezaei Kalaj, S., & Oashk Sarai, L. (2014). *Investigation of environmental effects of electricity generation technologies (Case study of Manjil wind and hydropower plant)*. The Second National and Specialized Conference on Environmental Research in Iran. Hamedan, Hegmataneh Association of Environmental Assessors. (In Persian).
32. Saber, Z., Esmaeili, M., Pirdashti, H., Motevali, A., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). Exergoenvironmental-Life cycle cost analysis for conventional, low external input and organic systems of rice paddy production. *Journal of Cleaner Production*, *263*, 121529. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121529
33. Solomon, K. R. (2008). Effects of ozone depletion and UV-B radiation on humans and the environment. *Atmosphere-Ocean*, *46*, 185-202. https://doi.org/10.3137/ao.460109
34. Standardization, I. O. F. (2006). Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework. ISO.
35. Statistical, I. (2019). Annual statistical report of iran water and electricity industry, Statistical reports of water and electricity, Ministry of Energy. Retrieved from: https://isn.moe.gov.ir
36. Stavridou, N., Koltsakis, E., & Baniotopoulos, C. (2020). *Life Cycle Analysis of lattice and tubular wind turbine towers. A comparative study*. Pages 012071. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012071.
37. Teffera, B., Assefa, B., Björklund, A., & Assefa, G. (2021). Life cycle assessment of wind farms in Ethiopia. The *International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*, 76-96. https://doi.org/10.1007/s11367-020-01834-5
38. Turkovska, O., Castro, G., Klingler, M., Nitsch, F., Regner, P. Soterroni, A. C. & Schmidt, J. (2021). Land-use impacts of Brazilian wind power expansion. *Environmental Research Letters*, *16*, 024010. https://doi.org/10.5281/zenodo.4013396
39. Wang, S., & Wang, S. (2015). Impacts of wind energy on environment: A review. Renewable and Sustainable. *Energy Reviews*, *49*, 437-443. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.137
40. Wang, L., Wang, Y., Du, H., Zuo, J., Li, R. Y. M., Zhou, Z., ... & Garvlehn, M. P. (2019). A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study. *Applied Energy*, *249*, 37-45. https://doi.org/1/0,1016/j.apenergy.2019.04.099
41. Wang, S., Wang, S., & Liu, J. (2019). Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 804-810. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.031

42. Xu, L., Pang, M., Zhang, L., Poganietz, W. R., & Marathe, S. D. (2018). Life cycle assessment of onshore wind power systems in China. *Resources, Conservation and Recycling*, *132*, 361-368 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.014
43. Yuan, C., Bai, X., Zhu, T., Wen, Z., Cao, T., Zhang, X., & Ni, L. (2021). Long-Term Effects of the Harvesting of Trapa natans on Local Water Quality and Aquatic Macrophyte Community in Lake Erhai, China. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 246. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.706746
44. Zare Thani, H., & Nisari, P. (2016). *Wind energy and its life cycle evaluation*. 10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran .Mashhad, Iran. (In Persian).

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 427-451

Identifying and Prioritizing the Key Factors Affecting the Efficient Maintenance Management in the Agricultural Industry Based on Empirical Studies

H. Soltanali[1*], M. Khojastehpour[2]

1- Postdoctoral Researcher, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: ha.soltanali@mail.um.ac.ir)

Received: 24 April 2022
Revised: 03 July 2022
Accepted: 11 July 2022
Available Online: 11 July 2022

How to cite this article:
Soltanali, H., & Khojastehpour, M. (2023). Identifying and Prioritizing the Key Factors Affecting the Efficient Maintenance Management in the Agricultural Industry Based on Empirical Studies. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 427-451. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.76333.1104

Introduction

With the emergence of new automation and mechanized technologies in the production and processing of agricultural products in Iran, which aim to accelerate the food supply process, adopting appropriate management models in the field of maintenance becomes inevitable. This is crucial to maintain and enhance the operational reliability of agricultural machinery, tools, and equipment. Furthermore, proper management of various physical assets in the agricultural industry, including operation and maintenance, is one of the most important requirements. This is due to their crucial role in ensuring readiness and high availability during the seasons of planting, cultivating, and harvesting agricultural products. These needs differ from that of other continuous production processes.

Materials and Methods

To achieve an efficient model in the field of maintenance, the following steps have been investigated:

a) Reviewing and identifying the most important criteria and sub-criteria driving the maintenance management. This is based on the previous literature and the experts' opinion.

b) Evaluating and prioritizing the main criteria and the interactions between their sub-criteria using the Best-Worst Method (BWM).

c) Providing improved solutions for maintenance management of Iranian agro-industries.

We decided to employ BWM because, compared to similar methods, it (i) provides more reliable pairwise comparisons, (ii) reduces the possible anchoring bias that may occur during the weighting process by respondents, (iii) is the most data-efficient method, and (iv) provides multiple optimal solutions which increase flexibility when accessing the best weight point. The process of weighting by BWM is summarized in five steps:

1) Determine a set of evaluation criteria identified by the experts or decision-makers.

2) Identify the most important (Best) and the least important (Worst) criteria according to the experts or decision-makers, each of which may have their own Best and Worst.

3) Determine the preference of the Best criterion over all the other criteria using a number from 1 to 9 (where 1 represents equal importance and 9 represents extremely more important).

4) Determine the preference of all the decision criteria over the Worst criterion.

5) Compute optimal weights.

Results and Discussion

According to the preliminary surveys, the most important criteria in the excellence maintenance model were identified as "organizational management", "human-related factors", and "organizational aspects", respectively. The results of the BWM revealed that sub-criteria such as "top management support," "fund allocation and

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2022.76333.1104

inventory resource management," and "appropriate maintenance strategies" had the greatest impact on maintenance management in agro-industries, with global weights of 0.108, 0.075, and 0.067, respectively. Additionally, these findings were compared to previous research conducted in the field of agricultural and production system maintenance models.

Conclusion

The findings of this study could assist managers in revising and developing maintenance management models in the agro-industries. Future studies could consider calculating the interactions among the criteria that were omitted in this study to simplify the evaluation process which might improve the accuracy of weighing criteria. This can be achieved through the combination of the Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) and structural equation modeling.

Keywords: Agro-industry, Best-Worst method, Machinery, Maintenance, Mechanization

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

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، ص ٤٥۱-٤۲۷

شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها بر پایه مطالعات تجربی توسعه‌یافته

حمزه سلطانعلی[1*]، مهدی خجسته پور[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

چکیده

پیاده‌سازی الگوهای مدیریتی مناسب در حوزه نگهداری و تعمیرات جهت نگهداشت اصولی و ارتقای قابلیت اطمینان انواع ماشین‌ها و تجهیزات کشاورزی با هدف تسریع در روند تأمین غذای جامعه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به کمبود مطالعات بنیادی و توسعه‌ای در این بخش، مطالعه حاضر به دنبال بررسی عوامل مؤثر بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در سطح کشت و صنعت‌ها بر پایه مطالعات مفهومی و تجربی می‌باشد. بدین منظور ابتدا به بررسی و شناخت مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار بر مدیریت نگهداری و تعمیرات با کمک مطالعات بنیادین و دیدگاه کارشناسان خبره پرداخته شد. در ادامه تحقیق، ارزیابی و اولویت‌بندی معیارهای تأثیرگذار با کمک روش تصمیم‌گیری بهترین-بدترین انجام شد و به دنبال آن راهکارهای بهبودی به‌منظور مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها ارائه شدند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مهم‌ترین معیارها در مدل نگهداری و تعمیرات، به‌ترتیب "مدیریت سازمانی"، "عوامل انسانی" و "عوامل ساختاری" با استفاده از تحقیقات پیشین و نظر خبرگان به‌دست آمد. مطابق با نتایج روش تصمیم‌گیری بهترین-بدترین، زیرمعیارهایی چون "حمایت مدیریت عالی در سطح سازمان"، "اختصاص بودجه نگهداشت و مدیریت بهینه موجودی‌ها" و نیز "اتخاذ راهبردهای مناسب نگهداشت" به‌ترتیب با وزن کلی ۰/۱۰۸، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۶۷ بیش‌ترین تأثیرگذاری را در مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در سطح کشت و صنعت‌ها داشتند. نتایج این تحقیق می‌تواند مورد استفاده مدیران برای دست‌یابی به یک الگوی مناسب در زمینه مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها باشد و نیز قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج آن به سایر صنایع کشاورزی و غذایی در سطح کشور وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: روش بهترین-بدترین، کشت و صنعت، مکانیزاسیون، ماشین‌های کشاورزی، نگهداری و تعمیرات

مقدمه

به‌کارگیری تکنولوژی‌های مکانیزه در مراحل تولید و فرآوری انواع محصولات کشاورزی در ایران با هدف تسریع در روند تأمین غذای جامعه، روز به روز در حال گسترش است. از طرفی نحوه به‌کارگیری و مدیریت این نوع از تکنولوژی‌ها به‌ویژه سرمایه‌های فیزیکی که شامل انواع ماشین‌ها، ادوات و تجهیزات می‌باشد، با هدف دست‌یابی به حداکثر بهره‌وری در حوزه صنایع کشاورزی بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که مدیریت منسجم این سرمایه‌ها، نقش محوری در انجام به‌موقع فعالیت‌های زراعی شامل فرآیندهای مختلف تولید و فرآوری محصولات کشاورزی ایفا می‌نمایند (Soltanali & Rohani, 2016; Najafi, Asoodar, Marzban, & Hormozi, 2015; Mousavipour, Sheikh Davoodi, Ghanian, & Saeedi, 2012; Adebiyi, Ojediran, & Oyenuga, 2004). علاوه بر این، با توجه به عدم دسترسی به‌موقع تجهیزات/ماشین‌های مورد نیاز و نیز تأمین قطعات یدکی بحرانی آن‌ها در شرایط تحریم کنونی، اهمیت نگهداشت اصولی این سرمایه‌های فیزیکی و نحوه استفاده صحیح عملیاتی از آن‌ها، با هدف بهره‌برداری حداکثری از تمامی ظرفیت‌ها، افزایش آماده‌به‌کاری و کاهش هزینه چرخه عمر آن‌ها، امری اجتناب‌ناپذیر است (Afsharnia, Asoodar, & Abdeshahi,

۱- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: ha.soltanali@mail.um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.76333.1104

2014; Rohani, Ranjbar, Ajabshir, Abbaspour-Fard, & Valizadeh, 2009).

مضاف بر این، مدیریت صحیح بهره‌برداری و نگهداری-تعمیرات انواع دارایی‌های فیزیکی در صنایع کشاورزی شامل ماشین‌ها، ادوات و تجهیزات با توجه به اهمیت آماده‌به‌کاری/قابلیت دسترسی بالای آن‌ها در فصول کاشت، داشت و برداشت محصولات کشاورزی و نیز شرایط ویژه این بخش، در مقایسه با سایر فرآیندهای تولیدی پیوسته، یکی از مهم‌ترین الزامات است. بدین منظور، استفاده از راهبردهای مدیریتی به‌ویژه بهره‌مندی از دانش مدیریتی/مهندسی بهره‌برداری و نگهداری-تعمیرات که دربرگیرنده روش‌ها، رویه‌ها، نقشه راه‌ها، ابزارها و انواع تکنولوژی‌های نوین سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است، دارای اهمیت فراوان است (Holweg, Davies, De Meyer, Lawson, & Schmenner, 2018; Soltanali, Khojastehpour, & Farinha, 2020; Soltanali *et al.*, 2019). از نگاه استانداردهای موجود، تعریف دانش نگهداری و تعمیرات شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های فنی[1]، اداری[2] و مدیریتی[3] با هدف نگهداشت سیستم و باز احیایی[4] سیستم است که دربرگیرنده واکنش‌های بعد از خرابی یا اصلاحی و نیز واکنش‌های قبل از خرابی یا پیشگیرانه هستند (CEN, 2001; EN 13306, 2010). سطوح سازمانی در حوزه مدیریت نگهداری و تعمیرات به‌طور کلی در سه سطح راهبردی (بلندمدت)، تاکتیکی (میان‌مدت) و عملیاتی (کوتاه‌مدت) تقسیم‌بندی می‌شود (Tubis & Werbińska-Wojciechowska, 2015; Anthony, 1965; Pintelon & Gelders, 1992; Bottani, Ferretti, Montanari, & Vignali, 2014; Terminology, 2010) که یک شمای کلی از آن در شکل ۱ ارائه شده است. در سطح راهبردها، تعیین چشم‌اندازها، ماموریت‌ها و اهداف اصلی از نگهداشت، متناسب با نیازهای مشتریان یا سازمان صورت می‌پذیرد (Al-Turki, Ayar, Yilbas, & Sahin, 2014; Thomas, 2005). همچنین در این سطح، منابع موردنیاز شامل مالی، انسانی و تکنولوژیکی با هدف افزایش رقابت‌پذیری به همراه محدودیت‌ها و موانع قانونی و نیز مسائل اجتماعی و زیست‌محیطی، مورد توجه است (Van Horenbeek & Pintelon, 2014; Pintelon & Gelders, 1992; Hassanain, 2002). در سطح تاکتیکی، مدیریت مؤثر و اختصاص بهینه منابع تعیین‌شده در سطح پیشین، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در این مرحله انتخاب بهینه‌ترین و مناسب‌ترین سیاست‌های نگهداری و تعمیرات شامل انواع فعالیت‌های واکنشی و پیشگیرانه[5] با هدف ارتقای سطح قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی ماشین‌ها صورت می‌پذیرد (Pintelon & Gelders, 1992; Zhou *et al.*, 2017).

در این مطالعه به‌منظور ارزیابی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[6] مانند روش بهترین-بدترین[7] استفاده شده است. در سال‌های اخیر این روش در بسیاری از مسائل مرتبط با صنایع، مدیریت، تکنولوژی، انرژی، آموزش و سایر موارد، مورد توجه محققان و تصمیم‌گیرندگان به‌ویژه در حل مسائل چندوجهی بوده است (Kheybari, Rezaie, Naji, Javdanmehr, & Rezaei, 2020; Moktadir *et al.*, 2020; Van de Kaa, Fens, & Rezaei, 2019). مهم‌ترین ویژگی‌های برتر روش بهترین-بدترین در مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند روش تحلیل سلسله مراتبی[8] می‌توان به مواردی چون؛ الف) دارا بودن یک ساختار مقایسه زوجی بسیار قوی، ب) کارایی بیش‌تر داده‌ها (به‌عبارتی به داده‌های مقایسه‌ای کم‌تر نیاز دارد)؛ ج) کاهش سوگیری‌های احتمالی از سوی پاسخ‌دهندگان، در طول فرآیند وزن‌دهی و نیز د) دست‌یابی به جواب‌ها و نتایج قابل‌اعتمادتر، به‌عبارتی دیگر، چندین راه‌حل بهینه ارائه می‌دهد که باعث افزایش انعطاف‌پذیری در دست‌یابی به بهترین نقطه وزنی می‌شود، اشاره کرد (Rezaei, 2015; Rezaei, 2016).

مطالعات قابل‌توجهی به بررسی و شناخت ابعاد و عناصر اصلی در مدل/چارچوب نهایی مدیریت نگهداری و تعمیرات پرداخته‌اند. برای مثال در تحقیقی سه معیار شامل روش‌های پیش‌کنشی، ارتباطات نرم[9] و ارتباطات سخت[10] نگهداری و تعمیرات به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرها در مدل نگهداری و تعمیرات معرفی شدند. براساس این معیارها، یک بررسی میدانی در شرکت‌های سوئدی صورت پذیرفت که در آن‌ها، رویکردهای پیش‌کنشی و ارتباط بخش‌های نگهداری و تعمیرات به‌عنوان مهم‌ترین عناصر در فرآیندهای رقابت‌پذیری و انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری‌ها شناخته شدند (Jonsson, 2000). به‌منظور دستیابی به یک مدل مناسب کسب و کار در حوزه نگهداشت، چهار معیار راهبردی از قبیل گزینه‌های تحویل خدمات، طراحی سازمانی، روش نگهداشت و سیستم‌های پشتیبان پیشنهاد شد (Tsang, 2002). در ادامه مطالعه پیشین، اثرات مدیریت مدرن نگهداری و تعمیرات بر روی کارآیی کلی سازمانی در شرکت‌های بزرگ و هوشمند مورد بررسی قرار گرفت.

1- Technical
2- Administrative
3- Managerial
4- Retain and restore
5- Corrective & preventive actions
6- Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)
7- Best Worst Method (BWM)
8- Analytical Hierarchy Process (AHP)
9- Hard maintenance integration
10- Soft maintenance integration

شکل ۱– سطوح سازمانی در مدیریت نگهداری و تعمیرات

Fig.1. Organizational levels in maintenance and repair management (Tubis & Werbińska-Wojcowska, 2015)

یک چارچوب مدیریتی با تکیه بر معیارهایی چون سیستم فناوری اطلاعات، شاخص‌های مدیریتی نگهداشت، مهارت‌های فنی، و سیستم مدیریت تولید ارائه شد (Marquez & Gupta, 2004). در تحقیق دیگری، مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها و رویه‌ها برای ارزیابی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در صنایع تولیدی براساس معیارهایی چون سازماندهی امور نگهداشت، برون‌سپاری فعالیت‌های نگهداشت، سیستم‌های اطلاعاتی، سیاست‌گذاری‌ها، سطح تکنولوژی، مهارت‌های سخت و نرم، دسترسی به نیروی کار، مدیریت موجودی، آموزش و یادگیری مستمر مورد استفاده واقع شد (Salonen, 2008; Salonen, 2009). در همین راستا، به‌کارگیری روش‌های کاربردی با هدف طراحی مدل‌های مدیریتی پیشنهاد شد که هدف آن کاهش شکاف‌های موجود بین تئوری‌های دانشگاهی و محیط واقعی در صنعت بود. کلیدی‌ترین عناصر در مدل پیشنهادی شامل توسعه راهبردها، مهارت‌ها، سازماندهی نگهداشت، فرهنگ، و تکنولوژی بود (Bengtsson & Salonen, 2009). در مطالعه‌ای، به مرور مهم‌ترین معیارهای سنجشی برای دست‌یابی به مدل تعالی نگهداری و تعمیرات پرداخته شد. مهم‌ترین معیارهای اثرگذار بر مدیریت نگهداری و تعمیرات شامل مدیریت قراردادها، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، مدیریت موجودی‌ها، سیستم پشتیبان نگهداشت، بهینه‌سازی مالی راهبردها و سیاست‌ها، گزارش‌دهی و مدیریت سفارشات، آموزش، مدیریت اسناد و مدارک، و نیز مشارکت مدیریت تولید شناخته شدند (Wireman, 2010). در پژوهشی دیگر، با هدف طراحی مدل نگهداشت در شرکت‌های تولیدی، ارائه چارچوبی نوین برای بهبود و اثربخشی برنامه‌های نگهداری و تعمیرات صورت پذیرفت. در این مدل، معیارهایی چون راهبردها و اهداف، مدیریت جنبه‌های انسانی، مکانیزم‌های پشتیبان، سیاست‌های نگهداشت، ابزارها و روش‌ها و نیز رویکرد سازمان‌دهی مد نظر قرار گرفت (Sharma, 2013). در ادامه پژوهش‌های صورت‌گرفته، مدل مفهومی جدیدی با هدف دست‌یابی به یک سیستم نگهداری و تعمیرات هوشمند ارائه شد که در آن چهار عامل اصلی منابع انسانی، رویه‌های درون‌سازمانی، رویه‌های برون‌سازمانی و نهایتا بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نرم‌افزاری/سخت‌افزاری مبتنی بر داده‌کاوی مورد توجه قرار گرفت (Bokrantz, 2019). یک مطالعه مروری با هدف مفهومی‌سازی نگهداشت پیشرفته صورت پذیرفت که در آن یک تعریف جدیدی از مفهوم نگهداشت پیشرفته با تکیه بر عناصری چون خودآموزی[1]، پایش وضعیت برخط، تصمیم‌گیری یا محوریت داده، مدیریت منابع انسانی، تداخلات و تعاملات احتمالی ارائه شد (Roda & Macchi, 2021). همچنین مطالعات دیگری به ارائه مدل‌های مفهومی در حوزه مدیریت نگهداری و تعمیرات پرداخته‌اند (Vasudevan & Duan, 2021; Bekar, Nyqvist, & Skoogh, 2020; Zhang, Yang, & Wang, 2019; Wen, Zhang, Hu, Xiang, & Shi, 2019; Kumar, Shankar, & Thakur, 2018; Gopalakrishnan, 2018).

علاوه بر مطالعات بنیادی و مفهومی در حوزه مدیریت نگهداری و تعمیرات، در ادامه به مروری بر سیر مطالعات تخصصی در زمینه مدیریت نگهداری و تعمیرات در صنایع کشاورزی و غذایی پرداخته

1- Self-learning

شده است. برای مثال در تحقیقی وضعیت عملکرد برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در صنایع غذایی در اتریش مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین ابعاد مدیریتی شامل مدیریت و رهبری، راهبرد و سیاست‌گذاری، مدیریت فرآیندها و منابع، و صلاحیت شغلی نیروی کار در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که امکان افزایش رقابت‌پذیری و بهبود کیفیت اقتصادی در صنایع غذایی وجود دارد (Meixner, Pöchtrager, & Haas, 2001). مشکلات و چالش‌های اصلی در واحدهای تولید و نگهداشت در مزارع کشاورزی در اوکراین مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین معیارهای اثرگذار در این مطالعه شامل زیرساخت‌های تدارکاتی، ارتباط بین واحدهای نگهداشت با کارگاه‌ها و نیز پشتیبانی‌های اطلاعاتی گزارش شد (Horyovy, 2007; Reis & Alves, 2020). مدیریت نگهداری و تعمیرات و نیز امکان دست‌یابی به تولید ناب[1] در مزارع لبنی مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین فعالیت‌های برنامه‌ریزی‌شده شامل اولویت‌بندی فعالیت‌های نگهداشت، نظارت بر برنامه‌های نگهداشت، راهبردهای نگهداشت و نیز روش‌های تولید ناب بود (Arslankaya & Atay, 2015). ارتقای سیستم‌های مدیریت نگهداری و تعمیرات در صنایع غذایی و شیمیایی در دستور کار قرار گرفت. مهم‌ترین شاخص‌های کلیدی برای توسعه مدل شامل سازوکارها برای ارزیابی عملکرد برنامه نگهداشت، سیستم‌های برنامه‌ریزی پیشگیرانه و تشخیص عیوب، سیستم‌های اطلاعاتی و روش‌های نوین نگهداشت، اهداف راهبردی، سازمان‌دهی مرکزی و برون‌سپاری فعالیت‌ها بود (Branská, Pecinová, Paták, Stankova, & Kholová, 2016). در مطالعه دیگری یک سیستم زمان‌بندی هوشمند به همراه تئوری‌های پایه به‌منظور مدیریت نگهداشت ماشین‌های کشاورزی ارائه شد. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن بود که چارچوب پیشنهادی بستر مناسبی برای بهبود روندهای جمع‌آوری و پردازش داده‌های عملیاتی فراهم کرده و نیز امکان هوشمندسازی فعالیت‌های نگهداشت در ماشین‌های کشاورزی وجود دارد (Liu, Hu, Wen, & Tang, 2018). به دنبال این مطالعه، یک پلتفرم دیگری با هدف تشخیص عیوب در ماشین‌های کشاورزی از طریق کسب اطلاعات و داده‌های لازمه از اجزای تشکیل‌دهنده ماشین‌ها و نیز ریشه‌یابی علل خرابی‌ها ارائه شد. در این پلتفرم به‌منظور بهبود روند تصمیم‌گیری‌ها، معیارهایی چون اکتساب و تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از اینترنت و رویکرد داده‌های عظیم[2] در نظر گرفته شد (Li, Zheng, & Zhao, 2019). ارزیابی عملکرد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها با تکیه بر معیارهایی چون برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، توسعه سیاست‌گذاری‌ها، مدیریت اقلام و قطعات یدکی، سازمان‌دهی امور نگهداشت، مدیریت مالی و منابع انسانی انجام گرفت. بررسی ابعاد بنیادی در سه سطح صنعت، مدیریت نگهداشت و فعالیت‌های نگهداشت، نشان داد که امکان شناسایی مهم‌ترین نقاط ضعف و فرصت‌های بهبودی در کشت و صنعت‌ها وجود دارد (Gandhare & Akarte, 2020). به دنبال این پژوهش، یک سیستم مدیریت یکپارچه نگهداری و تعمیرات با هدف پایش خطوط تولید در صنایع تولید بیسکویت پیشنهاد شد. سیستم تشخیص عیوب در این تحقیق، قابلیت شناسایی عوامل کاهش بهره‌وری، کیفیت اثربخشی، وضعیت سلامت ماشین‌های و تجهیزات، و نیز میزان فرسودگی یا فرسایش آن‌ها را دارا بود (Amrani, Alhomdi, Ghaleb, Al-Qubati, & Shameeri, 2020). همچنین در مطالعه‌ای به کلیدی‌ترین معیارها در مدیریت نگهداری و تعمیراتِ دارایی‌های فیزیکی در مراکز اسنک مواد غذایی اندونزی پرداخته شد. مهم‌ترین ابعاد در مدل پیشنهادی شامل به‌کارگیری سیاست‌ها و سازمان‌دهی امور نگهداشت، برنامه‌ریزی و کنترل، هزینه‌های نگهداشت، پارامتر بهبود مستمر و نیز مدیریت منابع انسانی بودند (Gandhi, Purwani, Susanti, & Prasetya, 2021).

براساس پیشینه تحقیقات انجام‌شده در جدول ۱ شامل مطالعات مفهومی و تخصصی در صنایع مختلف، به‌طور کلی می‌توان مهم‌ترین معیارها در مدل‌های یکپارچه و مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات، را در سه بعد یا معیار اصلی شامل: ۱- مدیریت سازمانی[3]، ۲- عوامل انسانی[4] و ۳- عوامل ساختاری[5] تقسیم‌بندی کرد. بدین منظور در "مدیریت سازمانی"، عواملی چون راهبردهای و سیاست‌گذاری‌های نگهداشت، حمایت مدیران عالی در مدیریت نگهداشت، آگاهی از اهمیت مباحث نگهداشت، اندازه‌گیری عملکرد و پایش پیوسته فعالیت‌های نگهداشت، اختصاص بودجه لازمه و نیز مدیریت بهینه موجودی‌ها و مدیریت چرخه کار و استانداردسازی فعالیت‌ها نقش بنیادی ایفا می‌کنند. در سطح "مدیریت عوامل انسانی" نیز عناصری چون اهمیت و جایگاه آموزش و یادگیری در پرسنل نگهداشت، تعهد افراد و مشارکت مستمر آن‌ها در فعالیت‌های نگهداشت، صلاحیت و توانمندی پرسنل نت (نیروی متخصص) و نیز آگاهی کارکنان از اهداف و راهبردهای نگهداشت نقش کلیدی ایفا می‌نمایند. از طرفی در سطح "مدیریت عوامل ساختاری" زیرمعیارهایی چون مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت، برخورداری از یک ساختار سازمانی مناسب در گردش کارهای نگهداری و تعمیرات، برخورداری از ساختارهای سیستم اطلاعاتی مناسب در کنار به‌کارگیری تجهیزات مناسب و نیز مدیریت مناسب قراردادها و نحوه تعامل با عوامل برون‌سازمانی نقش اساسی ایفا می‌کنند.

1- Lean manufacturing
2- Big Data

3- Organization management
4- Human-related
5- Organizational aspects

جدول ۱– مروری بر معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار در مدل تعالی نگهداری و تعمیرات (از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱)

Table 1- Review of criteria and sub-criteria in excellence maintenance and repair management model

منبع Reference	ابعاد یا معیار اصلی Main criteria	منبع Reference	ابعاد یا معیار اصلی Main criteria
Jonsson (2000)	سیستم فناوری اطلاعات، شاخصه‌های مدیریتی نگهداشت، مهارت‌های فنی، سیستم مدیریت تولید Information technology system, maintenance management indicators, technical skills, production management system	Tsang (2002)	گزینه‌های تحویل خدمات، طراحی سازمانی، روش‌های نگهداشت، سیستم‌های حمایتی یا پشتیبان Service delivery options, organizational design, maintenance methods, support systems
Marquez & Gupta (2004)	روش‌های پیش‌کنشی، ارتباطات/تعاملات نرم، ارتباطات/تعاملات سخت Proactive methods, soft communication/interactions, hard communication/interactions	Pinjala, Pintelon, & Vereecke (2006)	ابعاد تصمیم‌گیری ساختاری، ابعاد تصمیم‌گیری زیربنایی (سازمان نگهداشت، سیاست‌های نگهداشت و مفاهیم، برنامه‌ریزی و سیستم‌های کنترل، منابع انسانی، اصلاحات نگهداشت) Organizational decision-making dimensions, basic decision-making dimensions (maintenance organization, maintenance policies and concepts, planning and control systems, human resources, maintenance reforms)
Garg & Deshmukh (2006)	مدل‌های بهینه‌سازی، روش‌های نگهداشت، فرآیند برنامه-ریزی و زمان‌بندی، سیستم‌های اطلاعاتی Optimization models, maintenance methods, planning and scheduling process, information systems	Pintelon & Parodi-Herz (2008)	عوامل تکنولوژیکی، لجستیک یا زنجیره ، مدیریت عملیات‌ها (پشتیبانی از فعالیت‌های نگهداشت در برنامه‌ریزی، هماهنگی و ارائه منابع) Technological factors, logistics or chain, operations management (supporting maintenance activities in planning, coordinating and providing resources)
Salonen (2008); Salonen (2009)	سازمان‌دهی نگهداشت، برون‌سپاری امور، سیستم‌های اطلاعاتی و کنترلی، سیاست‌گذاری‌ها، سطح تکنولوژی، مهارت سخت و نرم، تعداد و دسترسی به نیروی کار، مدیریت اقلام و موجودی، آموزش و یادگیری مستمر Maintenance organization, outsourcing, information and control systems, policymaking, level of technology, hard and soft skills, number and access to the labor force, management of items and inventory, training, and continuous learning.	Bengtsson & Salonen (2009)	توسعه/بهبود راهبردها، مهارت‌ها، سازماندهی نگهداشت، فرهنگ، تکنولوژی Development/improvement of strategies, skills, maintenance organization, culture, technology
Wireman (2010)	فرآیند قراردادها، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، مدیریت موجودی، سیستم پشتیبان، بهینه‌سازی مالی، راهبردها و سیاست‌ها، گزارش‌دهی و مدیریت سفارشات، مدیریت اسناد، آموزش، مشارکت مدیریت تولید Contracts process, planning, and scheduling, inventory management, support system, financial optimization, strategies and policies, order reporting and management, document management, training, production management participation	Barberá, Crespo, Viveros, & Stegmaier (2012)	مدیریت منابع انسانی، مدیریت مواد و اقلام موجودی، مدیریت زیرساختی، مدیریت اطلاعاتی Human resources management, management of materials and inventory items, infrastructure management, information management
Fredriksson & Larsson (2012)	سازمان‌دهی و رهبری، مشارکت، برنامه‌ریزی و زمان‌ریزی، آموزش و فرهنگ، روش‌ها و ابزارها، سیستم‌های پشتیبانی، جنبه‌های مالی Organization and leadership, participation, planning and scheduling, education and culture, methods and tools, support systems, financial aspects	Sharma (2013)	راهبردها و اهداف، مدیریت جنبه‌های انسانی، مکانیزم‌های پشتیبان، سیاست‌های نگهداشت، ابزارها و روش‌ها، رویکرد سازمان‌دهی Strategies and goals, human aspects management, support mechanisms, maintenance policies, tools and methods, organization approach

Karia, Asaari, & Saleh (2014)	منابع انسانی، بهبود مستمر، جنبه مالی، راهبردها، سازمان‌دهی، سیاست‌ها، ابزارها و روش‌ها، مکانیزم پیشتیانی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، تعهدات نگهداشتی Human resources, continuous improvement, financial aspect, strategies, organization, policies, tools and methods, support mechanism, planning and scheduling, maintenance commitments.	Milana, Khan, M. & Munive-Hernandez (2017)	ماژول فعالیت‌ها (تعمیر، نگهداری، طراحی، اصلاح)، ماژول منابع (مردم، تجهیزات و ابزار، مواد، فناوری اطلاعات)، ماژول رویه‌ها/سازوکارها (سیاست، سازمان‌دهی، اطلاعات و مستندات، برون‌سپاری) Activities module (repair, maintenance, design, modification), resources module (people, equipment and tools, materials, information technology), procedures/mechanisms module (policy, organization, information and documentation, outsourcing)
Bokrantz (2019)	منابع انسانی، رویه درون‌سازمانی، رویه برون‌سازمانی، تکنولوژی‌های مبتنی بر داده Human resources, internal procedure, external procedure, data-based technologies	Naji, Oumami, Bouksour, & Beidouri (2019)	مدیریت اطلاعات، مدیریت قرارداد نگهداشت، مدیریت موجودی، رویه و روش نگهداشت، سیاست مدیریت ارشد، پیشرفت مداوم و پیوسته، جنبه مالی Information management, maintenance contract management, inventory management, maintenance procedure and method, senior management policy, continuous and continuous improvement, financial aspect
Gandhare & Akarte (2020)	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، سیاست‌های توسعه‌ای، سازمان‌دهی، جنبه مالی، منابع انسانی، مدیریت موجودی‌ها، مدیریت اطلاعات و پشتیبان Planning and scheduling, development policies, organization, financial aspect, human resources, inventory management, information management and support	Gomes, Yasin, & Simões (2020)	قابلیت اطمینان و برنامه‌های پیش‌کنشی، سیستم پاسخ‌دهی خدمات، اثربخشی و کیفیت، از کارافتادگی و ایمنی، معضلات انرژی و محیطزیست، کارایی تیم، معضلات رویه‌فعالیت‌ها، مدیریت بودجه، منابع انسانی Reliability and predictive plans, service response system, effectiveness, and quality, failure and safety, energy and environment problems, team efficiency, activity procedure problems, budget management, human resources
Priyantha (2021)	آموزش و یادگیری، همکاری و مشارکت، تکنولوژی و نوآوری، تخصیص بودجه، سیاست‌گذاری‌ها، نگهداشت برنامه‌محور، فرهنگ حل مساله، ساختار سازمانی Education and training, cooperation and partnership, technology and innovation, budget allocation, policymaking, program-oriented maintenance, problem-solving culture, organizational structure	Roda & Macchi (2021)	خودآموزی، پایش وضعیت برخط، تصمیم‌گیری بر مبنا یا محوریت داده، تغییر انقلابی، مدیریت منابع انسانی، تداخلات و تعاملات احتمالی Self-learning, online situation monitoring, decision-making based on data, revolutionary change, human resource management, interactions, and possible interactions.

از آن‌جا که مطالعات بنیادی، توسعه‌ای و نیز کاربردی بسیار کمی با هدف بررسی، بهبود و ارتقای مدل‌های مدیریت نگهداری و تعمیراتِ سرمایه‌های فیزیکی در حوزه صنایع کشاورزی انجام شده است، مطالعه حاضر به دنبال یک بررسی همه‌جانبه و ارائه یک چارچوب مدیریتی نگهداری و تعمیرات با تکیه بر فرآیندهایی چون طرح‌ریزی و مفهومی‌سازی اولیه و به دنبال آن ارزیابی آن‌ها با هدف بهبود برنامه‌های نگهداشت در صنایع کشاورزی می‌باشد. عمده تمرکز این پژوهش بر روی دخالت دادن سطوح راهبردی و تاکتیکی در مدل مدیریت نگهداری و تعمیرات در صنایع کشاورزی و در نهایت گسترش سازوکارها به سمت رویکرد عملیاتی، در قالب برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت است. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی در زمینه مدیریت نگهداری و تعمیرات در پژوهش حاضر، اراضی کشاورزی با سطح زیرکشت بالای ۲۰۰۰ هکتار در کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

شرح مختصری از گام‌های چهارگانه پژوهش حاضر مطابق زیر می‌باشد که در شکل ۲ نیز به نمایش درآمده است:

گام نخست: طرح‌ریزی و مفهومی‌سازی چارچوب مدیریت نگهداری و تعمیرات در حوزه صنایع کشاورزی براساس روش‌های بررسی منابع کتابخانه‌ای و نیز طراحی پرسشنامه اولیه به منظور بهره‌مندی از نظر خبرگان مطرح در مورد معیارها و زیرمعیارهای انتخابی.

گام دوم: طراحی پرسشنامه ثانویه به‌منظور شناخت مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای اثرگذار بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد صورت گرفت. بدین منظور براساس اطلاعات پرسشنامه اولیه و بررسی منابع انجام‌شده، از نظرات کارشناسان و مدیران در حوزه مدیریت صنایع کشاورزی و صنایع وابسته بودند، بهره گرفته شد.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به انواع ماشین‌ها، ادوات، تجهیزات به همراه انواع محصولات در واحدهای کشت و صنعت

Table 2- Information related to all types of machines, tools, equipment, along with all types of products in agro-industries

انواع ماشین‌آلات مورد استفاده Types of machines used	تراکتورها Tractors	تراکتورهای بزرگ مخصوص فعالیت‌های مزرعه و امور دام، تراکتورهای کوچک مخصوص فعالیت‌های باغی Large tractors for farm and livestock activities, small tractors for garden activities	
	ادوات و دیگر ماشین‌ها در سطح مزارع Implements and other farm machines	گاوآهن‌ها، دیسک‌ها و لولرها، چیزل‌ها Plows, discs and levelers, chisels	مخصوص خاک‌ورزی Tillage process
		خطی‌کارها، نشاءکارها، ردیف‌کارها Planters and seeders	مخصوص فرآیند کاشت Cultivation/Planting process
		سمپاس‌های دستی و نیمه‌مکانیزه، کودپاش‌ها، سیستم‌های آبیاری تحت فشار و قطره‌ای، میکروالمنت‌ها، انواع ادوات هرس، انواع پمپ‌ها Manual and semi-mechanized sprayers, fertilizer sprayers, pressurized and drip irrigation systems, microelements, pruning tools, pumps	مخصوص فرآیند داشت Maintain process
		دروگرها، شیکرها، بیلرها، کمباین‌ها Harvesters, Shakers, Balers, Combines	مخصوص فرآیند برداشت و بسته-بندی Harvesting and packaging process
	تجهیزات مخصوص گلخانه Special greenhouse equipment	تأسیسات تهویه، تأسیسات گرمایشی، تأسیسات سرمایشی، سیستم‌های کانال کشی و آبیاری، سیستم‌های کنترل برق و روشنایی، تجهیزات رطوبت‌رسانی. Ventilation facilities, heating facilities, cooling facilities, canalization and irrigation systems, electricity and lighting control systems, and humidification equipment.	
	تجهیزات در سطح دامپروری‌ها Livestock farming equipment	میکسر، علوفه خردکن، ماشین بیلر، تأسیسات تهویه، تأسیسات گرمایشی، تأسیسات سرمایشی، سیستم‌های آبخوری، سیستم‌های شیردوشی، سیستم‌های خنک‌کاری شیر (شیرسردکن‌ها)، مبدل‌های حرارتی Mixer, fodder crusher, baler, ventilation facilities, heating facilities, cooling facilities, drinking systems, milking systems, milk cooling systems (milk coolers), heat exchangers	
	تجهیزات حمل و نقل و عمرانی Transportation equipment	تریلی‌ها، لودرها، گریدرها، کامیون‌ها Trolleys, loaders, graders, trucks	
محصولات زراعی Crops	گندم و جو wheat and barley	زمان کشت مهر تا آذرماه، زمان برداشت تیرماه Cultivation time is from October to December, harvest time is in July	
	چغندرقند Sugar beet	زمان کشت اسفند تا فروردین ماه، زمان برداشت مهر و آبان Cultivation time from March to April, harvest time is in October and November	
	ذرت علوفه‌ای fodder corn	زمان کشت خرداد ماه، زمان برداشت مهرماه Cultivation time in June, harvest time in October	
	کلزا Canola	زمان کشت شهریور ماه، زمان برداشت خردادماه Cultivation time is in September, harvest time is in June	
محصولات صیفی‌جات Summer products	گوجه‌فرنگی Tomato	زمان کشت اردیبشهت ماه، زمان برداشت شهریورماه Cultivation time in May, harvest time in September	
	خربزه Melon	زمان کشت خردادماه، زمان برداشت شهریورماه Cultivation time in June, harvest time in September	
محصولات باغی Garden products	سیب Apple	زمان برداشت شهریور تا مهرماه Harvest time from September to October	
	گلابی Pear	زمان برداشت شهریورماه Harvest time in September	
	هلو Peach	زمان برداشت اردیبهشت و خرداد ماه Harvest time in May and June	
	گوجه سبز Greengage	زمان برداشت اردیبهشت و خرداد ماه Harvest time in May and June	
	شلیل Nectarine	زمان برداشت تیرماه Harvest time in July	
	گیلاس Cherry	زمان برداشت تیرماه Harvest time in July	

پرسشنامه‌های ارسالی عمدتا در اختیار کارشناسان و مدیران در واحدهای کشت و صنعت مزرعه آستان قدس رضوی، کشت و صنعت نمونه امید خراسان، کشت و صنعت سبزداناب، کشت و صنعت رشدینه و کشت و صنعت سادات خراسان گرفت که دارای حجم بالایی از ناوگان ماشین‌ها و ادوات کشاورزی در سطوح مزرعه و گلخانه، حمل و نقل و فرآوری محصولات کشاورزی بودند. جدول ۲ اطلاعات مربوط به نوع محصولات و کشت‌ها، فصول کشت و برداشت، نوع ماشین‌های متداول در عملیات‌های مختلف در سطح کشت و صنعت‌های مورد بررسی آورده شده است. همچنین براساس بررسی‌های میدانی صورت گرفته، نوع سیستم نگهداری و تعمیرات به‌کار رفته در حال حاضر از نوع واکنشی (اصلاح بعد از خرابی) برای اغلب ماشین‌ها و تجهیزات در این واحدها می‌باشد.

گام سوم: تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری‌شده. با دریافت نظرات کارشناسی خبرگان، به‌منظور اولویت‌بندی معیارها و زیر معیارها در چارچوب مدل مفهومی نگهداری و تعمیرات از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده شد.

گام چهارم: در این بخش، هریک از معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها مورد بحث و بررسی بیشتر قرار گرفت و با مقایسه با سایر مطالعات انجام‌شده، راهکارها و پیشنهادات کاربردی با هدف بهره‌مندی از نتایج آن برای مدیران و کارشناسان در کشت و صنعت‌ها و نیز قابلیت تعمیم‌پذیری آن برای سایر صنایع غذایی و کشاورزی ارائه شد.

شکل ۲- مراحل انجام پژوهش (شناسایی و اولویت‌بندی معیارها/زیرمعیارهای مؤثر بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات)

Fig.2. Steps of conducting research (identifying and prioritizing criteria / sub-criteria affecting efficient maintenance and repair management)

طرح‌ریزی با هدف تعیین معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار

به دنبال مرور منابع صورت‌گرفته در جداول ۱ و ۲، با هدف شناسایی معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات، پرسشنامه اولیه به‌منظور تأیید، حذف یا اضافه کردن معیارها و زیرمعیارهای مورد مطالعه، از طریق نظرات کارشناسی ۱۵ خبره با سوابق مشاوره و مدیریت نگهداری و تعمیرات حداقل ۱۵ سال در صنایع مختلف، طراحی شد. بدین منظور در معیار مدیریت سازمانی، زیر معیارهای دیگری چون "مدیریت تغییر و همسوسازی کلیه ذی‌نفعان" و "اتخاذ مشوق‌ها و قوانین مربوط به نگهداشت" و در معیار عوامل ساختاری زیر معیارهایی چون"مدیریت عوامل محیطی و عملیاتی" و نیز "داشتن فرهنگ سازمانی مناسب" از نگاه خبرگان پیشنهاد گردید که نتایج آن به همراه نتایج مرور منابع، در شکل ۳ آورده شده است.

شکل ۳- طبقه‌بندی معیارها و زیرمعیارهای اثرگذار بر مدیریت نگهداری و تعمیرات براساس پیشینه تحقیقات و نظر خبرگان

Fig.3. Classification of criteria and sub-criteria affecting maintenance and repair management based on available literature and expert opinion

اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت نگهداری-تعمیرات با کمک روش بهترین-بدترین

طراحی پرسشنامه ثانویه به‌منظور شناخت و اولویت‌بندی مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای اثرگذار بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد انجام گرفت. بدین منظور براساس اطلاعات پرسشنامه اولیه و نیز بررسی منابع انجام‌شده، پرسشنامه ثانویه در اختیار ۳۰ کارشناس خبره که دارای سوابق مدیریتی و اجرایی در بخش‌های صنایع کشاورزی بودند، قرار داده شد که در نهایت با توجه به بررسی اطلاعات تکمیل شده/نشده، نظرات کارشناسی ۲۳ خبره مبنای تجزیه و تحلیل‌ها با کمک روش تصمیم‌گیری بهترین-بدترین قرار گرفت. اطلاعات مربوط به خبرگان شامل سطح تحصیلات، سمت شغلی و تجربه بر حسب سال در جدول ۳ آورده شده است.

روش بهترین-بدترین به‌منظور ارزیابی و اولویت‌بندی نظر خبرگان در مورد معیارهای مؤثر بر مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت وصنعت‌ها مورداستفاده واقع شد. نخستین بار این روش توسط رضایی (Rezaei, 2015) معرفی شد. در این روش، بهترین (مطلوب‌ترین و مهم‌ترین) معیار و بدترین (نامطلوب‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین) معیار توسط تصمیم‌گیرندگان شناسایی شده و سپس مقایسات زوجی بین این دو معیار بهترین و بدترین و سایر زیرمعیارها انجام می‌شود. به دنبال آن، یک مسأله بهینه‌سازی حداقل-حداکثری[1] به‌منظور تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای اثرگذار فرمول‌بندی و حل می‌شود. به عبارتی این روش، ابزار مناسبی برای وزن‌دهی به معیارها به شمار می‌رود. به‌طور کلی فرآیند به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری بهترین-بدترین براساس گام‌های پنج‌گانه زیر می‌باشد (Rezaei, 2015; Rezaei, 2016):

گام اول: تعیین یک مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ براساس دیدگاه خبرگان یا تصمیم‌گیرندگان.

گام دوم: شناسایی مهم‌ترین معیارها (بهترین (B)) و کم‌اهمیت‌ترین معیارها (بدترین (W)) براساس دیدگاه خبرگان یا تصمیم‌گیرندگان، جایی‌که هر فرد می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی داشته باشد.

گام سوم: تعیین بهترین معیار اولویت‌دار در مقایسه با سایرمعیارها

1- Max-Min

از طریق نمره‌دهی از عدد ۱ تا ۹. جایی که عدد ۱ به مفهوم اهمیت یکسان و عدد ۹ بیش‌ترین اهمیت آن معیار را بیان می‌کند. بدین ترتیب، نتایج مقایسه بهترین معیار در برابر دیگر معیارها به‌صورت یک بردار $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bj}, \dots, a_{Bn})$ قابل تعریف است که در آن a_{Bj} نشان‌دهنده مهم بودن آن معیار (B) به ازای jمعیار مورد بررسی است.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به خبرگان در کشت و صنعت‌های مورد مطالعه

Table 3- Information related to the experts in agro-industries

ردیف کارشناس Expert .No	تجربه بر حسب سال Years of experience	سمت شغلی Occupation	سطح تحصیلات Education	ردیف کارشناس Expert .No	تجربه بر حسب سال Years of experience	سمت شغلی Occupation	سطح تحصیلات Education
1	14	مدیرکارگاه تعمیرات Workshop manager	کارشناسی BSc	13	14	تکنیسن فنی Technician	کارشناسی BSc
2	11	مدیرکارگاه تعمیرات Workshop manager	کارشناسی ارشد MSc	14	12	مدیر امور فنی Technical manager	کارشناسی ارشد MSc
3	12	مدیر امور فنی Technical management	کارشناسی BSc	15	16	مدیرکارگاه تعمیرات Workshop manager	کارشناسی BSc
4	15	مدیر تولید و برنامه‌ریزی Production and planning manager	کارشناسی ارشد MSc	16	9	مدیر کشت و صنعت Agro-industry manager	کارشناسی ارشد MSc
5	9	مدیر کشت و صنعت Agro-industry manager	کارشناسی ارشد MSc	17	9	مدیر امور فنی Technical manager	کارشناسی ارشد MSc
6	10	مدیر کشت و صنعت Agro-industry manager	دکتری PhD	18	7	تکنیسن فنی Technician	کارشناسی ارشد MSc
7	9	مدیر تولید و برنامه‌ریزی Production and planning manager	کارشناسی ارشد MSc	19	10	مدیر تولید و برنامه‌ریزی Production and planning manager	دکتری PhD
8	12	مدیر مالی و بودجه Finance and budget manager	کارشناسی BSc	20	10	مدیر منابع انسانی Human resources manager	کارشناسی BSc
9	7	مدیرکارگاه تعمیرات Workshop manager	کارشناسی ارشد MSc	21	14	مدیرکارگاه تعمیرات Workshop manager	کارشناسی ارشد MSc
10	8	مدیر منابع انسانی Human resources manager	کارشناسی BSc	22	11	مدیرکارگاه تعمیرات Workshop manager	کارشناسی ارشد MSc
11	8	مدیر تولید و برنامه‌ریزی Production and planning manager	کارشناسی ارشد MSc	23	15	مدیر منابع انسانی Human resources manager	کارشناسی BSc
12	13	تکنیسن فنی Technician	کارشناسی BSc	–	–	–	

گام چهارم: تعیین اولویت‌دار بودن سایر معیارها در برابر بدترین یا کم‌اهمیت‌ترین معیار از طریق نمره‌دهی از عدد ۱ تا ۹. در نتیجه، نتایج دیگر معیارها در برابر بدترین معیار شناخته‌شده به‌صورت یک بردار $A_w = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{jW}, \dots, a_{nW})$ قابل تعریف است که در آن a_{jW} نشان‌دهنده اولویت‌دار بودن یا مهم بودن سایر معیارها به‌ازای j در مقایسه با بدترین معیار (W) می‌باشد.

