



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۴

جلد ۱۵

سال ۱۴۰۴

(شماره پیاپی: ۳۸)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

۴۹۳ بررسی اثر زمان برداشت انگور و خشک کردن به روش خلاء (VD) بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی کشمش رقم بی دانه سفید قوچان

فائزه کیومرثی دربندی، یحیی سلاح ورزی، بهرام عابدی، مریم کمالی، حسن صدرنیا

۵۱۳ بررسی عملکرد تعاونی های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان با استفاده از رهیافت ترکیبی Delphi-AHP-SWOT

مهدی بامداد، مرتضی زنگنه، سیدحسین پیمان

۵۳۱ ارزیابی عملکرد یک پوست کن گردو مجهز به صفحه برشی گردان

هادی صمیمی اخیحجانی، محمد صالح برقی جهرمی

۵۴۹ اندازه گیری بلادرنگ زبری سطح خاک در شرایط مزرعه ای، با استفاده از حسگرهای لیزری و مادون قرمز

نسیم صالحی بابامیری، حسین حاجی آقا علیزاده، مجید دولتی

۵۶۹ امکان سنجی و مکان یابی نصب سامانه روشنایی جاده ای با استفاده از انرژی باد در استان کرمانشاه

بهروز دوستی، عباس عساکره

۵۸۹ ارزیابی مزرعه ای و اقتصادی استفاده از پهیاد سم پاش در مقایسه با سم پاش بوم دار به منظور کنترل علف های هرز و بیماری زنگ زرد در مزارع گندم

مجتبی صفائی نژاد، محمود قاسمی نژاد رائی، مرتضی تاکی

۶۰۷ بررسی اثر غلظت سوبسترا استات سدیم و میزان اکسیژن دهی بر ولتاژ سیستم و رفع آلاینده گی در پیل سوختی میکروبی-گیاهی

شهریار شکری، وحید رستم پور، کاوه ملازاده، صابر امیری، ایوب فتح الهی قره چپوق

نشریه ماشین های کشاورزی

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

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

زمستان ۱۴۰۴

جلد ۱۵ شماره ۴

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین

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

ابونجمی، محمد

گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، ایران

پوررضا، علیرضا

گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی، دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا

خوش تقاضا، محمدهادی

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

راجی، عبدالغنی

گروه مهندسی کشاورزی و محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه ایبادان، نیجریه

روحانی، عباس

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

سعیدی راد، محمدحسین

مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مشهد، ایران

سوپاکیت، سایاسونترن

دانشکده کشاورزی، دانشگاه کاستسارت، تایلند

عباسپور فرد، محمدحسین

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

علیمردانی، رضا

گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس کرج، ایران

عمادی، باقر

گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک، دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا

غضنفری مقدم، احمد

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

کدخدایان، مهران

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

لغوی، محمد

گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز، ایران

محتسبی، سید سعید

گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مدرس رضوی، محمدرضا

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

نصیراحمدی، ابوذر

گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه کاسل، آلمان

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

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

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

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

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

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۴۹۳ بررسی اثر زمان برداشت انگور و خشک کردن به روش خلاء (VD) بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی کشمش رقم بی‌دانه سفید قوچان
فائزه کیومرثی دربندی، یحیی سلاح ورزی، بهرام عابدی، مریم کمالی، حسن صدرنیا
- ۵۱۳ بررسی عملکرد تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان با استفاده از رهیافت ترکیبی Delphi-AHP-SWOT
مهدی بامداد، مرتضی زنگنه، سیدحسین پیمان
- ۵۳۱ ارزیابی عملکرد یک پوست کن گردو مجهز به صفحه برشی گردان
هادی صمیمی اخیجهانی، محمد صالح برقی جهرمی
- ۵۴۹ اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک در شرایط مزرعه‌ای، با استفاده از حسگرهای لیزری و مادون قرمز
نسیم صالحی بابامیری، حسین حاجی آقا علیزاده، مجید دولتی
- ۵۶۹ امکان‌سنجی و مکان‌یابی نصب سامانه روشنایی جاده‌ای با استفاده از انرژی باد در استان کرمانشاه
بهرروز دوستی، عباس عساکره
- ۵۸۹ ارزیابی مزرعه‌ای و اقتصادی استفاده از پهاد سم‌پاش در مقایسه با سم‌پاش بوم‌دار به منظور کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد در مزارع گندم
مجتبی صفائی نژاد، محمود قاسمی نژاد رائینی، مرتضی تاکی
- ۶۰۷ بررسی اثر غلظت سوبسترا استات سدیم و میزان اکسیژن‌دهی بر ولتاژ سیستم و رفع آلاینده‌گی در پیل سوختی میکروبی-گیاهی
شهریار شکری، وحید رستم‌پور، کاوه ملازاده، صابر امیری، ایوب فتح‌اللهی قره‌چپوق

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 491-509

Evaluating the Effects of Grape Harvest Time and Vacuum Drying on the Physicochemical Properties of White Seedless Quchan Raisin Cultivar

F. Kiumarsi Darbandi¹, Y. Selahvarzi^{1*}, B. Abedy¹, M. Kamali¹, H. Sadrnia²

1- Department of Horticulture and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

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

Received: 22 April 2024

Revised: 02 June 2024

Accepted: 09 June 2024

Available Online: 14 July 2025

How to cite this article:

Kiumarsi Darbandi, F., Selahvarzi, Y., Abedy, B., Kamali, M., & Sadrnia, H. (2025). Evaluating the Effects of Grape Harvest Time and Vacuum Drying on the Physicochemical Properties of White Seedless Quchan Raisin Cultivar. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 491-509. <https://doi.org/10.22067/jam.2024.87715.1241>

Introduction

Various methods have been used to dry grapes. The main purpose is to increase shelf life, produce high-quality dried grapes, and also produce raisins to reduce post-harvest losses. Different methods can be used to dry grapes. Sun drying is the method traditionally used to dry commercial raisins. However, this process is very slow and depends mainly on weather conditions, which can cause microbial and insect contamination in dried fruits and hence, reduce their quality. Recently, advanced vacuum drying techniques have been used in order to increase the amount of water removal and ensure better quality of raisins. Vacuum drying (VD) is a process in which wet materials are dried under subatmospheric pressure. Vacuum pressure reduction increases the mass of water between the fruit and its surroundings, thereby reducing the heat needed for rapid drying. Therefore, vacuum drying is a promising technology for drying grapes and has been used in current works. Preserving the quality of raisins and maintaining their essential nutritional indicators is a vital aspect of effective management strategies aimed at enhancing product quality. This improvement boosts demand for raisins in both domestic and international markets. Finding new methods of drying while maintaining the desired quality and preventing contamination are other factors that determine the quality of raisins. On the other hand, it is very important to determine the right time to harvest grapes according to the climatic conditions of each region and its effect on the quality of raisins. For this purpose, in this study, some quantitative, qualitative, and nutritional indicators related to raisins were compared between the sun-dried and vacuum drying methods for the white Quchan cultivar, evaluating the potential of each method in this field.

Materials and Methods

This research was conducted in 2021-2023 in one of the vineyards of the Quchan region in Iran. Quchan city is located within the geographical coordinates of 36 to 37 degrees north latitude and 58 degrees 10 minutes to 58 degrees 58 minutes east longitude. The relative humidity of this city is 40% in summer, 65% in spring, and 60% in autumn. Based on 10-year statistics, the average annual rainfall in this area is 274 mm. This research project was done in the form of a split plot, based on a randomized complete block design with four replications. Experimental factors include three harvesting times (August 27th, September 6th, and 16th) and four modes of



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.87715.1241>

drying (sun drying, and vacuum drying at 60, 70, and 80°C). Fruits were harvested at three different stages, with time intervals of 10 days from August 27 to September 16, based on the sugar content in the pods and the ratio of total soluble solids (TSS) to titratable acidity (TA). At each harvest time, the grapes were dried in four different ways. In the first method, the grapes were dried traditionally in the open environment and in front of the sunlight. In the second method, the grapes were dried using a vacuum system at three different temperatures of 60, 70, and 80°C.

Results and Discussion

In general, the interaction of harvesting time and drying method had a significant effect on most of the studied traits. The grape drying methods employed in this research significantly influenced the levels of phenolic compounds, flavonoids, and the antioxidant capacity of the resulting white seedless raisins. The amount of these compounds in sun-dried raisins was lower than the raisins produced using the vacuum drying method. The interaction effect of harvesting time and drying method on the production raisin yield was significant at the 1% probability level. The highest yield was related to the third harvest under the vacuum dryer at 60°C (305.52 g kg⁻¹), and the lowest yield was related to the first and second harvests with an average of 270.29 g kg⁻¹ in the sun-dried method. In general, the highest amount of TSS was related to the treatments of the third harvest, which was observed in vacuum drying at 60°C. After that, no significant difference was observed in temperatures of 70 and 80°C. The amount of antioxidant, phenol, flavonoid, and total sugar content in the vacuum drying treatment was higher than the sun drying method. The total soluble sugars in sun-dried raisins were, on average, 22.68% lower compared to those dried using the vacuum method. In terms of total microbial count, the highest microbial load (126.51 Cfu g⁻¹) was related to sun-dried raisins. The treatments under vacuum drying at all three temperatures of 60, 70, and 80 °C showed the lowest amount of microbial load (almost zero). The low level of microbial contamination in raisins produced by the vacuum method in this research can be attributed to the short drying time and also the lack of contact with the surrounding environment.

Conclusion

Vacuum drying is a new technology that has been developed in recent years, employing a lower pressure in the chamber to increase the moisture transfer during the drying process. In this method, due to the lack of oxygen in the environment, some undesirable biochemical reactions such as browning, oxidation, and degradation reactions are reduced. In addition, the periodic pressure change can create fissured and porous structures in the skin of the sample, thereby increasing the mass transfer through the pores. Overall, the results of this research showed that the raisins produced in the third harvest and using vacuum drying at 60°C had better quality than other treatments in terms of biochemical and sensory characteristics, including flavor, texture, and color. It can also be concluded that the vacuum drying method is a good alternative to traditional drying methods.

Keywords: Antioxidant, Flavonoid, Microbial load, Phenol content, Vacuum dryer

بررسی اثر زمان برداشت انگور و خشک کردن به روش خلاء (VD) بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی کشمش رقم بی‌دانه سفید قوچان

فائزه کیومرثی دربندی^۱، یحیی سلاح ورزی^{۱*}، بهرام عابدی^۱، مریم کمالی^۱، حسن صدرنیا^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

چکیده

با توجه به اهمیت زمان برداشت انگور بر کیفیت کشمش، تعیین زمان مناسب برداشت و بهینه‌سازی روش‌های خشک کردن برای دستیابی به تولید کشمش با کیفیت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور بررسی اثر متقابل زمان برداشت (۵، ۱۵ و ۲۵ شهریور ماه) و روش خشک کردن (آفتاب خشک، خشک‌کن خلاء ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس) بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی کشمش رقم بی‌دانه سفید، تحقیقی در قالب آزمایش کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی در ۴ تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که برهمکنش زمان برداشت و روش خشک کردن بر صفات فیزیکوشیمیایی نظیر مواد جامد محلول، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فنل کل، فلاونوئید و بار میکروبی تأثیر معنی‌داری نشان داد. بیشترین مقدار مواد جامد محلول مربوط به تیمار ۲۵ شهریور ماه و کمترین آن مربوط به تیمار ۵ شهریور ماه بود. میزان آنتی‌اکسیدان، محتوای فنل، فلاونوئید و قند کل در تیمار خشک‌کن خلاء بیشتر از روش آفتاب خشک بود. بیشترین بار میکروبی (10^5 CFU/g) مربوط به کشمش آفتاب خشک بود و در مقابل تیمار تحت خشک‌کن خلاء در هر سه دما کمترین مقدار بار میکروبی (تقریباً صفر) را داشتند. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که کشمش تولیدشده در برداشت سوم و خلاء ۶۰ درجه سلسیوس از نظر صفات بیوشیمیایی نسبت به سایر تیمارها کیفیت مطلوب‌تری داشت و می‌توان چنین اظهار کرد که روش خشک‌کن خلاء، جایگزین مناسبی برای روش‌های خشک کردن سنتی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، بار میکروبی، باز جذب آب، خشک‌کن خلاء، فلاونوئید، محتوای فنل

مقدمه

اهمیت بالایی برخوردار است. در سال ۲۰۱۸-۲۰۱۷، تولید جهانی کشمش ۱/۱۴۹ میلیون تن بوده است. عمده تولید کشمش مربوط به کشورهای ترکیه، ایالات متحده، چین و ایران است که در مجموع ۷۳ درصد از تولید جهانی را تشکیل می‌دهند (USDA Raisins, 2018). خشک کردن انگور اساساً آب اضافی را تا زمانی که سطح رطوبت مناسبی به‌دست آید حذف می‌کند و رشد باکتری‌ها، کپک‌ها و مخمرها را مهار می‌کند، تخریب آنزیم را کند می‌کند و اکثر واکنش‌های فیزیکی و بیوشیمیایی را غیرفعال می‌کند. نگهداری انگور به‌صورت کشمش مزایای دیگری نیز دارد از جمله کاهش وزن و حجم، که به کاهش هزینه‌های بسته‌بندی، ذخیره‌سازی و حمل و نقل نیز کمک می‌کند (Wang et al., 2016).

روش‌های متعددی برای خشک کردن انگور به‌کار گرفته‌شده است که هدف اصلی افزایش ماندگاری آن، تولید انگور خشک با کیفیت بالا و همچنین تولید کشمش برای کاهش تلفات پس از

انگور یکی از عمده‌ترین محصولات کشاورزی رایج است که از دوران ماقبل تاریخ کشت شده است. بر اساس داده‌های سازمان غذا و کشاورزی (FAO & OIV, 2016) و سازمان بین‌المللی انگور برای سال ۲۰۱۹، تولید جهانی انگور در حال حاضر بیش از ۷۷/۱۴ میلیون تن است. در میان محصولات که از انگور به‌دست می‌آیند، کشمش از گذشته تاکنون بسیار محبوب بوده است و از آن‌جایی که به‌خوبی می‌تواند کیفیت غذایی انگور را حفظ کند و حمل و نقل آسانی دارد، از

۱- گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* - نویسنده مسئول:
(Email: selahvarzi@um.ac.ir)

برداشت است. برای خشک کردن انگور از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. خشک کردن آفتابی، روشی است که به‌طور سنتی برای خشک کردن کشمش تجاری استفاده می‌شود. با این حال، این فرایند بسیار کند است و عمدتاً به شرایط آب و هوایی بستگی دارد، که می‌تواند باعث ایجاد آلودگی میکروبی و حشرات در میوه‌های خشک‌شده شود و از این‌رو، کیفیت آن‌ها را کاهش دهد (Wang et al., 2017).

اخیراً، تکنیک‌های پیشرفته خشک کردن، مانند خشک شدن در آون، خشک شدن در مایکروویو، خشک کردن با خلاء، خشک شدن با مادون قرمز و بسیاری دیگر به‌منظور افزایش میزان آبگیری و تضمین کیفیت بهتر کشمش استفاده شده است (Wang et al., 2017).

خشک کردن خلاء (VD¹) فرایندی است که طی آن مواد مرطوب تحت فشار زیر اتمسفر خشک می‌شوند. کاهش فشار توسط خلاء باعث افزایش جرم آب بین میوه و محیط اطراف آن می‌شود که این امر حرارت مورد نیاز برای خشک شدن سریع را کاهش می‌دهد و محصول با کیفیتی را تهیه می‌کند (Parikh, 2015).

خشک کردن خلاء فناوری جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته است و از فشار متفاوتی در محفظه برای افزایش انتقال رطوبت در طی فرایند خشک کردن استفاده می‌کند. در این روش به دلیل کمبود اکسیژن در محیط، برخی واکنش‌های بیوشیمیایی نامطلوب مانند قهوه‌ای شدن، اکسیداسیون و واکنش‌های تخریب را می‌توان کاهش داد. علاوه بر این، تغییر فشار دوره‌ای می‌تواند ساختارهای شکاف‌دار و متخلخل در پوست نمونه ایجاد کند و با این کار انتقال جرم از طریق منافذ را افزایش می‌دهد. بنابراین، خشک کردن خلاء یک فناوری امیدوارکننده برای خشک کردن انگور است و در کارهای فعلی مورد استفاده قرار گرفته است (Parikh, 2015).

حفظ و جلوگیری از کاهش شاخص‌های مهم در ارزش غذایی کشمش یکی از برنامه‌های مدیریتی موثر در افزایش کیفیت و در نتیجه تقاضا برای خرید کشمش در بازارهای داخلی و خارجی است. یافتن روش‌های نوین خشک کردن با حفظ کیفیت مطلوب و جلوگیری از آلودگی از دیگر عوامل تعیین‌کننده کیفیت کشمش است. از طرف دیگر تعیین زمان مناسب برداشت انگور با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه و تاثیر آن بر کیفیت کشمش بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور در این بررسی برخی از شاخص‌های کمی، کیفی و تغذیه‌ای مربوط به کشمش در دو روش آفتابی و خشک‌کن خلاء در رقم بی‌دانه سفید، ارزیابی و پتانسیل هر روش در این زمینه مورد مقایسه قرار گرفتند.

رسیدن میوه‌ها نه‌تنها بر ویژگی فیزیکی‌شیمیایی مواد اولیه تأثیر می‌گذارد، بلکه بر فرایند پردازش و کیفیت محصول نیز اثرگذار است

تا ۴۰ روز نگهداری در انبار اکثر خصوصیات تغذیه‌ای و آنتی‌اکسیدانی خود را بدون هیچ‌گونه تیمار شیمیایی حفظ می‌کنند. میوه‌های برداشت‌شده در زمان سوم (۷ مهر ماه) یعنی برداشت دیرهنگام در شرایط آب و هوایی شهرستان ارومیه به خاطر داشتن خصوصیات کیفی و تغذیه‌ای مطلوب، برای تازه‌خوری مناسب‌تر می‌باشند (Pileh, Farokhzad, Esmaili, & Dolati Baneh, 2015).

می‌توان اظهار کرد که با نزدیک شدن به انتهای فصل برداشت، با استناد بر این که میزان مواد جامد محلول، دکستروز و شاخص طعم در بیشترین مقدار خود و اسیدیته انگور در کمترین مقدار خود بوده است، بیشترین بازارپسندی را دارا می‌باشد. بررسی اثر متقابل انبارمانی و زمان برداشت نشان داد که نمونه‌های برداشت‌شده در اواخر زمان برداشت قبل از انتقال به سردخانه، دارای بالاترین میزان شاخص طعم بوده‌اند (Ghodsvali, Mohamadi, Mohamadi Chianeh, & Rashizadeh, 2015). وانگ و همکاران (Wang et al., 2017) دریافتند که با افزایش رسیدگی انگور، غلظت کل فنل، محتوای جامد محلول و pH کشمش به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته در حالی که میزان اسیدیته قابل‌تراکم کاهش یافته است. فرآیند خشک کردن، که هوای اطراف محصول را در یک محفظه بسته توسط یک پمپ خلاء حذف می‌کند و منجر به کاهش فشار برای افزایش مصنوعی اختلاف فشار بخار آب بین محصول و محیط اطراف می‌شود، خشک کردن به روش خلاء نامیده می‌شود. رطوبت نامحدود را می‌توان به‌راحتی از محصول غذایی حساس به حرارت با استفاده از خشک‌کن خلاء حذف کرد (Parikh, 2015). این فناوری در فرآوری کشمش که در آن انگور تحت فشار خلاء خشک می‌شود، بسیار موفق عمل کرده است. خلاء انتقال جرم بین غذا و محیط اطراف را افزایش می‌دهد که نیاز به حرارت کمتری دارد و در نتیجه تولید محصولات با کیفیت بهتر را تسهیل می‌کند (Khiari, Zemni, & Mihoubi, 2019). ایوبی و همکاران (Ayoubi, Sedaghat, Kashaninejad, Mohebbi, Nassiri Mahalati, 2016) دریافتند استفاده از هوای خشک‌کننده ۶۰ درجه سانتی‌گراد، چروکیدگی و کمترین شاخص قهوه‌ای شدن و مطلوب‌ترین مقادیر بافت را به دنبال داشت و بیشترین مقدار بازجذب آب مربوط به کشمش خشک‌شده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بود. سرعت جریان هوای خشک‌کننده تنها بر شاخص قهوه‌ای شدن تأثیر معنی‌داری گذاشت. کریمی و میرزایی (Karimi & Mirzaei, 2017) دریافتند روش‌های مختلف خشک کردن تأثیر معنی‌داری بر زمان لازم برای تهیه کشمش، سرعت خشک شدن و عملکرد کشمش تولیدی دارند که این اختلاف در سرعت خشک شدن روی بسیاری از شاخص‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی کشمش تأثیر می‌گذارد. کشمش تیزابی در مقایسه با کشمش آفتاب خشک و سایه خشک محتوای

این پژوهش رقم انگور بی‌دانه سفید استفاده شده است که از ارقام مهم کشمشی در منطقه قوچان می‌باشد (شکل ۱). این طرح پژوهشی به صورت اسپیل‌پلات و بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار صورت گرفته است. فاکتورهای آزمایشی شامل ۳ زمان برداشت (۵، ۱۵ و ۲۵ شهریور ماه) و چهار سطح خشک‌کن (آفتاب خشک، خشک‌کن خلاء ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس) می‌باشد. میوه‌ها در سه مرحله مختلف با فواصل زمانی ۱۰ روز از ۵ شهریور ماه تا ۲۵ شهریور ماه براساس درصد قند حبه‌ها و نسبت TSS به TA برداشت شدند. در هر زمان برداشت انگورها به ۴ روش مختلف خشک شد. روش اول انگورها به صورت سنتی در محیط باز و مقابل نور خورشید خشک شد و در روش دوم انگورها با استفاده از سیستم خلاء در سه دمای مختلف ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس خشک گردید.

کشمش تهیه‌شده برای ارزیابی شاخص‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیکی مانند عملکرد کشمش تولیدی، شاخص طعم، درصد رطوبت، بازجذب آب، میزان مواد جامد محلول، اسیدهای قابل تیتراسیون، pH، محتوای فنل کل، فلاونوئیدکل، محتوای آنتی‌اکسیدان کل و آزمون میکروبی به آزمایشگاه گروه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شد.

دستگاه خشک‌کن خلاء

دستگاه خشک‌کن خلاء مدل sadran-HCP212 شامل ۴ بخش مجزا محفظه خشک‌کن، کندانسور، کنترلر و پمپ خلاء می‌باشد (شکل ۲). محدوده دمایی قابل تنظیم در این دستگاه ۲۰ الی ۱۲۰ درجه سلسیوس است و محدوده خلاء ۵ تا ۱۵۰ میلی‌بار می‌تواند تنظیم شود.

عملکرد کشمش تولیدی

انگور برداشت‌شده در هنگام برداشت و کشمش تهیه‌شده حاصل از آن را وزن کرده و طبق رابطه (۱) عملکرد محاسبه گردید.

$$(1) \quad 100 \times (\text{وزن میوه} / \text{وزن کشمش}) = \text{عملکرد کشمش کیلوگرم}$$

میزان رطوبت کشمش

بدین منظور مقدار ۲ گرم از نمونه در داخل یک پتری‌دیش در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا وزن آن ثابت شود. سپس میزان رطوبت از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$(2) \quad (W_1 - W_2) \times 100 / W_1 = \text{درصد رطوبت}$$

که در آن W_1 وزن اولیه نمونه و W_2 وزن نمونه پس از خشک شدن است. برای مقایسه اثر خشک کردن و روش تهیه کشمش بر میزان فنل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها بر حسب وزن تر محاسبه شد (Sawheny, Pangavhane, & Sarsavadia, 1999).

ترکیب‌های فنلیو فلاونوئید^۱ و ظرفیت پاداکسندگی^۲ بیشتری داشت که ممکن است با سرعت خشک شدن سریع‌تر و در نتیجه اکسایش کمتر ترکیب‌های فنلی و پاداکسندگی در مقایسه با دو روش دیگر مرتبط باشد. زی و همکاران (Xie et al., 2017) دریافتند که برای خشک کردن توت با استفاده از خشک‌کن خلاء در شرایط مختلف، خشک کردن حدود ۷ تا ۱۰ ساعت طول کشیده است، با این حال، خشک کردن در آفتاب با همان میزان رطوبت حدود ۵-۴ روز طول می‌کشد. دنگ و همکاران (Deng et al., 2018) گزارش کردند که فلفل قرمز خشک‌شده در خشک‌کن خلاء از نظر رنگدانه قرمز، محتوای اسید اسکوربیک و ظرفیت آنتی‌اکسیدان، مقدار قابل توجهی بالاتر از نمونه‌های خشک‌شده توسط خشک‌کن هوای گرم و مادون قرمز است. در یک پژوهش انجام‌شده توسط زو و همکاران (Zhou, Li, Lyng, & Wang, 2018) تأثیر فصل رشد بر تجمع ترکیبات فنلی و خواص آنتی‌اکسیدانی پنج رقم انگور مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که محتوای فنل در دانه‌ها و پوست انگورهایی که در زمستان پرورش داده می‌شود به‌طور قابل توجهی بیشتر از آن‌هایی است که در تابستان کشت می‌شود. برخی دیگر از نویسندگان گزارش داده‌اند که تغییرات فصلی ترکیبات فنلی و خواص آنتی‌اکسیدانی در انگور نیز توسط عوامل آب و هوایی دیگر مانند تابش خورشید، بارندگی بین فصول مختلف رشد ایجاد شده است.

در ایران تاکنون پژوهشی مبنی بر خشک کردن انگور به روش خلاء صورت نگرفته است و از آن‌جا که رقم انگور بی‌دانه سفید یک رقم مهم و تجاری در منطقه قوچان محسوب می‌شود، بررسی روش‌های نوین خشک‌کاری از جمله روش خلاء می‌تواند اثر به‌سزایی بر افزایش بازارپسندی و صادرات این محصول باارزش داشته باشد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر مقایسه کلی خواص فیزیکیوشیمیایی کشمش آفتاب خشک با روش خشک‌کن تحت خلاء و بررسی اثر زمان برداشت انگور و سطوح مختلف خشک‌کن خلاء بر کیفیت کشمش و همچنین به‌دست آوردن مطلوب‌ترین دمای خشک‌کن خلاء جهت تولید کشمش صادراتی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۰ در یکی از باغات انگور منطقه قوچان انجام شده است. شهر قوچان در مدار جغرافیایی ۳۶ درجه تا ۳۷ درجه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. میزان رطوبت نسبی این شهرستان در تابستان ۴۰٪، در بهار ۶۵٪ و در پاییز ۶۰٪ است. براساس آمار ۱۰ساله، میانگین بارندگی سالیانه در این ناحیه ۲۷۴ میلی‌متر است. در

- 1- Flavonoid
- 2- Antioxidant activity

بازجذب آب

برای اندازه‌گیری میزان بازجذب آب، نمونه کشمش وزن شده به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش ۱۰۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شد. سپس نمونه‌های مرطوب شده آبکشی شده و دوباره وزن می‌شوند.

نسبت بازجذب آب کشمش از رابطه (۳) محاسبه شد (Kerdpiboon, Kerr, & Devahastin, 2006).

$$\text{نسبت بازجذب آب} = \frac{m_2}{m_1} \quad (3)$$

وزن اولیه نمونه و m_2 وزن نمونه مرطوب بعد از بازجذب آب



شکل ۱- انگور رقم بی‌دانه سفید

Fig.1. White seedless grapes



شکل ۲- دستگاه خشک‌کن خلاء: ۱- محفظه خشک‌کن، ۲- کندانسور، ۳- کنترلر و ۴- پمپ خلاء

Fig. 2. The vacuum dryer: 1. Drying chamber, 2. Condenser, 3. Controller, and 4. Vacuum pump

چینی له شد و به تدریج ۳ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه گشت. عصاره به دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه در ۴۰۰۰ rpm سانترفیوژ شد. قسمت روشن‌تر نمونه‌ها را به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده و بعد از قرائت pH عصاره با دستگاه pH متر (827, metrohm, Japan)، جهت تعیین اسیدیته قابل تیتر با محلول سود ۰/۱ نرمال تا رسیدن به pH ۸/۳ تیتر شد و بر اساس میلی‌گرم اسید تارتاریک در ۱۰۰ گرم بافت میوه مورد ارزیابی قرار گرفت (Chen & Mellenthin, 1981).

شاخص طعم

شاخص طعم میوه‌های انگور از طریق نسبت مواد جامد کل محلول به اسیدیته قابل تیتر، مورد اندازه‌گیری قرار خواهد گرفت. این

میزان مواد جامد محلول

برای اندازه‌گیری مواد جامد محلول کشمش از عصاره آبی کشمش به وسیله دستگاه رفاکتومتر دیجیتال مدل Kruss dr 101 استفاده گردید. برای تهیه عصاره آبی کشمش، ۵ گرم از نمونه کشمش با مخلوط‌کن به طور یکنواخت کاملاً له شد. سپس ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به کشمش‌ها اضافه شده و ۲ ساعت در بن‌ماری با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت و در آخر از صافی عبور داده شد (Sotiropoulos, 2008).

pH و اسیدیته قابل تیتراسیون

برای تعیین اسیدیته قابل تیتر یک گرم از گوشت میوه در هاون

به کار گرفته شد. نمونه‌ها به صورت pour plate کشت و برای ۲۴ ساعت در دمای ۳۵ درجه سلسیوس گرمخانه‌گذاری گردیدند. تعداد باکتری‌ها و کپک و مخمر با کلونی کانت شمارش و بر اساس تعداد کلونی تشکیل شده بر حسب $cfu \text{ g}^{-1}$ گزارش گردید.

اندازه‌گیری میزان آنتی‌اکسیدان کل به روش DPPH^۱

برای اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی به روش DPPH، ۵ میکرولیتر از عصاره متانولی ۵ برابر رقیق شده نمونه در یک لوله آزمایشی ریخته و به آن ۲۰۰۰ میکرولیتر از محلول DPPH اضافه شد. محلول حاصل تکان داده شده و در دمای آزمایشگاه به مدت ۳۰ دقیقه نگهداری و جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر در اسپکتروفوتومتر قرائت شد (Chiou et al., 2007).

قندهای محلول کل

به منظور استخراج قندهای محلول کل، ابتدا ۰/۵ گرم از بافت منجمد شده با استفاده از ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد در هاون چینی له شد و بخش بالایی محلول جدا شد. عمل استخراج بار دیگر با افزودن ۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد به رسوبات قبلی تکرار شد. عصاره استخراج شده به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. به منظور اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول کل، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی به دست آمده با ۳ میلی‌لیتر آنترون تازه تهیه شده (۱۵۰ میلی‌گرم آنترون + ۱۰۰ میلی‌لیتر سولفوریک اسید ۷۲ درصد) مخلوط شد. برای شروع واکنش رنگ‌گیری، لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم ۹۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. پس از سرد شدن، میزان جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر خوانده شد. غلظت قندهای محلول کل بر اساس منحنی استاندارد گلوکز تعیین و به شکل میلی‌گرم در گرم وزن تر بیان شد (Irigoyen, Emerich, & Sanchez-Diaz, 1992).

تجزیه و تحلیل آماری

کلیه داده‌های به دست آمده در ۴ تکرار و به صورت اسپیلیت پلات و در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با استفاده از نرم افزار 8 Jump آنالیز شده است. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم افزار 2013 Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

عملکرد کشمش، رطوبت و بازجذب آب

اندیس به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد.

$$I = S/A \quad (4)$$

در این رابطه، S مواد جامد محلول کل و A اسیدیته قابل تیتراسیون (گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید تارتاریک) می‌باشد (Dissa, Desmorieux, Bathiebo, & Kouliadiati, 2008).

فنل کل

محتوای فنل کل موجود در کشمش با روش فولین-سیوکالتیو صورت گرفت. در این روش ۰/۵ گرم کشمش در ۴ سی‌سی اتانول کوبیده شد و محلول همگنی تهیه شد که پس از ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ در دور ۹۵۰۰ بر دقیقه محلول شفاف رویی جدا شد. میزان ۳۰۰ میکرولیتر عصاره با ۱۲۰۰ میکرولیتر کربنات سدیم ۷ درصد و ۰/۵ سی‌سی فولین ۱۰ درصد مخلوط شده و مخلوط به دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه در محل تاریک قرار داده شد. بعد از طی شدن مدت زمان لازم، میزان جذب توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۷۲۵ نانومتر برای هر نمونه اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از نمودار استاندارد اسید گالیک، میزان فنل بر حسب میلی‌گرم اسید گالیک درصد گرم وزن خشک (کشمش) به دست آمد (Velioglu, Mazza, Gao, & Oomah, 1998).

فلاونوئید کل

برای سنجش مقدار فلاونوئید کل از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم استفاده شد. در این روش در ابتدا ۰/۱ میلی‌لیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد در لوله آزمایش ریخته شد، پس از آن ۱ میلی‌لیتر استات پتاسیم ۱ مولار به لوله‌ها اضافه و با آن مخلوط شد و سپس ۲/۸ میلی‌لیتر آب مقطر به لوله‌ها اضافه شد. در مرحله آخر ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول عصاره کشمش به مخلوط اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک قرار گرفت و در نهایت جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۱۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر تعیین شد. مقدار فلاونوئید کل برای هر کدام از عصاره‌ها در چهار تکرار به صورت معادل میلی‌گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن خشک محاسبه شد (Chang, Yang, Wen, & Chern, 2002).

بار میکروبی

نمونه‌های کشمش تولیدی در روش‌های مختلف خشک کردن، از نظر شمارش کلی میکروب مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای آزمون شمارش کلی میکروب محیط کشت پلیت کانت آگار استفاده شد (Busta, Peterson, Adams, & Johnson, 1984). برای محیط کشت تهیه شده میزان ۰/۱ میلی‌لیتر از هر نمونه برداشته شد. محیط کشت Plate Count Agar جهت شمارش کلی میکروارگانیزم‌ها

درصد بر مقدار بازجذب آب اثر معنی‌داری داشت. با توجه به نمودار مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۵) بیشترین بازجذب آب مربوط به برداشت دوم و تیمار تحت خلاء ۶۰ درجه سلسیوس بود. پرشکوهی و همکاران (Gholami parshokohi, Mohammadi shamami, Mohseni, Kermani, & Abdolizadeh, 2013) اعلام کردند که خشک شدن در دمای دو مرحله‌ای، با دمای مرحله دوم ۶۰ درجه سلسیوس، بیشترین بازجذب آب را دارد که نشان‌دهنده آن است در محصول تغییرات ساختاری کمتری اتفاق می‌افتد و با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. در پژوهشی که زو و همکاران (Zhou et al., 2018) روی گیاه انگور انجام دادند نشان داد که خشک کردن با خلاء فرایند بازجذب آب را سریع‌تر انجام می‌دهد. علت این امر به‌خاطر عدم تخریب منافذ کوتیکول پوست حبه‌ها بود. این خواص میکروسکوپی، نشان‌دهنده عدم تخریب بافت‌ها بود. همچنین می‌توان چنین اظهار کرد که خشک شدن سریع‌تر (خشک شدن با خلاء)، بازجذب آب را از خشک شدن آهسته‌تر (خشک شدن در محیط آزاد) بیشتر افزایش می‌دهد. این نتایج با نتایج دای و همکاران (Dai et al., 2015) برای خشک کردن زردآلو و مورنو و همکاران (Moreno et al., 2016) برای خشک کردن بلوبری مطابقت دارد.

مواد جامد محلول، اسید قابل‌تیتراسیون، شاخص طعم و pH

با توجه به نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، میزان مواد جامد محلول به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر زمان برداشت و روش‌های خشک کردن در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفت. همچنین اثر متقابل این دو عامل نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. به‌طور کلی بیشترین مقدار مواد جامد محلول مربوط به تیمارهای برداشت سوم بود که در خلاء ۶۰ درجه سلسیوس و پس از آن بدون اختلاف معنی‌دار در دماهای ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس مشاهده شد (شکل ۶). توپالوویک و میکولیک (Topalovic & Mikulic, 2011) گزارش کردند که افزایش میزان مواد جامد محلول در مرحله رسیدن میوه انگور، نتیجه کاهش آب میوه و تجزیه قندهای مرکب و تبدیل آن‌ها به قندهای ساده و همچنین ناشی از هضم دیواره‌های سلولی است که در هنگام رسیدن میوه اتفاق می‌افتد. یوسفی و همکاران (Yousefi, Emam-Djomeh, Mousavi, & Askari, 2012) گزارش کردند که استفاده از فرآیند تبخیر برای آب انار، سبب حفظ ۴۰ درصدی TSS نسبت به شاهد گردید. همچنین پژوهشی که سابانکی و آیسر (Sabanci & Icier, 2017) بر گیاه آلبالو تحت شرایط خلاء انجام دادند چنین نشان داد که خشک کردن با خلاء کمک به حفظ TSS آبمیوه کرده است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل زمان برداشت و روش خشک کردن بر میزان عملکرد کشمش تولیدی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بر اساس نمودار مقایسه میانگین (شکل ۳) بیشترین عملکرد مربوط به برداشت سوم تحت خشک‌کن خلاء ۶۰ درجه سلسیوس (۳۰۵/۵۲ گرم بر کیلوگرم) بود و همچنین کمترین عملکرد مربوط به برداشت اول و دوم با میانگین ۲۷۰/۲۹ گرم بر کیلوگرم در روش آفتاب خشک گزارش شد. به‌طور کلی می‌توان گفت راندمان تولید کشمش ۱۳ درصد افزایش پیدا کرده است. در این راستا ماندال و تاکور (Mandal & Thakur, 2015) نیز راندمان تولید کشمش از ارقام مختلف انگور با روش‌های مختلف پیش‌تیمار و خشک کردن را بین ۲۸۳/۵ - ۲۴۴/۰ گرم بر کیلوگرم انگور گزارش کردند.

همچنین اثر ساده روش خشک کردن بر مقدار رطوبت کشمش در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). با توجه به شکل ۴ کشمش تحت تیمار خشک‌کن خلاء ۸۰ درجه سلسیوس کمترین مقدار رطوبت با میانگین ۱۴/۲۷ درصد را به خود اختصاص داد و بقیه تیمارها با بیشترین درصد رطوبت (میانگین ۱۶/۸۳ درصد) در یک گروه آماری قرار گرفتند. رطوبت را می‌توان به‌راحتی با استفاده از خشک کردن خلاء از محصول غذایی حساس به حرارت حذف کرد (Parikh, 2015). همین فناوری با موفقیت در فرآوری کشمش که در آن انگور، تحت فشار خلاء خشک می‌شود، استفاده شده است. خلاء انتقال جرم بین غذا و محیط اطراف را افزایش می‌دهد که نیاز کمتری به حرارت دارد و در نتیجه تولید محصولات با کیفیت بهتر را تسهیل می‌کند. ماندال و تاکور (Mandal & Thakur, 2015) نیز مقدار رطوبت کشمش حاصل از ارقام مختلف انگور را با پیش‌تیمارها و روش‌های مختلف خشک کردن به‌ترتیب بین ۱۶/۵۵ - ۱۴/۴۷ درصد (بر پایه تر) گزارش کردند. دلیل این اختلافات را می‌توان به نوع رقم، زمان برداشت، روش‌های پیش‌تیمار و خشک کردن نسبت داد. رطوبت کشمش یک پارامتر مهم در احساس دهانی و قابلیت‌پذیرش مصرف‌کننده می‌باشد. اگر رطوبت کشمش کمتر از ۱۴ درصد باشد، بافت کشمش سخت می‌شود، در حالی‌که در رطوبت بیشتر از ۱۸ درصد کشمش مورد حمله میکروبه‌ها قرار می‌گیرد. همچنین بهمن پور و همکاران (Bahmanpour, Sajadiye, Sheikh davoodi, & Zolfaghari, 2016) گزارش کردند خشک کردن به روش خلاء مناسب‌ترین روش جهت خشک کردن نعنای می‌باشد. در ابتدای خشک کردن به دلیل محتوی رطوبتی بالا در برگ‌های نعنای سرعت خشک شدن نزولی می‌باشد و در انتهای فرآیند خشک شدن، به دلیل میزان ناچیز رطوبت آزاد درون محصول نرخ خشک شدن کاهش می‌یابد.