گام پنجم: محاسبه وزن‌های بهینه $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$. در واقع محاسبه وزن‌های بهینه از طریق کمینه‌کردنِ بیشینه قدرمطلق اختلاف رابطه $\{|w_B - a_{Bj}w_j|, |w_j - a_{jW}w_W|\}$ برای تمامی j ها به‌دست می‌آید که در نهایت به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی

مطابق با روابط (۱) و (۲) تبدیل می‌شود:

$$\min \max_j \{|w_B - a_{Bj} w_j|, |w_j - a_{jW} w_W|\} \quad (۱)$$

به شرطی که

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$$

$w_j \geq 0$ برای تمامی j ها

در ادامه، رابطه (۱) به‌صورت رابطه (۲) تبدیل می‌شود:

$$\min \xi$$

که در آن داریم:

$$|w_B - a_{Bj} w_j| \leq \xi, \text{ for all } j$$

$$|w_j - a_{jW} w_W| \leq \xi, \text{ for all } j \quad (۲)$$

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$$

$w_j \geq 0$ برای تمامی j ها

مطابق با خروجی رابطه (۲)، رابطه ξ^* and $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ به‌ترتیب بیانگر وزن بهینه معیارها و نرخ سازگاری[1] در هر سطح می‌باشد. اگر نرخ سازگاری به عدد صفر نزدیک باشد، بدین مفهوم است که سطح سازگاری در مقایسات زوجی، از سوی پاسخ‌دهندگان، بسیار بالا بوده است و بالعکس. از طرفی اگر در مسائل بیش از یک سطح در درخت سلسله مراتبی برای معیارها تعریف شده باشد، آنگاه w^* که برای هر سطح تخمین زده می‌شود، به‌عنوان وزن محلی[2] شناخته خواهد شد. بنابراین وزن سراسری[3] برای هر زیرمعیار در آخرین سطح از درخت سلسله‌مراتبی از طریق ضرب وزن معیارهای محلی قابل محاسبه است. در این مطالعه از محیط برنامه‌نویسی VBA در نرم‌افزار اکسل[4] به‌منظور محاسبات روش بهترین–بدترین بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به وزن مهم‌ترین معیارهای مؤثر بر مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها از طریق دیدگاه هر یک از خبرگان و نیز میانگین وزنی آن‌ها به همراه اولویت‌بندی (رتبه‌بندی) آن‌ها براساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین–بدترین در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به نمودار سلسله مراتبی در شکل ۳ مشاهده می‌شود که از بین معیارهای مورد بررسی در سطح اوّل، معیارهای "مدیریت سازمانی"،"عوامل انسانی"و "عوامل ساختاری" به‌ترتیب دارای بالاترین اولویت با میانگین هندسی[5] وزنی ۰/۴۶۱، ۰/۱۹۲ و ۰/۳۲۵ از نگاه کارشناسان می‌باشند. هم‌چنین میانگین وزنی نرخ سازگاری (ξ^*) برابر ۰/۱۳ به‌دست آمد که هرچه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، کیفیت مناسب پاسخ‌دهی را نشان می‌دهد (Liang, Brunelli, & Rezaei, 2019). یکی از مهم‌ترین وظایف مدیریت سازمان، تبیین راهبردها، اهداف و سیاست‌گذاری‌ها در راستای دست‌یابی به تعالی در حوزه نگهداری و تعمیرات جهت مدیریت بهینه تجهیزات و ماشین‌ها در کشت و صنعت‌ها بوده که این امر در معیار وزن‌دهی از نگاه خبرگان قابل‌توجه می‌باشد. همچنین، براساس دیدگاه خبرگان می‌توان دریافت که نبود راهبردها و سیاست‌گذاری‌های پایدار و منسجم، به دلیل تغییرات مکرر و پیوسته در سطح مدیریت سازمان و یا به عبارتی عدم توجه کافی به مقوله "مدیریت سازمانی" در بخش کشت و صنعت‌ها بوده است. از طرفی اهمیت مقوله "مدیریت سازمانی" در مدیریت نگهداشت دارایی‌های فیزیکی مورد توجه محققان در سایر مطالعات بوده است. برای مثال در یک مطالعه به مبحث "مدیریت سازمانی" و نقش رهبران/مدیران عالی در ایجاد تغییرات اساسی برای دست‌یابی به فرهنگ نگهداشت مبتنی بر قابلیت اطمینان در سازمان‌ها/شرکت‌ها پرداخته شده است. براساس تحلیل‌های صورت گرفته رهبران شامل عمل‌گرا و تحول‌گرا دسته‌بندی شده که نقش مهمی در تبیین نقشه‌راه‌ها و چشم‌اندازها، جهت‌دهی به سمت خط مشی‌ها و راهبردها، توجه به مدیریت تغییر همگام با تحولات روز، آگاهی از نیازمندی‌های سازمان در راستای اهداف و چشم‌اندازها، حفظ تعادل سازمان در مواجهه با چالش‌ها و رکودها، و نیز پاسخ‌گویی از دیگران در قبال انحراف سازمان از اهداف دارند (Thomas, 2005). در مطالعه‌ای در صنایع تولید و فرآوری شکر، در مقوله "مدیریت سازمانی"، به‌ترتیب عواملی مانند اتخاذ سیاست‌گذاری‌های مناسب نگهداشت، اختصاص بودجه و مدیریت موجودی‌ها، ارزیابی عملکرد و پایش پیوسته فعالیت‌های نگهداشت از مهم‌ترین عوامل موفقیت گزارش شده است (Gandhare, Akarte, & Patil, 2018). از طرفی بررسی عملکرد نگهداری و تعمیرات کشت و صنعت‌ها در غرب هند نشان داد که در مرحله "مدیریت سازمانی"، اهمیت انتخاب راهبردهای مناسب نگهداشت از سوی مدیران به همراه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اصولی فعالیت‌ها، نقش اساسی در ارتقای عملکرد نگهداشت فعلی انواع ماشین‌ها و ادوات در سطح مزرعه دارند (Gandhare & Akarte, 2020). براساس نظر خبرگان، معیار "عوامل ساختاری" به‌عنوان اولویت دوم در مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد شناخته شد. عدم برخورداری مناسب از فرهنگ سازمانی مناسب همسو با اهداف و راهبردهای نگهداشت و نداشتن ساختار سلسله

1- Consistency rate
2- Local weight
3- Global weight
4- Excel Microsoft software

5- Geometric mean

مراتبی مناسب با هدف تعیین جایگاه افراد و نیز نقش آن‌ها از جمله وظایف مدیران عالی بوده که کم‌تر مورد توجه در این بخش بوده است. براساس مطالعات صورت‌گرفته با هدف ایجاد ساختارهای نگهداشت قابلیت اطمینان محور، توجه به مقوله ساختارهای کارکرد محور و فرآیند محور به همراه تقویت ارزش‌ها و فرهنگ سازمانی می‌تواند نقش اساسی ایفا نمایند. به عبارتی در این مرحله نیاز به تعامل گروهی با ایجاد کارگروه‌های کارکردی و فرآیندی در سطح سازمان/شرکت با هدف برقراری ارتباط بین عناصر فرهنگ سازمانی و ساختار طراحی شده می‌باشد (Thomas, 2005). از طرفی براساس نتایج به‌دست‌آمده، معیار "عوامل انسانی" ضریب وزنی و درجه اولویت کم‌تری از دیدگاه کارشناسان به خود اختصاص داده است که این امر بیش‌تر ناشی از ماهیت فصلی بودن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات انواع ماشین‌ها و تداخل کم‌تر نیروی انسانی در طول ایام سال در کشت و صنعت‌ها می‌باشد. اما با این وجود همسو با اهداف "مدیریت سازمانی" که دارای اولویت بالایی بوده است، تقویت برنامه‌های آموزشی سالیانه و آگاهی بخشی نیروی انسانی نسبت به راهبردها و سیاست‌گذاری‌های نگهداشت در کشت و صنعت‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

شکل ٤– وزن‌دهی و اولویت‌بندی معیارهای مؤثر بر مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها از طریق روش بهترین–بدترین

Fig.4. The weight and rank of the criteria for maintenance and repair management at the first level using BWM

در سطح دوم از نمودار سلسله مراتبی در شکل ۳ به تبیین زیر معیارهای مربوط به هریک از معیارهای سه‌گانه در مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها پرداخته شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از روش تصمیم‌گیری بهترین-بدترین، که در جدول ۴ ارائه شده است، در معیار "مدیریت سازمانی"، زیرمعیارهایی چون"حمایت مدیران عالی"، "اختصاص بودجه و مدیریت بهینه موجودی" و "راهبردها و سیاست‌گذاری‌های نگهداشت" در کشت و صنعت‌ها به‌ترتیب بالاترین نمره وزنی با مقادیر ۰/۲۴۶، ۰/۱۶۰ و ۰/۱۴۲ را به خود اختصاص دادند. به‌عبارتی از نگاه کارشناسان، این زیرمعیارها دارای بالاترین اولویت در دست‌یابی به برنامه‌های مناسب نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها شناخته شدند. بنابراین می‌توان گفت حمایت مدیریت سازمان و تقویت این رکن در سطح کشت و صنعت‌ها می‌تواند به‌عنوان یک عامل محرک بر روی مدیریت بودجه و موجودی‌ها و نیز تبیین و پیشبرد اهداف و راهبردهای سازمان تأثیر مستقیم داشته باشد و متعاقب آن می‌تواند سبب افزایش اثربخشی پروژه‌های نگهداشت در این بخش گردد. با توجه به اهمیت جایگاه رهبران و مدیران عالی در مدیریت نگهداری و تعمیرات، از این رو حساسیت ویژه‌ای می‌بایست در انتخاب مدیران میانی باید اتخاذ شود، به طوری‌که آگاهی کافی به سازوکارهای نگهداری و تعمیرات در واحدهای کشت و صنعت‌ها داشته باشند. در این راستا، اهمیت جایگاه مدیران عالی در مدیریت نگهداری و تعمیرات در صنایع غذایی و شیمیایی در کشور چک به‌منظور به‌کارگیری روش‌ها و راهبردهای نوین نگهداشت، سازمان‌دهی امور مرکزی، برون‌سپاری فعالیت‌ها، مدیریت چرخه کار و استانداردسازی فعالیت‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Branská *et al.*, 2016). علاوه بر این، جایگاه مدیران عالی سازمان در مدیریت فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در مزارع کشاورزی در کشور چین شامل مدیریت رویه‌ها و سازوکارهای عملیاتی، مدیریت برنامه‌های عملیاتی، مدیریت سیستم‌های پشتیبان، مدیریت عوامل خارج از مزرعه و نیز مدیریت عوامل داخلی یا محلی مورد توجه بوده است. نتایج نشان داد که امکان دست‌یابی به پارامترهای توسعه پایدار از طریق پایش مستمر شاخص‌های ارزیابی نگهداشت با توجه به چارچوب پیشنهادی از طریق حمایت مدیران عالی وجود دارد (Kim, Jeong, Lee, & Lim, 2014). زیر معیار "اختصاص بودجه و مدیریت بهینه موجودی" در اولویت دوم به‌منظور موفقیت مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها در خراسان رضوی (شهرستان مشهد) از نگاه خبرگان برشمرده شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در حال حاضر سهم بودجه اختصاص‌یافته به بخش نگهداری و تعمیرات در مقایسه با کل بودجه سازمان در کشت و صنعت‌ها ناچیز است. از این‌رو اختصاص بودجه مناسب با هدف تقویت راهبردهای نگهداشت به‌ویژه از نوع پیشگیرانه می‌تواند اثربخشی قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های از کارافتادگی ماشین‌ها و نیز بهبود بهره‌وری عملیات کشاورزی داشته باشد. در این راستا، اهمیت اختصاص بودجه و مدیریت بهینه موجودی‌ها در مطالعات مختلف در ارائه مدل‌های نگهداری و تعمیرات مورد توجه پژوهشگران بوده است. برای مثال بودجه‌بندی مناسب با هدف پوشش انواع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات به‌ویژه تمرکز بیش‌تر بر روی هزینه‌های نگهداشت پیشگیرانه به‌منظور کاهش تعداد خرابی‌ها و از کارافتادگی‌های تصادفی در ماشین‌ها، از جمله مهم‌ترین وظایف در سطح "مدیریت سازمانی" گزارش شده است (Johannes, Theodorus Voordijk, Marias Adriaanse, & Aranda-Mena, 2021; Gandhare & Akarte, 2020; Oliveira & Lopes, 2019). در ادامه معیار مدیریت سازمانی، زیر معیار"راهبردها و سیاست‌گذاری‌های مناسب نگهداشت" از نگاه نظر خبرگان، به‌منظور دست‌یابی به مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها در اولویت سوم قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که عمده راهبردهای نگهداشت در کشت و صنعت‌ها به‌صورت واکنشی (انجام تعمیرات ماشین‌ها بعد از خرابی) بوده است. از این رو به منظور کاهش توقفات اضطراری (تصادفی) در عملیات کشاورزی به‌ویژه در زمان‌ها یا فصل‌های اوج عملیات زراعی و باغی و متعاقب آن مدیریت بهینه هزینه‌های تعمیرات، بهره‌گیری از راهبردهای پیشگیرانه نگهداشت مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی شناخته‌شده در حوزه نگهداشت مانند استانداردهای ایزو[1]، استانداردهای موسسه بریتانیا[2] و سایر استانداردهای اروپایی[3] می‌تواند از سوی مدیران مورد توجه قرار گیرد. مطالعات مشابه دیگری نیز به اهمیت جایگاه "راهبردها و سیاست‌گذاری‌های نگهداشت" در ابعاد مختلف مدیریت نگهداری و تعمیرات در صنایع تولیدی و کشاورزی پرداخته‌اند. برای مثال تأکید بر راهبردهای نگهداشت پیشگیرانه قابلیت اطمینان محور به جای راهبردهای واکنشی (اصلاح بعد از خرابی) در صنایع کشاورزیِ کشور ترکیه با هدف افزایش اثربخشی بیش‌تر برنامه‌های نگهداشت مورد توجه بوده است. نتایج نشان داد که بهره‌مندی از راهبردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان نقش به‌سزایی در ارتقای قابلیت اطمینان و پویایی انواع تجهیزات و ماشین‌ها ایفا می‌نمایند (Yavuz, Doğan, Carus, & Görgülü, 2019). نتایج ارائه مدل مدیریت نگهداری و تعمیرات به‌منظور دست‌یابی به تولید ناب در مزارع لبنی نشان داد که بهره‌مندی از راهبردهای مناسب نگهداشت در کنار عواملی چون روش‌های تولید ناب، برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی فعالیت‌های نگهداشت و نیز آماده‌سازی و نظارت بر برنامه‌های نگهداشت، نقش

1- International Organization for Standardization (ISO)
2- British Standards Institute (BSI)
3- Europäische Norm (EN Standards)

اساسی در کاهش تعداد از کار افتادگی‌های ماشین‌ها، بهبود بهره‌وری و نیز اثربخشی نیروی کارگری در مزارع لبنی خواهد داشت (Atay & Arslankaya, 2015).

در اولویت‌های بعدی، زیر معیار "میزان آگاهی از اهمیت مباحث نگهداشت و ایمنی در سازمان" از نگاه کارشناسان، نقش محوری در معیار "مدیریت سازمانی" در کشت و صنعت‌ها ایفا نموده که بی‌شک از مهم‌ترین وظایف مدیران و رهبران عالی و نیز مدیران ارشد/میانی در سطح شرکت‌ها برشمرده می‌شود. تحلیل‌ها نشان داد که در حال حاضر در عمده کشت و صنعت‌های مورد بررسی، رویه‌ها و سازوکارهای مناسب به‌منظور تقویت مباحث ایمنی و نیز آگاهی‌بخشی از انواع استراتژی‌های نوین در حوزه نگهداشت مانند رویکردهای پیشگیرانه و پیش‌بینانه، کم‌تر مورد توجه مدیران در سطح سازمان بوده است.

جدول ٤– وزن‌دهی و اولویت‌بندی زیرمعیارهای مؤثر در سطح دوم بر مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها

Table 4- The weight and rank of the sub-criteria for the economic criteria at the second level using BWM

معیار Criteria	زیرمعیار Sub-criteria	میانگین وزنی Weight	رتبه یا اولویت Rank
مدیریت سازمانی Organization management	راهبردهای و سیاست‌گذاری‌های سازمانی نگهداشت Strategies and policies	0.142	3
	حمایت مدیر عالی در مدیریت سازمانی نگهداشت Top management support	0.246	1
	مدیریت چرخه کار و استانداردسازی امور نگهداشت Workflow management and standardization	0.071	5
	اختصاص بودجه لازمه و نیز مدیریت بهینه موجودی‌ها Fund allocation and inventory resource management	0.160	2
	میزان آگاهی از اهمیت مباحث نگهداشت و ایمنی در سازمان Awareness of maintenance and safety activities	0.116	4
	اندازه‌گیری عملکرد و پایش پیوسته فعالیت‌ها و راهبردهای نگهداشت Performance measurement and monitoring	0.047	8
	مدیریت تغییر و همسوسازی کلیه ذی‌نفعان Change management and alignment of all stakeholders	0.091	7
	در نظر گرفتن مشوق‌ها و قوانین مربوط به امور نگهداشت Incentives and rules related to maintenance	0.055	6
عوامل انسانی Human-related	اهمیت و جایگاه آموزش و یادگیری در پرسنل نگهداشت Training & education	0.318	2
	تعهد افراد و مشارکت مستمر آن‌ها در فعالیت‌های نگهداشت Participation and commitment	0.156	3
	صلاحیت و توانمندی پرسنل نگهداشت (نیروی متخصص) Adequacy of maintenance personnel	0.352	1
	آگاهی پرسنل از اهداف و راهبردهای نگهداشت Employee awareness of maintenance goals and strategies	0.110	4
عوامل ساختاری Organizational aspects	مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت Documentation of maintenance works	0.163	2
	برخورداری از یک ساختار سازمانی مناسب در گردش کارهای نگهداشت Well-established organizational structure	0.121	4
	برخورداری از ساختارهای مناسب فناوری اطلاعات در کنار تجهیزات مناسب Adequacy of IT infrastructures and facilities for operations	0.154	3
	مدیریت عوامل محیطی و عملیاتی در فعالیت‌های نگهداشت Environmental and operatorial conditions	0.112	5
	برخورداری از فرهنگ سازمانی مناسب Organizational culture	0.09	6
	مدیریت مناسب قراردادها و نحوه تعامل با عوامل برون سازمانی Contracting out maintenance	0.191	1

علاوه بر این نکته قابل‌توجه، درجه کم‌اهمیتی زیر معیارهایی چون "در نظر گرفتن مشوق‌ها و قوانین مربوط به امور نگهداشت" و "اندازه‌گیری عملکرد و پایش پیوسته فعالیت‌ها و راهبردهای نگهداشت" با مقادیر میانگین وزنی به‌ترتیب ۰/۰۵۵ و ۰/۰۴۷ بوده که از دیدگاه خبرگان در جایگاه مدیریت سازمانی گزارش شده است. دلیل کم‌اهمیتی این شاخص‌ها در مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها از نگاه خبرگان، به دلیل عدم توجه به مسائلی چون برنامه‌های آگاهی‌بخشی مناسب و نیز نبود سازوکاروهایی برای پایش مستمر عملکرد تجهیزات و پرسنل در این بخش بوده است. به‌منظور تقویت سازوکارهای اندازه‌گیری عملکرد انواع دارایی‌ها (انسانی، مالی و فیزیکی) در کشت وصنعت‌ها و به دنبال آن بصری‌سازی روند پیشرفت‌ها، زیرساختارهای فناوری اطلاعات مبتنی بر نرم‌افزارهای مدیریت منابع سازمانی می‌تواند مورد استفاده باشد. اهمیت این مسأله در معیار "جنبه‌های ساختاری" در ادامه بحث شده است.

در ادامه و در سطح معیار "عوامل انسانی"، مطابق با نتایج مدل بهترین-بدترین، به‌ترتیب زیرمعیارهایی چون "صلاحیت و توانمندی پرسنل نگهداشت (نیروی متخصص)" و "اهمیت و جایگاه آموزش و یادگیری در پرسنل نگهداشت" دارای بالاترین مقادیر وزنی و نمره اولویت‌بندی به‌ترتیب با مقادیر ۰/۳۵۲ و ۰/۳۱۸ در واحدهای کشت و صنعت‌ها به‌دست آمدند. به‌منظور دست‌یابی به برنامه‌های مناسب نگهداشت در کشت و صنعت‌ها، بهره‌مندی از برنامه‌های آموزشی مستمر و برگزاری کارگاه‌های فصلی در محیط کشت و صنعت‌ها در جهت ارتقای توانمندی‌های ارتباطی و فنی پرسنل به‌ویژه در بخش نگهداری و تعمیرات، توجه به نکاتی چون استخدام پرسنل با قابلیت توانایی‌های چند مهارته شامل مهارت‌های نرم‌افزاری، مهارت‌های مدیریت در شرایط بحران، مهارت‌های برقراری تعامل و ارتباطات، در کنار مهارت‌های سخت‌افزاری/فنی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. از طرفی این شاخص‌ها در فاز "عوامل انسانی" در سایر مطالعات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال زیر معیار "اهمیت و جایگاه آموزش و یادگیری در پرسنل نگهداشت" از طریق آموزش روش‌هایی چون نگهداشت بهره‌ور فراگیر (نگهداشت خودآموز برای اپراتورها)، برگزاری کارگاه‌های آموزشی در راستای تقویت ارتباطات و قابلیت حل مسأله توسط پرسنل نگهداشت، برنامه‌های آموزش با هدف آشنایی پرسنل با سیستم‌های کامپیوتری در جهت تسریع روند جریان کارها و حذف فرآیندهای دستی انجام امور نگهداشت، اختصاص بودجه ویژه به‌منظور برگزاری آموزش‌های فنی موردنیاز مورد توجه بوده است. علاوه بر این، در زیر معیار "صلاحیت و توانمندی پرسنل نگهداشت (نیروی متخصص)" توجه به استخدام نیروی کار چند مهارته، میزان مرتبط بودن تخصص‌ها متناسب با کار تعریف‌شده، سنجش عملکرد پرسنل به‌صورت دوره‌ای، تشویق پرسنل در اختیار برای دریافت صلاحیت‌های لازم با توجه به نیازهای روز، در صنایع تولیدی و کشاورزی پیشنهاد شده است (Priyantha, 2021; Sarbini, Ibrahim, Abidin, Yahaya, & Azizan, 2021; Jandali & Sweis, 2018; Tan, Shen, Langston, Lu, & Yam, 2014; Macchi & Fumagalli, 2013; Ab Wahid & Corner, 2009). در ادامه معیار "عوامل انسانی"، شاخص‌های دیگری چون "تعهد افراد و مشارکت مستمر آن‌ها در فعالیت‌های نگهداشت" و "آگاهی پرسنل از اهداف و راهبردهای نگهداشت" دارای کم‌ترین اولویت در مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها براساس نظر خبرگان شناخته شدند. این در حالی است که مدیران عالی و میانی در سطح کشت و صنعت‌ها می‌توانند نقش مؤثری در تقویت تعهد و افزایش مشارکت پرسنل در نگهداشت سامانه‌ها و نیز آگاهی‌بخشی آن‌ها نسبت به موضوعات ایمنی و راهبردهای نگهداشت داشته باشند. در این راستا اختصاص جلسات هم‌اندیشی هفتگی یا ماهیانه با هدف تحلیل وضعیت نگهداشت با هدف بهبود مشارکت‌پذیری پرسنل و نیز اختصاص تشویق‌های حمایتی در راستای بهبود فرهنگ نگهداشت (به‌طور خاص پیشگیرانه)، از سوی مدیران می‌تواند کمک‌کننده باشد.

در طبقه‌بندی‌های سلسله مراتبی مربوط به معیار "عوامل ساختاری"، براساس نظر خبرگان، برخورداری از "مدیریت مناسب قراردادها و نحوه تعامل با عوامل برون سازمانی" و "مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت"، با مقادیر میانگین وزنی ۰/۱۹۱ و ۰/۱۶۳ به‌ترتیب بالاترین اولویت ممکن را به خود اختصاص دادند. بخشی از سیاست‌گذاری‌های نگهداری و تعمیرات انواع ماشین‌ها و تجهیزات در کشت و صنعت‌ها و نیز بخش قابل‌توجهی از عملیات برداشت محصولات کشاورزی به‌صورت پیمانکاری و استیجاری انجام می‌پذیرد. این در حالی است که هنوز سازوکاری در رابطه با ارزیابی اثربخشی این نوع سیاست‌های نگهداری و تعمیرات به‌ویژه تعمیرات اورهال (سراسری) سالیانه توسط پیمانکاران در این بخش وجود ندارد. لذا ارزیابی هزینه‌های اختصاص‌یافته به پیمانکاران و نیز میزان موفقیت آن‌ها در بهبود عملکرد تجهیزات در مواجهه با خرابی‌ها از سوی مدیران در کشت و صنعت‌ها، نقش به‌سزایی در مدیریت بهینه قراردادها خواهد داشت. مضاف بر این، براساس بررسی‌های میدانی صورت گرفته، بخش قابل‌توجهی از عملیات برداشت محصولات زراعی مانند گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و نیز چغندرقند توسط کمباین‌های استیجاری است. بدین مفهوم که براساس نظر خبرگان، وجود سازوکارهای قراردادی و برون‌سپاری بخشی از عملیات ویژه محصولات کشاورزی، می‌تواند صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها داشته باشد. از طرفی،

جدول ۵ به ارائه مهم‌ترین تجهیزات بحرانی با اولویت نگهداشت بالا براساس نوع کشت/محصول تولیدی و نیز فصل/فصول پرتراکم عملیات کشاورزی شامل مراحل آماده‌سازی اولیه، کاشت، داشت و برداشت می‌پردازد. همان‌طور که در معیار "مدیریت سازمانی" اشاره شد، نوع راهبرد غالب نگهداشت در بیش‌تر تجهیزات بحرانی به‌دست‌آمده، از نوع واکنشی (انجام تعمیرات بعد از خرابی) می‌باشد که در بخش کارگاه تعمیرات در واحدهای کشت و صنعت‌ها مورد اصلاح و بازبینی مجدد قرار می‌گیرند. برای مثال از میان ماشین‌های کشاورزی تراکتورهای بزرگ و نیز ادوات خاک‌ورزی شامل انواع دیسک‌ها، گاوآهن‌ها، لولرها در فرآیند آماده‌سازی اولیه زمین بیش‌ترین سهم عملیاتی را دارند. از طرفی، در فرآیند کشت محصولات زراعی در کشت و صنعت‌ها، قابلیت دسترسی بالای انواع بذرکارها و ردیف‌کارها حائز اهمیت است.

جدول ۵- تجهیزات بحرانی در کشت و صنعت‌ها براساس نوع کشت/محصول و فصول پرتراکم عملیاتی

Table 5- Critical equipment in agro-industries based on the type of crop/product and season

ماشین‌ها و تجهیزات بحرانی **Critical agricultural fleet**	فصل/فصول پرتراکم **Dense operating season (s)**	نوع کشت/محصول (زراعی، باغی، دامی، گلخانه‌ای) **Type of product (crop, orchard, livestock, greenhouse)**
تراکتورها و نیز ادوات خاک‌ورزی (دیسک‌ها، گاوآهن‌ها، لولرها)، بذرکارها، ردیف‌کارها Tractors, tillage implements (discs, plows, rollers), seeders	زمان فرآیند آماده‌سازی و کشت مهر تا آذرماه Preparation and cultivation times from October to December	گندم و جو Wheat and Barley
انواع دروگرها و بیلرهای متصل به تراکتورها، کمباین‌ها، ماشین‌های حمل و نقل (کامیون‌ها) Harvesters and balers attached to tractors, combines, transport machines (trucks)	زمان برداشت تیرماه Harvest time in July	گندم و جو Wheat and Barley
تراکتورها و نیز ادوات خاکورزی (دیسک‌ها، گاوآهن‌ها، لولرها)، بذرکارها Tractors, tillage implements (discs, plows, rollers), seeders	زمان فرآیند آماده‌سازی و کشت خردادماه Cultivation time in June	ذرت علوفه‌ای Forage corn
انواع دروگرها و بیلرهای متصل به تراکتورها، ماشین‌های حمل و نقل (کامیون‌ها) Harvesters and balers attached to tractors, combines, transport machines (trucks)	زمان برداشت مهرماه Harvest time in October	ذرت علوفه‌ای Forage corn
تراکتورها و نیز ادوات خاکورزی (دیسک‌ها، گاوآهن‌ها، لولرها)، بذرکارها Tractors, tillage implements (discs, plows, rollers), seeders	زمان فرآیند آماده‌سازی و کشت اسفند تا فروردین ماه Cultivation time from March to April	چغندرقند Sugar beet
انواع دروگرها و بیلرهای متصل به تراکتورها، ماشین‌های حمل و نقل (کامیون‌ها) Harvesters and balers attached to tractors, combines, transport machines (trucks)	زمان برداشت مهر و آبان Harvest time in October and November	چغندرقند Sugar beet
سیستم‌های مکانیزه آبیاری، میکروالمنت‌ها، پمپ‌ها و موتورهای دیزل، سمپاش‌ها Mechanized irrigation systems, micronutrients, diesel pumps and engines, sprayers	بهار و تابستان Spring and summer	اغلب محصولات باغی و زراعی Most orchard and crop products
سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، سیستم‌های تهویه، ژنراتورها Heating and cooling systems, ventilation systems, generators	بهار و تابستان Spring and summer	محصولات گلخانه Greenhouse products
انواع تراکتورها، کامیون‌ها، خردکن‌ها، میکسرها، دستگاه‌های شیردوش، سیستم‌های تهویه Tractors, trucks, shredders, mixers, milking machines, ventilation systems	در بیشتر فصول سال In most seasons	محصولات دامی و لبنی Livestock and dairy products

علاوه بر این اهمیت نگهداشت و سرویس‌دهی مناسب انواع دروگرهای متصل به تراکتورها و نیز بسته‌بندها و همچنین آماده به‌کاری بالای کامیون‌های بارگیری و انتقال در فاز برداشت محصولات زراعی در فصل‌های پرتراکم عملیاتی بسیار حیاتی است. در ادامه، بیش‌ترین سهم از ماشین‌ها و تجهیزات پرکاربرد در اغلب محصولات باغی و زراعی عمدتاً مربوط به فاز داشت به‌ویژه در فصول بهار و تابستان مرتبط می‌شود. جایی‌که در این فاز، دسترسی بالای انواع تجهیزات شامل موتورهای دیزل و پمپ‌های مربوط به سیستم‌های مکانیزه آبیاری به همراه انواع سمپاش‌ها و کودپاش‌های نیمه‌مکانیزه دارای اهمیت فراوان است. همچنین در فعالیت‌های گلخانه‌ای و واحدهای دامی در اغلب فصول سال تجهیزات بحرانی شامل انواع سیستم‌های تهویه، سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، خردکن‌ها، میکسرها و نیز دستگاه‌های شیردوش دارای اهمیت بالایی از نگهداشت هستند. در نتیجه شناسایی این تجهیزات بحرانی مطابق با نوع محصولات و فصول پرتراکم عملیاتی و نیز ارائه برنامه-ریزی‌های اصولی نگهداری و تعمیرات می‌تواند بر روی بهبود قابلیت اطمینان عملیاتی و بهره‌وری عملکردی تولیدات در واحدهای کشت و صنعت‌ها مؤثر باشد.

در ادامه، اهمیت زیرمعیار "مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت" در اولویت دوم در معیار "عوامل ساختاری" از نگاه خبرگان به‌منظور مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌های مشهد قرار گرفت. بدین مفهوم که برای دست‌یابی به یک مدیریت یکپارچه و ساختارمند نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها، مدیریت یکپارچه اسناد، مدارک و مستندات مربوط به انواع تجهیزات و ماشین‌ها می‌تواند از حجم قابل‌توجهی از زمان و نیروی انسانی مورد نیاز صرفه‌جویی به‌عمل آورد. با توجه به بررسی‌های میدانی صورت گرفته، در حال حاضر تنها مستندسازی بخشی از تجهیزات بحرانی (جدول ۵) در بخش‌های عملیات زراعی و باغی که شامل انواع کاتولوگ‌ها و دفترچه راهنماها که از سوی سازنده می‌باشد، صورت گرفته است. حال آن‌که سایر مستندسازی‌ها مرتبط با تجهیزات بحرانی به‌ویژه در گلخانه‌ها و واحدهای دامپروری شامل ثبت دقیق مواردی چون زمان خرابی‌ها، زمان تعمیرات و برخی فعالیت‌های پیشگیرانه و بازرسی شامل آچارکشی‌ها و تعویض روغن، هزینه‌های مرتبط با نگهداشت و تعمیرات، اطلاعات مربوط به ورودی و خروجی قطعات یدکی، مشخصات فنی و کدگذاری انواع تجهیزات و اقلام یدکی، از جمله مهم‌ترین نارسایی‌های فعلی در زیرمعیار "مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت" در واحدهای کشت و صنعت‌های مورد بررسی می‌باشد. از این رو اقداماتی مانند برگزاری سلسله جلسات آموزشی با هدف آشنایی پرسنل نگهداشت با نحوه مستندسازی اولیه تجهیزات در این واحدها با بهره‌مندی از استانداردهای شناخته‌شده در این عرصه شامل استانداردهایی مانند ایزو ۱۴۲۲۴ می‌تواند بسیار مؤثر باشد. علاوه بر این، به‌منظور تکمیل فرآیند مستندسازی‌ها، فراهم کردن زیرساخت‌های فناوری اطلاعات شامل انواع بهره‌مندی از نرم‌افزارهای کاربردی با هدف تسریع در روند زمان دستورکارها و درخواست کارها و نیز مدیریت بهینه نیروی انسانی می‌تواند کمک‌کننده باشد.

در ادامه، زیر معیارهایی چون "برخورداری از زیرساختارهای مناسب فناوری اطلاعات در کنار تجهیزات مناسب" و "برخورداری از یک ساختار سازمانی مناسب در گردش کارهای نگهداشت" به‌ترتیب با مقادیر وزنی ۰/۱۵۴ و ۰/۱۲۱ در رتبه بعدی از مهم‌ترین "عوامل ساختاری" به‌دست آمدند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، عمده کشت و صنعت‌های مورد بررسی عمدتاً از فرآیندهای غیراتوماسیونی به‌منظور انجام فرآیندها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات استفاده می‌کنند. این در حالی است که با فراهم کردن زیرساخت‌های مناسب فناوری اطلاعات و با استقرار نرم‌افزارهای یکپارچه می‌توان بخش قابل‌توجهی از فعالیت‌ها شامل روند مستندسازی‌ها، مدیریت دستورکارها و گردش کارهای نگهداشت، مدیریت کاربران، ارزیابی پیوسته عملکرد دارایی‌ها، مدیریت هزینه‌ها و موارد دیگر را به‌صورت خودکار مدیریت کرد که این امر می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش زمان و صرفه‌جویی هزینه‌ها در بخش عملیات و نگهداشت در کشت و صنعت‌ها داشته باشد. در ادامه بررسی‌ها، زیرمعیارهایی از قبیل "داشتن فرهنگ سازمانی مناسب" و"مدیریت عوامل محیطی و عملیاتی" دارای کم‌اهمیت‌ترین عناصر از دیدگاه خبرگان معرفی شدند. همچنین این زیرمعیارها در شکل‌دهی "عوامل ساختاری" مورد توجه سایر مطالعات در سال‌های اخیر بوده است. برای مثال اهمیت شاخص ساختار سازمانیِ کشت و صنعت‌ها در غرب کشور هند با تأکید ویژه بر زیرمعیارهایی چون مدیریت منسجم اطلاعات، فراهم کردن زیرساخت‌های مناسب فناوری اطلاعات و نیز توجه به مدیریت برون‌سپاری‌های فعالیت‌های نگهداشت بوده است (Gandhare & Akarte, 2020). در مطالعات دیگری بهره‌مندی از زیرساخت‌ها و سیستم‌های یکپارچه اطلاعاتی به همراه قابلیت انطباق آن با اینترنت و پلتفرم‌های اینترنتی و فضای ابری، با هدف مدیریت انواع عملیات زراعی، مدیریت عملکرد و گردش کارهای مربوط به انواع ماشین‌ها، تشخیص و پیش‌بینی عیوب تجهیزات مورد توجه در صنایع کشاورزی بوده است (Fountas *et al*., 2015; Li *et al*., 2019). علاوه بر این، پشتیبانی‌های اطلاعاتی، زیرساخت‌های تدارکاتی مانند اجاره ماشین‌های کشاورزی و نحوه برون‌سپاری فعالیت‌های نگهداشت از جمله مهم‌ترین چالش‌ها در مزارع کشاورزی اوکراین گزارش شده است (Horyovy, 2007). در تحقیق دیگری توجه به مقوله مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت و تقویت آن‌ها از طریق

پشتیبانی‌های سخت و نرم‌افزاری در انجام فعالیت‌های زراعی مهم‌ترین دغدغه کشاورزان و پیمانکاران ماشین‌ها بوده است (Sørensen & Bochtis, 2010). همچنین مدیریت رویه‌ها و سازوکارهای عملیاتی، مدیریت سیستم‌های پشتیبان، مدیریت عوامل داخل و خارج از مزرعه و نیز نحوه تعاملات برون‌سازمانی در مزارع کشاورزی در کشور چین از جمله مهم‌ترین عوامل برای تقویت فاکتور "عوامل ساختاری" در نگهداشت ماشین‌ها عنوان شده است (Kim *et al.*, 2014).

در ادامه تجزیه و تحلیل‌ها، به محاسبه وزن کلی/سراسری با کمک روش بهترین-بدترین پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۶ به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابق با نتایج فراوانی تجمعی، زیرمعیارهای شماره ۱ تا ۹، حدود ۶۰ درصد از کل میانگین وزنی را در مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها را به خود اختصاص دادند.

جدول ٦- وزن‌دهی و اولویت‌بندی کلی زیرمعیارهای اثرگذار بر مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها

Table 6- The overall weight of the sub-criteria for maintenance and repair management in agro-industries

زیرمعیار Sub-criteria	میانگین وزنی Weight	رتبه یا اولویت Rank
حمایت مدیر عالی در مدیریت سازمانی نگهداشت Top management support	0.108	1
اختصاص بودجه لازمه و نیز مدیریت بهینه موجودی‌ها Fund allocation and inventory resource management	0.075	2
راهبردهای و سیاست‌گذاری‌های سازمانی نگهداشت Maintenance strategies and policies	0.067	3
صلاحیت و توانمندی پرسنل نگهداشت (نیروی متخصص) Adequacy of maintenance personnel	0.066	4
مدیریت مناسب قراردادها و نحوه تعامل با عوامل برون سازمانی Contracting out maintenance	0.061	5
اهمیت و جایگاه آموزش و یادگیری در پرسنل نگهداشت Training & education	0.059	6
میزان آگاهی از اهمیت مباحث نگهداشت و ایمنی در سازمان Awareness of maintenance and safety activities	0.053	7
مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت Documentation of maintenance works	0.052	8
برخورداری از ساختارهای مناسب فناوری اطلاعات در کنار تجهیزات مناسب Adequacy of IT infrastructures and facilities for operations	0.049	9
مدیریت تغییر و همسوسازی کلیه ذی‌نفعان Change management and alignment of all stakeholders	0.039	10
برخورداری از یک ساختار سازمانی مناسب در گردش کارهای نگهداشت Well-established organizational structure	0.038	11
مدیریت عوامل محیطی و عملیاتی در فعالیت‌های نگهداشت Environmental and operatorial conditions	0.035	12
مدیریت چرخه کار و استانداردسازی امور نگهداشت Workflow management and standardization	0.034	13
برخورداری از فرهنگ سازمانی مناسب Organizational culture	0.029	14
تعهد افراد و مشارکت مستمر آن‌ها در فعالیت‌های نگهداشت Participation and commitment	0.028	15
در نظر گرفتن مشوق‌ها و قوانین مربوط به امور نگهداشت Incentives and rules related to maintenance	0.024	16
آگاهی پرسنل از اهداف و راهبردهای نگهداشت Employee awareness of maintenance goals and strategies	0.021	17
اندازه گیری عملکرد و پایش پیوسته فعالیت‌ها و راهبردهای نگهداشت Performance measurement and monitoring	0.017	18

در این بین زیرمعیارهایی چون "حمایت مدیر عالی در مدیریت سازمانی نگهداشت"، "اختصاص بودجه لازمه و نیز مدیریت بهینه موجودی‌ها"، "راهبردهای و سیاست‌گذاری‌های سازمانی نگهداشت" و "صلاحیت و توانمندی پرسنل نگهداشت (نیروی متخصص)" با اختصاص اولویت‌های یکم تا چهارم و میانگین وزنی ۰/۱۰۸، ۰/۰۷۵، ۰/۰۶۷ و ۰/۰۶۶ دارای بالاترین اثرگذاری‌ها به‌دست آمدند که تجزیه و تحلیل‌ها در رابطه با این معیارها و مقایسه نتایج آن‌ها با سایر مطالعات در بخش قبل در جدول ۴ پرداخته شد.

نتیجه‌گیری

بهره‌مندی از مدیریت مناسب نگهداری و تعمیرات انواع ماشین‌ها و تجهیزات در کشت و صنعت‌ها نقش مهمی در انجام به‌موقع انواع عملیات کشاورزی دارد که در نهایت می‌تواند بهبود بهره‌وری در فرآیندهای تولید و فرآوری محصولات کشاورزی را به دنبال داشته باشد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که معیارهایی چون "مدیریت سازمانی"، "عوامل انسانی" و نیز "عوامل ساختاری" به‌ترتیب بیش‌ترین وزن‌دهی در مدل تعالی نگهداری و تعمیرات را دارند. براساس روش تصمیم‌گیری بهترین-بدترین، زیرمعیارهایی چون "حمایت مدیریت عالی در سطح سازمان"، "اختصاص بودجه نگهداشت و مدیریت بهینه موجودی‌ها" و نیز "اتخاذ راهبردهای مناسب نگهداشت" به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیرگذاری را در مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد داشتند. در ادامه مهم‌ترین پیشنهادات کاربردی و راهکارهای مدیریتی در واحدهای کشت و صنعت با هدف ارتقای برنامه‌های و تعمیرات و نیز قابلیت تعمیم‌پذیری آن‌ها به سایر صنایع کشاورزی و غذایی در سطح کشور پرداخته شده است:

براساس نتایج به‌دست‌آمده، توجه ویژه به مقوله مدیریت استراتژیک نگهداشت و اتخاذ برنامه‌ریزی‌های مناسب انواع عملیات کشاورزی در بخش‌های زراعی، باغی، دامی و گلخانه‌ای با تکیه بر سه عنصر عوامل انسانی، ساختاری و سازمانی در واحدهای کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد پیشنهاد می‌گردد.

یکی از مهم‌ترین نتایج براساس نظر خبرگان در واحدهای کشت و صنعت‌ها در معیار مدیریت سازمانی، جایگاه و نقش ویژه مدیران در مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات گزارش شد که این موضوع در این سال‌ها کم‌تر مورد توجه بوده است. بنابراین انتخاب مدیران میانی و فنی آگاه با سازوکارها و آشنا به فرهنگ کلی نگهداشت انواع تجهیزات بحرانی شناخته‌شده در بخش‌های زراعی، باغی، دامی و گلخانه‌ای در واحدهای کشت و صنعت‌ها، می‌بایست مد نظر قرار گیرد.

بررسی‌های میدانی نشان داد با توجه به این‌که عمده برنامه‌های نگهداری و تعمیرات بر مبنای نگهداشت واکنشی یا اصلاحی در کشت و صنعت‌های مورد بررسی استوار است، بخش قابل‌توجهی از پرسنل به‌ویژه در بخش کارگاه‌های نگهداری و تعمیرات و عملیات کشاورزی از آگاهی کافی در مورد مفاهیم نگهداشت به‌ویژه اثربخشی فعالیت‌های پیشگیرانه در کاهش تعداد خرابی‌ها و تعداد تعمیرات در ماشین‌های بحرانی شامل انواع تراکتورها، کارنده‌ها و دروگرها در سطح عملیات زراعی، پمپ‌ها و تجهیزات مکانیزه آبیاری در فعالیت‌های باغی و میکسرها و خردکن‌ها در فعالیت‌های دامی و نیز انواع سیستم‌های تهویه در سطح گلخانه‌ها با هدف مدیریت هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در میان‌مدت و بلندمدت برخودار نیستند. از این‌رو آشنایی با آخرین راهبردهای نوین در حوزه نگهداشت و اتخاذ بودجه اختصاصی در این بخش و نیز برگزاری کارگاه‌های آموزشی به‌ویژه تکنیک‌های نگهداشت قابلیت اطمینان محور در کشت و صنعت‌ها پیشنهاد می‌گردد.

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، زیرمعیار "مستندسازی فعالیت‌های نگهداشت" ازجمله اساسی‌ترین عنصر به‌منظور مدیریت کارآمد نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌های مشهد در معیار "عوامل ساختاری" از نگاه خبرگان گزارش شد. بررسی‌های میدانی حاکی از آن بود که تنها بخشی از مستندسازی‌ها شامل گردآوری انواع کاتولوگ‌ها و دفترچه راهنماهای تجهیزات بحرانی به‌ویژه ماشین‌آلات مربوط به عملیات زراعی و باغی شامل انواع تراکتورها، دروگرها، ادوات خاک‌ورزی و نیز کارنده‌ها صورت گرفته است. این در حالی است که سایر مستندسازی‌ها و گردآوری اطلاعات در واحدهای کشت و صنعت‌ها مورد غفلت قرار گرفته است. از این رو اقداماتی مانند برگزاری سلسله جلسات آموزشی با هدف آشنایی پرسنل نگهداشت با مستندسازی اولیه تجهیزات در این واحدها با بهره‌مندی از استانداردهای شاخته شده، می‌تواند بسیار مؤثر باشد.

نتایج تحلیل‌ها از نگاه خبرگان در کشت و صنعت‌های مورد بررسی نشان داد که علاوه بر عدم وجود سازوکارهای مناسب با هدف افزایش سطح آگاهی پرسنل در زمینه نگهداشت اصولی و مباحث ایمنی انواع ماشین‌ها و تجهیزات بحرانی در عملیات مختلف کشاورزی، توجه به مقوله توانمندسازی مهارت‌ها در سطح تکنسین‌ها نیز کم‌تر در برنامه‌های آموزشی مورد تأکید بوده است. بنابراین سرمایه‌گذاری در مواردی چون تربیت پرسنل چندمهارته دارای مهارت‌های نرم‌افزاری در کنار مباحث فنی، مهارت‌های مدیریت در شرایط بحران و مهارت‌های برقراری تعامل و ارتباطات می‌تواند از سوی واحدهای نیروی انسانی در کشت و صنعت‌های شهرستان مشهد انجام گردد.

علاوه بر این، از آن‌جا که مطالعه حاضر بیش‌تر به مقوله مدیریت

نگهداری و تعمیرات در سطح راهبردی در کشت وصنعت‌ها پرداخته شده است، سیر تحقیقات آینده می‌تواند در سطح عملیاتی به‌منظور بررسی وضعیت فعلی برنامه‌های نگهداری و تعمیرات متناسب با نوع کشت، نوع فصل و نوع تجهیزات/ماشین‌های کشاورزی در بخش‌های مختلف در کشت و صنعت‌ها معطوف شود. علاوه بر این از جنبه توسعه تئوری و مدل‌ها، بررسی ارتباط منطقی و وابستگی معیارها و زیرمعیارهای اثرگذار بر مدیریت نگهداری و تعمیرات در کشت و صنعت‌ها، با استفاده از دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مانند یا روش‌های پیشرفته آماری مانند آنالیز فاکتورهای عاملی برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی و معنوی صندوق پژوهشگران و فناوران کشور (زیر نظر نهاد ریاست جمهوری) در قالب طرح پسادکتری مستقل به شماره ۹۹۰۲۴۷۷۵، حمایت‌های دانشگاه فردوسی مشهد و نیز راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر سیامک خییری پژوهشگر پسادکتری دانشگاه کمبریج انگلستان، تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

References

1. Ab Wahid, R., & Corner, J. (2009). Critical success factors and problems in ISO 9000 maintenance. *International Journal of Quality & Reliability Management, 26*(9), 881-893. https://doi.org/10.1108/02656710910995073
2. Adebiyi, K. A., Ojediran, J. O., & Oyenuga, O. A. (2004). An appraisal of maintenance practice in food industries in Nigeria. *Journal of Food Engineering, 62*(2), 131-133 (in Persian). https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00201-2
3. Afsharnia, F., Asoodar, M., & Abdeshahi, A. (2014). Regression Analysis and Modeling of Failure Rate and its Effective Factors on Tractors in Some Cities of Khuzestan Province. *Journal of Agricultural Engineering, 36*(2), 49-58. (in Persian).
4. Al-Turki, U. M., Ayar, T., Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2014). Integrated maintenance planning. In Integrated Maintenance Planning in Manufacturing Systems (pp. 25-57). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06290-7_3
5. Amrani, M. A., Alhomdi, M., Ghaleb, A. M., Al-Qubati, M., & Shameeri, M. (2020). Implementing an integrated maintenance management system for monitoring production lines: a case study for biscuit industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 28*(1), 180-196. https://doi.org/10.1108/jqme-06-2020-0049
6. Anthony, R. N. (1965). Planning and control systems: a framework for analysis. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
7. Arslankaya, S., & Atay, H. (2015). Maintenance management and lean manufacturing practices in a firm which produces dairy products. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 207*, 214-224. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.090
8. Barberá, L., Crespo, A., Viveros, P., & Stegmaier, R. (2012). Advanced model for maintenance management in a continuous improvement cycle: integration into the business strategy. *International Journal of System Assurance Engineering and Management, 3*(1), 47-63. https://doi.org/10.1007/s13198-012-0092-y
9. Bekar, E. T., Nyqvist, P., & Skoogh, A. (2020). An intelligent approach for data pre-processing and analysis in predictive maintenance with an industrial case study. *Advances in Mechanical Engineering, 12*(5), 1687814020919207. https://doi.org/10.1177/1687814020919207.
10. Bengtsson, M., & Salonen, A. (2009, June). *On the need for research on holistic maintenance*. In Proceedings of the 22nd international congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM) (pp. 9-11).
11. Bokrantz, J. (2019). Smart Maintenance:-Maintenance in Digitalised Manufacturing. Department of Industrial and Materials Science. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden. ISBN 978-91-7905-191-4
12. Bottani, E., Ferretti, G., Montanari, R., & Vignali, G. (2014). An empirical study on the relationships between maintenance policies and approaches among Italian companies. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 20*(2), 135-162. https://doi.org/10.1108/jqme-11-2012-0039
13. Branská, L., Pecinová, Z., Paták, M., Stankova, M., & Kholová, P. (2016). Maintenance management systems in the Czech enterprises of chemical and food industries. *Trends Economics and Management, 10*(27), 20-29. https://doi.org/10.13164/trends.2016.27.20
14. Fountas, S., Sorensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Liakos, V., & Gemtos, T. (2015). Farm machinery management information system. *Computers and Electronics in Agriculture, 110*, 131-138. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.011
15. Fredriksson, G., & Larsson, H. (2012). An analysis of maintenance strategies and development of a model for strategy formulation. Master of science thesis in production engineering. Department of product and production development. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
16. Gandhare, B. S., & Akarte, M. M. (2020). Benchmarking maintenance performance in select agro-based

industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *28*(2), 296-326. https://doi.org/10.1108/jqme-02-2019-0018

17. Gandhare, B. S., Akarte, M. M., & Patil, P. P. (2018). Maintenance performance measurement–a case of the sugar industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *24*(1), 79-100. https://doi.org/10.1108/jqme-07-2016-0031
18. Gandhi, A., Purwani, D. R., Susanti, Y. D., & Prasetya, Y. (2021). *The Status of Maintenance Management in Indonesia: Result from a Pilot Survey Food Snack MSMEs*. Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Singapore
19. Garg, A., & Deshmukh, S. G. (2006). Maintenance management: literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *12*(3), 205-238. https://doi.org/10.1108/13552510610685075
20. Gomes, C. F., Yasin, M. M., & Simões, J. M. (2020). The emerging organizational role of the maintenance function: a strategic perspective. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *27*(1). https://doi.org/10.1108/jqme-03-2017-0012
21. Gopalakrishnan, M. (2018). Data-driven Decision Support for Maintenance Prioritisation: Connecting Maintenance to Productivity. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
22. Hassanain, M. A. (2002). Integrated systems for maintenance management (Doctoral dissertation, University of British Columbia). http://hdl.handle.net/2429/13109
23. Holweg, M., Davies, J., De Meyer, A., Lawson, B., & Schmenner, R. W. (2018). Process theory: The principles of operations management. Oxford University Press.
24. Horyovy, V. P. (2007). Developing the production and maintenance support of enterprises of the AIC [agro-industrial complex of Ukraine]. Visnyk Ahrarnoyi Nauky (Ukraine).
25. Jandali, D., & Sweis, R. (2018). Factors affecting maintenance management in hospital buildings: Perceptions from the public and private sector. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, *37*(1). https://doi.org/10.1108/ijbpa-12-2017-0064
26. Johannes, K., Theodorus Voordijk, J., Marias Adriaanse, A., & Aranda-Mena, G. (2021). Identifying Maturity Dimensions for Smart Maintenance Management of Constructed Assets: A Multiple Case Study. *Journal of Construction Engineering and Management*, *147*(9), 05021007. https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0002112
27. Jonsson, P. (2000). Towards a holistic understanding of disruptions in Operations Management. *Journal of Operations Management*, *18*(6), 701-718. https://doi.org/10.1016/s0272-6963(00)00040-1
28. Karia, N., Asaari, M. H. A. H., & Saleh, H. (2014, January). *Exploring Maintenance Management in Service Sector: A Case Study*. In Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia.
29. Kheybari, S., Rezaie, F. M., Naji, S. A., Javdanmehr, M., & Rezaei, J. (2020). Evaluation of factors contributing to the failure of information systems in public universities: *The case of Iran. Information Systems*, *92*, 101534. https://doi.org/10.1016/j.is.2020.101534
30. Kim, E. J., Jeong, W. I., Lee, Y. K., & Lim, C. S. (2014). Development of evaluation indicators for maintenance and preservation of agriculture and rural heritage. *Journal of Agricultural Extension & Community Development*, *21*(4), 1191-1226. https://doi.org/10.12653/jecd.2014.21.4.1191
31. Kumar, A., Shankar, R., & Thakur, L. S. (2018). A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction. *Journal of Computational Science*, *27*, 428-439. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.06.006
32. Li, D., Zheng, Y., & Zhao, W. (2019). Fault analysis system for agricultural machinery based on big data. *IEEE Access*, *7*, 99136-99151. https://doi.org/10.1109/access.2019.2928973
33. Liang, F., Brunelli, M., & Rezaei, J. (2019). Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. Omega, 102175. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102175
34. Liu, Y., Hu, Y., Wen, J., & Tang, Y. (2018, July). *An overview on smart maintenance service scheduling system and theoretical basis for agricultural machinery*. In 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (I Things) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) (pp. 766-771). IEEE. https://doi.org/10.1109/cybermatics_2018.2018.00151
35. Macchi, M., & Fumagalli, L. (2013). A maintenance maturity assessment method for the manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *19*(3), 295-315. https://doi.org/10.1108/jqme-05-2013-0027
36. Marquez, A. C., & Gupta, J. N. (2004). Modern maintenance management for enhancing organizational efficiency. In Intelligent Enterprises of the 21st Century (pp. 321-332). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-59140-160-5.ch019
37. Meixner, O., Pöchtrager, S., & Haas, R. (2001). *Determining the success factors for the introduction and maintenance of quality management in the Austrian food industry using the Analytic Hierarchy Process*. In Proceedings of the 6th International Symposium on the Analytic Hierarchic Process, ISAHP (pp. 2-4).

https://doi.org/10.13033/isahp.y2001.032
38. Milana, M., Khan, M. K., & Munive-Hernandez, J. E. (2017). Design and development of knowledge-based system for integrated maintenance strategy and operations. *Concurrent Engineering, 25*(1), 5-18. https://doi.org/10.1177/1063293x16665662
39. Moktadir, M. A., Kumar, A., Ali, S. M., Paul, S. K., Sultana, R., & Rezaei, J. (2020). Critical success factors for a circular economy: Implications for business strategy and the environment. *Business Strategy and the Environment, 29*(8), 3611-3635. https://doi.org/10.1002/bse.2600
40. Mousavipour, A., Sheikh Davoodi, M. J., Ghanian, M., & Saeedi, S. N. (2012). Economic comparison of two common emergency methods and oil status monitoring maintenance and repair of sugarcane harvesting machines. *Journal of Agricultural Engineering, 36*(2).
41. Najafi, P., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Hormozi, M. A. (2015). Reliability evaluation and analysis of sugarcane 7000 series harvesters in sugarcane harvesting. *Journal of Agricultual Machinery, 5*(2), 446-455. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v5i2.28447
42. Naji, A., Oumami, M. E., Bouksour, O., & Beidouri, Z. (2019). A Mixed methods research toward a framework of a maintenance management model: A survey in Moroccan industries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 26*(2), 260-289. https://doi.org/10.1108/jqme-10-2018-0079
43. Oliveira, M. A., & Lopes, I. (2019). Evaluation and improvement of maintenance management performance using a maturity model. *International Journal of Productivity and Performance Management, 69*(3), 559-58. https://doi.org/10.1108/ijppm-07-2018-0247
44. Pinjala, S. K., Pintelon, L., & Vereecke, A. (2006). An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *International Journal of Production Economics, 104*(1), 214-229. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.12.024
45. Pintelon, L. M., & Gelders, L. F. (1992). Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research, 58*(3), 301-317. https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90062-e
46. Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). *Maintenance: an evolutionary perspective*. In Complex system maintenance handbook (pp. 21-48). Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_2
47. Priyantha, J. (2021). Literature Review: The Role of organizational factors in maintenance organizations affecting their manufacturing performance, from Sri Lankan cultural perspective. *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS), 4*(5).
48. Reis, L. F., & Alves, F. J. D. C. (2020). Brazilian sugarcane agro-industry human resources' management: strategies to increase work intensity. *Gestão & Produção, 27*. https://doi.org/10.1590/0104-530x5147-20
49. Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega, 53*, 49-57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009
50. Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega, 64*, 126-130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001
51. Roda, I., & Macchi, M. (2021). Maintenance concepts evolution: a comparative review towards Advanced Maintenance conceptualization. *Computers in Industry, 133*, 103531. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103531
52. Rohani, A., Ranjbar, I., Ajabshir, Y., Abbaspour-Fard, M. H., & Valizadeh, M. (2009). Prediction of two-wheel drive tractor repair and maintenance costs using artificial neural network in comparing with regression. *Journal of Agricultural Engineering Research, 16*(1), 225-235.
53. Salonen, A., (2008). *Strategic Factors for Maintenance in Manufacturing Industry*, in the proceedings of 21st International Congress and Exhibition COMADEM – 2008: Prague, The Czech Republic.
54. Salonen, A. (2012). Formulation of maintenance strategies: A simplified process. *International Journal of COMADEM, 15*(3), 9-18.
55. Sarbini, N. N., Ibrahim, I. S., Abidin, N. I., Yahaya, F. M., & Azizan, N. Z. N. (2021). Review on maintenance issues toward building maintenance management best practices. *Journal of Building Engineering, 44*, 102985. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102985
56. Sharma, S. K. (2013). Maintenance reengineering framework: a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 19*(2), 96-113. https://doi.org/10.1108/13552511311315922
57. Soltanali, H., & Rohani, A. (2016). *Evaluation of reliability of production systems in food industry*. 10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
58. Soltanali, H., Garmabaki, A. H. S., Thaduri, A., Parida, A., Kumar, U., & Rohani, A. (2019). Sustainable production process: An application of reliability, availability, and maintainability methodologies in automotive manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: *Journal of Risk and Reliability, 233*(4), 682-697. https://doi.org/10.1177/1748006x18818266
59. Soltanali, H., Khojastehpour, M., & Farinha, J. T. (2020). Measuring the production performance indicators for food processing industry. *Measurement, 173*, 108394. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108394

60. Sørensen, C. G., & Bochtis, D. D. (2010). Conceptual model of fleet management in agriculture. *Biosystems Engineering*, *105*(1), 41-50. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.009
61. Tan, Y., Shen, L., Langston, C., Lu, W., & Yam, M. C. (2014). Critical success factors for building maintenance business: a Hong Kong case study. *Facilities*. https://doi.org/10.1108/f-08-2012-0062
62. Terminology, M. (2010). CEN (European Committee for Standardization). European Standard EN, 13306, 2010.
63. Thomas, S. J. (2005). Improving maintenance and reliability through cultural change. Industrial Press Inc.
64. Tsang, A. H. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in maintenance Engineering*.
65. Tubis, A., & Werbińska-Wojciechowska, S. (2015). *Concept of controlling for maintenance management performance: a case study of passenger transportation company*. In Safety and reliability of complex engineered systems proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL (pp. 1055-1063).
66. Van de Kaa, G., Fens, T., & Rezaei, J. (2019). Residential grid storage technology battles: a multi-criteria analysis using BWM. *Technology Analysis & Strategic Management*, *31*(1), 40-52. https://doi.org/10.1080/09537325.2018.1484441
67. Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2014). Development of a maintenance performance measurement framework-using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection. *Omega*, *42*(1), 33-46. https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.006
68. Vasudevan, A., & Duan, X. (2021). A systematic data science approach towards predictive maintenance application in manufacturing industry. Examensarbete för masterexamen. Master Thesis. https://hdl.handle.net/20.500.12380/302632
69. Wen, Q., Zhang, J. P., Hu, Z. Z., Xiang, X. S., & Shi, T. (2019). A data-driven approach to improve the operation and maintenance management of large public buildings. *IEEE Access*, *7*, 176127-176140. https://doi.org/10.1109/access.2019.2958140
70. Wireman, T. (2010) *Benchmarking Best Practices in Maintenance Management* (2nd edition). [Electronic] New York: Industrial Press Inc.
71. Yavuz, O., Doğan, E., Carus, E., & Görgülü, A. (2019). Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry. *Procedia Computer Science*, *158*, 227-234. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.046
72. Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, *13*(3), 2213-2227. https://doi.org/10.1109/jsyst.2019.2905565
73. Zhou, Q., Jiang, J., Zhao, Z., Zhong, J., Pan, B., Jin, X., & Sun, Y. (2017, August). *Research on the Internet of Things Platform Design for Agricultural Machinery Operation and Operation Management*. In International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (pp. 400-410). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06179-1_40

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 453-475

Automatic Detection of Plant Cultivation Rows Robot using Machine Vision (Case Study: Basil Plant)

M. Nadafzadeh[1], A. Banakar[2], S. Abdanan Mehdizadeh[3*], M. R. Zare-Bavani[4], S. Minaei[5]

1- Ph.D Student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran
4- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran
5- Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.abdanan@asnrukh.ac.ir)

Received: 23 June 2022
Revised: 05 November 2022
Accepted: 21 November 2022
Available Online: 21 November 2022

How to cite this article:
Nadafzadeh, M., Banakar, A., Abdanan Mehdizadeh, S., Zare-Bavani, M., & Minaei, S. (2023). Automatic Detection of Plant Cultivation Rows Robot using Machine Vision (Case Study: Basil Plant). *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 453-475. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.77315.1112

Introduction

Nowadays, machine vision systems are extensively used in agriculture. The application of this technology in the field can help preserve agricultural resources while reducing manual labor and production costs. In the field of agricultural automation, accurately detecting crop rows is recognized as a crucial and challenging issue for weed identification and the automatic guidance of machines. Therefore, it is necessary to explore practical solutions to optimize this process. Hence, the purpose of this study is the precise identification of basil cultivation rows to enable the automatic navigation of robots in the cultivation field.

Materials and Methods

In the first stage of this research, six images from each growth period of basil plants (third, fourth, and fifth week) were taken and weeds were removed from the area between the crop rows using three different methods of area opening, dimensional removal, and masking. In the next stage, six images of crop rows without weeds were examined by performing image processing operations and implementing several routing algorithms, namely, Hough transform, wavelet transform, Gabor filter, linear regression, and an additional algorithm proposed in this study. The output of each of these algorithms was compared with the ideal path identified by the user. For this purpose, after capturing an image, green areas were extracted from it by performing the segmentation process. By applying each of the routing algorithms to the image, plant cultivation lines were identified and their equations were determined. Finally, the performance of the designed robot was evaluated using the most appropriate routing algorithm.

Results and Discussion

Examining the performance of three different methods of weed removal in three periods of plant growth (third, fourth, and fifth week) showed that during this interval, the masking method had the lowest error rate compared to the ideal path and the shortest average operation time of 1.64 seconds, followed by the dimensional removal and the area opening methods. Comparing the routes detected by different routing algorithms with the ideal routes and according to the results of the t-test at 5% probability level, the order of the studied routing methods from the most superior is as follows: the proposed algorithm, Gabor filter, linear regression, Hough transform and wavelet transform algorithm. Overall, the proposed algorithm had the highest rate of adaptation to

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2022.77315.1112

the ideal path (with an average error of 3.65 pixels) and the shortest operation time (4.79 seconds) and was selected as the most appropriate routing algorithm and the performance of the designed robot was evaluated using it.

Conclusion

A reliable crop row detection algorithm can reduce production costs and preserve the environment. In this study, the masking method was used for removing weeds from the images. The new proposed routing algorithm has superior performance when compared with common routing algorithms such as the Gabor filter, linear regression, Hough transform, and wavelet transform. Additionally, it was shown that the designed robot using the proposed algorithm (with an average error of 3.65 pixels) has the desired performance.

Acknowledgment

The authors express appreciation for the financial support provided by Tarbiat Modares University.

Keywords: Basil, Cultivation line detection, Digital image processing, Path-finding algorithm

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

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، ص ٤۷۵-٤۵۳

تشخیص خودکار ردیف‌های کشت گیاه توسط ربات به کمک بینایی ماشین (مطالعه موردی: گیاه ریحان)

مریم نداف زاده[۱]، احمد بناکار[۲]، سامان آبدانان مهدی‌زاده[۳*]، محمد رضا زارع بوانی[٤]، سعید مینایی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

چکیده

در کشاورزی دقیق، مکان‌یابی خودکار محصولات یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم است. در این پژوهش شناسایی دقیق ردیف‌های کشت محصول ریحان به‌منظور مسیریابی خودکار یک ربات گزارش می‌شود. در یک مرحله از این تحقیق با اخذ تعداد شش تصویر در هر دوره‌ی رشد (هفته سوم، هفته چهارم و هفته پنجم) به حذف علف‌های هرز میان ردیف‌های کشت محصول پرداخته شد؛ که بدین منظور از سه روش مختلف (گشودگی مساحت، حذف ابعادی و ماسک‌گذاری) استفاده گردید. در مرحله‌ای دیگر تعداد شش تصویر از ردیف‌های کشت بدون وجود علف‌های هرز مورد بررسی قرار گرفت. سپس با انجام عملیات پردازش تصویر و پیاده‌سازی چندین الگوریتم مسیریابی (الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل هاف، تبدیل موجک، فیلتر گابور، رگرسیون خطی و الگوریتم پیشنهادی این مطالعه) بر روی تصاویر، به بررسی خروجی هر یک از این الگوریتم‌ها نسبت به مسیر ایده‌آل تعیین‌شده توسط کاربر پرداخته شد. پس از مقایسه‌ی دقیق مسیرهای تشخیص داده شده توسط الگوریتم‌های مختلف مسیریابی نسبت به مسیرهای ایده‌آل و با توجه به نتایج آزمون آماری t-test در سطح احتمال ۵٪، برتری روش‌های مسیریابی مورد مطالعه به‌ترتیب زیر مشخص گردید: روش پیشنهادی، روش فیلتر گابور، روش رگرسیون خطی، روش تبدیل هاف و روش تبدیل موجک. در نهایت الگوریتم پیشنهادی با بیشترین میزان انطباق نسبت به مسیر ایده‌آل (با میانگین خطای تشخیص ۳/۶۵ پیکسل) و کمترین مدت زمان اجرای عملیات (۴/۷۹ ثانیه) به‌عنوان مناسب‌ترین الگوریتم مسیریابی انتخاب و با استفاده از آن عملکرد یک ربات طراحی‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم مسیریابی، پردازش تصاویر دیجیتال، تشخیص خط کشت، ریحان

مقدمه

امروزه سامانه‌های بینایی ماشین در زمینه‌ی کشاورزی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از این فناوری در این زمینه می‌تواند ضمن کاهش کارهای دستی و هزینه تولید محصولات به حفظ منابع و نهاده‌های کشاورزی کمک کند (Elstone *et al.*, 2020). در واقع عملیات کاشت، کوددهی، حذف علف‌های هرز و برداشت از جمله مهم‌ترین فرآیندهای تولید محصولات کشاورزی می‌باشند که برای اجرای این عملیات نیاز به دقت بالا و تکرار همان عمل برای چندین ساعت است. گاهی انجام این فعالیت‌ها برای انسان بسیار طاقت‌فرساست، لذا با توجه به اهمیت شناسایی ردیف‌های کشت جهت هدایت دقیق ماشین در مزرعه، می‌توان هر یک از فرآیندهای ذکرشده را به‌صورت خودکار انجام داد. بدین ترتیب می‌توان گفت که توسعه‌ی روش‌های دقیق و قابل‌اطمینان به‌منظور تشخیص ردیف‌های کشت محصول، در زمینه‌ی مکانیزه کردن عملیات کشاورزی از اهمیت بسیاری برخوردار است (Vidovic, Cupec, &

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
۴- استادیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
۵- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: s.abdanan@asnrukh.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.77315.1112

(Hocenski, 2016).

طبق تحقیقات، روش‌های مختلفی برای حل مسئله هدایت ماشین در مزرعه وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از: کنترل مکانیکی، کنترل نوری، کنترل رادیویی، کنترل موقعیت مکانی با به‌کارگیری GPS (سامانه موقعیت‌یابی جهانی) و کنترل بینایی رایانه‌ای. در حال حاضر از آن‌جایی که استفاده از دوربین‌های با کیفیت، نسبتاً کم هزینه است و دسترسی به آن‌ها گسترده و آسان می‌باشد، مکانیزه کردن عملیات کشاورزی مبتنی بر کنترل بینایی رایانه‌ای از توجه بیشتری برخوردار است. در این روش، با تشخیص دقیق ردیف‌های کشت گیاه، بسیاری از عملیات کشاورزی را می‌توان با هدایت ماشین براساس ردیف‌های شناسایی‌شده به‌راحتی و به‌صورت خودکار انجام داد (Vidovic *et al.*, 2016). در حقیقت می‌توان گفت که استفاده از هدایت خودکار نه تنها خستگی کاربر را کاهش داده بلکه بهره‌وری و ایمنی عملیات را نیز افزایش می‌دهد (Garcia-Santillan, Montalvo, Guerrero, & Pajares, 2017).

گیاه ریحان با نام علمی (*Ocimum basilicum* L.) به‌عنوان یک گیاه مهم دارویی محسوب می‌شود و از انواع خانواده نعناعیان (Lamiaceae) است. کشت این گیاه نیازمند آبیاری فراوان، هوای گرم و نور کافی است. این محصول گیاهی است علفی، یک ساله و معطر که به ارتفاع ۱۵ تا ۴۵ سانتی‌متر رشد می‌کند (Vijayashree & Gopal, 2015). از آن‌جایی‌که علف‌های هرز و محصولات کشاورزی دارای منابع رشد یکسانی هستند، گاهاً وجود علف‌های هرز در میان ردیف‌های کشت یکی از مهم‌ترین عواملی است که باعث کاهش دقت در تشخیص ردیف‌های کشت محصول در مزرعه می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای شناسایی ردیف‌های کشت در تصاویر به‌صورت بلادرنگ توسعه یافته است (Fontaine & Crowe, 2006). اکثر این روش‌ها مبتنی بر تبدیل هاف[1] (Leemans & Destain, 2006)، تبدیل فوریه (Vioix, Douzals, & Truchetet, 2004)، فیلتر کالمن[2] (Hague & Tillet, 2001) و رگرسیون خطی (Søgaard & Olsen, 2003) می‌باشند.

به‌طور کلی در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های بینایی ماشین در زمینه‌ی شناسایی ردیف‌های کشت محصول و علف‌های هرز از جمله موضوعات مورد مطالعه محققان بوده است (Li *et al.*, 2022; Kanagasingham, Ekpanyapong, & Chaihan, 2020; Elstone *et al.*, 2020; Guerrero, Pajares, Montalvo, Romeo, & Guijarro, 2012; Lopez-Granados, 2011; Montalvo *et al.*, 2012). در همین راستا، گروهی از محققان یک روش مبتنی بر خوشه‌بندی برای شناسایی ردیف‌های گیاه از مجموعه عکس‌های هوایی اخذشده توسط هواپیمای بدون سرنشین ارائه کردند. الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش، شامل سه مرحله بخش‌بندی مناطق سبز در تصویر، استخراج ویژگی و خوشه‌بندی گیاهان در ردیف‌های کشت بود. با استفاده از تبدیل فوریه دو بعدی، اطلاعاتی در مورد جهت و فاصله ردیف‌ها استخراج و در نهایت موقعیت دقیق خطوط کشت توسط تجزیه و تحلیل مؤلفه‌ی اصلی[3] مشخص گردید. مطابق نتایج، نشان داده شد که این روش قادر است ردیف‌های کشت گیاه را از مجموعه عکس‌های ۹۶۹ × ۱۴۵۲ پیکسل با دقت ۹۴٪ تشخیص دهد (Tenhunen *et al.*, 2019). در یک تحقیق، روشی جهت شناسایی ردیف‌های کشت محصول در تصاویر اخذشده از مزرعه ذرت تحت تراکم زیاد علف‌های هرز، ارائه شد. در این مطالعه، سامانه بینایی بر روی یک وسیله نقلیه سیار کشاورزی نصب شد و تصاویر تحت تأثیر حرکات و ارتعاشات نامطلوب وسیله ثبت و ارسال گردیدند. پردازش تصویر در این پژوهش از سه فرآیند اصلی بخش‌بندی تصویر، آستانه‌گذاری دوگانه[4] براساس روش اتسو[5] و تشخیص ردیف کشت تشکیل شده بود. پس از مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با الگوریتم مبتنی بر تبدیل هاف، مشخص گردید که مدت زمان مورد نیاز برای انجام پردازش‌های روش ارائه‌شده در وضوح مختلف تصویر (۱۰۴۴ × ۱۳۹۲ برابر ۲۹۷ میلی‌ثانیه، ۵۲۲ × ۶۹۶ برابر ۷۴ میلی‌ثانیه، ۵۷۶ × ۷۲۰ برابر ۸۱ میلی‌ثانیه و ۲۸۸ × ۳۶۰ برابر ۲۸ میلی‌ثانیه) کمتر است و همچنین این روش از دقت تشخیص بیشتری در وضوح مختلف تصویر (۱۰۴۴ × ۱۳۹۲ برابر ۹۵/۵٪، ۵۲۲ × ۶۹۶ برابر ۹۲/۹٪، ۵۷۶ × ۷۲۰ برابر ۸۹/۶٪ و ۲۸۸ × ۳۶۰ برابر ۸۸/۱٪) برخوردار می‌باشد (Montalvo *et al.*, 2012). گروهی دیگر از محققین، در الگوریتمی که برای شناسایی ردیف‌های کشت گیاه به‌کار گرفتند از روش تبدیل هاف استفاده کردند. براساس نتایج، نشان داده شد که این الگوریتم قادر به تخمین زاویه، انحراف جانبی و فاصله بین ردیف‌های کشت محصول است و به‌ویژه در دوره‌ای از رشد گیاه که اندازه‌ی آن کوچک است از عملکرد مناسبی (با خطای زاویه کوچک‌تر از ۱۰ درجه و انحراف جانبی کمتر از ۰/۱۰ متر) برخوردار بود (Winterhalter, Fleckenstein, Dornhege, & Burgard, 2018). در مطالعه‌ای دیگر، گوئرو و همکاران (Guerrero *et al.*, 2013) برای تشخیص دقیق ردیف کشت محصول در مزارع ذرت، یک سامانه خودکار مبتنی بر بینایی ماشین طراحی کردند. سامانه بینایی مورد نظر روی یک وسیله نقلیه سیار کشاورزی نصب گردید و تحت لرزش‌ها و حرکات ارتعاشی در شرایط واقعی قرار گرفت. در این پژوهش، ردیف‌های کشت با استفاده از پارامترهای هندسی تحت

1- Hough transform
2- Kalman filtering

3- Principal Component Analysis
4- Double thresholding
5- Otsu

میدان دید دوربین تصویربرداری و برآوردگر Theil-Sen پیش‌بینی شدند، اما به دلیل اثرات نامطلوب ذکرشده در حین حرکت سامانه، غالباً نتایج تخمین زده شده در مقایسه با ردیف‌های واقعی محصول نادرست بودند.

در تحقیقی، تصاویر برگ گیاهان از سه نوع گونه‌ی مختلف با به‌کارگیری فیلتر گابور و تغییر پارامترهای این فیلتر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این پژوهش یک مجموعه داده که شامل ۱۲۰ تصویر بود توسط این الگوریتم به سه کلاس دسته‌بندی شدند. طبق نتایج، مقادیر دقت به‌دست‌آمده برای هر سه کلاس برابر ۱۰۰٪ گزارش گردید (Chaki & Parekh, 2012). ماسودا و همکاران (Masuda, Fujimoto, Iida, & Suguri, 2013) با به‌کارگیری الگوریتم تبدیل موجک به کار شناسایی گیاه برنج در شالیزار پرداختند. بدین منظور این محققین از یک ماژول دوربین USB ارزان قیمت بر روی کمباین استفاده کردند. در این مطالعه، براساس نتایج نشان داده شد که الگوریتم مورد نظر توانایی تشخیص گیاه در شرایط نوری متفاوت را با دقت تشخیص ۹۶/۷٪ دارد. در یک تحقیق دیگر، ابتدا پس از ایجاد نوارهای موازی با فاصله‌ی یکسان بر روی تصویر اخذشده از ردیف‌های کشت، هر خط کشت به چندین ناحیه تقسیم گردید. سپس مختصات مراکز ثقل نواحی موجود در تصویر محاسبه شدند. در انتها با به‌کارگیری الگوریتم رگرسیون خطی، موقعیت ردیف‌های کشت گیاه شناسایی شدند. لازم به ذکر است که در این تحقیق از فرآیند بخش‌بندی در حین عملیات پردازش تصویر به‌منظور تشخیص گیاه استفاده نشد. براساس نتایج نشان داده شد که موقعیت نقاط مرکزی روی ردیف‌های کشت محصول بسته به میزان رشد محصول با دقتی در محدوده‌ی ۶± تا ۱۲± میلی‌متر قابل تخمین است (Søgaard & Olsen, 2003). بوسو و همکاران (Bossu, Gee, Jones, & Truchetet, 2009) از الگوریتم‌های پردازش تصویر مبتنی بر تبدیل موجک[1] و فیلتر گابور[2] برای تمایز میان محصول و علف‌های هرز در تصاویر مصنوعی و واقعی استفاده کردند. براساس ماتریس درهم‌ریختگی حاصل از اعمال تبدیل موجک، نتایج طبقه‌بندی میان محصول و علف‌های هرز با نتایج حاصل از فیلتر گابور مقایسه شد. پس از به‌کارگیری این الگوریتم‌ها بر روی یک سامانه سمپاش دقیق بلادرنگ، بهترین نتیجه با اعمال تبدیل گسسته موجک Meyer حاصل شد. در حقیقت، استفاده از تبدیل موجک (با Daubechies 25) نه تنها برای طبقه‌بندی محصول و علف‌های هرز مناسب‌تر بود بلکه از لحاظ زمان پردازش نیز نتایج بهتری نسبت به فیلتر گابور ارائه داد. در یک تحقیق، با به‌کارگیری الگوریتمی با هدف تشخیص ردیف کشت گیاه به توسعه‌ی یک سامانه مسیریابی نشاءکار برنج پرداخته شد. در این الگوریتم از روش شبکه عصبی کانولوشن (CNN[3]) برای شناسایی و مکان‌یابی نشاءهای برنج در تصاویر مزرعه و از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی تجمعی (AHC[4]) برای گروه‌بندی نشاءهای برنج در ردیف‌های کشت استفاده شد. نهایتاً پس از ارزیابی عملکرد این سامانه طراحی‌شده، براساس نتایج نشان داده شد که الگوریتم مبتنی بر CNN در مقایسه با یک الگوریتم کلاسیک دارای ۶۲٪ خطای کمتر از لحاظ پارامتر فاصله جانبی و همچنین ۵۷٪ خطای کمتر در مقدار زاویه حرکت بود (Lin *et al.*, 2020). محمود و همکاران (Mahmud, Abidin, Mohamed, Abd Rahman, & Iida, 2019) نیز برای حل مسئله‌ی مسیریابی نوعی ربات سمپاش گلخانه‌ای، یک الگوریتم چندمنظوره را ارائه دادند. در این مطالعه، نقشه احتمالی برای مسیرهای بین گیاهان در یک بستر مجازی طراحی شد. شایان ذکر است که این محیط مجازی براساس یک محیط واقعی گلخانه طراحی شد تا انجام عملیات کشاورزی در گلخانه قابل تجسم باشد. به‌منظور تعیین بهترین مسیرها برای ربات متحرک، از یک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب-نسخه‌ی سه (NSGA[5]-III) استفاده شد. عملکرد NSGA-III براساس زمان اجرا و کیفیت راه‌حل با استفاده از شاخص C-Metric مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که NSGA-III در مقایسه با NSGA-II در همه موارد آزمایشی از کیفیت عملکرد مناسب‌تری برخوردار بود. از سوی دیگر، عملکرد NSGA-II از لحاظ زمان اجرا در همه موارد آزمایشی نسبتاً بهتر گزارش گردید. علی‌رغم عملکرد بهتر NSGA-II از لحاظ زمان اجرا، NSGA-III به‌عنوان حل‌کننده مسئله‌ی مسیریابی ربات‌های کشاورزی بیشتر مورد توجه می‌باشد، زیرا راه‌حل مناسب‌تری را به‌ویژه برای محیط‌هایی با تعداد زیادی از گیاهان ارائه می‌دهد.

در مجموع می‌توان گفت که استفاده از روش‌های سنتی کشاورزی گاهاً منجر به استفاده بی‌رویه از مواد شیمیایی (علف‌کش‌ها و کودها)، فرسایش خاک و آلودگی محیط‌زیست می‌شود (Astrand & Baerveldt, 2005; Kataoka, Kaneko, Okamoto, & Hata, 2003). لذا مجموع این عوامل در کنار نیاز برای تأمین مواد غذایی جمعیت رو به ازدیاد کره زمین باعث حرکت به سوی کشاورزی هوشمند شده است. افزایش دقت و سرعت فرآیندهای کاشت و داشت از اهداف اصلی هوشمندسازی می‌باشد. در زمینه‌ی مکانیزه کردن عملیات کشاورزی، تشخیص دقیق ردیف‌های کشت محصولات به‌عنوان یک مسئله مهم و چالش برانگیز در راستای شناسایی علف‌های هرز و راهنمایی خودکار ماشین‌ها شناخته می‌شود. با وجود الگوریتم‌های مختلفی که تاکنون در این زمینه مورد بررسی قرار

1- Wavelet transform
2- Gabor filtering
3- Convolutional Neural Network
4- Agglomerative Hierarchical Clustering
5- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

گرفتند، نیاز به ارائه‌ی راهکارهای کاربردی برای بهینه‌سازی این مسئله است. لذا با در نظر داشتن این موضوع، هدف از مطالعه‌ی حاضر، ارائه‌ی یک الگوریتم جدید برای تشخیص خودکار ردیف‌های کشت گیاه ریحان است که با بهره‌گیری از روش بینایی ماشین می‌توان سرعت و دقت عملیات هدایت یک ربات در زمین کشت را بهبود داد. بدین منظور در این پژوهش، ابتدا با استفاده از سه روش مختلف (گشودگی مساحت، حذف ابعادی و ماسک‌گذاری) به حذف علف‌های هرز میان ردیف‌های کشت محصول در حین دوره‌ی رشد پرداخته شد. سپس جهت شناسایی ردیف‌های کشت در تصاویر علاوه بر الگوریتم پیشنهادی، چهار الگوریتم مبتنی بر تبدیل هاف، تبدیل موجک، فیلتر گابور و رگرسیون خطی مورد بررسی قرار گرفتند و نهایتاً به ارزیابی عملکرد مسیریابی ربات طراحی شده پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

تمامی مراحل انجام این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و در بهار ۱۴۰۰ انجام پذیرفت. شکل ۱ روند کلی کار تشخیص خودکار ردیف‌های کشت گیاه ریحان را نشان می‌دهد. بدین منظور پس از اخذ تصویر از ردیف‌های کشت، با انجام فرآیند بخش‌بندی، تمامی مناطق سبز از تصویر استخراج گردید. سپس با اعمال هر یک از الگوریتم‌های مسیریابی بر روی تصویر، خطوط کشت گیاه تشخیص داده شد و معادلات آن‌ها تعیین گردید. نهایتاً عملکرد ربات طراحی‌شده با به‌کارگیری مناسب‌ترین الگوریتم مسیریابی مورد ارزیابی قرار گرفت. شایان ذکر است که شرح مراحل فوق با جزئیات بیشتر در زیر آمده است.

شکل ۱- نمودار مراحل کلی کار تشخیص خودکار ردیف‌های کشت گیاه ریحان

Fig.1. Diagram of the steps for automatic detection of basil cultivation rows

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق، مقدار بذر مصرفی گیاه ریحان برای زمینی به مساحت ۳۵ مترمربع برابر ۱۷۵ گرم بود. لازم به ذکر است که بذرها در ردیف‌هایی به فاصله تقریبی۳۰-۵۰ سانتی‌متر در نوعی از خاک با ویژگی‌هایی مانند بافت غالب رسی و لوم رسی، ظرفیت زراعی[1] ۲۱٪ و pH برابر ۷/۴۶ کشت شدند. در این مطالعه به محض ۲-۳ برگی شدن گیاه، تصویربرداری در سه دوره‌ی زمانی از طول مدت کشت گیاه (هفته سوم، هفته چهارم و هفته پنجم) انجام پذیرفت، به‌طوری‌که در هر دوره‌ی رشد، تعداد شش تصویر مورد بررسی قرار گرفت.

ساختار الکترومکانیکی ربات

اجزای الکترومکانیکی و مکانیکی ربات عبارتند از: یک وب‌کم Logitech (مدل C930e HD، کشور تایوان)، یک برد توسعه دوربین

1- Field Capacity (FC)

دیجیتالی ESP32CAM (مدل OV2640، کشور چین)، DC موتور (مدل ZGA37FH، کشور چین) با ولتاژ ۱۲v و مکانیزم انتقال توان موتورگیربکس، دور خروجی ۵ RPM و حداکثر گشتاور ۱۵ kg.cm، ماژول درایور موتور L298N برای راه‌اندازی موتورها و شاسی (پروفیل ۴ شیار جنس آلومینیوم (AL-6063) با ابعاد ۲۰ × ۲۰). چرخ‌هایی که در قسمت جلوی ربات قرار داشتند به‌صورت متحرک و چرخ‌های قسمت عقب محرک بودند. شکل ۲ ساختار ربات مورد نظر را نشان می‌دهد.

شکل ۲- ساختار ربات و مکان قرارگیری دوربین و شاخص بر روی آن

Fig.2. Robot structure and the locations of the camera and the index

سامانه حرکتی ربات

به‌منظور اطمینان از قرارگیری ربات در مسیر حرکت، یک دوربین بر روی ربات نصب گردید و با استفاده از تصاویر آن، عملیات پردازش تصویر به‌منظور استخراج مسیر انجام شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، با توجه به ارتفاع ساقه‌ی گیاه ریحان در طی مدت دوره رشد، ارتفاع ربات طراحی‌شده نسبت به سطح زمین برابر با ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. علاوه بر این، سطح زمین برای حرکت ربات از قبل آماده‌سازی گردید تا حین حرکت از بروز لغزش چرخ‌ها و برخورد با موانع جلوگیری شود. شکل ۳ شماتیکی از نقشه‌ی مسیر حرکت ربات را نشان می‌دهد.

شکل ۳- چگونگی حرکت ربات در مسیر کشت گیاه

Fig.3. Schematic of robot moving in the path of plant cultivation

سامانه حرکتی ربات طراحی‌شده متشکل از دو درایور موتور (مدل L298N، کشور چین) برای راه‌اندازی دو DC موتور (مدل ZGA37FH، کشور چین) سمت راست و چپ ربات، حسگر فراصوتی (مدل US-100، کشور چین)، شاخص و همچنین دو حسگر انکودر نوری[1] (مدل ۶۰۰ درجه‌ی دو فاز، کشور چین) برای تشخیص میزان حرکت چرخ‌های متحرک ربات در هر سمت می‌باشد (Palacin & Martinez, 2021). حسگر فراصوتی از جمله رایج‌ترین حسگرهای اندازه‌گیری فاصله است که در این پژوهش به دلیل صرفه اقتصادی و سهولت استفاده، به‌منظور جلوگیری از آسیب ناشی از برخورد ربات با موانع بزرگ و نهایتاً توقف به‌موقع آن در نظر گرفته شد (Zhmud, Kondratiev, Kuznetsov, Trubin, & Dimitrov, 2018). شاخص تعبیه‌شده نیز به‌منظور تعیین زاویه قرارگیری ربات مورد استفاده قرار گرفت. ورودی مدار کنترلی برای تعیین زاویه، اختلاف میان شاخص و خط کشت مستخرج از تصویر اخذشده می‌باشد و خروجی مدار، تغییر سرعت موتورهای چپ و راست (در محدوده‌ی ۰ تا ۰/۱ متر بر ثانیه) به‌منظور ایجاد زاویه‌ی مطلوب حرکت ربات است. داده‌های حسگرهای انکودر نوری به‌عنوان بازخورد از موتور چرخ‌ها به‌صورت دیجیتال به میکروکنترل ارسال می‌شوند. بدین ترتیب میکروکنترلر، پالس‌های ارسالی از حسگرها را دریافت و با توجه به مسیری که از قبل مشخص شده موتورها را کنترل و سرعت آن‌ها را با استفاده از درایور موتور L298N تنظیم می‌نماید.

سامانه اخذ تصویر

به‌منظور تعیین مسیر حرکت ربات و اطمینان از قرارگیری آن در مسیر مورد نظر، یک وب‌کم Logitech (مدل C930e HD، کشور تایوان) با نرخ ۱۰ فریم در ثانیه در نقطه‌ی مشخصی از ربات (شکل ۲) در نظر گرفته شد به‌طوری‌که خط کشت گیاه را پوشش دهد، سپس با انجام عملیات پردازش تصویر از طریق برد پردازنده LattePanda (4G/64GB، کشور چین) و با به‌کارگیری نرم‌افزار Matlab 2018a ردیف‌های کشت گیاه از تصویر استخراج گردید. علاوه بر این دوربین، برای دور زدن به موقع ربات از یک برد توسعه دوربین دیجیتالی ESP32CAM (مدل OV2640، کشور چین) نیز استفاده شد. لنز این دوربین در فاصله‌ی ثابت ۶۵ سانتی‌متر از سطح زمین و به‌صورت عمود بر سطح افقی قرار گرفت (شکل ۲).

لازم به ذکر است که با کمک این دو دوربین، مدارکنترلی با دریافت یک کد مبنی بر تشخیص وجود مقداری معین از مساحت گیاه (کد ۱) و عدم وجود مقدار کافی از مساحت گیاه (کد ۰) در تصویر دستورات لازم به منظور دور زدن به‌موقع ربات در انتهای هر ردیف را به درایور موتور چرخ‌ها ارسال می‌کند.

بدین ترتیب از آن‌جایی که در حین حرکت ربات، خروجی دو دوربین تعبیه‌شده بر روی آن در هر لحظه بررسی می‌گردید، هنگام قرارگیری ربات در انتهای ردیف کشت و به محض عدم تشخیص مقدار معینی از مساحت گیاه در تصاویر اخذشده از سوی هر دو دوربین کد ۰ به مدار کنترلی ارسال شده که سبب آغاز عملیات دور زدن ربات می‌شود. مطابق شکل ۳ در این حالت، در ابتدای عملیات دور زدن، با اعمال ولتاژ ثابت (۱۲ ولت) به هر دو چرخ، ربات به مسافت ۵۰ سانتی‌متر در یک جهت مستقیم حرکت کرده و سپس با توجه به نقطه‌ی ثابت شروع حرکت و مکان قرارگیری ردیف بعدی نسبت به ربات (چپ یا راست) با اعمال ولتاژ صفر به چرخی که در مجاورت ردیف بعدی قرار داشت، سرعت آن صفر شده و چرخ دیگر با سرعت ثابت (با اعمال یک ولتاژ معین) طی یک زاویه ۹۰ درجه شروع به دور زدن کرد؛ و در ادامه ضمن اعمال ولتاژ ثابت ۱۲ ولتی به هر دو چرخ، بعد از طی یک مسافت مستقیم ۵۰ سانتی‌متری، مجدداً با چرخش تحت یک زاویه ۹۰ درجه‌ی دیگر مطابق آنچه که پیش‌تر ذکر شد، ربات در مسیر کشت بعدی قرار می‌گرفت.

پردازش تصویر

پس از دریافت تصویر با گسترش هیستوگرام، کیفیت تصویر بهبود یافت. نویزهای موجود در تصویر با استفاده از فیلترگذاری (فیلتر میانگین) حذف گردیدند. در مرحله بعد با انجام عملیات آستانه‌گذاری، پس‌زمینه حذف شده و قسمت‌های دیگری از پس‌زمینه نیز به‌دلیل تشابه شدت رنگ با پس‌زمینه باقی ماندند. به‌منظور حذف این نویزهای باقی‌مانده، بعد از عملیات بستن تصویر[2] (پنجره ۳×۳)، فرآیند گشودگی بر روی مساحت[3] به ابعاد ۲۰ پیکسل صورت پذیرفت (Du, Wang, & Zhang, 2007). شایان ذکر است که مقادیر آستانه به‌دست‌آمده با روش آزمون و خطا بر روی تصاویر اعمال گردید. بدین ترتیب بعد از استخراج همه‌ی مناطق سبز از تصویر (گیاهان ریحان و علف‌های هرز) و حذف علف‌های هرز، با اعمال هر یک از الگوریتم‌های شناسایی ردیف کشت، خطوط کشت گیاه ریحان در تصاویر تشخیص داده شد.

اکثر الگوریتم‌های شناسایی ردیف کشت، زمانی بهترین نتیجه را دارند که مناطق بین ردیف‌های کشت گیاه یکنواخت و عاری از علف‌های هرز باشند. به عبارت دیگر وجود علف‌های هرز در بین خطوط کشت، اجرای این روش‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌کند (Jiang, Wang, Wang, & Liu, 2016; Tenhunen *et al.*, 2019). لذا

1- Optical Encoder

2- Image closing

3- Area opening

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در این پژوهش قبل از پیاده‌سازی هر یک از الگوریتم‌های مسیریابی مورد نظر، برای کاهش خطا در تشخیص خطوط کشت گیاه حین دوره‌ی رشد و همچنین برای افزایش سرعت اجرای کار، همه‌ی علف‌های هرز بین ردیف‌های کشت طی یک مرحله عملیات پیش‌پردازش از تصویر حذف گردید. بدین منظور سه روش (۱- گشودگی مساحت، ۲- حذف ابعادی و ۳- ماسک‌گذاری) مورد بررسی قرار گرفت:

(a) (b) (c) (d) (e)

شکل ٤- خروجی‌های روش گشودگی مساحت: a) تصویر اصلی، b) تصویر باینری، c) تصویر حاصل از اجرای عملیات رشد ناحیه، d) تصویر حاصل از اجرای عملیات باز کردن ناحیه و e) تصویر ردیف‌های کشت تشخیص داده‌شده

Fig.4. The outputs of the area opening method: a) Original image, b) Binary image, c) Image obtained from region growing operation, d) Image obtained from area opening operation, and e) Image of the detected rows

(a) **(b)** **(c)** **(d)** **(e)**

شکل ٥- خروجی‌های روش حذف ابعادی: a) تصویر اصلی، b) تصویر باینری، c) تصویر حاصل از اعمال عنصر ساختاری دیسکی توسط عملیات افزایش و d) تعیین مقدار طول بزرگ نواحی موجود در تصویر و e) تصویر ردیف‌های کشت تشخیص‌داده‌شده

Fig.5. The outputs of the dimensional elimination method: a) Original image, b) Binary image, c) The image obtained by applying the disk structural element by the dilation operation, d) Determining the amount of large length of the areas in the image, and e) Image of the detected rows

در روش گشودگی مساحت برای حذف علف‌های هرز، ابتدا با اجرای عملیات رشد ناحیه[1] (Kurmi, Gangwar, Agrawal, Kumar, & Srivastava, 2021)، ابعاد هر یک از مناطق موجود در تصویر تا حدی افزایش یافت تا گیاهانی که بر روی یک خط کشت قرار دارند به یکدیگر متصل گردند (شکل ۴-c) و سپس با توجه به مقدار قابل توجه مساحت ردیف‌های کشت، حذف علف‌های هرز بین ردیف‌ها توسط عملیات باز کردن ناحیه[2] انجام پذیرفت (شکل ۴-d). در گام آخر با انجام عملیات اشتراک میان خروجی حاصل از مرحله‌ی قبل (شکل ۴-d) و تصویر باینری (شکل ۴-b)، ردیف‌های کشت گیاه استخراج شدند (شکل ۴-e).

در روش حذف ابعادی ابتدا هر یک از نواحی موجود در تصویر با یک عنصر ساختاری دیسکی با قطر ۱۰ پیکسل توسط عملیات افزایش[3]، گسترش یافت؛ به طوری که بخش زیادی از گیاهانی که روی خطوط کشت واقع بودند هر کدام در یک منطقه از تصویر قرار گرفتند (شکل ۵-c). در مرحله‌ی بعد، طول بزرگ همه مناطق موجود در تصویر به‌عنوان یک پارامتر ابعادی بر حسب پیکسل محاسبه شد (شکل ۵-d) و در نهایت، ناحیه‌هایی از تصویر که با

1- Region growing
2- Area opening
3- Dilation

اختلاف زیاد نسبت به دیگر نواحی دارای بیشترین مقادیر طول بزرگ بودند به‌عنوان ردیف کشت استخراج گردیدند (شکل ۵-e).

در روش ماسک‌گذاری، نخست یک ماسک با طولی برابر طول تصویر و عرض ثابت بر روی تصویر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که این ماسک با عرض‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و سرانجام با مقایسه‌ی دقت تشخیص خطوط کشت و زمان اجرای الگوریتم حاصل از ماسک‌های مختلف، مناسب‌ترین مقدار عرض برای ماسک در هر دوره‌ی رشد گیاه انتخاب شد (شکل ۶).

شکل ٦- تغییرات دقت و زمان اجرای روش ماسک‌گذاری به‌ازای مقادیر مختلف عرض ماسک طی سه دوره‌ی رشد گیاه: a) هفته سوم، b) هفته چهارم و c) هفته پنجم

Fig.6. The changes in the accuracy and the implementation time of the masking method for different values of mask width during the three periods of plant growth: a) Third week, b) Fourth week, and c) Fifth week

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بهترین مقدار عرض ماسک برای دوره‌های رشد سه هفتگی، چهار هفتگی و پنج هفتگی به‌ترتیب برابر ۳۸۵، ۴۲۴ و ۴۰۰ پیکسل به‌دست آمد. شایان ذکر است که گام‌های کوچک تر از این مقادیر عرض بیان شده، دقت مطلوبی نداشتند و گام‌های بزرگ‌تر از آن‌ها نیز به دلیل قرار گرفتن بخش‌هایی از دو ردیف کشت مجاور در ناحیه ماسک به اشتباه از دقت بالاتری برخوردار بودند. علاوه بر این، در هر سه نمودار مربوط به زمان مشاهده می‌شود که با چشم‌پوشی از نوسانات ناچیز، مدت زمان اجرای روش ماسک‌گذاری به‌صورت تقریبی از گام ۳۰۰ به بعد، پس از طی یک روند ثابت، در این مقادیر عرض ماسک (۳۸۵ پیکسل در هفته سوم رشد، ۴۲۴ پیکسل در هفته چهارم رشد و ۴۰۰ پیکسل در هفته پنجم رشد) دارای میزان مناسبی بود.

پس از تعیین مناسب‌ترین مقدار عرض برای ماسک در هر دوره‌ی رشد گیاه، در ادامه کار با حرکت ماسک از سمت چپ به راست تصویر، مجموع پیکسل‌های گیاهان در آن شمارش گردید. با توجه به بدیهی بودن تراکم بالای کشت گیاهان در نواحی خطوط کشت، نهایتاً منطقه‌ای از تصویر که بیشترین مقدار از پیکسل‌های گیاهان را دارا بود به‌عنوان ردیف کشت انتخاب و استخراج شد (شکل ۷-c).

در پایان این بخش از تحقیق، با مقایسه‌ی دقت تشخیص و سرعت سه روش ذکرشده و همچنین بررسی عملکرد الگوریتم‌های شناسایی ردیف کشت ضمن به‌کارگیری خروجی هر یک از این روش‌ها، مناسب‌ترین روش حذف علف هرز تعیین گردید.

الگوریتم‌های شناسایی ردیف کشت

برای شناسایی ردیف‌های کشت محصول در تصویر به‌منظور کنترل ربات در مسیر حرکت، علاوه بر الگوریتم پیشنهادی، چهار الگوریتم دیگر که براساس پژوهش‌های پیشین در شناسایی ردیف‌های کشت گیاه رایج و پرکاربرد بودند نیز مورد بررسی قرار گرفتند (Tenhunen *et al.*, 2019). این الگوریتم‌ها عبارتند از: ۱) روش مبتنی بر تبدیل هاف (Rovira-Mas, Zhang, Reid, & Will, 2005)، ۲) روش مبتنی بر تبدیل موجک (Han, Wang, & Kang, 2012)، ۳) روش مبتنی بر فیلتر گابور (Bossu *et al.*, 2009) و ۴) روش مبتنی بر رگرسیون خطی (Guerrero *et al.*, 2013). شایان ذکر است که در این پژوهش برای به چالش کشیدن الگوریتم‌های مورد نظر، چندین ردیف گیاه به‌صورت انحنادار کشت شدند. علاوه بر این، عملکرد این روش‌های مسیریابی بدون وجود علف‌های هرز نیز مورد بررسی قرار گرفت؛ بدین منظور از مجموعه تصاویر اخذشده توسط دوربین واقع‌شده در یک نقطه‌ی ثابت از مزرعه، استفاده گردید.