اثر متقابل زمان برداشت و روش خشک کردن در سطح احتمال ۱

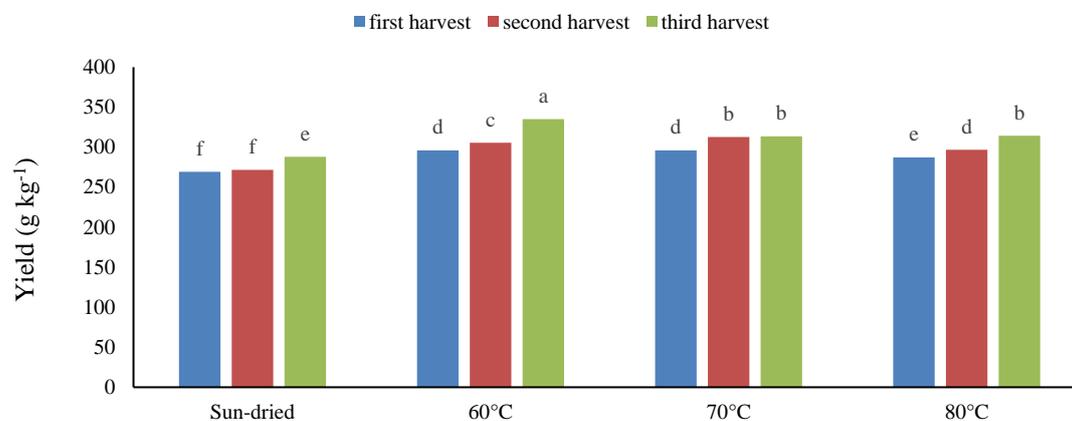
جدول ۱- تجزیه واریانس اثر زمان برداشت انگور و خشک کردن به روش خلا (VD) بر عملکرد، رطوبت، باز جذب آب، مواد جامد محلول، اسیدهای قابل تیتراسیون و pH کشمش رقم بی دانه سفید

Table 1- ANOVA for effect of grape harvest time and vacuum drying on yield, moisture, rehydration, TSS, TA, and pH of white seedless raisins

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean square					
		عملکرد Yield	رطوبت Moisture	باز جذب آب Rehydration	مواد جامد محلول TSS	اسیدهای قابل تیتراسیون TA	اسیدیته pH
بلوک Block	3	0.040 ^{ns}	1.325 ^{ns}	0.081 ^{ns}	0.197 ^{ns}	0.000051 ^{ns}	0.002 ^{ns}
زمان برداشت Harvest time (H)	2	2.204 ^{**}	1.046 ^{ns}	4.899 ^{**}	8.910 ^{**}	0.004429 ^{**}	0.094 ^{**}
خطای عامل اصلی Main plot error	6	0.064	0.350	0.258	0.073	0.000049	0.006
روش خشک کردن Drying method (D)	3	2.881 ^{**}	19.875 ^{**}	0.671 ^{ns}	4.179 ^{**}	0.000148 ^{**}	0.124 ^{**}
زمان برداشت × روش خشک کردن H × D	6	23.812 ^{**}	1.503 ^{ns}	2.320 ^{**}	4.298 ^{**}	0.0000215 ^{**}	0.012 ^{ns}
خطای عامل فرعی Sub plot error	27	0.048	0.798	0.269	0.256	0.000031	0.012

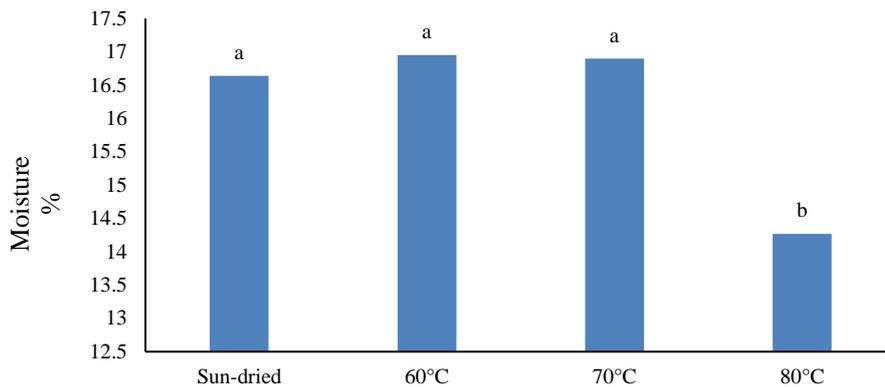
ns, **, * به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, *, **: Non-significant difference and significant differences at 5 and 1% of probability levels, respectively.



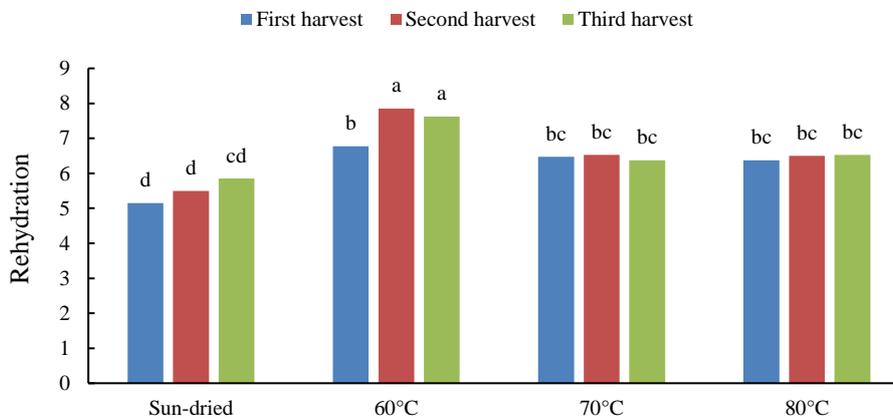
شکل ۳- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای زمان برداشت و روش خشک کردن بر عملکرد کشمش

Fig.3. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on yield of raisins



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر ساده روش خشک کردن بر درصد رطوبت کشمش

Fig.4. Means comparison of effect of drying method on moisture of raisins

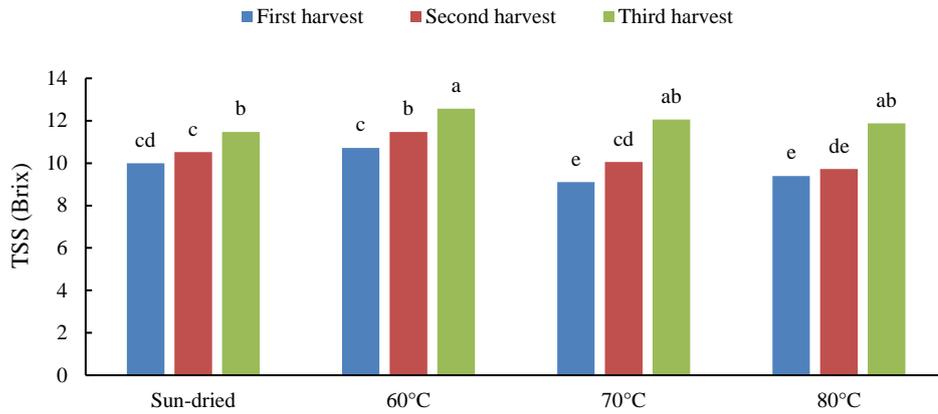


شکل ۵- مقایسه میانگین اثر برهمکنش تیمارهای زمان برداشت و روش خشک کردن بر میزان بازجذب آب

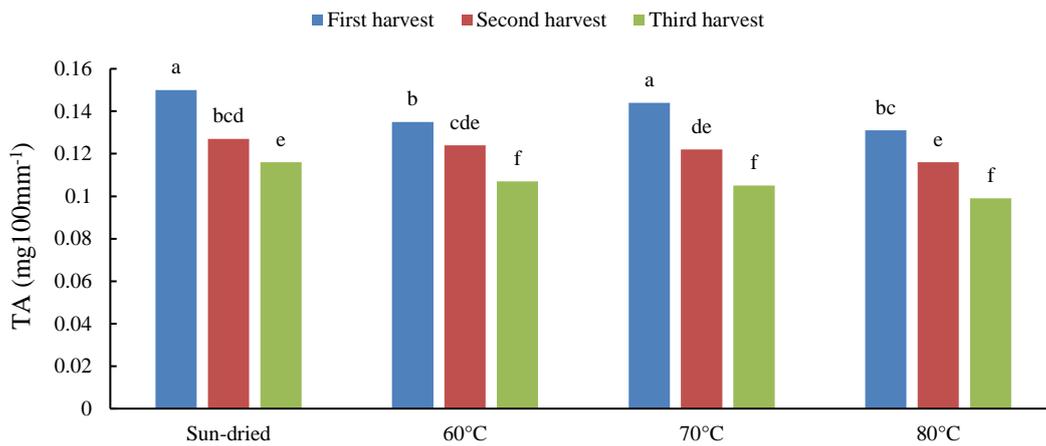
Fig.5. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on rehydration

بیشتری در اسیدیته نسبت به دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که خشک کردن تحت خلاء به علت افزایش سرعت در خشک کردن، موجب حفظ اسیدهای قابل‌تیترا در میوه‌ها می‌گردد (Bozki, 2020). همچنین طبق گزارش زو و همکاران (Zhou et al., 2018) روی میوه کیوی، می‌توان به این نتیجه رسید که برای حفظ محتوای اسید قابل‌تیترا بهترین روش استفاده از خشک کردن تحت خلاء می‌باشد. همچنین اثر ساده زمان برداشت و اثر ساده روش خشک کردن در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان pH معنی‌دار بود. با توجه به بررسی میانگین داده‌ها در شکل ۸ بیشترین میزان pH در خلاء ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس مشاهده شد و کمترین مقدار pH در روش آفتاب خشک و خلاء ۶۰ درجه سلسیوس گزارش شد. قدس ولی و همکاران (Ghodsevali et al., 2015) با تحقیق بر روی انگور بی‌دانه سفید مشاهده کردند که با گذشت زمان مقدار pH نیز بیشتر شده است که نتایج این پژوهش با تحقیق حاضر همخوانی دارد.

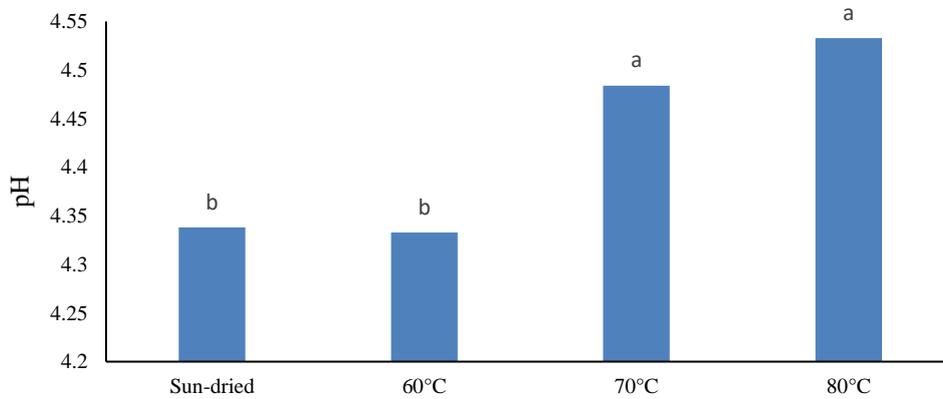
طبق جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از اثر معنی‌دار زمان برداشت و روش خشک کردن بر اسیدیته قابل‌تیتراسیون در سطح ۱ درصد بوده است. فاکتور مورد بررسی نشان داد که به‌طور میانگین برداشت دیر هنگام (برداشت سوم) باعث کاهش اسیدیته قابل‌تیتراسیون میوه به میزان ۲۴ درصد نسبت به برداشت زود هنگام (برداشت اول) شد. نتایج چنین نشان داد که با گذشت زمان میزان اسیدیته آلی در کشمش پیدا کرد (شکل ۷). این نتایج با پژوهش بلوچ و بیبی (Baloch & Bibi, 2012) در میوه انبه و همچنین در میوه تمشک قرمز کروگه و همکاران (Kruge, Dietrich, Schopplein, Rasim, Kurbel, 2011) مطابقت داشت. با توجه به این‌که اسیدهای آلی به‌عنوان سوبسترا در مسیرهای تنفس سلولی مصرف می‌شوند لذا با گذشت زمان و افزایش دما مقدار اسیدیته کاهش می‌یابد اسیدهای آلی به‌عنوان سوبسترا در مسیرهای تنفس سلولی مصرف می‌شوند. بنابراین در دمای ۸۰ درجه سلسیوس تحت خشک کن خلاء، به علت افزایش شدید تنفس سلولی، کاهش



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر برهمکنش تیمارهای زمان برداشت و روش خشک کردن بر میزان مواد جامد محلول کشمش
Fig.6. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on TSS of raisins



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر برهمکنش تیمارهای زمان برداشت و روش خشک کردن بر میزان اسیدهای قابل تیتراسیون کشمش
Fig.7. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on TA of raisins



شکل ۸- اثر ساده روش خشک کردن بر pH کشمش
Fig.8. Means comparison of effect of drying method on the pH of raisins

کشمش برداشت سوم تحت خلاء ۷۰ درجه سلسیوس و کمترین مقدار شاخص طعم مربوط به برداشت اول در روش آفتاب خشک و خشک‌کن تحت خلاء ۶۰ درجه سلسیوس بود.

شاخص طعم

اثر متقابل زمان برداشت و روش خشک کردن بر شاخص طعم در سطح احتمال ۱ درصد نیز معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی میانگین داده‌ها (شکل ۹) نشان داد که بیشترین شاخص طعم مربوط به

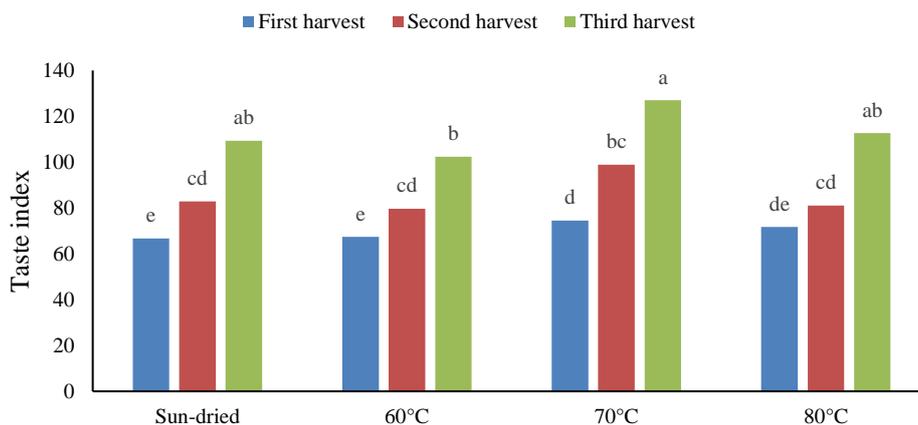
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر زمان برداشت انگور و خشک کردن به روش خلا (VD) بر شاخص طعم، فنل کل، فلاونوئید، بار میکروبی، آنتی‌اکسیدان و قندهای محلول کل کشمش رقم بی‌دانه سفید

Table 2- ANOVA for effect of grape harvest time and vacuum drying on taste index, total phenolic, flavonoid, microbial load, antioxidant activity, and total soluble sugars of white seedless raisin

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean square					ظرفیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity	قندهای محلول کل Total soluble sugars
		شاخص طعم TSS/TA	فنل کل Total phenolic	فلاونوئید Flavonoid	بار میکروبی Microbial load	بار میکروبی Microbial load		
بلوک Block	3	32.367 ^{ns}	43.404 ^{ns}	56.860 ^{ns}	48017.503 ^{**}	3.005 ^{ns}	247606.401 ^{**}	
زمان برداشت Harvest time (H)	2	543.913 ^{**}	1174.327 ^{**}	8.829 ^{ns}	106.307 ^{ns}	109.279 ^{**}	8040442.884 ^{**}	
خطای عامل اصلی Main plot error	6	33.252	12.127	21.906	106.307	6.720	58298.886	
روش خشک کردن Drying method (D)	3	86.578	1277.709 ^{**}	258.843 ^{**}	48017.503 ^{**}	206.201 ^{**}	2187496.496 ^{**}	
زمان برداشت × روش خشک کردن H × D	6	494.510 ^{**}	727.360 ^{**}	595.202 ^{**}	106.307 ^{ns}	27.940 ^{**}	395028.197 ^{ns}	
خطای عامل فرعی Sub plot error	27	32.964	17.68	31.344	16076.7	8.197	78782	

ns, **, * و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, *, **: Non-significant difference and significant differences at 5 and 1% of probability levels, respectively.



شکل ۹- مقایسه میانگین برهمکنش اثر زمان برداشت و روش خشک کردن بر شاخص طعم کشمش

Fig.9. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on taste index of raisins

فنل، فلاونوئید و خاصیت آنتی‌اکسیدانی

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل زمان برداشت و روش خشک کردن در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان فنل کل و فلاونوئید کشمش معنی‌دار بود. با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۱۰) بیشترین میزان فنل کل مربوط به تیمار برداشت سوم تحت خشک‌کن خلاء ۷۰ درجه سلسیوس (۱۱۳/۹ میلی‌گرم اسید گلیک بر گرم وزن خشک) گزارش شد. همچنین کمترین مقدار فنل کل مربوط به برداشت اول به روش آفتاب خشک (۵۳/۶ میلی‌گرم اسید گلیک بر گرم وزن خشک) بود. این نتایج با نتایج سایر محققان مانند توپالوویک و میکولیک (Topalovic & Mikulic, 2011) و پاپوتسیس و همکاران (Papoutsis *et al.*, 2017) مطابقت داشت. محققان یافته‌هایی در مورد تغییرات محتوای فنل در انواع فرایندهای خشک کردن ارائه کرده‌اند (Çoklar & Akbulut, 2017). برای مثال سراتوسا و همکاران (Serratos, Marquez, Lopez-Toledano, Medina, & Merida, 2011) کاهش معنی‌داری در محتوای فنلی پوست تفاله انگور پس از خشک کردن در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس ارائه کرده‌اند. همچنین چونگ و همکاران (Chung, Kim, Moon, & Youn, 2014) روش‌های مختلفی را برای خشک کردن انگور به کار بردند. آن‌ها بیان کردند که بهترین روش خشک کردن برای حفظ محتوای فنلی، خشک کردن انگور تحت خلاء با پمپ حرارتی^۱ می‌باشد. از طرف دیگر کاهش شدید و معنی‌دار ترکیبات فنلی انگورهای خشک‌شده در محیط آزاد نسبت به تحت خلاء، می‌تواند به علت تخریب اکسیداتیو این ترکیبات در نمونه‌ها باشد (Adiletta, Russo, Senadeera, & Di Matteo, 2016).

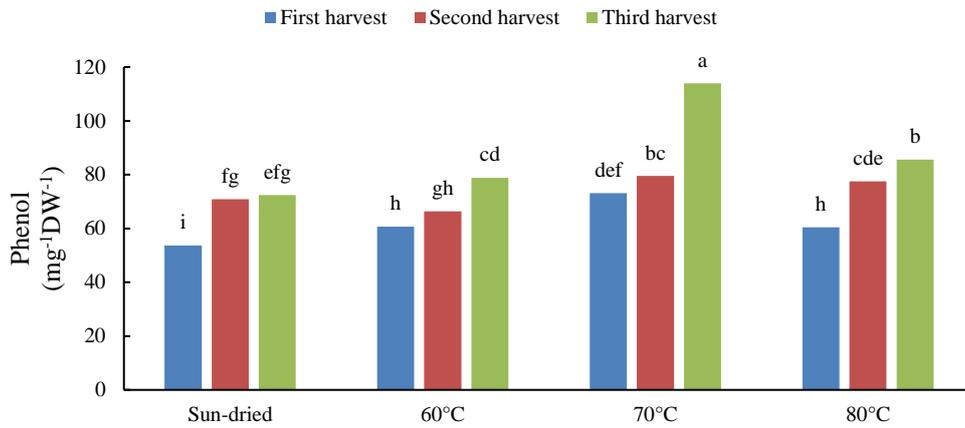
بیشترین مقدار فلاونوئید در برداشت سوم خلاء ۶۰ درجه سلسیوس و همچنین برداشت دوم و سوم خلاء ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. در مقابل کمترین مقدار فلاونوئید در برداشت اول روش آفتاب خشک و خلاء ۶۰ درجه سلسیوس گزارش شد (شکل ۱۱). ترکیبات فلاونوئیدی در اکثر میوه‌ها و سبزی‌ها یافت می‌شوند و ترکیباتی حساس به دما هستند، که می‌توانند به راحتی در طول خشک شدن گیاه تخریب شوند (Li, Wang, Wu, Wan, & Yang, 2020). با افزایش دمای خشک کردن، محتوای فلاونوئید افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به آزادسازی باندهای فلاونوئیدی نسبت داد (Hayat *et al.*, 2010). تحقیقات پاپوتسیس و همکاران (Papoutsis *et al.*, 2017) نشان می‌دهد که بهترین دما برای خشک کردن خلاء و همچنین حفظ ترکیبات فلاونوئیدی دمای ۷۰ درجه سلسیوس می‌باشد که با تحقیقات حاضر مطابقت دارد. اثر متقابل زمان برداشت و روش خشک کردن در سطح احتمال ۱

درصد بر میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کشمش بی‌دانه سفید معنی‌دار بود (جدول ۲). مطابق مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۱۲ دامنه تغییرات ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در این پژوهش بین ۷۱/۲۷ تا ۸۵/۴۳ درصد بود. به‌طور کلی بیشترین مقدار آنتی‌اکسیدان در روش خلاء مشاهده شد. افزایش مقدار آنتی‌اکسیدان در طول برداشت می‌تواند به علت افزایش ترکیبات فنلی باشد که این گزارش در تحقیق فریرا و همکاران (Ferreira, Vina, Mugridge, & Chaves, 2007) و شجاع و همکاران (Shojah, Ghasemnejad, & Mortazavi, 2011) آمده است و با تحقیق حاضر مطابقت دارد. ارتباط نزدیکی بین محتوای فنل‌ها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در انگور وجود دارد (Çoklar & Akbulut, 2017). چونگ و همکاران (Chong, Law, Figiel, & Wojdylo, & Oziemblowski, 2013) نیز گزارش کردند که روش‌های خشک کردن در هوای آزاد، مقدار آنتی‌اکسیدان را نسبت به خشک‌کن تحت خلاء بیشتر کم می‌کند. که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت.

بار میکروبی

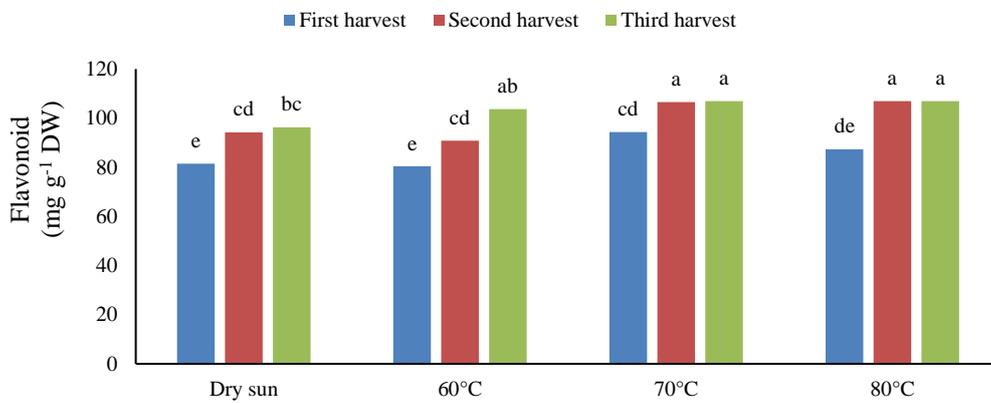
نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده روش خشک کردن بر بار میکروبی کشمش در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در بررسی مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۱۳) بیشترین بار میکروبی ($126/51 \text{ Cfu g}^{-1}$) مربوط به کشمش آفتاب خشک بود. تیمارهای تحت خشک‌کن خلاء در هر سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس کمترین مقدار بار میکروبی (تقریباً صفر) را از خود نشان دادند. تعداد میکروارگانیسم‌ها در کشمش به عوامل بسیاری از جمله نوع آلودگی و اسپور آن‌ها در میوه قبل از خشک شدن بستگی دارد. در روش آفتابی بار میکروبی کلی، کلی فرم‌ها و تعداد کپک و مخمرها بیشتر اما تعداد باکتری‌های اسید لاکتیک کمتر از روش صفحات گرمایش کنترلی بود (Magnoli *et al.*, 2004).

در پژوهش دیگری چنین گزارش شد که کشمش‌های تیمار شده با قلیا نیز بار میکروبی کلی، کلی فرم و کپک‌ها کمتر اما تعداد باکتری‌های اسید لاکتیک و مخمرها بیشتر از کشمش‌های طبیعی بود. کمتر بودن بار میکروبی کلی و کلی فرم‌ها در کشمش تولیدی توسط صفحات برقی را می‌توان به کم بودن زمان خشک شدن و بالا بودن دمای خشک کردن نسبت داد. در این راستا لانگوا و همکاران (Langová, Juzl, Cwиковá, & Kos, 2020) نیز نشان دادند که بیشترین بار میکروبی کلی در کشمش‌های خشک‌شده در ۴۰ درجه سلسیوس و کمترین آن‌ها در کشمش‌های خشک‌شده در ۷۰ درجه سلسیوس بود. آن‌ها نیز نتیجه گرفتند که دماهای بالاتر در هنگام خشک کردن اثر مخرب بیشتری بر بار میکروبی کلی کشمش تولیدی داشت.



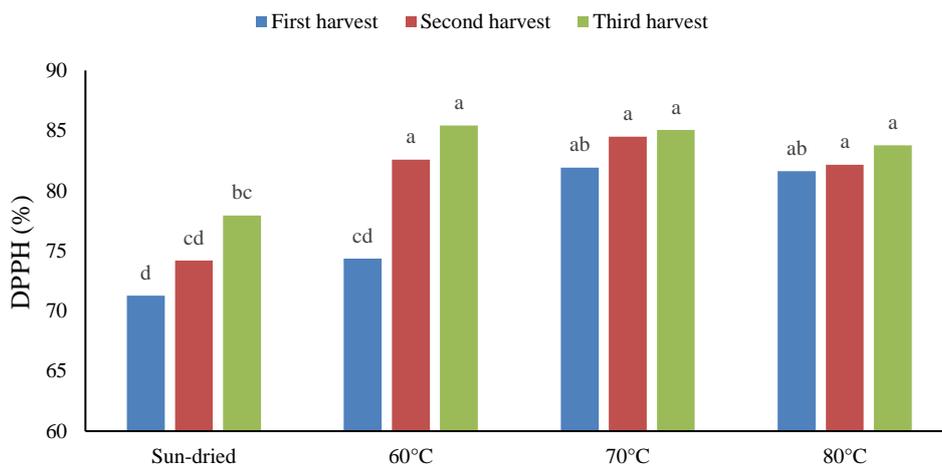
شکل ۱۰- مقایسه میانگین برهمکنش اثر زمان برداشت و خشک کردن بر محتوای فنل کل کشمش

Fig.10. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on phenol content of raisins



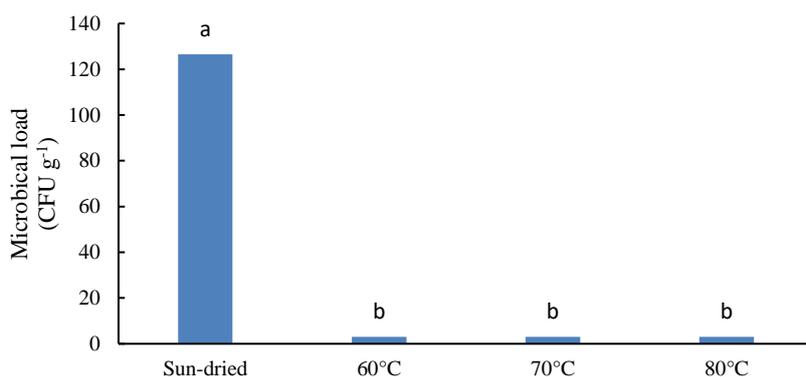
شکل ۱۱- مقایسه میانگین برهمکنش اثر زمان برداشت و روش خشک کردن بر محتوای فلاونوئید کشمش

Fig.11. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on flavonoid content of raisins



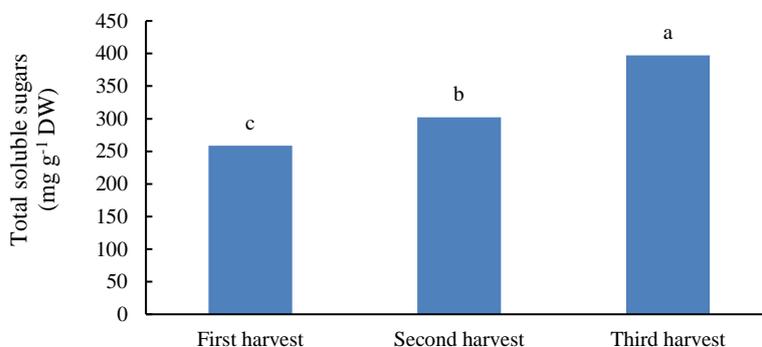
شکل ۱۲- مقایسه میانگین اثر برهمکنش زمان برداشت و روش خشک کردن بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کشمش

Fig.12. Means comparison of interaction between harvest time and drying method on antioxidant activity of raisins



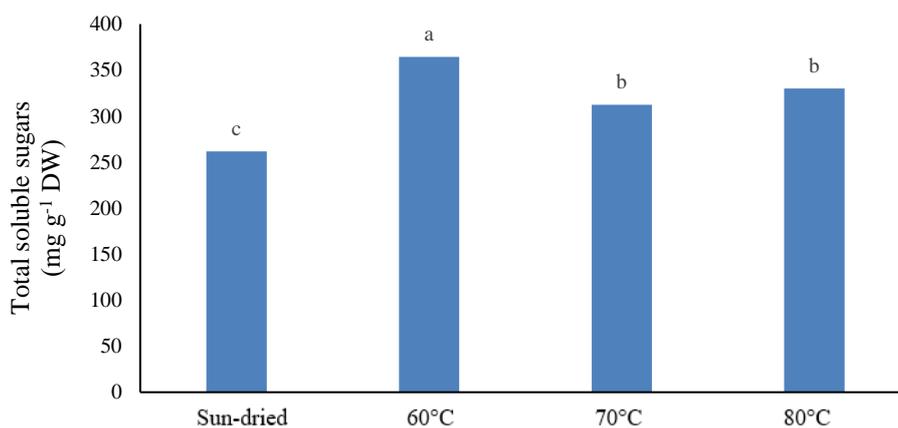
شکل ۱۳- مقایسه میانگین اثر ساده روش خشک کردن بر مقدار بار میکروبی کشمش

Fig.13. Means comparison of the effect of drying method on microbial load of raisins



شکل ۱۴- مقایسه میانگین اثر ساده زمان برداشت بر مقدار قندهای محلول کل کشمش

Fig.14. Means comparison of the effect of harvest time on total soluble sugars of raisins



شکل ۱۵- مقایسه میانگین اثر ساده روش خشک کردن بر مقدار قندهای محلول کل کشمش

Fig.15. Means comparison of the effect of drying method on total soluble sugars of raisins

(2021). پایین بودن آلودگی میکروبی در کشمش‌های تولیدی به روش خلاء در تحقیق حاضر را می‌توان به زمان کوتاه در خشک کردن و همچنین عدم تماس با محیط اطراف نسبت داد.

با بررسی‌های متعدد چنین به نظر می‌رسد که با رسیدن بیشتر انگورها و افزایش pH و قند حبه‌ها، مقدار آلودگی در آن‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند (Zomorodi, Amir Shaghghi, & Gerami,

قندهای محلول کل

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن بود اثر ساده زمان برداشت و روش خشک کردن در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار قندهای محلول کل معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین مقدار قند کشمش در برداشت سوم و همچنین کمترین مقدار قند محلول در برداشت اول حاصل شد. به‌طور کلی در برداشت سوم مقدار قند کل حدود ۵۳/۶۱ درصد نسبت به برداشت اول افزایش پیدا کرد (شکل ۱۴). در طی بلوغ انگور، رشد آن سریع می‌شود و بدین منظور افزایش حجم اتفاق می‌افتد نه تقسیم سلولی. با انبساط سلولی نیز افزایش هجوم آب و قند به سلول‌ها مشاهده می‌شود (Hellman, 2004). در انگور انبساط سلولی هم‌زمان با متابولیسم قندها و اسیدهای آلی اتفاق می‌افتد. مالات یکی از اسیدهای مهم در انگور است و این امر نشان می‌دهد که با افزایش زمان برداشت و تجزیه مالات در حبه‌ها، قندهای هگزوز نیز افزایش پیدا می‌کند (Piazzolla, Pati, Amodio, & Colelli, 2016). در پژوهش حاضر، بیشترین مقدار قند کل در بین روش‌های مختلف خشک کردن به دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک‌کن تحت خلاء اختصاص یافت (شکل ۱۵). همچنین کمترین مقدار قند در روش آفتابی حاصل گردید. به‌طور میانگین مقدار قندهای محلول کل در روش آفتابی حدود ۲۲/۶۸ درصد کمتر از روش خشک‌کن خلاء مشاهده شد. با افزایش دما خشک کردن، مقدار قند در نهایت کاهش پیدا می‌کند. این کاهش قند را می‌توان به فرایند میلارد و کارملیزاسیون^۱ نسبت داد. با افزایش دما و طولانی‌تر شدن دوره گرما، مقدار قند بیشتر کاهش می‌یابد (Karaman et al., 2014).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی برهمکنش زمان برداشت و روش خشک کردن بر اکثر صفات مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری داشت. روش‌های خشک

کردن انگور به‌منظور تهیه کشمش بی‌دانه سفید در این پژوهش تاثیر معنی‌داری بر میزان ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کشمش تولیدی داشت. میزان این ترکیبات در کشمش آفتاب خشک کمتر از کشمش حاصل از روش خشک‌کن خلاء بود. میانگین مقدار قندهای محلول کل در کشمش روش آفتاب خشک حدود ۲۲/۶۸ درصد کمتر از روش خشک‌کن خلاء مشاهده شد. از نظر شمارش کلی میکروب، بیشترین بار میکروبی (۱۲۶/۵۱ Cfu g⁻¹) مربوط به کشمش آفتاب خشک بود. تیمارهای تحت خشک‌کن خلاء در هر سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس کمترین مقدار بار میکروبی (تقریباً صفر) را از خود نشان دادند. پایین بودن آلودگی میکروبی در کشمش‌های تولیدی به روش خلاء در تحقیق حاضر را می‌توان به زمان کوتاه در خشک کردن و همچنین عدم تماس با محیط اطراف نسبت داد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که کشمش تولیدشده در برداشت سوم و خلاء ۶۰ درجه سلسیوس از نظر صفات بیوشیمیایی نسبت به سایر تیمارها کیفیت مطلوب‌تری داشت و می‌توان چنین اظهار کرد که روش خشک‌کن خلاء، جایگزین مناسبی برای روش‌های خشک کردن سنتی محسوب می‌شود.