(a) (b) (c) (d) (e)

شکل ۷- تشخیص ردیف کشت محصول توسط الگوریتم پیشنهادی ضمن به‌کارگیری روش سوم حذف علف‌های هرز[۱]: a) تصویر اصلی، b) تصویر باینری، c) تعیین منطقه‌ای از تصویر با بیشترین تعداد پیکسل‌های گیاه، d) تعیین نقاط خط مرکزی ردیف کشت و e) استخراج خط کشت گیاه

Fig.7. Detection of crop row by the proposed algorithm using the third method of weed removal: a) Original image, b) Binary image, c) Determined area of the image with the highest number of plant pixels, d) Centerline points of the crop row, and e) Extraction of plant cultivation line

۱- به دلیل محدودیت تعداد صفحات، فقط خروجی‌های الگوریتم پیشنهادی در هفته‌ی سوم دوره‌ی کشت گیاه به‌صورت نمونه نشان داده شده است.

الگوریتم مبتنی بر تبدیل هاف

یکی از متداول‌ترین الگوریتم‌های بینایی ماشین برای تشخیص خطوط مستقیم در تصویر، تبدیل هاف است. در این بخش، روش تبدیل هاف مطابق با الگوریتم ارائه شده توسط اسلاتر و همکاران (Slaughter, Giles, & Downey, 2008) به‌کار گرفته شد. به‌منظور بهینه‌سازی الگوریتم مبتنی بر هاف و کاهش تعداد نقاط پرت، پس از انجام عملیات پیش‌پردازش تصویر، حذف نویز و استخراج مناطق سبز، ابتدا اسکلت ردیف‌های کشت توسط عملگر مورفولوژیکی نازک‌سازی[1] (Rapacz & Lazarz, 2020) به‌دست آمد و سپس فرآیند تبدیل هاف بر روی تصاویر انجام پذیرفت.

الگوریتم مبتنی بر تبدیل موجک

در این مطالعه با توجه به پیشنهاد تکرال و منهاس (Thakral & Manhas, 2018)، موجک Daubechies با مرتبه یک (db1) و فیلتر haar به‌عنوان تابع پایه موجک مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت با انجام فرآیند بازسازی، ردیف‌های کشت محصول از تصویر استخراج گردید.

الگوریتم مبتنی بر فیلتر گابور

برای تحلیل و بررسی محتوای فرکانس خاص در تصویر در یک جهت خاص از فیلتر گابور استفاده می‌شود. در فضای مکان (پیکسل‌ها)، فیلتر گابور دو بعدی، یک فیلتر میان‌گذر مختلط است که شامل دو بخش حامل[2] و پوش[3] می‌باشد (Bossu *et al.*, 2009) (رابطه ۱):

$$g(x,y) = W_r(x,y)\ .\ S(x,y) \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق، S(x,y) تابع سینوسی مختلط است که بخش حامل فیلتر را تشکیل می‌دهد و $W_r(x,y)$ تابع گوسی شکل است که به پوش فیلتر گابور معروف است.

به‌منظور داشتن یک ویژگی گابور قدرتمند برای تشخیص ردیف‌های کشت گیاه لازم است پارامترهای مؤثر در تولید بانک فیلتر گابور به‌درستی تنظیم شوند. لذا در این بخش برای تولید بانک فیلتر گابور با توجه به تحقیق انجام شده توسط نیکولوف و سانکووا (Nikolov & Tsankova, 2018)، پارامتر طول موج برابر ۴ و پارامتر زاویه بین ۰ تا ۴۵ درجه در نظر گرفته شد و نهایتاً با بررسی پاسخ‌ها، کارآمدترین فیلتر با بیشترین مقدار آشکارسازی ردیف‌های کشت انتخاب گردید.

الگوریتم مبتنی بر رگرسیون خطی

در این بخش، پس از استخراج مناطق سبز از تصویر، عملیات تبدیل به تصویر دودویی صورت گرفت. سپس با توجه به ثابت بودن ابعاد تصویر، خطوطی با رنگ پس‌زمینه و با گام ثابت بر روی تصویر رسم شد و از این طریق هر ردیف کشت به تعدادی نواحی تقسیم گردید. شایان ذکر است که مقدار این گام متناسب با طول ردیف‌های کشت و با هدف دستیابی به مجموعه‌ای از نقاط نزدیک به هم در راستای هر ردیف به‌صورت آزمون و خطا تعیین شد. در ادامه با یافتن مرکز سطح هر ناحیه، مجموعه‌ای از نقاط با مختصات معین بر روی هر ردیف به‌دست آمد. در نهایت با اعمال الگوریتم رگرسیون خطی (Tenhunen *et al.*, 2019) بر روی این مجموعه داده‌ها (مراکز سطح)، خطوط کشت گیاه بر روی تصویر مشخص گردید.

الگوریتم پیشنهادی (روش برازش نقاط مرکزی)

اجرای این الگوریتم شامل سه مرحله می‌باشد: ۱) شناسایی خطوط کامل کشت محصول، ۲) یافتن مختصات نقاط مرکزی (Midpoint) هر خط کشت به‌عنوان مجموعه داده‌ها و ۳) برازش منحنی بر روی مجموعه نقاط استخراج‌شده.

برای شناسایی خطوط کامل کشت گیاه، مختصات مراکز سطح همه‌ی نواحی ردیف کشت در تصویر یافته شد و بعد با توجه به ابعاد مشخص تصویر، فرآیند تقسیم‌بندی تصویر به دو ناحیه با اندازه برابر (بالا و پایین) انجام پذیرفت. سپس، آن دسته از مناطقی که مراکز سطح آن‌ها در ناحیه‌ی پایینی تصویر واقع بود به‌عنوان خطوط کامل کشت در نظر گرفته شدند و بقیه مناطق تحت عنوان خطوط ناقص کشت از تصویر حذف گردیدند.

لازم به ذکر است که به‌منظور یافتن مجموعه نقاط واقع‌شده بر روی خط مرکزی هر ردیف کشت از یک الگوریتم جستجو استفاده گردید و از این طریق مختصات نقاطی که در طرفین هر خط کشت قرار دارند، مشخص شد. در نهایت با انجام عملیات میانگین‌گیری، نقاط خط مرکزی هر ردیف کشت تحت عنوان Midpoint تعیین گردید (شکل ۷-d) و با برازش منحنی‌های درجه یک بر روی این مجموعه نقاط، خطوط کشت از تصویر استخراج شدند (شکل ۷-e).

روش ارزیابی و مقایسه‌ی الگوریتم‌های تشخیص مسیر

برای انتخاب بهترین الگوریتم مسیریابی، هر یک از الگوریتم‌ها از لحاظ مدت زمان اجرای الگوریتم و میزان دقت الگوریتم در پیروی از مسیر تعیین‌شده توسط کاربر (مسیر ایده‌آل) مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور بررسی میزان خطای هر یک از الگوریتم‌ها، ابتدا کاربر مسیر اصلی حرکت ربات را بر روی تصاویر به‌صورت دستی تعیین نمود.

1- Morphological Thinning
2- Carrier
3- Envelope

سپس مقدار انحراف مسیر حاصل در روش‌های مختلف تعیین مسیر نسبت به مسیر تعیین‌شده محاسبه گردید؛ بدین منظور نقاطی به‌صورت تصادفی بر روی مسیر اصلی حرکت و مسیرهای مورد نظر انتخاب شدند و سپس میانگین و انحراف معیار فواصل میان نقاط مسیر اصلی حرکت نسبت به نقاط روی سایر مسیرها محاسبه گردید. نهایتاً روشی که در عین داشتن سرعت مناسب، دارای بیشترین دقت در پیروی از مسیر اصلی حرکت بود به‌عنوان مناسب‌ترین الگوریتم مسیریابی انتخاب گردید. بدین ترتیب حین حرکت ربات بر روی ردیف‌ها، هر لحظه این مسیر مناسب با شاخص از پیش تعیین‌شده‌ای که نشان‌دهنده‌ی جهت‌گیری ربات نسبت به موقعیت واقعی گیاهان در هر ردیف است، مقایسه شده و در صورت وجود انحراف مسیر حرکت نسبت به شاخص، دستورات لازم به درایور موتور چرخ‌ها ارسال می‌شود تا با تنظیم دور چرخ‌ها، ربات مجدداً در مسیر حرکت اصلی قرار گیرد.

نتایج و بحث

الف) ارزیابی الگوریتم‌های حذف علف هرز

در این مطالعه، عملکرد سه روش مختلف به‌منظور حذف علف‌های هرز در سه دوره‌ی رشد گیاه (هفته سوم، هفته چهارم و هفته پنجم) مورد بررسی قرار گرفت. نمودار تغییرات دقت تشخیص و مدت زمان اجرای سه روش پیش‌پردازش تصویر برای حذف علف‌های هرز در شکل ۸ ترسیم گردید. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است در هر سه دوره‌ی رشد گیاه، روش حذف ابعادی نسبت به دو روش دیگر دارای بالاترین دقت تشخیص ردیف کشت گیاه (در دوره اول رشد برابر ۰/۶۷۵۰ از دقت کل ۰/۷۱۱۵، در دوره دوم رشد برابر ۰/۶۵۲۶ از دقت کل ۰/۶۵۲۶ و در دوره سوم برابر ۰/۷۲۵۵ از دقت کل ۰/۷۲۵۵) بود. این در حالی است که روش ماسک‌گذاری در هر سه دوره رشد گیاه، بهترین عملکرد را از لحاظ سرعت اجرای عملیات داشت. شایان ذکر است که مدت زمان اجرای روش گشودگی مساحت بیشتر از سایر روش‌های حذف علف هرز گزارش گردید و به عبارت دیگر سرعت اجرای عملیات با به‌کارگیری این روش نسبت به بقیه کمتر می‌باشد.

در این تحقیق، سه روش مختلف حذف علف هرز بر روی همه‌ی الگوریتم‌های مسیریابی مورد مطالعه، پیاده‌سازی گردید و به صورت نمونه، نتایج مربوط به میانگین و انحراف معیار فواصل میان نقاط مسیرهای حاصل از الگوریتم پیشنهادی ضمن به‌کارگیری این سه روش نسبت به نقاط مسیرهای اصلی حرکت در شکل ۹ نشان داده شده است.

از آن جایی که اندازه‌ی گیاهان در سه دوره‌ی رشد نسبت به یکدیگر متفاوت بود، به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، عملکرد سه روش حذف علف هرز در هر دوره‌ی رشد به صورت جداگانه بررسی شد (شکل ۹). مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که روش ماسک‌گذاری در هر سه دوره‌ی رشد گیاه دارای مقدار میانگین و انحراف معیار پایین‌تری می‌باشد و بعد از آن به ترتیب روش حذف ابعادی و گشودگی مساحت از میزان انحرافات و پراکندگی کمتری برخوردار بودند.

(a) (b)

شکل ۸– نمودار تغییرات دقت و مدت زمان اجرای سه روش پیش‌پردازش تصویر به‌منظور حذف علف‌های هرز

Fig.8. Diagram of accuracy and implementation time in the three image preprocessing methods for removing weeds

شکل ۹– نمایش (a) تغییرات میانگین و (b) تغییرات انحراف معیار فواصل میان نقاط مسیر اصلی حرکت و نقاط مسیر مستخرج از تصویر توسط الگوریتم پیشنهادی ضمن به‌کارگیری سه روش مختلف حذف علف هرز

Fig.9. Showing (a) Mean values, and (b) The standard deviation of the distance between points of the main path and points of the path extracted from the image by the proposed algorithm using three different methods of weed removal

جدول ۱– آزمون t-test میان نقاط مسیر اصلی تعیین‌شده توسط کاربر و نقاط مسیر تشخیص‌داده‌شده توسط روش مسیریابی پیشنهادی ضمن استفاده از سه روش مختلف حذف علف هرز

Table 1- T-test between user-defined main path points and path points detected by the proposed routing method using three different weed removal methods

الگوریتم پیشنهادی ضمن به‌کارگیری سه روش مختلف حذف علف هرز Proposed algorithm using three different methods of weed removal		اختلاف میانگین میان نقاط مسیر تشخیص‌داده‌شده و مسیر ایده‌آل Average difference between the points of detected path and the ideal path	P-Value
دوره اول رشد The first growth period	روش گشودگی مساحت Area opening	10.2216	0.8226 ns
	روش حذف ابعادی Dimensional elimination	7.6560	0.8757 ns
	روش ماسک‌گذاری Masking	1.6897	0.9735 ns
دوره دوم رشد The second growth period	روش گشودگی مساحت Area opening	5.1618	0.9087 ns
	روش حذف ابعادی Dimensional elimination	1.1555	0.9766 ns
	روش ماسک‌گذاری Masking	1.8646	0.9654 ns
دوره سوم رشد The third growth period	روش گشودگی مساحت Area opening	3.2557	0.9409 ns
	روش حذف ابعادی Dimensional elimination	2.9363	0.9370 ns
	روش ماسک‌گذاری Masking	2.1267	0.9573 ns

ns: اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود ندارد.

ns: There is no significant difference at 5% level.

علاوه بر این لازم به ذکر است که طبق نتایج آزمون آماری (آزمون t-test) گزارش شده در جدول ۱، اختلاف‌های معنی‌داری میان نقاط مسیر اصلی تعیین‌شده توسط کاربر نسبت به نقاط مسیر تشخیص‌داده‌شده توسط الگوریتم مسیریابی پیشنهادی ضمن به‌کارگیری سه روش مختلف حذف علف هرز مشاهده نشد ($p > ۰/۰۵$).

بدین ترتیب، در مجموع می‌توان گفت که در هر سه دوره رشد گیاه، روش ماسک‌گذاری دارای کوتاه‌ترین مدت زمان اجرای عملیات (۱/۶۴ ثانیه به‌صورت میانگین) و همچنین با دقت تشخیص نزدیک به دقت کل (در دوره اول رشد برابر ۰/۶۵۲۴ از دقت کل ۰/۷۱۱۵، در دوره دوم رشد برابر ۰/۶۵۱۱ از دقت کل ۰/۶۵۲۶ و در دوره سوم برابر ۰/۷۱۴۲ از دقت کل ۰/۷۲۵۵) بود و بعد از آن از لحاظ کمی به‌ترتیب روش‌های حذف ابعادی و گشودگی مساحت قرار گرفتند. در پژوهشی، به‌منظور حذف علف‌های هرز در مزرعه، الگوریتمی پیشنهاد داده شد که در آن ابتدا ردیف‌های کشت توسط تبدیل خطی هاف با دقت تشخیص ۹۹٪ شناسایی شدند، در ادامه پس از تعیین عرض ردیف‌های کشت، گیاهان بین خطوط کشت به‌عنوان علف هرز تشخیص داده شدند. شایان ذکر است که دقت تشخیص علف هرز در این الگوریتم ۸۵٪ گزارش گردید (Jones, Gee, & Truchetet, 2009). در همین راستا، همینگ و راث (Hemming & Rath, 2001) نیز به‌منظور طبقه‌بندی کلم، هویج و علف‌های هرز موجود در مزرعه، هشت ویژگی مورفولوژی و سه ویژگی رنگی از گیاهان (کلم، هویج و علف‌های هرز) را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج این تحقیق، دقت طبقه‌بندی وابسته به مرحله رشد و تراکم علف‌های هرز بین ۵۱–۹۵٪ بود. در مطالعه‌ای دیگر، از شاخص پوشش گیاهی EXG برای جداسازی محصول ذرت و علف‌های هرز از پس‌زمینه (خاک) استفاده گردید. با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی در این پژوهش نشان داده شد که الگوریتم ارائه‌شده، دارای عملکرد مطلوبی در تشخیص ذرت (قدرت تشخیص ۱۰۰٪) و علف‌هرز (تنها ۴٪ خطا در طبقه‌بندی) می‌باشد (Kiani & Jafari, 2012).

ب) ارزیابی الگوریتم‌های مسیریابی

پس از انجام عملیات پردازش تصویر، خروجی هر یک از الگوریتم‌های مسیریابی به شکل خطوط کشت استخراج‌شده از تصویر مشخص گردید (شکل ۱۰).

شکل ۱۰– استخراج خطوط کشت محصول با استفاده از a) الگوریتم تبدیل هاف، b) الگوریتم تبدیل موجک، c) فیلتر گابور، d) الگوریتم رگرسیون خطی و e) الگوریتم پیشنهادی

Fig.10. The extraction of crop lines using the a) Hough transform algorithm, b) Wavelet transform algorithm, c) Gabor filter, d) Linear regression algorithm, and e) The proposed algorithm

در ادامه بعد از پیاده‌سازی هر یک از الگوریتم‌های مسیریابی بر روی تصاویر، به بررسی میزان انحراف نقاط و خطوط تشخیص‌داده‌شده توسط هر یک از این الگوریتم‌ها نسبت به مسیر ایده‌آل تعیین‌شده توسط کاربر پرداخته شد. بدین منظور ابتدا در یک مرحله RMSE[1] میان نقاط تشخیص‌داده‌شده توسط روش‌های

1- Root Mean Square Error

مختلف مسیریابی و نقاط تعیین‌شده توسط کاربر مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۲)، سپس نمودار میانگین و انحراف معیار فواصل میان نقاط مسیر اصلی حرکت و نقاط روی سایر مسیرهای تشخیص‌داده‌شده ترسیم گردید (شکل ۱۲). همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد از میان شش ردیف کشت موجود در تصویر مورد بررسی، دو ردیف (ردیف سوم و پنجم با رنگ خاکستری در جدول ۲ مشخص شده‌اند) به‌صورت انحنادار در نظر گرفته شد تا میزان دقت الگوریتم‌ها در پیروی از مسیر تعیین‌شده توسط کاربر (مسیر ایده‌آل) نسبت به یکدیگر در حالتی غیر از خط کشت مستقیم نیز مقایسه گردد.

مطابق جدول ۲ مشاهده شد که در شش ردیف کشت مورد بررسی، روش پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های مسیریابی دارای پایین‌ترین مقدار RMSE می‌باشد. بعد از روش پیشنهادی در ردیف‌های کشت مستقیم اول، دوم و ردیف کشت انحنادار پنجم به‌ترتیب روش گابور، روش تبدیل هاف، روش رگرسیون خطی و روش تبدیل موجک شامل کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا بودند. در ردیف کشت سوم روش‌های گابور، رگرسیون خطی، تبدیل موجک و تبدیل هاف به‌ترتیب کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین مقدار این پارامتر را داشتند. این ترتیب قرارگیری در ردیف کشت چهارم و ششم عبارت است از روش رگرسیون خطی، روش گابور، روش تبدیل هاف و روش تبدیل موجک. بدین‌ترتیب، پس از محاسبه‌ی متوسط RMSE شش خط کشت استخراج‌شده از تصویر توسط هر الگوریتم مسیریابی مشخص گردید که در میان روش‌های تشخیص ردیف کشت، نقاط مستخرج از روش پیشنهادی با اختلاف زیاد، کمترین مقدار میانگین انحرافات (۲۷/۰۳۱۳ پیکسل) را نسبت به نقاط تعیین‌شده بر روی مسیر ایده‌آل داشت و بعد از آن به‌ترتیب روش گابور، روش رگرسیون خطی، روش تبدیل هاف و روش تبدیل موجک با متوسط انحرافات ۴۷/۱۶۴۰، ۱۲۴/۰۴۰۶، ۱۹۱/۱۸۷۰ و ۲۱۹/۳۶۹۲ پیکسل قرار گرفتند.

جدول ۲- RMSE نقاط تشخیص‌داده‌شده توسط روش‌های مختلف مسیریابی و نقاط تعیین‌شده توسط کاربر بر روی ردیف‌های کشت گیاه

Table 2- RMSE of points detected by different routing methods and user-defined points on plant cultivation rows

روش‌های مختلف مسیریابی Routing method	ردیف کشت ۱ Cultivation row 1	ردیف کشت ۲ Cultivation row 2	ردیف کشت ۳ Cultivation row 3	ردیف کشت ٤ Cultivation row 4	ردیف کشت ٥ Cultivation row 5	ردیف کشت ٦ Cultivation row 6
روش تبدیل هاف Hough transform	74.4915	236.4702	638.5084	53.4727	71.6724	72.5068
روش گابور Gabor	31.4283	30.1133	34.7481	49.2020	69.3099	68.1825
روش تبدیل موجک Wavelet transform	90.0751	340.0037	605.9483	73.7358	114.7115	91.7409
روش رگرسیون خطی Linear regression	79.8980	336.9250	139.7882	46.3803	81.2134	60.0384
روش پیشنهادی The proposed method	27.3375	21.6356	29.0484	5.8331	37.9338	40.3996

همان طور که در شکل (۱۱-a) مشخص است، در شش ردیف کشت مورد نظر، میانگین فاصله‌های میان نقاط مسیر تشخیص‌داده‌شده توسط روش پیشنهادی و نقاط مسیر تعیین‌شده توسط کاربر با مقدار متوسط ۸/۳۲۳۷ پیکسل در پایین‌ترین سطح نسبت به سایر روش‌های مسیریابی قرار دارد. به‌علاوه در روش پیشنهادشده، فواصل میان نقاط متناظر در سرتاسر خطوط با متوسط انحراف معیار برابر ۴/۴۸۶۳ پیکسل از کمترین میزان پراکندگی نیز برخوردار بودند (شکل ۱۱-b). در مجموع ضمن توجه به مقدار میانگین فواصل نقاط متناظر در سایر روش‌ها می‌توان گفت که بعد از روش پیشنهادی، روش‌های گابور، رگرسیون خطی، تبدیل هاف و تبدیل موجک به‌ترتیب با مقادیر متوسط ۲۲/۲۶۰۱، ۲۳/۶۱۲۰، ۲۵/۳۸۵۶ و ۳۴/۷۷۹۲ دارای کمترین میزان انحرافات نسبت به شش مسیر ایده‌آل کشت بودند. همچنین، پس از بررسی مقدار انحراف معیار فواصل نقاط متناظر در این چهار روش مشاهده گردید که این الگوریتم‌های مسیریابی با میانگین مقادیر بین ۱۰ تا ۱۳ پیکسل به‌صورت تقریبی دارای میزان پراکندگی نزدیک به یکدیگر بودند. گفتنی است که در دو نمودار نشان‌داده‌شده در شکل ۱۱، ردیف کشت سوم در همه‌ی روش‌ها دارای بالاترین میزان مقادیر انحراف و پراکندگی است، علت این امر وجود انحنای زیاد و طویل بودن این ردیف کشت نسبت به دیگر خطوط کشت گیاه می‌باشد که میزان انطباق خط تشخیص‌داده‌شده بر روی ردیف کشت محصول را تحت تأثیر قرار داده است.

در همین راستا، تنهونن و همکاران (Tenhunen *et al.*, 2019) با استفاده از تبدیل فوریه دو بعدی، اطلاعاتی در مورد جهت و فاصله ردیف‌های کشت گیاهان به‌دست آوردند و سپس با به‌کارگیری الگوریتم رگرسیون خطی، مجموعه خطوطی از تصاویر استخراج

گردید. سرانجام موقعیت دقیق ردیف‌های کشت توسط روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌ی اصلی مشخص گردید. طبق این پژوهش نتیجه گرفته شد که این روش قادر است ردیف‌های کشت گیاه را با دقت ۹۴٪ پیدا کند. پونامالام و همکاران (Ponnambalam, Bakken, Moore, Glenn Omholt Gjevestad, & Johan From, 2020) نیز با استفاده از روش Multi-ROI تطبیقی، به کار تشخیص خودکار ردیف‌های محصول در مزرعه توت‌فرنگی پرداختند. در این پژوهش، پس از مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش‌های تبدیل هاف، رگرسیون خطی و Multi-ROI مشخص گردید که در اکثر تصاویر آزمایشی، خط راهنمای ردیف کشت مستخرج از روش Multi-ROI تطبیقی نسبت به دیگر روش‌ها با دقت بیش‌تری برآورد شده است.

شکل ۱۱– نمایش (a) تغییرات میانگین و (b) تغییرات انحراف معیار فواصل میان نقاط شش مسیر مستخرج از تصویر توسط پنج روش مختلف مسیریابی و مسیرهای اصلی حرکت

Fig.11. Showing (a) Mean value, and (b) The standard deviation of the distance between the points of the six paths extracted from the image and the main paths of movement using five different routing methods

در این تحقیق به‌منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر مسیرهای تشخیص‌داده‌شده توسط الگوریتم‌های مسیریابی نسبت به مسیرهای ایده‌آل تعیین‌شده توسط کاربر، آزمون t-test انجام پذیرفت (جدول ۳). طبق آنالیز آماری (جدول ۳)، اختلافات معنی‌داری میان نقاط مسیر اصلی و نقاط مسیر مستخرج از روش پیشنهادی در همه‌ی شش ردیف کشت گیاه مشاهده نشد ($p > ۰/۰۵$). این در حالی است که روش‌های تبدیل هاف و رگرسیون خطی تنها در ردیف‌های کشت دوم، سوم و چهارم، روش گابور در ردیف‌های کشت دوم و سوم و

روش تبدیل موجک فقط در ردیف‌های چهارم و پنجم دارای اختلاف‌های غیر معنی‌دار بودند ($p > ۰/۰۵$).

علاوه بر این، با محاسبه‌ی اختلاف میانگین میان نقاط تصادفی روی خطوط کشت تشخیص‌داده‌شده توسط الگوریتم‌های مورد نظر و نقاط تصادفی تعیین‌شده بر روی مسیرهای کشت ایده‌آل، مقدار میانگین خطای تشخیص برای هر یک از روش‌های تبدیل هاف، گابور، تبدیل موجک، رگرسیون خطی و روش پیشنهادی به‌ترتیب برابر ۱۵/۸۱، ۱۳/۸۷، ۲۲/۷۰، ۱۵/۲۵ و ۳/۶۵ پیکسل به‌دست آمد.

جدول ۳- آزمون t-test میان نقاط مسیر اصلی تعیین‌شده توسط کاربر و نقاط مسیر تشخیص‌داده‌شده توسط روش‌های مختلف مسیریابی

Table 3- T-test between user-defined main path points and path points detected by different routing methods

روش Method		ردیف کشت ۱ Cultivation row 1	ردیف کشت ۲ Cultivation row 2	ردیف کشت ۳ Cultivation row 3	ردیف کشت ٤ Cultivation row 4	ردیف کشت ٥ Cultivation row 5	ردیف کشت ٦ Cultivation row 6
روش تبدیل هاف Hough transform	اختلاف میانگین میان نقاط (پیکسل) Average difference between points (px)	13.1130	11.8896	20.8077	13.0213	15.9088	17.4384
	P-Value	0.0006	0.0690 ns	0.0999 ns	0.0826 ns	0.0098	0.0040
روش گابور Gabor	اختلاف میانگین میان نقاط (پیکسل) Average difference between points (px)	9.0091	1.0462	21.4973	19.8719	15.9058	15.9225
	P-Value	0.0010	0.4791 ns	0.0757 ns	0.0001	0.0033	0.0117
روش تبدیل موجک Wavelet transform	اختلاف میانگین میان نقاط (پیکسل) Average difference between points (px)	17.2731	25.8967	61.8360	7.1204	6.3899	17.7279
	P-Value	4.6173×10^{-7}	1.3023×10^{-7}	0.0026	0.0640 ns	0.4860 ns	0.0001
روش رگرسیون خطی Linear regression	اختلاف میانگین میان نقاط (پیکسل) Average difference between points (px)	0.9583	5.7173	31.1075	8.1670	26.7409	18.8608
	P-Value	0.0272	0.0631 ns	0.0521 ns	0.0782 ns	1.8598×10^{-7}	0.0008
روش پیشنهادی The proposed method	اختلاف میانگین میان نقاط (پیکسل) Average difference between points (px)	2.3508	4.2471	5.7810	0.4366	3.7570	5.3786
	P-Value	0.1433 ns	0.1617 ns	0.2232 ns	0.4897 ns	0.0815 ns	0.1295 ns

ns: اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود ندارد.

ns: There is no significant difference at 5% level.

لازم به ذکر است که با اندازه‌گیری مدت زمان مورد نیاز جهت اجرای هر یک از الگوریتم‌های تشخیص ردیف کشت گیاه، این روش‌های مسیریابی از لحاظ سرعت اجرای عملیات نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۱۲). مطابق شکل ۱۲، الگوریتم پیشنهادی با ۲/۱۶۱ ثانیه دارای بیشترین سرعت اجرای عملیات بود و بعد از آن به‌ترتیب الگوریتم رگرسیون خطی، الگوریتم تبدیل موجک، الگوریتم تبدیل هاف و الگوریتم گابور به‌ترتیب با ۲/۶۶۷، ۶/۰۰۱، ۶/۵۱۷ و ۶/۸۰۵ ثانیه قرار داشتند.

بنابراین طبق نتایج مشاهده شده، روش پیشنهادی با بیشترین میزان انطباق نسبت به مسیر ایده‌آل و کمترین مدت زمان اجرای عملیات به عنوان مناسب‌ترین الگوریتم مسیریابی انتخاب شد. روش گابور با وجود سرعت کمتر در زمان اجرای عملیات از خطای کمتری (۱۳/۸۷ پیکسل) نسبت به دیگر الگوریتم‌ها برخوردار بود و پس از الگوریتم پیشنهادی در جایگاه دوم قرار گرفت. این در حالی است که روش رگرسیون خطی ضمن داشتن سرعتی نزدیک به روش پیشنهادی، به دلیل میزان خطای بیشتر نسبت به دو الگوریتم قبلی به‌عنوان سومین الگوریتم مسیریابی مناسب شناخته شد و پس از آن روش‌های تبدیل هاف و تبدیل موجک به ترتیب در جایگاه‌های چهارم و پنجم قرار گرفتند.

شکل ۱۲– نمودار تغییرات مدت زمان اجرای الگوریتم‌های مسیریابی مورد مطالعه

Fig.12. Diagram of the execution time for the studied routing algorithms

در تحقیقی که توسط بوسو و همکاران (Bossu *et al.*, 2009) انجام گردید، نشان داده شد که استفاده از تبدیل موجک برای تشخیص ردیف‌های کشت گیاهان، زمان‌های محاسبه نسبتاً زیادی را به همراه داشته است. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از یک الگوریتم تبدیل هاف بهبودیافته، مسیر یک ربات در بین محصولات گلخانه‌ای (گوجه‌فرنگی و خیار) تعیین گردید. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی، خط تشخیص‌داده‌شده نسبت به مسیر حرکت دارای حداکثر ۰/۵ درجه خطا بود و همچنین زمان پیمایش مسیر با استفاده از این الگوریتم ۴۵/۲۴ میلی‌ثانیه کوتاه‌تر از پیاده‌سازی روش رایج تبدیل هاف گزارش گردید (Chen *et al.*, 2020). در یک پژوهش، مینایی و همکاران (Minaei, Mahdavian, & Banakar, 2015) به طراحی و ارزیابی یک الگوریتم بینایی ماشین جهت یافتن مسیر پیشروی کمباین پرداختند. در این الگوریتم پس از اخذ تصویر و بهینه‌سازی‌های لازم به کمک تبدیل هاف، مسیر پیشروی به‌صورت یک خط از تصویر استخراج شد. در نهایت پس از ارزیابی‌های لازم مشخص گردید که این الگوریتم قادر به تشخیص مسیر پیشروی کمباین با دقت ۹۸٪ می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر نیز محققان به‌منظور تعیین مسیر مناسب حرکت یک تراکتور کشاورزی در بین خطوط کشت گیاهان از الگوریتم تبدیل هاف استفاده کردند. در این تحقیق، پس از اطمینان از مطابقت ردیف‌های کشت تشخیص‌داده‌شده نسبت به مکان واقعی آن‌ها، سیگنال‌های لازم جهت فرمان حرکت به چرخ‌ها ارسال گردید (Rovira-Mas *et al.*, 2005).

به‌طور کلی، همان‌طور که پیش از این اشاره شد در تحقیقاتی که تاکنون به‌منظور شناسایی ردیف‌های کشت گیاه انجام پذیرفته‌اند، از روش‌های کلاسیک مختلفی استفاده شده است. در مطالعه حاضر نیز، روش‌های رایج و پرکاربردی از جمله تبدیل هاف، تبدیل موجک، فیلتر گابور و رگرسیون خطی در این زمینه مورد بررسی قرار گرفتند. پس از مقایسه‌ی نتایج تحقیقات مشابه مشخص گردید که اگرچه تبدیل هاف قادر به تشخیص خطوط در جهات مختلف است اما الگوریتمی کند و زمان‌بری است و استفاده از آن باعث ایجاد محدودیت زمانی در سیستم‌های برخط می‌شود. به‌علاوه اگر بین ردیف‌های کشت علف هرزی وجود داشته باشد و یا در طول ردیف‌ها فضای خالی مشاهده شود، الگوریتم تبدیل هاف ممکن است خطوط اضافی غیر هدف را تشخیص دهد (Choi *et al.*, 2015). در روش رگرسیون خطی، مکان نقاط تعیین‌شده بر روی ردیف کشت گیاه در تشخیص صحیح خطوط کشت اهمیت بسیار دارد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده شد که وجود انحنا در ردیف‌های کشت به دلیل ایجاد انحراف در مکان قرارگیری نقاط نسبت به خط میانی ردیف کشت سبب می‌شود که کار تشخیص خطوط کشت توسط این الگوریتم با خطا همراه باشد. در روش تبدیل موجک با استفاده از توابع پایه موجک جزئیات موجود در بخش‌های مختلف تصویر در چندین جهت (جهت‌های قطری، عمودی و افقی) استخراج می‌شوند (Dutta *et al.*, 2016)، لذا این الگوریتم در تشخیص ردیف‌های کشت عریض‌تر (خطوط عمودی موجود در تصویر) نامناسب عمل کرده و براساس نتایج، مشاهده شد که خروجی آن از خط میانی ردیف کشت محصول در فاصله‌ای دورتر قرار گرفت. در مورد روش گابور، لازم به ذکر است که منحنی بودن ردیف‌های کشت محصول بر خروجی حاصل از فیلتر گابور نیز تأثیرگذار است، زیرا این فیلتر مبتنی بر تحلیل محتوای فرکانس خاص در تصویر در یک جهت خاص است (Bossu *et al.*, 2009).

بدین ترتیب با وجود نتایج مطالعات متعدد در این زمینه، در پژوهش حاضر به نحوی دیگر با ارائه‌ی یک الگوریتم جدید تحت

عنوان روش برازش نقاط مرکزی به کار تشخیص ردیف‌های کشت گیاه پرداخته شد. در این تحقیق، پس از مقایسه‌ی خروجی همه‌ی روش‌های موردمطالعه نسبت به مسیر ایده‌آل نشان داده شد که الگوریتم پیشنهادشده در این مطالعه، علاوه‌بر عملکرد مناسب در تشخیص خطوط کشت مستقیم قادر به شناسایی ردیف‌های کشت انحنادار به‌صورت مطلوب نیز می‌باشد. همچنین شایان ذکر است که این الگوریتم قادر به حذف خطوط ناقص کشت و به‌عبارتی دیگر تشخیص خطوط کامل کشت محصول از تصویر است.

ج) ارزیابی عملکرد مسیریابی ربات

در این بخش از تحقیق، عملکرد ربات طراحی‌شده با به‌کارگیری مناسب‌ترین الگوریتم مسیریابی (الگوریتم پیشنهادی) مورد بررسی قرار گرفته شد. بدین منظور از یک شاخص از پیش‌تعیین‌شده که نشان‌دهنده‌ی جهت‌گیری ربات نسبت به ردیف کشت گیاهان است، استفاده گردید. ضمن قرارگیری شاخص در یک موقعیت مشخص (فاصله ۸۰ سانتی‌متری و زاویه قرارگیری ۶۰ درجه نسبت به خط کشت)، میزان انحراف مسیر مستخرج از تصویر توسط الگوریتم مسیریابی پیشنهادی نسبت به شاخص محاسبه شد. سپس با توجه به موقعیت مکانی شاخص ربات، دستورات لازم به درایور موتور چرخ‌ها ارسال گردید. برای نشان دادن چگونگی قرارگیری شاخص ربات در جهت مسیر حاصل از روش پیشنهادی، نمودار تغییرات ولتاژ موتور چرخ‌ها بر حسب زمان به‌صورت نمونه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

A view of the designed robot in the plant culture environment

شکل ۱۳– تغییرات ولتاژ موتور **a**) چرخ سمت راست و **b**) چرخ سمت چپ در مدت زمان معین جهت همسو شدن شاخص ربات و خط تشخیص‌داده‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی

Fig.13. The motor voltage of the a) Right wheel, and b) Left wheel during the time required for the alignment of the robot index and the line detected by the proposed algorithm

برای حالتی از موقعیت مکانی ربات که شاخص در سمت راست مسیر تشخیص‌داده‌شده واقع بود، پس از محاسبه‌ی میزان انحراف شاخص نسبت به ردیف کشت، مطابق شکل ۱۳، هنگام حرکت ربات با پایین آمدن ولتاژ ورودی موتور سمت چپ از مقدار ۱۲ به حدود ۲ ولت، سرعت آن نسبت به موتور چرخ سمت راست (با ولتاژ ورودی تقریباً ثابت بین ۱۱/۹۰ تا ۱۲ ولت) کاهش یافت. با توجه به بر خط بودن سامانه و بررسی لحظه‌ای شاخص نسبت به خط کشت مستخرج از تصویر، به‌تدریج با گذشت زمان، ولتاژ ورودی موتور چرخ سمت چپ افزایش یافت تا لحظه‌ای (۵۱ ثانیه) که دیگر انحراف معنی‌داری مشاهده نشد. در این هنگام، سرعت حرکت هر دو چرخ ربات با اعمال ولتاژ ورودی برابر به موتورها یکسان گردید. لازم به ذکر است که برای حالتی که شاخص ربات در سمت چپ مسیر تشخیص‌داده‌شده قرار داشت، همه‌ی دستورات ارسالی از سوی میکروکنترلر مطابق حالت قبل بود، اما این بار ضمن ثابت بودن تقریبی سرعت حرکت چرخ سمت چپ، ولتاژ ورودی موتور چرخ سمت راست کاهش یافت و به‌تدریج تا زمان همسو شدن شاخص و مسیر خط کشت، یک روند افزایشی را طی نمود. گفتنی است که به‌منظور تعیین میزان ولتاژ ورودی موتورها براساس مقدار زاویه‌ی قرارگیری شاخص نسبت به مسیر حرکت مورد نظر، از یک منحنی کالیبراسیون استفاده گردید؛ این منحنی کالیبراسیون حاصل از به‌کارگیری یک روش آزمون و خطا بود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در حوزه کشاورزی دقیق، ارائه روش‌های قابل‌اطمینان و کاربردی برای شناسایی خطوط کشت گیاهان سبب کاهش هزینه‌های تولید، مقادیر علف‌کش‌ها و همچنین کاهش آسیب به اکوسیستم می‌شود. در این تحقیق، پس از مقایسه‌ی سه روش حذف علف هرز (۱- گشودگی مساحت، ۲- حذف ابعادی و ۳- ماسک‌گذاری)، روش ماسک‌گذاری به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای حذف علف‌های هرز میان خطوط کشت گیاه انتخاب شد. سپس به‌منظور تشخیص ردیف‌های کشت محصولات، مجموعه‌ای از تصاویر خطوط کشت با استفاده از تکنیک پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال پنج الگوریتم مختلف تبدیل هاف، رگرسیون خطی، فیلتر گابور، تبدیل موجک و همچنین روش پیشنهادشده در این مطالعه (روش برازش نقاط مرکزی)، به کار استخراج خطوط کشت گیاهان از تصاویر پرداخته شد. در ادامه، پس از اندازه‌گیری و مقایسه‌ی سرعت اجرای عملیات و میزان خطای هر یک از این الگوریتم‌ها مشخص گردید که به‌ترتیب روش‌های پیشنهادی، فیلتر گابور، رگرسیون خطی، تبدیل هاف و تبدیل موجک در زمینه‌ی مسیریابی نسبت به یکدیگر ارجحیت دارند. سرانجام نشان داده شد که ربات طراحی‌شده با به‌کارگیری روش برازش نقاط مرکزی (با میانگین خطای برابر ۳/۶۵ پیکسل) دارای عملکرد مطلوبی می‌باشد. به‌علاوه گفتنی است که مرطوب بودن سطح کشت گیاه و همچنین وجود موانع در مسیر حرکت ربات از جمله محدودیت‌هایی هستند که باعث ایجاد مشکل در حرکت چرخ‌های ربات طراحی‌شده گردیدند. لذا برای جلوگیری از بروز لغزش چرخ‌ها در حین حرکت و برخورد با موانع، پیش از حرکت ربات نیاز به آماده‌سازی سطح زمین است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس قدردانی می‌نمایند.

References

1. Astrand, B., & Baerveldt, A. J. (2005). A vision based row-following system for agricultural field machinery. *Mechatronics*, *15*, 251-269. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2004.05.005
2. Bossu, J., Gee, C., Jones, G., & Truchetet, F. (2009). Wavelet transform to discriminate between crop and weed in perspective agronomic images. *Computers and Electronics in Agriculture*, *65*, 133-143. https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.08.004
3. Chaki, J., & Parekh, R. (2012). Plant leaf recognition using Gabor filter. *International Journal of Computer Applications*, *56*(10). https://doi.org/10.5120/8927-3000
4. Chen, J., Qiang, H., Wu, J., Xu, G., Wang, Z., & Liu, X. (2020). Extracting the navigation path of a tomato-cucumber greenhouse robot based on a median point Hough transform. *Computers and Electronics in Agriculture*, *174*, 105472. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105472
5. Choi, K. H., Han, S. K., Han, S. H., Park, K. H., Kim, K. S., & Kim, S. (2015). Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, *113*, 266-274. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.02.014
6. Du, J. X., Wang, X. F., & Zhang, G. J. (2007). Leaf shape based plant species recognition. *Applied Mathematics and Computation*, *185*, 883-893. https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.07.072
7. Dutta, M. K., Sengar, N., Kamble, N., Banerjee, K., Minhas, N., & Sarkar, B. (2016). Image processing based technique for classification of fish quality after cypermethrine exposure. *LWT-Food Science and Technology*, *68*,

408-417. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.059
8. Elstone, L., How, K. Y., Brodie, S., Ghazali, M. Z., Heath, W. P., & Grieve, B. (2020). High speed crop and weed identification in lettuce fields for precision weeding. *Sensors*, *20*, 455. https://doi.org/10.3390/s20020455
9. Fontaine, V., & Crowe, T. (2006). Development of line-detection algorithms for local positioning in densely seeded crops. *Canadian Biosystems Engineering*, *48*, 7.
10. Garcia-Santillan, I. D., Montalvo, M., Guerrero, J. M., & Pajares, G. (2017). Automatic detection of curved and straight crop rows from images in maize fields. *Biosystems Engineering*, *156*, 61-79. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.013
11. Guerrero, J. M., Pajares, G., Montalvo, M., Romeo, J., & Guijarro, M. (2012). Support vector machines for crop/weeds identification in maize fields. *Expert Systems with Applications*, *39*, 11149-11155. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.040
12. Guerrero, J. M., Guijarro, M., Montalvo, M., Romeo, J., Emmi, L., Ribeiro, A., & Pajares, G. (2013). Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize fields. *Expert Systems with Applications*, *40*, 656-664. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.040
13. Hague, T., & Tillett, N. (2001). A bandpass filter-based approach to crop row location and tracking. *Mechatronics*, *11*, 1-12. https://doi.org/10.1016/S0957-4158(00)00003-9
14. Han, Y., Wang, Y., & Kang, F. (2012). *Navigation line detection based on support vector machine for automatic agriculture vehicle*. International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012), (IET): https://doi.org/10.1049/cp.2012.1237
15. Hemming, J., & Rath, T. (2001). PA-Precision agriculture: Computer-vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *78*, 233-243. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0639
16. Jiang, G., Wang, X., Wang, Z., & Liu, H. (2016). Wheat rows detection at the early growth stage based on Hough transform and vanishing point. *Computers and Electronics in Agriculture*, *123*, 211-223. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.002
17. Jones, G., Gee, C., & Truchetet, F. (2009). Modeling agronomic images for weed detection and comparison of crop/weed discrimination algorithm performance. *Precision Agriculture*, *10*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s11119-008-9086-9
18. Kanagasingham, S., Ekpanyapong, M., & Chaihan, R. (2020). Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot. *Precision Agriculture*, *21*, 831-855. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09697-z
19. Kataoka, T., Kaneko, T., Okamoto, H., & Hata, S. (2003). *Crop growth estimation system using machine vision*. Pages b1079-b1083 vol. 1072. Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003): IEEE. https://doi.org/10.1109/AIM.2003.1225492
20. Kiani, S., & A. Jafari. (2012). Crop detection and positioning in the field using discriminant analysis and neural networks based on shape features. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 755-765.
21. Kurmi, Y., Gangwar, S., Agrawal, D., Kumar, S., & Srivastava, H. S. (2021). Leaf image analysis-based crop diseases classification. *Signal, Image and Video Processing*, *15*, 589-597. https://doi.org/10.1007/s11760-020-01780-7
22. Leemans, V., & Destain, M. F. (2006). Application of the Hough transform for seed row localisation using machine vision. *Biosystems Engineering*, *94*, 325-336. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.03.014
23. Li, X., Lloyd, R., Ward, S., Cox, J., Coutts, S., & Fox, C. (2022). Robotic crop row tracking around weeds using cereal-specific features. *Computers and Electronics in Agriculture*, *197*, 106941.
24. Lin, S., Jiang, Y., Chen, X., Biswas, A., Li, S., Yuan, Z., Wang, H., & Qi, L. (2020). Automatic detection of plant rows for a transplanter in paddy field using faster r-cnn. *IEEE Access*, *8*, 147231-147240. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015891
25. Lopez-Granados, F. (2011). Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research*, *51*, 1-11. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00829.x
26. Mahmud, M. S. A., Abidin, M. S. Z., Mohamed, Z., Abd Rahman, M. K. I., & Iida, M. (2019). Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, *157*, 488-499. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.016
27. Masuda, R., Fujimoto, S., Iida, M., & Suguri, M. (2013). A Method to Detect the Occurrence of Rice Plant Lodging Using Wavelet Transform. *IFAC Proceedings Volumes*, *46*(18), 75-80. https://doi.org/10.3182/20130828-2-sf-3019.00048
28. Minaei, S., Mahdavian, A., & Banakar, A. (2015). Design and evaluation of a path detection algorithm in road images using Hough transform. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *46*, 85-93. (In Persian). https://doi.org/10.22059/IJBSE.2015.54340
29. Montalvo, M., Pajares, G., Guerrero, J. M., Romeo, J., Guijarro, M., Ribeiro, A., Ruz, J. J., & Cruz, J. (2012). Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure. *Expert Systems with Applications*, *39*,

11889-11897. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.117
30. Nikolov, D. N., & Tsankova, D. D. (2018). Features extraction for pollen recognition using Gabor filters. *Food Science and Applied Biotechnology, 1*, 86-95. https://doi.org/10.30721/fsab2018.v1.i2.11
31. Palacin, J., & Martinez, D. (2021). Improving the Angular Velocity Measured with a Low-Cost Magnetic Rotary Encoder Attached to a Brushed DC Motor by Compensating Magnet and Hall-Effect Sensor Misalignments. *Sensors, 21*, 4763. https://doi.org/10.3390/s21144763
32. Ponnambalam, V. R., Bakken, M., Moore, R. J., Glenn Omholt Gjevestad, J., & Johan From, P. (2020). Autonomous crop row guidance using adaptive multi-roi in strawberry fields. *Sensors, 20*, 5249. https://doi.org/10.3390/s20185249
33. Rapacz, M., & Lazarz, R. (2020). Automatic extraction of leaf venation complex networks. *ECAI, IOS Press*, 1914-1921. https://doi.org/10.3233/FAIA200309
34. Rovira-Mas, F., Zhang, Q., Reid, J., & Will, J. (2005). Hough-transform-based vision algorithm for crop row detection of an automated agricultural vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: *Journal of Automobile Engineering, 219*, 999-1010. https://doi.org/10.1243/095440705X34667
35. Slaughter, D. C., Giles, D., & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture, 61*, 63-78. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008
36. Søgaard, H. T., & Olsen, H. J. (2003). Determination of crop rows by image analysis without segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture, 38*, 141-158. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00140-0
37. Tenhunen, H., Pahikkala, T., Nevalainen, O., Teuhola, J., Mattila, H., & Tyystjärvi, E. (2019). Automatic detection of cereal rows by means of pattern recognition techniques. *Computers and Electronics in Agriculture, 162*, 677-688. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.002
38. Thakral, S., & Manhas, P. (2018). *Image processing by using different types of discrete wavelet transform*. International Conference on Advanced Informatics for Computing Research: Springer 499-507. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3140-4_45
39. Vidovic, I., Cupec, R., & Hocenski, Z. (2016). Crop row detection by global energy minimization. *Pattern Recognition, 55*, 68-86. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.01.013
40. Vijayashree, T., & Gopal, A. (2015). *Comparison procedure for the authentication of Basil (Ocimum tenuiflorum) leaf using image processing technique*. In 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP) 0075-0078. IEEE. https://doi.org/10.1109/iccsp.2015.7322591
41. Vioix, J., Douzals, J., & Truchetet, F. (2004). Aerial detection and localization of weed by using multispectral and spatial approaches. AgEng2004, European Society of Agricultural Engineers, Leuven, Belgium, September: 12-16.
42. Winterhalter, W., Fleckenstein, F. V., Dornhege, C., & Burgard, W. (2018). Crop row detection on tiny plants with the pattern hough transform. *IEEE Robotics and Automation Letters, 3*(4), 3394-3401. https://doi.org/10.1109/lra.2018.2852841
43. Zhmud, V., Kondratiev, N., Kuznetsov, K., Trubin, V., & Dimitrov, L. (2018). Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *Journal of Physics: Conference Series: IOP Publishing, 3*, 032189. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032189

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 477-491

A Multi-Objective Optimization to Determine The Optimal Patterns of Sustainable Agricultural Mechanization Using NSGA-II Algorithm

M. A. Hormozi[1], H. Zaki Dizaji[2*], H. Bahrami[2], N. Monjezi[3]

1- PhD Student in Agricultural Mechanization, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: hzakid@scu.ac.ir)

Received: 10 August 2022 Revised: 05 November 2022 Accepted: 09 November 2022 Available Online: 09 November 2022	**How to cite this article:** Hormozi, M. A., Zaki Dizaji, H., Bahrami, H., & Monjezi, N. (2023). A Multi-Objective Optimization to Determine The Optimal Patterns of Sustainable Agricultural Mechanization Using NSGA-II Algorithm. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 477-491. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.78147.1118

Introduction

The development of mechanization and machine technology can have positive and negative effects on the economic, social, and environmental conditions of a region. Conflicts in these areas complicate the selection and optimization of sustainable mechanization systems. One of the basic questions in the selection of a sustainable agricultural mechanization system is how and with what methodology would it be possible to propose the closest mechanization model that will overcome the simultaneous contradictions between the three pillars of sustainability; taking into account the natural and technical limitations in agricultural production. What is the appropriate approach considering the economic, environmental, and social aspects? The current research aims to provide a framework for an optimal mechanization model to achieve the goals of agricultural sustainability so that it can be implemented and applied practically. It is possible to provide a model that addresses the conflicting economic, social, and environmental aspects by quantitatively optimizing the level of mechanization.

Materials and Methods

In this study, a framework is applied whereby contradictory goals of agricultural sustainability can be achieved simultaneously. After selecting the indices and data collection, by combining Shannon entropy and TOPSIS, the similarity index was obtained for each objective. The similarity indices and values of the Benefit-Cost Ratio calculated for each system were considered as coefficients of three objective (economic, social, and environmental) functions in multi-objective optimization. The multi-objective optimization model was applied to achieve sustainable mechanization patterns and was solved using the NSGA-II algorithm. For framework validation, paddy production mechanization systems in the Ramhormoz region located in southwestern Iran were analyzed with constraints: land, water, and machinery. The five mechanization systems of paddy production included puddled transplanted, un-puddled transplanted, water seeded, dry seeded, and, no-till.

Results and Discussion

Pareto-optimal solutions of different scenarios with water and machine constraints showed that this framework cannot only meet the sustainable goals, but also the optimal allocation of mechanization systems is identified and the effect of different scenarios under different constraints can be examined. The sustainability goals between the no-tillage and planting with puddling systems are highly contradictory. The no-tillage system has the highest score in the environmental aspect and the lowest score in the social and economic aspects. This modern system was developed in Ramhormoz three years ago and has faced technical, economic, and social

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2022.78147.1118

challenges ever since. The cultivated area using this system was 43 hectares in 2019. Despite the speed and ease of planting with this system, and its direct environmental benefits, the possibility of fungal outbreaks is raised due to the presence of wheat residues from previous cultivation and the warm and humid environment of cultivation. Additionally, weed outbreaks caused by periodic irrigation have greatly affected the satisfaction and profitability of this system, leading to the highest amount of pesticides consumed among the studied systems. The results of multi-objective optimization of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz city showed that the total surface area of optimal point systems is in the range of 2700 to 3200 hectares, which is close to the area under rice cultivation in Ramhormoz (3310 hectares) and it indicates that the output of the model is according to the applied restrictions and close to reality. The limitation of machinery and water has made the two planting systems of un-puddled transplanting and dry-seeding better than other systems. Removing only the machinery restriction can lead to an increase in the area under rice cultivation by about 700 hectares. This means that the requirement for the development of sustainable rice cultivation in Ramhormoz is to strengthen and support modern mechanized systems of no-tillage, dry-seeding, and planting with puddling, with a focus on systems with less water consumption which are the systems with higher levels of mechanization. Without water limitation, if the model is subject to the current machinery limitations, the optimal mechanization systems are the more traditional ones such as transplanting without puddling and wet-seeding.

Conclusion

One of the most fundamental challenges in the development of mechanization is identifying systems that can best balance the economic, social, and environmental aspects of sustainability and minimize environmental damage whilst maximizing economic and social benefits. Using the framework for sustainable mechanization will not only accomplish sustainable goals in identifying the optimum agricultural mechanization level, but it will also allow researchers and implementers in the agricultural sector to examine the outcome of various scenarios under different constraints. This framework can be used to find the optimal model for mechanization of all stages of tillage, planting, harvesting, and post-harvest in diverse geographical areas.

Keywords: Agricultural mechanization, Multi-objective optimization, Optimal pattern, Sustainability

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

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٤٩١-٤٧٧

بهینه‌سازی چندهدفه جهت تعیین الگوهای بهینه‌ی عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک با استفاده از الگوریتم NSGA-II

محمد علی هرمزی[۱]، حسن ذکی دیزجی[۲*]، هوشنگ بهرامی[۲]، نسیم منجزی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

چکیده

توسعه مکانیزاسیون و فناوری ماشینی پیامدهای مثبت و نامطلوب بسیاری را با توجه به شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هر منطقه در پی خواهد داشت. تعارضات به‌وجود آمده در این ابعاد، انتخاب و سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار را بحث‌برانگیز و مشکل می‌کند. هدف از این مطالعه، مدل‌سازی چندهدفه جهت تعیین الگوهای بهینه عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک و ارائه چارچوبی جهت تخصیص مکانیزاسیون به اهداف متناقض پایداری کشاورزی است. بر این اساس، پس از انتخاب شاخص‌ها و جمع‌آوری داده، با ترکیب روش‌های وزن‌دهی آنتروپی شانون و TOPSIS، شاخص شباهت برای ابعاد چند شاخصه محاسبه شد و این شاخص شباهت به همراه مقادیر شاخص‌ها به‌عنوان ضرایب توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شد. مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از الگوریتم NSGA-II ارائه شد. جهت اعتبارسنجی این چارچوب، پنج سیستم مکانیزاسیون (خاک‌ورزی و کاشت) در تولید شلتوک شهرستان رامهرمز با محدودیت‌های زمین، آب و ماشین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در صورت عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ بهینه هستند و در شرایط خشک‌سالی و محدودیت شدید آب سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری، بی‌خاک‌ورزی (با عملکرد مطلوب) و نشاکاری با پدلینگ به‌عنوان سیستم‌های بهینه پایدار خواهند بود. جواب‌های بهینه پارتو تحت سناریوهای مختلف در محدودیت‌های آب و ماشین نشان داد با به‌کارگیری این چارچوب، نه‌تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف نیز وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه، پایداری، مکانیزاسیون کشاورزی

مقدمه

مکانیزاسیون تمام سطوح فناوری‌های تولید و فرآوری از ابزاردستی ساده تا تجهیزات موتوری و پیچیده را شامل می‌شود که باعث کاهش سختی کار، برطرف شدن مشکل کمبود کارگر، بهبود بهره‌وری و انجام به‌موقع عملیات کشاورزی، بهبود استفاده مؤثر از منابع، دسترسی بهتر به بازار و مشارکت در کاهش خطرات تغییر اقلیم می‌گردد. مکانیزاسیون پایدار هنگام مشارکت در توسعه پایدار بخش غذا و کشاورزی، جنبه‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فرهنگی را در نظر می‌گیرد (FAO, 2022).

بدین‌منظور در قالب چارچوب توسعه پایدار، در تحلیل مکانیزاسیون کشاورزی سه جنبه باید دیده شود. جنبه اقتصادی که به افزایش عملکرد، ارزش‌افزوده و درآمد بالاتر اشاره دارد. جنبه اجتماعی که می‌بایست مکانیزاسیون در بستر اجتماعی دیده شود و به منافعی مانند کاهش سختی کار و افزایش زمان فراغت و اشتغال توجه کند. جنبه زیست‌محیطی که به نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند تخریب منابع طبیعی رسیدگی می‌کند (Sims, Hilmi, & Kienzle, 2016;

۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hzakid@scu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.78147.1118

(Mishra & Satapathy, 2022). برای توسعه پایدار و پایداری تولید محصول، می‌بایست مفهوم پایداری در مکانیزاسیون را تبیین کرد. مکانیزاسیون کشاورزی پایدار را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: مکانیزاسیونی که از نظر اقتصادی ممکن[1]، از نظر زیست‌محیطی حساس[2] و از نظر اجتماعی مقبول[3] باشد (Sims & Kienzle, 2016).

در اصول اولیه انتخاب سیستم‌های مکانیزه کشاورزی روابط، روش‌ها و مدل‌های بسیاری ارائه شده است که عمده تمرکز مطالعات انجام‌گرفته بر تحلیل فنی و اقتصادی بوده است. در این زمینه، می‌توان در انتخاب تراکتور و توان مورد نیاز و در انتخاب تجهیزات مناسب براساس توان در دسترس تراکتور یا زمان مورد نیاز اشاره کرد (Bochtis, Sørensen, & Busato, 2014; Bochtis, Sørensen, & Kateris, 2019). سوپیا و اکوازیچ (Cupiał & Kowalczyk, 2020) نیز جهت کمینه‌سازی[4] هزینه‌ها و بهترین ترکیب ماشین‌ها در مزرعه یک پلتفرم را طراحی کردند.

در برخی پژوهش‌ها از برنامه‌ریزی ریاضی[5] و تحلیل سلسله‌مراتبی[6] برای انتخاب و مدیریت ماشین‌ها استفاده شده است که در آن‌ها گاهی عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در نظر گرفته شده است. با این‌وجود، در زمینه کاربرد مکانیزاسیون حداقل یک بعد از ابعاد پایداری مغفول مانده است. کمرانا و همکاران (Camarena, *et al.*, 2004) برای کمینه‌سازی هزینه سالیانه مکانیزاسیون مدلی را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی[7] برای سیستم‌های مزارع چند کشتی ارائه کردند؛ که براساس آن اندازه ماشین‌ها محاسبه گردید. در پژوهشی برای تعیین دیدگاه‌های مهم در انتخاب تراکتورهای کشاورزی یک تکنیک ترکیبی از AHP و TOPSIS[8] ارائه شد (García-Alcaraz *et al.* 2016). کشوری و مرزبان (Keshvari & Marzban, 2019) نیز توان تراکتوری موردنیاز شهرستان‌های استان خوزستان را در زمان اوج عملیات کشاورزی با استفاده از روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی فازی محاسبه نمودند. ژو و همکاران (Zhou *et al.* 2011) به دنبال بهینه‌سازی انتخاب ماشین‌های کشاورزی بوده‌اند و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و فازی روشی برای پیدا کردن بهترین ماشین از منظر زیست‌محیطی ارائه کردند. کوریتز (Koritz 2014) با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و ارزیابی چرخه حیات[9] ماشین‌های کشاورزی با کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی بهترین گزینه‌های ماشین‌ها را به‌دست آورد. امامی و همکاران (Emami *et al.* 2018) جهت اولویت‌بندی سیاست‌گذاری توسعه مکانیزاسیون کشاورزی با توجه به امنیت غذایی در ایران از تحلیل SWOT به کمک روش‌های TOPSIS و AHP استفاده کردند.

برخی تحقیقات به ارزیابی پایداری در طراحی و ساخت ماشین‌های کشاورزی پرداخته‌اند. در پژوهشی رهیافت‌های طراحی پایداری محور[10] مورد آزمایش قرار گرفت و طی فرآیند طراحی، توسعه، ساخت، فروش، کاربرد، تعمیر و نگهداری و اسقاط کردن هر سه بعد پایداری به‌طور یکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفت (Banerjee & Punekar, 2020). بزروک و همکاران (Bezruk, *et al.*, 2014) ارزیابی پایداری با استفاده از نظرات کشاورزان در مراحل طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری ماشین‌های کشاورزی و کورتی و همکاران (Corti *et al.*, 2013) مدل‌های تجاری را برای سازندگان ماشین‌های کشاورزی برای بهبود پایداری مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین کثرن هاردی (Gathorne-Hardy, 2016) یک ارزیابی پایداری مقایسه‌ای سیستم‌های تراکتوری و حیوانی را انجام دادند. رومانلی و میلان (Romanelli & Milan, 2012) کاربرد و مدیریت ماشین‌های کشاورزی را با استفاده از جریان مواد مورد ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی قرار داده است.

با این‌حال، تعداد مطالعاتی که از شناسایی اثرات مخرب مکانیزاسیون کشاورزی و خدمات اکوسیستم[11] مربوط به آن بر روی پایداری زیست‌محیطی و اجتماعی- اقتصادی صورت‌پذیرفته بسیار کم هستند (Banerjee & Punekar, 2020; Kiani *et al.*, 2022). این در حالی است که پیوندهایی بین شیوه‌های مکانیزه و پایداری کشاورزی، به‌ویژه در رابطه با عملکرد زیست‌محیطی وجود دارد. لیوا و موریس (Leiva & Morris, 2001) با ارائه ۹ مجموعه شاخص شامل: انرژی، آلودگی هوا، فشردگی خاک، آبشویی نیترات، آبشویی آفت‌کش، مواد آلی خاک، ایمنی و سلامت در مزرعه، اشتغال و عملکرد مالی، این ارتباطات را نشان داده‌اند. این پژوهشگران اعلام کرده‌اند که گرچه امکان شناسایی میزان شاخص‌های مرتبط با مکانیزاسیون وجود دارد اما تعریف مقادیر بحرانی برای این شاخص‌ها به‌منظور تعیین این‌که آیا شیوه‌های مکانیزه، کاملاً پایدار هستند، امکان‌پذیر نیست.

از این‌رو یکی از سؤالات اساسی در انتخاب مکانیزاسیون کشاورزی پایدار این است که چگونه می‌توان با توجه به

1- Feasible
2- Sensitive
3- Acceptable
4- Minimization
5- Mathematical Programing
6- Analytical Hierarchy Analysis
7- Linear Programing
8- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

9- Life cycle assessment
10- Sustarnobity– orienthing design
11- Service ecosystem

محدودیت‌های طبیعی و فنی، نزدیک‌ترین الگوی[1] مکانیزاسیون به اهداف پایداری را پیشنهاد داده و به تناقضات هم‌زمان سه بعد – اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی– پایداری رسیدگی کرد؟

پژوهش حاضر درصدد است چارچوبی را ارائه دهد که بتوان در قالب آن به الگوی مکانیزاسیون بهینه جهت دستیابی به اهداف پایداری کشاورزی دست یافت به‌طوری‌که به شکل عملی قابل‌اجرا و کاربرد باشد و بتوان مدلی را ارائه داد که سطوح بهینه سیستم‌های مکانیزه را ارائه نماید. برای اعتبارسنجی این چارچوب نیز مطالعه موردی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی–کاشت) در منطقه رامهرمز صورت می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

چارچوب کلی اجرای مطالعه

جهت رسیدگی به مسئله مکانیزاسیون کشاورزی پایدار و حل آن با در نظر گرفتن تعارضات و تناقضات هم‌زمان ابعاد پایداری چارچوبی ارائه می‌گردد که به‌وسیله داده‌هایی که بر مبنای سیستم‌های تولید برنج (خاک‌ورزی و کاشت) برداشت شده است به حل آن می‌پردازد.

سطوح بهینه سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک در منطقه رامهرمز در استان خوزستان طبق چارچوب کلی نشان داده شده در شکل ۱ با ترکیب روش‌های آنتروپی شانون، TOPSIS و الگوریتم NSGA-II انجام شده است. بر این اساس، شاخص‌های منتخب در هر بعد با استفاده از روش آنتروپی شانون وزن‌دهی می‌شوند. با استفاده از روش TOPSIS، شاخص شباهت برای سیستم‌های مکانیزاسیون و به همراه مقادیر به‌دست‌آمده برای ابعاد تک شاخصه به‌عنوان ضرایب تابع هدف در مدل در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی چندهدفه اقتصادی–اجتماعی–زیست‌محیطی ارائه و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی، سطوح عملیات هر سیستم را که بهترین شرایط ابعاد سه‌گانه پایداری را داشته باشند نشان می‌دهند.

منطقه موردمطالعه

داده‌برداری، از سطح شهرستان رامهرمز در شرق استان خوزستان با ارتفاع از سطح دریا ۱۶۰ متر صورت گرفت. آب‌وهوای رامهرمز گرم بوده و رودخانه اعلاء از رامهرمز می‌گذرد. براساس گزارش شفاهی کارشناسان جهادکشاورزی شهرستان رامهرمز، در سال زراعی ۹۹ سطح زیر کشت تابستانه ۵۶۴۲ هکتار بوده است به‌طوری‌که سطح زیر کشت برنج ۳۳۱۰ هکتار بوده است.

سیستم‌های مکانیزاسیون تولید شلتوک شهرستان رامهرمز منتج از ترکیب روش‌های متنوعی است که در مدیریت بقایا در مراحل خاک‌ورزی، کاشت و آبیاری به‌کار می‌روند. در سیستم «نشاکاری بدون پدلینگ» زمین اصلی قبل از نشاکاری دستی، خاک‌ورزی و مرزبندی شده و پس از غرقاب شدن کرت‌ها، مرزها توسط کارگرها محکم و سطح کرت‌ها صاف می‌شود. در مقابل، سیستم «نشاکاری با پدلینگ»، تولید نشاکاری یک تغییر مهم در تهیه زمین با به‌کارگیری پادلر[2] در شهرستان رامهرمز رخ داده است. خاک‌ورزی در سیستم «آب‌کاری» مشابه نشاکاری بدون پدلینگ است، اما روش کاشت آن به‌صورت مستقیم و با بذرپاشی دستی صورت می‌گیرد. در سیستم «خشکه‌کاری»، بذور خشک در بستر خشک، به شکل مستقیم و مکانیزه به‌وسیله خطی‌کار کاشته می‌شوند. آبیاری به‌صورت تناوبی انجام می‌شود. جدیدترین سیستم در منطقه، «بی‌خاک‌ورزی» است که مشابه خشکه‌کاری است. در این سیستم، بذور توسط کارنده ویژه بی‌خاکورزی در بستر خشک خاک در بین بقایای محصول قبل (غالباً گندم) کاشت می‌شود (Hormozi *et al.*, 2012; Hormozi, *et al.*, 2016).

جمع‌آوری و اندازه‌گیری شاخص‌ها

بررسی وضعیت برنج‌کاری و جمع‌آوری داده‌های آماری کشت برنج و وضعیت تأمین آب کشاورزی با مراجعه به اداره امور آب شمال‌شرق و اداره جهادکشاورزی شهرستان رامهرمز جمع‌آوری شدند. تکمیل پرسشنامه‌ها از طریق جلسات حضوری و تلفنی با کشاورزان و ماشین‌داران انجام شد که به‌ترتیب ۱۱۷ و ۲۴ پرسشنامه مربوطه تکمیل شد. جهت ارزیابی قابلیت اعتماد پرسشنامه در این تحقیق از آزمون آلفای کرونباخ[3] استفاده شد که مقدار آن ۰/۷۳ به‌دست آمد.

شاخص‌های مورد بررسی

در تحلیل بعد اقتصادی، یکی از شاخص‌های مهم نسبت فایده به هزینه[4] است که از تقسیم ارزش فعلی فواید به ارزش فعلی هزینه‌ها حاصل می‌شود (Lotfalipour *et al.*, 2007). در بهینه‌سازی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک به دنبال حداکثرسازی این نسبت هستیم.

دو شاخص کمی نیروی انسانی به‌کاررفته در بخش ماشینی و غیر ماشینی و سه شاخص کیفی رضایت، سهولت کار و سلامتی و ایمنی

۱– الگو به‌معنای آرایش و روش انجام کار است که در مقاله بررسی توسعه مکانیزاسیون کشاورزی در کشورهای مختلف دنیا، تعریف آن با شکل انتخاب و توزیع منابع توان کشاورزی و سیستم‌های مکانیزه نشان داده شده است (Kienzle, Ashburner, & Sims 2013).

2- Puddler

3- Cronbach's alpha

4- Benefit- Cost Ratio

به‌عنوان شاخص‌های اجتماعی منظور شدند.

شکل ۱- چارچوب مکانیزاسیون پایدار بهینه تولید برنج در منطقه رامهرمز

Fig.1. Optimal sustainable mechanization framework for rice production in Ramhormoz region, Iran

مقادیر این شاخص‌ها، با استفاده از تکمیل پرسشنامه کشاورزان با نمره‌دهی ۱ تا ۱۰ جمع‌آوری شد و میانگین آن منظور گردید.

برای انتخاب شاخص‌ها در بعد زیست‌محیطی، شش شاخص در مدل قرار داده شدند.

* مقدار مصرف سوخت دیزل: یکی از شاخص‌های منفی کاربرد سیستم‌های مکانیزاسیون است که به‌صورت لیتر در هکتار از روش (Fleming, 2003; Askin & Askin, 2012) و با تصحیح بر گزارش مرکز توسعه مکانیزاسیون کشاورزی (Safari *et al.*, 2014; Rostami *et al.*, 2018) و درخصوص میانگین مصرف سوخت ماشین‌های کشاورزی محاسبه شد.

* مقدار مصرف سموم: با توجه به تفاوت سیستم‌های کشت و بالطبع آن مدیریت آفات، مقدار مصرف سموم شیمیایی متغیر بوده است. این شاخص به‌صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

* مقدار مصرف کود ازته: مقدار مصرف کود ازته نیز به علت تفاوت در مدیریت و نگهداری بقایای کشت قبل از برنج تفاوت داشته. این شاخص به‌صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

* ضریب انتشار گاز متان[1]: پتانسیل گرمایش جهانی[2] (GWP) در تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک با انتخاب سیستم تولید دچار تغییر می‌شود. این انتشار، تأثیر زیادی بر پتانسیل گرمایش جهانی می‌گذارد (Hang *et al.*, 2014). انتشار متان به دو عامل کربن در دسترس خاک و وضعیت رطوبت خاک بستگی دارد و ازآن‌جایی‌که تفاوت بین سیستم‌های تولید شلتوک در این دو عامل است لذا ضریب انتشار این گاز براساس فراتحلیل (Sanchis *et al.*, 2012) انجام شد. این شاخص به‌صورت کیلوگرم متان در هکتار در سال محاسبه شد.

* ضریب انتشار ناشی از سوزاندن بقایا: در منطقه رامهرمز، سوزاندن بقایای کشت قبل (غالباً گندم) و کاه برنج ریخته شده از پشت کمباین همچنان مرسوم است. ضریب انتشار معادل سمی[3] (TEQ) به مقدار ۵/۰ نانوگرم برای هر کیلو بقایای سوخته، محاسبه و در این مطالعه استفاده شده است(Gullett & Touati, 2003).

* شدت بار مزرعه[4]: به‌عنوان شاخصی برای فشردگی خاک به‌کار رفته است (Leiva & Morris, 2001). این شاخص براساس وزن ماشین‌ها و مدت‌زمان عملیات زراعی به‌صورت تن ساعت بر هکتار محاسبه و در ماتریس تصمیم‌گیری قرار داده شد.

وزن‌دهی و رتبه‌بندی

برای وزن‌دهی شاخص‌ها از روش آنتروپی شانون[5] استفاده شد. روش آنتروپی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن معیارها می‌باشد. این روش نیازمند به ماتریس معیار-گزینه است. مفهوم این روش در سال ۱۹۴۸ توسط شانون ارائه شد (Shannon, 1948). آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (Lu *et al.*, 2022).

رتبه‌بندی شاخص‌ها و محاسبه شاخص شباهت برای هر سیستم به کمک روش TOPSIS انجام می‌شود Sen & Yang (2012). با استفاده از وزن هر شاخص که در مرحله قبلی محاسبه شد به‌دست می‌آید. منطق زیربنایی این روش، راه‌حل ایده‌آل (مثبت) و راه‌حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی دارد (Thakkar, 2021). شاخص شباهت[6] هر سیستم مکانیزاسیون محاسبه و به‌عنوان ضریب تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

مدل بهینه‌سازی چندهدفه

در فرآیند بهینه‌سازی، هدف یافتن بهترین جواب از میان چند جواب ممکن برای مسئله است. لذا نیاز است که معیاری برای ارزیابی هر جواب در دسترس باشد. این معیار همان تابع هدف مسئله می‌باشد. متغیرهای تصمیم‌گیری مجموعه پارامترهای ورودی به یک سیستم هستند که با تغییر آن‌ها می‌توان عملکرد آن سیستم را کنترل کرد. کلیه مسائل بهینه‌سازی با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند که ناشی از عوامل مختلفی می‌باشند و قیود مسئله محسوب می‌شوند. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به شکل کلی زیر تعریف نمود:

$$\begin{aligned} & Maximize|Minimize \ \ (max|min) \\ & f_m(x) \qquad \forall m \in M \\ & Subject\ to\ (s.t.): \\ & g_i(X) \geq 0 \qquad \forall j \in J \\ & h_k(X) = 0 \qquad \forall k \in K \\ & x_i \in X \qquad \forall i \in n \end{aligned} \tag{۱}$$

که در آن $x \in R^n$ بردار شامل n متغیر تصمیم‌گیری برای مسئله موردنظر می‌باشد. پاسخ‌هایی که کلیه قیود مسئله را ارضا نمایند فضای تصمیم امکان‌پذیر مسئله $S \subset R^n$ را تشکیل می‌دهند.

در مطالعه حاضر مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[7] (NSGA-II) ارائه شد (Deb *et al.*,2002). توابع هدف تحت مدل NSGA-II در نرم‌افزار

1- Emission Factors for methane
2- Global warming potential
3- toxic equivalence emission factor
4- Field load intensity
5- Shannon's Entropy
6- Similarity index
7- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

MATLAB (R2019b) برنامه‌نویسی‌شده و بهینه‌سازی چندهدفه انجام گرفت. خروجی آن بهینه پارتو سطوح الگوهای مکانیزاسیون هستند که از منظر پایداری و توابع هدف تعریف‌شده برتری نسبت به هم ندارند. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به‌جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را ارائه می‌دهد که با نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. این الگوریتم یک روش کارآمد به‌منظور حل مسائل با چند تابع هدف است (Mishra *et al.*,2022). ولی به‌منظور انتخاب ذره‌های غالب و پیچیدگی محاسباتی، دارای ضعف‌هایی است. به همین منظور، نسخه دوم الگوریتم NSGA با نام NSGA-II در سال ۲۰۰۰ معرفی شد (Deb *et al.*, 2002). گام‌های این الگوریتم به‌طورکلی عبارتند از: ۱. تولید جمعیت اولیه بر مبنای مقیاس و قیود مسئله؛ ۲. ارزیابی جمعیت تولیدشده باتوجه به توابع هدف؛ ۳. اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب؛ ۴. محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله ازدحامی؛ ۵. انتخاب جمعیت والدین برای تولیدمثل؛ ۶. انجام عملگر تقاطع و جهش. لازم به ذکر است که جهت پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ کروموزم درنظر گرفته شده است. جمعیت شرکت‌کننده در تقاطع[1] برابر ۰/۸ جمعیت اولیه، نرخ جهش[2] ۰/۲ تعیین شده است.

نتایج و بحث

نتایج جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و همچنین وزن‌دهی به شاخص‌های اجتماعی و زیست‌محیطی با روش آنتروپی شانون برای هر بعد به‌صورت دو ماتریس جداگانه در جدول ۱ نمایش داده شده است.

تناقضات اهداف پایداری در سیستم بی‌خاک‌ورزی و نشاکاری با پدلینگ به‌شدت نمایان است. سیستم بی‌خاک‌ورزی با بالاترین امتیاز بعد زیست‌محیطی، پایین‌ترین امتیاز بعد اجتماعی و اقتصادی را دارد. این سیستم مدرن که سه سال است در رامهرمز توسعه پیدا کرده است با چالش‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی روبه‌رو شده است. سطح زیر کشت این سیستم در سال ۱۳۹۹، ۴۳ هکتار بوده است. این سیستم باوجود سرعت و سهولت کاشت و مزایای زیست‌محیطی مستقیم آن، به علت حضور بقایای گندم کشت قبل و محیط گرم و مرطوب کشت، احتمال توسعه قارچ بالا رفته، همچنین به‌علت آبیاری تناوبی، طغیان علف‌های هرز رضایت و سوددهی این سیستم را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. این نکته باعث تضعیف شاخص‌های زیست‌محیطی نیز شده است به‌طوری‌که بیشترین مصرف سموم در این سیستم ثبت شده است (جدول ۱).

بیشترین وزن محاسبه‌شده شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون در جدول ۱ در بین شاخص‌های اجتماعی مربوط به اشتغال ماشینی با مقدار ۰/۶۳۳ است و بعد از آن نیروی انسانی با ۰/۱۵۸ بیشترین مقدار را نشان داده است. این اوزان اهمیت نیروی انسانی به‌کار رفته را در بین شاخص‌های اجتماعی نشان می‌دهد.

در بین شاخص‌های زیست‌محیطی، شدت بار مزرعه و مصرف سوخت بالاترین اوزان به‌ترتیب ۰/۲۷۲ و ۰/۲۶۴ را نشان دادند که به‌طور مستقیم ناشی از کاربرد نهاده ماشین در مزرعه بوده است.

همان‌طور که در جدول ۱ قابل‌مشاهده است نسبت سود به هزینه سیستم بی‌خاک‌ورزی کمتر از ۱ است و حتی اصولاً یک سیستم غیراقتصادی به‌شمار می‌رود. بنابراین با توجه به حساسیت‌های فنی این سیستم توسعه آن نیازمند مشاوره و حمایت فنی دقیق است.

رتبه‌بندی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج در شهرستان رامهرمز انجام شد. نتایج شاخص شباهت برای هر سیستم در دو بعد اجتماعی و زیست‌محیطی به همراه نسبت فایده به هزینه در جدول ۲ قرار داده شده است. در سیستم‌های خشکه‌کاری و آب‌کاری کاشت به شکل مستقیم انجام می‌شود، اما روش کاشت و آبیاری متفاوتی دارند. این دو سیستم بهترین رتبه اقتصادی را نسبت به سایر سیستم‌ها دارند (جدول ۲). مجموع سطح زیر کشت این سیستم‌ها در سال ۹۹ در رامهرمز، ۴۰۱ هکتار گزارش شده است.

در سیستم خشکه‌کاری کاشت به‌صورت مکانیزه به‌وسیله خطی‌کار صورت می‌گیرد و آبیاری به‌صورت تناوبی انجام می‌شود و نسبت به سایر سیستم‌ها کمترین مصرف آب را در حدود ۲۰/۳ هزار مترمکعب دارد (Hormozi *et al.*, 2016). بزرگ‌ترین چالش این سیستم کنترل علف‌های هرز است که باعث شده مصرف سموم کشاورزی افزایش یابد. در مقابل، به‌علت مصرف کم آب، مکانیزه بودن عملیات کاشت و بازدهی مطلوب توانسته مورد توجه کشاورزان قرار گیرد. در نقطه مقابل آن، سیستم آب‌کاری به علت این‌که از ابتدای کاشت زمین به‌صورت دائم غرقاب است، بالاترین مصرف آب را در حدود ۳۷ هزار مترمکعب در هکتار دارد. عملکرد مطلوب، رضایت و سهولت انجام این سیستم قابل‌توجه است و نیاز به نیروی کارگری کمی دارد. کاهش هزینه‌های کارگری و ماشینی باعث شده این سیستم بالاترین نسبت سود به هزینه را بین سایر سیستم‌ها داشته باشد (جدول ۲).

سیستم‌های نشاکاری بیشترین سطح زیر کشت برنج را در منطقه با ۲۸۶۶ هکتار در سال ۱۳۹۹ دارا هستند. سیستم نشاکاری بدون پدلینگ مرسوم‌ترین سیستم تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج در منطقه است.

1- Crossover
2- Mutation

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های پایداری و وزن محاسبه‌شده شاخص‌ها در آنتروپی شانون

Table 1- Values of stability indices and the calculated weight of the indices in Shannon entropy

بعد پایداری Sustainability	اقتصادی Economical	زیست‌محیطی Environmental						اجتماعی Social			
سیستم کاشت Planting system	سود به هزینه Benefit-Cost Ratio	شدت بار مزرعه Farm load intensity (tonne h.ha^{-1})	انتشار معادل سمی Toxic Equivalence emission Factor (10^{-9} g)	انتشار متان Emission Factors for methane (kg CH_4 ha^{-1}year^{-1})	مقدار سموم Pesticide consumption (kg.ha^{-1})	مقدار ازت Nitrogen fertilizer (kg.ha^{-1})	سوخت Fuel (L ha^{-1})	اشتغال ماشینی (نفر ساعت در هکتار) Workers in mechanization (man-h.ha^{-1})	نیروی کارگری کل (نفر روز در هکتار) Total labor (man-day.ha^{-1})	سلامتی و ایمنی (بدون واحد) Health & Safety (dimensionless)	سهولت کار Convenience	رضایت Satisfaction
نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling	2.170	24.31	900	160	1.29	97	47.2	5.9	67.5	8	5.5	8.4
نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling	1.935	42.96	900	160	1.26	95	87.2	10.9	55	7.2	6.1	9
خشکه‌کاری Dry-seeding	2.292	30.76	900	82.9	2.28	102	59.2	7.4	43.4	8.1	7.5	8.2
آب‌کاری Wet-seeding	2.807	24.31	900	160	1.52	100	47.2	5.9	36	9.6	8	9.5
بی‌خاک‌ورزی No-tillage	0.714	11.625	400	145.3	2.96	128	25	2.5	48	8.3	8.4	5.8
وزن شاخص Index weight	-	0.272	0.133	0.091	0.217	0.023	0.264	0.633	0.158	0.031	0.088	0.090

جدول ۲- امتیاز رتبه‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون برنج رامهرمز

Table 2- Ramhormoz rice mechanization systems rating score

بعد پایداری Sustainability		اقتصادی Economical	زیست‌محیطی Environmental	اجتماعی Social
سیستم کاشت Planting system	متغیر سیستم System variable	سود به هزینه Benefit-Cost Ratio	شاخص شباهت Similarity index	شاخص شباهت Similarity index
نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling	A1	2.170	0.631	0.416
نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling	A2	1.935	0.306	0.939
خشکه‌کاری Dry-seeding	A3	2.292	0.413	0.577
آب‌کاری Wet-seeding	A4	2.807	0.618	0.404
بی‌خاک‌ورزی No-tillage	A5	0.714	0.689	0.066

این سیستم به علت استفاده کم از ماشین‌آلات و سموم از امتیاز بالایی در شاخص‌های زیست‌محیطی به‌دست آورده است (جدول ۲)، البته یکی از دلایل عدم رضایت کشاورزان از این سیستم کارگر بر بودن آن و هزینه‌های بالای کارگری آن است که همگی به‌صورت نقدی پرداخت می‌شود. در تهیه زمین تغییرات زیادی در شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم نشاکاری رخ داده است، که با ورود پادلر شکل گرفته است. تناقضات پایداری سیستم نشاکاری با پدلینگ را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود. این سیستم با بهترین امتیاز بعد اجتماعی، بدترین رتبه را ازنظر زیست‌محیطی نشان داد. در این نوع سیستم گرچه پدلینگ باعث می‌شود مرحله تهیه زمین و نشاکاری با سرعت و رضایت بیشتری انجام شود ولی به‌کارگیری مفرط تراکتور در پدلینگ شاخص‌های زیست‌محیطی به‌ویژه مصرف سوخت و فشردگی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است (جدول ۱).

مدل بهینه‌سازی چندهدفه و محدودیت‌ها

براساس امتیازهای رتبه‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون برنج رامهرمز (جدول ۲)، توابع هدف سه بعد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی به شکل زیر تعریف گردیدند. به علت این‌که حل مسئله به روش NSGA II با حداقل‌سازی صورت می‌گیرد و ضرایب محاسبه‌شده در TIPSIS مثبت هستند، ضرایب به‌صورت منفی در توابع نوشته شده‌اند.

$$Z1=-(0.416)*A1-(0.939)*A2-(0.577)*A3-(0.404)*A4-(0.066)*A5 \quad (۲)$$

$$Z2=-(0.631)*A1-(0.306)*A2-(0.413)*A3-(0.618)*A4-(0.689)*A5 \quad (۳)$$

$$Z3=-2.170*A1-1.935*A2-2.292*A3-2.807*A4-0.714*A5 \quad (۴)$$

محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی مکانیزاسیون برنج پایدار در منطقه رامهرمز، شامل زمین، آب و ماشین‌های کشاورزی هستند (پارامترها در جدول ۱ تشریح شدند). در سال ۱۳۹۹ مجموعاً ۵۶۴۲ هکتار سطح اراضی کشت تابستانه منطقه رامهرمز بوده، بنابراین حداکثر سطح زیر کشت برنج ۵۶۴۲ به شکل زیر در مدل وارد شد:

$$A1+A2+A3+A4+A5\leq 5642 \quad (۵)$$

در سال ۱۳۹۹ برنامه و محدودیت رهاسازی آب برای کشت برنج در شهرستان رامهرمز درمجموع ۸۳ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. درعین‌حال با برآورد مقدار مصرف سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج نشاکاری بدون پدلینگ، خشکه‌کاری، آب‌کاری و بی‌خاک‌ورزی که به‌ترتیب ۳۰/۵، ۲۴/۳، ۲۰/۳، ۳۷ و ۲۳/۶ هزار مترمکعب بوده است (Hormozi *et al.*, 2016)، رابطه (۶) به‌عنوان معادله محدودیت مصرف آب در مدل وارد شد:

$$30500*A1 + 24300*A2 + 20300*A3 + 37000*A4 + 23600*A5 \leq 83000000 \quad (۶)$$

برخی ماشین‌های کشاورزی مانند خطی‌کار غلات، کارنده بی‌خاک‌ورز و پادلر به علت تعداد محدودی که در منطقه وجود دارند به‌عنوان محدودیت ظاهر می‌شوند. توان اجرایی ماشینی یک شاخص سنجش ظرفیت اجرایی میزان عملیات مکانیزه بوده که به‌صورت هکتار برای هر ماشین یا برای مجموعه ماشین‌ها بیان می‌شود (Almassi, Kiani, & Loveimi, 2008). بر این اساس، محدودیت توان اجرایی ماشین‌ها محاسبه شدند و به شکل $A2\leq 600$، $A3\leq 1440$ و $A5\leq 64$ منظور شد.

نتایج بهینه‌سازی

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج شهرستان رامهرمز در جدول ۳ نمایش داده شده است. مجموع سطح سیستم‌های نقاط بهینه در بازه ۲۷۰۰ تا ۳۲۰۰ قرار دارند که این مقدار با سطح زیر کشت برنج در رامهرمز که ۳۳۱۰ هکتار است نزدیک بوده و نشان‌دهنده این است که خروجی مدل با توجه به محدودیت‌های اعمال‌شده نزدیک به واقعیت است. محدودیت ماشین و آب باعث شده است که دو سیستم نشاکاری بدون پدلینگ و خشکه‌کاری از سطوح بالاتری نسبت به سایر سیستم‌ها برخوردار باشند.

در صورتی‌که محدودیت آب نباشد و مدل تحت محدودیت‌های ماشینی فعلی قرار داشته باشد (جدول ۴)، نقاط بهینه مکانیزاسیون با سطوح بیشتر بر سیستم‌های آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ تکیه دارند. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که در شرایط پرآبی و عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی کشت برنج در رامهرمز مطلوب خواهد بود و بالاترین سطح پایداری را خواهند داشت. تحت سیستم‌های آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ، کاربرد نیروی کارگری بیشتر از سایر سیستم‌ها است و تولید محصول بر توان ماهیچه‌ای تکیه دارد. این سیستم‌ها دارای چالش‌های مدیریتی کمتری هستند و کشاورزان بر روش‌های کنترل آفات و آبیاری تسلط بیشتری دارند.

در شرایط کم‌آبی، با در نظر گرفتن ۲۰ میلیون مترمکعب آب (جدول ۵) سیستم‌های بهینه مطلقاً خشکه‌کاری و نشاکاری با پدلینگ را نشان می‌دهند. علت اصلی این‌که در این مدل، سیستم بی‌خاک‌ورزی باوجود مصرف آب کم، در بهینه پارتو سهمی ندارند پایین بودن ضریب سیستم بی‌خاک‌ورزی در تابع هدف اقتصادی (۰/۷۱۴) است. این مسئله با پایین بودن نسبت فایده به هزینه کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۳- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با همه محدودیت‌ها

Table 3- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with all restrictions

نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling (ha)	نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling (ha)	خشکه‌کاری Dry-seeding (ha)	آب‌کاری Wet-seeding (ha)	بی‌خاک‌ورزی No-tillage (ha)	سطح زیر کشت Area under cultivation (ha)	مصرف آب Water consumption (m^3)
1886	166	899	78	12	3041	82962373
1351	316	1275	213	13	3169	82994714
2698	0	1	12	10	2721	82999997
1264	340	1336	235	14	3190	82999995
2527	15	237	12	11	2802	82961626
1276	539	1177	184	13	3188	82999997
2712	0	1	0	11	2724	82999997
2094	65	788	33	12	2992	82952086
1643	237	1057	145	13	3094	82980004
1264	340	1336	235	14	3190	83000000
1618	340	1014	121	12	3106	82979981
1276	539	1177	184	13	3188	82999996
2221	41	629	31	12	2934	82934402
1968	308	712	16	11	3015	82826449
1834	180	935	91	12	3053	82965469
2710	1	1	0	11	2724	82980670
2427	24	364	18	12	2845	82954600
2009	117	813	56	12	3006	82959032

محدودیت‌ها:
۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت
۸۳ میلیون مترمکعب آب
Limitations: 5642 hectares of cultivated area
83 million cubic meters of water

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ
۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری
۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی
600 hectares of power of planting machine with puddling
1440 hectares of operational power of dry-seeding machines
64 hectares of operational power of no-tillage machines

زیرا سیستمی که این نسبت در آن کمتر از یک باشد اقتصادی نیست. البته به علت جدید بودن سیستم و این‌که غالب کشاورزان اولین تجربه آن را داشتند و با حساسیت‌ها و ملاحظات آن آشنایی نداشته‌اند کشت با موفقیت صورت نگرفته و میانگین عملکرد پایینی داشته است. بااین‌حال، درصورتی‌که نسبت فایده به هزینه بر اساس عملکرد کشاورزان موفق سیستم بی‌خاک‌ورزی (۱/۹۶۷) با محدودیت‌های فعلی در مدل وارد شود، سطوح عمده بهینه، سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی و خشکه‌کاری خواهند بود.

این بدان معنی است لازمه توسعه کشت پایدار برنج در رامهرمز، تقویت و حمایت سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری و نشاکاری با پدلینگ بوده و نیازمند تمرکز بر سیستم‌های با مصرف آب کمتر هستند که این سیستم‌ها با درجات مکانیزاسیون بالاتر و با کاربرد روش‌های مکانیزه صورت می‌گیرند. در عین حال حمایت از طرح‌های کارشناسی در جهت رفع چالش‌های مدیریت آفات و بیماری‌های سیستم بی‌خاک‌ورزی می‌تواند این سیستم پایدار را در منطقه ترویج دهد.

نتیجه‌گیری

یکی از اساسی‌ترین چالش‌های توسعه مکانیزاسیون شناسایی سیستم‌هایی هست که بهترین تعادل را بین ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی برقرار کرده و در عین دستیابی به بیشترین منافع اقتصادی و اجتماعی، کمترین خسارت زیست‌محیطی را به همراه داشته باشند. به‌کارگیری چارچوب مکانیزاسیون پایدار، نه‌تنها می‌تواند اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کند بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف را نیز به محققان و مجریان بخش کشاورزی می‌دهد. این چارچوب برای پیدا کردن مدل بهینه مکانیزاسیون تمام مراحل خاک‌ورزی، کاشت، داشت، برداشت و پس از برداشت در نواحی جغرافیایی مختلف قابل‌استفاده است. در چارچوب ارائه‌شده شاخص‌های منتخب در سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مطالعه موردی سیستم‌های مکانیزاسیون تولید شلتوک شهرستان رامهرمز مورد بررسی قرار گرفت. وزن شاخص‌ها با استفاده از آنتروپی شانون محاسبه و شاخص

شباهت هر سیستم در هر بعد پایداری از روش TOPSIS به‌دست آمد. این شاخص به‌عنوان ضرایب توابع هدف سه‌گانه در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب NSGA-II به‌کار رفت. نتایج نشان داد مجموع سطوح نقاط بهینه، با سطح زیر کشت واقعی ۳۳۱۰ هکتار برنج در رامهرمز همخوانی دارد. در صورت عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ بهینه هستند و در شرایط خشکسالی و محدودیت شدید آب سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری، بی‌خاک‌ورزی (با عملکرد مطلوب) و نشاکاری با پدلینگ به‌عنوان سیستم‌های بهینه پایدار خواهند بود. بررسی بهینه پارتو تحت سناریوهای مختلف در محدودیت‌های آب و ماشین نشان داد با به‌کارگیری این چارچوب، نه‌تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف نیز وجود دارد.

جدول ٤- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با محدودیت ماشین

Table 4- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with machine restriction

مصرف آب Water consumption (m^3)	سطح زیر کشت Area under cultivation (ha)	بی‌خاک‌ورزی No-tillage (ha)	آب‌کاری Wet-seeding (ha)	خشکه‌کاری Dry-seeding (ha)	نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling (ha)	نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling (ha)
208749362	5642	0	5642	0	0	0
198425726	5642	3	4259	82	76	1222
170166224	5642	12	469	306	283	4572
177823206	5642	5	1045	64	59	4470
179159195	5642	3	1092	0	0	4547
179380325	5635	10	1749	237	219	3419
176107325	5600	10	1536	290	264	3500
190400514	5593	10	3645	240	222	1476
185374613	5641	8	2472	134	215	2813
203290491	5638	2	4943	49	45	598
188763438	5633	6	3004	159	146	2318
181679059	5551	11	2585	258	276	2421
195499081	5642	3	3781	71	66	1720
170895987	5611	5	62	29	49	5466
208744350	5642	1	5641	0	0	0
172058983	5642	3	0	0	0	5639
191060368	5642	6	3271	140	130	2095
173227704	5626	11	954	282	259	4119

محدودیت‌ها:
۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت
Limitations: 5642 hectares of cultivated area

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ
۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری
۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی
600 hectares of power of planting machine with puddling
1440 hectares of operational power of dry-seeding machines
64 hectares of operational power of no-tillage machines

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.AA99.585) و از آقای دکتر مهدی شریف یزدی، عضو هیات علمی مدرسه بازرگانی نروژ بابت همکاری در تحلیل نتایج تشکر و قدردانی می‌کنند.

جدول ۵- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با همه محدودیت‌ها (خشک‌سالی)

Table 5- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with all restrictions (drought)

نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling (ha)	نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling (ha)	خشکه‌کاری Dry-seeding (ha)	آب‌کاری Wet-seeding (ha)	بی‌خاک‌ورزی No-tillage (ha)	سطح زیر کشت Area under cultivation (ha)	مصرف آب Water consumption (m^3)
0	270	662	0	0	932	19999989
0	171	779	0	1	951	19997295
0	148	806	0	1	955	19985138
0	14	966	0	1	981	19988213
0	59	911	0	2	972	19980398
0	182	766	0	1	949	19999967
0	0	982	0	3	985	19999993
0	0	984	0	0	985	19999994
0	212	731	0	0	943	19993736
0	118	843	0	0	961	19995990
0	34	944	0	0	978	19999990
0	134	823	0	1	958	19939460
0	160	793	0	0	953	19990671
0	69	902	0	0	971	19997817
0	235	703	0	0	939	19998322
0	89	876	0	2	967	19999552
0	38	938	0	1	977	19989284
0	269	663	0	0	932	19992559

محدودیت‌ها:
۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت
۲۰ میلیون مترمکعب آب
Limitations: 5642 hectares of cultivated area
20 million cubic meters of water

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ
۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری
۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی
600 hectares of power of planting machine with puddling
1440 hectares of operational power of drying machines
64 hectares of operational power of no-tillage machines

References

1. Almassi, M., Kiani, S., & Loveimi, N. (2008). *Principles of agricultural mechanization*. Jungle Publication, Tehran, Iran, 308 p. (In Persian)
2. Askin, D., & Askin, V. (2012). Financial budget manual 2012. Lincoln University. Faculty of Commerce, p.
3. Banerjee, S., & Punekar, R. M. (2020). A sustainability-oriented design approach for agricultural machinery and its associated service ecosystem development. *Journal of Cleaner Production, 264*, 121642. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121642
4. Bezruk, Y., Lavèn, P., Hoffmann, C., & Doluschitz, R. (2014). Sustainability in agricultural machinery production-an empirical study among farmers. *Landtechnik, 69*, 84-89.
5. Bochtis, D., Sørensen, C. A. G., & Kateris, D. (2019). *Choosing a Machinery System*. In: Bochtis, D., Sørensen, C.A.G., Kateris, D. (Eds.), O*perations Management in Agriculture*, 117-158. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809786-1.00005-9
6. Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering, 126*, 69-81. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012
7. Camarena, E., Gracia, C., & Sixto, J. C. (2004). A mixed integer linear programming machinery selection model for multifarm systems. *Biosystems Engineering, 87*, 145-154. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.003
8. Corti, D., Granados, M. H., Macchi, M., & Canetta, L. (2013). *Service-oriented business models for agricultural machinery manufacturers: Looking forward to improving sustainability*. In: (Eds.), Proceeding of International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE) & IEEE International Technology Management Conference, pp. 1-8. https://doi.org/10.1109/itmc.2013.7352612
9. Cupiał, M., & Kowalczyk, Z. (2020). Optimization of Selection of the Machinery Park in Sustainable Agriculture.

Sustainability, 12, 1380. https://doi.org/10.3390/su12041380
10. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6*, 182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017
11. Emami, M., Almassi, M., & Bakhoda, H. (2018). Agricultural mechanization, a key to food security in developing countries: strategy formulating for Iran. *Agriculture & Food Security, 7*, 24.
12. FAO. (2022). Sustainable Agricultural Mechanization. http://www.fao.org/sustainable-agricultural-mechanization.
13. Fleming, P. H. (2003). Farm technical manual.
14. García-Alcaraz, J., Maldonado-Macías, A., Hernández-Arellano, J., Blanco-Fernández, J., Jiménez-Macías, E., & Sáenz-Díez Muro, J. (2016). Agricultural tractor selection: a hybrid and multi-attribute approach. *Sustainability, 8*, 157. https://doi.org/10.3390/su8020157
15. Gathorne-Hardy, A. (2016). The sustainability of changes in agricultural technology: The carbon, economic and labour implications of mechanisation and synthetic fertiliser use. *Ambio, 45*, 885-894. https://doi.org/10.1007/s13280-016-0786-5
16. Gullett, B., & Touati, A. (2003). PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue. *Atmospheric Environment, 37*, 4893-4899. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.08.011
17. Hang, X., Zhang, X., Song, C., Jiang, Y., Deng, A., He, R., Lu, M., & Zhang, W. (2014). Differences in rice yield and CH_4 and N_2O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China. *Soil and Tillage Research, 144*, 205-210. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.013
18. Hormozi, M., Abdeshahi, A., Asoodar, M., & Baruah, D. (2016). Energy use pattern of paddy production systems in khuzestan province, Iran. *Iran Agricultural Research, 35*, 47-56. (In Persian).
19. Hormozi, M. A., Asoodar, M. A., & Abdeshahi, A. (2012). Impact of mechanization on technical efficiency: A case study of rice farmers in Iran. *Procedia Economics and Finance, 1*, 176-185.
20. Keshvari, A., & Marzban, A. (2019). Prioritizing the Power Arrival in Khuzestan Province Agriculture using FAHP and FTOPSIS. *Journal of Agricultural Machinery, 9*(1), 235-251. (In Persian).
21. Kiani, F., Randazzo, G., Yelmen, I., Seyyedabbasi, A., Nematzadeh, S., Anka, F. A., Erenel, F., Zontul, M., Lanza S., & Muzirafuti, A. (2022). A Smart and Mechanized Agricultural Application: From Cultivation to Harvest. *Applied Sciences, 12*. https://doi.org/10.3390/app12126021
22. Kienzle, J., Ashburner, J. E., & Sims, B. (2013). Mechanization for rural development: a review of patterns and progress from around the world. *Integrated Crop Management, 20*.
23. Koritz, K. (2014). *Optimization in a system of systems: Minimizing a farm's environmental impact through operational efficiency*. Master Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
24. Leiva, F., & Morris, J. (2001). PH—Postharvest Technology: Mechanization and Sustainability in Arable Farming in England. J*ournal of Agricultural Engineering Research, 79*, 81-90. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0686
25. Lotfalipour, M. R., & Eslami Gisaki, S. (2007). Evaluation of Cost- Benefit and Sensitivity Analysis of Sarcheshmeh Copper Complex. *Journal of Quantitative Economics, 4*, 83-99. (In Persian).
26. Lu, H., Zhao, Y., Zhou, X., & Wei, Z. (2022). Selection of agricultural machinery based on improved CRITIC-entropy weight and GRA-TOPSIS method. *Processes, 10*(2), 266. https://doi.org/10.3390/pr10020266
27. Mishra, D., & Satapathy, S. (2022). Sustainability-assessment for farm-machinery. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
28. Mishra, D., Satapathy, S., & Chatterjee, P. (2022). *Soft Computing and Optimization Techniques for Sustainable Agriculture*. De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110745368
29. Romanelli, T. L., & Milan, M. (2012). Machinery management as an environmental tool-material embodiment in agriculture. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 14*, 63-73.
30. Rostami, S., Lotfalian, M., & Hosseinzadeh Samani, B. (2018). Assessment and Comparison of Conventional and Straw Walker Combines Harvesting Losses in Fars Province. *Agricultural Mechanization and Systems Research, 19*, 85-96.
31. Safari, M., Alizadeh, M. R., & Gerami, K. (2014). Comparison of Three Conventional Rice Combine Harvesters in Mazandaran, Iran. J*ournal of Agricultural Engineering Research, 14*, 73-86.
32. Sanchis, E., Ferrer, M., Torres, A. G., Cambra-López, M., & Calvet, S. (2012). Effect of Water and Straw Management Practices on Methane Emissions from Rice Fields: A Review Through a Meta-Analysis. *Environmental Engineering Science, 29*, 1053-1062. https://doi.org/10.1089/ees.2012.0006
33. Sen, P., & Yang, J. B. (2012). *Multiple criteria decision support in engineering design*. Springer Science & Business Media, 207 p.
34. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal, 27*, 379-423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
35. Sims, B., Hilmi, M., & Kienzle, J. (2016). Agricultural mechanization: a key input for sub-Saharan Africa smallholders. Integrated Crop Management (FAO) eng v. 23 (2016).
36. Sims, B., & Kienzle, J. (2016). Making mechanization accessible to smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Environments, 3*, 11-37. https://doi.org/10.3390/environments3020011

37. Thakkar, J. J. (2021). Multi-Criteria Decision Making (Vol. 336, pp. 1-365). Springer.
38. Zhou, Q., Lou, J., Xie, F., & Liu, Q. (2011). The method research on optimum selection of agricultural machinery. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, *5* 337-334.