مشارکت نویسندگان

فائزه کیومرثی دربندی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن
یحیی سلاح ورزی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی
بهرام عابدی: نظارت و مدیریت، مشاوره فنی
حسن صدرنیا: روش‌شناسی، اعتبارسنجی
مریم کمالی: پردازش داده‌ها، خدمات نرم‌افزاری، تحلیل آماری

References

- Adiletta, G., Russo, P., Senadeera, W., & Di Matteo, M. (2016). Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *Journal of Food Engineering*, 172, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.031>
- Ayoubi, A., Sedaghat, N., Kashaninejad, M., Mohebbi, M., & Nassiri Mahalati, M. (2016). Investigation the effect of cabinet drying conditions and different pretreatments on drying rate of grape and quality of raisin. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 226-238. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v1395i2.32219>
- Bahmanpour, H., Sajadiye, M., Sheykh davoodi, M. J., & Zolfaghari, M. (2016). The Effect of Temperature and Drying Method on Drying Time and Color Quality of Mint. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(2), 415-426. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i2.51268>
- Baloch, M. K., & Bibi, F. (2012). Effect of harvesting and storage conditions on the post harvest quality and shelf life of Mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *South African Journal of Botany*, 83, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2012.08.001>

5. Bozkir, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), e13485. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13485>
6. Busta, F. F., Peterson, E. H., Adams, D. M., & Johnson, M. G. (1984). Colony count methods. In M. L. Speck (Ed.), *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods* (2nd ed., pp. 62–83). American Public Health Association.
7. Cemeroglu, B. S. (2011). *Meyve ve sebze işleme teknolojisi*. Nobel Akademik Yayıncılık.
8. Chang, C., Yang, M., Wen, H. & Chern, J. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
9. Chen, P. M., & Mellenthin, W. M. (1981). Effect of harvest date on ripening capacity and post harvest life of Anjou pears. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 106(1), 38-42. <https://doi.org/10.21273/JASHS.106.1.38>
10. Chiou, A., Karathanos, V. T., Mylona, A., Salta, F. N., Preventi, F., & Andrikopoulos, N. K. (2007). Currants (*Vitis vinifera* L.) content of simple phenolics and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 102(2), 516-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.009>
11. Chong, C. H., Law, C. L., Figiel, A., Wojdylo, A., & Oziembowski, M. (2013). Colour, phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods. *Food Chemistry*, 141(4), 3889-3896. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.042>
12. Chung, H. S., Kim, J. K., Moon, K. D., & Youn, K. S. (2014). Changes in Color Parameters of Corn Kernels during Roasting. *Food Science Biotechnology*, 23(6), 1829-1835. <https://doi.org/10.1007/s10068-014-0250-x>
13. Çoklar, H., & Akbulut, M. (2017). Effect of sun, oven and freeze-drying on anthocyanins, phenolic compounds and antioxidant activity of black grape (Eksikara) (*Vitis vinifera* L.). *South African Journal of Enology and Viticulture*, 38(2), 264-272. <https://doi.org/10.21548/38-2-2127>
14. Dai, J. W., Rao, J. Q., Wang, D., Xie, L., Xiao, H. W., Liu, Y. H., & Gao, Z. J. (2015). Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves. *Drying Technology*, 33(3), 365-376. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.954667>
15. Deng, L. Z., Yang, X. H., Mujumdar, A. S., Zhao, J. H., Wang, D., Zhang, Q., ... & Xiao, H. W. (2018). Red pepper (*Capsicum annum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. *Drying Technology*, 36(8), 893-907. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1361439>
16. Dissa, A. O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., & Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 429-43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.008>
17. FAO & OIV. (2016). *Table and dried grapes: Non-alcoholic products of the viticultural sector intended for human consumption*. Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Organisation of Vine and Wine. <http://www.fao.org/3/a-i7042e.pdf>
18. Ferreyra, M. R., Vina, S. Z., Mugridge, A., & Chaves, A. R. (2007). Growth and ripening season effects on antioxidant capacity of Strawberry cultivar selva. *Scientia Horticulturae*, 112(1), 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.001>
19. Ghodsvali, A., Mohamadi, M., Mohamadi Chianeh, S., & Rashizadeh, S. (2016). An Investigation on the Effect of Harvest Time and Storage on the Quality Properties of Red Grape, the Variety of Fakhri Shahrood. *Journal of Crop Production and Processing*, 5(18), 1-13. (in Persian). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.18.1>
20. Gholami parshokohi, M., Mohammadi shamami, M., Mohseni, Sh., Mashallah kermani, A., & Abdolalizadeh, E. (2014). Determination of some physical properties of pistachio and its kernel (local cultivars of Qazvin). *Journal of Food Science and Nutrition*, 43, 47-58. (in Persian).
21. Guiné, R. P. F., Almeida, I. C., Correia, A. C., & Gonçalves, F. J. (2015). Evaluation of the physical, chemical and sensory properties of raisins produced from grapes of the cultivar crimson. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 9, 337-346. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9241-8>
22. Hayat, K., Zhang, X., Chen, H., Xia, S., Jia, C., & Zhong, F. (2010). Liberation and separation of phenolic compounds from citrus mandarin peels by microwave heating and its effect on antioxidant activity. *Separation and Purification Technology*, 73(3), 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.04.026>
23. Hellman, E. W. (2004, February 27–28). *How to judge grape ripeness before harvest*. Paper presented at the Southwest Regional Vine & Wine Conference, Albuquerque, NM, USA.
24. Irigoyen, J. J., Emerich, D. W., & Sanchez-Diaz, M. (1992) Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa* L.) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55-60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
25. Karaman S., Said Toker O. S., Çam M., Hayta M., Mahmut Doğan M., & Kayacier A. (2014). Bioactive and Physicochemical Properties of Persimmon as Affected by Drying Methods Drying Technology: *An International*

- Journal*, 32(3), 258-267. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.821480>
26. Karimi, R., & Mirzaei, F. (2017). The effect of three drying methods on biophysical and biochemical properties of raisin. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 49(2), 475-491. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.232628.1249>
 27. Kerdpiboon, S., Kerr, W. L., & Devahastin, S. (2006). Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content. *Food Research International*, 39(10), 1110-1118. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.07.019>
 28. Khiari, R., Zemni, H., & Mihoubi, D. (2019). Raisin processing: Physicochemical, nutritional and microbiological quality characteristics as affected by drying process. *Food Reviews International*, 35(3), 246-298. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1517264>
 29. Kruge, E., Dietrich, H., Schopplein, E., Rasim, S., & Kurbel, P. (2011). Cultivar, storage conditions and ripening effect on physical and chemical quality of red raspberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 60(1), 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.12.001>
 30. Langová, R., Juzl, M., Cwiková, O., & Kos, I. (2020). Effect of Different Method of Drying of Five Varieties Grapes (*Vitis vinifera* L.) on the Bunch Stem on Physicochemical, Microbiological, and Sensory Quality. *Foods*, 9(9), 1183. <https://doi.org/10.3390/foods9091183>
 31. Li, Y., Wang, X., Wu, Z., Wan, N., & Yang, M. (2020). Dehydration of hawthorn fruit juices using ultrasound-assisted vacuum drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105219. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105219>
 32. Magnoli, C. A., Astroeca, L., Ponsone, M., Combina, G., Palacio, C. A. R., Rose, A. M., & Dalcero, M. (2004). Survey of mycoflora and ochratoxin A in dried vine fruit from Argentina markets. *Letters in Applied Microbiology*, 39(4), 326-331. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2004.01583.x>
 33. Magwaza, L. S., & Tesfay, S. Z. (2015). A review of destructive and non-destructive methods for determining Avocado fruit maturity. *Food Bioprocess Technology*, 8(10), 1995-2011. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1568-y>
 34. Mandal, G., & Thakur, A. K. (2015). Preparation of raisin from grapes varieties grown in Punjab with different processing treatments. *International Journal of BioResource, Environment and Agriculture Science*, 1(1), 25-31.
 35. Moreno, J., Gonzales, M., Zúñiga, P., Petzold, G., Mella, K., & Muñoz, O. (2016). Ohmic Heating and Pulsed Vacuum Effect on Dehydration Processes and Polyphenol Component Retention of Osmodehydrated Blueberries (cv. Tifblue). *Innovative Food Science Emerging Technologies*, 36, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.005>
 36. Papoutsis, K., Pristijono, P., Golding, J. B., Stathopoulos, C. E., Bowyer, M. C., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2017). Effect of vacuum-drying, hot air-drying and freeze-drying on polyphenols and antioxidant capacity of lemon (*Citrus limon*) pomace aqueous extracts. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(4), 880-887. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13351>
 37. Parikh, D. M. (2015). Vacuum Drying: Basics and Application. *Chemical Engineering*, 122(4), 48.
 38. Piazzolla, F., Pati, S., Amodio, M. L., & Colelli, G. (2016). Effect of harvest time on table grape quality during on-vine storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(1), 131-139. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7072>
 39. Pileh, F., Farokhzad, A., Esmaili, M., & Dolati Baneh, H. (2015). Effect of harvest time and storage duration on some biochemical attributes of table grape cv 'Bidaneh Sefid. *Food Research Journal*, 25(4), 564-576. (in Persian).
 40. Sabanci, S., & Icier, F. (2017). Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice. *Journal of Food Engineering*, 212, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.004>
 41. Sawheny, R. L., Pangavhane, D. R., & Sarsavadia, P. N. (1999). Drying kinetics of single layer Thompson Seedless grape under heated ambient air conditions. *Drying Technology*, 17(1-2), 215-236. <https://doi.org/10.1080/07373939908917526>
 42. Serratos, M. P., Marquez, A., Lopez-Toledano, A., Medina, M., & Merida, J. (2011). Changes in hydrophilic and lipophilic antioxidant activity in relation to their phenolic composition during the chamber drying of red grapes at a controlled temperature. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(5), 1882-1892. <https://doi.org/10.1021/jf1042536>
 43. Shojah, A., Ghasemnejad, M., & Mortazavi, S. N. (2011). The Changes of Antioxidant Capacity and Post Harvest Quality of Thompson navel and Blood Orange Fruits during Storage. *Journal of Horticultural Science*, 25(2), 147-155. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jhort4.v1390i0.9984>
 44. Sotiropoulos, T. E. (2008). Performance of the apple (*Malus domestica* Borkh) cultivar 'Imperial Double Red Delicious' grafted on five rootstocks. *Horticultural Science*, 35(1), 7-11. <https://doi.org/10.17221/645-HORTSCI>
 45. Topalovic, A., & Mikulic-Petkovsek, M. (2010). Changes in sugars, organic acids and phenolics of grape berries of cultivar cardinal during ripening. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(3-4), 223-227.
 46. USDA. (2018). *Raisins: World markets and trade*. U.S. Department of Agriculture. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/raisins>
 47. Velioglu, Y. S., Mazza, G., Gao, L., & Oomah, B. D. (1998). Antioxidant activity and total phenolics in selected

- fruits, vegetables and grain products. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 46(10), 4113-4117. <https://doi.org/10.1021/jf9801973>
48. Wang, J., Law, C. L., Nema, P. K., Zhao, J. H., Liu, Z. L., Deng, L. Z., ... & Xiao, H. W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering*, 224, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.002>
49. Wang, J., Mu, W. S., Fang, X. M., Mujumdar, A. S., Yang, X. H., Xue, L. Y., ... & Zhang, Q. (2017). Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: Effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic. *Food and Bioprocess Technology*, 106, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.003>
50. Wang, J., Mujumdar, A. S., Mu, W., Feng, J., Zhang, X., Zhang, Q., ... & Xiao, H. W. (2016). Grape drying: Current status and future trends. *Grape and Wine Biotechnology*, 7, 145-165. <https://doi.org/10.5772/64662>
51. Xie, L., Mujumdar, A. S., Fang, X. M., Wang, J., Dai, J. W., Du, Z. L., Xiao, H. W., Liu, Y. H., & Gao, Z. J. (2017). Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of Wolfberry (*Lycium barbarum* L.): effects on drying kinetics and quality attributes. *Food and Bioprocess Technology*, 102, 320-331. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.012>
52. Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, S. M. A., & Askari, G. R. (2012). Comparing the effects of microwave and conventional heating methods on the evaporation rate and quality attributes of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1328-1339. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0603-x>
53. Zhou, X., Li, R., Lyng, J. G., & Wang, S. (2018). Dielectric properties of kiwifruit associated with a combined radio frequency vacuum and osmotic drying. *Journal of Food Engineering*, 239, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.006>
54. Zomorodi, Sh., Amir Shaghghi, F., & Gerami, K. (2022). Modification of the traditional grape drying place using control heating plates and evaluate its energy consumption. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 19(127), 167-176. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/FSCT.19.127.167>

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 511-528

Investigating the Performance of Agricultural Mechanization Service Cooperatives in Gilan Province Using a Combined Delphi-AHP-SWOT Method

M. Bamdad¹, M. Zangeneh^{1*}, S. H. Payman¹

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

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

Received: 08 September 2024

Revised: 20 October 2024

Accepted: 22 October 2024

Available Online: 21 April 2025

How to cite this article:

Bamdad, M., Zangeneh, M., & Payman, S. H. (2025). Investigating the Performance of Agricultural Mechanization Service Cooperatives in Gilan Province Using a Combined Delphi-AHP-SWOT Method. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 511-528. <https://doi.org/10.22067/jam.2024.89685.1280>

Introduction

The cooperative system for agricultural mechanization services holds significant potential to boost agricultural production. Key benefits include providing services during crop cultivation to reduce labor demands, delivering centralized and specialized services to lower production costs, facilitating the adoption of new technologies, and improving productivity in agricultural processes and supply chains. However, in Gilan Province, Iran, over 198 of the 260 registered mechanization service cooperatives, approximately 76%, are currently inactive. This significant decline highlights an urgent need to assess the performance of the mechanization service system to ensure its sustainability. Therefore, this study aims to identify the main challenges underlying the inactivity of these cooperatives in Gilan Province.

Materials and Methods

This study aims to evaluate the performance of mechanization service cooperatives in Gilan Province. To achieve this objective, a combined methodology incorporating Delphi methods, hierarchical analysis process, and the SWOT (strengths, weaknesses, opportunities, and threats) analysis was employed. Initially, factors influencing the performance of agricultural service cooperatives were identified through a review of existing literature concerning the performance pathology of agricultural cooperatives, as well as the specific factors impacting mechanization cooperatives and the associated challenges they face. The Delphi method was utilized to align the identified factors with the operational conditions of agricultural mechanization service cooperatives in Gilan Province. The Delphi process was conducted over three rounds, culminating in the identification and prioritization of the primary factors. Subsequently, the SWOT matrix was applied to assess the strengths, weaknesses, opportunities, and threats related to the mechanization service cooperatives, with input from a panel of experts for ranking purposes. Ultimately, strategies to address the performance challenges were developed based on the SWOT results and prioritized using AHP.

Results and Discussion

The findings of this research indicate that the lack of capital in the cooperative company, coupled with financial and credit difficulties, insufficient tools and equipment needed for generating income for members, stringent bank policies regarding the provision of financial aid, and the presence of discrepancies in the selection of cooperative members constitute the primary obstacles faced by these companies. The most important recommended strategies are as follows: Leverage internal investment from cooperative members. Attract capital



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.89685.1280>

from entrepreneurs. Organize tours to visit successful cooperatives for information exchange and learning. Reduce service fees. Increase access to financial assistance. Lower guarantee requirements for newly established cooperatives and entrepreneurs seeking financial support

Conclusion

In this study, a comprehensive review of existing literature was conducted to identify the challenges affecting cooperative performance. These challenges were categorized into six main groups: financial, operational, organizational, structural, social, and environmental. The Delphi method, involving a panel of nine field experts, was used to evaluate these issues. Additionally, a SWOT analysis, based on previous research, was carried out to assess the strengths, weaknesses, opportunities, and threats related to cooperatives. To determine the relative importance of each challenge, a hierarchical analysis was performed to rank them accordingly.

The results revealed that the most pressing challenges are primarily financial or have a significant financial impact on cooperative operations. Key issues include strict bank loan requirements, internal financial and credit difficulties, limited capital resources, and a lack of necessary tools and equipment to generate income for members. Moreover, the member selection process was identified as a critical concern, as it can lead to reduced motivation and inadequate fulfillment of responsibilities among cooperative members.

Keywords: Cooperative members, Delphi, Facilities, Mechanization services, Troubleshooting

بررسی عملکرد تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان با استفاده از رهیافت

ترکیبی Delphi-AHP-SWOT

مهدی بامداد^۱، مرتضی زنگنه^{۱*}، سیدحسین پیمان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

چکیده

این مطالعه باهدف ارزیابی عملکرد تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون استان گیلان انجام شد. بدین منظور از یک رهیافت ترکیبی از روش‌های دلفی، تحلیل سلسله مراتبی و همچنین روش سوات استفاده شد. ابتدا عوامل مؤثر بر عملکرد تعاونی‌های خدمات کشاورزی با مرور مطالعات پیشین در حوزه آسیب‌شناسی عملکرد تعاونی‌های کشاورزی، نزدیک‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد تعاونی‌های مکانیزاسیون و آسیب‌های وارده بر آن‌ها شناسایی شد. برای انطباق گویه‌های به‌دست‌آمده از منابع با شرایط تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان از روش دلفی استفاده شد. فرآیند دلفی در سه دور انجام شد و نهایتاً گویه‌های اصلی مشخص شده و وزن‌دهی شدند. در ادامه با استفاده از ماتریس سوات، نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدهای تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون مشخص شده و از گروه کارشناسان برای رتبه‌بندی آن‌ها استفاده شد. در پایان، راهبردهای سوات برای مواجهه با آسیب‌های وارده بر عملکرد تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون تعیین و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که ناچیز بودن سرمایه شرکت تعاونی و مشکلات مالی و اعتباری، نبود ابزار و ادوات کافی برای کسب درآمد اعضا، سخت‌گیری بانک‌ها درخصوص ارائه تسهیلات، وجود انحراف در انتخاب اعضای تعاونی مهم‌ترین موانع این شرکت‌ها هستند. مهم‌ترین راهبردهای پیشنهادی عبارتند از: بهره‌گیری از سرمایه‌گذاری داخلی (اعضا شرکت) و جذب سرمایه از طرف کارآفرینان، اجرای تورهای بازدید از سایر تعاونی‌های فعال برای تبادل اطلاعات با اهداف آموزشی، کاهش کارمزد، افزایش مقدار تسهیلات و کاهش الزامات ضمانت در فرآیند دریافت تسهیلات برای تعاونی‌های تازه تأسیس و کارآفرینان این حوزه.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌شناسی، اعضای تعاونی، تسهیلات، خدمات مکانیزاسیون، دلفی

مقدمه

جدید. به‌طور کلی هدف اصلی تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی، ارائه خدمت برای افزایش بهره‌وری فرآیندهای کشاورزی و تمام زنجیره‌های تأمین مرتبط با آن است (Shuqi, Jiasheng, & Abdulquadri & Dongwei, 2019). عبدالقادری و محمد (Abdulquadri & Mohammed, 2012) این‌طور اشاره دارند که در زمینه آزادسازی و جهانی‌سازی تجارت، رویکرد تعاونی به‌واسطه مفهوم خود-کمکی و مشارکت اعضا، یکی از بهترین معانی خود-حفاظتی برای کشاورزان کوچک است. از این‌رو تقویت اعتبار تعاونی و بهبود کارکرد تأمین اعتبار کشاورزی، برای دولت حیاتی است. تعاونی خدمات مکانیزاسیون کشاورزی، شرکتی است که در آن صاحبان سرمایه و ماشین‌های کشاورزی برای رفع نیازهای مکانیزاسیون اعضای تعاونی و همچنین کشاورزان دیگر گرد هم آمده‌اند و در اداره کل تعاون، کار و رفاه اجتماعی به‌عنوان شرکت تعاونی ثبت‌شده‌اند. رقبای موجود برای تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون، شرکت‌های سهامی خاص مکانیزاسیون و ماشین‌داران مستقل (فاقد قالب شرکتی) هستند. بر

برای کاهش مشکلات بخش کشاورزی و ارتقای بهره‌وری آن، باید از فناوری مناسب و مدیریت صحیح ماشین‌ها و ادوات کشاورزی بهره برد. از این‌رو، استقرار نظام‌های بهره‌برداری از جمله شرکت‌های تعاونی و خصوصی خدمات مکانیزاسیون، برای دستیابی به یک ساختار مدیریتی صحیح، الزامی هستند (Kianfar, 2016). تعاونی‌های مکانیزاسیون کشاورزی سهم عمده‌ای در افزایش تولیدات کشاورزی دارند. ارائه خدمات در فرآیند کشت محصولات مختلف و آزادسازی نیروی کارگری بیشتر از بخش کشاورزی؛ ارائه خدمات متمرکز، سازماندهی شده و اختصاصی که می‌توانند به‌طور اساسی هزینه‌های تولید را کاهش دهد؛ ایفای نقش مهم در به‌کارگیری فناوری‌های

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

 <https://doi.org/10.22067/jam.2024.89685.1280>

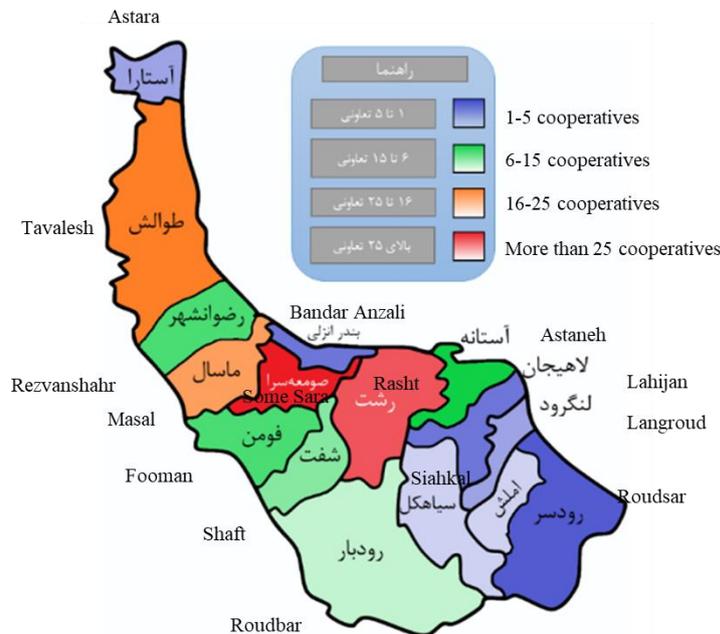
و دوم را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به ریزش چشم‌گیر تعاونی‌های مکانیزاسیون به نظر می‌رسد که بهره‌برداری از ماشین‌های کشاورزی در قالب شرکت تعاونی دارای مسائل و مشکلاتی بوده که باعث شکست آن در سطح وسیعی در استان گیلان شده است. لذا شرایط فعلی نشان‌دهنده بازدهی نداشتن این شرکت‌ها بوده که ضرورت آسیب‌شناسی و ارزیابی عملکرد آن‌ها را برجسته می‌کند.

اساس آمار ارائه‌شده توسط اداره کل تعاون استان گیلان در آبان ماه سال ۱۳۹۸، از تعداد کل ۲۶۰ تعاونی خدمات مکانیزاسیون ثبت‌شده، بالغ بر ۱۹۸ تعاونی یا به عبارت دیگر ۷۶ درصد از کل تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون، غیرفعال و راکد شده‌اند. در شکل ۱ و ۲ به ترتیب پراکندگی تعاونی‌های فعال و غیرفعال خدمات مکانیزاسیون کشاورزی در استان گیلان نشان داده شده است. شهرستان‌های صومعه‌سرا و رشت به ترتیب با ۵۰ و ۳۴ تعاونی غیرفعال، رتبه‌های اول



شکل ۱- نقشه پراکندگی تعاونی‌های فعال خدمات مکانیزاسیون کشاورزی در استان گیلان

Fig. 1. The distribution map of active agricultural mechanization service cooperatives in Gilan province



شکل ۲- پراکندگی تعاونی‌های غیرفعال و راکدشده خدمات مکانیزاسیون کشاورزی در استان گیلان

Fig. 2. Distribution of inactive and stagnant agricultural mechanization service cooperatives in Gilan province

شهرستان، به تفکیک تعاونی‌های فعال و غیرفعال در جدول ۱ آمده است. استان گیلان دارای ۶۲ تعاونی خدمات مکانیزاسیون در حال بهره‌برداری است که در مجمع آن‌ها ۴۴۷ عضو وجود دارد و با سرمایه ۹ میلیارد و ۳۳۸ میلیون ریال، ۳۳۴ فرصت شغلی ایجاد کرده است.

اطلاعات ارائه‌شده توسط اداره کل تعاون درخصوص تعداد تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون در شهرستان‌های استان گیلان، تعداد افراد مجمع تعاونی‌ها، میزان سرمایه مجموع تعاونی‌های هر شهرستان و میزان اشتغال‌زایی تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون در هر

جدول ۱- آمار تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون استان گیلان

Table 1- Statistics of mechanization service cooperatives in Gilan province Anonymous (2019)

شهرستان County	تعاونی‌های فعال Active cooperatives				تعاونی‌های غیرفعال Inactive cooperatives			
	اشتغال‌زایی (نفر) Employment generation (people)	سرمایه (هزار ریال) Capital (thousand Rials)	مجمع (نفر) Assembly (people)	تعداد No.	اشتغال‌زایی (نفر) Employment generation (people)	سرمایه (هزار ریال) Capital (thousand Rials)	مجمع (نفر) Assembly (people)	تعداد No.
آستارا Astara	0	0	0	0	10	4200	32	2
آستانه‌اشرفیه Astaneh Ashrafieh	37	162400	44	6	88	171150	108	15
املش Amlash	7	10500	7	1	5	1000	20	1
بندر انزلی Bandar Anzali	0	2100	7	1	24	15050	21	3
رشت Rasht	88	159400	63	9	225	860640	263	34
رضوانشهر Rezvanshahr	0	0	0	0	78	85870	103	13
رودبار Roudbar	18	3150	21	3	38	38700	44	6
رودسر Roudsar	8	2450	14	2	53	29250	36	5
سیاهکل Siahkal	6	22500	14	2	8	2400	8	1
شفت Shaft	61	484400	72	10	54	78600	60	8
صومعه‌سرا Some Sara	70	6612900	124	17	302	511300	384	50
طوالش Tavalesh	8	12600	14	2	140	738470	166	23
فومن Foومان	16	17800	21	3	78	351900	89	13
لاهیجان Lahijan	10	1064000	14	2	25	12100	29	3
لنگرود Langroud	0	0	0	0	11	12600	14	2
ماسال Masal	15	784700	32	4	129	75450	137	19
مجموع Total	344	9338900	447	62	1268	2988680	1514	198

پیشینه تحقیق

بر اساس مطالعه‌ای در سال ۱۳۸۵، عوامل مؤثر بر عملکرد تعاونی‌های ارائه خدمات مکانیزاسیون در استان گیلان، عواملی شامل ورود افراد غیربومی و کاهش درآمد افراد بومی، مشخص نبودن نحوه پرداخت بین کشاورز و شرکت، متناسب نبودن ادوات با شرایط منطقه و نبود راننده حرفه‌ای برای کار با ادوات شناسایی شد. همچنین مشکلات دیگر این شرکت‌ها، کوچک بودن قطعات زراعی و از این جهت پایین بودن راندمان زراعی ادوات، تسطیح نبودن زمین‌های کشاورزی و نبود راه ارتباطی بین آن‌ها و اختلافات بین نوبت دریافت خدمت در فصل زراعی با تراکم کاری بالا گزارش شد (Payman & Bagheri, 2006). همچنین فقدان برنامه جامع و بلندمدت، نامشخص بودن جایگاه حقوقی و وجود اختلاف با مراجع دولتی به عنوان عواملی هستند که تعاونی‌ها را تهدید می‌کنند (Sa'di, 2018). بر اساس یک تحقیق درباره عوامل عدم موفقیت شرکت‌های تعاونی بخش کشاورزی در شهرستان‌های بوشهر و دشتستان، عواملی همچون همکاری نکردن دستگاه‌های اجرایی استان، هزینه‌های بالای تأمین مواد اولیه، بالا بودن کارمزد تسهیلات بانکی و دشوار بودن مسیر دریافت آن‌ها، ناچیز بودن سرمایه شرکت، عدم همکاری مناسب صندوق تعاونی استان، ارائه نامطلوب خدمات بازاریابی و نبود اطلاع‌رسانی مناسب در زمینه‌های مختلف، به عنوان عواملی شناسایی شدند که نقش مهمی در عدم موفقیت این تعاونی‌ها داشته‌اند (Khafae, 2010). در مطالعه دیگری برای شناسایی عوامل مؤثر بر موفقیت تعاونی‌ها، عواملی مانند عوامل فرهنگی اجتماعی (با گویه‌هایی مانند مشارکت فعال اعضا و روحیه همکاری بین آن‌ها)، شخصیتی (با گویه‌هایی مانند علاقه به کار، ابتکار و نوآوری)، آموزشی (با گویه‌هایی مانند آشنایی اعضا با اصول تعاونی و بهره‌مندی از دوره‌های آموزش فنی)، مدیریتی (با گویه‌هایی مانند تخصص، پاسخگویی و تجربه مدیر) و اقتصادی (با گویه‌هایی مانند بازاریابی، بهره‌مندی از تسهیلات دولتی و مشارکت اقتصادی اعضا) را مورد بررسی قرار دادند و در حوزه هر عامل به ارائه راهکار پرداختند (Karami & Agahi, 2010). در تحقیقی دیگر، علت اصلی رکود فعالیت شرکت‌های تعاونی و در نتیجه غیرفعال شدن آن‌ها، مشکلات درونی شرکت‌ها از قبیل ضعف مدیریتی، کمبود مهارت، اختلاف سلیقه، انتظارات نابجا از اداره تعاون و برخی کمبودهای خدمات زیربنایی و مشکلات برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری از سوی سازمان‌های دولتی، شناخته شد (Hazrati & Babaei Fini, 2012). مظفری (Mozaffari, 2016)، با بررسی کارایی اقتصادی تعاونی‌های کشاورزی در شهرستان بوئین‌زهرا، عواملی مانند سیاست‌های نامناسب در قیمت‌گذاری و نوسانات قیمتی محصولات کشاورزی، خدمات پایین

در زمینه بسته‌بندی، فرآوری، بازاریابی و توزیع محصولات و نبود برنامه‌ریزی جامع بلندمدت از سوی مدیران را به عنوان مهم‌ترین عوامل ناکارآمدی فرآیند مدیریت و نظام بازاریابی تعاونی‌های منطقه شناسایی کرد و متناسب با آن به ارائه راهکار پرداخت. تحقیق دیگری در شناسایی موانع بازاریابی تعاونی‌های تولید کشاورزی، به تأثیر مثبت و معنی‌دار موانع اقتصادی، انسانی، بازاری، عملیاتی، ساختاری و مدیریتی در نظام بازاریابی شهرستان درگز پی برد. عواملی مانند حضور واسطه‌ها و دلالتان در هنگام فروش، عدم به‌کارگیری نیروی متخصص و سیاست‌های نامناسب در قیمت‌گذاری، مهم‌ترین موانع ناکارایی نظام بازاریابی تعاونی‌های تولید کشاورزی در این منطقه (Feizabadi & Javadi, 2017). در پژوهشی با در نظر گرفتن تعاونی‌ها به عنوان یک سیستم، عوامل درونی و بیرونی مؤثر بر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. عوامل بیرونی مؤثر بر تعاونی‌ها عبارتند از: تغییرات سنی کشاورزان، فناوری‌های جدید، تغییر فضای رقابتی، نقش مصرف‌کننده، صنعتی‌سازی (از مزرعه تا خرده‌فروشی با زنجیره تأمین)، تغییرات ساختاری در فرآوری و فروش مواد غذایی، جهانی‌سازی، فضای سیاسی، ناهنجاری‌های قیمت-درآمد، مقررات زیست‌محیطی. عوامل درونی مؤثر بر تعاونی‌ها عبارتند از: هزینه‌های مالی تعاونی، پراکندگی خصوصیات و نیازهای اعضا، اثربخشی هیئت‌مدیره، نبود مدیریت تعاونی محور، فعالیت‌های ارزش‌افزوده (U.S. Department of Agriculture, Rural Business-Cooperative Service, 2002). مارسیس و همکاران (Marcis, de Lima, & da Costa, 2018) برای ارزیابی عملکرد تعاونی‌های کشاورزی دست به طراحی مدلی با نام ارزیابی پایداری تعاونی‌های کشاورزی^۱ زدند. در این مدل عوامل مالی (مانند بسته‌بندی مالی از جمله شاخص‌های بازگشت سرمایه، قرض و جریان نقدینگی)، زیست‌محیطی (با بررسی هوا، خاک، مصرف انرژی، مدیریت پسماند و غیره)، اجتماعی (با گویه‌هایی مانند درآمد کارکنان، رابطه نیروی انسانی، آموزش و جامعه)، اقتصادی (ارتباطات و بازاریابی، چرخه تأمین) و شاخص‌های اختصاصی تعاونی‌ها (مانند کیفیت خدمات به اعضا تعاونی، نفع اعضا، آموزش و تعیین صلاحیت) مورد بررسی قرار می‌گیرند. علاوه بر استفاده در ارزیابی عملکرد، می‌توان از این مدل برای تعیین راهبردهای عملکردی، تصمیم‌گیری و گزارش پایداری کمک گرفت. هدف از مطالعه حاضر شناسایی مشکلات اصلی عدم فعالیت تعاونی‌ها در استان گیلان است.

به منظور انتخاب روش ارزیابی آسیب‌های تعاونی‌های خدمات کشاورزی فراوانی مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده برای جمع‌آوری و

در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ می‌کند. گوا و ژائو (Guo & Zhao, 2022) یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی ارائه کردند که بر اساس AHP است و قابلیت کاربرد در مسائل تصمیم‌گیری پیچیده را دارد. مردانی و همکاران (Mardani, Zavadskas, Govindan, Senin, & Jusoh, 2021) یک مرور جامع بر ادبیات AHP ارائه دادند و کاربردهای آن را در زمینه‌های مختلف بررسی کردند. پاموچار و همکاران (Pamučar, Stević, & Sremac, 2022) یک مدل جدید برای تعیین ضرایب وزنی معیارها در مدل‌های MCDM ارائه دادند که بر اساس AHP است. این مطالعات نشان می‌دهند که AHP ابزار مؤثری برای آسیب‌شناسی عملکرد تعاونی‌های خدمات کشاورزی است و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا عوامل مؤثر را شناسایی و اولویت‌بندی کنند.

در مطالعه‌ای توسط رضایی و همکاران (Rezaei, Karimi, & Ahmadi 2021) از روش SWOT برای ارزیابی عملکرد تعاونی‌های کشاورزی در ایران استفاده شد و نتایج نشان داد که عواملی مانند دسترسی به بازارهای جدید و همکاری بین تعاونی‌ها از فرصت‌های مهم به‌شمار می‌روند. همچنین، در تحقیق دیگری توسط کریمی و همکاران (Karimi, Salehi, & Zare 2022) به بررسی چالش‌های پیش روی تعاونی‌های کشاورزی در افغانستان پرداخته شد و با استفاده از روش SWOT، موانع اصلی شناسایی گردید. به‌علاوه، در مطالعه‌ای توسط صالحی و همکاران (Salehi, Zare, & Ahmadi 2022) تأکید شد که استفاده از روش SWOT در کنار سایر روش‌های تصمیم‌گیری مانند AHP می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر عوامل مؤثر بر عملکرد تعاونی‌ها کمک کند و در نهایت، در تحقیقی توسط زارع و همکاران (Zare, Karimi, & Rezaei, 2023) به بررسی تأثیر سیاست‌های دولتی بر عملکرد تعاونی‌ها پرداخته شد و نتایج نشان داد که تدوین راهبردهای مناسب بر اساس تحلیل SWOT می‌تواند به بهبود وضعیت این تعاونی‌ها کمک کند. در تحقیق دیگری توسط سیکالومبی و موچموا (Sikalumbi, & Muchemwa, 2021)، چالش‌های پیش روی تعاونی‌ها در کشورهای درحال توسعه بررسی شد و نتایج نشان داد که ضعف در مدیریت و عدم آموزش مناسب از موانع اصلی هستند.

مواد و روش‌ها

برای ارزیابی عملکرد تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون، ابتدا عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این امر از مطالعات پیشین با موضوع مشترک و نظر کارشناسان این حوزه بهره گرفته شد. با بررسی مطالعات انجام‌شده در حوزه آسیب‌شناسی عملکرد تعاونی‌های کشاورزی، نزدیک‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد تعاونی‌های مکانیزاسیون و آسیب‌های وارده بر آن‌ها شناسایی شد.

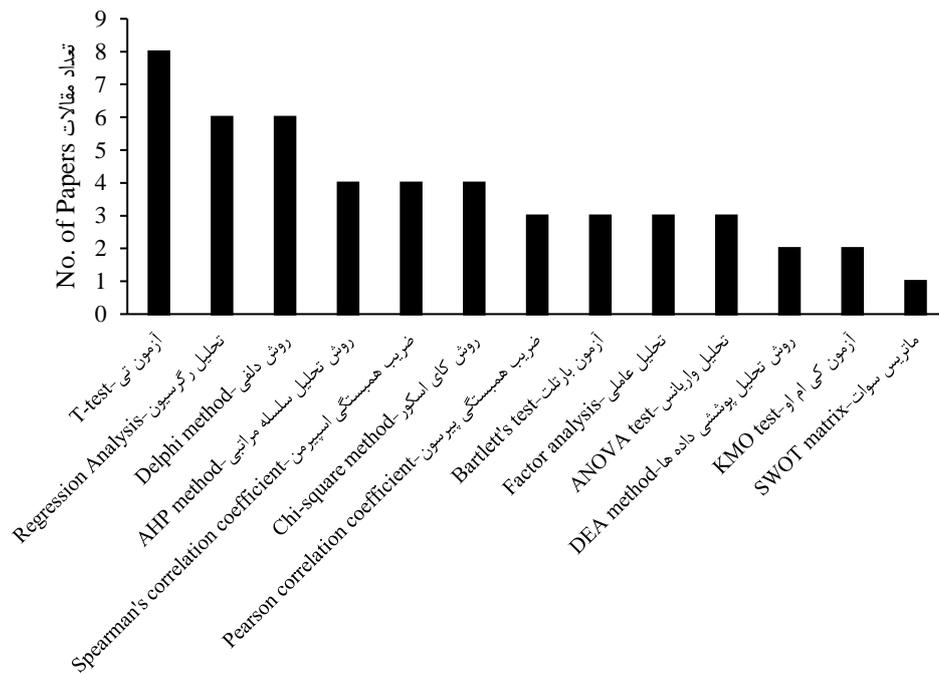
تجزیه و تحلیل داده‌ها در مقالات منتخب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در تحقیقات بررسی شده، از آزمون‌های پارامتریک و ناپارامتریک استفاده شده است. آزمون تی، تحلیل رگرسیون و روش دلفی^۱ رایج‌ترین روش‌ها هستند. آزمون تی برای تعیین این که آیا یک فرضیه بر موضوع مورد مطالعه مؤثر است یا خیر استفاده شده است (Feizabadi & Javadi, 2017). تحلیل رگرسیون روشی قابل اعتماد برای شناسایی متغیرهایی است که بر موضوع مورد بحث تأثیر دارند. فرآیند انجام رگرسیون اجازه می‌دهد تا با اطمینان مشخص شود که کدام عوامل بیشتر اهمیت دارند، کدام عوامل را می‌توان نادیده گرفت و چگونه این عوامل بر یکدیگر تأثیر می‌گذارد (Aldrich, 2005). روش دلفی فرآیندی است که برای رسیدن به نظر یا تصمیم جمعی از طریق نظرسنجی از یک گروه از کارشناسان استفاده می‌شود. کارشناسان به چندین دور از پرسشنامه‌ها پاسخ می‌دهند و پاسخ‌ها پس از هر دور جمع‌آوری شده و با گروه به اشتراک گذاشته می‌شود. معایب دلفی عبارتند از: فقدان دستورالعمل‌های روش‌شناختی روشن، الزام تعهد مستمر از شرکت‌کنندگانی که چندین بار سؤال مشابهی از آن‌ها پرسیده می‌شود، و عدم وجود مدرکی دال بر قابلیت اطمینان به این روش (یعنی اگر دو گروه سؤال یکسانی را دریافت کنند، ممکن است به یک جواب نرسند) (Dalkey & Helmer, 1963). روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، یک رویکرد دقیق برای تعیین کمیت وزن معیارهای تصمیم‌گیری است. از تجربیات کارشناسان برای تخمین مقادیر نسبی اهمیت عوامل از طریق مقایسه‌های زوجی استفاده می‌شود. هر یک از پاسخ‌دهندگان با استفاده از پرسشنامه طراحی شده ویژه، اهمیت نسبی هر جفت گویه را باهم مقایسه می‌کنند. مشکل این روش قضاوت در مورد یک تصمیم است، زیرا معمولاً احساسات انسان مبهم است (Forman & Gass, 2001). همچنین برای اعتبارسنجی عوامل مورد مطالعه از آزمون‌های بارتلست و کی ام او (KMO) استفاده شده است. با توجه به نتایج، روش دلفی، فرآیند سلسله‌مراتبی و آزمون تی، محبوب‌ترین روش‌های جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات در تحقیقات حوزه تعاونی‌ها هستند. در زمینه تعاونی‌های کشاورزی، AHP به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی عوامل مختلفی که بر عملکرد تأثیر می‌گذارد، مانند شرایط بازار، تخصیص منابع و کارایی عملیاتی، اثبات شده است. آسیب‌شناسی عملکرد تعاونی‌های خدمات کشاورزی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) در چندین مطالعه اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. دنگ و همکاران (Deng, Hu, Deng, & Mahadevan 2021) یک روش جدید مبتنی بر AHP ارائه دادند که با استفاده از اعداد، عدم قطعیت را

1- Delphi method

2- Analytical Hierarchy Process (AHP) method

تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون را مشخص کرده و از گروه کارشناسان برای رتبه‌بندی آن‌ها استفاده شد. در انتهای مرحله آسیب‌شناسی، عوامل مؤثر بر عملکرد، دلایل شکست، نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدهای تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی مورد شناسایی قرار گرفت.

برای انطباق گویه‌های به‌دست‌آمده از منابع با شرایط تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی از روش دلفی استفاده شد تا گویه‌های نامرتب را حذف کرده و از گویه‌های مدنظر گروه کارشناسان هم استفاده شود. کارشناسان شرکت‌کننده در پرسشنامه‌ها، کارشناسان دانشگاهی، متخصصان جهاد کشاورزی و اداره تعاون بود. در ادامه کار با استفاده از منابع مطالعاتی، نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدهای

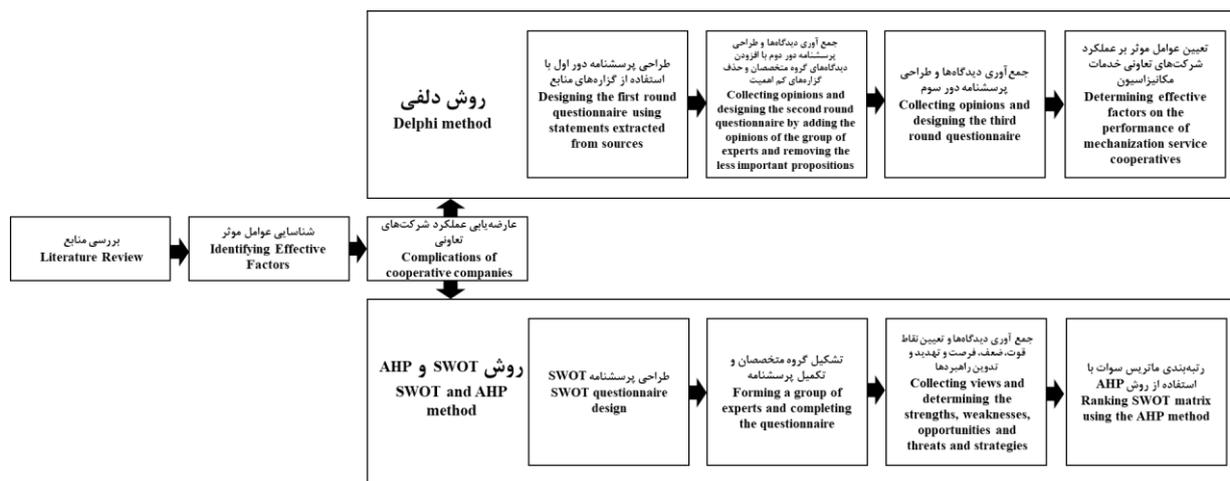


شکل ۳- فراوانی استفاده از روش‌های مختلف در پژوهش‌های حوزه تعاونی‌ها

Fig. 3. The frequency of using different methods in research in the field of cooperatives

کارشناسان اداره کل تعاون، کار و رفاه اجتماعی استان و همچنین برخی از صاحبان تعاونی خدمات مکانیزاسیون استفاده شد. در گام اول، پرسشنامه دلفی با دسته‌بندی گویه‌ها به دسته‌های مالی، عملیاتی، سازمانی، ساختاری، اجتماعی و زیست‌محیطی طراحی شده، سپس از گروه متخصصان خواسته شد تا به گویه‌ها، بر اساس اهمیتشان در طیف هفت گزینه‌ای، امتیاز دهند و در صورت مدنظر داشتن عوامل جدید در هر دسته، آن‌ها را بیان کنند. در گام دوم، عواملی که امتیاز کافی را کسب نکردند حذف کرده و با اضافه کردن عوامل پیشنهادی کارشناسان مشارکت‌کننده، پرسشنامه مرحله دوم طراحی شد. در گام سوم، با استفاده از میانگین هندسی امتیازات، اهمیت و اولویت هر گویه در هر دسته، مشخص شد.

مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۴ نشان داده شده است. هدف از این مطالعه شناسایی مشکلات اصلی عدم فعالیت تعاونی‌ها در استان گیلان است. برای تعیین معیارهای پرسشنامه‌ها، از منابع مطالعه شده و ادبیات موجود در این زمینه استفاده شد. به این صورت که برای پرسشنامه دلفی آسیب‌های شناسایی شده توسط مطالعات پیشین، دسته‌بندی شده و در قالب پرسشنامه مورد ارزیابی گروه کارشناسان دلفی قرار گرفت. با استفاده از روش دلفی عمل امتیازدهی به علل شناسایی شده انجام گرفت تا عوامل واقعی با توجه به نظر کارشناسان مشخص گردند و این کار در سه مرحله انجام شد. انتخاب کارشناسان در روش دلفی بر اساس میزان دانش آنها از موضوع تعاونی‌ها بود. بدین ترتیب از تعدادی از اساتید دانشگاهی و



شکل ۴- روش‌شناسی تحقیق
Fig. 4. Research methodology

روش دلفی

روش دلفی که به‌عنوان روش تخمین-گفتگو-تخمین^۱ هم شناخته می‌شود، یک روش نظام‌مند و کیفی برای پیش‌بینی است که با جمع‌آوری نظرات گروهی از کارشناسان از طریق پخش چندین دور پرسشنامه محقق می‌شود. این روش بر کارشناسانی متکی است که در مورد یک موضوع خاص آگاه هستند و از این‌رو می‌توانند نتیجه سناریوهای مختلف را پیش‌بینی و احتمال وقوع یک رویداد را بررسی کنند یا درباره یک موضوع خاص به نتیجه برسند. پس از هر دور جمع‌آوری پرسشنامه‌ها، خلاصه‌ای از دور آخر به کارشناسان ارائه می‌شود که این کار به هر کارشناس اجازه می‌دهد تا پاسخ‌های خود را با در نظر گرفتن پاسخ گروه تنظیم کند. این فرآیند تحلیل فردی کارشناس را با مزایای خرد جمعی ترکیب می‌کند. برای تکمیل پرسشنامه هیچ قانون قوی و صریحی در مورد انتخاب تعداد متخصصین وجود ندارد و تعداد آن‌ها وابسته به عوامل همگن^۲ و غیرهمگن^۳، وسعت مشکل، توانایی گروه تحقیق در اداره مطالعه، زمان جمع‌آوری داده‌ها، دامنه مسئله و منابع در دسترس است (Hazrati & Babaei Fini, 2012)؛ معمولاً از یک هیئت (گروه) شامل ۱۰ الی ۲۰ نفر از متخصصان، برای تکمیل پرسشنامه‌ها با این روش، استفاده می‌شود (Powell, 2003).

روش سوات

روش سوات^۴ که با نام تحلیل سوات هم شناخته می‌شود یکی از

- 1- Estimate-Talk-Estimate (ETE)
- 2- Homogeneous
- 3- Heterogeneous
- 4- SWOT- Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats

ابزارهای برنامه‌ریزی راهبردی است که برای ارزیابی وضعیت داخلی و خارجی یک مجموعه استفاده می‌شود. سوات مخفف کلمات لاتین به معنی نقاط قوت، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدات است. نقاط قوت توصیف می‌کنند که سازمان‌ها چه برتری دارند و چه چیزی آن‌ها را از رقبا جدا می‌کند؛ منشأ نقاط قوت از داخل یک سازمان است. نقاط ضعف نیز مسائل داخلی یک سازمان بوده که از رسیدن سازمان به عملکرد مطلوب جلوگیری می‌کنند. فرصت‌ها به عوامل خارجی مطلوب اشاره می‌کنند که می‌توانند مزیت رقابتی در اختیار سازمان قرار دهند و نهایتاً تهدیدها دربرگیرنده عوامل خارجی هستند که احتمال آسیب رساندن به سازمان را دارند. پس از شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای یک سازمان می‌توان با استفاده از ماتریس سوات به ارائه راهکار با توجه به این عوامل پرداخت (Madureira, Nunes, Mata, & Vaz-Velho, 2024). جدول ۲ شکل کلی ماتریس سوات را نشان می‌دهد.

روش تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، نظریه‌ای بر پایه سنجش نسبی^۵ است. در این فرآیند، از روشی ساختارمند (بر پایه اصول ریاضی و روانشناسی) برای نظم‌دهی و تحلیل تصمیمات پیچیده استفاده می‌شود. در سنجش نسبی، به‌جای تمرکز بر اندازه‌گیری دقیق مقادیر، روی نسبت‌های بین آن‌ها تمرکز می‌شود. این روش با انجام مقایسه‌های زوجی (جفت به جفت) بین گزینه‌ها، آن‌ها را رتبه‌بندی می‌کند (González-Prida, Barberá, Viveros, & Crespo, 2012). مراحل انجام تحلیل سلسله مراتبی به این صورت است:

5- Relative measurement

و اهمیت هر عامل نسبت به عامل دیگر از طیف یک تا نه استفاده می‌شود (جدول ۳).

ساختن نمودار سلسله مراتبی که در آن عوامل پژوهش از طریق مطالعه منابع و یا پرسش از خبرگان به دست می‌آیند. مرحله بعدی تشکیل ماتریس مقایسات زوجی است که در آن برای تعیین ارجحیت

جدول ۲- ماتریس سوات

Table 2- SWOT matrix

ماتریس سوات SWOT Matrix	ضعفها Weaknesses	قوتها Strengths
فرصتها Opportunities	راهبردهای تقویتی Offensive strategies	راهبردهای تهاجمی Aggressive strategies
تهدیدها Threats	راهبردهای تدافعی Defensive strategies	راهبردهای رقابتی Competitive strategies

جدول ۳- طیف عبارتهای کلامی برای مقایسات زوجی

Table 3- Range of verbal expressions for paired comparisons

مقدار عددی Numerical value	میزان اهمیت Importance
9	کاملاً مهم‌تر Absolute importance
7	بسیار مهم Very strong importance
5	مهم Strong importance
3	کمی مهم‌تر Moderate importance
1	اهمیت یکسان Equal importance
2, 4, 6, 8	مقادیر میانی Intermediate values

پذیرفت.

هر یک از مشکلات شناسایی شده توسط روش دلفی در دسته‌بندی مربوطه خود رتبه‌بندی شده است. مشکلات اساسی شرکت‌های تعاونی با صرف نظر از دسته‌بندی آن‌ها به شرح زیر است: ناچیز بودن سرمایه شرکت تعاونی و مشکلات مالی و اعتباری در شرکت که چندین تحقیق اخیر نیز به مشکلات مالی و کمبود سرمایه در تعاونی‌های کشاورزی به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی این بخش اشاره کرده‌اند (Mardani, Zavadskas, & Govindan, 2020; Sikalumbi, & Muchemwa, 2021). نبود ابزار و ادوات کافی برای کسب درآمد اعضا یکی دیگر از موانع عملیاتی شرکت‌های تعاونی خدمات مکانیزاسیون است که تحقیقات سایرین نیز بر آن تأکید دارند (Khosravi & Mohammadi, 2021; Mohammadi & Gholami, 2022). سخت‌گیری بانک‌ها در خصوص ارائه تسهیلات، وجود انحراف در انتخاب اعضای تعاونی (تشکیل تعاونی توسط اعضا یک خانواده برای برخورداری از

پس از تشکیل و تکمیل ماتریس مقایسات زوجی، باید نرخ ناسازگاری را تعیین نمود. نرخ ناسازگاری ثبات و پایداری نتایج ماتریس را محاسبه می‌کند. این نرخ در نرم‌افزارهای مختص این روش به صورت خودکار محاسبه شده و مقدار آن باید کمتر از ۰/۱ باشد. در مرحله آخر باید وزن عوامل موردبررسی را تعیین نمود که روش‌های متفاوتی مانند مجموع سطری، مجموع ستونی، میانگین حسابی، میانگین هندسی، روش بردار ویژه، روش مجموع مربعات از جمله این روش‌ها هستند.

نتایج و بحث

نتایج نهایی آسیب‌شناسی تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون با استفاده از روش دلفی در جدول ۴ قابل مشاهده است. برای شناسایی نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدهای تعاونی‌ها، موارد شناخته شده از مطالعات به کارشناسان ارائه شد و با استفاده از مقایسه زوجی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی، رتبه‌بندی این عوامل نیز صورت

تسهیلات و انصراف در ادامه راه) نیز از جمله چالش‌های دیگر این شرکت‌هاست.

جدول ۴- مشکلات شناسایی شده تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان با استفاده از روش دلفی

Table 4- Identified problems of agricultural mechanization service cooperatives in Gilan province using the Delphi method

دسته‌بندی Grouping	مسائل Problems
مالی Financial	ناچیز بودن سرمایه شرکت تعاونی و وجود مشکلات مالی و اعتباری در شرکت The insignificance of the capital of the cooperative company and the presence of financial and credit problems in the company
	بالا بودن کارمزد تسهیلات بانکی High bank facility fees تورم موجود در جامعه و عدم احتساب تورم در ارائه طرح‌های توجیهی Inflation in society and not including inflation in the presentation of explanatory plans
عملیاتی Operational	ابزار و ادوات ناکافی برای کسب درآمد اعضا Inadequate tools and equipment to earn income for members
	مشکلات تعمیر و نگهداری تجهیزات Equipment maintenance problems
	فرسودگی تجهیزات مورد استفاده Wear and tear of used equipment
	نبود نیروی انسانی متخصص Lack of specialized labor
سازمانی Organizational	سخت‌گیری بانک‌ها در خصوص ارائه تسهیلات Strictness of banks regarding the provision of financial facilities
	افزایش کمی تعداد تعاونی‌ها بدون توجه به وضعیت کیفی آن‌ها Increase the number of cooperatives regardless of their quality
	ضعف قوانین مرتبط با حمایت از فعالیت‌های تعاونی Weakness of laws related to supporting cooperative activities
	نبود نظام شفاف برای کنترل عملکرد تعاونی‌ها Absence of a transparent system to control the operation of cooperatives
ساختاری Structural	عدم اطلاع از اصول بازاریابی و مدیریت مالی Not knowing the principles of marketing and financial management
	وجود انحراف در انتخاب اعضای تعاونی (تشکیل تعاونی توسط اعضا یک خانواده برای برخورداری از تسهیلات و انصراف در ادامه راه) Disparity in the selection of cooperative members (formation of cooperatives primarily by family members for personal gain, followed by subsequent withdrawal from participation)
	نبود انگیزه در اعضا برای استمرار فعالیت و سرمایه‌گذاری Lack of motivation among members to continue their activity and investment
	فقدان انگیزه کافی در بین متخصصان برای فعالیت در مناطق روستایی Lack of sufficient motivation among professionals to work in rural areas
	پایین بودن و غیر مرتبط بودن تحصیلات اعضای تعاونی Low and irrelevant education of cooperative members
اجتماعی Social	قصور در اجرای وظایف محوله به اعضا Failure to perform duties assigned to members
	عدم اطلاع و اجرای ناقص اصول تعاونی Lack of information and incomplete implementation of cooperative principles
	پراکنده شدن تدریجی اعضا و عدم همکاری و هماهنگی آن‌ها با یکدیگر The gradual dispersal of members and their lack of cooperation and coordination with each other
	عدم توجه به مصرف بی‌رویه نهاده‌ها Not paying attention to the excessive consumption of inputs
	عدم توجه به آلودگی محیطی برای همسایگان شرکت Not paying attention to environmental pollution for the company's neighbors

و هماهنگی آن‌ها با یکدیگر، نبود انگیزه در اعضا برای استمرار فعالیت و سرمایه‌گذاری، عدم اطلاع از اصول بازاریابی. از دیدگاه کارشناسان نقاط قوت این تعاونی‌ها شامل: مجاورت روستاها با یکدیگر و نزدیکی آن‌ها به شرکت تعاونی، امکان جلوگیری از قانون‌شکنی و رانت‌خواری و رشوه به دلیل نظارت اعضا بر عملکرد تعاونی، امکان افزایش مسئولیت‌پذیری در اعضای تعاونی به دلیل نظارت اعضا بر یکدیگر، امکان ایجاد اعتماد و اطمینان در اعضای تعاونی، افزایش ریسک‌پذیری اعضای تعاونی به دلیل امکان پشتیبانی اعضا از تصمیمات جمعی. از سوی دیگر، اعطای تسهیلات و وام‌های کم‌بهره با بازپرداخت بلندمدت به تعاونی، امکان توسعه خدمات مکانیزاسیون در خارج از محدوده فعالیت شرکت تعاونی، امکان بهره‌گیری از طرح‌های حمایتی سازمان‌های ذی‌ربط (در قالب انتقال فناوری، نوآوری و غیره)، استفاده از تجربیات تعاونی‌های دیگر، ارائه آموزش از سوی اداره کل تعاون و سایر مراکز آموزشی به تعاونی‌ها، از جمله فرصت‌هایی هستند که می‌توانند در بهبود عملکرد تعاونی‌ها مؤثر باشند. از دیدگاه کارشناسان، تورم موجود در جامعه و هزینه‌های روزافزون جاری، بالا بودن کارمزد تسهیلات بانکی، نبود نیروی انسانی متخصص، سخت‌گیری بانک‌ها در خصوص ارائه تسهیلات و عدم همکاری دستگاه‌های اجرایی، مهم‌ترین تهدیدهای موجود برای این تعاونی‌ها هستند.

تدوین راهبردهای تقویت تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی

با استفاده از ماتریس سوات، راهبردهای مختلفی برای رفع موانع و آسیب‌های وارده بر عملکرد شرکت‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی در استان گیلان تدوین شد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل سوات در بخش آسیب‌شناسی، بر اساس نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدهای تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون کشاورزی، ماتریس سوات تشکیل شد و در چهار دسته‌بندی راهبردهای تهاجمی، تقویتی، رقابتی، و تدافعی به ارائه راهکار پرداخته شد. راهبردهای تعریف‌شده برای دسته‌بندی تهاجمی عبارتند از: آموزش استفاده از فضای مجازی برای بازاریابی و تخصیص سرمایه برای راه‌اندازی نرم‌افزار خدمات‌یاب کشاورزی؛ گسترش خدمات شرکت‌های تعاونی خدمات مکانیزاسیون به روستاهای مجاور با استفاده از بازاریابی رودرو؛ ارائه تسهیلات خرید ماشین‌های کشاورزی جدید توسط صندوق تعاون باهدف افزایش حوزه پوشش جغرافیایی شرکت‌های تعاونی در فصل کار؛ برگزاری رویداد سالانه برای بازخورد و انتقال تجربیات تعاونی‌ها به همراه تقدیر از تعاونی‌های برتر سال؛ و اجرای تورهای بازدید از سایر تعاونی‌های فعال برای تبادل اطلاعات با اهداف آموزشی.

نبود نیروی انسانی متخصص در شرکت‌های تعاونی خدمات مکانیزاسیون کشاورزی استان گیلان مشکل دیگری است که به‌طور مشابه سایر تحقیقات نیز به ضعف در مدیریت و نبود نیروی انسانی متخصص در تعاونی‌ها اشاره کرده‌اند که بر عملکرد این تعاونی‌ها تأثیر منفی می‌گذارد (Gholami & Rahmani, 2021; Sikalumbi, & Muchemwa, 2021). فرسودگی تجهیزات مورد استفاده، نبود انگیزه در اعضا برای استمرار فعالیت و سرمایه‌گذاری، و قصور اعضا در اجرای وظایف محوله به آن‌ها بخش آخر از مسائل مؤثر بر عملکرد تعاونی‌های خدمات کشاورزی است که در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (Rahimi & Mardani, 2021; Zare & Khosravi, 2022). پورطاهری و همکاران (Pourtaheri, Papoli, & Fallahi, 2012) در این زمینه یافته‌اند که شکل‌گیری تعاونی‌ها عمدتاً بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۰ بوده که مصادف با تصویب قانون تعاون و ارائه وام برای تشویق مردم به سوی این شکل‌ها بود. نتیجه این امر، تشکیل تعاونی با گردآوردن خویشاوندان بوده است که به دنبال آن برخی از این شرکت‌ها پس از چند سال تعطیل شدند. آن‌ها علاوه بر این دریافته‌اند که کمبود سرمایه و وابستگی تعاونی‌ها به دولت و عدم نظارت دولت بر تسهیلات پرداختی علت اصلی رکود تعاونی‌هاست. انصاری و همکاران (Ansari, Jourablou, Pourafkari, & Hashemianfar, 2015) نیز این‌طور گزارش کردند که ضعف روابط اجتماعی، خویشاوندگرایی و بالا بودن سطح ذهنیت وابسته به دولت، نقش مهمی در بی‌میلی اعضای تعاونی به مشارکت فعالانه در امور تعاونی دارد درعین‌حال که سود بیشتر به افزایش مشارکت اعضا منجر می‌شود. درنهایت، در تحقیقی توسط زارع و همکاران (Zare et al., 2023) به بررسی تأثیر سیاست‌های دولتی بر عملکرد تعاونی‌ها پرداخته شد و نتایج نشان داد که نظرات خبرگان در این زمینه می‌تواند به تدوین سیاست‌های مؤثر کمک کند. در تحقیق غلامی و رحمانی (Gholami & Rahmani, 2021)، از روش دلفی برای شناسایی نیازهای آموزشی کشاورزان در تعاونی‌ها استفاده شد و نتایج نشان داد که آموزش‌های هدفمند می‌تواند به بهبود عملکرد تعاونی‌ها کمک کند.

در بخش دیگری از این تحقیق، با استفاده از روش سوات، ضعف‌ها، قوت‌ها، تهدیدها و فرصت‌های تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون استان گیلان شناسایی شد و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی رتبه‌بندی شد (جدول ۵). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری برای تمامی قضاوت‌ها کمتر از به‌طور متوسط ۰/۰۷۳ گزارش شد که کمتر از ۰/۱ بوده و در محدوده قابل قبول قرار دارد.

با توجه به جدول ۵، مهم‌ترین نقاط ضعف تعاونی‌های خدمات مکانیزاسیون استان گیلان عبارتند از: وجود مشکلات مالی و اعتباری در شرکت تعاونی و ناچیز بودن سرمایه شرکت، قصور در اجرای وظایف محوله به اعضا، پراکنده شدن تدریجی اعضا و عدم همکاری

جدول ۵- نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدات تعاونی‌ها که بر اساس فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی رتبه‌بندی شده‌اند

Table 5- Weaknesses, strengths, opportunities, and threats of cooperatives ranked according to the hierarchical analysis process

دسته‌بندی Grouping	مسائل Problems	وزن Weight
ضعف‌ها Weaknesses	وجود مشکلات مالی و اعتباری در شرکت تعاونی و ناچیز بودن سرمایه شرکت The existence of financial and credit problems in the cooperative company and the insignificance of the company's capital	0.321
	قصور در اجرای وظایف محوله به اعضا Failure to perform duties assigned to members	0.246
	پراکنده شدن تدریجی اعضا و عدم همکاری و هماهنگی آن‌ها با یکدیگر The gradual dispersal of members and their lack of cooperation and coordination with each other	0.209
	نبود انگیزه در اعضا برای استمرار فعالیت و سرمایه‌گذاری Lack of motivation among members to continue their activity and investment	0.143
	عدم اطلاع از اصول بازاریابی Lack of knowledge of marketing principles	0.081
قوت‌ها Strengths	مجاورت روستاها با یکدیگر و نزدیکی آن‌ها به شرکت تعاونی The proximity of the villages to each other and their proximity to the cooperative company	0.253
	امکان جلوگیری از قانون‌شکنی و رانت‌خواری و رشوه به دلیل نظارت اعضا بر عملکرد تعاونی The possibility of preventing law-breaking and rent-seeking and bribery due to the supervision of members on cooperative performance	0.220
	امکان افزایش مسئولیت‌پذیری در اعضای تعاونی به دلیل نظارت اعضا بر یکدیگر The possibility of increasing the responsibility of the cooperative members due to the supervision of the members on each other	0.186
	امکان ایجاد اعتماد و اطمینان در اعضای تعاونی The possibility of creating trust and confidence in cooperative members	0.180
	افزایش ریسک‌پذیری اعضای تعاونی به دلیل امکان پشتیبانی اعضا از تصمیمات گروهی Increasing the risk tolerance of cooperative members due to the possibility of members supporting group decisions	0.161
فرصت‌ها Opportunities	اعطای تسهیلات و وام‌های کم‌بهره با بازپرداخت بلندمدت به تعاونی Granting facilities and low-interest loans with long-term repayment to the cooperative	0.420
	امکان توسعه خدمات مکانیزاسیون در خارج از محدوده فعالیت شرکت تعاونی The possibility of developing mechanization services outside the scope of the cooperative company	0.279
	امکان بهره‌گیری از طرح‌های حمایتی سازمان‌های ذی‌ربط (در قالب انتقال فناوری، نوآوری و ...) The possibility of benefiting from the support plans of relevant organizations (in the form of technology transfer, innovation, etc.)	0.152
	استفاده از تجربیات تعاونی‌های دیگر Using the experiences of other cooperatives	0.075
	ارائه آموزش از سوی اداره کل تعاون و سایر مراکز آموزشی به تعاونی‌ها Providing training to the cooperatives by the General Administration of Cooperatives and other educational centers	0.074
تهدیدها Threats	تورم موجود در جامعه و هزینه‌های روزافزون جاری Inflation in the society and ever-increasing current costs	0.402
	بالا بودن کارمزد تسهیلات بانکی High bank facility fees	0.215
	نبود نیروی انسانی متخصص Lack of specialized labor	0.178
	سخت‌گیری بانک‌ها در خصوص ارائه تسهیلات Strictness of banks regarding the provision of facilities	0.150
	عدم همکاری دستگاه‌های اجرایی Non-cooperation of executive bodies	0.055

آموزش‌های بازاریابی و علوم مالی و حسابداری به مدیران و اعضا شرکت تعاونی و تشویق برای استفاده از نرم‌افزارهای مدیریت مالی و دارایی؛ ارائه تسهیلات مالی و کوپن‌های خرید مواد غذایی برای افزایش رفاه اعضای فعال تعاونی در جهت استمرار همکاری و جلوگیری از قطع روابط؛ و اجرای تورهای آموزشی جهت برانگیختن روحیه رقابتی و آشنایی با اصول تعاون در اعضا ارائه شدند.

در دسته‌بندی راهبردهای تقویتی راهبردهای: کاهش کارمزد، افزایش مقدار تسهیلات و کاهش الزامات ضمانت در فرآیند دریافت تسهیلات برای تعاونی‌های تازه تأسیس و کارآفرینان این حوزه، توسط بانک‌های تعاون و کشاورزی؛ انتقال فناوری‌های کاربردی و جدید از دانشگاه‌ها و پارک‌های علمی فناوری برای بهبود و آسان‌سازی شرایط کار در تعاونی‌ها باهدف تشویق اعضا برای استمرار فعالیت؛ ارائه

جدول ۶- راهبردهای سوات

Table 6- SWOT strategies

دسته‌بندی Grouping	راهبردها Strategies	وزن Weight
	آموزش استفاده از فضای مجازی برای بازاریابی و تخصیص سرمایه برای راه‌اندازی نرم‌افزار خدمات‌یاب کشاورزی Teaching how to use virtual space for marketing and capital allocation for launching agricultural service finder software	0.290
	گسترش خدمات شرکت‌های تعاونی خدمات مکانیزاسیون به روستاهای مجاور با استفاده از بازاریابی رودرو Expanding the services of cooperative mechanization services to nearby villages using face-to-face marketing	0.282
تهاجمی Aggressive	ارائه تسهیلات خرید ماشین‌های کشاورزی جدید توسط صندوق تعاون باهدف افزایش حوزه پوشش جغرافیایی شرکت‌های تعاونی در فصل کار Providing facilities for the purchase of new agricultural machines by the cooperative fund with the aim of increasing the geographical coverage of cooperative companies in the working season	0.214
	برگزاری رویداد سالانه برای بازخورد و انتقال تجربیات تعاونی‌ها به همراه تقدیر از تعاونی‌های برتر سال Holding an annual event for feedback and transferring the experiences of cooperatives along with recognition of the best cooperatives of the year	0.135
	اجرای تورهای بازدید از سایر تعاونی‌های فعال برای تبادل اطلاعات با اهداف آموزشی Carrying out visits to other active cooperatives to exchange information with educational purposes	0.079
	کاهش کارمزد، افزایش مقدار تسهیلات و کاهش الزامات ضمانت در فرآیند دریافت تسهیلات برای تعاونی‌های تازه تأسیس و کارآفرینان این حوزه، توسط بانک‌های تعاون و کشاورزی Reducing the fee, increasing the amount of facilities and reducing the guarantee requirements in the process of receiving facilities for newly established cooperatives and entrepreneurs in this field, by cooperative and agricultural banks	0.501
	انتقال فناوری‌های کاربردی و جدید از دانشگاه‌ها و پارک‌های علمی فناوری برای بهبود و آسان‌سازی شرایط کار در تعاونی‌ها باهدف تشویق اعضا برای استمرار فعالیت Transfer of applied and new technologies from universities and science and technology parks to improve and facilitate working conditions in cooperatives with the aim of encouraging members to continue their activities	0.169
تقویتی conservative	ارائه آموزش‌های بازاریابی و علوم مالی و حسابداری به مدیران و اعضا شرکت تعاونی و تشویق برای استفاده از نرم‌افزارهای مدیریت مالی و دارایی Providing marketing and financial science and accounting training to managers and members of the cooperative company and encouraging them to use financial and property management software	0.149
	ارائه تسهیلات مالی و کوپن‌های خرید مواد غذایی برای افزایش رفاه اعضای فعال تعاونی در جهت استمرار همکاری و جلوگیری از قطع روابط Providing financial facilities and food purchase coupons to increase the well-being of the active members of the cooperative in order to continue cooperation and prevent the disconnection of relations	0.129
	اجرای تورهای آموزشی جهت برانگیختن روحیه رقابتی و آشنایی با اصول تعاون در اعضا Conducting educational tours to stimulate the competitive spirit and familiarize the members with the principles of cooperation	0.051
رقابتی	بهره‌گیری از سرمایه‌گذاری داخلی (اعضا شرکت) و جذب سرمایه از طرف کارآفرینان Taking advantage of internal investment (company members) and attracting capital from entrepreneurs	0.345

Competitive	تشکیل اتحادیه توانمند برای تسهیل مناسبات اداری در جهت پشتیبانی و نظارت بر فعالیت شرکت‌های عضو	0.292
	Forming a powerful union to facilitate administrative relations to support and monitor the activities of member companies	
	نظارت اعضا بر عملکرد یکدیگر و اقدام برای کمک گرفتن از کارشناسان حاضر در سازمان‌ها و دانشگاه‌ها در صورت نیاز	0.201
	Monitoring each other's performance and taking action to get help from experts in organizations and universities if needed	
	استفاده از کارشناس حقوقی برای اقدام در خصوص دریافت و تخصیص تسهیلات	0.085
	Using a legal expert to take action regarding receiving and allocating facilities	
	استفاده از کارشناسان مالی برای پیش‌بینی بازار	0.077
	Using financial experts to forecast the market	
	استفاده از ظرفیت‌های دانشگاهی و دانش‌آموختگان رشته‌های کشاورزی برای بهبود عملکرد تعاونی‌ها	0.262
	Using university capacities and agricultural graduates to improve the performance of cooperatives	
	ایجاد نظارت از جانب مدیر بر اعضا و نظارت اتحادیه بر شرکت‌ها برای جلوگیری از مسئولیت‌گریزی	0.229
	Establishing management supervision over members and union supervision over companies to prevent evasion of responsibility	
تدافعی Defensive	استفاده از جدول زراعی سالانه برای حفظ همکاری اعضا در خارج از فصل و افزایش حاشیه سود	0.224
	Using the annual crop table to maintain members' cooperation in the off-season and increase profit margins	
	استفاده از راننده‌های حرفه‌ای برای کاهش هزینه نهاده‌ها	0.186
	Using professional drivers to reduce input costs	
	تخصیص برنامه‌های مالی برای ایجاد انگیزه در کارشناسان در راستای پر کردن خلأ موجود در زمینه دانش فنی و کاربردی	0.098
	Allocation of financial programs to motivate experts in order to fill the gap in the field of technical and applied knowledge	

یکی از راهبردهای تهاجمی پیشنهادی برای بهبود دانش مدیران و اعضای تعاونی‌ها اجرای تورهای بازدید از سایر تعاونی‌های فعال برای تبادل اطلاعات با اهداف آموزشی است. تحقیق دیگری گزارش کرد که ارتباط با تعاونی‌های دیگر و استفاده از تجربیات تعاونی‌های دیگر در موفقیت تعاونی‌ها موثرند (Karami & Agahi, 2010). در تحقیقی مشخص شد که بازدید از مزارع و تعاونی‌های نمونه و گردش‌های علمی، با ارتقا دانش اعضای تعاونی، رابطه معنی‌دار دارد (Solouki, Malekmohammadi, & Chizari, 2011). برخی تحقیقات نیز استفاده از تجارب تعاونی‌های موفق را الزامی می‌دانند (Ahmadpoor, Mokhtari, Poorsaeed, 2014; Mozaffari, 2016).

کاهش کارمزد، افزایش مقدار تسهیلات و کاهش الزامات ضمانت در فرآیند دریافت تسهیلات برای تعاونی‌های تازه‌تأسیس و کارآفرینان این حوزه، توسط بانک‌های تعاون و کشاورزی، از جمله راهبردهای تقویتی پیشنهاد شده برای بهبود وضعیت تعاونی‌ها است. نتایج تحقیقی نشان داد که اعمال حمایت‌های مالی و مالیاتی و بخشودگی‌های سازمان‌یافته از تعاونی‌ها، اصلاح قوانین و مقررات بانکی و سازگار نمودن آن با شرایط کارآفرینان، افزایش حمایت‌های قیمتی و اختصاص یارانه‌های تولیدی به تولیدکنندگان، اصلاح نظام قیمت‌گذاری در بخش کشاورزی، و تدوین سند ملی توسعه کارآفرینی و کسب‌وکار، بر توسعه و تقویت کارآفرینی مؤثر هستند (Rajaei, Yaghoubi, & Donyaeyi, 2011). محققان دیگری نیز در این زمینه یافته‌اند که دلیل استقبال کم مردم از تعاونی‌ها نبود چشم‌انداز

راهبردهای دسته رقابتی عبارتند از: بهره‌گیری از سرمایه‌گذاری داخلی (اعضا شرکت) و جذب سرمایه از طرف کارآفرینان؛ تشکیل اتحادیه توانمند برای تسهیل مناسبات اداری در جهت پشتیبانی و نظارت بر فعالیت شرکت‌های عضو؛ نظارت اعضا بر عملکرد یکدیگر و اقدام برای کمک گرفتن از کارشناسان حاضر در سازمان‌ها و دانشگاه‌ها در صورت نیاز؛ استفاده از کارشناس حقوقی برای اقدام در خصوص دریافت و تخصیص تسهیلات؛ و استفاده از کارشناسان مالی برای پیش‌بینی بازار. در نهایت راهبردهای تدافعی پیشنهادی شامل: استفاده از ظرفیت‌های دانشگاهی و دانش‌آموختگان رشته‌های کشاورزی برای بهبود عملکرد تعاونی‌ها؛ ایجاد نظارت از جانب مدیر بر اعضا و نظارت اتحادیه بر شرکت‌ها برای جلوگیری از مسئولیت‌گریزی؛ استفاده از جدول زراعی سالانه برای حفظ همکاری اعضا در خارج از فصل و افزایش حاشیه سود؛ استفاده از راننده‌های حرفه‌ای برای کاهش هزینه نهاده‌ها؛ و تخصیص برنامه‌های مالی برای ایجاد انگیزه در کارشناسان در راستای پر کردن خلأ موجود در زمینه دانش فنی و کاربردی بودند. این راهبردها با استفاده از ابزار پرسشنامه مقایسه جفتی در دسته‌بندی‌های مرتبط به خود توسط کارشناسان مورد ارزیابی قرار گرفتند و اهمیت آن‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در نرم‌افزار اکسپرت‌چویس^۱ مشخص شد. راهبردها به همراه اوزان حاصل شده از تحلیل در جدول ۶ قابل مشاهده هستند.

تهدیدهای تعاونی‌ها نیز با توجه به مطالعات پیشین مورد بحث قرار گرفت. برای پی بردن به اهمیت هر یک از گزاره‌ها، رتبه‌بندی با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. رتبه‌بندی مشکلات تعاونی‌ها با صرف‌نظر از دسته‌بندی‌های گفته‌شده نشان داد که مهم‌ترین مشکلات موجود، مالی بوده و یا تأثیر مالی بر تعاونی دارند. مشکلاتی مانند سخت‌گیری بانک‌ها در خصوص ارائه تسهیلات، مشکلات مالی و اعتباری در شرکت تعاونی، ناکافی بودن سرمایه شرکت تعاونی، ناکافی بودن ابزار و تجهیزات برای کسب درآمد اعضا، می‌توانند وضعیت مالی شرکت را تحت تأثیر قرار دهند. همچنین انحراف در انتخاب اعضای تعاونی مشکل مهمی بوده از آنجاکه می‌تواند دلیل مشکلاتی از جمله بی‌انگیزگی در اعضا و کوتاهی آن‌ها در انجام وظایف خود باشد.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مادی و معنوی اداره کل تعاون، کار و رفاه اجتماعی استان گیلان و همچنین دانشگاه گیلان انجام شده است. بدین وسیله از همه عزیزانی که از انجام این تحقیق حمایت کردند مراتب قدردانی و تشکر به عمل می‌آید.

مشارکت نویسندگان

مهدی بامداد: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها و تحلیل آماری
مرتضی زنگنه: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، مشاوره فنی
سید حسین پیمان: نظارت و مدیریت

روشن از سطح سود دریافتی و نگاه معیشتی به کشاورزی به جای نگاه اقتصادی است (Baseri, Sadeghi, & Khaksar, 2010). ارائه آموزش‌های بازاریابی و علوم مالی و حسابداری به مدیران و اعضا شرکت تعاونی یکی دیگر از راهبردهای تقویتی ارائه‌شده است. یافته‌های تحقیق دیگری نشان می‌دهد که تقویت گروه بازاریابی در تعاونی‌های کشاورزی در افزایش کارایی و موفقیت آن‌ها تأثیر زیادی دارد (Mozaffari, 2016). محققان دیگری نیز برگزاری کارگاه‌های تخصصی به منظور آشنایی بیشتر مدیران با بازاریابی را با توجه به تأثیر عوامل اقتصادی بر موفقیت تعاونی‌ها، توصیه می‌کنند (Ahmadpoor et al., 2014).

در رابطه با استفاده از ظرفیت‌های دانشگاهی و دانش‌آموختگان رشته‌های کشاورزی برای بهبود عملکرد تعاونی‌ها، به‌عنوان یک راهبرد تدافعی، محققانی یافته‌اند که با جذب مهندسان و کارشناسان کشاورزی علاوه بر اشتغال‌زایی، تعاونی‌ها می‌توانند از دانش این افراد نیز بهره‌برند (Heydari, Naderi, Yaghoubi Farani, & Heidary, 2017).

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با مرور مطالعات پیشین مشکلات مؤثر بر عملکرد تعاونی‌ها شناسایی شدند. شش دسته‌بندی تعریف شد و مشکلات مشابه در دسته‌های مشابه قرار گرفتند (دسته‌های مالی، عملیاتی، سازمانی، ساختاری، اجتماعی و زیست‌محیطی). از روش دلفی برای ارزیابی مشکلات این حوزه با بهره‌گیری از گروهی از متخصصان شامل نه نفر استفاده شد. نقاط ضعف، قوت، فرصت‌ها و

References

1. Abdulquadi, A. F., & Mohammed, B. T. (2012). The role of agricultural cooperatives in agricultural mechanization in Nigeria. *World Journal of Agricultural Sciences*, 8(5), 537-539. <https://doi.org/10.5281/zenodo.810109>
2. Ahmadpoor, A., Mokhtari, V., & Poorsaeed, A. (2014). Identifying Success Factors of Agricultural Production Cooperatives in Ilam Province of Iran. *Village and Development*, 17(3), 105-122. (in Persian). <https://doi.org/10.30490/rvt.2018.59407>
3. Aldrich, J. (2005). Fisher and Regression. *Statistical Science*, 20(4), 401-417. <https://doi.org/10.1214/088342305000000331>
4. Anonymous. (2019). Statistics of Agricultural Mechanization Cooperatives. General Directorate of Cooperatives, Labor and Social Welfare of Guilan Province. Rasht.
5. Ansari, H., Jourablou, M., Pourafkari, N., & Hashemianfar, A. (2015). Investigating the Social Factors that Influence Participation in Agricultural Cooperatives and Comparison with Industrial Cooperatives in Tehran Province. *Co-operation and Agriculture (Taavon)*, 4(13), 73-98. (in Persian).
6. Baseri, B., Sadeghi, H., & Khaksar, G. R. (2010). Performance of producer cooperatives in Iran's agriculture sector. *Journal of Sustainable Growth and Development*, 10(3), 1-24. (in Persian).
7. Dalkey, N., & Helmer, O. (1963). *An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts*. RAND Corporation. (RM-727/1-PR). Retrieved from: https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM727z1.html#citation
8. Deng, X., Hu, Y., Deng, Y., & Mahadevan, S. (2021). Supplier selection using AHP methodology extended by D numbers. *Expert Systems with Applications*, 41(1), 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.018>

9. Feizabadi, Y., & Javadi, N. (2017). Identifying and Prioritizing Marketing Barriers Facing Agricultural Production Cooperatives of Dargaz Township. *Co - Operation and Agriculture (Taavon)*, 5(20), 39-63. (in Persian).
10. Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The Analytic Hierarchy Process-An Exposition. *Operations Research*, 49(4), 469-486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>
11. Gholami, M., & Rahmani, M. (2021). Identifying educational needs of farmers in agricultural cooperatives using Delphi method. *Journal of Extension Education and Practice*, 12(1), 45-60.
12. González-Prida, V., Barberá, L., Viveros, P., & Crespo, A. (2012). Dynamic Analytic Hierarchy Process: AHP method adapted to a changing environment. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(31), 25-29. <https://doi.org/10.3182/20121122-2-ES-4026.00005>
13. Guo, S., & Zhao, H. (2022). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-Based Systems*, 121, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010>
14. Hazrati, M., & Babaei Fini, O. (2012). Identify the factors affecting the inactivation of agricultural cooperatives using Delphi analysis (case study: county Khodabandeh). *Journal of Regional Planning*, 2(6), 91-104. (in Persian).
15. Heydari, F., Naderi M. K., Yaghoubi Farani, A., & Heidary, A. (2017). Analyzing Agricultural Cooperatives Performance in Hamedan Province Based on Combined Evaluation Model. *Co-operation and Agriculture (Taavon)*, 6(23), 145-169. (in Persian).
16. Karami, Sh, & Agahi, H. (2010). Factors affecting the success of cooperatives in Iran: a case study of “out-of-season products cooperatives” in Kermanshah province. *Village and Development*, 13(2), 31-60. (in Persian). <https://doi.org/10.30490/rvt.2018.59198>
17. Karimi, S., Salehi, A., & Zare, M. (2022). Challenges Facing Agricultural Cooperatives in Afghanistan: A SWOT Analysis. *International Journal of Agricultural Extension*, 10(2), 123-135.
18. Khafaie, B. (2010). Factors contributing to the lack of success in the agricultural cooperative companies of Bushehr and Dashtestan cities. *Co-operation and Agriculture (Taavon)*, 20(212), 183-200. (in Persian).
19. Khosravi, M., & Mohammadi, S. (2021). Prioritizing factors affecting agricultural cooperatives' performance using AHP. *Journal of Rural Studies*, 87, 123-134.
20. Kianfar, A. (2016). *Technical, economic and job creation evaluation of agricultural mechanization companies and the views of farmers towards them in North Khuzestan*. Master's thesis. Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ramin Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources. (in Persian).
21. Madureira, T., Nunes, F., Mata, F., & Vaz-Velho, M. (2024). A SWOT Analysis of Organizations in the Agri-Food Chain Sector from the Northern Region of Portugal Using the PESTEL and MEETHS Frameworks. *Agriculture*, 14, 1554. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091554>
22. Marcis, J., de Lima, E. P., & da Costa, S. E. G. (2019). Model for assessing sustainability performance of agricultural cooperatives. *Journal of Cleaner Production*, 234, 933-948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.170>
23. Mardani, A., Zavadskas, E. K., & Govindan, K. (2020). A systematic review of the literature on the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in agricultural cooperatives. *Sustainability*, 12(8), 3250.
24. Mardani, A., Zavadskas, E. K., Govindan, K., Senin, A. A., & Jusoh, A. (2021). VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, 8(1), 37. <https://doi.org/10.3390/su8010037>
25. Mohammadi, S., & Gholami, M. (2022). Economic and social factors affecting agricultural cooperatives: An AHP approach. *International Journal of Agricultural Management*, 10(2), 78-90.
26. Mozaffari, M. M. (2016). Survey of the economic efficiency of agricultural cooperatives in the Buin Zahra city and prioritization of their problems faced in the management process and the marketing system. *Rural Development Strategies*, 2(4), 364-383. (in Persian).
27. Pamučar, D., Stević, Ž., & Sremac, S. (2022). A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise Solution (MARCOS) method. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 16(2), 171-191.
28. Payman, H., & Bagheri, I. (2006). Investigating the status of agricultural mechanization cooperatives in Gilan province. General Directorate of Cooperatives of Gilan Province.
29. Pourtaheri, M., Papoli, M., & Fallahi, A. (2012). Assessment the Performance of Agricultural Cooperatives in Rural Areas Case Study: Khorramabad Township. *Geography and Development*, 10(26), 49-60. (in Persian).
30. Powell, C. (2003). The Delphi technique: myths and realities. *Journal of Advanced Nursing*, 41(4) 82-376. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2003.02537.x>
31. Rahimi, M., & Mardani, A. (2021). The role of government policies in the performance of agricultural cooperatives: A systematic review. *Agricultural Economics*, 52(1), 1-15.
32. Rajaei, Y., Yaghoubi, J., & Donyaei, H. (2011). Assessing effective factors in development of entrepreneurship in agricultural cooperatives of Zanjan province. *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, 15, 1521-1525. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.03.323>
33. Rezaei, R., Karimi, A., & Ahmadi, F. (2021). Evaluating the Performance of Agricultural Cooperatives Using

- SWOT Analysis: A Case Study in Iran. *Journal of Co-operative Organization and Management*, 9(1), 100-112.
34. Sa'di, H. (2018). Evaluating Agricultural Production Cooperatives of Iran: A Case Study in Kaboudarahang County of Hamedan Province. *Village and Development*, 10(2), 137-164. (in Persian).
 35. Salehi, A., Zare, M., & Ahmadi, F. (2022). Integrating SWOT and AHP for Analyzing Factors Affecting Agricultural Cooperative Performance. *Annals of Operations Research*, 311(1-2), 123-145.
 36. Shuqi, S., Jiasheng, W., & Dongwei, W. (2019). Development of Agricultural Mechanization in China and Its Current Strategic Focus. *Agricultural Machinery & Technologies*, 13(3), 4-7. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-3-4-7>
 37. Sikalumbi, D., & Muchemwa, V. (2021). Critical Literature Review on Agriculture Co-Operatives in Developing Countries: A Poverty Mitigation Perspective. *Texila International Journal of Management*, 7(2), 1-17.
 38. Solouki, M., Malekmohammadi, I., & Chizari, M. (2011). Investigating the effectiveness of extension educational activities in promoting knowledge of the members of agriculture production cooperatives in Semnan province. *Co-operation and Agriculture (Taavon)*, 21(4), 151-170. (in Persian).
 39. U.S. Department of Agriculture, Rural Business-Cooperative Service. (2002). Agricultural Cooperatives in the 21st Century (RBS Cooperative Information Report 60). Retrieved from: <https://www.govinfo.gov/app/details/GOVPUB-A109-PURL-LPS33511>
 40. Zare, M., & Khosravi, M. (2022). Integrating SWOT and AHP for analyzing factors affecting agricultural cooperative performance. *Annals of Operations Research*, 311(1-2), 123-145.
 41. Zare, M., Karimi, S., & Rezaei, R. (2023). The Impact of Government Policies on Agricultural Cooperatives Performance: Insights from SWOT Analysis. *Journal of Agricultural Economics*, 74(2), 345-365.