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 493-508

Fusion of Multispectral and Radar Images to Enhance Classification Accuracy and Estimate the Area under Various Crops Cultivation

M. Saadikhani[1], M. M. Maharlooei[2*], M. A. Rostami[3], M. Edalat[4]

1- MSc Student in Biosystems Mechanical Engineering, Department of Biosystems Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Resource Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran
4- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Shiraz University, Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: maharlooei@uk.ac.ir)

Received: 25 August 2022
Revised: 26 October 2022
Accepted: 08 November 2022
Available Online: 21 November 2022

How to cite this article:
Saadikhani, M., Maharlooei, M. M., Rostami, M. A., & Edalat, M. (2023). Fusion of Multispectral and Radar Images to Enhance Classification Accuracy and Estimate the Area under Various Crops Cultivation. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 493-508. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.78446.1123

Introduction

Remote sensing is defined as data acquisition about an object or a phenomenon related to a geographic location without physical. The use of remote sensing data is expanding rapidly. Researchers have always been interested in accurately classifying land coverage phenomena using multispectral images. One of the factors that reduces the accuracy of the classification map is the existence of uneven surfaces and high-altitude areas. The presence of high-altitude points makes it difficult for the sensors to obtain accurate reflection information from the surface of the phenomena. Radar imagery used with the digital elevation model (DEM) is effective for identifying and determining altitude phenomena. Image fusion is a technique that uses two sensors with completely different specifications and takes advantage of both of the sensors' capabilities. In this study, the feasibility of employing the fusion technique to improve the overall accuracy of classifying land coverage phenomena using time series NDVI images of Sentinel 2 satellite imagery and PALSAR radar imagery of ALOS satellite was investigated. Additionally, the results of predicted and measured areas of fields under cultivation of wheat, barley, and canola were studied.

Materials and Methods

Thirteen Sentinel-2 multispectral satellite images with 10-meter spatial resolution from the Bajgah region in Fars province, Iran from Nov 2018 to June 2019 were downloaded at the Level-1C processing level to classify the cultivated lands and other phenomena. Ground truth data were collected through several field visits using handheld GPS to pinpoint different phenomena in the region of study. The seven classes of distinguished land coverage and phenomena include (1) Wheat, (2) Barley, (3) Canola, (4) Tree, (5) Residential regions, (6) Soil, and (7) others. After the preprocessing operations such as radiometric and atmospheric corrections using predefined built-in algorithms recommended by other researchers in ENVI 5.3, and cropping the region of interest (ROI) from the original image, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated for each image. The DEM was obtained from the PALSAR sensor radar image with the 12.5-meter spatial resolution of the ALOS satellite. After preprocessing and cropping the ROI, a binary mask of radar images was created using threshold values of altitudes between 1764 and 1799 meters above the sea level in ENVI 5.3. The NDVI time series was then composed of all 13 images and integrated with radar images using the pixel-level

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2022.78446.1123

integration method. The purpose of this process was to remove the high-altitude points in the study area that would reduce the accuracy of the classification map. The image fusion process was also performed using ENVI 5.3. The support Vector Machine (SVM) classification method was employed to train the classifier for both fused and unfused images as suggested by other researchers.

To evaluate the effectiveness of image fusion, Commission and Omission errors, and the Overall accuracy were calculated using a Confusion matrix. To study the accuracy of the estimated area under cultivation of main crops in the region versus the actual measured values of the area, regression equation and percentage of difference were calculated.

Results and Discussion

Visual inspection of classified output maps shows the difference between the fused and unfused images in classifying similar classes such as buildings and structures versus regions covered with bare soil and lands under cultivation versus natural vegetation in high altitude points. Statistical metrics verified these visual evaluations. The SVM algorithm in fusion mode resulted in 98.06% accuracy and 0.97 kappa coefficient, 7.5% higher accuracy than the unfused images.

As stated earlier, the similarities between the soil class (stones and rocks in the mountains) and manmade buildings and infrastructures increase omission error and misclassification in unfused image classification. The same misclassification occurred for the visually similar croplands and shallow vegetation at high altitude points. These results were consistence with previous literature that reported the same misclassification in analogous classes. The predicted area under cultivation of wheat and barley were overestimated by 3 and 1.5 percent, respectively. However, for canola, the area was underestimated by 3.5 percent.

Conclusion

The main focus of this study was employing the image fusion technique and improving the classification accuracy of satellite imagery. Integration of PALSAR sensor data from ALOS radar satellite with multi-spectral imagery of Sentinel 2 satellite enhanced the classification accuracy of output maps by eliminating the high-altitude points and biases due to rocks and natural vegetation at hills and mountains. Statistical metrics such as the overall accuracy, Kappa coefficient, and commission and omission errors confirmed the visual findings of the fused vs. unfused classification maps.

Keywords: Confusion Matrix, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Radar Image, Sentinel 2 satellite, Support Vector Machine

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

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، ص ۵۰۸-٤۹۳

ادغام تصاویر چندطیفی و راداری به‌منظور افزایش دقت طبقه‌بندی و برآورد سطح زیر کشت محصولات زراعی

مهدی سعدیخانی[۱]، محمدمهدی مهارلویی[۲*]، محمدعلی رستمی[۳]، محسن عدالت[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

چکیده

سنجش از دور فنّ به‌دست‌آوردن اطلاعات درباره یک شئ، عارضه و یا پدیده‌های مربوط به یک منطقه جغرافیایی خاص بدون تماس فیزیکی با آن‌ها است. دستیابی به دقت بالا در طبقه‌بندی عوارض سطح زمین به کمک تصاویر چندطیفی همواره مد نظر پژوهشگران بوده است. یکی از عوامل کاهش دقت نقشه طبقه‌بندی، ناهموار بودن سطح زمین است. وجود نقاط مرتفع موجب می‌شود که سنجنده در دریافت دقیق اطلاعات بازتابی از سطح پدیده‌ها با مشکل روبه‌رو شود. تصاویر رادار با ارائه مدل رقومی ارتفاع (DEM) در شناسایی و تعیین ارتفاع پدیده‌های سطح زمین موثر است. استفاده از خصوصیات تصاویر دو سنجنده کاملاً متفاوت به‌منظور بهره‌گیری از قابلیت‌های مثبت آن‌ها با کمک روش ادغام تصاویر ممکن می‌شود. در این پژوهش به‌منظور برآورد سطح زیر کشت و طبقه‌بندی محصولات زراعی و سایر پدیده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ مربوط به منطقه باجگاه واقع در استان فارس استفاده شد. بدین منظور سری زمانی NDVI متشکل از ۱۳ تصویر ایجاد و با تصویر راداری سنجنده PALSAR در سطح پیکسل، با هدف حذف نقاط مرتفع، تلفیق شد. نتایج این پژوهش نشان داد طبقه‌بندی تصاویر برای شناسایی مزارع زیر کشت محصولات مختلف با دقت بالایی انجام شده است و سطح زیر کشت با دقت ۹۷درصد در گندم، ۹۹/۵درصد در جو و ۹۶/۵ درصد در کلزا نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مزرعه تخمین زده شده است. تصاویر ادغام‌شده دارای دقت کلی۹۸/۱ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۷ بود که دقت کلی را نسبت به تصاویر مجزا ۷/۵ درصد بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: سنتینل۲، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)، ضریب کاپا، ماتریس آشفتگی، ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

سنجش از دور؛ فنّ به‌دست‌آوردن اطلاعات درباره یک عارضه و یا پدیده‌های مربوط به یک منطقه جغرافیایی است که از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی ابزاری است که در تماس فیزیکی با شیء و یا پدیده تحت بررسی نباشد (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015). امروزه سنجش از دور بیشتر به معنی مشاهده زمین از راه فضا بوده و با استفاده از ماهواره صورت می‌گیرد. برای این منظور می‌توان مشخصه‌های یک شیء و یا یک پدیده را بدون نیاز به منبع نور اندازه‌گیری و تجزیه وتحلیل کرد. در اصل، منبع داده‌های سنجش از دور تابش الکترومغناطیسی[5] است که از شئ یا پدیده بازتاب یا تشعشع می‌شود (Johnson, 2009).

امروزه پیدایش تصاویر ماهواره‌ای با پوشش دوره‌ای متناوب، ارائه جزئیات بیشتر، سرعت بالاتر و دقت قابل‌قبول، باعث گسترش کاربردهای سنجش از دوری و افزایش تقاضا به خدمات سنجش از دور شده است. با استفاده از این داده‌ها مناطق تحت پوشش در فواصل زمانی کمی پایش می‌شوند و نقشه‌هایی با جزئیات زیاد می‌توانند تولید شوند. از این تصاویر می‌توان در برنامه‌ریزی شهری

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۲- دانشیار، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۳- استادیار پژوهش، بخش فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۴- دانشیار، بخش زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: maharlooei@uk.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.78446.1123

5- Electromagnetic radiation

اعم از مدیریت منابع طبیعی، گسترش شهری، برنامه‌ریزی شبکه حمل و نقل و نقشه‌برداری استفاده کرد (Ahmad, 2005).

با توجه به این‌که هدف اساسی فناوری سنجش از دور شناسایی و تفکیک پدیده‌های زمین است، بنابراین طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای مهم‌ترین مرحله تفسیر اطلاعات ماهواره‌ای محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی برای تهیه نقشه پوشش اراضی وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. انتخاب روش، به هدف مطالعه و داده‌های در دسترس بستگی دارد (Knorn *et al.*, 2009).

نقطه‌ی عطف پژوهش‌های سنجش از دور در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل پوشش‌های گیاهی در تصاویر چندطیفی توسط روز[1] و همکاران در سال ۱۹۷۴ میلادی ارائه‌ی شاخص تفاضلی نرمالیزه‌ی گیاهی (NDVI) بوده است. این شاخص که تا به امروز به‌عنوان شاخص اصلی تجزیه و تحلیل گیاهان از تصاویر چندطیفی در مقالات و پژوهش‌های مختلف همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Nouri *et al.*, 2017).

از میان این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش‌هایی با هدف کلی استخراج گیاه از تصویر (Malingreau, Tucker, & Laporte, 1989)، برآورد نوع محصولات، مقدار سطح زیرکشت و پایش رشد گیاهان (Myneni, Asrar, Tanre, & Choudhury, 1992)، طبقه‌بندی پوشش زمین (Senay & Elliott, 2000)، تشخیص زودهنگام قحطی و خشکسالی (Kogan, 1995) براساس تحلیل داده‌ها سنجش از دور در یک بازه زمانی مشخص و همچنین آنالیز آب وهوا (Bounoua *et al.*, 2000) اشاره کرد.

پایش و بررسی یک منطقه وسیع به نهادها و دستگاه‌های تصمیم گیر این امکان را می‌دهد تا بتوانند میزان سطح زیر کشت یک محصول خاص در یک منطقه را تعیین و به تبع آن میزان تولید آن محصول را پیش‌بینی کنند، تا علاوه بر تامین امنیت غذایی جامعه، سیاست‌های اقتصادی کشور نیز در بخش واردات و صادرات محصولات کشاورزی به شکل دقیق‌تری تنظیم شود (Rahnama, Maharlooei, Rostami, & Maghsoudi, 2019).

تغییر در پدیده‌ها و عرضه‌های زمینی در یک بازه زمانی به کمک داده‌های سری زمانی[2] قابل تحلیل و مطالعه است. این تحلیل‌ها امکان پیش‌بینی تغییرات در آینده را براساس آنچه در دوره‌های زمانی گذشته اتفاق افتاده است را فراهم می‌نماید. سری زمانی به ساده‌ترین مفهوم، عبارت است از ارزیابی تغییرات تدریجی که در بازه زمانی نسبتا طولانی اتفاق افتاده است (Wang, Li, Gao, Sun, & Du, 2014). بررسی محل، وسعت، نوع و تکرار تغییرات پوشش زمین، همچنین شناسایی الگوهای مکانی و زمانی تغییرات از طریق تفسیر و تجزیه و تحلیل نقشه‌های مکرر پوشش زمینی، دیدی وسیع از فرایندهای مسبب تغییر اساسی را فراهم می‌کند (Gomez, White, & Wulder, 2016).

استفاده از داده‌های به‌دست آمده از چندین سنجنده مزایای بسیار زیادی در مقایسه با استفاده از داده‌های حاصل از سنجنده‌های منفرد دارد. برای نمونه، استفاده از انواع داده‌های برداشت‌شده از طریق سنجنده‌های مختلف باعث افزایش دقت طیفی و مکانی در فرآیند مشاهده و تخمین می‌شود (Zhang, Ghamisi, & Li, 2017). به همین دلیل امروزه، ادغام و ترکیب داده‌های مختلف به‌منظور دستیابی به اطلاعات جدید که حاوی جنبه‌های اطلاعاتی مفید در هر یک از داده‌های اولیه باشد، جایگاه ویژه‌ای دارد. در میان سنجنده‌های موجود، سنجنده‌های راداری و چندطیفی به علت توانایی بالا در جمع‌آوری اطلاعات ارتفاعی و طیفی مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند (Fang, He, Li, Ghamisi, & Benediktsson, 2017).

یکی از جدیدترین روش‌های مورد استفاده در سنجش از دور، ادغام تصویر[3] است. این روش از شاخه‌های مربوط به ترکیب اطلاعات[4] است که در آن دو یا چند تصویر متفاوت از یک صحنه مشابه توسط الگوریتم ادغام با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا تصویر جدیدی تولید شود (Efimov, Kolchaev, Nikiforov, & Novikov, 2018).

در پژوهشی که به‌منظور شناسایی و پهنه‌بندی گونه مهاجم تمشک کوهی (American Bramble) در یک پارک ملی در آفریقای جنوبی انجام شد نتایج ادغام تصاویر ماهواره سنتینل۲[5] و لندست۸ با باندهای راداری ماهواره سنتینل۱ در طی فصول مختلف سال نشان داد که استفاده از طبقه‌بندی نظارت‌شده ماشین بردار پشتیان در تصاویر ادغام‌شده ماهواره سنتیل۲ با دقت ۷۶ درصد انجام شده‌است. این دقت برای تصاویر ادغام‌شده ماهواره لندست۸ حدود ۷۲ درصد گزارش شده است (Rajah, Odindi, & Mutanga, 2018).

در پژوهش دیگری در کلمبیا به‌منظور شناسایی سطح زیر کشت درخت پالم (Palm Oil Tree) از داده‌های ماهواره سنتینل۲ و باندهای راداری ماهواره سنتینل۱ استفاده شد. داده‌ها در دو وضعیت استفاده از داده‌های باندهای مرئی ماهواره سنتینل۲ بدون انجام ادغام و ادغام‌شده با باندهای راداری ماهواره سنتینل۱ برای شناسایی درخت پالم با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی[6] تحلیل گردید. نتایج نشان داد بالاترین دقت کلی در طبقه درخت پالم ۸۲/۱۴ درصد بوده که در شرایط ادغام تصاویر به‌دست‌آمده است. این در حالی‌است که دقت طبقه‌بندی در وضعیت ادغام‌نشده حدود ۱۱/۵

1- Rouse
2- Time Series Data
3- Image Fusion
4- Data Integration
5- Sentinel 2
6- Random Forest

درصد کمتر بوده است (Monsalve-Tellez, Torres-León, & Garcés-Gómez, 2022).

وجود نقاط مرتفع در تصویر چندطیفی موجب ایجاد خطاهایی در تفکیک و طبقه‌بندی پدیده‌ها می‌شود. نتایج تحقیقی که در منطقه بم به‌منظور پایش سطح زیر کشت نخلستان خرما با استفاده از تصاویر ماهواره لندست۸ انجام شد نشان داد که الگوریتم‌های طبقه‌بندی در تفکیک مناطق کوهستانی داری پوشش مرتعی با پدیده‌های زراعی که در مناطق کم‌ارتفاع قرار دارند، دچار خطا می‌شوند (Rahnama, Maharlooei, Rostami, & Maghsoudi, 2018). نقشه خروجی فرآیند طبقه‌بندی حاوی پیکسل‌های مخلوط است که این امر موجب کاهش کمی و کیفی دقت طبقه‌بندی می‌شود. به علت قابلیت تصاویر راداری در ارائه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، استفاده هم‌زمان از تصویر راداری و تصویر چندطیفی می‌تواند در حذف مناطق مرتفع کوهستانی از تصویر موثر باشد.

یکی از ماهواره‌هایی که داده‌های بسیار کاربردی در زمینه مطالعات علوم زمین تهیه و در اختیار کاربران قرار می‌دهد، ماهواره آلوس[1] می‌باشد، که در ژاپن به‌عنوان دایچی[2] شناخته می‌شود. این ماهواره دارای ۳ سنجنده است که سنجنده PALSAR[3] آن رادار است. داده‌های خروجی ارتفاعی این سنجنده برای تهیه توپوگرافی و مطالعه پوشش‌های گیاهی بسیار مفید است.

این پژوهش با هدف طبقه‌بندی پوشش گیاهی و محاسبه سطح زیر کشت زمین‌های زراعی و بررسی استفاده از روش ادغام تصویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ و تصویر راداری ماهواره آلوس به‌منظور افزایش دقت نقشه طبقه‌بندی پوشش گیاهی و سایر پدیده‌های زمینی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزارع دانشکده کشاورزی واقع در ۱۵ کیلومتری شهرستان شیراز انجام شد. شیراز در بخش مرکزی استان فارس، در ارتفاع ۱۴۸۶ متر بالاتر از سطح دریا و در منطقه کوهستانی زاگرس واقع شده و آب و هوای معتدلی دارد. دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در منطقه باجگاه در ۱۵ کیلومتری شمال غربی شیراز و بین طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی واقع است. شکل ۱ محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

برای دستیابی به اهداف این پژوهش، نرم‌افزارهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفت. از نرم‌افزار ENVI[4] (نسخه ۵,۳، توسعه‌یافته شرکت ITT VIS، آمریکا) به‌منظور پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای، استفاده شد. این نرم‌افزار شامل ابزارهای تصحیح هندسی، تصحیح اتمسفری، تجزیه و تحلیل زمین، تجزیه و تحلیل تصاویر راداری، برخی قابلیت‌های GIS برداری و رستری، پشتیبانی تصاویر با فرمت‌های مختلف و غیره می‌باشد (Rahnama *et al.*, 2018).

نرم‌افزار ArcGIS (نسخه ۱۰,۵، توسعه‌یافته شرکت ESRI، آمریکا) برای تبدیل انواع داده‌های رقومی به فرمت برداری و انتقال تصاویر پردازش‌شده جهت اعمال روش کارتوگرافی بهره گرفته شد. برای ثبت موقعیت زمینی پدیده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، از یک سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) دستی (Garmin، مدل GPSMAP62s، تایوان) استفاده شد. نقاط ثبت‌شده در حافظه دستگاه، با استفاده از نرم‌افزار BaseCamp (نسخه ۱,۱، توسعه‌یافته شرکت Garmin، تایوان) تخلیه و به‌صورت یک نقشه وکتوری مورد استفاده قرار گرفت.

برای جمع‌آوری داده‌های سنجش از دور، از تصاویر ماهواره سنتینل۲ استفاده گردید. این ماهواره، دومین سری از ماهواره‌های سنتینل، از نوع مدار قطبی است که از ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول موج کوتاه برخوردار است. در این پژوهش از ۱۳ تصویر که از ۲۱ نوامبر ۲۰۱۸ تا ۳۰ ژوئن ۲۰۱۹ دریافت شده است، استفاده گردید. بر اساس اهداف تحقیق؛ از باندهای مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول موج کوتاه، در قالب یک دیتاست[5] ۵ باندی استفاده شد و مشخصات باندهای مورد استفاده جهت ایجاد دیتاست در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور حذف نقاط مرتفع، از تصاویر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) سنجنده PALSAR ماهواره آلوس استفاده شد. تصاویر مورد استفاده از توان تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و توان تفکیک رادیومتریک ۱۶ بیت برخوردار هستند که در فرایند ادغام با تصاویر ۱۰ متری ماهواره سنتینل۲، نتیجه بسیار مطلوبی ارائه می‌دهد. ابعاد تصویر این ماهواره ۶۳۸۲×۵۶۷۴ پیکسل می‌باشد. عرض تصویر به‌دست‌آمده از سنجنده این ماهواره ۷۰ کیلومتر است (Abdikan, 2018).

برای به‌دست‌آوردن اطلاعات دقیق مرجع زمینی[6] در مورد پدیده‌های موجود، طی چندین مرحله، به منطقه مورد مطالعه مراجعه و موقعیت جغرافیایی هر یک از پدیده‌ها (موقعیت جغرافیایی مزارع مختلف، ساختمان‌ها، زمین‌های آیش، جاده و غیره) برداشت شد.

1- Advanced Land Observation Satellite (ALOS)
2- Daichi
3- Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
4- Environment For Visualizing Images
5- Dataset
6- Ground Truth

شکل ۱- محدوده مطالعاتی تحقیق

Fig.1 The study region map

جدول ۱- باندهای مورد استفاده جهت ایجاد دیتاست

Table 1- Spectral bands used to create dataset

Spectral Band باند طیفی	Spatial resolution (m) توان تفکیک مکانی	Wavelength (nm) طول موج
Band 2 (Blue) باند ۲ (آبی)	10	490
Band 3 (Green) باند ۳ (سبز)	10	560
Band 4 (Red) باند ۴ (قرمز)	10	665
Band 8 (NIR) باند ۸ (مادون قرمز نزدیک)	10	842
Band 11 (SWIR) باند ۱۱ (مادون قرمز موج کوتاه)	20	1610

نقاط برداشت‌شده به‌صورت یک فایل وکتوری وارد نرم‌افزار Arc Map شدند و پس از اصلاح سیستم مختصات فایل وکتوری، از نمونه‌های مربوط به هر کلاس به‌صورت مجزا خروجی تهیه شد. سپس شیپ فایل[1] مربوط به هر کلاس وارد نرم‌افزار ENVI 5.3 شده و نسبت به ساخت نمونه مرجع زمینی جهت فرایند اعتبارسنجی اقدام گردید. شکل ۲ نقاط برداشت‌شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مراحل انجام این مطالعه، شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است. مرحله پیش‌پردازش شامل دریافت تصاویر ماهواره‌ای از وب‌گاه شرکت‌های ارائه‌دهنده، تهیه تصاویر سری زمانی از تصاویر ماهواره سنتینل۲، انجام تصحیحات مختلف و برش تصاویر اصلی هر دو ماهواره برای محدوده مورد مطالعه و در نهایت ادغام تصاویر است. مرحله پردازش شامل استخراج ویژگی‌ها، طبقه‌بندی عوارض و ارزیابی دقت طبقه‌بندی براساس داده‌های مرجع زمینی است. آخرین مرحله مربوط به پس‌پردازش داده‌ها می‌باشد که به تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده می‌پردازد. روش انجام تحقیق و نحوه کار با تصاویر دریافتی از هر دو ماهواره در فلوچارت شکل ۳ آورده شده است.

1- Shape File (*.shp)

شکل ۲- نقاط برداشت‌شده با دستگاه GPS. نقاط با رنگ‌های مختلف برای تشخیص عارضه‌های مختلف زمینی است.

Fig.2. Marked points using handheld GPS. Points with various colors show different phenomena

شکل ۳- فلوچارت مراحل آماده‌سازی و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای برای طبقه‌بندی عوارض زمینی

Fig.3. Flowchart demonstrating the preprocessing and employing of the satellite images for land cover phenomena classification

با توجه به این‌که تصاویر مورد استفاده در این تحقیق از لحاظ سطح پردازش در سطح L1C قرار داشتند و در این سطح از پردازش معمولاً تبدیل‌های اصلی صورت نگرفته است، بنابراین بایستی پیش‌پردازش‌های مناسب بر روی باندهای تصویر انجام گیرد. قبل از پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای، لازم بود باندهای مورد نیاز تصویر در قالب یک دیتاست ایجاد شده و سپس تصویر جدید در نرم‌افزار فراخوانی شود. به این منظور باندهای مورد نیاز که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شد، به‌صورت تکی فراخوانی و از هر کدام از باندها به‌عنوان یک لایه[1] جداگانه خروجی گرفته شد. در نهایت لایه‌ها با هم ترکیب شده و یک دیتاست ۵ باندی ایجاد گردید.

در این مطالعه برای تصحیح خطاهای هندسی تصاویر ماهواره‌ای، از ابزار تصحیح هندسی نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. همچنین،

1- Layer

به‌منظور حذف اثرات اتمسفری در تصاویر مورد استفاده، از الگوریتم QUAC[1] در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده گردید. با توجه به این‌که تصاویر مورد استفاده در این مطالعه مربوط به زمان‌های مختلف بودند و با زاویه ارتفاعی و روش‌های مختلف برداشت می‌باشند، نیاز بود تا تصحیحات رادیومتریک و جوی روی تصاویر انجام شود. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.3 و با روش کالیبراسیون[2] تصحیح شدند، به این ترتیب که ابتدا مقادیر تابش[3] تصویر با به‌کارگیری الگوریتم FLAASH[4] محاسبه و در مرحله نهایی مقادیر بازتابش[5] هر تصویر محاسبه گردید، و با استفاده از رابطه (۱) بازه مقادیر تصویر بین ۰ و ۱ تعریف شد.

$$\text{Rescale}=(Y\leq 0)\times 0+(Y\geq 10000)\times 1+(0\leq Y\leq 10000)\times\frac{Y}{10000} \quad (۱)$$

Y: تصویر خروجی الگوریتم FLAASH

اندازه بزرگ تصاویر ماهواره سنتینل۲ از سطح زمین (ابعاد هر تصویر ۱۰۹۸۰×۱۰۹۸۰ پیکسل می‌باشد) و لزوم پردازش حجم وسیع از اطلاعات، موجب پیچیده و زمان‌بر شدن فرآیند پردازش می‌شود. به همین دلیل برای افزایش سرعت کار و همچنین دقت فرآیند پردازش، محدوده مورد مطالعه، با ابعاد ۵۴۰ ×۵۴۰ پیکسل، از روی تصویر اصلی که مراحل پیش‌پردازش روی آن‌ها اعمال شده بود برش زده و جدا شد. فرآیند مذکور در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. نتیجه خروجی حاصل از برش تصویر، در شکل ۴ ارائه شده است.

برای ادغام کردن تصاویر دو ماهواره مختلف باید مختصات جغرافیایی هر دو تصویر یکسان باشد، در غیر این‌صورت نتایج به‌دست‌آمده با خطا همراه خواهد بود. بدین منظور باید تصاویر راداری نیز مانند تصاویر چندطیفی از روی تصویر اصلی برش داده شوند. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که، تصاویر راداری و چندطیفی برش‌خورده باید عینا با هم منطبق باشند تا در فرآیند ادغام خطا ایجاد نشود. نتیجه این فرآیند در شکل ۵ آمده است.

در این پژوهش به‌منظور طبقه‌بندی پدیده‌های سطح زمین در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر سری زمانی حاصل از شاخص NDVI استفاده شد. به این ترتیب که با استفاده از رابطه ریاضی شاخص NDVI، در محیط نرم‌افزار این شاخص برای ۱۳ تصویر اخذشده محاسبه و سپس تصاویر خروجی با هم ترکیب و دیتاست سری زمانی ایجاد شد. باندهای تشکیل‌دهنده تصویر سری‌زمانی تصاویر دریافت‌شده در تاریخ‌های مختلف در بازه زمانی یادشده در مقدمه است. شکل ۶ مکعب دیتاست سری‌زمانی NDVI را ارائه می‌نماید.

مراحل ادغام تصاویر راداری ماهواره آلوس با تصاویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ در این پژوهش به‌طور خلاصه در شکل ۷ نشان داده شده است. بدین منظور ابتدا ارتفاع کلیه نقاط منطقه مورد مطالعه از ماهواره راداری استخراج و براساس نقشه‌های رقومی موجود، نقاط با محدوده ارتفاعی ۱۷۶۴ تا ۱۷۹۹ متر از سطح دریا آستانه‌گذاری شد و به رنگ آبی مشخص می‌شود و لایه ماسک با استفاده از ابزار Build Mask به‌صورت باینری (سیاه و سفید) در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 برای تصویر ماهواره ALOS تهیه شد. لایه ماسک ساخته‌شده در تصویر اصلی ضرب شد و به این ترتیب نقاط با ارتفاع مجاز که دارای مقدار عددی یک در لایه ماسک بود، در تصویر باقی ماند و سایر نقاط عمدتا نقاط مرتفع کوهستانی حذف شدند. نتیجه نهایی فرآیند ادغام تصویر در شکل ۶ نمایش داده شده است.

برای انجام فرآیند طبقه‌بندی در این تحقیق با توجه به نتایج پژوهش‌های مرتبط پیشین (Abdikan, 2018; Rahnama *et al.*, 2019) از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) تصاویر سری زمانی NDVI استفاده شد. این روش یک طبقه‌بندی‌کننده دودویی[6] و خطی است که با استفاده از توابع کرنل، به منزله یک طبقه‌بندی‌کننده چندکلاسی و غیرخطی نیز به‌کار می‌رود (Arekhi & Adibnejad, 2011). برای استفاده در حالت چندکلاسه، ابتدا باید چند طبقه‌بندی‌کننده دودویی طراحی شود و در نهایت طبقه‌بندی نهایی با استفاده از ادغام اطلاعات طبقه‌بندی‌کننده‌های دودویی انجام شود. انجام این فرآیند با دو روش یکی در مقابل بقیه[7] و دسته‌بندی زوج-زوج[8] اجرا می‌شود. این دو روش به گونه‌ای سعی در استخراج اطلاعاتی از مرزهای بین کلاس‌ها دارند. در روش دسته‌بندی کردن زوج-زوج، میزان اطلاعاتی که از مرز بین کلاس‌ها استخراج می‌شود، بسیار بیشتر از اطلاعاتی است که با روش یکی در مقابل بقیه به‌دست می‌آید (Arekhi & Adibnejad, 2011).

در مطالعه حاضر الگوریتم SVM با روش زوج-زوج مقادیر عامل جریمه[9] و سطح هرم[10] به‌صورت خودکار و بر اساس مقادیر نرم‌افزاری به‌ترتیب ۱۰۰ و ۰ در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی تاثیر ادغام تصاویر در دقت طبقه‌بندی، فرآیند طبقه‌بندی در دو وضعیت ۱) تصاویر سری زمانی ادغام‌شده ماهواره سنتینل۲ با داده های راداری ماهواره آلوس و ۲) تصاویر سری زمانی بدون ادغام ماهواره سنتینل۲ انجام شد.

1- Quick Atmospheric Correction
2- Radiometric Calibration
3- Radiation
4- FLAASH Atmospheric Correction
5- Reflection

6- Binary
7- One-against-all
8- One-against-one
9- Fine agent
10- Surface of the Pyramid

شکل ٤- تصویر اصلی و محدوده برش‌خورده دریافتی از ماهواره

Fig.4. Original Sentiel 2 satellite imagery and the cropped region

شکل ٥- تصویر اصلی و محدوده برش‌خورده مدل رقومی ارتفاعی ماهواره راداری

Fig.5. Original and cropped DEM of radar satellite

شکل ٦- مکعب دیتاست سری زمانی NDVI

Fig.6. NDVI Time series dataset cube

شکل ۷- مراحل آماده‌سازی لایه ماسک از تصاویر راداری و ادغام آن با تصاویر ماهواره سنتینل ۲

Fig.7. Procedure for preparing the mask layer from radar imagery and fusing it with the Sentinel 2 satellite imagery

در این مطالعه برای انتخاب نمونه‌های تعلیمی از عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی و همچنین نقاط برداشت‌شده با دستگاه GPS در عملیات میدانی استفاده شده و سعی شد پیکسل‌های تعلیمی برای هر کلاس معین در داخل منطقه همگن با پراکنش مناسب ایجاد شود. تعداد پیکسل به‌کار گرفته‌شده در هر نمونه تعلیمی، حداقل به اندازه ده برابر تعداد باندهای طیفی سنجنده مورد استفاده انتخاب گردید (Tuia, Merenyi, Jia, & Grana-Romay, 2014). جدول ۲ مشخصات داده‌های اعتبارسنجی مرجع زمینی را نشان می‌دهد. در این جدول کلیه عوارض زمینی موجود در منطقه مورد مطالعه طی بازدیدهای میدانی مشخص گردید و نام هر کلاس عارضه به‌همراه توصیف آن آورده شده است. تعداد نمونه‌های برداشت‌شده در هر کلاس نیز آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های میدانی اعتبارسنجی برای طبقه‌بندی نظارت‌شده

Table 2- Specifications of ground truth annotation for supervised classification

کد کلاس Class code	نام کلاس Class Name	توصیف کلاس Class Description	تعداد نمونه‌ها Number of Samples
1	Wheat	Irrigated and rain-fed wheat fields	130
2	Barley	Barley fields	80
3	Canola	Canola fields	120
4	Soil	Bare soil, uncultivated fields	110
5	Tree	Orchards and green belts	50
6	Residential	Niyayesh and Sadra towns, administrative offices	50
7	Others	Alfalfa and other minor crop fields	80

پس از طبقه‌بندی، به‌منظور تعیین قابلیت داده‌های ماهواره‌ای و مقایسه نتایج طبقه‌بندی با داده‌های زمینی با هدف ارزیابی صحت نقشه‌های حاصل از طبقه‌بندی باید نتایج صحت‌سنجی شوند. از آن‌جایی که امکان کنترل تمام پیکسل‌های تصویر با واقعیت‌های زمینی وجود ندارد بدین منظور، باید از نمونه‌های آزمایشی به‌عنوان کلاس صحیح زمینی استفاده شود. ارزیابی خطا و برآورد صحت طبقه‌بندی معمولاً بر اساس پارامترهای آماری که از ماتریس آشفتگی[1] استخراج می‌شود، انجام می‌گیرد. این ماتریس حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل نمونه‌های آموزشی در واقعیت زمینی با پیکسل‌های متناظر در نتایج طبقه‌بندی است که دقت طبقه‌بندی کل تصویر را در یک جدول نشان می‌دهد (Lillesand *et al.*, 2015).

با محاسبه پارامترهای دقت کلی[2]، ضریب کاپا[3]، خطای حذف‌شده[4] و خطای گماشته[5] کیفیت طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت (Palubinskas, Makarau, & Tao, 2011; Rahnama *et al.*, 2019)

از آنجا که دانستن سطح زیر کشت دقیق و براورد مقدار تولیدی محصولات استراتژیک از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، در این تحقیق پس از طی تمامی مراحل پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش، تصویر با بالاترین دقت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا انتخاب گردید و مساحت پدیده های موجود در تصویر محاسبه شد. با مقایسه مساحت‌های تخمین زده شده از تصاویر ماهواره‌ای و مساحت واقعی اراضی در منطقه که از طریق نمونه‌برداری‌های میدانی به‌دست آمده بود، دقت مساحت تخمین‌زده‌شده با استفاده از شاخص‌های درصد تغییر و معادله رگرسیونی ارزیابی شد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا مقایسه‌ای کیفی بین تصویر طبقه‌بندی‌شده حاصل از فرآیند ادغام تصاویر دو ماهواره سنتینل۲ و آلوس با نتیجه طبقه‌بندی تصویر ادغام‌نشده ماهواره سنتینل۲ صورت می‌گیرد، سپس نتایج حاصل از طبقه‌بندی نظارت شده تصویر سری زمانی NDVI، در دو وضعیت ادغام‌شده و ادغام‌نشده ارائه می‌شود و در نهایت نتایج مربوط به اعتبارسنجی نقشه طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس آشفتگی به تفصیل بیان می‌گردد.

طبقه‌بندی نظارت‌شده

طبقه‌بندی تصویر سری‌زمانی NDVI با استفاده از الگوریتم SVM انجام شد. با استفاده از این روش طبقه‌بندی، تعداد ۷ کلاس پدیده، تفکیک شد. الگوریتم در دو وضعیت ادغام‌شده و ادغام‌نشده

1- Confusion matrix
2- Overall accuracy
3- Kappa coefficient
4- Omission Error
5- Commission Error

بـه‌ترتیـب، دقـت کلـی ۹۸/۰۶٪ (ضـریب کاپـای ۰/۹۷) و ۹۰/۴۸٪ (ضریب کاپای ۰/۸۹) ایجاد کردنـد. نتیجـه ارزیـابی طبقـه‌بنـدی، بـا استفاده از ماتریس آشفتگی بیانگر این موضوع است که ادغام تصـویر راداری و چندطیفی و به تبع آن حذف نـواحی مرتفـع از روی تصـویر، موجب افزایش دقت کلی طبقه‌بندی می‌شود.

مقایسه کیفی تصـویر طبقـه‌بنـدی ادغـام‌شـده و تصـویر ادغام‌نشده

در شکل ۸ مقایسه‌ای بین تصویر حاصل از فرآیند ادغام و تصویر ادغام‌نشده صورت گرفته اسـت و تـاثیر تکنیـک ادغـام تصـویر را در نتیجه بصری و کیفی طبقه‌بندی نشان می‌دهـد. تصـویر سـمت چـپ خروجی طبقه‌بندی تصویر ادغام‌نشده و تصـویر سـمت راسـت نتیجـه طبقه‌بندی تصویر ادغام‌شده را نشان می‌دهد. در تصـویر سـمت چـپ رنگ سفید بیانگر مناطق مسکونی و شهری است. بـه دلیـل شـباهت طیفی برون‌زدگی‌های سنگی در ارتفاعات با ساختمان‌های مسـکونی، در این تصویر کلاس مسکونی با خطا مواجـه شـده و باعـث کـاهش دقت طبقه‌بندی شده است. همچنین پوشش مرتعی موجود در نـواحی کوهستانی و مرتفع اطراف منطقه مورد مطالعه موجب تداخل کلاسـی بین پدیده‌های گیاهی شده و به تبع آن دقت کمـی و بصـری تصـویر خروجی تحت تاثیر قرار گرفته است. تکنیـک ادغـام تصـویر راداری و چندطیفی با حذف ارتفاعات موجود در منطقه مطالعـاتی باعـث تولیـد نقشه طبقه‌بندی با کیفیت و همچنین افزایش دقت طبقه‌بنـدی شـده است. این نتیجه براساس تحقیقات راهنما و همکاران (Rahnama *et al.*, 2019) مورد انتظار بود. در تحقیق یاد شده به دلیل عـدم حـذف نقاط مرتفع کوهستانی برخی پوشش‌های گیاهی به اشـتباه بـه‌عنـوان پوشش گیاهی مزارع یونجه در منطقه مورد مطالعه، طبقه‌بنـدی شـده بود.

شکل ۸– مقایسه نقشه طبقه‌بندی و تاثیر ادغام تصویر. راست: تصویر ادغام‌شده، چپ: تصویر ادغام‌نشده

Fig.8. Comparison between output classified maps and the effect of image fusion. Left: output map of Sentinel 2, Right: output map of Sentinel2+ALOS

نتیجه ماتریس آشفتگی مربوط به الگوریتم در شرایط ادغـام‌شـده بیانگر این است که پدیده‌های گیاهی (گندم، جو و کلزا) با دقت بسیار بالایی از سایر پدیده‌هـا جداسـازی شـده‌انـد. در شـرایط ادغـام‌نشـده الگوریتم در ایجاد تمایز بین دو کلاس مسکونی و خـاک و همچنـین پوشش‌های مختلف گیاهی ضعیف عمل کرد بـه همـین سـبب دقـت کلی طبقه‌بندی تحـت تـاثیر ایـن موضـوع کـاهش یافـت. همچنـین بیشترین خطای الگوریتم در تفکیک ۳ کلاس جـو، درخـت و کلـزا از سایر کلاس‌ها بود که نتیجه آن افزایش خطـای حـذف‌شـده در ایـن کلاس‌ها و به تبع آن کاهش دقت کلـی طبقـه‌بنـدی بـود. مـاتریس آشفتگی و مشخصات آماری مربوط به ارزیابی دقت طبقه‌بندی سـری زمانی NDVI مربوط به منطقه باجگـاه در دو وضـعیت ادغـام‌شـده و ادغام‌نشده در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شـده اسـت. ایـن نتـایج توسـط پالوبینسکاس و همکاران در طبقه‌بندی فضای شهری شهر مونیخ نیـز به‌دست آمده است. در آن پژوهش خطا در بـین کـلاس‌هـای جـاده و

ساختمان مسکونی در تصاویر غیر ادغام‌شده ۳۵ درصد بود که پس از ادغام تصاویر ماهواره و رادار این خطا به ۳ درصدکاهش پیدا کرد. (Palubinskas *et al.*, 2011). در پژوهش دیگری از ادغام تصویر ماهواره آلوس با ماهواره لندست۸ برای طبقه‌بندی پوشش گیاهی در مناطق جنگلی در استان بارتین ترکیه استفاده شد و ادغام تصاویر باعث افزایش دقت طبقه‌بندی پوشش گیاهی تا ۹۴/۳۲ درصد شده است. در شرایط ادغام‌نشده میزان دقت کلی ۸۸/۴۰ درصد گزارش شد (Abdikan, 2018).

اگرچه در اکثر مقالات مرور شده در زمینه ادغام تصاویر، دقت طبقه‌بندی در تصویر حاصل از ادغام بیشتر از تصویر غیر ادغام‌شده بوده است اما در پژوهش هانگر و همکاران در طبقه‌بندی عوارضی چون زمین‌های آیش و جنگل بهبود معنی‌داری حاصل نشده است و همچنین در مورد حوضه‌های آبریز استفاده از تصاویر ادغام‌شده باعث کاهش دقت طبقه‌بندی شده است (Hunger, Karrasch, & Wessollek, 2016). خلاصه‌ای از پژوهش‌های یادشده در بخش‌های مقدمه و نتایج برای مقایسه در جدول ۵ آورده شده است.

تخمین سطح زیر کشت محصولات اصلی منطقه مورد مطالعه

جدول ۶ نتایج مربوط به مجموع مساحت زیر کشت اراضی در منطقه مورد مطالعه برای سه محصول گندم جو و کلزا نشان می‌دهد. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که طبقه‌بندی با دقت مناسبی در حالت ادغام تصاویر ماهواره سنتینل۲ و آلوس برای تخمین سطح زیر کشت انجام شده است.

جدول ۳- ماتریس آشفتگی مربوط به طبقه‌بندی عوارض در شرایط ادغام‌نشده ماهواره سنتینل۲

Table 3- Confusion matrix for classification of unfused image of Sentinel 2 satellite

	مرجع‌شده Referenced									
	کلاس Class	جو Barley	کلزا Canola	مسکونی Residential	خاک Soil	درخت Tree	گندم Wheat	سایر Others	مجموع Total	خطای گماشته (٪) Commission Error(%)
طبقه‌بندی‌شده Classified	جو Barley	78	0	0	0	0	0	0	78	0
	کلزا Canola	0	118	0	0	0	0	0	118	0
	مسکونی Residential	0	0	47	0	0	0	0	47	0
	خاک Soil	0	0	1	107	0	0	0	108	0.92
	درخت Tree	2	0	0	3	50	1	0	56	10.71
	گندم Wheat	0	2	0	0	0	129	1	132	2.27
	سایر Others	0	0	2	0	0	0	79	81	2.47
	مجموع Total	80	120	50	110	50	130	80	620	
	خطای حذف‌شده (٪) Omission Error (%)	2.50	1.67	6	2.73	0	0.77	1.25		
	دقت کلی (٪) Overall Accuracy (%)	98.06		ضریب کاپا Kappa coefficient			0.97			

جدول ٤– ماتریس آشفتگی مربوط به طبقه‌بندی عوارض در شرایط ادغام تصاویر ماهواره سنتیل و راداری

Table 4- Confusion matrix for classification of Fused images of Sentinel 2 and radar satellites

	مرجع‌شده Referenced									
	کلاس Class	جو Barley	کلزا Canola	مسکونی Residential	خاک Soil	درخت Tree	گندم Wheat	سایر Others	مجموع Total	خطای گماشته (٪) Commission Error (%)
طبقه‌بندی‌شده Classified	جو Barley	71	0	0	0	0	0	0	71	0
	کلزا Canola	0	94	0	0	0	0	0	94	0
	مسکونی Residential	0	0	45	0	0	0	0	45	0
	خاک Soil	0	0	5	102	0	0	0	107	4.67
	درخت Tree	0	8	0	0	50	10	0	68	26.47
	گندم Wheat	0	0	0	4	0	120	1	125	4
	سایر Others	9	18	0	4	0	0	79	110	28.18
	مجموع Total	80	120	50	110	50	130	80	620	
	خطای حذف‌شده (٪) Omission Error (%)	11.25	21.67	10	7.27	0	7.69	1.25		
	دقت کلی (٪) Overall Accuracy (%)	90.48	ضریب کاپا Kappa coefficient					0.89		

جدول ٥– مقایسه نتایج برخی پژوهش‌های مرتبط

Table 5- An overview of related literature

مرجع Reference	خلاصه نتیجه Results Summary	روش ادغام Fusion method	نوع پوشش Type of land cover
Rajah *et al.*, 2018	The overall accuracy was 76% with Sentinel2 + SAR and 72% with Landsat8+SAR, while the accuracy for single unfused images were 65% and 53%, respectively.	Sentinel2+ SAR/Sentinel 1 Landsat8+ SAR/Sentinel 1	تمشک وحشی American Bramble
Monsalve-Tellez *et al.*, 2022	The overall accuracy of classification in fusion mode was 84.1% with 11.5% improvement for single imagery.	Sentinel2+ SAR/Sentinel 1	درخت پالم Palm oil tree
Abdikhan, 2018	Improved the overall accuracy by up to 7% in fusion mode.	Landsat8+ PALSAR/ALOS	پوشش جنگل Forest
Hunger *et al.*, 2016	Improved the overall accuracy by up to 30% in the fused image versus single imagery. The producer's and user's accuracy were significantly improved in cultivated land and urban area classification. The Forest and fallow lands classifications were not significantly different. The water body was negatively affected in the fused mode.	Sentinel2+ SAR/Sentinel1	حوضه های آبریز، زمین‌های زراعی و آیش، مناطق جنگلی و مناطق شهری Water body, Cultivated and Fallow land, Forest, and Urban areas
Palubinskas *et al.*, 2011	Improved the classification accuracy of infra-structure and reduced the errors by 32%.	Worldview-2+Terra SAR/ Spotlight	زیرساخت‌های شهری Urban infrastructure

کمترین درصد تغییر مساحت تخمین‌زده‌شده نسبت به مساحت واقعی مربوطه به تنها مزرعه جو موجود در منطقه است و بیشترین درصد تغییر مربوط به مزرعه کلزا است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در مزارع گندم و جو تخمین مساحت بر اساس سنجش از دور با بیش تخمینی و در مورد کلزا مساحت کمتر تخمین زده شده است. علامت منفی در ستون درصد تغییر مبین همین مسئله است.

جدول ٦– مساحت اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده کلاس‌های زمین زراعی در منطقه مورد مطالعه

Table 6- Measured vs. predicted cultivated area in the region of study

کلاس Class	مساحت اندازه‌گیری‌شده Measured Area (ha)	مساحت تخمین‌زده‌شده Predicted Area (ha)	درصد تغییر Difference percentage
گندم Wheat	140	144.2	3
جو Barley	5.5	5.58	1.5
کلزا Canola	36	34.7	-3.6

شکل‌های ۹ راست و چپ به‌ترتیب مساحت تخمین‌زده‌شده (محور افقی) در مقابل مساحت اندازه‌گیری‌شده (محور عمودی) زمین‌های زراعی زیر کشت گندم و کلزا را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر نقطه دایره‌ای مساحت مربوط به یک قطعه مزرعه را نشان می‌دهد و خط‌چین رابطه رگرسیونی بین این دو مساحت را نمایش می‌دهد. همان‌طور که معادله رگرسیونی و ضریب تبیین در هر نمودار نشان می‌دهد مساحت‌های تخمین‌زده‌شده نسبت به مساحت‌های واقعی دقت مناسبی دارد و تقریبا بر روی خط معیار y=x قرار گرفته است. ضریب زاویه خط بزرگ‌تر از مقدار واحد در کلزا و کمتر از واحد در گندم مطابق آن‌چه در جدول ۶ هم بیان شد به‌ترتیب به دلیل تخمین کمتر از واقعی و بیشتر از واقعی در کلزا و گندم است.