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 529-546

Performance Analysis of a Walnut Peeler with a Rotating Cutting Plate

H. Samimi Akhijahani^{1*}, M. S. Barghi Jahromi²

1- Department of Bio Systems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

Received: 10 October 2024

Revised: 21 December 2024

Accepted: 12 January 2025

Available Online: 07 June 2025

How to cite this article:

Samimi Akhijahani, H., & Barghi Jahromi, M. S. (2025). Performance Analysis of a Walnut Peeler with a Rotating Cutting Plate. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 529-546. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.90199.1294>

Introduction

Walnut (*Juglans regia* L.) is a highly valued horticultural product, and significant efforts are underway to enhance its production in Iran. Despite the development of various tools aimed at increasing productivity and improving harvesting efficiency, over 90% of walnuts in Iran are still harvested manually, often with the aid of specialized tools or by striking the trees with sticks. Although numerous mechanical devices have been introduced, the considerable height of walnut trees and the asynchronous ripening of the nuts continue to make traditional harvesting methods predominant. In this research, a novel walnut peeling system incorporating a horizontally rotating cutting plate was developed and evaluated. The cutting plate, designed with specific grooves and curvature, aims to enhance the mechanical efficiency of the peeling process. This analysis investigates the influence of rotational speed and groove depth on system performance. In addition, the life cycle assessment is conducted to evaluate the environmental and operational impacts of the proposed system, with comparative analysis against conventional peeling methods.

Materials and Methods

The designed and constructed system consists of three main parts: the container, the rotating disk, and the power system, which includes the electric motor. The rotating disk, as the heart of the system, is made from a 1.5 mm thick steel sheet with a diameter of 640 mm. It has been laser-cut with sufficient precision to cut and transfer walnuts. The third part of the system is the power unit, which includes a 3-hp, 1400 rpm electric motor. Power transmission is carried out using a V-shaped belt. In this system, the product is first collected from the designated garden and stored in equally weighted bags. The rotating plate is the most important component of the walnut peeler, essentially the heart of the system. On this plate, there are 12 oval grooves, each 5 mm in diameter and 150 mm in length. One side of each groove is raised, with a depth that can be varied. Increasing the groove depth increases the amount of peel removed and exposes a larger surface of the walnut. The plate is connected to the driven pulley and then to the electric motor via a shaft. In this research, a life cycle assessment was also used to evaluate the impact of various parameters of the walnut peeling system on the environment and its pollution level.

Results and Discussion

The findings from the variance analysis regarding the impact of groove depth and rotation speed on peeling percentage indicate that variations in plate groove depth and electric motor rotation speed during walnut peeling are significant at the 1% level. Furthermore, the impact of changes in the groove depth of the cutting plate on machine performance and the reduction of walnut losses is substantial, showing significance at the 1% probability



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.90199.1294>

level. The effect of this factor on the amount of damage to walnuts is significant at the 5% level. By increasing the groove depth from 1.5 to 3 mm and from 3 to 5 mm, changes of 6.99% and 5.12% in walnut skin removal were observed. By reducing the elevation of the groove, the amount of cutting removed from the walnut surface is also reduced, and the peeling process becomes more abrasive. In this case, for proper peeling, the cycle duration and retention time in the machine should be increased. By increasing the rotational speed from 218 to 275 rpm, the momentum and linear velocity increase, resulting in more green shell removal. Conversely, reducing the rotational speed decreases the impact, leaving more green skin on the product. The interaction between rotational speed and groove depth is also significant in the amount of peeled product at the 1% level. The results of the life cycle assessment showed that the human health index has the highest value due to the use of electric power, iron profile (in the system chassis and container), and copper wire in the electric motor armature. Optimizing the system and using clean energy can help improve system efficiency and reduce environmental impact.

Conclusion

Utilizing a walnut peeling machine achieves an impressive 94% efficiency in walnut peeling while ensuring less than 5% damage. The results of the life cycle assessment showed that the use of a walnut peeling machine has less environmental damage than the traditional method and is highly cost-effective.

Keywords: Damage, Life cycle assessment, Effective productivity, Rotary cutting plate, Walnut quality

ارزیابی عملکرد یک پوست‌کن گردو مجهز به صفحه برشی گردان

هادی صمیمی اخیبجانی^{۱*}، محمد صالح برقی جهرمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

چکیده

در این تحقیق یک دستگاه پوست‌گیر گردو با قابلیت جابه‌جایی و مجهز به یک الکتروموتور معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور تأثیر تغییر سرعت دورانی و عمق شیار صفحه برش بر عملکرد سامانه شامل پوست‌گیری و تأثیر آن بر ترک و شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت دورانی صفحه دوار، مدت زمان پوست‌کنی گردو کاهش یافته و کیفیت پوست‌گیری بهبود پیدا می‌کند. تأثیر سرعت دورانی صفحه برش (از ۲۱۸ تا ۳۲۲ دور بر دقیقه) بر میزان آسیب به محصول معنی‌دار بود. در سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه به‌طور میانگین بیش از ۶/۲۴ درصد گردوهای ریخته‌شده در سامانه آسیب دیده بودند. هرچند میزان پوست‌کنی بهبود پیدا کرده بود. این امر به دلیل افزایش مقدار حرکت خطی وارد شده به محصول و ایجاد ترک و شکستگی پوست محصول بود. همچنین افزایش عمق شیار باعث می‌گردد که سرعت برش پوسته‌ها افزایش یابد. در این حالت نیز تأثیر عمق شیار بر آسیب به محصول در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. حداکثر ظرفیت مؤثر کارایی پوست‌کننده برای گردو در سرعت دورانی ۲۸۰ دور بر دقیقه و عمق شیار صفحه ۳ میلی‌متر، ۱۲۰۰ کیلوگرم در ساعت با ۱۸ کیلوگرم محصول آسیب‌دیده به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌دیدگی، ارزیابی چرخه زیست، بهره‌وری مؤثر، صفحه برش گردان، کیفیت گردو

مقدمه

ژنوتیپ‌های زیاد محصول، عدم یکنواختی در چیدن گردو به‌وجود می‌آید (Ebrahimi, Sharifi, Rafiei, & Fatahi, 2009). به‌عبارت دیگر در یک باغ برخی از آن‌ها ترک برداشته و برخی سالم و بدون ترک هستند. منظور از پوست در این تحقیق پوست سبز محصول (در اصطلاح محلی کزال) است. تحقیقات نشان داده است اگر به درخت گردو فرصت داده شود که محصول آن به‌صورت پوست‌کنده شود، بخش اعظمی از مغز گردوها به‌صورت قهوه‌ای درآمده و بازارپسندی خود را از دست می‌دهد (Ghasemi, Arzani, & Hassani, 2012; Ramos, 1998). به‌ویژه اگر از گردو برای تولید مواد غذایی مانند شیرینی و ماست استفاده گردد، سالم و سفید بودن مغزها اهمیت خود را بیشتر نشان می‌دهد (Gachpazian et al., 2013). بر این اساس قبل از آن‌که به‌طور کامل پوست ترک داشته باشد، باید چیده شوند. اما این امر به‌نوبه خود باعث می‌گردد، جداشدن پوست سبز از پوسته چوبی به‌سختی انجام شود. بنابراین استفاده از ادواتی که بتوانند

گردو (*Juglans regia* L.) یکی از محصولات باغی است که تلاش‌های زیادی برای تولید بیشتر آن در ایران انجام می‌شود. همه‌ساله ادوات زیادی در جهت بهره‌وری و تولید بهینه این محصول گران‌بها صورت می‌گیرد. ادوات عمل‌آوری این محصول شامل ادوات خاکورز، داشت، برداشت و حتی پس از برداشت و فرآوری آن می‌باشد (Ghafari, Chegini, Khazaei, & Vahdati, 2011). از بین این مراحل، مرحله برداشت و پوست‌کنی آن مشکل‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین مرحله است (Makarichian & Chegini, 2013). بیشتر از ۹۰ درصد گردوی ایرانی به‌دست‌آمده، به‌وسیله دست و با استفاده از ابزار مخصوصی یا با چوب چیده می‌شوند. ادوات زیادی برای برداشت این محصول تا به حال ساخته شده‌اند. اما به‌دلیل ارتفاع زیاد درختان و عدم هماهنگی در رسیدن محصول، هنوز هم برداشت محصول به‌صورت سنتی انجام می‌گردد. از طرف دیگر به دلیل تنوع

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

(Email: h.samimi@uok.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

پوست‌کنی محصول را به‌طور کامل و همگن انجام دهد، ضروری به نظر می‌رسد.

استان آذربایجان شرقی به‌عنوان دومین تولیدکننده گردو در ایران نقش مهمی در صادرات این محصول دارد. گردوی آذرشهر در بسیاری از مناطق کشور به‌دلیل سفید و شیری بودن مغز آن منحصر به‌فرد بوده و طعم و مزه به‌خصوصی دارد. اقلیم منطقه آذربایجان شرقی طوری است که تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و خشک دارد. به این دلیل معمولاً برداشت محصول از نیمه شهریور ماه شروع و تا اواسط آبان‌ماه ادامه می‌یابد. گردو به دلیل خواص پزشکی که دارد، طبع گرمی داشته و در سفره‌های اکثر مردم کشور دیده می‌شود. این محصول هم به‌صورت مغز و هم به‌صورت روغن در مواد غذایی و آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rastegar, Shojaee, & Tajeddin, 2019). پوست سبز گردو که در برخی موارد به‌صورت دورریز در نظر گرفته می‌شود حاوی مواد آنتی‌اکسیدان و ضد میکروب است (Ziaolhagh & Zare, 2022). علاوه بر آن کنسانتره آن مصرف دامی داشته و باعث از بین بردن انواع مختلف بیماری‌ها می‌گردد. میزان تولید گردو در ایران و سطح زیر کشت آن به‌ترتیب ۳۵۵۰۴۹ تن و ۵۲۱۵۰ هکتار در سال ۲۰۲۲، به‌عنوان سومین تولیدکننده گردو در جهان پس از چین و ایالات متحده آمریکا می‌باشد (FAO, 2022). میزان تولید آن به دلیل شرایط اقلیمی و سرمازدگی و خشکسالی از ۳۸۵۰۰۰ تن در سال ۲۰۲۱ به ۳۵۵۰۴۹ تن در سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است. در ایران، استان آذربایجان شرقی با تولید ۲۴۵۶۰۰ تن پس از استان همدان دومین تولیدکننده گردو در ایران است.

عوامل زیادی بر میزان تولید و کیفیت تولید، فرآوری و بازاریابی گردو تأثیر می‌گذارد. این عوامل می‌تواند شامل ژنوتیپ، آب و هوای منطقه کشت، عوامل بیماری‌زا، نحوه برداشت و روش فرآوری و خشک کردن آن باشد (Rebufa, Artaud, & Dréau, 2022). با تغییر هر کدام از عوامل اشاره‌شده ویژگی‌های محصول مانند پوست آن نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. پوست‌کن‌های گردوی ساخته‌شده بسیار اندک بوده و تمام این ادوات به‌صورتی توانسته‌اند نیاز کشاورزان را به‌صورت مقطعی یا همیشگی برطرف نمایند. هرچند با به‌نژادی و تولید صنعتی گردو استفاده از پوست‌کن‌های گردو کاهش یافته است. اما همان‌طور که اشاره شد، در ایران به دلیل بودن بومی بودن درختان نیاز به این ادوات بسیار احساس می‌شود. تحقیقات اندکی در زمینه ارزیابی این سامانه‌ها صورت گرفته است و بیشتر این منابع قدیمی هستند. از جمله آن می‌توان به استفاده فرچه سیمی (Barton, 1956)، غلتک‌های دنداندار (Mcfarland & Saunders, 1977) و تیغه‌هایی فلزی (Cacho, 1978) اشاره نمود.

در سال‌های اخیر ادوات مشابهی برای پوست‌کنی طراحی و ساخته شده است. در ماشینی از سامانه انگشتی برای جدایش پوست گردو

استفاده شده است. اما سرعت این سامانه بسیار پایین بود (۹۵ ثانیه برای هر بار پر شدگی مخزن) (Trujillo, 2003). در سامانه‌ای برای پوست‌کنی از روش استوانه قفسی استفاده گردید. محصول بین استوانه گردان که دارای تیغه می‌باشد و استوانه قفسی قرار گرفته و با دوران استوانه وسطی عملیات جدایش پوست صورت می‌گرفت (Karimi, Minaei, Hasani, & Eyvani, 2008). به دلیل سایش به‌وجودآمده امکان وارد شدن خسارت و تلفات (شکستگی و خرد شدن) محصول بیشتر بود. در سامانه‌ای از یک صفحه افقی با شیارهای عمیق همراه با برس‌های سیمی استفاده شد. محیط استوانه مربوط به مخزن محصول نیز دارای شیارهایی برای پوسته محصول بود. برای پاک شدن کامل پوست سبز از روی محصول از پاشش آب نیز استفاده می‌شد (Makarichian & Chegini, 2013). در دستگاهی از خاصیت لایه‌برداری برای جداسازی لایه سبز گردو، با استفاده از کندن همراه با برش پوست شکسته و فشار پیچشی استفاده شد. به دلیل محدودیت پژوهش طرح آماری برای سامانه در نظر گرفته نشد (Jingtao, Pengxu, Xiaoxue, & Ye, 2016). در پژوهشی از مکانیزم گریز از مرکز چندمنظوره جدید برای فرآوری گردو و پوسته استفاده شد. سامانه ارائه‌شده قادر به پوسته کردن، شستشو و تخلیه محصول بود و چهار تیمار گردو برای ارزیابی سامانه لحاظ گردید. نتایج نشان داد، مناسب‌ترین حالت در سرعت دورانی پوسته به میزان ۳/۷۵ رادیان بر ثانیه، باردهی به وزن ۴ کیلوگرم و مدت زمان ۱۰ دقیقه اتفاق می‌افتد. همچنین داده‌ها نشان دادند، برای گردوهای با قطر بزرگ‌تر نیاز به اینرسی بیشتر می‌باشد. از ضعف‌های سامانه به باردهی کم می‌توان اشاره نمود. در این پژوهش به میزان تلفات محصول اشاره نشده است (Younesi-Alamooti & Mahmoodi, 2015). در تحقیقی برای جدایش پوست سبز از محصول از روش پاشش Tween-80 و Ethephone بر روی محصول استفاده نمودند. نتایج نشان داد عملکرد حداکثری ۴ روز پس از پاشش ترکیب اتفاق می‌افتد. دستگاه مورد نظر شامل یک استوانه با ۱۸ میله بود که به‌صورت قفسی جدایش محصول را صورت می‌داد (Hussain, Ahad, Rather, & Naik, 2016).

همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد، سامانه‌های ساخته‌شده مورد ارزیابی دقیق قرار نگرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی و عملکرد آن‌ها صورت نگرفته است. از طرف دیگر این سامانه‌ها ایراداتی نظیر آسیب به محصول و سیاه شدن مغز را به همراه دارد. در این ادوات برای تمیز نمودن زاینده‌های پوست سبز از روی پوست محصول از آب استفاده می‌شود. این امر باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی می‌گردد. در این حالت تلفات آب بیشتر بوده و از طرف دیگر به دلیل مخلوط شدن مایع پوسته سبز این ماده برای محیط‌زیست مضر بوده و نمی‌تواند مورد مصرف گیاه قرار گیرد. همچنین به دلیل عدم آب‌بندی وارپته‌های مختلف گردو و این که درصدی از محصول مورد آسیب قرار

باری خواهد شد. برای به دست آوردن سرعت‌های متنوع، از تسمه و پولی‌های مختلف استفاده می‌گردد. انتقال توان به صورت موازی و در یک خط بدون انحراف صورت می‌گیرد. پولی بزرگ‌تر به محوری که به تسمه متصل است، باعث دوران دیسک شده و عملیات پوست‌کنی صورت می‌گیرد. کل مجموعه روی یک شاسی قرار گرفته و برای حرکت مجموعه از چرخ لاستیکی استفاده می‌شود. برای جلوگیری از ارتعاش مجموعه دو پایه از آن بر روی سطح زمین روی لاستیک تخت قرار می‌گیرد. اجزای مختلف سامانه پوست‌کن گردو همراه با متعلقات و جزئیات آن شامل نوع، جنس، اندازه و ویژگی هر جزء در جدول ۱ لیست شده است. در ادامه ابتدا اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سامانه و سپس زیر مجموعه هر عنصر با جزئیات توضیح داده می‌شود.

صفحه گردنده شیاردار

صفحه گردنده مهم‌ترین قسمت از پوست‌کن گردو و به عبارت دیگر به عنوان قلب سامانه می‌باشد. بر روی این صفحه ۱۲ شیار به صورت بیضی با قطر ۵ میلی‌متر به طول ۱۵۰ میلی‌متر ایجاد شده است. یک سمت از شیارها برآمده بوده و میزان ارتفاع قرارگیری این سمت می‌تواند متغیر باشد. با افزایش عمق شیار میزان برش ایجادشده افزایش یافته و سطح زیادی از گردو را بر می‌دارد. این صفحه به وسیله یک محور به پولی متحرک و سپس به پولی الکتروموتور اتصال پیدا می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، پوست‌گیری با استفاده از ضربه صورت می‌گیرد. که با استفاده از رابطه (۱) می‌توان نیروی واردشده به پوست گردو را محاسبه نمود (Meriam, Kraige, & Bolton, 2018):

$$G = mv, \int_0^t f \cdot dt = \Delta G \quad (1)$$

که در آن f مقدار نیرویی است که به پوست گردو در مدت زمان t وارد می‌شود. برای محاسبه این نیرو ابتدا محصول را درون سامانه قرار داده و سپس با شروع به کار الکتروموتور، صفحه شروع به دوران می‌کند و زمان برای رسیدن به سرعت دورانی ثبت می‌گردد. نیروی وارد ایستایی نیز از گشتاورسنج در محل محور اندازه‌گیری می‌شود.

بررسی خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده

گردوی تازه برداشت شده پس از برداشت برای تمامی تست‌های فشاری مورد استفاده قرار گرفت. گردوها توسط دستگاه تست Instron بارگیری شدند تا زمانی که پارگی پوسته سبز شروع شود. رفتارهای مکانیکی گردو بر حسب حداکثر نیروی لازم برای برش پوسته، تغییر شکل خاص گردو، انرژی جذب‌شده و توان لازم برای پارگی پوسته گردو بیان شد. این مقادیر از هر منحنی فشرده‌سازی، به دست آمده از دستگاه تست Instron، توسعه یافته است. در این آزمایش، بیشترین نیروی ثبت‌شده برای برش پوست گردو ۷۹۸ نیوتن بود.

می‌گیرد، آب به داخل محصول شده و مغز محصول به رنگ قهوه‌ای یا سیاه درمی‌آید. بنابراین استفاده از راه‌های جایگزین توصیه می‌شود. در این تحقیق از یک سامانه جدید برای پوست‌گیری گردو استفاده شده است. با توجه به خواص مکانیکی اندازه‌گیری‌شده، طراحی پوست‌کن گردو با صفحه دوار با شیارها و انحنا باعث بهبود کارایی سامانه خواهد شد. بر این اساس تأثیر سرعت دورانی و عمق شیارها بر میزان کارایی سامانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن ارزیابی چرخه زیست سامانه مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و با روش سنتی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با توجه به تحقیقات پیشین چنین مطالعه‌ای با لحاظ نمودن یک سامانه آب‌گیر قبلاً انجام نگرفته است.

مواد و روش‌ها

شرح دستگاه پوست‌کن گردو و متعلقات آن

سامانه‌ای که در این تحقیق (شکل ۲) طراحی و ساخته شده است، از سه قسمت اصلی شامل محفظه، دیسک دوار و سیستم تواندهی که شامل الکتروموتور است تشکیل شده است. در مرحله اول سامانه متناسب با یک کیسه استاندارد در نظر گرفته شد که ابعاد تقریبی آن به شکل استوانه به قطر ۴۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر طراحی شد. هرچند در صورت توسعه سامانه می‌تواند به حالت پیوسته نیز طراحی و ساخته شود. بر این اساس ابعاد این محفظه که به صورت استوانه‌ای نیز می‌باشد، قطر ۶۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ورودی محصول از بالا و خروجی آن از دریچه کناری که در شکل ۱ نشان داده شده است، صورت می‌گیرد. دیسک دوار به عنوان قلب سامانه از یک ورق فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱/۵ و به قطر ۶۵۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شده است. برش این ورق با لیزر صورت گرفت تا دقت کافی برای برش و انتقال گردوها را داشته باشد. علاوه بر آن بر روی سطح این ورق شیارهایی به صورت بیضی در نظر گرفته شده است. این شیارها با انحرافی که به وسیله دستگاه خم‌کن صورت می‌گیرد، به میزان یک الی ۵ میلی‌متر می‌تواند از سطح اولیه ورق فاصله گرفته و عملیات برش پوست سبز گردو توسط همین شیارها صورت می‌گیرند. همچنین برای زیر و رو کردن محصول حین پوست‌گیری و انتقال گردوهای رویی به سطح زیرین، انحنا به میزان نصف قطر گردوها (حداکثر ۱۵ میلی‌متر) در صفحه گردنده در نظر گرفته شده است. این انحنا (یا اعوجاج) هم‌زمان هم باعث زیر و رو کردن محصول می‌شود و هم باعث تخلیه سریع در مرحله آخر پس از اتمام پوست‌گیری از سامانه می‌گردد. قسمت سوم مجموعه، سامانه تواندهی مجموعه است که این سامانه شامل یک الکتروموتور با توان ۳ hp و سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه است. انتقال توان به وسیله تسمه V شکل و پولی صورت می‌گیرد. این امر باعث جلوگیری از خسارت به سامانه در صورت به وجود آمدن حالت بیش

جدول ۱- جزئیات پوست‌کن گردوی طراحی و ساخته شده

Table 1- Components details of the designed and constructed walnut dehuller

سیستم اصلی Base system	توصیفات اجزا Description of element	جزئیات زیرمجموعه اجزا Details of sub element
مخزن Container	شکل استوانه‌ای Cylindrical shape	ورق (ST37)، به ابعاد (قطر: ۶۵۰ میلی‌متر، ارتفاع: ۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر) رنگ‌شده با رنگ ضد آب Steel (ST37) (diameter: 650 mm, height: 700 mm, thickness: 1 mm), coated with waterproof paint
	پاروک‌ها Paddles	ورق فولادی به ابعاد ۱۳۰ میلی‌متر در ۱۳۰ میلی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر، نصب‌شده با شیب ۴۵ درجه عمود به دیواره مخزن Stainless steel plate 130 mm × 130 mm, 1 mm thickness, installed at a 45° inclination perpendicular to the inner container face
صفحه برش Cutting plate	صفحه گردنده Rotary disk	ورق فولادی (قطر: ۶۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر) Stainless steel (diameter: 650 mm, thickness: 1.5 mm)
	شیارها Grooves	۱۲ شیار به شکل بیضی از طریق دیسک، با عمق ۱/۵-۳ میلی‌متر 12 grooves in oval shape through the disk, with 1.5-3 mm depth
	پیچ ثابت‌کننده Fixing screw	یک پیچ و مهره ۱۵ میلی‌متری برای ثابت کردن صفحه در محور سامانه A 15 mm screw and nut used to fix the plate on the powered shaft
	محور Shaft	شفت با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر متصل به پولی A shaft with a diameter of 20 mm and 300 mm length connected to pulley
	الکتروموتور Electromotor	یک الکتروموتور تک فاز ۳ اسب بخار ۲۲۰ ولت ۱۴۰۰ دور در دقیقه مدل: موتوژن-۱.۱ CR90L4A 1.1-1500 54F تبریز، ایران A single phase 3 hp electromotor, 220 V, 1400 rpm, Model: Motogen, CR90L4A 1.1-1500 54F, Tabriz, Iran
سامانه توان‌دهی Power system	پولی Pully	یک جفت پولی با شیار V شکل با سه قطر مختلف ۵۵، ۸۰ و ۱۰۵ میلی‌متر برای پولی کوچک و ۲۷۰ میلی‌متر برای قطر پولی بزرگ A pair of V-grooved with three various diameters, d = 55, 80, and 105 mm, and D = 270 mm
	تسمه Belt	تسمه V شکل تقویت‌شده تک کانال، مگاداین PL 1270 ساخت ابتکار صنعت تهران، ایران A refrained V shape belt in single channel, Megadyne PL 1270, made by Ebtekar Sanat, Tehran, Iran
شاسی Chassis	طراحی شده بر اساس ابعاد سامانه Designed based on the system dimensions	ورق فولادی (ST37)، با پروفیل گالوانیزه‌شده ۲۰×۴۰، رنگ‌شده با رنگ ضد آب Steel plate (ST37), reframed by 20×40 galvanized profile, coated with waterproof paint
		یک جفت چرخ لاستیکی (قطر ۱۵۰ میلی‌متر) نصب شده روی شاسی به منظور انتقال مکانیزم A pair of rubber wheels (150 mm diameter) installed in order to transfer the mechanism

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_f}{L_u} \quad (2)$$

که در این رابطه L_u و L_f به ترتیب ابعاد گردو بدون تغییر شکل و تغییر شکل ایجادشده در جهت محور فشاری می‌باشد. تغییر شکل موردنیاز برای پارگی (کشش زیاد) گردو بین ۱/۸۰ تا ۳/۱۵ میلی‌متر متغیر است.

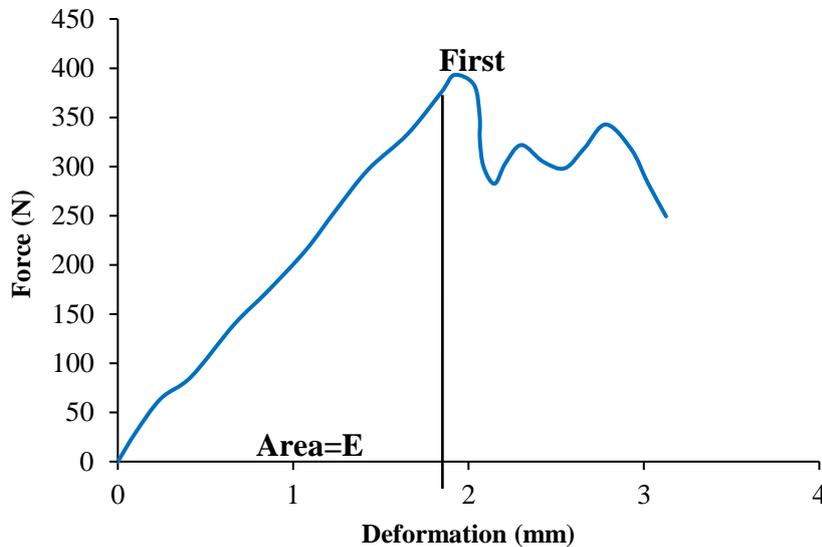
توان موردنیاز نیز به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Khazaei, Rasekh, & Borghei, 2002; Sharifian et al., 2008).

$$P = \frac{E \times V}{60000 \times \Delta l} \quad (3)$$

انرژی جذب‌شده مستقیماً از طریق اندازه‌گیری ناحیه زیر منحنی (نیرو- تغییر شکل) تعیین می‌شود (Koyuncu, Ekinci, & Savran, 2004; Sharifian, Rahmani Didar, & Haddad Derafshi, 2008). این اندازه‌گیری با استفاده از یک پلاتومتر دیجیتالی با دقت $\pm 0.2\%$ درصدا انجام شد (Sharifian et al., 2008; Güner, Dursun, & Dursun, 2003). بیشترین انرژی مورد نیاز برای پارگی پوسته گردو ۹۵۰ مگاژول ثبت شد. شکل ۱ منحنی نیرو- تغییر شکل را برای پوست گردو را نشان می‌دهد. تغییر شکل یا کرنش (ε) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Sharifian et al., 2008).

در پژوهش حاضر حداکثر توان ۱/۹۸ وات و سرعت بارگذاری ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه محاسبه شد.

که در این رابطه، P توان مورد نیاز بر حسب وات، E انرژی جذب شده بر حسب مگاژول، V سرعت بارگذاری بر حسب میلی متر بر دقیقه و Δl تغییر شکل تا پارگی اولیه پوست بر حسب میلی متر است.



شکل ۱- نمودار نیرو- تغییر شکل برای پوست گردو
Fig. 1. Force-Deformation graph for walnut green shell

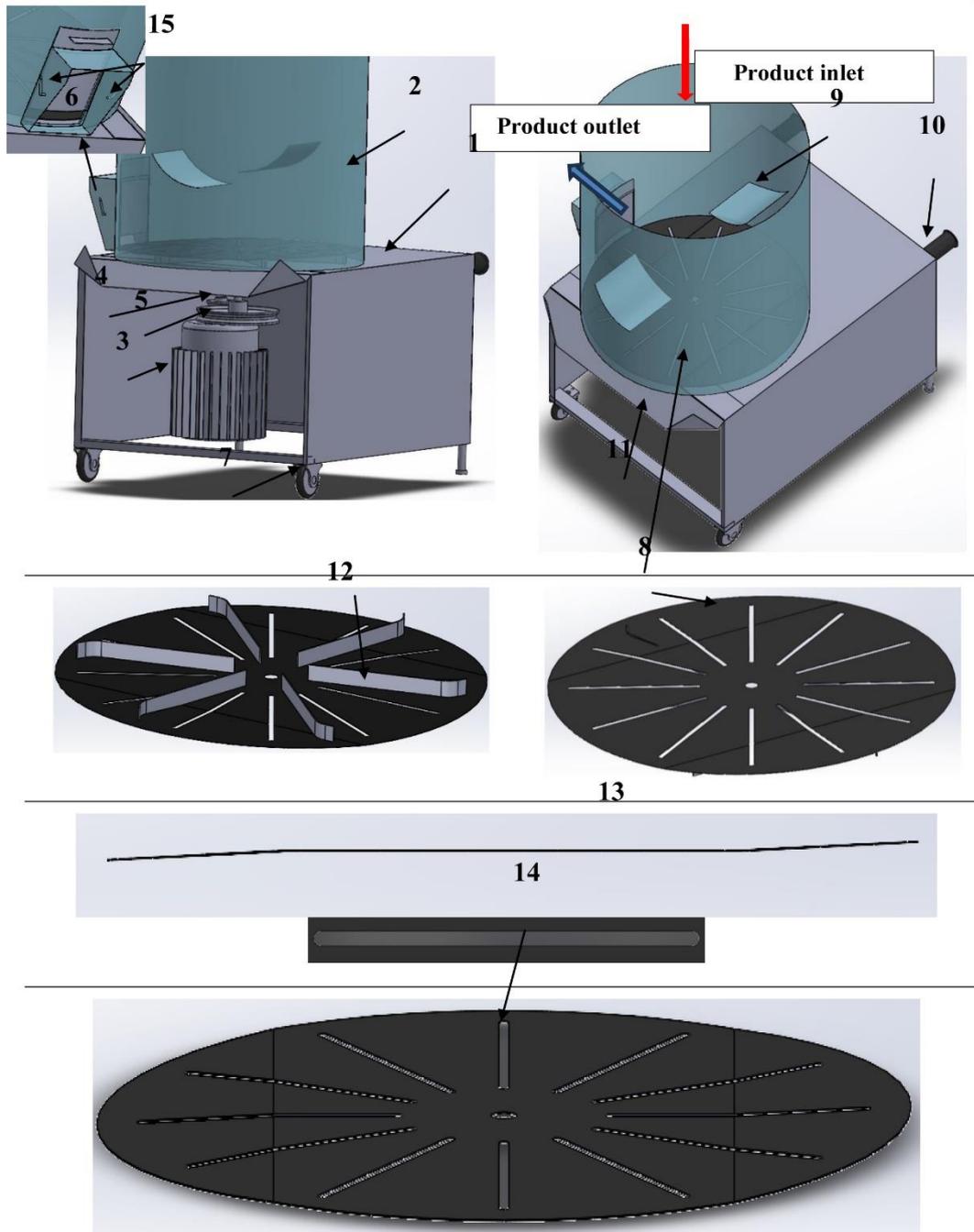
که اشاره شد، ژنوتیپ استفاده شده برای این تحقیق ژنوتیپ فرنور برای تمام آزمایش ها یکسان در نظر گرفته شد. پس از وزن کشی برای هر آزمایش یک کیسه را در نظر گرفته و با روشن شدن دستگاه گردوها در داخل محفظه ریخته شدند. مدت زمان پوست گیری برای هر آزمایش ۲ دقیقه لحاظ گردید. این زمان براساس میانگین کمترین بیشترین سرعت پوست گیری و با توجه به نظر کشاورز مینی بر مطلوب بودن پوست گیری در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از نفوذ مایع به درون گردوها، پس از ۱ دقیقه عملیات پاشش پودر آبگیر (پودر اره) به روی محصول صورت گرفت. برای هر آزمایش ۷۵۰ گرم پودر آبگیر لحاظ گردید که این مقدار بر اساس رطوبت فعال سطحی گردوها تعیین گردید. برای محاسبه میزان پودر آبگیر، ابتدا گردوهای پوست گیری شده، بدون آبگیر از سامانه خارج شده و وزن می شوند و سپس در پودر آبگیر مستغرق شده و سپس دوباره جمع آوری شده و دوباره وزن می شوند. اختلاف دو وزن نشان دهنده می میزان پودر آبگیر مورد نیاز برای گردو جهت کاهش رطوبت محصول و جلوگیری از نفوذ آب به درون گردو هاست. پس از پایان یافتن مرحله پوست گیری، درجه تخلیه دستگاه باز شده و محصول مورد نظر (گردو) از مخزن خارج می شود. محصول روی یک سطح صاف و مشخص ریخته می شود و گردوهای آسیب دیده، پوست گیری نشده و کمتر پوست گیری شده جدا می شوند و در مرحله بعد وزن می شوند. ترتیب مراحل انجام شده برای پوست گیری گردو در شکل ۳ نشان داده شده است.

طرح آزمایش ها

در این تحقیق هدف به دست آوردن ترکیب بهینه برای پوست کنی گردو با بیشترین کارایی و کمترین اتلاف و آسیب به گردو می باشد. به این منظور سرعت دوران صفحه برش در سه سرعت و عمق شیارهای برشی در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفتند. به عبارت دیگر سرعت دورانی در سه سطح ۲۱۸، ۲۷۵ و ۳۲۲ دور بر دقیقه و عمق شیار در سه سطح ۱/۵، ۳ و ۵ میلی متر بر کیفیت گردوهای پوست کنده شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که سطوح مربوط به سرعت با توجه به سرعت دورانی لازم برای برش قسمت سبز و چوب گردو در حالت ایستایی در نظر گرفته شده است. همچنین سطوح مربوط به عمق شیار نیز با توجه به حداکثر ضخامت پوست سبز در نظر گرفته شده است. کیفیت مطرح شده در این طرح شامل میزان پوست کنی با حداقل ترک یا شکست محصول است. آزمایش ها در سه تکرار برای هر تیمار انجام شدند. محصول گردوی استفاده شده برای ارزیابی سامانه از باغ های گردو شهرستان آذرشهر واقع در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. برای حصول نتیجه مناسب گردوها از یک وارسته و یک باغ با شرایط اقلیمی و دوره آبیاری یکسان انتخاب گردیدند.

توضیح روند کارکرد سامانه

در این سامانه ابتدا محصول از باغ مورد نظر تهیه شده و در کیسه های هم وزن (به $1/2 \pm 40$ کیلوگرم) نگهداری شدند. همان طور



شکل ۲- اجزای اصلی سامانه پوست‌کن گردو طراحی و ساخته شده برای تحقیق شامل: ۱- شاسی دستگاه، ۲- محفظه قرارگیری محصول، ۳- الکتروموتور، ۴- پولی محرک، ۵- پولی متحرک، ۶- دریچه خروجی محصول، ۷- چرخ‌های انتقال دستگاه، ۸- صفحه برش گردان، ۹- پاروی فشار، ۱۰- دستگیره انتقال، ۱۱- خروجی پوست گردو، ۱۲- پاروک زیرین (برای پوست)، ۱۳- انحناى صفحه، ۱۴- شیار صفحه و ۱۵- قلاب‌های کیسه

Fig. 2. The main components of the walnut peeling system designed and built for research include: 1- Machine chassis, 2- Product container, 3- Electro-motor, 4- Driving pulley, 5- Moving pulley, 6- Product outlet valve, 7- Wheels for moving the system, 8- Rotary cutting disk, 9- Pressure paddle, 10- Transferring handle, 11- Walnut peels outlet, 12- Lower paddle (for peels), 13- Disk curvature, 14- Disk grooves, and 15- Bag hooks



شکل ۳- مراحل انجام پژوهش برای پوست گیری، پوست سبز گردو در سرعت دورانی و عمق شیارهای مختلف
Fig. 3. Research steps for peeling of walnut at various rotational speeds and groove depths

آب پوسته به درون محصول اتفاق خاصی به وجود نمی آید. در صورتی که با نفوذ آب پوست سبز گردو به دلیل وجود ترکیبات فنولی و اسیدی (Latifi et al., 2021) باعث سیاه شدن رنگ مغز گردو خواهد شد، که به شدت باعث کاهش بازارپسندی محصول خواهد شد. علاوه بر آن بر اثر وجود ترک حشرات و عوامل قارچی سریع تر به درون مغز راه پیدا کرده و باعث آلودگی محصول می شود (Wei et al., 2020).
 رابطه (۵) برای محاسبه میزان آسیب به گردو در نظر گرفته می شود:

$$\eta' = \frac{L}{H + R + L} \times 100 \quad (5)$$

η' بیانگر درصد گردوی تلف شده پس از خارج شدن از سامانه (شامل هرگونه ترک و شکستگی) است (Zhou, He, Karkee, & Zhang, 2014).

برای بررسی اثر فاکتورهای اشاره شده بر نحوه عملکرد دستگاه پوست کن به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با استفاده از نرم افزارهای SAS (V 9.2.1) و Matlab2018 انجام شد. علاوه بر آن برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

پارامترهای اندازه گیری شده

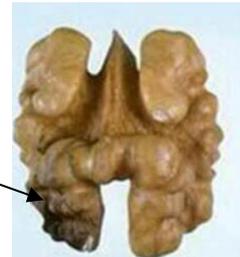
در هر آزمایش، وزن محصول به دست آمده، وزن محصولی که پوست کنده شده و وزن محصول آسیب دیده به دست می آید. مجموع موارد اشاره شده با وزن محصول ریخته شده در محفظه برابر خواهد بود. گردهای خارج شده از قسمت خروجی پوسته سبز نیز به عنوان محصول آسیب دیده در نظر گرفته شد. بنابراین با استفاده از رابطه (۴)، درصد گردوی پوست کنده شده سالم به دست آمد (Hussain et al., 2016):

$$\eta = \frac{H}{H + R + L} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، η بیانگر درصد گردو پوست کنده شده، H وزن محصول پوست کنده شده، R وزن گردهایی که پوست آن‌ها یا کنده نشده و یا کمتر کنده شده و L وزن محصول آسیب دیده است. یکی دیگر از عواملی که در پوست کردن محصول مورد توجه است، میزان شکستگی و یا آسیب دیدگی گردو (شامل هرگونه ترک و شکستگی) می باشد (Montero et al., 2009). این عامل در گردو بسیار مورد توجه است، زیرا در مورد محصولاتی مانند بادام، فندق و پسته، با نفوذ



قسمتی از مغز گردو که در اثر نفوذ آب گردو سیاه شده است.
A part of the walnut kernel that has turned black due to the penetration of walnut shell juice.



شکل ۴- گردو با مغز سالم و با مغز آسیب‌دیده در اثر نفوذ آب گردو به درون مغز (هر دو با دستگاه پوست‌کنی شده‌اند)

Fig. 4. Walnut with a healthy nut and with a damaged nut due to the penetration of walnut shell juice to the inside section (both were peeled with a machine)

آزمایش‌ها تا حدی کاهش یافته و بسیاری از محدودیت‌هایی که در روش‌های دیگر بهینه‌سازی اعمال می‌شود، برطرف می‌شود. در این تحقیق برای تعیین ترکیب مناسب، از قسمت بهینه‌سازی نرم‌افزار Design Expert 12 استفاده شده است. در این روش با تعیین تعداد متغیرها و حدود حداقل‌ها و حداکثرها برای پارامترها، ماتریس مناسب برای آزمایش به صورت کدبندی شده در محدوده ۱- تا ۱ طراحی می‌شود. سطوح کدبندی شده برای متغیرهای آزمایش در جدول ۲ مشخص شده است.

تعیین ترکیب بهینه

برای تعیین ترکیب بهینه از روش سطح پاسخ استفاده گردید. در این روش سعی می‌شود تا با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین برهمکنش‌ها، اثرات درجه دوم و حتی شکل موضعی سطح پاسخ مورد مطالعه یافته شود. به عبارتی دیگر، روش سطح پاسخ به طراحی یک آزمایش تجربی می‌پردازد که تأثیرات چندگانه متغیرها را مدل‌سازی می‌نماید. با استفاده از این روش، تعداد

جدول ۲- سطوح کدبندی شده متغیرهای آزمایش با در نظر گرفتن مقادیر واقعی

Table 2- The coded levels of the test variables, considering the actual values

متغیر Variable	سطح ۱ Level 1	سطح ۰ Level 0	سطح -۱ Level -1
عمق شیار برش Plate cutting depth (mm)	5	3	1.5
سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	322	275	218

ساخته شده‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر نیز بر اساس همین رهنمودها است. طبق استاندارد ISO 14040، هر پروژه LCA شامل چهار مرحله اساسی است که در چهار قسمت اشاره شده است: ۱. تعریف هدف و محدوده، ۲. تجزیه و تحلیل موجودی، ۳. ارزیابی گروه‌های تأثیر (LCIA) و ۴. تفسیر نتایج.

در این تحقیق تأثیرات مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت مورد ارزیابی قرار گرفتند. به عبارت دیگر، در (Life Cycle Assessment) LCIA Impact Assessment از ورودی‌های مرحله دوم برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی استفاده گردید و برای این منظور روش ارزیابی IMPACT 2002+ در نرم‌افزار SIMAPRO نسخه ۹ مورد استفاده قرار گرفت. این روش توسعه یافته، توسط موسسه فناوری فدرال سوئیس، یک رویکرد ترکیبی شامل چندین گروه با اثر اصلی و گروه‌های آسیب، از جمله ۱۵ نقطه میانی و چهار گروه تأثیر نقطه

ارزیابی چرخه زیست

ارزیابی چرخه عمر یک روش نوآورانه است که به طور گسترده برای تعیین کمیت نیازهای انرژی و تأثیرات بالقوه زیست‌محیطی یک محصول یا سیستم تولید در طول چرخه عمر آن استفاده می‌شود. در این روش از فرآیند «گهواره تا گور» برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مهم بر تحولات زیست‌محیطی استفاده می‌شود. این روش شامل تجزیه و تحلیل تمام مراحل استخراج منابع، تولید مواد، تولید قطعات و مدیریت مصرف محصولات به شکل زباله، بازیافت یا دفع نهایی است (Guinee, 2002). مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها بر اساس استاندارد (International Organization for standardization) ISO تدوین شده است که مطالعات ارزیابی چرخه زیست (Life Cycle Assessment) LCA باید بر اساس آن انجام شود. بنابراین، تمام مدل‌های توسعه یافته بر اساس دستورالعمل‌های ISO 14040

را داشت. هرچه انعطاف پذیری بیشتر باشد، میوه‌های آسیب دیده در فرآیند ترک خوردگی کمتر است (Sharifian et al., 2008).

ابعاد گردو تأثیر قابل توجهی بر نیروی گسیختگی، انرژی و توان مورد نیاز برای پارگی پوست گردو نداشت. بنابراین این امر باعث شد طراحی دستگاه مستقل از ابعاد گردو باشد. با این حال، کرنش پارگی به طور معنی داری تحت تأثیر اندازه گردو قرار گرفت. اما از طرف دیگر به دلیل تغییر شکل گردو طراحی سامانه با توجه به میزان انعطاف پذیری میوه گردو صورت گرفت. میزان کرنش پارگی به مقدار ۰/۰۷ با سرعت ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه اندازه گیری شد. با در نظر گرفتن حداکثر و حداقل ابعاد گردو (۲۵-۳۵ میلی متر)، دامنه تغییر شکل ۱/۸۰ تا ۳/۱۵ میلی متر محاسبه شده است.

همان طور که اشاره شد، در این تحقیق هدف افزایش میزان پوست گیری پوست سبز گردو با بیشترین کارایی و کمترین آسیب فیزیکی به محصول است. پس از داده گیری تحلیل بر روی محصول صورت گرفته و نتایج آن در این قسمت نمایش داده می شود.

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس را برای تأثیر عمق شیار و سرعت چرخش بر درصد پوست گیری نشان می دهد. یافته ها حاکی از آن است که تغییرات عمق شیار و سرعت موتور به طور قابل توجهی بر پوست کندن گردو در سطح یک درصد تأثیر می گذارد. به بیان دیگر سرعت های دورانی مختلف معنی داری در سطح یک درصد بر عملکرد دستگاه داشته و عملکرد در هر سه سطح متأثر از سرعت بوده است. همچنین اثر تغییرات عمق شیار صفحه برش بر میزان عملکرد دستگاه و کاهش تلفات گردوها در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است. تأثیر این عامل بر میزان آسیب به گردو در سطح ۵ درصد معنی دار می باشد.

پایانی تأثیرات نقطه میانی شامل تشعشعات یونیزه، سرطان زا، غیرسرطان زا، تخریب لایه ازن، مواد آلی تنفسی، سمیت زیست محیطی آب، سمیت زیست محیطی، اسید/نوتری، اشغال زمین، اسیدی شدن آب، اوتروفیکاسیون آب، گرمایش جهانی، انرژی غیرقابل استخراج معدنی است. چهار دسته اصلی نیز وجود دارد که تأثیرات نقطه میانی در آن ها طبقه بندی می شوند: سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، تغییرات آب و هوا و منابع (Mirzaei, Salami, Samimi- Akhijahani, & Zareei, 2023). نتایج مرحله دوم و سوم به عنوان مبنایی برای مرحله «تفسیر» خلاصه می شود. پس از تعریف هدف و محدوده، نتیجه گیری، پیشنهادات و تصمیمات مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار تأثیرات زیست محیطی پوست کن گردو مورد بررسی قرار می گیرد.

نتایج و بحث

نتیجه بررسی خواص مکانیکی

آزمایش های بیومکانیکی نشان داد که جهت نیروی وارد شده به گردو بر کرنش پارگی تأثیری ندارد. بنابراین نیازی به کنترل جهت نیروی اعمالی نبود و این امر به طرز قابل توجهی طراحی ماشین پوست کن گردو را ساده کرد. حداکثر نیرو، انرژی و توان برای پارگی پوست گردو به ترتیب ۷۹۸ نیوتن، ۹۵۰ مگاژول و ۱/۹۸ وات اندازه گیری شد. این مقادیر برای طراحی ماشین مورد استفاده قرار گرفت. سرعت نیروی اعمالی برای ایجاد ترک ۵۰۰ میلی متر بر دقیقه بود. پوست گردو در این سرعت بیشترین کرنش (انعطاف پذیری)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر عمق برش و سرعت دورانی صفحه بر درصد پوست کنی گردو

Table 3- The results of analysis of variance of the effect of cutting depth and rotational speed of the plate on the percentage of walnut peeling

منابع تغییرات Variation sources	درجه آزادی Degree of Freedom	F	آسیب Damage (%)		میزان پوست گیری Peeling amount (%)	
			میانگین مربعات (MS)		میانگین مربعات (MS)	
			Mean squares		Mean squares	
عمق شیار برش Cutting depth (mm)	2	17.14**	69.72	154.16* *	295.32	
سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	2	5.21*	29.04	49.26**	105.11	
ارتفاع *سرعت Depth *Speed	4	128.29**	4.01	11.26**	1.87	
خطا Error	18	-	0.029	-	0.179	

** معنی دار در سطح یک درصد و * معنی دار در سطح ۵ درصد

**Significant at the level of 1%, and *Significant at the level of 5%

دوران و ملدن در دستگاه بایستی افزایش یابد. از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی درصد پوست‌کنی افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش آن از ۲۱۸ به ۲۷۵ دور بر دقیقه و از ۲۷۵ تا ۳۲۲ دور بر دقیقه، میزان پوست‌گیری گردو به ترتیب ۱۲/۷۲ و ۹/۶۵ درصد افزایش یافت. با افزایش سرعت دورانی، از ۲۱۸ به ۲۷۵ دور بر دقیقه، مومنتوم و ضربه خطی در اثر سرعت وارد شده افزایش یافته میزان جدایش پوسته سبز نیز افزایش می‌یابد. با کاهش سرعت دورانی ضربه کاهش یافته و پوست سبز بیشتری روی محصول باقی می‌ماند.

جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین میزان گردوهای پوست‌کنده شده سالم در عمق شیار و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پارامتر ارتفاع و سرعت دورانی الکتروموتور دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد است. با افزایش عمق شیار از ۱/۵ به ۳ میلی‌متر و از ۳ به ۵ میلی‌متر، در میزان گردوهای سالم پوست‌کنده شده به میزان ۶/۹۹ و ۵/۱۲ درصد افزایش یافت. با کاهش ارتفاع شیار، میزان برشی که از سطح سبز گردو برداشته می‌شود نیز کاهش می‌یابد و بیشتر به صورت سایشی عمل پوست‌کنی را انجام می‌دهد. در این حالت برای پوست‌کنی مناسب، مدت زمان

جدول ۴- میانگین درصد محصول پوست‌کنده شده مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده (عمق شیار صفحه برش و سرعت دورانی)

Table 4- The average percentage of the peeled walnut product related to the measured variables (groove depth of the cutting plate and rotational speed)

منبع Source	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)			سرعت دورانی Rotational speed (rpm)		
	1.5	3	5	218	275	322
درصد محصول پوست‌کنده شده Percentage of peeled product	85.42 ^a	91.18 ^b	95.31 ^c	86.54 ^a	89.85 ^a	92.69 ^b

برش ۱/۵ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۱۸ دور بر دقیقه با میانگین ۸۱/۴۳ درصد اتفاق می‌افتد. میزان بازده یک پوست‌کن گردو با شیارهای موجود در جداره به میزان ۸۲٪ گزارش شده است (Makarichian & Chegini, 2013). همچنین در تحقیق دیگری که از یک موتور گازوئیلی برای انرژی‌دهی استفاده شده بود، برای تیمارهای مختلف درصد پوست‌کنی از ۷۱/۶٪ تا ۹۸/۲٪ بر اساس وزن پوست‌کنده شده از محصول متغیر بود (Karimi et al., 2008).

اثر متقابل دو عامل سرعت دورانی و عمق شیار برش نیز در میزان محصول پوست‌کنده شده در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). در جدول ۵، نیز میانگین اثر متقابل سرعت دورانی و عمق شیار برش نشان داده شده است. با افزایش عمق شیار برش، میزان محصول پوست‌کنده شده افزایش می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت دورانی نیز میزان محصول پوست‌کنده شده، افزایش می‌یابد. بیشترین میزان محصول پوست‌کنده شده، در عمق برش ۵ میلی‌متر و سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه، با میانگین ۹۵/۷۱ درصد و کمترین آن در عمق

جدول ۵- مقایسه میانگین درصد محصول پوست‌کنده شده در اثر متقابل عمق شیار صفحه و سرعت دورانی آن

Table 5- Comparison of the average percentage of peeled product with the interaction between the depth of the plate groove and the rotational speed

منبع Source	میانگین درصد گردوهای پوست‌کنده شده Mean percentage of peeled walnuts (%)		
	سرعت دورانی صفحه Rotational speed (rpm)		
	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)	218	275
1.5	81.43 ^h	83.95 ^g	85.05 ^f
3	92.06 ^e	88.16 ^d	92.06 ^c
5	90.15 ^e	93.24 ^b	95.71 ^a

مختلف نشان داده شده است. با توجه به جدول ۶، عمق شیار برش و سرعت‌های دوران مختلف دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال

در جدول ۶ نتایج آنالیز داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن برای میانگین درصد آسیب به گردو در عمق برش و سرعت‌های دورانی

دقیقه، میزان درصد تلفات گردوهای پوست کنده شده افزایش ۱/۴۱ برابری داشته است. با افزایش سرعت دورانی، با آن که میزان محصول پوست کنده شده افزایش می یابد، اما در اثر برخورد ضربه ای به پوست سبز و سپس پوست چوبی افزایش یافته و متعاقباً باعث افزایش تلفات و آسیب به محصول می گردد.

به ترتیب یک و پنج درصد هستند. با افزایش عمق صفحه برش، از ۳ میلی متر به ۵ میلی متر، میزان شکستگی به میزان ۷۲/۲۵ درصد بیشتر بود. این میزان برای تغییر عمق از ۱/۵ میلی متر تا ۳ میلی متر به میزان ۲۵/۶۲ درصد بود. میزان آسیب به محصول با تغییر عمق از ۳ به ۵ میلی متر معنی دار نبود. با افزایش سرعت دورانی از ۲۱۸ به ۳۲۲ دور بر

جدول ۶- میانگین آسیب محصول مربوط به متغیرهای اندازه گیری شده (و عمق شیار و سرعت دورانی)

Table 6- The average damage of product related to the measured variables (groove depth and rotational speed)

منبع Source	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)			سرعت دورانی Rotational speed (rpm)		
	1.5	3	5	218	275	322
درصد تلفات Damage percentage	2.46 ^a	3.075 ^c	5.29 ^e	4.05 ^b	4.35 ^b	6.24 ^d

بیشترین میزان تلفات گردو در عمق شیار ۵ میلی متر و سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه با میانگین ۶/۸۳ و کمترین آن در عمق ۱/۵ میلی متر با سرعت دورانی ۲۱۸ دور بر دقیقه با میانگین ۱/۹۲ درصد اتفاق می افتد. ترکیب های دیگر در گروه های بعدی قرار می گیرند که در جدول ۷ نشان داده شده است. در تحقیقات مشابه میزان آسیب دیدگی به گردوهای تحت پوست کنی از ۰/۷٪ و ۲/۴٪ در تیمارهای مختلف به دست آمد (Karimi et al., 2008).

میزان آسیب دیدگی محصول از نظر کشاورز بسیار مورد توجه است. همان طور که قبلاً اشاره شد، با ترک، شکستگی و یا کنده شدن حتی قسمت جزئی از گردو، کیفیت محصول به شدت افت نموده و علاوه بر نفوذ مایع پوست گردو به درون آن، در بلندمدت باعث می شود حشرات و قارچ ها رشد کرده و بازارپسندی محصول به شدت افت کند. نتایج مقایسه میانگین های اثر متقابل عمق شیار صفحه و سرعت دورانی نشان می دهد که هرچه عمق شیار صفحه افزایش می یابد، میزان تلفات و آسیب دیدگی محصول نیز افزایش می یابد.

جدول ۷- مقایسه میانگین آسیب پوست کنی گردو در اثر متقابل عمق شیار و سرعت دورانی صفحه برش

Table 7- Comparison of the average walnut peeling damage due to the mutual effect of groove depth and rotational speed of the cutting blade

منبع Source	میانگین آسیب به گردوهای پوست کنده شده Mean percentage of damaged peeled walnuts (%)		
	سرعت دورانی صفحه Rotational speed (rpm)		
عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)	218	275	322
1.5	1.92 ^a	2.04 ^a	3.05 ^b
3	4.07 ^c	4.15 ^c	4.62 ^d
5	5.64 ^e	6.17 ^f	6.83 ^f

شرط های بهینه سازی مطابق با جدول ۸ تعیین شد. مقادیر پارامترهای مذکور برای بیشینه کردن میزان عملکرد سامانه، کمینه کردن میزان محصول آسیب دیده و کاهش مدت زمان انجام عملیات پوست کنی در محدوده های به دست آمده از آزمایش ها تعیین گردید. مقدار بهینه برای عمق برش ۳/۴ میلی متر با سرعت دورانی ۲۸۱ دور بر دقیقه با مطلوبیت ۹۵٪ به دست آمد. برای این تیمار مقادیر درصد پوست کنی، زمان آزمایش، محصول آسیب دیده به ترتیب ۹۳/۵ درصد، ۵۳ ثانیه و ۱/۷ درصد، محاسبه شد.

با توجه به بحث اقتصادی و این که زمان در این مرحله از برداشت گردو از مزرعه بسیار حایز اهمیت است، بنابراین عمق برش کم و سرعت های دورانی کم باعث اتلاف زمان پوست کنی و افزایش هزینه کارگری خواهد بود. چرا که در این حالت قسمت اعظمی از محصول پوست کنی نشده و دوباره بایستی در فرآیند پوست کنی وارد چرخه شود که این خود مستلزم صرف هزینه و وقت است. از طرف دیگر با افزایش عمق برش و سرعت دورانی بیشتر صفحه، باعث می شود، آسیب بیشتری به محصول رسیده و کیفیت محصول کاهش یابد. برای تعیین مقادیر بهینه برای عمق برش و سرعت دورانی، حد و

جدول ۸- شروط و محدوده بهینه‌سازی

Table 8- Limitations and ranges for optimization

شرط بهینه‌سازی Optimization condition	پارامتر Parameter	محدوده Data range	
-	عمق برش Cutting depth (mm)	5	1.5
-	سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	322	218
بیشینه Maximize	درصد پوست‌کنی Peeling percentage (%)	95	80
کمینه Minimize	زمان انجام آزمایش Experiment duration (s)	72	40
کمینه Minimize	میزان محصول آسیب‌دیده Amount of the damaged product (%)	9.5	1

سامانه‌های پیشین می‌توان دریافت، دستگاه طراحی شده با ظرفیت ۱۲۰۰ کیلوگرم در ساعت نسبت به دستگاه‌های دیگر عملکرد بهتری دارد. دستگاه سانتریفیوژ توری دار با ۹۰۰ کیلوگرم در ساعت نزدیک‌ترین ظرفیت را ارائه می‌دهد. بازدهی دستگاه طراحی شده (۹۳/۵٪) بالاتر از سایر دستگاه‌هاست. بازده دستگاه قفسی و انگشتی به ترتیب ۸۵٪ و ۸۶٪ است که نشان‌دهنده پیشرفت در طراحی است. میزان آسیب به محصول در دستگاه طراحی شده تنها ۱/۸٪ است که به‌طور قابل توجهی کمتر از دیگر دستگاه‌هاست (آسیب ۵٪ تا ۱۰٪). این امر به حفظ کیفیت محصول و افزایش بازارپسندی کمک می‌کند. دستگاه ساخته شده در این پژوهش با مصرف ۲/۵ کیلووات در ساعت از نظر انرژی بهینه‌ترین است. دستگاه‌های دیگر به‌ویژه سیستم‌های قفسی و انگشتی به دلیل استفاده از الکتروموتورهای بزرگ‌تر مصرف انرژی بیشتری دارند (۳/۵ تا ۴ کیلووات).

با توجه به تحلیل‌های انجام‌گرفته و نتایج آن، می‌توان چنین ابراز نمود که استفاده از ماشین پوست‌کن گردو، می‌تواند عمل پوست‌کنی را با عملکرد بیش از ۹۳ درصد و آسیب کمتر از ۲ درصد انجام دهد. در ارزیابی کلی کار دستگاه پوست‌کن، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد تأثیر عمق برش صفحه و سرعت دورانی بر پوست‌کنی گردو در سطح یک درصد معنی‌دار است. در محدوده‌های مورد اشاره، عمق ۵ و سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه بالاترین میزان عملکرد را حاصل نمود، اما با لحاظ نمودن درصد تلفات، عمق ۳ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۷۵ دور بر دقیقه برای عملکرد مطلوب پیشنهاد می‌شود. علاوه بر آن خروجی حاصل از بهینه‌سازی نشان داد بالاترین میزان بهره‌وری در عمق برش ۳/۴ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۸۱ دور بر دقیقه حاصل می‌شود.

در جدول ۹، مقایسه دستگاه پوست‌کن ساخته‌شده با سه پوست‌کن مشابه نشان داده شده است. با تحلیل و مقایسه سامانه حاضر با

جدول ۹- مقایسه دستگاه حاضر با سه پوست‌کن گردو

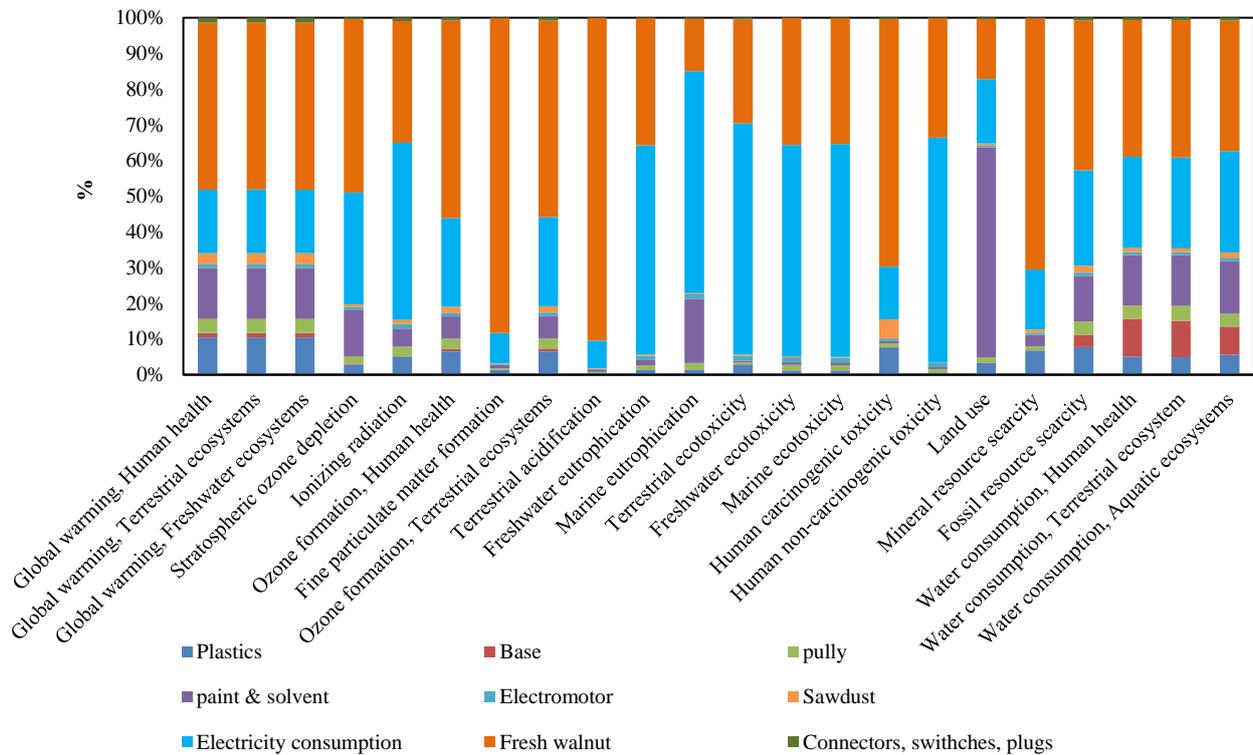
Table 9- Comparison of the present device with three walnut peelers

پارامتر Parameter	دستگاه سانتریفیوژ توری دار (Zhong et al., 2018) Centrifugal Net peeler	دستگاه قفسی (Karimi et al., 2008) Cage peeler	دستگاه انگشتی (Hussain et al., 2016) Finger peeler	دستگاه حاضر Present system
ظرفیت Capacity (kg h ⁻¹)	900	800	750	1200
بازدهی پوست‌کنی Peeling efficiency (%)	90	85	86	93.5
درصد آسیب Damage (%)	5	10	8	1.8
مصرف انرژی Energy consumption (kW)	3.2	3.5	4.0	2.5

مربوط به مرحله تولید گردو است که به فرآیند پوست کنی گردو مربوط نمی‌شود. بقیه نهاده‌ها تنها حدود یک درصد از مواد سرطان‌زا را تشکیل می‌دهند (Mao & Hua, 2012). به غیر از اشغال زمین و استخراج مواد معدنی، شاخص‌های دیگر شامل تخریب لایه اوزون، مواد آلی تنفسی، سمیت آبیان، سمیت زمینی، اسیدی شدن زمین، اسیدی شدن آب، اوتروفیکاسیون آبیان و انرژی‌های تجدیدناپذیر است. اثر مصرف برق بیشتر از تولید گردوی تازه و سایر نهاده‌ها بود.

نتایج ارزیابی چرخه زیست

شکل ۵ نتایج ارزیابی تأثیر چرخه حیات (LCIA) را بر حسب درصد برای پوست کن گردو نشان می‌دهد. جریان الکتریکی مصرف شده، ۶۲/۹ درصد بزرگ‌ترین سهم در رده اول قرار دارد. پس از آن همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، گردوی تازه در اکثر شاخص‌ها به جز گرم شدن کره زمین در فرآیند عمل‌آوری بیشترین تأثیر را بر آلودگی دارد. این بدان معناست که بخش عمده آلودگی

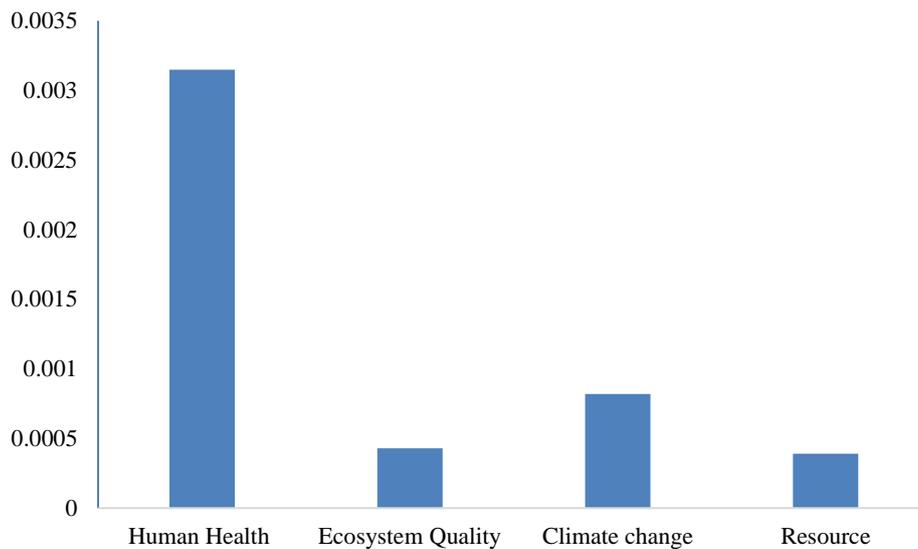


شکل ۵- سهم هر ورودی در نتایج ارزیابی تأثیر چرخه حیات (LCIA) پوست کن گردو بر حسب درصد

Fig. 5. The share of each input in the results of the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) of the walnut peeler, in percentage points

می‌باشد. گازهای گلخانه‌ای به‌طور عمده شامل گازهای CO_2 و NO_x و SO_x که با پراکندگی در فضا علاوه بر آثار زیست‌محیطی در بلندمدت باعث تغییرات اقلیمی می‌گردد. کیفیت اکوسیستم و منابع در رده‌های بعدی از تأثیر آلودگی قرار می‌گیرند. با بهینه نمودن سامانه، کاهش وزن آن و استفاده از انرژی پاک خورشیدی به جای انرژی الکتریکی می‌توان تا حد زیادی از تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از استفاده از جریان الکتریکی و منبع مورد نیاز کاست.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج مقایسه شاخص‌های LCIA نشان داده شده است. با توجه به نمودار شاخص مربوط به سلامت انسانی نسبت به بقیه شاخص‌ها، در بالاترین سطح قرار دارد. این امر به دلیل استفاده از جریان الکتریکی، استفاده از پروفیل و ورق آهن و سیم مسی درون الکتروموتور می‌باشد، که برای استحصال این مواد نیاز به پروسه‌هایی نظیر خالص‌سازی و پالایش در رده بعدی تغییرات اقلیمی قرار دارد که بیشترین تأثیر در این عامل در اثر آزاد شدن گازهای گلخانه‌ای ناشی از محصول و اجزای سامانه



شکل ۶- مقایسه شاخص‌های اصلی نرمال شده LCIA برای دستگاه پوست کن گردو

Fig. 6. Comparison of the main normalized LCIA indices for the walnut peeling machine

نتیجه گیری

با استفاده از دستگاه پوست کنی گردو، می‌توان عمل پوست کنی گردو را با کارایی بالای ۹۴ درصد و آسیب کمتر از ۵ درصد انجام داد. در ارزیابی کلی عملکرد دستگاه چنین استنباط شد که تأثیر عمق شیارهای برش و سرعت دورانی بر پوست کنی گردو در سطح یک درصد معنی دار است. در محدوده‌های مورد اشاره، عمق برش ۳ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۷۵ دور بر دقیقه مناسب‌ترین عملکرد را از نظر پوست کنی و آسیب به گردوها داشت. علاوه بر آن خروجی حاصل از بهینه‌سازی نشان داد بالاترین میزان بهره‌وری در عمق ۳/۴ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۸۱ دور بر دقیقه حاصل می‌شود. نتایج ارزیابی چرخه زیست نشان داد، شاخص مربوط به سلامت انسان به دلیل استفاده از جریان الکتریکی (جهت توان‌دهی سامانه)، پروفیل آهن (در شاسی و مخزن سامانه)، سیم مسی در آرمیچر الکتروموتور

بیشترین مقدار را دارد. بهینه نمودن سامانه و استفاده از انرژی‌های پاک می‌تواند به بهبود کارایی سامانه و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی کمک کند.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه کردستان و شرکت خودباوران صنعت آذرشهر تشکر و سپاسگزاری می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

هادی صمیمی اخیجانه‌ای: مفهوم‌سازی، تحقیق، جذب سرمایه، تحلیل رسمی، نرم‌افزار، مرور و ویرایش.
محمد صالح برقی جهرمی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، مصورسازی، تحلیل داده‌ها، نگارش، پیش‌نویس اصلی، مرور و نگارش.

References

- Barton, R. P. (1956). Nut Hulling Machine. *United States patent*, 2,747.632.
- Cacho, M. (1978). Nut Huller or Sheller. *United States patent*, Pp, 868-320.
- Ebrahimi, A., Sharifi, M., Rafiei, Sh., & Fatahi, M. (2009) Determination of Physical and Morphological Properties in Four Genotypes of Walnut. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 40(1), 63-70. (in Persian). [20.1001.1.20084803.1388.40.1.8.0](https://doi.org/10.1001.1.20084803.1388.40.1.8.0)
- FAO. (2022). Statistics of Quantity of walnut Production in Iran. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Gachpazian, A., Azadmard Damirchi, S., Hesari, J., Peighambaroust, S. H., Nemati, M., Alijani, S., & Ahmadi, E. (2013). Production of Yoghurt Fordified with Walnut Powder. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 9(4), 66-73. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v9i4.31361>
- Ghafari, A., Chegini, G. R., Khazaei, J., & Vahdati, K. (2011) Design, Construction and Performance Evaluation of the Walnut Cracking Machine. *International. Journal of Nuts and Related Science*, 2(1), 11-16.

- <https://doi.org/10.22034/jon.2011.515757>
7. Ghasemi, M., Arzani, K., & Hassani, D. (2012). Evaluation and identification of walnut (*Juglans regia* L.) genotypes in Markazi province of Iran. *Crop Breeding Journal*, 2(2), 119-124. <https://doi.org/10.22092/cbj.2012.100429>
 8. Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(5), 311-313. <https://doi.org/10.1007/BF02978897>
 9. Güner, M. E. T. İ. N., Dursun, E. R. G. İ. N., & Dursun, I. G. (2003). Mechanical behavior of hazelnut under compression loading. *Biosystems Engineering*, 85(4), 485-491. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00089-8)
 10. Hussain, S. Z., Ahad, T., Rather, A. H., & Naik, H. R. (2016). Development of walnut dehulling machine and assessment of its performance using Ethephon and Tween-80 as pre-treatments for hull loosening. *Journal of Food Science Technology*, 53, 2835-2843. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2261-5>
 11. Jingtao, Z., Pengxu, S., Xiaoxue, W., & Ye, F. (2016). Design of the mechanism principle of the new green walnut peeling machine. *Food and Machinery*, 32(8), 20. <https://doi.org/10.13652/j.issn.1003-5788.2016.08.020>
 12. Karimi, N., Minaei, S., Hasani, D., & Eyvani, A. (2008). Parameters involved in walnut peeling process. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 4(4), 389-393.
 13. Khazaei, J., Rasekh, M., & Borghei, A. M. (2002). Physical and Mechanical Properties of Almond and its Kernel related to cracking and peeling. In *2002 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.10847>
 14. Koyuncu, M. A., Ekinçi, K. A. M. İ. L., & Savran, E. (2004). Cracking characteristics of walnut. *Biosystems Engineering*, 87(3), 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.001>
 15. Latifi, Y., Chaharlang, M., Daneshniya, M., Khaki Arani, S., Barzanoi, M., & Boghori, P. (2021). Antioxidant and antimicrobial properties of methanolic extract of green walnut skin. *FSCT*, 17(108), 127-136. <https://doi.org/10.52547/fsct.17.108.127>
 16. Makarichian, A., & Chegini, G.R. (2013). Design and Construction a Walnut peeler. *International Journal of Nuts and Related Science*, 5, 19-29. <https://doi.org/10.22034/JON.2014.515692>
 17. Mao, X., & Hua, Y. (2012). Composition, Structure and Functional Properties of Protein Concentrates and Isolates Produced from Walnut (*Juglans regia* L.). *International Journal of Molecular Science*, 13, 1561-1581. <https://doi.org/10.3390/ijms13021561>
 18. McFarland, J., & Saunders, E. (1977). Pistachio huller. *United States patent*. 587, 918.
 19. Meriam, J. L., Kraige, L. G., & Bolton, J. N. (2018). *Engineering Mechanics: Dynamic*. Published by Wiley, New York. 9th edition.
 20. Mirzaei, P., Salami, P., Samimi-Akhijahani, H., & Zareei, S. (2023). Life cycle assessment, energy and exergy analysis in an indirect cabinet solar dryer equipped with phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 61, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106760>
 21. Montero, C. R. S., Schwarz, L. L., Dos, L. C., Santos, C. S., Andrezza, C. P., & Kechinski, R. J. (2009). Postharvest mechanical damage affects fruit quality of 'Montenegrina' and 'Rainha' tangerines. *Brazilian Agricultural Research*, 44(12), 1636-1640. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200011>
 22. Ramos, D. (1998). *Walnut Production Manual*. University of California. 328 pp.
 23. Rastegar, S., Shojaee, A., & Tajeddin, B. (2019). The effect of packaging method on the physical, chemical, and organoleptic characteristics of walnut kernel during its storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(5), 699-713. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v14i5.68814>
 24. Rebufa, C., Artaud, J., & Dréau, Y. L. (2022). Walnut (*Juglans regia* L.) oil chemical composition depending on variety, locality, extraction process and storage conditions: A comprehensive review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 110, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104534>
 25. Sharifian, F., Rahmani Didar, A., & Haddad Derafshi, M. (2008). Design of a walnut cracking machine based on acquired mechanical properties. In *V: 10th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture*. Antalya, Turkey. (pp. 826-831).
 26. Trujillo, G. (2003). Nut Hulling tub Agitating fingers. *United States patent*, 10, 424, 241.
 27. Wei, L., Fu, H., Lin, M., Dang, H., Zhao, Y., Xu, Y., & Zhang, B. (2020). Identification of dominant fungal contamination of walnut in Northwestern China and effects of storage conditions on walnut kernels. *Scientia Horticulture*, 264, 109141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109141>
 28. Younesi Alamooti, Y., & Mahmoodi, S. (2015). Evaluation of a new multipurpose centrifugal mechanism for nut process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.09.002>
 29. Zhong-qiang, Y., Kuan-bo, C., Sheng-kun, Y., Li-na, S., Ba-siti, A., Zhong-xin, L., & Qing-hui, W. (2018). Design and experiment of centrifugal-mesh green walnut peeling machine. *Science and Technology of Food Industry*, 39(8), 195-198. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.08.035>
 30. Zhou, J., He, L., Karkee, M., & Zhang, Q. (2014). Effect of excitation position of a handheld shaker on fruit removal efficiency and damage in mechanical harvesting of sweet cherry. *Biosystems Engineering*, 125, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.016>

31. Ziaolhagh, S. H., & Zare, S. (2022). Effect of ultrasound on the extraction of phenolic compounds and antioxidant activity of different parts of walnut fruit. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 18(3), 85-98. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2021.72602.1114>

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 547-566

Real-Time Measurement of In-Field Soil Surface Roughness Using Laser and Infrared Sensors

N. Salehi Babamiri¹, H. Hajy Agha Alizade^{1*}, M. Dowlati²

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Food Science and Technology, Tuyserkhan Faculty of Engineering and Natural Resources, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: h-alizade@basu.ac.ir)

Received: 22 October 2024

Revised: 12 November 2024

Accepted: 19 November 2024

Available Online: 03 June 2025

How to cite this article:

Salehi Babamiri, N., Hajy Agha Alizade, H., & Dowlati, M. (2025). Real-Time Measurement of In-Field Soil Surface Roughness Using Laser and Infrared Sensors. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 547-564. <https://doi.org/10.22067/jam.2024.90374.1300>

Introduction

Soil surface roughness is an important factor in determining the intensity and quality of tillage operations, and obtaining accurate information essential for precision tillage. Using an inappropriate technique due to the lack of precise discrepancy detection can lead to increased time spent on analysis and potential damage. Generally, there are two methods for measuring soil surface roughness: contact and non-contact. Contact methods are less accurate for measuring the roughness of soft soil because they involve physical contact, which can partially disturb the soil. Most non-contact measurement methods are also performed in stop-and-go conditions, which increases measurement time and related analysis. The aim of this study is to measure soil surface roughness in real-time using optical sensors in the field. The accuracy and precision of two non-contact measurement methods will be compared to determine the best approach for precision tillage operations.