شکل ۹– نمودار رابطه بین مساحت تخمین‌زده‌شده و واقعی مزارع در منطقه مورد مطالعه. راست: گندم و چپ: کلزا

Fig.8. Regression relations between predicted vs. measured cultivated area in the ROI**.** Left: Canola, Right: Wheat

نتیجه‌گیری

محور اساسی این پژوهش طبقه‌بندی پوشش‌های گیاهی و ادغام تصاویر رادار و چندطیفی به‌منظور بالا بردن دقت طبقه‌بندی بوده است. از آن‌جا که در محدوده مطالعاتی مناطق مرتفع و کوهستانی وجود داشت، به‌منظور حذف نقاط مرتفع از روش ادغام تصاویر بهره گرفته شد. به این منظور تصاویر راداری سنجنده PALSAR با توان تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و تصاویر چندطیفی ماهواره سنتینل۲ با توان تفکیک ۱۰ متر به روش ادغام در سطح پیکسل با هم ترکیب شدند. این فرآیند، با حذف نقاط کوهستانی و مرتعی، افزایش کیفیت بصری نقشه تولیدی و همچنین افزایش دقت طبقه‌بندی براساس

شاخص‌های ارزیابی با ماتریس آشفتگی را به دنبال داشت. مقایسه مساحت تخمین‌زده‌شده و واقعی مزارع گندم، جو و کلزا که بیشترین سطح زیر کشت را داشتند نشان داد که تصاویر ماهواره سنتینل در شرایط ادغام برای این منظور دقت بالایی دارد.

References

1. Abdikan, S. (2018). Exploring image fusion of ALOS/PALSAR data and LANDSAT data to differentiate forest area. *Geocarto International*, *33*, 21-37. https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1222635
2. Ahmad, A. (2005). Change detection in high density urban area and rural area using high resolution satellite image .Atılım Üniversitesi.
3. Arekhi, S., & Adibnejad, M. (2011). Efficiency assessment of the of Support Vector Machines for land use classification using Landsat ETM+ data (Case study: Ilam Dam Catchment). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, *18*, 420-440. (in Persian). https://doi.org/10.22092/ijrdr.2011.102175
4. Bounoua, L., Collatz, G., Los, S., Sellers, P., Dazlich, D., Tucker, C., & Randall, D. (2000). Sensitivity of climate to changes in NDVI. *Journal of Climate*, *13*, 2277-2292. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2277:SOCTCI>2.0.CO;2
5. Efimov, A. I., Kolchaev, D. A., Nikiforov, M. B., & Novikov, A. I. (2018). *Algorithm of geometrical transformation and merging of radar and video images for technical vision systems*. Pages 1-4. 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): IEEE. https://doi.org/10.1109/meco.2018.8406061
6. Fang, L., He, N., Li, S., Ghamisi, P., & Benediktsson, J. A. (2017). Extinction profiles fusion for hyperspectral images classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *56*, 1803-1815 https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2768479
7. Gomez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *116*, 55-72. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008
8. Hunger, S., Karrasch, P., & Wessollek, C. (2016). Evaluating the potential of image fusion of multispectral and radar remote sensing data for the assessment of water body structure. Pages 374-384. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII: SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2241264
9. Johnson, S. J. (2009). An evaluation of land change modeler for ARCGIS for the ecological analysis of landscape composition. Southern Illinois University at Carbondale.
10. Knorn, J., Rabe, A., Radeloff, V. C., Kuemmerle, T., Kozak, J., & Hostert, P. (2009). Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images. *Remote Sensing of Environment*, *113*, 957-964. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.010
11. Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, *15*, 91-100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-t
12. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
13. Malingreau, J., Tucker, C., & Laporte, N. (1989). AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *International Journal of Remote Sensing*, *10*, 855-867. https://doi.org/10.1080/01431168908903926
14. Monsalve-Tellez, J. M., Torres-León, J. L., & Garcés-Gómez, Y. A. (2022). Evaluation of SAR and Optical Image Fusion Methods in Oil Palm Crop Cover Classification Using the Random Forest Algorithm. *Agriculture*, *12*, 955. https://doi.org/10.3390/agriculture12070955
15. Myneni, R. B., Asrar, G., Tanre, D., & Choudhury, B. J. (1992). Remote sensing of solar radiation absorbed and reflected by vegetated land surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*, 302-314. https://doi.org/10.1109/36.134080
16. Nouri, H., Anderson, S., Sutton, P., Beecham, S., Nagler, P., Jarchow, C. J., & Roberts, D. A. (2017). NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands. *Science of the Total Environment*, *584*, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.130
17. Palubinskas, G., Makarau, A., & Tao, J. (2011). Fusion of optical and radar data for the extraction of higher quality information.
18. Rahnama, S., Maharlooei, M., Rostami, M., & Maghsoudi, H. (2018). *Date palm identification using Sentinel and Landsat satellites imagery*. Pages 1. 2018 ASABE Annual International Meeting: American Society of Agricultural and Biological Engineers. https://doi.org/10.13031/aim.201801777
19. Rahnama, S., Maharlooei, M., Rostami, M. A., & Maghsoudi, H. (2019). Determining the Best Classification Algorithm in order to Estimate the Area under Date Palm Cultivation using LANDSAT 8 Satellite Imagery. *Journal of Agricultural Machinery*, *9*(2), 321-335. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.67310
20. Rajah, P., Odindi, J., & Mutanga, O. (2018). Feature level image fusion of optical imagery and Synthetic Aperture Radar (SAR) for invasive alien plant species detection and mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *10*, 198-208. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.007
21. Senay, G., & Elliott, R. (2000). Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial

dynamics of vegetation. *Forest Ecology and management*, *128*, 83-91. https://doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00275-3

22. Tuia, D., Merenyi, E., Jia, X., & Grana-Romay, M. (2014). Foreword to the special issue on machine learning for remote sensing data processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *7*, 1007-1011. https://doi.org/10.1109/jstars.2014.2311915
23. Wang, H., Li, Q., Gao, Z., Sun, B., & Du, X. (2014). A*ssessment of land degradation using time series trends analysis of vegetation indictors in Beijing-Tianjin dust and sandstorm source region*. Pages 753-756. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium: IEEE. https://doi.org/10.1109/igarss.2014.6946533
24. Zhang, M., Ghamisi, P., & Li, W. (2017). Classification of hyperspectral and LIDAR data using extinction profiles with feature fusion. *Remote Sensing Letters*, *8*, 957-966. https://doi.org/10.1080/2150704x.2017.1335902

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 509-520

Feasibility of Soil Texture Determination Using Acoustic Signal Processing of a Cone Penetrometer

J. Nasrollahi Azar[1], R. Farrokhi Teimourlou[2*], V. Rostampour[2]

1- PhD Student, Department of Mechanical Enginering of Biosystem, Urmia University, Urmia, Iran
2- Associate Professor, Department of Mechanical Enginering of Biosystem, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.farrokhi@urmia.ac.ir)

Received: 22 September 2022
Revised: 14 January 2023
Accepted: 22 January 2023
Available Online: 22 January 2023

How to cite this article:
Nasrollahi Azar, J., Farrokhi Teimourlou, R., & Rostampour, V. (2023). Feasibility of Soil Texture Determination Using Acoustic Signal Processing of a Cone Penetrometer. *Journal of Agricultural Machinery, 13*(4), 509-520. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.78870.1126

Introduction

Precision agriculture is a modern approach to farming that ensures the crops and soil receive exactly what they need for optimum health and productivity. Precision agriculture offers the potential to automate and simplify the collection and analysis of information. It allows management decisions to be quickly made and implemented in small areas of larger fields. Measuring acoustic signals with a cone penetrometer is an advanced and inexpensive method that provides a lot of information about the soil within the shortest amount of time and with the lowest cost. The texture of the soil determines the percentage of the constituents of the mineral part of the soil such as sand, silt, and clay.

In this study, an acoustic penetrometer is developed to provide an accurate method for determining the soil texture. This system uses a microphone to record the sound produced by the cone-soil contact and correlates this data with the soil texture.

Materials and Methods

An acoustic cone penetrometer (ACPT) was designed to determine if there is a relationship between the sound produced at the cone-soil contact and soil particle size. Three types of cones with angles of 30, 45, and 60 degrees, diameter of 20.27 mm, and rod length of 300 mm according to ASAE standard S313.3 FEB1999ED (R2013) were used to determine the relationship between sound and soil texture and to choose the best angle. A microphone (20-20,000 Hz) suitable for fast dynamic responses was used to record the audio signals produced from the soil. Audio signals were stored online through the oscilloscope section of Matlab software. To create the controlled vertical movement of the cones, a mechanical mechanism with electronic controllers was designed. This mechanism can be connected to the rails of the soilbin available in Urmia University, Iran, and is made of a 5 hp electric motor with a gearbox, an inverter for controlling the rotational speed of the electric motor, and a digital ruler for recording vertical movement. Soil samples were tested in 19-liter bins.

Acoustic signals received from the microphone were processed in the time-frequency domain using wavelet transform. In this research, Daubechi function type 3 is used to analyze acoustic signals. It is not possible to use the processed acoustic signals directly for statistical analysis. Therefore, the relevant features should be extracted from them. From the 30 features of time domain signals, the most effective and main features include: SUM, Max, RMS, average, Var, kurtosis, and Moment4. They were ranked using the feature selection section of WEKA 3.9.2 software to avoid increasing the volume of calculations, increase processing speed, and reduce errors. The characteristic vector of the sub-signals of several different soil samples was analyzed to distinguish the soil type and constituents namely sand, silt, and clay.

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2023.78870.1126

Results and Discussion

The best type of cone was selected using WEKA software. The number of features in the d1 sub-signals was higher for the 45-degree cone, and it can be concluded that with this cone, the soil type can be better recognized.

The average values of characteristics in clay, loam, and sand had an increasing trend, respectively, and were statistically significant with a probability of 1% and 5%.

Acoustic signals for clay soil, which has a heavy texture and small particles, have minimum amplitude, and for loamy and sandy soils, they were observed as medium and maximum, respectively. This will cause the values of the selected features of clay soil to be low, and as a result, the average values, variance, and standard deviation are also low. They would be higher for loamy and sandy soil which have larger particles. It can be deduced that, as the size of the soil particles increases, the particles hitting the cone wall would become heavier and would affect the frequency and amplitude of the signal. This will result in the increase of signal amplitude values and, the sum, max, and mean values as well.

Conclusion

Among the sub-signals, the maximum effect of soil texture type changes was related to d1 sub-signals for the 45° cone, and these signals had more potential to identify the soil texture type. Among the features, the sum, average, VAR, and RMS were significant at 1% probability levels. Therefore, these features have more potential to detect the type of soil texture in the mentioned sub-signal. Additionally, the effect of soil texture change on Moment and Kurtosis characteristics was significant at 5% probability levels.

Keywords: Cone penetrometer, Microphone, Signal processing, Sub-signal, Wavelet transform

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

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٥٢٠-٥٠٩

امکان‌سنجی تعیین بافت خاک با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی یک نفوذسنج مخروطی

جعفر نصرالهی آذر[1]، رحمان فرخی تیمورلو[2*]، وحید رستم پور[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

چکیده

بافت خاک یکی از خصوصیات مهم خاک است که با بسیاری از جنبه‌های عملکرد خاک، از بهره‌وری تا سهولت خاک‌ورزی، در ارتباط است. در حال حاضر، تعیین بافت خاک به دو صورت انجام می‌گیرد: در سطح مزرعه با دقت کم یا در محیط آزمایشگاهی و زمان‌بر. در این مطالعه به توسعه یک سیستم جدید برای تعیین بافت خاک در محل مورد نظر، با استفاده از یک نفوذسنج مخروطی با سه زاویه مخروط ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه پرداخته شد. نفوذسنج مجهز به یک میکروفون بود که در آن صدای حاصل از اصطکاک مخروط-خاک برای تعیین بافت خاک استفاده شد. برای تشخیص سه نوع بافت خاک که شامل رس، شن و لوم بود، از روش آنالیز سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان- فرکانس (تبدیل موجک) استفاده گردید. تجزیه سیگنال‌ها در ۵ سطح انجام شد و ویژگی‌های مجموع (SUM)، ریشه میانگین مربعات (RMS)، واریانس Var، کشیدگی (kurtosis) و ممان‌های مرتبه بالا Moment4 مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که زیر سیگنال‌های جزئیات اول مخروط ۳۰ و ۶۰ درجه، جزئیات سوم مخروط ۶۰ درجه، جزئیات چهارم مخروط ۶۰ درجه و آپروکسیمت مخروط ۴۵ و ۶۰ درجه به‌ترتیب دارای بیشترین توانایی و اولویت برای تشخیص نوع بافت خاک از یکدیگر می‌باشند. در بین ویژگی‌های بررسی‌شده به‌ترتیب ویژگی‌های مجموع، واریانس، ممان، کشیدگی و ماکزیمم برای تشخیص نوع خاک با سطح احتمال ۱٪ دارای اولویت هستند. مقادیر همه این ویژگی‌ها با افزایش اندازه ذرات خاک از رس تا شن افزایش یافت. تکنیک صوت دارای پتانسیل خوبی جهت تشخیص نوع بافت خاک بود.

واژه‌های کلیدی: پردازش سیگنال، تبدیل موجک، زیر سیگنال، شاخص مخروطی، میکروفون

مقدمه

مدیریت محصول و خاک در سطح کوچک یا همان کشاورزی دقیق، در حال حاضر انقلابی در شیوه‌های مدیریت و استفاده بهتر از مزرعه ایجاد کرده است. نوع بافت یک خاک می‌تواند تاثیرات گسترده‌ای بر ویژگی‌های خاک مانند شکل‌پذیری، نفوذپذیری، سهولت خاک‌ورزی، حاصلخیزی و بهروری داشته باشد (Sun *et al.*, 2011). بافت خاک تعیین‌کننده درصد اجزای تشکیل‌دهنده بخش معدنی خاک یعنی شن، سیلت و رس است که با توجه به درصد هر جزء، کلاس بافتی خاک مشخص می‌شود. سیستم USDA اندازه ذرات خاک رس تا ۲ میکرومتر، خاک لوم در محدوده ۵۰-۲ میکرومتر و اندازه ذرات شن بین ۵۰ میکرومتر تا ۲ میلی‌متر طبقه‌بندی می‌کند. ذرات خاک بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر به‌طور معمول به‌عنوان شن شناخته می‌شوند و در طبقه‌بندی خاک‌ها نادیده گرفته می‌شوند (Posadas, Giménez, Bittelli, Vaz, & Flury, 2001). در حال حاضر، بافت خاک یا از طریق حدس بر اساس احساس یک نمونه در دست، یا در آزمایشگاه با کار گسترده تعیین می‌شود. تعیین بافت خاک در مزرعه نیز یک اندازه‌گیری واقعی نیست، بلکه یک تخمین است (Tate, 2016). با وجود اهمیت زیاد سیگنال‌های صوتی در تعیین بافت خاک، به استفاده و بهبود آن توجه کمتری شده است.

اندازه‌گیری سیگنال‌های صوتی با استفاده از میکروفون تعبیه‌شده در یک نفوذسنج مخروطی برای آزمایش نفوذ ژئوتکنیکی لایه زیرین به اوایل دهه ۱۹۸۰ برمی‌گردد. این نفوذسنج‌های مخروطی ژئوتکنیکی شبه‌استاتیک (مساحت پایه مخروطی ۱۰ سانتی‌مترمربع و

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: r.farrokhi@urmia.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.78870.1126

زاویه نوک مخروطی ۶۰ درجه) مقاومت در برابر نفوذ نوک مخروط و اطلاعات صوتی را برای ارائه اندازه دانه و ماهیت نوع خاک اندازه‌گیری کردند (Tringale, 1983). این نفوذسنج مخروطی صوتی با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های مزرعه‌ای، توانست نتایجی را از تجزیه و تحلیل دامنه و محتوای فرکانس سیگنال صوتی به‌دست آورد. رابطه بین مقدار ریشه میانگین مربعات دامنه و نرخ نفوذ مخروط، مقاومت در برابر نفوذ، اندازه متوسط دانه و رطوبت خاک تعیین شد.

در یک مطالعه که یک نفوذسنج مخروطی صوتی افقی برای تشخیص تراکم لایه خاک در سطل آزمایش شد. نتیجه این بود که یک لایه سخت فشرده‌تر می‌تواند سطح صدای بالاتری را ایجاد کند (Grift, Tekeste, & Raper, 2005).

در یک مطالعه تجربی، آزمایشاتی را با یک نفوذسنج مخروطی صوتی برای تعیین همبستگی بین سیگنال صوتی و ویژگی‌های خاک انجام دادند. مشخص شد که محدوده ۲۵-۱۳ کیلوهرتز با خصوصیات خاک ارتباط دارد (Houlsby & Ruck, 1998).

در مطالعه دیگر یک نفوذسنج مخروطی صوتی برای پیدا کردن رابط بین ذرات خاک در یک محیط آزمایشگاهی استفاده شد. به جای استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) از روش تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT) استفاده شد، مشخص شد که این روش با وجود دقت، بسیار پیچیده است. آن‌ها دریافتند که مقدار مجموع میانگین مربعات (RMS) با مقدار صدا تولیدی به میزان مشخصی مرز میان ذرات را نشان می‌دهد (Chang, Chang, Nguyen, & Wang, 2010).

در تحقیقی مشابه، همت و همکاران (Hemmat, Rahnama, & Vahabi, 2014)، میکروفون‌ها را در دو تا از سه نوک افقی قرار دادند و رابطه بین حالت‌های شکست خاک و پاسخ صوتی را بررسی کردند. مشخص شد که چگالی طیفی توان در مواردی که شکست خاک با فشار رخ می‌دهد در مقایسه با خاک سست به‌طور قابل‌توجهی بالاتر بود.

میثمی و همکاران تحقیقی در مورد اثرات رطوبت خاک بر انتشار سیگنال‌های صوتی انجام دادند. مشخص شد که با افزایش رطوبت، دامنه و قدرت سیگنال افزایش می‌یابد. اعوجاج هارمونیک کل و نسبت سیگنال به نویز هر دو رابطه درجه دوم را با رطوبت خاک نشان دادند (Meisami-asl, Shari, Mobli, Eyvani, & Alimardani, 2013).

نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji, Tekeste, Nordstorm, Barnard, & Birrel, 2019) یک حسگر شامل یک نفوذسنج مخروطی عمودی، یک حسگر پیزوالکتریک انتشار صوت (AE) در فرکانس بالا و یک سنسور دی‌الکتریک خازنی برای مشخصه‌های فیزیکی خاک توسعه دادند. ارزیابی‌های حسگر نشان داد که طیف توزیع فرکانس صوتی به‌دست‌آمده از تبدیل فوریه بافت خاک شنی را از بافت‌های خاک رس و لوم متمایز می‌کند. با این حال، استفاده از حسگر پیزوالکتریک انتشار صوتی (AE) و سیستم جمع‌آوری داده‌ها با نرخ نمونه‌برداری بالا، هنوز یک فناوری گران‌قیمت با محدودیت‌های فنی زیاد است.

تعیین بافت خاک در مزرعه یک اندازه‌گیری دقیق نیست، بلکه یک برآورد است. در حالی‌که بسیاری از مطالعات در مورد بررسی خواص مختلف خاک وجود دارد، تعداد کمی رابطه مستقیم بین فرکانس صدای تولیدی با بافت خاک وجود دارد. کسانی که با نفوذسنج‌های مخروطی صوتی آزمایش انجام داده‌اند، پی برده‌اند که داده‌های ارزشمندی را می‌توان ارائه داد، اما نتوانسته‌اند آن‌ها را از مرحله اثبات مفهوم فراتر ببرند. یک نفوذسنج صوتی به‌منظور ارائه یک روش قوی‌تر برای تعیین سه نوع بافت خاک درجا و بلادرنگ توسعه داده شد. این سیستم پس از ضبط صدای تولیدشده از طریق ارتباط شاخص مخروطی با خاک، داده‌ها را با بافت خاک مرتبط می‌سازد.

مواد و روش‌ها

فرآیند تحقیق و تهیه نمونه

از روش آنالیز سیگنال صوتی برای تشخیص نوع بافت خاک در سه نوع خاک با بافت مشخص استفاده شد. در این تحقیق آزمایش نفوذ عمودی به‌صورت آزمایشگاهی در بافت‌های خاک رس، لومی و شنی انجام شد. ترکیب بافتی و رطوبت خاک‌های آزمایش‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. خاک‌ها از مزارع استان آذربایجان‌غربی با ارتفاع ۱۴۶۰ متر، طول ۴۵/۱۴ درجه شرقی و عرض ۳۶/۴۷ درجه شمالی جمع‌آوری شد و در غربال با اندازه قطر سوراخ ۵ میلی‌متر الک شد و رطوبت برای هر نمونه با قرار دادن مقدار وزنی ظروف مخصوص در کوره ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. میزان رطوبت بر اساس رطوبت پایه (wet-basis) محاسبه شد.

تجهیزات

یک نفوذسنج مخروطی صوتی (ACPT)[1] به‌منظور تعیین این‌که آیا رابطه‌ای بین صدای تولیدشده در سطح مشترک مخروط و خاک و اندازه ذرات خاک وجود دارد، طراحی شده است. مخروط‌ها طبق استاندارد ASAE S313.3 FEB1999ED (R2013) با قطر ۲۰/۲۷ میلی‌متر و با سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، طول میله ۳۰۰ میلی‌متر و از فولاد ۱۰۴۵ و با روش ماشین‌کاری برای تعیین ارتباط صدا و شاخص مخروطی و انتخاب بهترین زاویه استفاده شد (Anonymous, 2013).

1- Acoustic Cone Penetrometer Test

جدول ۱- نمونه‌های بافتی و رطوبت خاک‌های جمع‌آوری‌شده

Table 1-Texture and moisture samples of collected soils

نمونه‌های خاک Soil sample	شماره آزمایش Test number	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت خاک Texture class	رطوبت Moisture (%)
South of Piranshahr (جنوب پیرانشهر)	1-20	42	32	25	Loam	10
East of Piranshahr (شرق پیرانشهر)	21-40	22	36	42	Clay	11
North of Piranshahr (شمال پیرانشهر)	41-60	88	8	4	Sand	10.5

به‌منظور ضبط سیگنال‌های صوتی تولیدشده از خاک، از یک میکروفون (VM-034CY) استفاده شد که دارای پاسخ فرکانسی از ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز، حساسیت مدار باز $mv.Pa^{-1}$ ۴/۲، حساسیت مکانیکی $nm.Pa^{-1}$ ۱/۵ و برای پاسخ‌های دینامیکی سریع بسیار مناسب است. سرعت نفوذ مخروط با ستفاده از اینورتور ۵/۵ کیلووات، که کنترل موتور را به‌صورت برداری بدون سنسور، کنترل ولتاژ و فرکانس انجام می‌دهد، مطابق با استاندارد نفوذسنج مخروطی ASABE (EP542) روی ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شد. همچنین فرکانس نمونه‌برداری ۴۸۰۰۰ هرتز و مدت زمان داده‌برداری روی ۱۰ ثانیه تنظیم شد. برای به حداقل رساندن صدای الکتروموتور و محیط، میکروفون داخل مخروط توسط ژل مخصوص ابتدا آغشته شده سپس همراه با یک حلقه لاستیکی در داخل و نزدیک به نوک مخروط ثابت شد (شکل ۱). سیگنال‌های صوتی به‌صورت آنلاین از طریق بخش اسیلوسکوپ نرم‌افزار Matlab ذخیره می‌شوند.

شکل ۱- مخروط و اجزای آن طبق استاندارد ASAE S313.3 FEB1999ED (R2013)

Fig.1. Cone and its components according to ASAE standard S313.3 FEB1999ED (R2013), all values are in mm

برای ایجاد حرکت عمودی کنترل‌شده مخروط‌ها، یک مکانیزم مکانیکی با کنترل‌کننده‌های الکترونیکی طراحی شد. این مکانیزم قابل اتصال بر روی ریل‌های جعبه خاک (سویل بین) واقع در دانشگاه ارومیه است (شکل ۲).

در این سیستم از یک الکتروموتور ۵ اسب بخار دارای سرعت ۱۴۳۰دور در دقیقه در شفت خروجی، اینورتر برای کنترل سرعت دورانی الکتروموتور، خط‌کش دیجیتالی برای ثبت حرکت عمودی و یک جعبه دنده برای تبدیل حرکت استفاده شد. نمونه‌های خاک در داخل سطل‌های ۲۰ لیتری آزمایش شدند. هر نمونه خاک ده بار در مکان‌های مختلف درون سطل مورد آزمایش قرار گرفت. و پس از هر سه تکرار، دوباره به حالت اولیه برگردانده می‌شود. این تعداد آزمایش بیشترین تکرار را در هر سطل بدون نمونه‌برداری نزدیک به نمونه قبلی و دیواره سطل ارائه می‌دهد.

شکل ۲- مکانیزم حرکت عمودی و کنترل‌شده مخروط‌ها؛ ۱- چرخ‌دنده شانه‌ای، ۲- جعبه‌دنده، ۳- موتور الکتریکی، ۴- لودسل، ۵- خط‌کش دیجیتالی، ۶- سیم اتصال میکروفون به کامپیوتر، ۷- میله و ۸- مخروط

Fig.2. Mechanism of vertical and controlled movement of cones; 1- Rack and pinion gear, 2- Gearbox, 3- Electric motor, 4- Load cell, 5- LVDT, 6- Microphone connection cable to the computer, 7- Rod, and 8- Cone

شکل ۳- شماتیک دستگاه و سیستم ثبت سیگنال‌های صوتی

Fig.3. Test setup of the device and audio data recording system

پردازش سیگنال

سیگنال های صوتی دریافتی از مخروط‌ها (سه مخروط با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سه نوع بافت خاک) در حوزه فرکانس زمانی با استفاده از تبدیل موجک پردازش شدند. در تبدیل موجک، سیگنال از یک سری فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر عبور می کند. سیگنال به دو بخش تقسیم می‌شود. بخشی که از یک فیلتر بالاگذر عبور می‌کند، حاوی داده‌های فرکانس بالا یعنی نویز است که به آن جزئیات می‌گویند. بخش دوم که از یک فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند که حاوی داده های فرکانس پایین و شامل ویژگی های سیگنال است و تقریب نامیده می‌شود. به‌طور کلی، اگر x(t) سیگنال اصلی باشد و

با استفاده از موجک به n سطح تجزیه شود، اولین سیگنال را می توان از مجموع سیگنال های تقریبی در آخرین سطح و مجموع توابع جزئیات در سطوح مختلف طبق رابطه (۱) به‌دست آورده و آن را محاسبه نمود (Zanardelli, Strangas, Khalil, & Miller, 2005; Soman, 2010):

$$X(n) = a_n(n) + \sum_{n=1}^{N} d_n(n) \quad (۱)$$

که در آن a_n تقریبات سیگنال و d_n جزئیات سیگنال هستند. عملیات تجزیه در تبدیل موجک را می‌توان تا زمانی ادامه داد که داده‌های قابل‌توجهی در تقریب وجود نداشته باشد. بنابراین، اولین سیگنال را می‌توان با استفاده از سیگنال‌های جزئیات بدون از دست دادن داده‌های ضروری بازسازی کرد. انتخاب نوع تابع برای مسائل مختلف در تبدیل موجک متفاوت است. تابع داوبچی Daubechi (DB3) در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. کارایی تابع داوبچی تایید شده است. از این رو تابع مذکور در این تحقیق برای تجزیه سیگنال‌های صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع داوبچی با ۵ سطح تجزیه پس از تلاش و خطا انتخاب شد. بنابراین، سیگنال را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) نوشت، ([d1-d5 جزئیات، a5 تقریبی و x[n] سیگنال اصلی است):

$$X(n) = a5 + d5 + d4 + d3 + d2 + d1 \quad (۲)$$

استفاده از سیگنال‌های صوتی پردازش‌شده به‌صورت مستقیم در تجزیه و تحلیل آماری امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل باید اقدام به استخراج ویژگی‌های مختلف کرده و ویژگی‌های مناسب را انتخاب نمود. در مجموع ۳۰ ویژگی طی فرآیند پردازش سیگنال استخراج شد (جدول ۲). بدیهی است که تعداد زیاد ویژگی‌ها باعث افزایش حجم محاسبات و در نتیجه کاهش سرعت پردازشگر و افزایش خطا خواهد شد. بنابراین می‌توان با رتبه‌بندی ویژگی‌ها از لحاظ تاثیر و اهمیت، ویژگی‌های موثرتر را انتخاب کرد و مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، با استفاده از بخش انتخاب ویژگی نرم‌افزار WEKA 3.9.2، ویژگی‌های موثرتر و اصلی انتخاب شدند که شامل هفت ویژگی، مقدار مجموع (SUM)، ماکزیمم (Max)، ریشه میانگین مربعات (RMS)، میانگین (Mean)، واریانس (Var)، کشیدگی (kurtosis) و ممان‌های مرتبه بالا (Moment4) سیگنال‌ها می‌باشد.

برای تشخیص سیگنال‌های مربوط به چند بافت مختلف و در نهایت برای تشخیص تفاوت بین این سه نوع بافت، باید بردار مشخصه سیگنال‌های فرعی را انتخاب کرد و با توجه به تغییرات این بردارها، بافت‌ها را از هم متمایز کرد. در این مطالعه از مجموع، ریشه میانگین مربعات، واریانس، کشیدگی و ممان‌های مرتبه بالا برای مقایسه سیگنال‌های خروجی سه نوع بافت خاک با سه مخروط استفاده شد.

جدول ۲- ۳۰ ویژگی استخراج‌شده از سیگنال‌های صوتی

Table 2- 30 features extracted from audio signals

1	Max	7	Rms	13	Moment6	19	CF	25	Max/s
2	Sum	8	Skew	14	Entr	20	IF	26	Sqr/s
3	Meany	9	Kurtosis	15	Energ	21	Mom/POW2	27	Max/mea
4	Meanaby	10	Moment3	16	Geom	22	Rm/me	28	s16/s1
5	Var	11	Moment4	17	Har	23	Mom/POW3	29	y3
6	Std	12	Moment5	18	FM4	24	POW2	30	y4/POW

مجموع (Sum)

مجموع عبارت است از دامنه کل نقاط داده‌های سیگنال صوتی، که می‌تواند شدت سیگنال صوتی را نشان دهد و به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Lei, He, & Zi, 2008):

$$Sum = \sum_{n=1}^{N} x(n) \quad (۳)$$

که در آن x(n) دامنه نقاط و N تعداد نقاط داده‌های سیگنال است.

میانگین (Mean)

هرچه مقدار متوسط به صفر نزدیک شود، تقارن سیگنال افزایش می‌یابد. از آن‌جایی‌که سیگنال‌های ارتعاشی و صوتی به‌صورت موجی هستند، مقدار سیگنال معمولاً صفر است. بنابراین برای استفاده از این فاکتور تابع قدرمطلق آن محاسبه می‌شود. (رابطه (۴)) (Lei *et al.*, 2008):

$$Mean\ (abs) = \frac{\sum_{n=1}^{N} abs(x(n))}{N} \quad (۴)$$

واریانس (VAR)

این فاکتور معمولاً پراکندگی سیگنال را نشان می‌دهد. هرچه واریانس بزرگ‌تر باشد، سیگنال دارای پراکندگی بیشتری است. به‌عبارت دیگر، صدای دریافتی ناسازگاری بیشتری دارد (Lei *et al.*, 2008).

$$Var(x(n)) = \frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n)-mean(x(n)))^2}{N-1} \quad (۵)$$

ریشه میانگین مربعات (RMS)

یکی از رایج‌ترین پارامترهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل

سیگنال‌های صوتی، ریشه میانگین مربعات است. زیرا مهم‌ترین ویژگی یک سیگنال صوتی مقدار انرژی آن است. انرژی متناسب با دامنه سیگنال است و میانگین توان دوم سیگنال صوتی از قدرت سیگنال صوتی مناسب‌تر است. ریشه میانگین مربعات به‌صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Mohammed, Rantatalo, Aidanpää, & Kumar, 2013):

$$RMS = \left[\frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n))^2}{N}\right]^{1/2} \quad (۶)$$

که در آن x(n) دامنه نقاط داده و N تعداد نقاط داده‌های سیگنال است.

کشیدگی (kurtosis)

کشیدگی میزان برجستگی قله را در توزیع یک مجموعه داده مشخص می‌کند. در واقع، کشیدگی بزرگ‌تر نشان می‌دهد که پالس‌های سیستم بزرگ‌تر دارای توالی بزرگ‌تر، تیزتر و گسترده‌تر هستند و برای تشخیص عیوب ریزساختارها استفاده می‌شود. وجود عیوب ریز در یک سازه باعث افزایش اعوجاج سیگنال و افزایش میزان سیگنال کشیدگی می‌شود. مقدار کشیدگی برای سیگنال x (n) با تعداد N داده، به‌صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Mohammed *et al.*, 2013):

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x(n)^4}{\left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x(n)^2\right]^2} \quad (۷)$$

ممان (Momentum)

این فاکتور مقدار نرمال‌شده سیگنال را نسبت به میانگین نشان می‌دهد و عامل مناسبی برای بررسی وضعیت ضربه سیگنال است (Khazaee, Ahmadi, Omid, Banakar, & Moosavian, 2013)

$$Moment\ (4) = \frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n)) - Mean(x(n)))^4}{N} \quad (۸)$$

تحلیل آماری

آزمون برای هر نرخ با ۲۰ تکرار انجام شد و در مجموع ۱۸۰ سیگنال به‌دست آمد. پردازش سیگنال با استفاده از نرم‌افزار MTLAB انجام شد. از روش دانکن برای مقایسه میانگین‌ها با احتمال ۱٪ و ۵٪ استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS 18 استفاده شد.

نتایج و بحث

در ابتدا، داده‌های سیگنال که شامل سیگنال‌های اضافی صوتی ناشی از صدای محیط، الکتروموتور و جعبه‌دنده است با استفاده از فیلترهای دیجیتالی در تبدیل موجک نرم‌افزار متلب، فیلتر شدند. با این روش موثر سیگنال‌های صوتی استحصال‌شده از خاک به دلیل وجود نویزهای صوتی محیط، الکتروموتور و دستگاه فیلتر شدند و تا حد امکان سیگنال‌های صوتی خاک خالص شدند. شکل ۴ مقایسه توزیع فرکانس دو سیگنال قبل و بعد از فیلتر را نشان می‌دهد.

شکل ٤- سیگنال‌های صوتی قبل و بعد از فیلتر کردن و مقایسه آن‌ها در حوزه زمان

Fig.4. Audio signals before and after filtering and comparing them in the time domain

در شکل ۵، یکی از سیگنال‌های برداشت‌شده در حوزه زمان مربوط به سه نوع خاک و با سه نوع زاویه مخروط به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

شکل ۵– نمونه‌ای از وضعیت سیگنال‌های صوتی برای خاک با بافت رسی و مخروط ۶۰ درجه

Fig.5. An example of acoustic signal condition for clay texture soil with a 60-degree cone

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است بررسی ظاهری سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان اطلاعات مفیدی را در رابطه نوع خاک و نوع مخروط به‌دست نمی‌دهد و نمی‌تواند ارزیابی دقیقی را از وضعیت سیگنال‌ها انجام دهد؛ بنابراین برای بررسی دقیق‌تر وضعیت سیگنال‌ها از تبدیل موجک برای تجزیه آن‌ها استفاده شد.

شکل ۶ یک نمونه از زیرسیگنال‌های deatails و approximate برای خاک رسی با مخروط ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.

شکل ٦– نمونه‌ای از سیگنال‌های تجزیه‌شده جزئیات (deatails) و تقریبات (approximate) خاک رس با مخروط ۳۰ درجه

Fig.6. An example of the detailed and approximate sub-signals of clay with a 30-degree cone

انتخاب بهترین مخروط

برای انتخاب بهترین نوع مخروط از قسمت انتخاب ویژگی در نرم‌افزار WEKA استفاده شد و همان‌طور که در جدول ۳ قابل مشاهده است ویژگی‌های اولویت‌داده‌شده در زیرسیگنال‌های d_1 برای مخروط °45، d_1 برای مخروط °60، d_3 برای مخروط °60 و a5 برای مخروط °45، دارای تعداد بیشتری بود و می‌توان نتیجه گرفت که زیرسیگنال d1 با مخروط ۴۵ درجه، قابلیت بیشتری برای تفکیک نوع بافت خاک خواهد داشت.

جدول ۳- نتایج اولویت‌بندی ویژگی‌های زیرسیگنال‌های جزئیات و تقریبات

Table 3- The results of prioritizing the features under detail signals and proximates

زیرسیگنال‌ها Sub-Signal	زاویه مخروط Cone type	اولویت‌بندی ویژگی‌ها Prioritize features
	30°	Max
d1	45°	Sum- mean- var- moment4- RMS-kurt- max
	60°	Sum- meanaby- moment4
	30°	Max-Var
d2	45°	Sum
	60°	max
	30°	Max
d3	45°	Sum
	60°	Max- kurt- moment4- moment6- CF
	30°	Max
d4	45°	Max
	60°	Max- moment4
	30°	Max
d5	45°	Max
	60°	Max- sum
	30°	Max
a5	45°	Moment6- max/s- sum- mean
	60°	M0ment6

جدول ٤– نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های سیگنال‌های صوتی d1 برای تفکیک بافت خاک

Table 4- The results of variance analysis of acoustic signal characteristics d1 for soil texture separation

ویژگی‌ها Properties	نوع خاک Soil type	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	مجموع مربعات Sum of squares	آزمون F	سطح معنی‌داری Sig.
مجموع Sum	clay	16.403	1.107	145.271	22.141	0.001
	loam	18.755	1.486			
	sand	23.2501	2.532			
میانگین Mean	clay	0.002909	0.000197	0.000	17.045	0.001
	loam	0.003439	0.000389			
	sand	0.004123	0.000449			
واریانس VAR	clay	0.0000154	0.00000225	0.000	12.028	0.001
	loam	0.00002072	0.0000055999			
	sand	0.00002998	0.000006724			
ممان مرتبه بالا MOMENT4	clay	0.00000000158	0.00000000099	0.000	3.356	0.050
	loam	0.00000000253	0.00000000211			
	sand	0.000000004394	0.00000000238			
ریشه میانگین مربعات RMS	clay	101.00922	0.6671	46.584	19.061	0.010
	loam	97.07258	0.9039			
	sand	99.19299	1.551			
کشیدگی Kurt	clay	6.8079	2.1825	5.571	2.247	0.050
	loam	6.5549	1.6303			
	sand	5.0269	1.2829			
ماکزیمم Max	clay	0.0289	0.002393	0.003	6.868	0.010
	loam	0.0549	0.01753			
	sand	0.0579	0.01876			

بنابراین، این زیرسیگنال‌ها را به‌عنوان زیرسیگنال‌های مورد بررسی انتخاب و از تحلیل بقیه زیرسیگنال‌ها چشم‌پوشی شد و نهایتا مخروط 45° به‌عنوان بهترین مخروط برای این کار انتخاب شد.

به‌منظور تشخیص تفاوت در سیگنال‌های بافت خاک با استفاده از زیرسیگنال ها، از هفت ویژگی مجموع، ماکزیمم، میانگین، واریانس، کشیدگی و ممان استفاده شد. مقایسه تجزیه واریانس این ویژگی‌ها در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ در جدول ۳ ارائه شده است.

طبق جدول ۴، زیرسیگنال‌های جزییات با احتمال ۱٪ و ۵٪ با استفاده از تمام ویژگی‌های انتخاب‌شده، می‌تواند انواع بافت خاک را تشخیص دهد.

از نظر اندازه ذرات، خاک درشت و سبک را خاک شنی و خاک ریز و سنگین را خاک رسی می‌گویند. خاک لوم (loam) ما بین این دو نوع و دارای مخلوط مناسبی از شن و سیلت و رس است. همان‌طور که از جدول ۴ قابل مشاهده است مقادیر میانگین ویژگی‌ها در انواع خاک به‌ترتیب از خاک رسی، لومی و شنی با احتمال معنی‌داری ۱٪ و ۵٪ روندی افزایشی دارد که این تغییرات نشان‌دهنده این است که سیگنال‌های صوتی برای خاک رسی که دارای بافتی سنگین و ذرات کوچکی است، دارای دامنه حداقل و برای خاک لومی و شنی به‌ترتیب به‌صورت متوسط و حداکثر مشاهده شدند. این امر باعث کم بودن مقادیر ویژگی‌های انتخاب‌شده و به تبع آن مقادیر میانگین و واریانس و انحراف معیار برای خاک رسی خواهد شد و برای خاک لومی و شنی که دارای ذرات به‌ترتیب بزرگ‌تری هستند، بیشتر خواهد شد. بدین صورت که با بزرگ شدن اندازه ذرات خاک، برخورد به دیواره مخروط سنگین‌تر شده و روی فرکانس و دامنه سیگنال تاثیر خواهد گذاشت که باعث افزایش مقادیر دامنه سیگنال و در نتیجه افزایش ماکزیمم، مجموع و میانگین خواهد شد.

روند مذکور در جریان نفوذ مخروط داخل خاک و تماس خاک و مخروط و سیگنال‌های صوتی به‌دست‌آمده از آن تاثیر مستقیمی در روند تغییرات ویژگی‌های دیگر نیز خواهد داشت. به‌طوری‌که در مورد ویژگی واریانس، باید گفت که در خاک رس، پراکندگی سیگنال پایین بوده و با افزایش اندازه ذرات خاک، مقدار پراکندگی نیز افزایش می‌یابد.

افزایش کشیدگی (kurt) سیگنال در خاک‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر، احتمالا نشانگر این است که مقدار اکسترمم‌های سیگنال در حال زیاد شدن است که موجب نازک شدن قله سیگنال خواهد بود و کاهش کشیدگی سیگنال در خاک‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر، بیانگر کاهش مقادیر اکسترمم‌های سیگنال و در نتیجه پهن شدن مجدد قله آن خواهد شد.

مقدار ممان (moment) سیگنال در خاک‌های با ذرات بزرگ‌تر به دلیل برخورد شدیدتر ذرات با مخروط، افزایش داشت و به عبارت دیگر حالت ضربه‌ای سیگنال افزایش پیدا می‌کند و در خاک‌های با اندازه کوچک‌تر به علت تراکم بالای ذرات و برخورد پیوسته ذرات با دیواره مخروط، مقدار آن کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پتانسیل تکنیک تحلیل سیگنال صوتی برای تعیین نوع بافت خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. سیگنال‌های صوتی سه نوع بافت خاک با سه مخروط شامل خاک رسی، خاک لومی و خاک شنی با سه زاویه مخروط ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه توسط میکروفون جاگذاری شده داخل مخروط‌ها اندازه‌گیری شد. سپس برای تشخیص اختلاف معنی‌دار بین سیگنال بافت‌های خاک، سیگنال‌ها با استفاده از تبدیل موجک به ۵ سیگنال فرعی تجزیه شدند و برای هر کدام از زیر سیگنال ها ۷ ویژگی شامل: مجموع، میانگین، واریانس، ریشه میانگین مربعات، کشیدگی، ماکزیمم و ممان استخراج‌شده و با هم مقایسه شدند. نتایج اصلی کار حاضر را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. در بین سیگنال های فرعی (زیرسیگنال‌ها)، حداکثر اثر تغییرات نوع بافت خاک به‌ترتیب مربوط به زیر سیگنال d1 برای مخروط ۴۵ درجه، زیر سیگنال d1 برای مخروط ۶۰ درجه، زیر سیگنال d3 برای مخروط ۶۰ درجه و زیر سیگنال a5 برای مخروط ۴۵ درجه بود و این زیر سیگنال‌ها پتانسیل بیشتری برای شناسایی نوع بافت خاک داشتند.
۲. از میان ویژگی‌ها، تأثیر نوع بافت خاک بر ویژگی‌های (مجموع، میانگین، واریانس و ریشه میانگین مربعات) در زیرسیگنال d1 برای مخروط 45° ، در سطوح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. بنابراین، این ویژگی‌ها در زیرسیگنال مذکور پتانسیل بیشتری برای تشخیص نوع بافت خاک دارند. همچنین تأثیر تغییر بافت خاک بر ویژگی‌های ممان و کشیدگی در سطوح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود.
۳. به‌جز ویژگی کشیدگی همه ویژگی‌ها با افزایش اندازه ذرات خاک به‌ترتیب رس، لوم و شن افزایش یافت که به دلیل تقویت فرکانس‌های سیگنال صوتی و افزایش صدای دریافتی توسط میکروفون است.

در طول سال‌ها، تکنیک‌های سنجش مختلفی برای اندازه‌گیری نوع بافت خاک توسعه و پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها در کاربرد صنعتی محدود هستند، زیرا یا نسبت به تغییر محیط حساس هستند و یا هزینه‌بر و زمان‌بر هستند. اما، تجزیه و تحلیل سیگنال‌های صوتی به دلیل مزایای آن مانند ارتباط فرکانس بهینه با اندازه ذرات، سادگی روش، استحکام در برابر شرایط دشوار، نصب آسان، نمایش آنلاین، هزینه تجهیزات و نگهداری کم، جذاب است. همچنین نتایج این

مطالعه عملکرد این تکنیک را نشان داد. بنـابراین، تکنیـک تجزیـه و تحلیل سیگنال صوتی پتانسیل زیادی برای تشخیص نوع بافت خـاک دارد.

References

1. Anonymous. (2013). ASABE, S313.3 feb1999ed (r), Soil cone penetrometer. *American Society of Agricultural and Biological Engineers.*
2. Chang, H. W., Chang, T. H., Nguyen, V. T., & Wang, C. W. (2010), Determination of interfaces in soil layers by sound wave analysis with cone penetration tests. *Journal of Marine Science and Technology, 18*(5), 664-673. https://doi.org/10.51400/2709-6998.1909
3. Grift, T., Tekeste, M., & Raper, R. (2005), Acoustic compaction layer detection. *Transactions of the ASAE, 48*(5), 1723-1730. https://doi.org/10.13031/2013.20006
4. Hemmat, A., Rahnama, T., & Vahabi, Z. (2014), A horizontal multiple-tip penetrometer for on-the-go soil mechanical resistance and acoustic failure mode detection. *Soil and Tillage Research, 138,* 17-25. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.003
5. Houlsby, G. T., & Ruck, B. M. (1998). Interpretations of signals from an acoustic cone penetrometer. *Site Characterization: Geotechnical Site Characterization*, 1075-1080.
6. Khazaee, M., Ahmadi, H., Omid, M., Banakar, A., & Moosavian, A. (2013), Feature-level fusion based on wavelet transform and artificial neural network for fault diagnosis of planetary gearbox using acoustic and vibration signals. *Insight-NonDestructive Testing and Condition Monitoring, 55*(6), 323-330. https://doi.org/10.1784/insi.2012.55.6.323
7. Lei, U., He, Z., & Zi, Y. (2008). A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications, 35*, 1593-1600. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.072
8. Meisami-asl, E., Shari, A., Mobli, H., Eyvani, A., & Alimardani, R. (2013). On-site measurement of soil moisture content using an acoustic system. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15*(4), 1-8.
9. Mohammed, O. D., Rantatalo, M., Aidanpää, J. O., & Kumar, U. (2013). Vibration signal analysis for gear fault diagnosis with various crack progression scenarios. *Mechanical Systems and Signal Processing, 41*, 176-195. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.040
10. Naderi-Boldaji, M., Tekeste, M. Z., Nordstorm, R. A., Barnard, D. J., & Birrel, S. J. (2019). A mechanical-dielectric- high frequency acoustic sensor fusion for soil physical characterization. *Computer and Electronics in Agriculture, 156*, 10-23. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.006
11. Posadas, A. N. D., Giménez, D., Bittelli, M., Vaz, C. M. P., & Flury, M. (2001). Multifractal characterization of soils particlesize distributions. *Soil Science Society of America Journal, 65*, 1361-1367. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551361x
12. Soman, K. P. (2010). *Insight into wavelets: from theory to practice*, PHI Learning Pvt. Ltd., Wavelets (Mathematics).
13. Sun, Y., Druecker, H., Hartung, E., Hueging, H., Cheng, Q., Zeng, Q., Sheng, W., Lina, J., Roller, O., Paetzold, S., Schulze Lammers, P., (2011). Map-based investigation of soil physical conditions and crop yield using diverse sensor techniques. *Soil and Tillage Research, 112*(2), 149-158. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.12.002
14. Tate, B. L. (2016). *Soil texture determination by an acoustic cone penetrometer method*. Master thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
15. Tringale, P. T. (1983). *Soil identification in-situ using an acoustic cone penetrometer*. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
16. Zanardelli, W. G., Strangas, E., Khalil, H. K., & Miller, J. M. (2005). Wavelet-based methods for the prognosis of mechanical and electrical failures in electric motors. *Mechanical Systems and Processing Signal, 19*(2), 411-426. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2003.10.002

Journal of Agricultural Machinery

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

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 521-533

Experimental Study and Mathematical Modeling of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas

M. Zarei[1], M. R. Bayati[2*], M. A. Ebrahimi-Nik[2], B. Hejazi[3], A. Rohani[4]

1- PhD Student of Agricultural Mechanization, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: bayati@um.ac.ir)

Received: 05 January 2023
Revised: 31 January 2023
Accepted: 07 February 2023
Available Online: 07 February 2023

How to cite this article:
Zarei, M., Bayati, M. R., Ebrahimi-Nik, M. A., Hejazi, B., & Rohani, A. (2023). Experimental Study and Mathematical Modeling of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 521-533. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80432.1142

Introduction

Anaerobic bacteria break down organic materials like animal manure, household trash, plant wastes, and sewage sludge during the anaerobic digestion process of biological materials and produce biogas. One of the main issues in using biogas is hydrogen sulfide (H_2S), which can corrode pipelines and engines in concentrations between 50 and 10,000 ppm. One method for removing H_2S from biogas with minimal investment and operation costs is biofiltration. Whether organic or inorganic, the biofilter's bed filling materials must adhere to certain standards including high contact surface area, high permeability, and high absorption. In this study, biochar and compost were used as bed particles in the biofilter to study the removal of H_2S from the biogas flow in the lab. Afterward, kinetic modeling was used to describe the removal process numerically.

Material and Methods

To remove H_2S from the biogas, a lab-sized biofilter was constructed. Biochar and compost were employed separately as the material for the biofilter bed. Because of its high absorption capacity and porosity, biochar is a good choice for substrate and packed beds in biofilters. The biochar pieces used were broken into 10 mm long cylindrical pieces with a diameter of 5 mm. Compost was used as substrate particles because it contains nutrients for microorganisms. Compost granules with an average length of 7.5 mm and 3 mm in diameter were used in this study. For the biofilter reactor, each of these substrates was put inside a cylinder with a diameter of 6 cm and a height of 60 cm. The biofilter's bottom is where the biogas enters, and its top is where it exits. During the experiment, biogas flowed at a rate of 72 liters per hour. Mathematical modeling was used to conduct kinetic studies of the process to better comprehend and generalize the results. This method involves feeding the biofilter column with biogas that contains H_2S while the biofilm is present on the surface of the biofilter bed particles. The bacteria in the biofilm change the gaseous H_2S into the harmless substance sulfur and store it in their cells. The assumptions that form the foundation of the mathematical models are: the H_2S concentration is uniform throughout the gas flow, the gas flow is constant, and the column's temperature is constant at a specific height.