Materials and Methods

In the current research, a real-time soil surface roughness measurement system consisting of mechanical and electrical modules, data collection, and processing was built. The system performance was evaluated at different forward speeds and roughness categories, with two types of infrared and laser sensors. To assess the sensors' accuracy, the collected data was compared against the pin gauge method, which served as the reference standard. The method exhibiting the least variation from this reference is considered to provide the most reliable data. Also, to further examine the accuracy of the sensors, the roughness data obtained from the sensor at various frequencies was compared against the roughness data obtained from the pin measuring device at the same level, resulting in a suitable curve plot. The interpretation of the obtained mathematical relationship indicates the precision of the sensor data.

Results and Discussion

The results obtained from the optical sensors were compared to the pin meter, used as the reference method, in both stationary and moving conditions. It was demonstrated that the optical sensors detect distance in the static state similarly to the reference pin meter. The calibration curve interpretation factor was 0.99 for the infrared sensor and 1 for the laser sensor, indicating a strong correlation between the sensor signals and their



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.90374.1300>

distance from the soil surface. The random roughness index was significant for different roughness classes at the 1% probability level, showing that this index effectively distinguishes between the resulting roughness classes. Analysis of variance results revealed that the measurement method had a significant effect at the 1% level. The method with the smallest difference from the reference method is considered the most appropriate measurement technique. The effect of forward speed was also significant at the 1% level; the speed at which the sensor's performance did not significantly differ from the reference method was identified as the optimal speed for the system. Additionally, the effect of roughness class was significant at the 1% level, confirming that the created roughness classes had meaningful differences. The results of the sensor accuracy evaluation showed that the data obtained from the laser sensor at speeds of 1 and 2.6 km h⁻¹ had no significant difference with the reference method. Therefore, it is appropriate to use the laser sensor at speeds of 1 and 2.6 km h⁻¹. At speeds higher than 3.5 km h⁻¹, the laser sensor successfully detected smooth surfaces, but did not correctly distinguish uneven surfaces. In general, the laser sensor was able to detect all categories of roughness at a speed of 2.6 km h⁻¹. One reason the laser sensor did not perform well at speeds above 2.6 km h⁻¹ was its low data acquisition rate. By using laser sensors with a higher data collection rate, the soil height profile can be plotted similarly to a pin scale. The infrared sensor was successful only in detecting smooth surfaces but failed to detect other types of surfaces.

Conclusion

Due to limited accuracy and the risk of damaging or altering the surface roughness, the contact method is not recommended for use on soft soil surfaces. Among non-contact methods, the most suitable technique is the one that provides the highest accuracy and precision while minimizing cost and time for data collection and analysis. In this study, two types of sensors including laser and infrared ranging were selected based on their reasonable price, ease of operation, compatibility with a mobile system, and ability to deliver real-time roughness measurements in the shortest possible time. The results demonstrated that real-time measurement of soil surface roughness can effectively replace traditional, tedious, and time-consuming methods.

Keywords: Infrared sensor, Laser sensor, Precision, Real-Time measurement, Surface roughness

اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک در شرایط مزرعه‌ای، با استفاده از حسگرهای لیزری و مادون قرمز

نسیم صالحی بابامیری^۱، حسین حاجی آقا‌علیزاده^{۱*}، مجید دولتی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

چکیده

شاخص زبری تصادفی به دلیل سهولت محاسبات و قابلیت اطمینان خوب، مناسب‌ترین شاخص برای جداسازی کلاس‌های زبری و توصیف شدت و کیفیت خاک‌ورزی است. اکثر روش‌های مرسوم مورد استفاده از رهیافت توقف و حرکت در اندازه‌گیری زبری خاک بهره می‌گیرند؛ که بسیار پر زحمت و وقت‌گیر است. در پژوهش حاضر از حسگرهای فاصله‌یاب نوری برای اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک استفاده شد؛ که سرعت اندازه‌گیری آن نسبت به روش‌های دیگر بیشتر است. از برازش بین فاصله اندازه‌گیری شده توسط حسگرها و بین‌متر یک رابطه خطی بین این دو متغیر حاصل شد. هر دو حسگر فاصله‌یاب در شرایط استاتیکی توانستند به خوبی فاصله را اندازه‌گیری کنند ($R^2=0/98$)، صحت و دقت هر دو حسگر نوری مادون قرمز و لیزری بر روی سیستم متحرک، در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت. صحت داده‌های به‌دست‌آمده از حسگر لیزر در سرعت‌های کمتر از $2/6 \text{ km h}^{-1}$ ، همانند روش بین‌متر بود ولی در سرعت‌های بیش از $3/5 \text{ km h}^{-1}$ روش لیزری فقط توانست کلاس زبری نرم را به‌درستی تشخیص دهد. کاهش صحت عملکرد حسگر، به دلیل کاهش نرخ جمع‌آوری داده‌ها در واحد طول و وجود کلوخه‌های بزرگ در کلاس‌های زبرتر بود. روش مادون قرمز فقط سطوح نرم را همانند بین‌متر تشخیص داد. در سرعت رو به جلو کمتر از $3/5 \text{ km h}^{-1}$ ، داده‌های حسگر لیزری از دقت خوبی برخوردار بود ($R^2=0/85$)، با این حال، با افزایش سرعت رو به جلو به $4/8 \text{ km h}^{-1}$ ، دقت عملکرد حسگر کاهش یافت ($R^2=0/72$)، می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ داده‌برداری بیشتر، تشخیص سطوح زبری به خوبی روش بین‌متر امکان‌پذیر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری بلادرنگ، حسگر لیزر، حسگر مادون قرمز، دقت، زبری خاک

مقدمه

اعمال می‌کند. این نوع مدیریت، ادوات کشاورزی را به سمت فناوری نرخ متغیر^۴ سوق می‌دهد. ادواتی که مجهز به این نوع فناوری باشند می‌توانند نرخ متفاوتی از عملیات را در قسمت‌های مختلف مزرعه اعمال نمایند (Kitchen et al., 2010; Maleki, Mouazen, De Ketelaere, Ramon, & De Baerdemaeker, 2008).

با وجود این که عملیات خاک‌ورزی بیشترین مصرف انرژی را دارد (Al-Suhaibani & Ghaly, 2010) ولی تاکنون نتوانسته است جایگاهی در تعاریف کشاورزی دقیق داشته باشد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تعداد تحقیقات در زمینه خاک-ورزی دقیق بسیار محدود است. یکی از دلایل آن خصوصیات خاک و تغییرپذیری پیچیده آن می‌باشد (Anthonis, Mouazen, Saeys, & Ramon, 2004; Fallahi, Aghkhani, & Bayati, 2015; Gohari,

کشاورزی دقیق^۳ یک فناوری جدید در کشاورزی مدرن است و به‌عنوان راهکاری جدید در بالا بردن کارایی ادوات کشاورزی و مدیریت مزرعه شناخته می‌شود؛ به گونه‌ای که با استفاده از فناوری‌ها و تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، اطلاعات لازم را گردآوری نموده و نهاده‌های مرتبط را مطابق با ویژگی‌های آن مکان از مزرعه

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده فنی و منابع طبیعی تویسرکان، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: h-alizade@basu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.90374.1300>

3- Precision agriculture

یک نقطه با نقاط مجاور آن تعیین می‌شود. پارامتر ترکیبی (افقی-عمودی)، ترکیبی از هر دو نوع مشخصه زبری سطح خاک است و پارامتر مبتنی بر تئوری فراکتال یا خودهمانند، که تعادل بین تغییرات ارتفاع در مقیاس‌های مختلف مکانی (فاصله‌ها) را اندازه‌گیری می‌کند. (Martinez-Agirre et al., 2016).

در صورتی که زبری سطح خاک ادوات خاک‌ورزی به صورت لحظه‌ای و در حال حرکت اندازه‌گیری شود؛ این شاخص می‌تواند در حین عملیات خاک‌ورزی نرخ متغیر مورد استفاده قرار گیرد (García Moreno et al., 2010). زبری سطح خاک شخم‌خورده تحت تأثیر اطلاعات وسیعی از خاک همچون رطوبت، بافت خاک، میزان کاه و کلش و بقایای گیاهی و شدت ابزار خاک‌ورز است؛ و در فاصله کوتاه بعد از عبور خاک‌ورز، شدت تغییرات زیاد نخواهد بود (Mohammadi et al., 2019; Maleki, & Khodaei, 2022). اندازه‌گیری زبری و پستی و بلندی سطح خاک، با توجه به نوع دستگاه و ابعاد اندازه‌گیری با دو روش تماسی و غیرتماسی انجام می‌شود (Jester & Klik, 2005). در روش تماسی، وسایل مکانیکی به‌طور مستقیم با خاک تماس برقرار می‌کنند. روش‌های تماسی خود به دو روش زنجیر غلتکی و روش سوزن‌های اندازه‌گیری یا پین‌متر تقسیم می‌شوند (Kuipers, 1957; Podmore & Huggins, 1981; Saleh, 1993).

در روش غیرتماسی، وسایل اندازه‌گیری از سطح خاک فاصله داشته و با سطح خاک تماسی ندارند. مبنای روش‌های غیرتماسی، ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن می‌باشد، روش‌های اندازه‌گیری غیرتماسی را می‌توان براساس نوع حسگری که استفاده می‌شود و ابعاد اندازه‌گیری به پنج روش: فراصوت، اسکنر لیزری، استریوفتوگرامتری، مادون قرمز و راداری ماهواره‌ای دسته‌بندی کرد. (Aguilar, Aguilar, & Negreiros, 2009; Gilliot, Vaudour, & Michelin, 2017; Jester & Klik, 2005; Koval, Vaňuš, & Bilík, 2016; Lee, Yamazaki, Oida, Nakashima, & Shimizu, 1996; Marinello, Gasparini, Arvidsson, & Sartori, 2015; Römken et al., 1986; Zribi, Ciarletti, & Taconet, 2000).

در اندازه‌گیری‌های فراصوتی، فاصله زمانی بین ارسال و دریافت امواج اندازه‌گیری شده و با استفاده از سرعت صوت، فاصله تا سطح جسم مورد نظر محاسبه می‌گردد. از آنجایی که دما و رطوبت محیط در سرعت صوت تأثیرگذارند لذا می‌بایست به‌منظور تصحیح داده‌های به‌دست‌آمده، در کنار حسگرهای فراصوت از حسگرهای دما و رطوبت استفاده کرد که از معایب این روش اندازه‌گیری است (Mohammadi et al., 2022). با استفاده از اسکنرهای لیزر سه‌بعدی، مدل ارتفاعی سطح خاک با دقت بسیار خوبی قابل‌ارائه است. وضوح و دقت در محدوده عمودی ۰/۵-۰/۱ میلی‌متر و افقی ۲-۰/۱ میلی‌متر را می‌توان با این روش به‌دست آورد (Haubrock, Kuhnert,

2010). Hemmat, & Afzal, 2010). از چالش‌های مهم در راستای اجرای خاک‌ورزی دقیق، داشتن اطلاعات کافی از خاک مزرعه برای تعیین آبی کیفیت و شدت خاک‌ورزی و معیار قرار دادن داده‌های حاصل از آن به‌منظور تغییرات آبی نرخ شخم است (Sharda, Franzen, David, Clay, & Luck, 2019). کیفیت خاک‌ورزی به‌وسیله برخی پارامترها همچون زبری سطح خاک، ابعاد خاکدانه‌ها، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک، چگالی حجمی، تعیین هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع و مقاومت به نفوذ خاک، مورد ارزیابی و سنجش قرار می‌گیرد (Martinez-Agirre, Alvarez-Mozos, & Gímez, 2016). زبری خاک از جمله خواص فیزیکی خاک است که از آن برای ارزیابی و مقایسه کیفیت شخم ادوات متعدد خاک‌ورزی و شخم با یکدیگر استفاده شده است؛ در پژوهشی، اثر سه ابزار خاک‌ورز مختلف شامل غلتک، چیزل و تیلر بر روی زبری خاک بررسی شد و نتایج نشان داد که زبری سطح خاک تحت تأثیر ادوات مختلف خاک‌ورزی، بافت و ساختمان خاک تغییر می‌کند (García Moreno, Díaz Alvarez, Tarquis Alonso, Paz González, & Saa' Requejo, 2010). در تحقیق دیگر پارامترهای زبری سطح در خاک با شرایط مختلف خاک‌ورزی با استفاده از یک پروفیل‌متر لیزری اندازه‌گیری شد که نتایج نشان داد مقدار زبری محاسبه‌شده با افزایش شدت خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Martinez-Agirre et al., 2016). نتایج مطالعات صورت‌گرفته نشان داد که پوشش محصولات (Lin & Richards, 2007). نوع خاک (García Moreno et al., 2010)، اثرات بارندگی، فرایندهای فرسایش آب (Marzahn, Seidel, & Ludwig, 2012) و شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی (Dalla Rosa, Cooper, Darboux, & Medeiros, 2012; Jensen, Karstoft, Green, & Munkholm, 2017; Römken, Singaray, & Gantzer, 1986) بر زبری سطح خاک موثر هستند. به‌طور کلی زبری به دو نوع زبری جهت‌دار^۱ و زبری تصادفی^۲ تقسیم می‌شود (Guzha, 2004). زبری جهت‌دار بر اثر شیب و توپوگرافی زمین و با به‌کارگیری ادوات مختلف شخم به‌وجود می‌آید. زبری تصادفی، بر اثر توزیع ذرات و خاک‌دانه‌ها به‌صورت مکانی بر یک سطح صاف ایجاد می‌گردد (Allmaras, Burwell, Larson, & Holt, 1966; Govers, Takken, & Helming, 2000). پارامترها و شاخص‌های متعددی برای اندازه‌گیری زبری سطح خاک وجود دارد. به‌طور کلی زبری سطح خاک دارای چهار پارامتر عمودی، افقی، ترکیبی (افقی-عمودی) و فراکتال است (Smith, 2014). پارامتر عمودی تعیین زبری خاک، اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع نقاط در سطح خاک است. پارامتر افقی تعیین زبری خاک، بعد افقی زبری یا رابطه بین ارتفاع

1- Oriented roughness

2- Random roughness (SD)

مشکلات استفاده از روش‌های: فراصوت، اسکنر لیزری و فوتوگرامتری و همچنین عدم توانایی آن‌ها در اندازه‌گیری بلادرنگ زبری، توصیه نمی‌شوند. از آنجا که حسگرهای نوری دقیق و قابل اعتمادند (Bagheri, 2023) و قابلیت به‌کارگیری در حال حرکت را دارند؛ به‌نظر روش جالبی برای اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک می‌باشند؛ هدف مطالعه حاضر اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک با استفاده از حسگرهای نوری در شرایط مزرعه و مقایسه صحت و دقت این دو روش اندازه‌گیری به‌منظور انتخاب روش مناسب در عملیات خاک‌ورزی دقیق است.

مواد و روش‌ها

سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری متشکل از واحدهای مکانیکی-الکتریکی، داده‌برداری و پردازش است که در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده‌ی بخش مکانیکی-الکتریکی شامل شاسی، الکتروموتور و چرخ‌دنده، درایور کنترل دور الکتروموتور، آدابتور تغذیه‌کننده الکتروموتور و آدابتور تغذیه‌کننده انکودر و برد آردوینو، ریل مسیر حرکت و جعبه محتوی خاک می‌باشد. بخش اندازه‌گیری شامل حسگر لیزری، حسگر مادون قرمز و انکودر است و بخش پردازش شامل برد آردوینو و نرم‌افزار لب‌ویو نصب‌شده روی لپ‌تاب می‌باشد.

آماده‌سازی نمونه خاک

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که روشنایی سطح خاک ارتباط نزدیکی با رطوبت خاک دارد؛ در خاکی با رطوبت بالا، بازتاب امواج از حسگرهای نوری در محدوده‌های مرئی و امواج کوتاه نزدیک مادون قرمز کاهش می‌یابد و سبب بروز خطاهای اندازه‌گیری می‌شود (Weidong et al., 2002). لذا به‌منظور جلوگیری از بروز خطای اندازه‌گیری ناشی از: رطوبت، بافت و ساختمان خاک؛ تعداد ۶ نمونه ۵ کیلوگرمی از خاک تهیه شد. میزان رطوبت خاک با استفاده از روش آون طبق استاندارد (ISO17892-1, 2014) تعیین شد. بدین صورت که نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون بادمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در آون (Mouazen, 2007) Maleki, De Baerdemaeker, & Ramon, 2007) خاک بر پایه خشک با استفاده از رابطه (۱) (ASTM D2216-19, 2019) محاسبه شد. مقدار رطوبت آن در حدود ۱۵ درصد برپایه خشک به‌دست آمد؛ به‌منظور جلوگیری از تغییرات رطوبت خاک در آزمایشگاه، خاک موردنظر در محفظه پلاستیکی در بسته نگهداری شد. پس از آماده‌سازی نمونه خاک، واسنجی حسگرها انجام شد.

$$M_{DB} = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه M_{DB} درصد رطوبت خاک بر پایه خشک، W_w

(Chabrilat, Güntner, & Kaufmann, 2009). اسکنر لیزری به‌دلیل وضوح و عملکرد نمونه‌برداری سریع، انتخاب بسیار جالبی است. با این حال، تا حدودی حجیم است و تنها مناطق کوچکی را در یک زمان پوشش می‌دهد؛ همچنین دستگاه بسیار گران و واسنجی آن پیچیده است (Draeos, Deshpande, & Grant, 2012). لذا توجیه اجرای آن در ماشین‌های کشاورزی دشوار است، این اسکنرها به‌گرد و غبار و ارتعاشات مکانیکی حساس هستند که قابل‌استفاده به‌صورت متحرک در ماشین‌های خاک‌ورزی نیست (Römken et al., 1986). تکنیک‌های فوتوگرامتری برد کوتاه، قابلیت تهیه مدل سه‌بعدی را دارند؛ که امکان استخراج پروفیل‌های متعدد در جهات مختلف با تنها یک اندازه‌گیری را فراهم می‌کند (Aguilar et al., 2009) با وجود این‌که که این روش از حسگرهای کم‌هزینه بهره می‌برد و جمع‌آوری داده‌ها در این روش سریع انجام می‌شود، به‌نظر راه‌حل جالبی است اما دانش تخصصی و همچنین نرم‌افزار ویژه برای تجزیه و تحلیل عکس‌ها وقت‌گیر بوده و موجب زمان‌بر شدن آن می‌گردد (Jester & Klik, 2005). به‌کارگیری این روش مستلزم دقت در موقعیت و جهت عکس‌برداری نسبت به سطح می‌باشد. همچنین خطای اعوجاج ناشی از فاصله کانونی دوربین می‌بایست مینیمم شود. نحوه اخذ تصویر می‌بایست طوری باشد که تصویر سایه‌دار نباشد که این امر مستلزم داشتن نور کافی به‌هنگام عکس‌برداری می‌باشد. تجزیه و تحلیل تصویر و استخراج ویژگی‌های هندسی کلوخه در تکنیک‌های پردازش تصویر دشوار است و برای اجرای قطعه‌بندی مناسب به مداخله انسانی نیاز دارد؛ لذا روش مناسبی برای اندازه‌گیری زبری خاک نیست (Moreno, Álvarez, Alonso, 2008). روش مادون قرمز، امواج الکترومغناطیس را با طول موج بیشتر از ناحیه دید انسان به سمت سطوح مورد نظر ساطع می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان در مدت زمان کوتاهی، اطلاعات زیادی را در مورد تعدادی از پارامترهای خاک بر اساس یک طیف با وضوح بالا، معمولاً در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر به‌دست آورد (Nayerifard, 2015). حسگرهای فاصله‌سنج لیزری در طول یک مسیر افقی حرکت کرده و فاصله تا سطح را اندازه‌گیری می‌کنند. با استفاده از حسگر لیزری می‌توان داده‌هایی با دقت کمتر از یک میلی‌متر را به‌دست آورد (Nayerifard, 2015).

به‌طور کلی روش مورد‌استفاده برای اندازه‌گیری زبری به عوامل مختلفی مانند هزینه، دقت، وضوح، امکان حرکت بر روی سطح و غیره بستگی دارد. استفاده از یک روش نامناسب، موجب تحلیل‌های بیشتر شده و خسارت‌هایی را به‌دلیل عدم تشخیص دقیق زبری در پی خواهد داشت. با توجه به زلوشن محدود و امکان تخریب و دگرگونی زبری سطح به دلیل تماس مستقیم، استفاده از روش تماسی پیشنهاد نمی‌گردد. در بین روش‌های غیرتماسی نیز با توجه به محدودیت‌ها و

وزن آب موجود در خاک و W_s وزن خشک خاک می‌باشد. وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت 0.1 g تعیین شد.



شکل ۱ - طرح‌واره و اجزای سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک: (۱) لپ‌تاب، (۲) حسگر مادون قرمز، (۳) برد آردوینو، (۴) حسگر لیزر، (۵) آداپتور تغذیه الکتروموتور، (۶) کنترلر دور الکتروموتور، (۷) چرخ‌دنده‌های انتقال قدرت، (۸) الکتروموتور، (۹) انکودر و (۱۰) آداپتور تغذیه حسگر مادون قرمز و برد آردوینو

Fig.1. Schematics and components of the soil surface roughness online measurement system: 1) Laptop, 2) IR sensor, 3) Arduino board, 4) Laser sensor, 5) Adapter driver for electromotor, 6) Speed controller for electromotor, 7) Power transmission gears, 8) Electromotor, 9) Encoder, and 10) Adapter feeding the infrared sensor and Arduino board

جدول ۱ - مشخصات حسگرهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک

Table 1- Specifications of sensors utilized for real-time soil surface roughness measurement

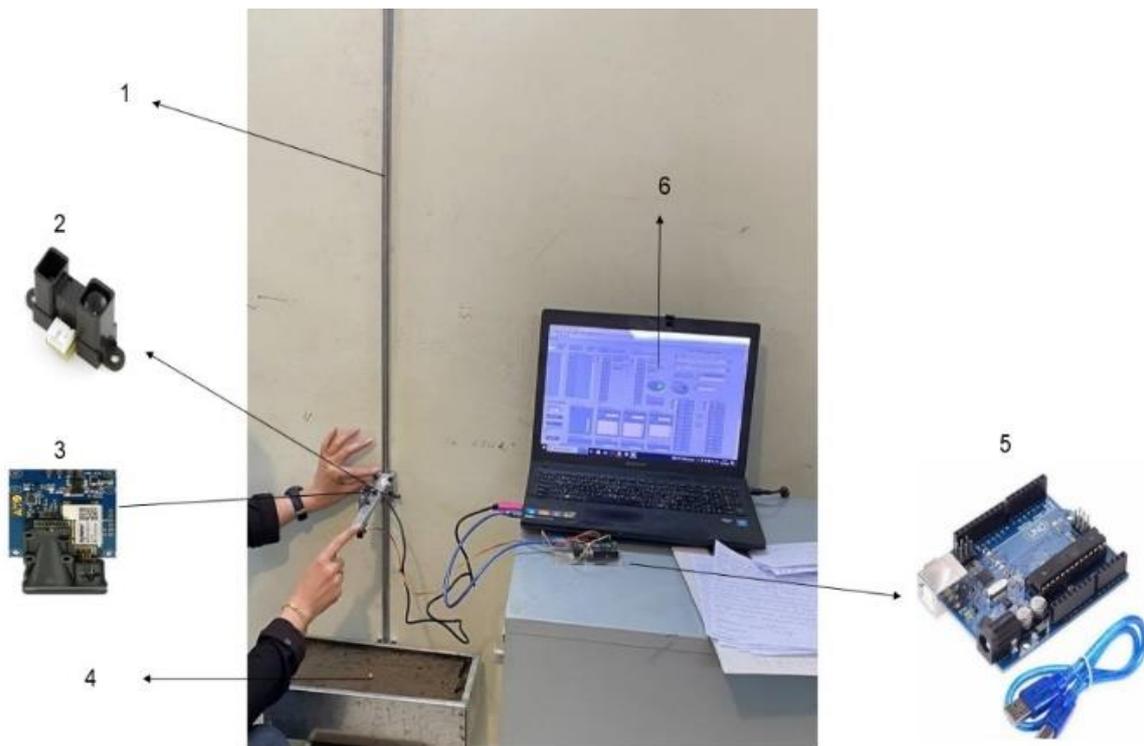
مشخصات Specification	نوع Type	
	مادون قرمز IR (GP2Y0A02YK0F)	لیزر Laser (L1-40)
جریان / ولتاژ عملیاتی Operational voltage (V) / current (mA)	4.5 to 5.5 / 33 to 50	3.7 to 5.2 / 86 to 122
فاصله اندازه‌گیری Measuring distance (cm)	20 to 150	5 to 4000
زمان پاسخ Response time (ms)	39	30
زمان اندازه‌گیری Measuring time (ms)	44	33
روش تشخیص Sensing method	Reflective	Reflective
وزن Weight (g)	5.03	15.8
ارتفاع × عرض × طول Height (mm) × Width (mm) × Length (mm)	21.6 × 18.9 × 44.2	14.3 × 36.61 × 54.33
نوع خروجی Output type	Analogue	Analogue
دمای عملیاتی Operating temperature (°C)	-70	-10 to 50

حسگرهای مورد استفاده و اساس کار آنها

دو نوع حسگر نوری مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل: حسگر مادون قرمز (IR) و حسگر لیزری است. حسگر مادون قرمز شامل فرستنده و گیرنده می‌باشد؛ که اساس کار آن مبتنی بر ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن است. فرستنده یک LED به‌عنوان منبع نور است که انرژی ساطع‌کننده و گیرنده نور را شناسایی و دریافت می‌کند. سیگنال خروجی حسگر معمولاً به‌صورت ولتاژی است که از طریق یک پردازنده سیگنال پردازش می‌شود تا داده‌های مورد نیاز را به‌دست آورد. این خروجی حاوی اطلاعاتی در مورد شدت تابش مادون قرمز می‌باشد. حسگرهای لیزری نیز با استفاده از ارسال اشعه لیزری و دریافت انعکاس و بازتاب آن، نسبت به داده‌برداری سطح خاک اقدام می‌کند. یک پرتو لیزر بازتاب را ساطع و دریافت می‌کند و زمان بین ارسال و دریافت نور لیزر می‌تواند فاصله را تعیین کند. مشخصات حسگرهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

واسنجی حسگرها

در ابتدا به‌منظور یافتن رابطه بین سیگنال خروجی حسگرها و فاصله حسگر از سطح خاک، همچنین واسنجی حسگرهای مورد استفاده به‌منظور اندازه‌گیری ناهمواری و زبری سطح خاک، سامانه‌ی آزمایشگاهی مطابق شکل ۲ طراحی و ساخته شد. شاسی این سامانه از قوطی آهنی با سطح مقطع ۲×۵ cm و طول ۱۶۰ cm، میله‌های هادی به قطر ۱/۲ cm و پایه نگه‌دارنده حسگر مدرج با قابلیت تنظیم و حرکت در هر ۱ mm، تشکیل و ساخته شد. سامانه به گونه‌ای روی دیوار نصب شد که نگهدارنده‌ی حسگر قابلیت حرکت در جهت عمود را داشته باشد و بتواند به‌وسیله پیچ تثبیت در موقعیت‌های مختلف ثابت شود (شکل ۲).



شکل ۲- سامانه واسنجی حسگرها: (۱) ریل هادی، (۲) حسگر مادون قرمز، (۳) حسگر لیزر، (۴) سطح خاک، (۵) برد آردوینو و (۶) لپ‌تاب و نرم‌افزار لب ویو

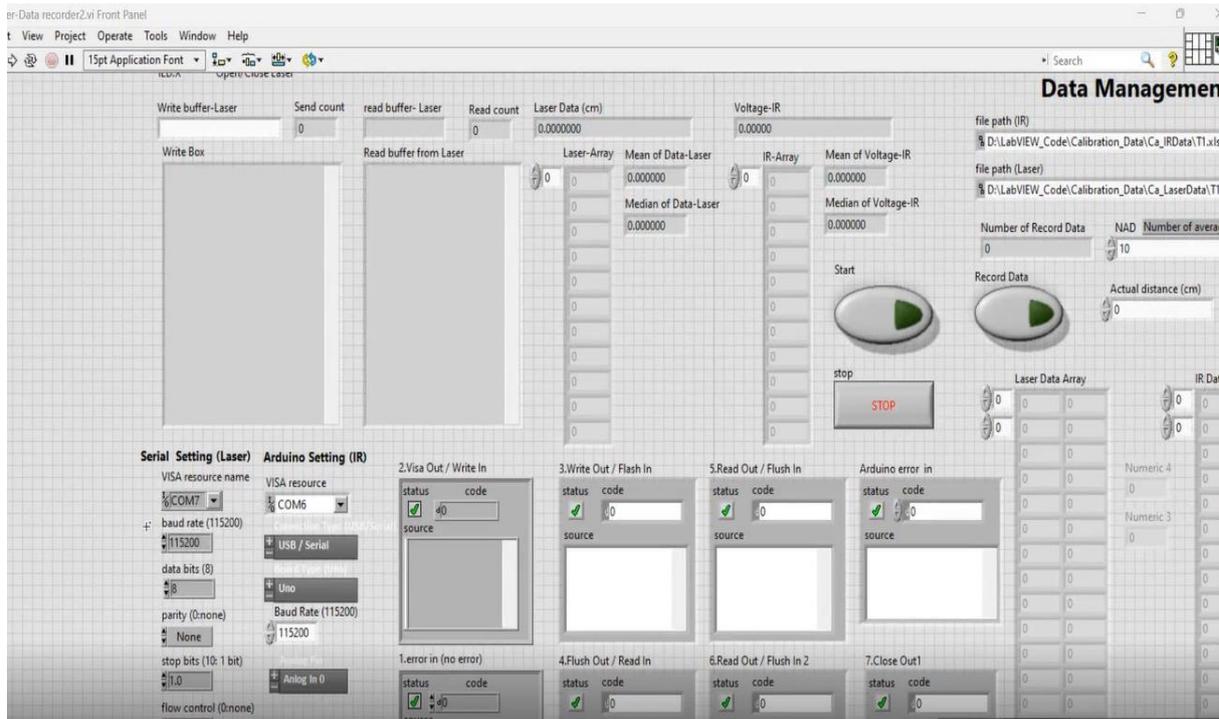
Fig.2. Calibration system for sensors: 1) Guide rail, 2) IR sensor, 3) Laser sensor, 4) Soil surface, 5) Arduino board, and 6) Laptop and LabVIEW software

خاک به‌عنوان متغیر وابسته و خروجی حسگرها به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. خروجی حسگر مادون قرمز به شکل ولتاژ و حسگر

حسگرها را در فاصله ۲۰ تا ۸۰ سانتی‌متری سطح خاک تنظیم کرده و در هر ۱ cm داده‌ها قرائت می‌شود. فاصله حسگر تا سطح

پورت سریال برد آردوینو و حسگر لیزر که در قسمت Device manager سیستم قابل مشاهده است وارد گردید. آیکن start شروع داده‌برداری حسگرها، آیکن‌های Laser Data (cm) و Voltage-IR برای نمایش لحظه‌ای خروجی حسگرها، آیکن‌های ستون IR-Array و Laser-Array مربوط به ثبت خروجی داده‌های حسگر در یک بازه زمانی، آیکن‌های file path (IR) و file path (Laser) تعریف مسیر ذخیره داده‌ها، آیکن stop توقف داده‌برداری و آیکن Record Data ذخیره داده‌ها در محل از پیش تعریف شده است.

لیزر به صورت فاصله طولی بر حسب cm است. بنابراین اندازه‌گیری در ۶۰ مرحله انجام شد. این مراحل ۶ بار تکرار شد که ۴ تکرار آن برای واسنجی و ۲ تکرار برای مراحل اعتبارسنجی بود. برای جمع‌آوری داده‌های حاصل از دو حسگر لیزر و مادون قرمز از نرم‌افزار LabVIEW 2020 استفاده شد. پنل برنامه نوشته شده در نرم‌افزار برای واسنجی حسگر نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. قسمتهایی که در حین عملیات واسنجی تنظیم شد شامل: serial setting (laser) و setting (IR) که در این قسمت‌ها شماره



شکل ۳- پنل برنامه نوشته شده در نرم‌افزار LabVIEW برای واسنجی حسگرها
 Fig.3. LabVIEW software program panel compiled for sensor calibration

قرار گرفت. سرعت حرکت با در نظر گرفتن سرعت‌های مرسوم عملیات خاک‌ورزی در مزرعه انتخاب شد. سپس در حین اجرای برنامه، حرکت با سرعت مشخصی آغاز شد و هر یک از حسگرهای تشخیص زبری، داده‌های حسگر را برای محاسبه ناهمواری سطح خاک به کامپیوتر ارسال کردند. حسگرها مطابق شکل ۵، روی سامانه در حال حرکت نصب شدند. حرکت دستگاه توسط الکتروموتور تامین شد و کنترل سرعت نیز با درایور کنترل سرعت براساس مدولاسیون عرض پالس صورت می‌گرفت. با استفاده از گیربکس با نسبت سرعت ۴:۱، سرعت رو به جلو تا 9 km h^{-1} در دسترس بود. موقعیت و سرعت سامانه در حال حرکت نیز با انکودر شفت در هر لحظه تعیین و داده‌های مربوطه جمع‌آوری شدند.

آزمون مزرعه‌ای سامانه

به منظور ارزیابی عملکرد سامانه در حال حرکت در شرایط واقعی مزرعه، سه سطح زبری برای هر یک از ادوات خاک‌ورز مرسوم (گاواهن برگرداندار، چپزل و دیسک) به ابعاد $40 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ مطابق شکل ۴ در مزرعه تحقیقاتی عباس‌آباد واقع در دانشگاه بوعلی سینا ایجاد شد.

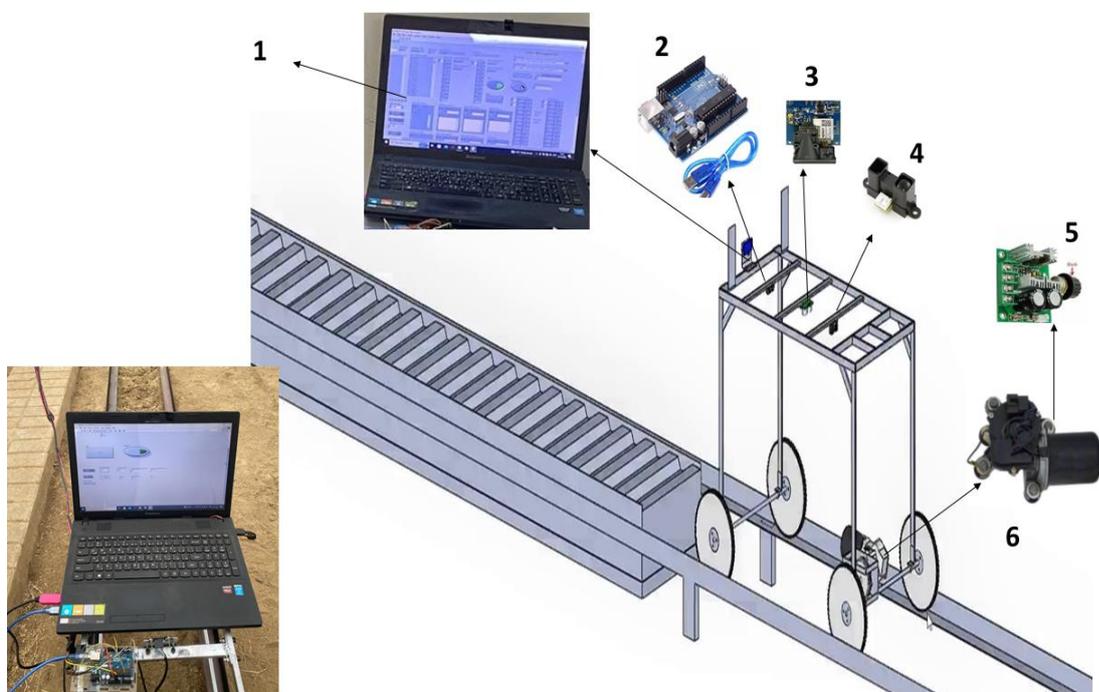
این آزمایش با هدف انتخاب حسگر مناسب به منظور تشخیص ناهمواری سطح خاک از بین حسگرهای مادون قرمز و لیزری در نظر گرفته شد، تیمارهای آزمایش شامل: سه روش اندازه‌گیری، چهار سطح سرعت و سه روش خاک‌ورزی بودند که در یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار مورد بررسی



الف a) Disc, ب b) Chisel, ج c) Moldboard

شکل ۴- ایجاد کلاس‌های زبری در مزرعه: الف) دیسک، ب) چیزل و ج) گاوآهن برگرداندار

Fig.4. Roughness classes created in the field: a) Disc, b) Chisel, and c) Moldboard plow



شکل ۵- طرح‌واره سامانه درحال حرکت برای اندازه‌گیری زبری بلادرنگ خاک: ۱) لپ‌تاب، ۲) برد آردوینو، ۳) حسگر لیزر، ۴) حسگر مادون قرمز، ۵) کنترلر دور الکتروموتور و ۶) الکتروموتور

Fig.5. Schematic of moving system for real-time soil roughness measurement: 1) Laptop, 2) Arduino board, 3) Laser sensor, 4) IR sensor, 5) Speed controller for the electromotor, and 6) Electromotor

زبری و روش اندازه‌گیری بر روی شاخص زبری تصادفی SD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای تعیین صحت و دقت عملکرد حسگرهای مورد استفاده، روش مرجعی به‌عنوان مبنا لازم است. به دلیل قابلیت اطمینان روش پین‌متر، از این روش به‌عنوان روش مرجع جهت ارزیابی استفاده شد (Podmore & Huggins, 1981). بر این اساس از پین‌متر ساخته‌شده توسط (Mohammadi et al., 2022)

دو شاخه نبشی L با بال‌های ۵ cm×۵ cm و ضخامت ۵ mm با فاصله ۴۰ cm از هم به طول ۱۲ m استفاده شد. برای رسیدن به سرعت تعیین‌شده سامانه در ۲ متر اول بدون داده‌برداری حرکت می‌کرد سپس به‌صورت یک متر در میان، ۴ بار به طول یک متر عمل داده‌برداری انجام شد. در این حالت نیز اثر سطوح مختلف سرعت پیشروی، کلاس

اندازه‌گیری ارتفاع ناهمواری سطح خاک در حالت استاتیکی قابل اعتماد است (García Moreno *et al.*, 2010; Jester & Kliik, 2005; Thomsen, Baartman, Barneveld, Starkloff, & Stolte, 2015).

در دانشگاه کردستان، به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری زبری سطح خاک برای ارزیابی حسگرها استفاده شد (شکل ۶). این پین‌متر شامل ۱۰۰ میخ با فاصله ۵ میلی‌متر از هم است که روی یک قاب چوبی نصب شده است. در مطالعات علمی گزارش شده که این روش برای



شکل ۶- پین‌مترگذاری برای قرائت داده‌های ارتفاع سطوح زبری در مزرعه

Fig.6. Pin metering for reading the height data of rough surfaces in the field

هیدرولیکی در تفکیک‌پذیری‌های مکانی-زمانی گنجانده می‌شود. بنابراین یکی از راه‌های بهبود عملکرد مدل فرسایش، بهبود دقت داده‌های ورودی مدل مانند زبری تصادفی، با استفاده از روش‌های جدید اندازه‌گیری حسگر و آزمایش میزان حساسیت مدل به تغییرات داده‌های ورودی است.

تجزیه و تحلیل مقادیر زبری

ابتدا از داده‌های پین‌متر به‌منظور بررسی توانایی شاخص زبری تصادفی برای تفکیک کلاس‌های مختلف زبری (شخم با گاوآهن برگرداندار، دیسک و چپزل) در مزرعه استفاده شد. برای این منظور آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی که تیمارهای آن سه نوع کلاس مختلف زبری بود صورت گرفت. مقدار داده‌های جمع‌آوری شده از نظر آماری تحلیل و مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه اثر سه کلاس زبری، چهار سطح سرعت پیشروی و سه روش اندازه‌گیری بر روی شاخص زبری تصادفی به‌دست‌آمده به‌وسیله حسگر در یک آزمایش فاکتوریل ۳×۳×۳ با طرح کاملاً تصادفی در ۴ تکرار در مزرعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل و بررسی داده‌ها و همچنین بررسی نتایج آزمایش از نرم‌افزارهای: R 4.1.0، Excell 2019 و SPSS-22.0.0.0 استفاده شد.