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80432.1142

Results and Discussion

In the beginning, biochar was used as a substrate in the biofilter to test its effectiveness, and the results obtained for removing H_2S from the biogas were acceptable. H_2S concentration in biogas was significantly reduced using biochar beds. It dropped from 300 ppm and 200 ppm to 50 ppm where the greatest H_2S concentration reduction was achieved. The level of Methane in the biogas was not significantly impacted by the biofilter. This is regarded as a significant outcome when taking into account the goal which is producing biogas with a high concentration of methane. The H_2S elimination effectiveness was 94% with the biochar bed and biogas input with 185 ppm H_2S concentration. The removal efficiency reached 76% with the compost bed and input concentration of 70 ppm. Using mathematical models, the simulation was carried out by modifying the model's parameters until the predicted results closely matched the experimental data. It may be concluded that the suggested mathematical model is sufficient for the quantitative description of H_2S removal from biogas utilizing biofilm in light of how closely the calculation results matched the experimental data. The only model parameter that was changed to make the model results almost identical to the experimental data was the value of the maximum specific growth rate (μ_{max}) which has the greatest influence on the model results. The value of μ_{max} for the biochar bed was calculated as 0.0000650 s^{-1} and for the compost bed at 70 ppm and 35 ppm concentrations as 0.0000071 s^{-1} and 0.0000035 s^{-1}, respectively.

Conclusion

The primary objective of this study is to examine the removal of H_2S from biogas using readily available and natural substrates. According to the findings, at a height of 60 cm, H_2S concentration in biochar and compost beds decreased from 185 ppm to 11 ppm (removal efficiency: 94%) and from 70 ppm to 17 ppm (removal efficiency: 76%), respectively. The mathematical models that were created can quantify the H_2S elimination process, and the μ_{max} values in biochar and compost were calculated as 0.0000650 s^{-1} and 0.0000052 s^{-1}, respectively.

Acknowledgment

The authors would also like to thank UNESCO for providing some of the instruments used in this study under grant number No. 18-419 RG, funded by the World Academy of Sciences (TWAS).

Keywords: Biochar, Biofilter, Compost, Rate of maximum specific growth, Removal efficiency

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

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٥٣٣-٥٢١

مطالعه تجربی و مدل‌سازی ریاضی حذف سولفید هیدروژن از بیوگاز با استفاده از بیوفیلتر

محسن زارعی[۱]، محمدرضا بیاتی[۲*]، محمدعلی ابراهیمی نیک[۲]، بیژن حجازی[۳]، عباس روحانی[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

چکیده

بیوگاز خام علاوه بر متان به‌عنوان ترکیب اصلی دارای ترکیب آلاینده دیگری مثل سولفید هیدروژن (H_2S) می‌باشد. سولفید هیدروژن بسیار خورنده بوده و یکی از مشکلات عمده در استفاده از بیوگاز را ایجاد می‌کند و باعث خوردگی در موتورها و خطوط لوله می‌شود. در این تحقیق از بیوفیلتر بستر ثابت برای حذف سولفید هیدروژن از جریان بیوگاز استفاده شد. از دو بستر زغال‌زیستی حاصل از پیرولیز و کمپوست به‌عنوان بستر بیوفیلتر بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که به‌ترتیب بازده حذف سولفید هیدروژن برای دو بستر زغال‌زیستی و کمپوست برابر با ۹۴ و ۷۶ درصد شد. به‌ترتیب در دو بستر زغال‌زیستی و کمپوست در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری غلظت سولفید هیدروژن از ۱۸۵ppm به ۱۱ppm و از ۷۰ppm به ۱۷ppm کاهش یافت. ضمن این‌که بیوفیلتر کارایی خوبی نسبت به افزایش ناگهانی غلظت سولفید هیدروژن در خوراک بیوگاز نشان داد. مدل‌سازی سینتیکی ساده حذف سولفید هیدروژن برای توصیف عملکرد بیوفیلتر ارائه شد. فرض‌های مدل‌سازی برای ساده‌سازی، شامل صرف‌نظر از تغییرات شعاعی غلظت و نیز استفاده از مدل سینتیکی مونود برای توصیف نرخ حذف سولفید هیدروژن می‌باشد. معادلات دیفرانسیلی معمولی برای شبیه‌سازی به کمک روش رانگه-کوتا حل شد. نتایج مقایسه مدل و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل پیشنهادی به‌خوبی عملکرد حذف سولفید هیدروژن را پیش‌بینی می‌کند (در تمام موارد R^2 بزرگتر از ۰/۹۰ بود). به کمک نتایج تجربی، مقادیر پارامتر سینتیکی حداکثر نرخ رشد ویژه (μ_{max}) در بستر زغال‌زیستی و کمپوست به‌ترتیب برابر $۶/۵ \times ۱۰^{-۵}\ s^{-1}$ و $۰/۵۲ \times ۱۰^{-۵}\ s^{-1}$ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بازده حذف، بیوفیلتر، حداکثر نرخ رشد ویژه، زغال زیستی، کمپوست

مقدمه

بیوگاز محصول فرآیند هضم بی‌هوازی مواد بیولوژیکی است که در آن مواد آلی مانند فضولات حیوانی، زباله‌های خانگی، بقایای گیاهی، لجن فاضلاب و مواد موجود در مراکز دفن زباله توسط باکتری‌های بی‌هوازی تجزیه می‌شوند (Amini & Reinhart, 2011). مراحل تجزیه توسط باکتری‌ها شامل هیدرولیز، اسیدزایی، استوژن‌زایی و تخمیر متان می‌شود (Sreekrishnan, Kohli, & Rana, 2004). بیوگاز خام عمدتاً از متان، دی‌اکسید کربن و مقدار کمی از ترکیبات باقی‌مانده مختلف مانند بخار آب، سولفید هیدروژن (H_2S)، آمونیاک، سیلوکسان‌ها و مرکاپتان‌ها تشکیل شده است (Poloncarzova, Vejrazka, Vesely, & Izak, 2011). ترکیبات بیوگاز تولیدی به‌طور معمول ۵۵٪ تا ۷۰٪ متان، ۳۰٪ تا ۴۵٪ دی‌اکسید کربن و صفر تا ۱/۵٪ H_2S می‌باشد. H_2S در بیوگاز از تجزیه پروتئین‌ها و ترکیبات گوگردی موجود در خوراک منشاء می‌گیرد (Syed, Soreanu, Falletta, & Béland, 2006). اگرچه غلظت H_2S در بیوگاز به مواد اولیه بستگی دارد، اما معمولاً بین ۲-۰/۱٪ متغیر است (Marzouk, Al-Marzouqi, Teramoto, Abdullatif, & Ismail, 2012). H_2S بسیار سمی، خورنده، بی‌رنگ و عامل بوی بد در بیوگاز است (Rattanapan, Boonsawang, &

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: bayati@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80432.1142

(Kantachote, 2009). علاوه بر این، H_2S یکی از مشکلات عمده در استفاده از بیوگاز را ایجاد می‌کند زیرا در محدوده ۵۰ppm تا ۱۰۰۰۰ppm، می‌تواند باعث خوردگی در موتورها و خطوط لوله شود (Pipatmanomai, Kaewluan, & Vitidsant, 2009). استفاده نهایی از بیوگاز مشخص می‌کند که چه غلظتی از سولفیدهیدروژن قابل‌تحمل است. در جدول ۱، حد استاندارد سولفید هیدروژن برای مصارف مختلف ذکر شده است (Allegue & Hinge, 2014).

جدول ۱– حد قابل قبول سولفید هیدروژن در مصارف گوناگون

Table 1- H_2S acceptable limit for different utilization

تکنولوژی Technology	سلول‌های سوختی Fuel cells	توربین‌ها Turbines	موتور احتراق داخلی Internal combustion engine	اجاق آشپزخانه Kitchen stoves
حد قابل تحمل برای H_2S H_2S tolerannce	0-20	<10,000	<500*	<10

*با توجه به نوع موتور می‌تواند کمتر از ۵۰ هم باشد.

* Depending on the engine type, it can be <50.

چندین فرآیند فیزیکوشیمیایی برای حذف H_2S از جریان‌های گاز خروجی از زباله صنعتی به‌کار برده می‌شود که شامل فرآیندهای جذب سطحی با جامد (Boumnijel, Amor, Chekir, & Hajji, 2016)، شستشو با مایع (Lien, Lin, & Ting, 2014) و جذب مایع (Al Mamun & Torii, 2015) می‌باشد. دو نوع روش جذب مبتنی بر مایع وجود دارد. اولین مورد جذب آبی است که به آب زیادی نیاز دارد (Lien, Lin, & Ting, 2014)، نیاز به فشار بالا داشته و فقط برای نرخ پایین جریان گاز به‌طور موثر عمل می‌کند، ضمن این‌که انواع دیگر پسماندها را تولید می‌کند. روش دوم، جذب با استفاده از آب حاوی مواد شیمیایی است (Taheri, Mohebbi, Hashemipour, & Rashidi, 2016) که باعث تولید پسماند شیمیایی شده و همچنین نیاز به مواد شیمیایی پرهزینه دارد. درنتیجه، روش‌های جذب H_2S نیاز به جاذب با هزینه بالا، فشار بالا و مرحله احیا دارند و همچنین فقط برای سرعت پایین جریان گاز به‌طور موثر عمل می‌کنند (Namini, Heydarian, Bonakdarpour, & Farjah, 2008).

ازطرفی، بیوفیلتراسیون یک فرآیند جایگزین برای حذف H_2S از بیوگاز می‌باشد (Elias, Barona, Arreguy, Rios, Aranguiz, & Penas, 2002). بیوفیلتراسیون نیاز به سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی کم دارد، با افت فشار کمی عمل می‌کند و همچنین ضایعات بیشتری تولید نمی‌کند و به‌طور موثر برای حذف H_2S در غلظت کم با سرعت جریان بالا کارایی دارد. علی‌رغم برخی اشکالات بیوفیلتراسیون، مانند سرعت کم در تطبیق با شرایط مختلف و حساسیت به شرایط عملیاتی و آلودگی (Devinny, Deshusses, & Webster, 2017)، همچنان به‌عنوان یک روش مهم استفاده می‌شود.

بیوفیلتراسیون یک سیستم چند فازی است که در آن H_2S در یک لایه نازک بیوفیلم که در اطراف ذرات بستر ثابت ایجاد شده است، حل و جذب می‌شود و سپس توسط میکروارگانیسم‌های موجود در بیوفیلم تجزیه می‌شود (Devinny *et al.*, 2017). مواد پرکننده بستر در بیوفیلتر ممکن است طبیعی یا مصنوعی باشد ولی در هر حال باید الزاماتی مانند سطح تماس بالا، نفوذپذیری بالا و جذب بالا را برآورده کنند. کارهای تحقیقاتی قبلی از خاک، کمپوست، تراشه‌های چوب، برگ، پوست درخت، خاک اره، ماسه و باگاس به‌عنوان ذرات بستر استفاده کردند (Devinny *et al*, 2017). ذرات بستر باید دارای تخلخل بالا و همچنین ظرفیت نگهداری آب بالایی باشند. به‌علاوه، وجود و در دسترس بودن مواد مغذی برای رشد میکروارگانیسم‌ها در شرایط بستر نیز مهم است (Delhoménie & Heitz, 2005). ذرات بستر ارگانیک هم سطح مواد مغذی و هم ظرفیت نگهداری آب بالاتری نسبت به ذرات بستر غیر ارگانیک را دارند. بیشتر ذرات بستر در بیوفیلتر که معمولاً به‌کار می‌روند، پیت و کمپوست با عوامل حجیم‌کننده بی‌اثر مانند کربن فعال، تراشه‌ها یا دانه‌های چوب هستند (Fischer, 2010). کمپوست‌ها جمعیت میکروبی متراکم‌تر و متنوع‌تری داشته و همچنین ظرفیت نگهداری آب و حفظ مواد مغذی را امکان‌پذیر می‌کنند. با این حال، کمپوست‌ها تخلخل کمی دارند، بنابراین افت فشار در بیوفیلتر زیاد خواهد بود. همچنین خاک‌ها مستعد کانالیزه‌شدن جریان گاز و گرفتگی هستند (Namini *et al*, 2008). کربن فعال دارای خواص بهتری از نظر سطح تماس، همگنی و استحکام فیزیکی است، بنابراین عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. در حالی‌که عیب آن در قیمت بالاتر نسبت به سایر منابع طبیعی است، زیرا کربن فعال در فرآیند تولید نیاز به پیرولیز دارد (Chung, Huang, & Tseng, 1996). داس و همکاران توانستند با استفاده از ترکیب زغال‌زیستی و کمپوست به‌ترتیب با نسبت حجمی ۲۵ درصد و ۷۵ درصد، به‌عنوان بستر بیوفیلتر، با زمان ماند بستر خالی[1] (EBRT) ۸۰ تا ۱۱۹، غلظت سولفید هیدروژن را در فاز گازی، ۷۰ تا ۹۹ درصد

1- Empty Bed Residence Time

کاهش دادند (Das *et al.*, 2019). با توجه به این‌که ایران یکی از منابع تولید انگور در دنیا می‌باشد و هر ساله حجم بالایی از شاخه‌ها و سر شاخه‌های آن هرس شده و به‌عنوان ضایعات تلف می‌شود، زغال‌زیستی[1] حاصل از چوب انگور هم به‌راحتی قابل دسترسی می‌باشد. زغال‌زیستی تحت فرایند پیرولیز و در دمای ۵۵۰ درجه تولید شد. ضمن این‌که کمپوست هم با توجه به این‌که سرشار از مواد مغذی برای میکروارگانیسم‌هاست یکی از منابع اصلی در تهیه بستر بیوفیلتر می‌باشد.

در یک تحقیق، مدل تک ذره همراه با مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه‌سازی فرآیند انتقال جرم-تجزیه‌زیستی در بیوفیلتر برای حذف H_2S توسعه داده شد. تجزیه و تحلیل حساسیت اندازه ذرات و ضریب انتشار برای ارزیابی اثرات آن‌ها بر انتشار داخلی در مقیاس تک ذره انجام شد. نقش فاز مایع در مقیاس راکتور ارزیابی شد. سپس مدلی که با CFD توسعه‌یافته بود با نتایج شبیه‌سازی حاصل از داده‌های تجربی از نظر راندمان حذف در بارهای ورودی مختلف H_2S مقایسه شد که مورد تأیید قرار گرفت. با افزایش غلظت H_2S ورودی، کاهش تدریجی اثر انتشار داخلی مشاهده شد (Xie, Zhu, Ramirez, & Jiang, 2021). به‌علاوه صالحی و لستاری (Salehi & Lestari, 2021) مدلی را برای پیش‌بینی عملکرد یک بیوفیلتر برای سولفورزدایی، بدون نیاز به اطلاعات قبلی و جزئی‌تر در مورد سینتیک و مکانیسم تجزیه زیستی H_2S توسعه دادند. یک مدل شبکه عصبی مصنوعی تک لایه پنهان (ANN) با استفاده از الگوریتم یادگیری پس‌انتشار نزولی گرادیان (GDBP) همراه با نرخ یادگیری و ضریب حرکت، توسعه و اعتبارسنجی شد. ورودی‌های مدل ANN، نرخ جریان گاز، زمان ماند و موقعیت محوری در بستر بیوفیلتر بود. راندمان حذف H_2S خروجی مدل بود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با ضریب تعیین (R^2=۰/۹۴) بالا وجود دارد (Salehi & Lestari, 2021).

در این تحقیق ابتدا در آزمایشگاه بیوفیلتر با دو بستر زغال‌زیستی و کمپوست با هدف حذف H_2S از جریان بیوگاز طراحی و ساخته شد. سپس فرآیند حذف با استفاده از مدل‌سازی سینتیکی، به‌صورت عددی نیز توصیف شد. در ادامه، پارامترهای سینتیکی مدل به کمک داده‌های آزمایشگاهی محاسبه گردید. دقت مدل‌ها با مقایسه نتایج محاسبه شده و داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. درنتیجه مهم‌ترین نوآوری این تحقیق را می‌توان توصیف و مدل‌سازی ریاضی حذف سولفید هیدوژن با استفاده از بسترهای زغال زیستی و کمپوست دانست که منجر به تعیین ثابت سینتیکی آن‌ها شده است.

1- Biochar

مواد و روش‌ها

آزمایش تجربی با بیوفیلتر

در این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی یک بیوفیلتر برای حذف H_2S از جریان بیوگاز طراحی و ساخته شد (شکل ۱). از زغال‌زیستی و کمپوست به‌صورت جداگانه به‌عنوان ذرات بستر بیوفیلتر استفاده شد تا امکان مقایسه عملکرد آن‌ها وجود داشته باشد. زغال‌زیستی از سر شاخه‌های درخت انگور تحت فرآیند پیرولیز تولید شد. زغال‌زیستی خرد شده و در قطعات استوانه‌ای با قطر حدود ۵ میلی‌متر و طول ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان بستر بیوفیلتر به‌کار برده شد. زغال‌زیستی به دلیل جذب و تخلخل بالا گزینه مناسبی برای بستر و مواد پرکننده بیوفیلتر می‌باشد. زغال‌زیستی طی فرآیند پیرولیز توسط امینی و همکاران تولید شد. بیشینه دمای پیرولیز در دستگاه ۴۵۰ درجه و به مدت دو ساعت و تحت فشار محیط تولید شده است (Amini, Ebrahimi-Nik, Abbaspour-Fard, & Rohani, 2021). علاوه‌بر زغال‌زیستی، از کمپوست هم به دلیل داشتن مواد مغذی برای میکروارگانیسم‌ها، به‌عنوان ذرات بستر استفاده شد. کمپوست گرانوله شده و به شکل ذرات استوانه‌ای با میانگین قطر و طول به‌ترتیب ۳ و ۷/۵ میلی‌متر بود. این بسترها درون یک استوانه به‌عنوان رآکتور بیوفیلتر با قطر ۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر قرار گرفتند. در ارتفاع‌های ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری این راکتور، سوراخی ایجاد شد تا در آن نقاط غلظت H_2S اندازه‌گیری شود. طبق دبی بیوگاز ورودی به بیوفیلتر، در این ارتفاعات، زمان‌های ماند ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ثانیه محقق می‌شد. مطابق شکل ۱، این سیستم شامل یک هاضم کود گاوی برای تولید بیوگاز که به‌صورت پیوسته تغذیه می‌شد و یک مخزن جمع‌آوری و نگهداری بیوگاز جهت تامین جریان پیوسته و اندازه‌گیری شده بیوگاز است. ابعاد هاضم شامل قطر ۴۶ و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و حجم روزانه تولید بیوگاز در هاضم در زمان اوج بین ۶۰ تا ۸۰ لیتر بود. برای حفظ دمای هاضم در محدوده مزوفیلیک و استقلال آن از دمای محیط از چند المنت غوطه‌ور در روغن استفاده شد که در پیرامون هاضم قرار گرفتند. از یک همزن با دوره ۴۰ ثانیه در ۴۲۰ ثانیه برای همزدن دایجست استفاده شد (شکل ۱). یعنی ۴۲۰ ثانیه خاموش و ۴۰ ثانیه بهم می‌زد. این مقادیر، تجربی بوده و بر مبنای هاضم‌های با خوراک مشابه تعیین شدند. بیوفیلتر بعد از مخزن بیوگاز قرار می‌گرفته است. بیوگاز تصفیه‌نشده از پایین بیوفیلتر وارد شده و از بالا خارج می‌شود. دبی بیوگاز ورودی به بیوفیلتر ۷۲ لیتر بر ساعت بود. تمام آزمایش‌ها در شرایط دمای اتاق انجام گرفت. متغیرهای مستقل در این تحقیق، ارتفاع‌های مختلف بستر و غلظت ترکیبات بیوگاز ورودی به بیوفیلتر بود. برای اندازه‌گیری ترکیبات بیوگاز شامل متان، دی‌اکسید کربن و اکسیژن و همچنین غلظت H_2S از تحلیلگر پرتابل بیوگاز (Multitec Sewerin -545) ساخت کشور آلمان استفاده شد. متغیر وابسته هم

در این تحقیق بازده حذف ترکیبات بیوگاز بود که به شکل حاصل تقسیم کاهش غلظت در اثر عبور از بیوفیلتر بر غلظت در بیوگاز ورودی بر حسب درصد تعریف شد.

شکل ۱- مجموعه هاضم تولید بیوگاز، مخزن ذخیره گاز و بیوفیلتر (۱- مخزن ذخیره بیوگاز، ۲- هاضم تولید بیوگاز و ۳- بیوفیلتر)

Fig.1 Digester, biogas storage, and biofilter (1- Biogas storage, 2- Digester, 3- Biofilter)

توسعه مدل

برای درک بهتر و تعمیم نتایج به‌دست‌آمده، مطالعات سینتیکی فرآیند با استفاده از مدل‌سازی ریاضی نیز انجام شد. مدل سینتیکی که در این تحقیق استفاده شد برگرفته از مدل لستاری و همکاران می‌باشد (Lestari, Sediawan, Syamsiah, & Teixeira, 2016). در این فرآیند، بیوفیلم روی سطح ذرات بستر بیوفیلتر قرار دارد و بیوگاز حاوی H_2S به ستون بیوفیلتر تغذیه می‌شود. H_2S موجود در گاز به‌وسیله باکتری‌های موجود در بیوفیلم به سولفور که ماده‌ای بی‌خطر است تبدیل شده و در سلول‌های باکتریایی ذخیره می‌شود. این مدل بر اساس فرضیات زیر بنا شده است:

۱- در یک ارتفاع مشخص از ستون بستر، در شعاع‌های مختلف جریان گاز ثابت و یکنواخت می‌باشد.

۲- غلظت H_2S در کل جریان گاز یکنواخت است.

۳- کل ستون دارای دمای یکسان می‌باشد.

دیاگرام انتقال جرم جزئی H_2S در اطراف بیوفیلم در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین پروفیل غلظت H_2S در اطراف بیوفیلم در شکل ۳ نمایش داده شده است. سایر فرضیات عبارتند از:

۱- غلظت H_2S در بیوفیلتر در یک ارتفاع مشخص (C_s)، یکسان فرض می‌شود. این ساده‌سازی بر این اساس می‌باشد که نفوذ به درون بیوفیلم نسبتا سریع انجام می‌شود، چون ضخامت بیوفیلم (δ) نسبتا کم است.

۲- در شعاع‌های مختلف در بستر، غلظت میکروارگانیسم‌ها در بیوفیلم در یک ارتفاع مشخص به‌صورت یکسان فرض می‌شود.

مراحل جذب و کاهش غلظت بدین شرح است؛ H_2S از قسمت توده گازی از طریق یک فیلم گازی به سطح بیوفیلم اطراف ذرات بستر منتقل می‌شود. سرعت انتقال جرم H_2S مشابه سرعت جذب می‌باشد. سرعت انتقال جرم از طریق فیلم گازی را می‌توان با رابطه (۱) تقریب زد (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2007).

$$N_A = k_g(C_g - C_{gi}) \quad (۱)$$

که در این رابطه، N_A سرعت انتقال جرم ($g.cm^{-3}$)، K_g ثابت انتقال جرم، Cg غلظت H_2S در بیوگاز ($g.\ cm^{-3}$) و C_{gi} غلظت سولفید هیدروژن در سطح مشترک فیلم گازی با بیوفیلم ($g.\ cm^{-3}$) می‌باشد. در ادامه فرآیند، H_2S در قسمت داخلی بیوفیلم منتشر می‌شود. در حین انتشار از طریق بیوفیلم، بخشی از H_2S توسط باکتری‌های موجود در بیوفیلم تبدیل می‌شود. میزان مصرف گوگرد توسط باکتری‌ها با رابطه مونود تقریب می‌شود (Monod, 1949):

$$r_A = \frac{\mu_{max} C_S}{C_S + K_S} \quad (۲)$$

شکل ۲- انتقال جرم H_2S در اطراف بیوفیلم (۱- بیوگاز، ۲- فیلم گازی، ۳- گاز، ۴- بیوفیلم، ۵- میکروب‌ها و ۶- بستر)

Fig.2. Hydrogen sulfide mass transfer around biofilm (1- Biogas, 2- Gasfilm, 3- Gas, 4- Biofilm, 5- Microbes, 6-Bed) (Lestari *et al*, 2016)

که در این رابطه r_A نرخ رشد باکتری (s^{-1})، Cs غلظت سولفیدهیدروژن در بیوفیلم ($g.cm^{-3}$)، K_s ثابت مونود و μ_{max} حداکثر نرخ رشد ویژه (s^{-1}) می‌باشد.

مرحله بعدی تبدیل H_2S به ترکیبات بی‌خطر سولفید و ذخیره آن در سلول‌های باکتریایی می‌باشد. باکتری‌ها با مصرف ترکیبات H_2S رشد می‌کنند. به‌طوری‌که نرخ رشد باکتری‌ها متناسب با نرخ مصرف ترکیبات H_2S در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، به‌مرور ضخامت بیوفیلم افزایش می‌یابد. جزئیات بیشتر از مدل‌های ریاضی حذف H_2S از بیوگاز با استفاده از بیوفیلم روی بستر بیوفیلتر در تحقیق لستاری و همکاران (Lestari *et al*, 2016) ارائه شده است.

در این تحقیق نیز با اعمال شرایط و پارامترهای مخصوص این مطالعه، دقت مدل‌ها به‌طور کامل‌تر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفتند و ثوابت سینتیکی ویژه این تحقیق، به‌دست آمدند.

نتایج و بحث

حذف H_2S در بیوفیلتر

در این تحقیق، ابتدا در مرحله آزمایشگاهی بیوفیلتر طراحی و ساخته شد و با اتصال به مخزن بیوگاز تأثیر بیوفیلتر بر حذف H_2S از بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا برای آزمایش کارایی بیوفیلتر، از زغال‌زیستی به‌عنوان ذرات بستر استفاده شد که منجر به نتایج خوبی در حذف H_2S از جریان بیوگاز شد. در شکل ۳ تأثیر بیوفیلتر با بستر زغال‌زیستی بر تغییر غلظت یا درصد ترکیبات بیوگاز نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، بستر زغال‌زیستی توانسته است به میزان زیادی غلظت H_2S را در بیوگاز کاهش دهد. در بیشترین حالت کاهش غلظت H_2S، از ۳۰۰ ppm و ۲۰۰ ppm به ۵۰ ppm تنزل داشته است. همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده عموما بازده حذف H_2S بیشتر از ۶۳٪ بوده و در چند مورد بالاتر از ۸۰٪ است که نشان‌دهنده موفقیت بیوفیلتر با بستر زغال‌زیستی در حذف H_2S می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در غالب موارد غلظت به زیر ۵۰ppm رسیده که طبق جدول ۱، بیوگاز خروجی از بیوفیلتر برای بعضی موتورهای احتراق داخلی مناسب می‌باشد. ضمن آن‌که طبق نمودار شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که بیوفیلتر عکس‌العمل بسیار خوبی نسبت به تغییر غلظت ناگهانی H_2S در خوراک ورودی داشته است و توانسته خود را با تغییر شرایط ناگهانی سازگار کند.

در ادامه، تأثیر بیوفیلتر بر غلظت سایر ترکیبات اصلی موجود در بیوگاز شامل O_2، CO_2، CH_4 بررسی شد (شکل ۴). مطابق شکل ۴ (a)، می‌توان بیان کرد که بیوفیلتر طراحی‌شده تنها باعث کاهش حدود ۲ تا ۶/۵۰ درصد در مقدار دی‌اکسید کربن شده است. همچنین مطابق نتیجه شکل ۴ (b) کاملا واضح است که بیوفیلتر طراحی‌شده تأثیر کمی بر کاهش غلظت اکسیژن موجود در بیوگاز داشته است به‌طوری‌که حداکثر مقدار کاهش آن برابر با ۰/۲ درصد بوده است. مهم‌تر آن‌که مطابق نتیجه شکل ۴ (c)، می‌توان گفت که بیوفیلتر طراحی‌شده تأثیر چندانی بر میزان متان موجود در بیوگاز تولیدشده نداشته است.

شکل ۳– کاهش غلظت H_2S و بازده حذف (RE) در روزهای مختلف

Fig.3. Decrease in H_2S concentration and removal efficiency in various days

شکل ٤– تغییر غلظت‌های دی‌اکسید کربن (a)، اکسیژن (b) و متان (c) در بیوفیلتر طراحی‌شده

Fig.4. Concentration changes of the CO_2 (a), O_2 (b), and CH_4 (c) in the biofilter

از آن‌جاکه یکی از اهداف تولید بیوگاز، تولید متان با غلظت بالا و بدون آلودگی می‌باشد، بر اساس این نتایج، می‌توان بیان کرد که بیوفیلتر طراحی‌شده علاوه بر کاهش قابل‌توجهی در غلظت H_2S موجود در بیوگاز، ولی تاثیر کاهشی چندانی بر مقدار متان تولید شده نداشته است، لذا نتیجه‌ای مطلوبی حاصل شده است.

تأثیر متغیرهای مختلف در بازده حذف H_2S

به‌منظور بررسی روند حذف H_2S در بستر بیوفیلتر، داده‌های تجربی مرتبط با غلظت H_2S در موقعیت‌های محوری مختلف بیوفیلتر در ستون‌های پر شده از ذرات زغال‌زیستی و کمپوست در جدول ۲ آورده شده است. از آن‌جایی که غلظت H_2S در بیوگاز ورودی در هر آزمایش ثابت نبود، برای تسهیل مقایسه، بازده حذف H_2S در موقعیت‌های مختلف در هر بستر نیز گزارش شده است.

جدول ۲- غلظت H_2S در ارتفاع‌های مختلف در بستر زغال زیستی و کمپوست

Table 2- H_2S concentration in biogas at various bed heights in biochar and compost

نوع بستر Bed type	ارتفاع بستر Bed height (cm)	غلظت H_2S H_2S concentration (ppm)	بازده حذف Removal efficiency (%)
زغال زیستی Biochar	0	185	0
	20	66	64
	40	21	89
	60	11	94
	0	105	0
	20	27	74
	40	11	90
	60	9	91
کمپوست Compost	0	70	0
	20	21	70
	40	19	73
	60	17	76
	0	35	0
	20	20	42
	40	18	49
	60	16	54

مطابق جدول ۲، برای دو نوع بستر زغال‌زیستی و کمپوست در بیوفیلتر طراحی‌شده، مشاهده می‌شود که راندمان حذف H_2S با افزایش فاصله از پایین ستون بیوفیلتر افزایش می‌یابد. این به‌واسطه فاصله بیشتر از پایین ستون است که منجر به افزایش زمان تماس بین بیوگاز و بیوفیلم می‌شود و در نتیجه بازدهی حذف H_2S افزایش می‌یابد. راندمان حذف H_2S برابر با ۹۴ درصد زمانی حاصل شد که بیوفیلتر با بستر زغال‌زیستی و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۶ سانتی‌متر تهیه شد. البته لازم به ذکر است که با توجه به نتایج جدول ۲، تغییر ارتفاع در بستر زغال‌زیستی تأثیر بیشتری نسبت به بستر کمپوست بر کاهش غلظت H_2S داشته است که این موضوع در شکل ۵ هم قابل‌تشخیص می‌باشد. بررسی همبستگی بین متغیرها نشان می‌دهد که بین بازده حذف و دو متغیر دیگر شامل غلظت H_2S و ارتفاع بستر همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد وجود دارد. به‌ترتیب همبستگی بین بازده حذف و ارتفاع بستر برای دو نوع بستر زغال‌زیستی و کمپوست برابر با ۰/۸۹ و ۰/۷۸ است. به همین ترتیب همبستگی بین بازده حذف و غلظت H_2S برای دو نوع بستر زغال‌زیستی و کمپوست برابر با ۰/۹۳- و ۰/۷۹- شد. بنابراین به‌ترتیب رابطه بین بازده حذف و ارتفاع بستر و غلظت H_2S مستقیم و معکوس می‌باشد.

مواد بستر بیوفیلتر

در این تحقیق از کمپوست و زغال‌زیستی به‌عنوان ماده پرکننده یا بستر بیوفیلتر استفاده شد. نتایج نشان داد که، در غلظت H_2S ورودی ۱۸۵ ppm در بستر زغال‌زیستی بازده حذف بیوفیلتر به ۹۴ درصد رسید. همچنین در بیوفیلتر با بستر کمپوست و غلظت ورودی ۷۰ ppm، بازده حذف به ۷۶ درصد رسید. مطابق نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی حاصل‌شده، قطعا بازده حذف H_2S برای ارتفاع بیشتر ستون بیوفیلتر حاصل خواهد شد. رنه و همکاران (Rene, López, Kim, & Park, 2013)، طی تحقیقی در مقیاس آزمایشگاهی، عملکرد بیوفیلتر سلولی ساکن با بستر مواد زیستی برای از بین بردن H_2S از گاز تولیدشده را ارزیابی کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که H_2S در نرخ متغیر بارگذاری تا ۱۳g H_2S $m^{-3}h^{-1}$ دارای راندمان حذف ۵۰

تا ۱۰۰ درصد بود. همچنین داس و همکاران (Das *et al*, 2019) با استفاده از بستر ترکیبی کمپوست و زغال‌زیستی به‌ترتیب با نسبت حجمی ۷۵ و ۲۵ درصد توانستند غلظت H_2S را به میزان ۳۳ gm^{-3} h^{-1} کاهش داده و به بازده ۹۹ درصد برسند. بنابراین نتایج این تحقیق با سایر تحقیقاتی که از بسترهای مشابه برای حذف سولفید هیدروژن استفاده کرده‌اند، قابل مقایسه می‌باشد.

مدل‌سازی

بر اساس روش مدل‌سازی شرح داده شده در بخش مواد و روش‌ها، سعی شد به کمک نرم‌افزار متلب برنامه‌ای تهیه شود تا به کمک آن و بر اساس نتایج عددی آزمایشگاهی، مدل‌ها کالیبره شوند. مقایسه بین نتایج مدل طراحی شده و داده‌های تجربی در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۶، می‌توان بیان کرد که توافق بسیار خوبی بین نتایج محاسبات مدل‌ها و داده‌های تجربی وجود دارد. زیرا مقدار R^2 بین دو مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل از H_2S برای همه موارد بیشتر از ۰/۹ شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل ریاضی پیشنهادی برای توصیف کمی حذف H_2S از بیوگاز با استفاده از بیوفیلم معتبر می‌باشد.

این مدل‌سازی‌ها با استفاده از تنظیم پارامترهای مدل کالیبره شدند. بیشتر مقادیر پارامترهای مدل بر اساس نتایج لستاری و همکاران (Lestari *et al*, 2016) تنظیم شد. بر این اساس پارامترهای مدل شرح داده‌شده در بخش مواد و روش‌ها شامل K_s =۰/۰۰۰۰۰۳۹g.cm^{-3}، K_g =۰/۰۰۸۶cm.s^{-1}، H_s = ۰/۹ و $Y_{x/s}$ = ۱۰ در نظر گرفته شد. مدل پیش‌بینی‌کننده مقدار حذف H_2S را بر حسب ارتفاع ستون بیوفیلتر تنها بر حسب پارامتر μ_{max} با هدف انطباق داده‌های پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی به روش سعی و خطا کالیبره شد. لازم به ذکر است که μ_{max} بیشترین تأثیر را بر نتایج مدل‌سازی دارد. مقدار μ_{max} برای بستر زغال‌زیستی برابر ۶/۵ ×۱۰$^{-۵}$ s^{-1} محاسبه شد. همچنین مقدار μ_{max} برای بستر کمپوست در غلظت ۷۰ ppm و ۳۵ ppm به‌ترتیب برابر ۰/۷۱ ×۱۰$^{-۵}$ s^{-1} و ۰/۳۴ ×۱۰$^{-۵}$ s^{-1} محاسبه شد. به‌علاوه می‌توان از میانگین μ_{max} برابر با ۰/۵۲ ×۱۰$^{-۵}$ s^{-1} برای بستر کمپوست استفاده کرد. مدل‌سازی سینتیکی در این مطالعه بر اساس دو فرض اصلی فرموله شد که آن‌ها عبارت بودند از شبه‌پایا بودن فرآیند در گاز و یکنواخت بودن غلظت H_2S در بیوفیلتر برای یک ارتفاع معین.

شکل ۵– غلظت H_2S در موقعیت‌های مختلف بستر زغال‌زیستی با غلظت‌های ورودی ۱۰۵ ppm (a) و ۱۸۵ ppm (b) و کمپوست با غلظت‌های ورودی ۳۵ ppm (c) و ۷۰ ppm (d)

Fig.5. H_2S concentration in different positions of biochar bed with input concentrations of (a) 105 ppm and (b) 185 ppm and compost with input concentrations of (c) 35 ppm and (d) 70 ppm

شکل ٦– نتایج ارزیابی توافق بین مقادیر غلظت H_2S اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط مدل در موقعیت‌های مختلف بستر زغال‌زیستی با غلظت‌های ورودی ۱۰۵ ppm (a) و ۱۸۵ ppm (b) و کمپوست با غلظت‌های ورودی ۳۵ ppm (c) و ۷۰ ppm (d)

Fig.6. The results of evaluating the agreement between the experimental and predicted H_2S concentration in different positions of the biochar bed with input concentrations of (a) 105 ppm and (b) 185 ppm and compost bed with input concentrations of (c) 35 ppm and (d) 70 ppm

همان‌طور که بیان شد مقدار μ_{max} در مدل بیوفیلتر با بستر زغال زیستی برابر $۶/۵ \times ۱۰^{-۵}\ s^{-1}$ شد که معادل با $۵/۶day^{-1}$ می‌شود. این نتیجه مطابق با نتیجه تحقیق هیجان و کلربزم (Heijnen & Kleerebezem, 1999) که مقدار $۵/۲۸day^{-1}$ را برای μ_{max} گزارش کردند، بود زیرا شرایط آزمایشگاهی آن‌ها نزدیک به این تحقیق بود و آن‌ها با سوزاندن بیومس تحت شرایط دمایی ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه، از زغال‌زیستی آن به‌عنوان منبع کربن برای بستر استفاده کردند. همچنین جیانگ و تای (Jiang & Tay, 2011) با بستر مواد طبیعی، غلظت ورودی ۳۵ ppm و زمان ماند ۱۰ ثانیه، نزدیک به شرایط این آزمایش، مقدار $۳/۶۱day^{-1}$ را برای μ_{max} به‌دست آوردند. به‌علاوه در این تحقیق، مقدار حداکثر نرخ رشد ویژه در بستر کمپوست برابر با $۰/۷۱ \times ۱۰^{-۵}\ s^{-1}$ به‌دست آمد که برابر $۰/۶day^{-1}$ می‌شود. در این مورد هم دیگر محققان با شرایط مشابه به نتایج مشابهی رسیده‌اند. ژو و همکاران (Xu *et al*, 2013) و نیل و گیکنوکس (Neill & Gignoux, 2006) در شرایط آزمایشگاهی مشابه از قبیل استفاده از خاک و بیومس و pH محدوده ۷ تا ۸، به‌ترتیب به مقادیر $۰/۶۷day^{-1}$ و $۰/۹۶day^{-1}$ برای μ_{max} رسیدند. ضمن این‌که، در این تحقیق علاوه‌بر آن‌که مقادیر μ_{max} در محدوده تحقیقات مشابه می‌باشد، بازده حذف H_2S هم دارای مقادیر بالایی است که از این نظر هم قابل مقایسه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این تحقیق، مدل‌سازی ریاضی حذف سولفید هیدروژن از جریان بیوگاز با استفاده از بیوفیلتر و تعیین ثوابت سینتیکی برای زغال‌زیستی و کمپوست به‌عنوان بسترهای متداول در بیوفیلتر می‌باشد. در آزمایشگاه، ابتدا در بستر زغال‌زیستی، غلظت H_2S در بیشترین میزان حذف از ۳۰۰ppm به ۵۰ppm کاهش یافت. بیوفیلتر تأثیر ناچیزی بر کاهش غلظت متان به‌عنوان ترکیب اصلی بیوگاز داشت. همچنین برای اندازه‌گیری تغییرات H_2S در ارتفاع‌های مختلف، بیوفیلتر با دو بستر زغال‌زیستی و کمپوست و با غلظت‌های متفاوت ورودی H_2S راه‌اندازی شد. نتایج نشان داد که در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر در بسترهای زغال‌زیستی و کمپوست غلظت H_2S به‌ترتیب از ۱۸۵ppm به ۱۱ppm (بازده حذف ۹۴٪) و از ۷۰ppm به ۱۷ppm

(بازده حذف ۷۶٪) کاهش داشت. مدل‌های ریاضی توسعه‌یافته به‌خوبی توانستند به‌صورت عددی فرآیند حذف H_2S را توصیف کنند که مقادیر μ_{max} در زغال‌زیستی و کمپوست به‌ترتیب برابر با $۶/۵ \times ۱۰^{-۵}\ s^{-1}$ و $۰/۵۲ \times ۱۰^{-۵}\ s^{-1}$ محاسبه شد. با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن آزمایشات تجربی، مدل‌های به‌دست‌آمده می‌توانند برای پیش‌بینی حذف سولفید هیدروژن و مقدمه‌سازی توسعه مقیاس بیوفیلتر به ابعاد صنعتی کمک کنند.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رساله دکتری با شماره ثبت ۴۹۵۴۲ در تاریخ ۱۳۹۷/۱۲/۱۴ می‌باشد و گروه نویسندگان، کمال تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه فردوسی مشهد بابت حمایت‌های مالی و امکاناتی انجام شده، اعلام می‌دارد. همچنین از سازمان جهانی یونسکو که به‌وسیله آکادمی جهانی علوم، تحت شماره پژوهانه RG ۱۸-۴۱۹ بعضی از تجهیزات اندازه‌گیری در این تحقیق را تأمین کردند، سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Allegue, L. B., & Hinge, J. (2014). Biogas upgrading Evaluation of methods for H_2S removal. Danish Technological Institute, 31(December), pp.1-31.
2. Al Mamun, M. R., & Torii, S. (2015). Removal of hydrogen sulfide (H_2S) from biogas using zero-valent iron. *Journal of Clean Energy Technologies*, *3*(6), 428-432. https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.236
3. Amini, A., Ebrahimi-Nik, M. A., Abbaspour-Fard, M. H., & Rohani, A. (2021). Preparation of charcoal pellets from grape pruning wastes and study of some of its characteristics. Faculty of Agriculture. Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian with English abstract)
4. Amini, H. R., & Reinhart, D. R. (2011). Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. *Waste Management*, *31*(9-10), 2020-2026. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.010
5. Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2007). Other mechanisms for mass transport. *Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc*.
6. Boumnijel, I., Amor, H. B., Chekir, H., & Hajji, N. (2016). Hydrogen sulphide removal from the effluents of a phosphoric acid production unit by absorption into chlorinated seawater under alkaline conditions. *Comptes Rendus Chimie*, *19*(4), 517-524. https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.10.010
7. Chung, Y. C., Huang, C., & Tseng, C. P. (1996). Microbial oxidation of hydrogen sulfide with biofilter. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, *31*(6), 1263-1278. https://doi.org/10.1080/10934529609376423
8. Das, J., Rene, E. R., Dupont, C., Dufourny, A., Blin, J., & van Hullebusch, E. D. (2019). Performance of a compost and biochar packed biofilter for gas-phase hydrogen sulfide removal. *Bioresource Technology*, *273*, 581-591. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.052
9. Delhoménie, M. C., & Heitz, M. (2005). Biofiltration of air: a review. *Critical reviews in biotechnology*, *25*(1-2), 53-72. https://doi.org/10.1080/07388550590935814
10. Devinny, J. S., Deshusses, M. A., & Webster, T. S. (2017). *Biofiltration for air pollution control*. CRC press.
11. Elias, A., Barona, A., Arreguy, A., Rios, J., Aranguiz, I., & Penas, J. (2002). Evaluation of a packing material for the biodegradation of H_2S and product analysis. *Process Biochemistry*, *37*(8), 813-820. https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00287-4
12. Fischer, M. E. (2010). *Biogas purification: H_2S removal using biofiltration* (Master's thesis, University of Waterloo). http://hdl.handle.net/10012/5458
13. Heijnen, J. J., & Kleerebezem, R. (1999). Bioenergetics of microbial growth. *Encyclopedia of bioprocess technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation*, *1*, 267-291.
14. Jiang, X., & Tay, J. H. (2011). Removal mechanisms of H2S using exhausted carbon in biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, *185*(2-3), 1543-1549. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.085
15. Lestari, R. A., Sediawan, W. B., Syamsiah, S., & Teixeira, J. A. (2016). Hydrogen sulfide removal from biogas using a salak fruit seeds packed bed reactor with sulfur oxidizing bacteria as biofilm. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *4*(2), 2370-2377. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.014
16. Lien, C. C., Lin, J. L., & Ting, C. H. (2014). Water scrubbing for removal of hydrogen sulfide (H2S) inbiogas from hog farms. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, *3*(02), 1-6. http://dx.doi.org/10.4236/jacen.2014.32B001
17. Marzouk, S. A., Al-Marzouqi, M. H., Teramoto, M., Abdullatif, N., & Ismail, Z. M. (2012). Simultaneous removal of CO_2 and H_2S from pressurized CO_2–H_2S–CH_4 gas mixture using hollow fiber membrane contactors. *Separation and Purification Technology*, *86*, 88-97. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.024
18. Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology*, *3*(1), 371-394. https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103

19. Namini, M. T., Heydarian, S. M., Bonakdarpour, B., & Farjah, A. (2008). Removal of H_2S from synthetic waste gas streams using a biotrickling filter. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, *5*(3), 40-51.
20. Neill, C., & Gignoux, J. (2006). Soil organic matter decomposition driven by microbial growth: a simple model for a complex network of interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, *38*(4), 803-811. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.07.007
21. Pipatmanomai, S., Kaewluan, S., & Vitidsant, T. (2009). Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H2S removal by activated carbon in small pig farm. *Applied Energy*, *86*(5), 669-674. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.007
22. Poloncarzova, M., Vejrazka, J., Vesely, V., & Izak, P. (2011). Effective Purification of Biogas by a Condensing-Liquid Membrane. *Angewandte Chemie International Edition*, *50*(3), 669 671. https://doi.org/10.1002/anie.201004821
23. Rattanapan, C., Boonsawang, P., & Kantachote, D. (2009). Removal of H_2S in down-flow GAC biofiltration using sulfide oxidizing bacteria from concentrated latex wastewater. *Bioresource Technology*, *100*(1), 125-130. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.049
24. Rene, E. R., López, M. E., Kim, J. H., & Park, H. S. (2013). Back propagation neural network model for predicting the performance of immobilized cell biofilters handling gas-phase hydrogen sulphide and ammonia. *BioMed Research International*, *2013*. https://doi.org/10.1155/2013/463401
25. Salehi, R., & Lestari, R. A. S. (2021). Predicting the performance of a desulfurizing bio-filter using an artificial neural network (ANN) model. *Environmental Engineering Research*, *26*(6). https://doi.org/10.4491/eer.2020.462
26. Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource Technology*, *95*(1), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.010
27. Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P., & Béland, M. (2006). Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes a review. *Canadian Biosystems Engineering*, *48*, 2.
28. Taheri, M., Mohebbi, A., Hashemipour, H., & Rashidi, A. M. (2016). Simultaneous absorption of carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulfide (H_2S) from CO_2–H_2S–CH_4 gas mixture using amine-based nanofluids in a wetted wall column. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *28*, 410-417. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.12.014
29. Xie, L., Zhu, J., Ramirez, M., & Jiang, C. (2021). CFD-single particle modeling and simulation of the removal of H_2S in a packed-bed bioreactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(4), 105692. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105692
30. Xu, X., Chen, C., Lee, D. J., Wang, A., Guo, W., Zhou, X., ... & Chang, J. S. (2013). Sulfate-reduction, sulfide-oxidation and elemental sulfur bioreduction process: modeling and experimental validation. *Bioresource Technology*, *147*, 202-211. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.113

Contents

Research Articles

Evaluation and Optimization of Energy and Environmental Indicators Using Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis (Case Study: Industrial Cattle Farms in Northern Khuzestan) 383
R. Fathi, M. Ghasemi Nejad-Raeini, R. Hesampour

Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh) 405
M. Nowroozipour, R. Tabatabaei koloor, A. Motevali

Identifying and Prioritizing the Key Factors Affecting the Efficient Maintenance Management in the Agricultural Industry Based on Empirical Studies 427
H. Soltanali, M. Khojastehpour

Automatic Detection of Plant Cultivation Rows Robot using Machine Vision (Case Study: Basil Plant) 453
M. Nadafzadeh, A. Banakar, S. Abdanan Mehdizadeh, M. R. Zare-Bavani, S. Minaei

A Multi-Objective Optimization to Determine The Optimal Patterns of Sustainable Agricultural Mechanization Using NSGA-II Algorithm 477
M. A. Hormozi, H. Zaki Dizaji, H. Bahrami, N. Monjezi

Fusion of Multispectral and Radar Images to Enhance Classification Accuracy and Estimate the Area under Various Crops Cultivation 493
M. Saadikhani, M. M. Maharlooei, M. A. Rostami, M. Edalat

Feasibility of Soil Texture Determination Using Acoustic Signal Processing of a Cone Penetrometer 509
J. Nasrollahi Azar, R. Farrokhi Teimourlou, V. Rostampour

Experimental Study and Mathematical Modeling of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas 521
M. Zarei, M. R. Bayati, M. A. Ebrahimi-Nik, B. Hejazi, A. Rohani

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 13 No. 4 2023

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Editor in charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

General Chief Editor: Prof. M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Abbaspour-Fard, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Aboonajmi, M.	Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
Aghkhani, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Alimardani, R.	Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Emadi, B.	Adjunct Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
Ghazanfari Moghaddam, A.	Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
Kadkhodayan, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Khoshtaghaza, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
Loghavi, M.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
Modarres Razavi, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Mohtasebi, S. S.	Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
Nasirahmadi, A.	Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
Pourreza, A.	Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States of America
Raji, A.	Professor, Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
Rohani, A.	Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Saiedirad, M. H.	Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institue, Mashhad, Iran
Sayasoonthorn, S	Assistant Professor, Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

Web Site: http://jame.um.ac.ir

Ferdowsi University of Mashhad

Vol. 13 No. 4

2023

Journal of Agricultural Machinery

Iranian Society of Mechanical Engineers (ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

Evaluation and Optimization of Energy and Environmental Indicators Using Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis (Case Study: Industrial Cattle Farms in Northern Khuzestan) 383
R. Fathi, M. Ghasemi Nejad-Raeini, R. Hesampour

Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh) 405
M. Nowroozipour, R. Tabatabaei koloor, A. Motevali

Identifying and Prioritizing the Key Factors Affecting the Efficient Maintenance Management in the Agricultural Industry Based on Empirical Studies 427
H. Soltanali, M. Khojastehpour

Automatic Detection of Plant Cultivation Rows Robot using Machine Vision (Case Study: Basil Plant) 453
M. Nadafzadeh, A. Banakar, S. Abdanan Mehdizadeh, M. R. Zare-Bavani, S. Minaei

A Multi-Objective Optimization to Determine The Optimal Patterns of Sustainable Agricultural Mechanization Using NSGA-II Algorithm 477
M. A. Hormozi, H. Zaki Dizaji, H. Bahrami, N. Monjezi

Fusion of Multispectral and Radar Images to Enhance Classification Accuracy and Estimate the Area under Various Crops Cultivation 493
M. Saadikhani, M. M. Maharlooei, M. A. Rostami, M. Edalat

Feasibility of Soil Texture Determination Using Acoustic Signal Processing of a Cone Penetrometer 509
J. Nasrollahi Azar, R. Farrokhi Teimourlou, V. Rostampour

Experimental Study and Mathematical Modeling of Hydrogen Sulfide Removal from Biogas 521
M. Zarei, M. R. Bayati, M. A. Ebrahimi-Nik, B. Hejazi, A. Rohani