به‌منظور مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از پین‌متر و حسگرهای فاصله‌یاب، از برخی پارامترهای آمار توصیفی بر اساس روابط زیر استفاده شد: ریشه میانگین مربعات خطا: طبق رابطه (۳)

شاخص‌های زبری سطح خاک

شاخص زبری تصادفی یکی از شاخص‌های رایج برای اندازه‌گیری زبری می‌باشد (Allmaras *et al.*, 1966). زبری تصادفی در واقع انحراف از معیار داده‌های ارتفاع از سطح خاک می‌باشد زبری تصادفی از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i^2 - \bar{Z}^2)}{N - 1}} \quad (2)$$

که در آن N تعداد داده‌های ارتفاع، Z_i ارتفاع مربوط به نقطه i ام و \bar{Z} میانگین تمام داده‌ها است. اگر S محاسبه شده برای یک سطح از S سطح دیگر بزرگتر باشد به معنی این است که زبری آن بیشتر است. عدم قطعیت در این رابطه ± 3 میلی‌متر با فاصله اطمینان ۹۵ درصد است (Bauer *et al.*, 2015). این نشان می‌دهد که شاخص S توانایی جداسازی طبقات زبری ایجاد شده را دارد. به همین ترتیب، برخی دیگر از محققین از شاخص زبری تصادفی به‌عنوان یک شاخص کارآمد برای تشخیص انواع مختلف خاک‌ورزی استفاده کردند (Vermang *et al.*, 2013). نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شاخص زبری تصادفی با تغییرات کاربری زمین و جهت‌گیری خاک‌ورزی و همچنین در طول زمان به‌طور قابل توجهی متفاوت است (Cremers, Van Dijk, De Roo, & Verzandvoort, 1996). این شاخص در چندین معادله برای تخمین ذخیره فرورفتگی سطحی، یعنی کسر سطح پوشیده از آب و مقدار بارندگی اضافی مورد نیاز قبل از شروع رواناب، در مدل‌های هیدرولوژیکی یا فرسایش خاک استفاده می‌شود. در چنین مدل‌هایی، زبری به صراحت با انجام محاسبات

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (At - Ft)^2}{N}} \quad (3)$$

به دست می‌آید که از آن به عنوان معیار مناسبی برای سنجش کیفیت مدل استفاده می‌شود. معیاری که با میانگین گرفتن از تفاضل مقادیر حقیقی و پیش‌بینی شده، میزان خطای مدل‌های آماری را اندازه می‌گیرد.



شکل ۷- سامانه اندازه‌گیری زبری سطح خاک

Fig.7. The soil surface roughness measurement system

سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک با قابلیت کنترل سرعت پیشروی به منظور استفاده در شخم نرخ متغیر که شامل حسگرهای فاصله‌سنج لیزری و مادون قرمز و همچنین سامانه تحصیل داده و مدارهای الکترونیک است مطابق شکل ۷ ساخته شد. برنامه نرم‌افزاری لبویو برای قرائت داده حسگرها و تبدیل آن به داده‌های زبری سطح خاک بر اساس شاخص‌های آماری مختلف تدوین گردید.

واسنجی حسگرها

هدف از انجام آزمایش‌ها در بخش واسنجی، پیدا کردن رابطه‌ای بین سیگنال خروجی حسگرها و فاصله حسگر از سطح خاک بود. این رابطه را می‌توان با ایجاد تناسب بین داده‌های این دو متغیر انجام داد. فاصله حسگر تا سطح خاک به عنوان متغیر وابسته و خروجی حسگرها به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود. خروجی حسگر مادون قرمز به صورت ولتاژ و حسگر لیزری به صورت فاصله است، نمودارهای برازش فاصله حسگر تا سطح خاک و خروجی حسگرها در این مرحله در شکل ۸ نشان داده شده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در چهار تکرار است.

نتایج بررسی فاصله حسگرها از سطح خاک و خروجی حسگرها نشان داد که ارتباط قوی بین سیگنال‌های خروجی حسگرها و فاصله آن‌ها از سطح خاک وجود دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر ضریب تبیین منحنی واسنجی برای حسگر مادون قرمز ۰/۹۹ و برای حسگر لیزر ۱ بود که نمایانگر وجود ارتباط قوی بین آن‌ها است. معادله رگرسیون به دست آمده برای واسنجی داده‌های خروجی حسگر

که در آن At ، Ft و N به ترتیب مقدار واقعی، مقدار پیش‌بینی شده و تعداد نقاط برازش است. میانگین درصد مطلق خطا، معیاری برای دقت پیش‌بینی است که طبق رابطه (۴) بیان می‌کند.

$$MAPE = 100 \frac{\sum_{i=1}^N |At - Ft|}{At} \quad (4)$$

بررسی صحت و دقت داده‌های حسگرها در شرایط مزرعه

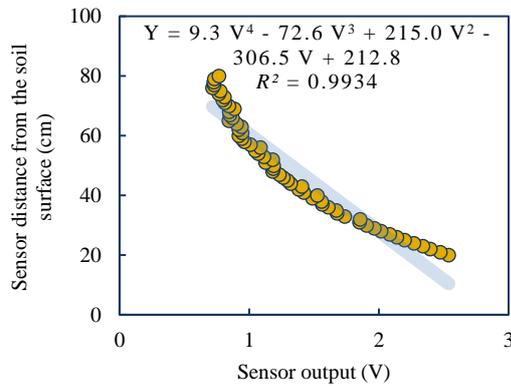
به منظور بررسی صحت داده‌های حسگر ابتدا سطوح ایجاد شده با استفاده از پین متر قرائت شد و اختلاف میانگین داده‌های زبری حسگر در تکرارهای مختلف با پین متر مورد بررسی قرار گرفت. در صورتی که این اختلاف میانگین‌ها معنی‌دار نباشد، بیانگر صحت داده‌های حسگر است. در صورتی که معنی‌دار باشد، بدین معنی است که داده‌های به دست آمده با میزان واقعی آن اختلاف دارد و عملکرد سامانه تحت تاثیر پارامتر مورد بررسی تغییر یافته است و صحیح نیست. به منظور بررسی میزان دقت حسگر نیز داده‌های زبری به دست آمده از حسگر در تکرارهای مختلف را در مقابل داده‌های زبری به دست آمده با پین متر در همان سطح قرار داده و منحنی برازش آن رسم می‌شود. ضریب تبیین برای رابطه ریاضی به دست آمده، بیانگر میزان دقت داده‌های حسگر است.

نتایج و بحث

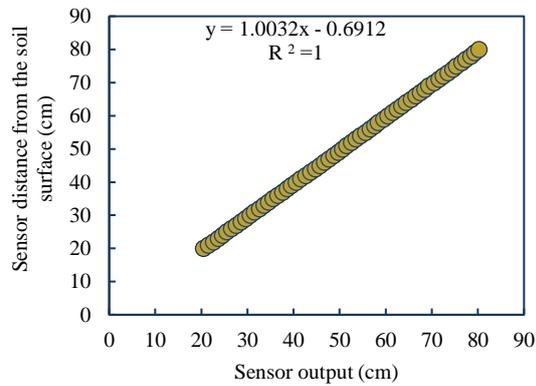
سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک

درجه یک نیز برای تبیین فاصله حسگر از سطح خاک استفاده کرد که نسبت به رگرسیون چندجمله‌ای درجه چهار، قدرت توضیح‌دهندگی مدل را کمتر نشان می‌دهد. در تحقیقی مشابه، ضریب تبیین منحنی واسنجی برای دو حسگر فراصوت و مادون قرمز ۰/۹۹ به‌دست آمد (Mohammadi, Maleki, & Khodaei, 2023).

مادون قرمز برخلاف حسگر لیزر خطی نیست و به‌صورت یک تابع چندجمله‌ای درجه ۴ می‌باشد که بر حسب ولتاژ (V) مدل می‌شود. اگرچه رگرسیون چندجمله‌ای یک مدل غیرخطی را برای داده‌ها برازش می‌کند، اما رگرسیون چندجمله‌ای یک مورد خاص از رگرسیون خطی چندگانه در نظر گرفته می‌شود. در واقع می‌توان از رابطه خطی



الف



ب

شکل ۸- نمودار واسنجی برای الف) حسگر مادون قرمز و ب) حسگر لیزر
Fig.8. Calibration diagram for a) Infrared sensor, and b) Laser sensor

۰/۱ و ۲/۱٪ بود (Mohammadi et al., 2023).

ارزیابی مزرعه‌ای حسگرها

به‌منظور تشخیص اختلاف بین سطوح زبری ایجادشده در شرایط واقعی مزرعه، داده‌های ارتفاع هر یک از سطوح با استفاده از پین‌متر به‌دست آمد و سپس تاثیر آن بر روی شاخص زبری تصادفی در یک آزمایش کاملاً تصادفی مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس کلاس‌های زبری بر روی شاخص زبری تصادفی را نشان می‌دهد.

همچنین به‌منظور اعتبارسنجی حسگرها، مقادیر خروجی حسگرها، با استفاده از معادلات واسنجی، به فاصله حسگر از سطح خاک تبدیل شد ضرایب تبیین برازش برای حسگر مادون قرمز و لیزری به‌ترتیب ۰/۹۸ و ۱، ریشه میانگین مربعات خطا به‌ترتیب ۲/۳۶ cm و ۰/۲ cm و میانگین درصد خطای مطلق به‌ترتیب ۲/۷٪ و ۰/۳۶٪ بود. نتایج این بخش، حاصل میانگین داده‌ها در دو تکرار است. همانطور که مشاهده می‌شود برای حسگرهای تشخیص فاصله از سطح خاک، حسگر لیزری شرایط بهتری نسبت به حسگر مادون قرمز دارد. ضریب تبیین منحنی برازش برای حسگر مادون قرمز و فراصوت ۰/۹۹ بود؛ همچنین ریشه میانگین مربعات خطا آن‌ها به‌ترتیب ۰/۸ cm و ۰/۶ cm و میانگین درصد خطای مطلق به‌ترتیب

جدول ۲- تجزیه واریانس کلاس‌های زبری بر روی شاخص زبری تصادفی

Table 2- Variance analysis of roughness classes on random roughness index

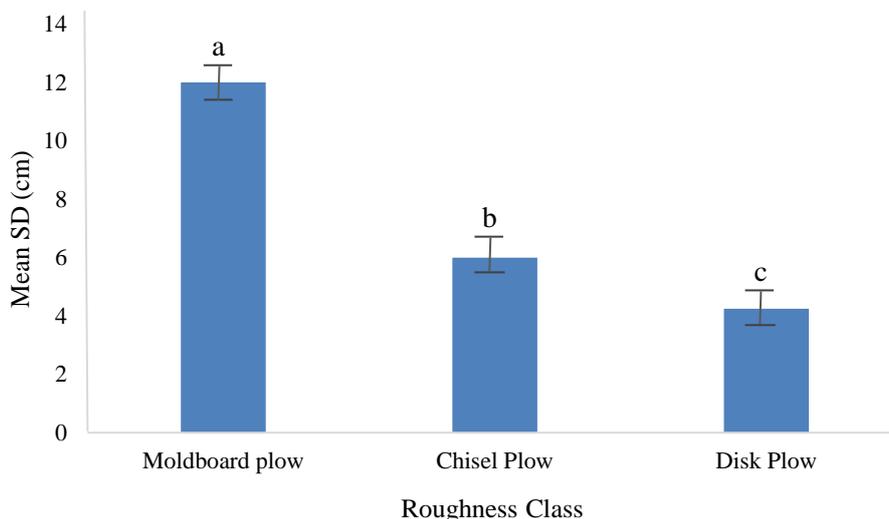
منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)
کلاس زبری Roughness class	2	66.083**
خطا Error	9	0.046
کل Total	11	

** وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪

** significant at 1% level

قابلیت تفکیک کلاس‌های زبری ایجاد شده را دارد؛ که مطابق نتایج تحقیقات انجام گرفته در این زمینه بود (Gilliot *et al.*, 2017). در شکل ۹ نتایج مقایسه میانگین شاخص زبری تصادفی در کلاس‌های زبری با آزمون دانکن در سطح احتمال ۱ درصد نشان داده شده است.

همانطور که نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، اثر نوع خاک‌ورزی روی شاخص زبری تصادفی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. به عبارتی میان زبری‌های به دست آمده برای کلاس‌های زبری در سطح احتمال ۱٪ اختلاف وجود دارد و این نشان می‌دهد شاخص زبری تصادفی



شکل ۹- مقایسه میانگین شاخص زبری تصادفی در کلاس‌های مختلف زبری در آزمایش‌های مزرعه
Fig.9. Mean comparison of random roughness index in different roughness classes in field experiments

زبری تخمین زده شده به وسیله حسگرها با زبری محاسبه شده به وسیله بین‌متر مقایسه شد.

با توجه به جدول ۲ اثر روش اندازه‌گیری در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود یعنی عدد زبری هر یک از روش‌ها در تشخیص زبری با هم متفاوت بود و از آن جایی که روش بین‌متر معیار اندازه‌گیری است؛ روشی که کمترین اختلاف را با روش مرجع داشته باشد بررسی شد تا به عنوان بهترین روش انتخاب گردد. اثر سرعت پیشروی نیز در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود یعنی سطوح سرعت پیشروی در مزرعه بر روی عملکرد دستگاه اثر معنی‌داری داشت. اثر کلاس زبری در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود یعنی کلاس‌های زبری ایجاد شده با هم اختلاف معنی‌دار داشتند؛ که مطابق با نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص اثرگذاری روش اندازه‌گیری (Aguilar *et al.*, 2009)، سرعت انجام عملیات و کلاس زبری (Al-Suhaibani & Ghaly, 2010; Martinez-Agirre *et al.*, 2016) بر روی شاخص زبری است. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه بر روی شاخص زبری تصادفی معنی‌دار است. با توجه به معنی‌داری اثر متقابل سه‌گانه (کلاس زبری × سرعت × روش)، ترکیب تیماری کلاس زبری، سرعت و روش اندازه‌گیری که کمترین

با توجه به نتایج حاصل شده، شاخص تعیین زبری تصادفی به طور کامل سه کلاس مختلف زبری را از هم تفکیک کرد. محققین دیگری از آن به عنوان یک شاخص کارآمد برای تشخیص انواع مختلف خاک‌ورزی استفاده کردند (Bauer *et al.*, 2015; Vermang *et al.*, 2013). نتایج مقایسه میانگین سطوح زبری نشان داد که بیشترین زبری مربوط به گاوآهن برگرداندار با زبری ۱۲ cm پس از آن چپزل با ۶ cm و دیسک با ۴/۲۵ cm قرار داشت و اختلاف بین همه کلاس‌های زبری با هم معنی‌دار بود. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان داد برای زمین شخم‌خورده شاخص زبری تصادفی از ۰/۴-۹/۳ cm، ۰/۱-۷/۴ cm (Amoah, Amatya, & Nnaji, 2013; Carvajal, Aguilar, Agüera, Aguilar, & Giráldez, 2006; García Moreno *et al.*, 2010).

در جدول ۳ نتایج ارزیابی مزرعه‌ای سامانه در حال حرکت تشخیص زبری سطح خاک با دو حسگر (مادون قرمز و لیزر) و بین‌متر برای تشخیص سه کلاس زبری در چهار سرعت پیشروی مختلف (۱ km h⁻¹، ۲/۶ و ۳/۵ و ۴/۸) نشان داده شده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در چهار تکرار است.

کلاس زبری) که هر یک ۹ سطح بود به‌طور جداگانه در هر یک از سطوح سرعت، در سطح اطمینان ۱ درصد معنی‌دار بود. ضریب تبیین R² برای همگی بیشتر از ۰/۹ بود که نشان‌دهنده برازش خوب مدل آماری بود.

اختلاف را با بین‌متر داشته باشد بهترین ترکیب است. جدول ۴ تجزیه واریانس اثر متقابل (روش × کلاس زبری) به‌طور جداگانه در هر سطح سرعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد اثر متقابل (روش ×

جدول ۳- تجزیه واریانس پارامترهای موثر بر روی شاخص زبری تصادفی
Table 3- Variance analysis for effective parameters on random roughness index

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)
روش Method	2	105.29**
سرعت Velocity	3	4.9*
کلاس زبری Roughness class	2	466.4**
روش × کلاس زبری Method × Roughness class	4	15**
سرعت × روش Method × Velocity	6	14.2**
سرعت × کلاس زبری Velocity × Roughness class	6	4.3**
کلاس زبری × سرعت × روش Method × Velocity × Roughness class	12	2.3**
خطا Error	108	0.6
کل Total	143	

* و **: به ترتیب وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد، ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار
 * and ** Significant at 1% and 5% level, respectively, and ns Nonsignificant

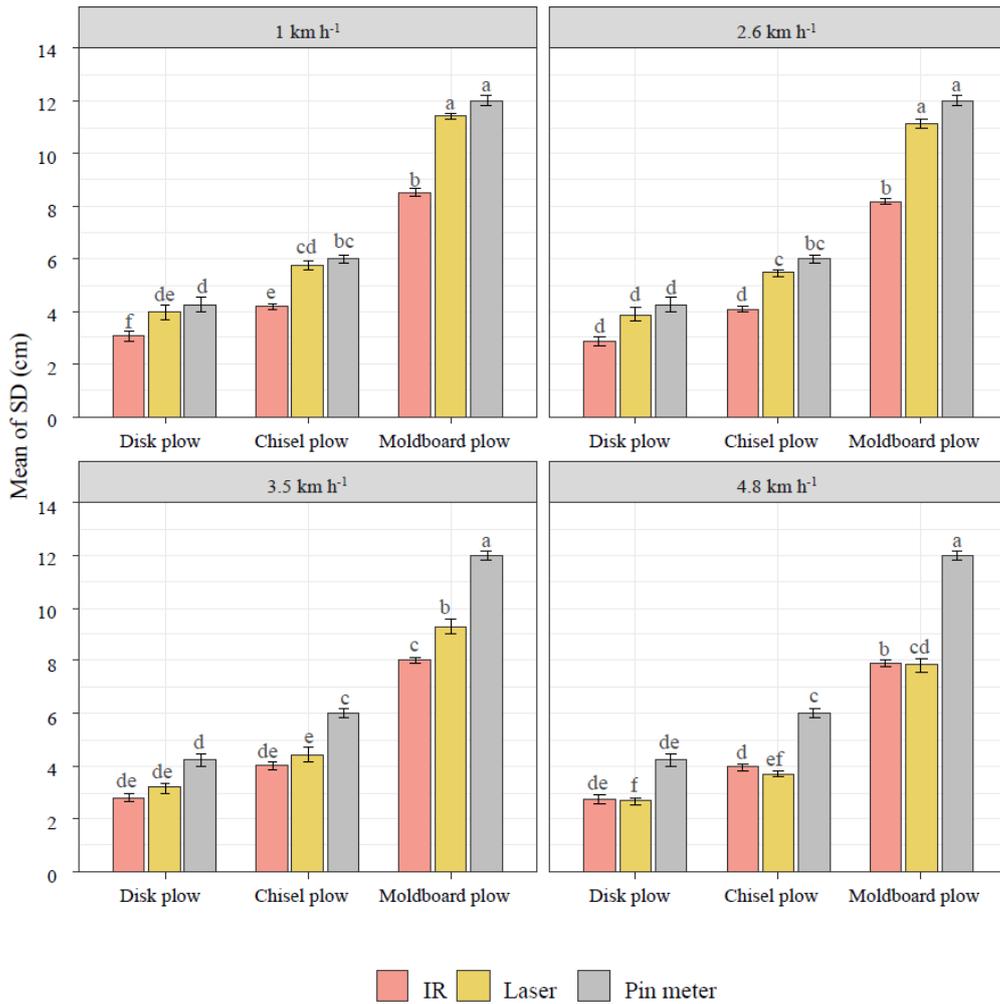
جدول ۴- تجزیه واریانس اثر متقابل (روش × کلاس زبری) به‌طور جداگانه در هر سرعت
Table 4- Variance analysis of the interaction effect (method × level) separately at each speed

سرعت Velocity (km h ⁻¹)	کلاس زبری × روش Method × Roughness class			ضریب تبیین R ²
	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS	P value	
1	8	53.67	p<.0001	0.95
2.6	8	41.47	<.0001	0.94
3.5	8	38.17	<.0001	0.93
4.8	8	34.54	<.0001	0.91

p<.01 وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪
 p<.01 significant at 1% level

مجزا برای هر سطح سرعت با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

بررسی صحت عملکرد حسگرها در شرایط مزرعه
 به‌منظور ارزیابی صحت عملکرد حسگرها در شرایط مزرعه، روش‌های مختلف اندازه‌گیری در کلاس‌های مختلف زبری به‌طور



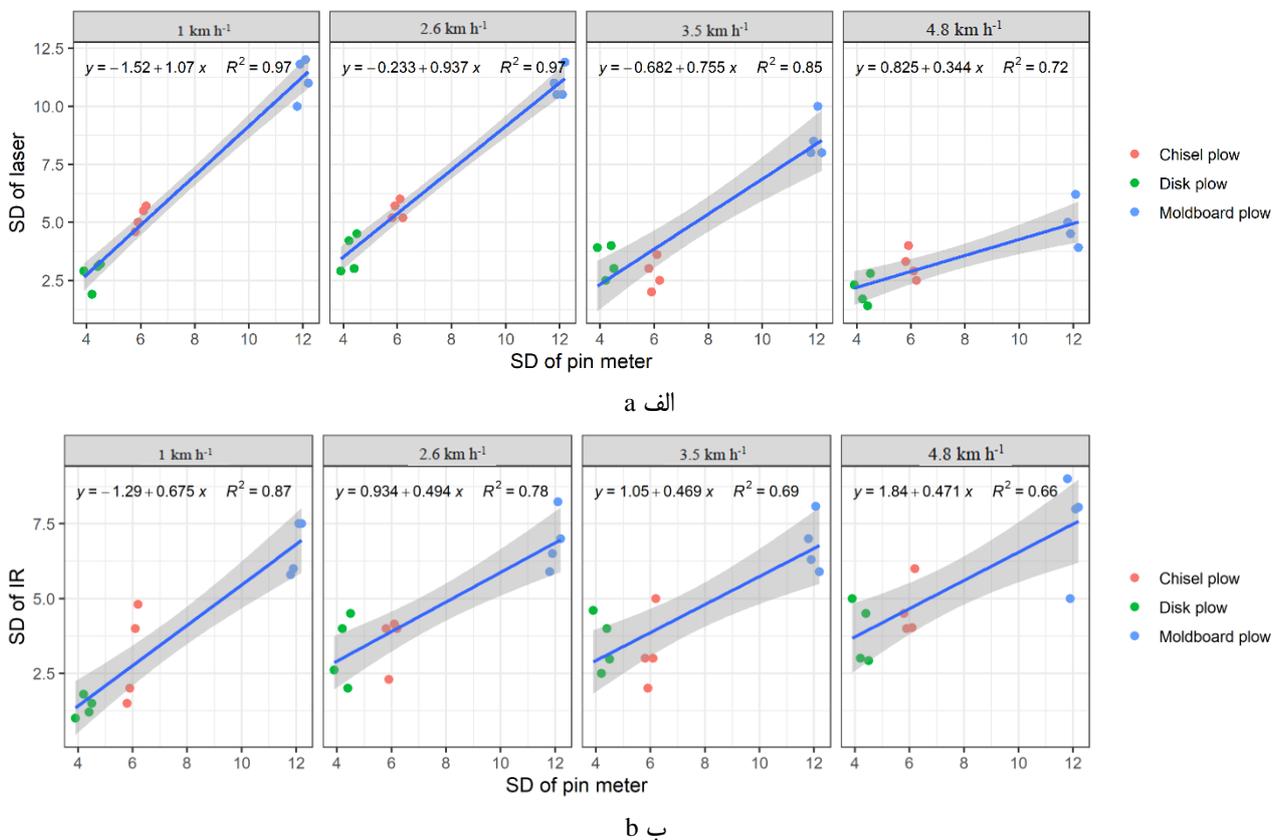
شکل ۱۰-۱ مقایسه میانگین اثر روش اندازه‌گیری در کلاس‌های زبری به‌طور مجزا در هر یک از سطوح سرعت
Fig.10. Mean comparison of the measurement method effect in the roughness classes separately for each of the speed levels

آن با پین‌متر معنی‌دار بود. برای مواردی که به دقت بالا نیاز نباشد از جمله کنترل ارتفاع ادوات نسبت به سطح خاک، از این حسگر می‌توان به‌عنوان یک روش قابل اطمینان برای اندازه‌گیری فاصله استفاده نمود. در تحقیقی که توسط *Lee et al. (1996)* انجام شد؛ دو حسگر فراصوت و نوری را برای تشخیص فاصله از سطح زمین تحت شرایط مختلف عملیاتی با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حسگر نوری می‌تواند فاصله را دقیق‌تر از حسگر فراصوت تشخیص دهد؛ زیرا حسگر نوری دارای یک زاویه دیافراگم واضح‌تر و قطر کوچک‌تر نقطه روی یک هدف در مقایسه با حسگر فراصوت است. در سرعت $3/5 \text{ km h}^{-1}$ نتایج روش‌های لیزری و پین‌متر در کلاس زبری ایجادشده با دیسک اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما در سایر کلاس‌های زبری اختلاف معنی‌داری بین روش پین‌متر با لیزر وجود داشت. که بدین معنی است در سطوح زبری نرم، لیزر توانست کلاس

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است در سرعت‌های km h^{-1} ۱ و $2/6$ روش لیزر اختلاف معنی‌داری با روش پین‌متر نداشت اما روش مادون قرمز در غالب کلاس‌های زبری با روش پین‌متر اختلاف معنی‌داری داشت. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش با نتایج *(Lee et al., 1996)* که به این نتیجه رسیدند که حسگر نوری به دلیل زاویه دیافراگم تیزتر و قطر نقطه کوچک‌تر فاصله را با دقت تشخیص می‌دهد، مطابقت داشت. یکی از دلایل ضعیف بودن حسگر مادون قرمز، احتمالاً کوچک بودن قطر دیوهای فرستنده و گیرنده می‌باشد، که باعث می‌شود در حین داده‌برداری در زمان حرکت به‌خوبی نتواند تمام سیگنال‌های فرستاده‌شده را دریافت کند. همچنین حسگر مادون قرمز در اندازه‌گیری فواصل کم به ولتاژ تغذیه حساسیت نشان داد و این می‌تواند نویزهایی را در زمان اندازه‌گیری حسگر ایجاد کند. حسگر مادون قرمز نیز توانست سطوح زبری را از هم تفکیک کند اما اختلاف

تشکیل سایه در پشت کلوخه‌ها و پراکندگی بیشتر نور در سطوح ناهموار می‌شد که موجب می‌شود انعکاس نور به‌درستی دریافت نگردد و باعث خطای اندازه‌گیری گردد. لذا بازتاب نور دریافتی از سطوح ناهموار کمتر از سطوح همگن و نرم است (Matthias *et al.*, 2000) زبری بیشتر سطح خاک، علاوه بر افزایش خود سایه، احتمال انعکاس نور منعکس‌شده توسط سنگدانه‌ها را نیز افزایش می‌دهد، همچنین سنگدانه‌های بزرگ‌تر و نامنظم دارای سوراخ‌ها و شکاف‌های بیشتری هستند که تشعشعات فرودی را به دام می‌اندازند و منجر به بازتاب کمتری می‌شود. مشاهده حسگر تحت تاثیر سطح روشنایی خاک به جهت تابش انرژی خورشید و آسمان و غیره بستگی دارد (Cierniewski *et al.*, 2015).

زبری را همانند روش پین‌متر تشخیص دهد اما در تشخیص سطوح ناهموار موفق عمل نکرد. در سرعت $4/8 \text{ km h}^{-1}$ ، در کلیه کلاس‌های زبری، بین روش پین‌متر با لیزر اختلاف معنی‌داری وجود داشت. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت از $2/6 \text{ km h}^{-1}$ به $3/5$ ، روش لیزری سطوح نرم را شناسایی کرد، اما در تشخیص سطوح ناصاف موفق نبود. این به دلیل کاهش نرخ جمع‌آوری داده بود (برای لیزر حداکثر ۲۰ هرتز یعنی ۲۰ داده در ثانیه است) که در سرعت $3/6 \text{ km h}^{-1}$ در طول یک متر فقط ۲۰ داده اخذ می‌شد که در مقایسه با ۲۰۰ داده کسب‌شده با پین‌متر بسیار اندک است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بازتاب و انعکاس نور تحت تاثیر خواص فیزیکی خاک قرار می‌گیرد. وجود توده‌های نسبتاً بزرگ در سطوح ناهموار باعث



شکل ۱۱- برازش بین زبری اندازه‌گیری‌شده توسط پین‌متر: الف) لیزر و ب) حسگر مادون در سرعت‌های مختلف رو به جلو

$$\text{الف} = 1 \text{ km h}^{-1}, \text{ ب} = 2/6 \text{ km h}^{-1}, \text{ ج} = 3/5 \text{ km h}^{-1}, \text{ د} = 4/8 \text{ km h}^{-1}$$

Fig.11. Fit between roughness measured by pin meter: a) Laser, and b) IR sensor at different forward speeds: a = 1 km h⁻¹, b = 2.6 km h⁻¹, c = 3.5 km h⁻¹, and d = 4.8 km h⁻¹

بود. نتایج تحقیقات (Mohammadi *et al.*, 2023) نشان داد حسگر مادون قرمز در تشخیص کلاس زبری ایجادشده توسط ورق موج‌دار موفق بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حسگر لیزر در تشخیص ناهمواری خاک بهتر از مادون قرمز بوده و سرعت بهینه

حسگر مادون قرمز به‌غیر از سرعت 1 km h^{-1} در سایر سرعت‌ها همانند روش پین‌متر موفق به تشخیص کلاس زبری ایجادشده با دیسک شد، اما در تشخیص سایر کلاس‌های زبری، تفاوت معنی‌داری با پین‌متر داشت، لذا حسگر مادون قرمز در تشخیص سطوح نرم موفق

تغییر زبری سطح، روش تماسی برای سطوح با زبری کم توصیه نمی‌شود. در بین روش‌های غیرتماسی، روش موجود با دقت و وضوح بالا که کمترین هزینه و زمان را برای جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج داشته باشد، مناسب‌ترین روش خواهد بود. از این‌رو حسگرهای فاصله‌یاب لیزری و مادون قرمز که با قیمت مناسب و کار آسان در دسترس باشند، قادر به نصب بر روی یک سیستم متحرک و ارائه نتایج زبری به‌صورت آنلاین در کمترین زمان ممکن هستند، استفاده شد. نتایج حسگرهای نوری با بین‌متر به‌عنوان روش مرجع در هر دو حالت ساکن و متحرک مقایسه شد و مشخص گردید که حسگرهای نوری در حالت ساکن، فاصله را همانند روش مرجع (بین‌متر) تشخیص می‌دهند. در حین حرکت، حسگر لیزری قادر بود کلاس‌های زبری را تا سرعت $2/6 \text{ km h}^{-1}$ همانند روش بین‌متر تشخیص دهد، در سرعت‌های بیشتر از $3/5 \text{ km h}^{-1}$ ، نیز در تشخیص سطوح نرم موفق عمل کرد اما سطوح ناهموار را به‌درستی تفکیک نکرد. به‌طور کلی حسگر لیزری قادر بود تمامی کلاس‌های زبری را با سرعت $2/6 \text{ km h}^{-1}$ تشخیص دهد. یکی از دلایلی که حسگر لیزر نتوانست در سرعت‌های بالاتر از $2/6 \text{ km h}^{-1}$ موفق عمل کند به‌خاطر نرخ کم داده‌برداری آن بود. استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ بالاتر داده‌برداری می‌تواند مشخصات ارتفاع خاک را مانند بین‌متر ترسیم کنند. حسگر مادون قرمز، فقط در تشخیص سطوح نرم موفق بود اما در تشخیص سطوح دیگر موفق عمل نکرد. استفاده از نتایج تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک می‌تواند جایگزین روش‌های خسته‌کننده و وقت‌گیر مرسوم شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از حمایت دانشگاه بوعلی سینا در قالب رساله دکتری با پیشنهادنامه شماره (۹۰۶۵۸۵۵۸) قدردانی می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

نسیم صالحی بابامیری: روش‌شناسی، جمع‌آوری داده، پردازش داده، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، شبیه‌سازی کامپیوتری، اعتبار‌نجی، استخراج و تهیه متن اولیه
حسین حاجی آقا علیزاده: نظارت و مدیریت و ویرایش متن، اعتبار‌سنجی، مفهوم‌سازی
مجید دولتی: مشاور فنی، ویرایش متن، اعتبار‌سنجی

حرکت با سیستم اندازه‌گیری زبری $2/6 \text{ km h}^{-1}$ است که در آن کلیه کلاس‌های زبری با حسگر لیزر قابل تشخیص است. در سرعت‌های بالاتر، اگر هدف اندازه‌گیری سطوح صاف خاک باشد، مشکلی وجود ندارد، اما در سطوح ناهموار داده‌های به‌دست‌آمده توسط حسگر لیزر صحیح نیستند.

بررسی دقت عملکرد حسگرها در شرایط مزرعه

به‌منظور یافتن دقت نتایج به‌دست‌آمده توسط حسگرهای فاصله‌یاب در شرایط مزرعه، منحنی برازش بین آن‌ها با روش بین‌متر به‌عنوان روش مرجع در سطوح مختلف سرعت رسم و نتیجه در شکل ۱۱ نشان داده شد.

نتایج برازش حسگرها نشان داد؛ حسگر لیزری دقت بهتری نسبت به حسگر مادون قرمز دارد. در تمام سرعت‌ها یک رابطه خطی با همبستگی مثبت بین زبری اندازه‌گیری‌شده توسط حسگر لیزر-بین‌متر و حسگر مادون قرمز-بین‌متر مشاهده شد. دقت روش اندازه‌گیری لیزری در مزرعه، برای سرعت‌های رو به جلو 1 km h^{-1} ، $2/6$ ، معادل $0/97$ بود. برای سرعت رو به جلو $3/5 \text{ km h}^{-1}$ معادل $0/85$ و برای سرعت $4/8 \text{ km h}^{-1}$ معادل $0/72$ بود، دقت کار حسگر مادون قرمز در شرایط مزرعه برای سرعت‌های رو به جلو 1 km h^{-1} ، $2/6$ ، $3/5$ و $4/8$ به‌ترتیب $0/87$ ، $0/78$ ، $0/69$ و $0/69$ می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که حسگر لیزری با روش بین‌متر تطابق خوبی داشت و سرعت حرکت دستگاه بر روی دقت کار حسگر تاثیرگذار است به‌طوری‌که با افزایش سرعت حرکت، دقت کار حسگر کاهش می‌یابد. در صورت استفاده از حسگرهایی با نرخ بیشتر داده‌برداری، سرعت سامانه حرکت تاثیر روی شاخص زبری تصادفی ندارد ولی اگر از حسگرهای با نرخ داده‌برداری کم استفاده شود در سرعت‌های بالاتر، قادر به تشخیص صحیح کلاس‌های زبری نخواهد بود.

نتیجه‌گیری

زبری سطح خاک به‌عنوان یک پارامتر مهم برای تعیین کمیت و کیفیت عملیات خاک‌ورزی شناخته می‌شود که داشتن اطلاعات کافی در مورد آن یکی از الزامات خاک‌ورزی دقیق است. چندین روش برای اندازه‌گیری آن پیشنهاد شده است. استفاده از یک تکنیک نامناسب به دلیل عدم تشخیص دقیق ناهمواری، قطعاً عواقبی در تحلیل‌های بیشتر و آسیب‌ها را در پی خواهد داشت. زبری سطح خاک را می‌توان با روش‌های تماسی و غیرتماسی اندازه‌گیری کرد. به‌طور کلی روشی که برای اندازه‌گیری زبری استفاده می‌شود به عوامل مختلفی از جمله هزینه، دقت، قدرت تفکیک، امکان جابه‌جایی روی سطح و غیره بستگی دارد. با توجه به محدودیت تفکیک‌پذیری و امکان تخریب و

References

1. Aguilar, M. A., Aguilar, F. J., & Negreiros, J. (2009). Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief. *Biosystems Engineering*, 103(4), 504-517. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.010>
2. Al-Suhaibani, S. A., & Ghaly, A. E. (2010). Effect of plowing depth of tillage and forward speed on the performance of a medium size chisel plow operating in a sandy soil. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(3), 247-255. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.247.255>
3. Allmaras, R. R., Burwell, R. E., Larson, W. E., & Holt, R. F. (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation Research Report*, 7, 1-14.
4. Amoah, J., Amatya, D. M., & Nnaji, S. (2013). Quantifying watershed surface depression storage: Determination and application in a hydrologic model. *Hydrological Processes*, 27(17), 2401-2413. <https://doi.org/10.1002/hyp.9364>
5. Anthonis, J., Mouazen, A. M., Saeys, W., & Ramon, H. (2004). An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, Part 3: Design of depth control system. *Biosystems Engineering*, 89(1), 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.06.013>
6. ASTM D2216-19. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International, West Conshohocken.
7. Bagheri, M. A. (2023). *3D surface profile extraction using image processing*, The ninth international Conference on Knowledge and Technology of Mechanical, Electrical Engineering and Computer of Iran, Tehran. (in Persian with English abstract).
8. Bauer, T., Strauss, P., Grims, M., Kamptner, E., Mansberger, R., & Spiegel, H. (2015). Long-term agricultural management effects on surface roughness and consolidation of soils. *Soil and Tillage Research*, 151, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.017>
9. Carvajal, F., Aguilar, M. A., Agüera, F., Aguilar, F. J., & Giráldez, J. V. (2006). Maximum depression storage and surface drainage network in uneven agricultural landforms. *Biosystems Engineering*, 95(2), 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.06.003>
10. Cierniewski, J., Karnieli, A., Kazmierowski, C., Krolewicz, S., Piekarczyk, J., Lewinska, K., Goldberg, A., Wesolowski, R., & Orzechowski, M. (2015). Effects of soil surface irregularities on the diurnal variation of soil broadband blue-sky albedo. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2), 493-502. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2330691>
11. Cremers, N. H. D. T., Van Dijk, P. M., De Roo, A. P. J., & Verzaandvoort, M. A. (1996). Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modeling. *Hydrological Process*, 10, 1035-1047. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199608\)10:10<1035::AID-HYD1035>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199608)10:10<1035::AID-HYD1035>3.0.CO;2-3)
12. Dalla Rosa, J., Cooper, M., Darboux, F., & Medeiros, J. C. (2012). Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariogram-based index. *Soil and Tillage Research*, 124, 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.001>
13. Draelos, M., Deshpande, N., & Grant, E. (2012). *The Kinect up close: Adaptations for short-range imaging*. IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp. 251-256. <https://doi.org/10.1109/mfi.2012.6343067>
14. Fallahi, E., Aghkhani, M. H., & Bayati, M. R. (2015). Design construction and evaluation of the automatics position control system of tillage tools. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 46(2), 117-123. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2015.55669>
15. García Moreno, R., Díaz Alvarez, M. C., Tarquis Alonso, A. M., Paz González, A., & Saa' Requejo, A. (2010). Shadow analysis of soil surface roughness compared to the chain set method and direct measurement of microrelief. *Biogeosciences*, 7, 2477-2487. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2477-2010>
16. Gilliot, J. M., Vaudour, E., & Michelin, J. (2017). Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 63-78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.010>
17. Gohari, M., Hemmat, A., & Afzal, A. (2010). Design Construction and evaluation of a variable-depth tillage implement equipped with a GPS. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 41(1), 1-9. (in Persian with English abstract). [20.1001.1.20084803.1389.41.1.1.0](https://doi.org/10.1001.1.20084803.1389.41.1.1.0)
18. Govers, G., Takken, I., & Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2), 131-146. <https://doi.org/10.1051/agro:2000114>
19. Guzha, A. C. (2004). Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage. *Soil and Tillage Research*, 76, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.09.002>
20. Jensen, T., Karstoft, H., Green, O., & Munkholm, L. J. (2017). Assessing the effect of the seedbed cultivator leveling tines on soil surface properties using laser range scanners. *Soil and Tillage Research*, 167, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.006>
21. Jester, W., & Klik, A. (2005). Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface

- representation. *Catena*, 64(2-3), 174-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.005>
22. Haubrock, S., Kuhnert, M., Chabrilat, S., Güntner, A., & Kaufmann, H. (2009). Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning, *Catena*, 79(2), 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.06.005>
 23. ISO 17892-1. (2014). *Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content*. International Organization for Standardization, 10 pp.
 24. Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Scharf, P. C., Palm, H. L., Roberts, D. F., & Vories, E. D. (2010). Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. *Agronomy Journal*, 102, 71-84. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0114>
 25. Koval, L., Vaňuš, J., & Bilík, P. (2016). Distance measuring by ultrasonic sensor. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.026>
 26. Kuipers, H. (1957). A reliefmeter for soil cultivation studies. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 5, 255-262. <https://doi.org/10.18174/njas.v5i4.17727>
 27. Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H., & Shimizu, H. (1996). Non-contact sensors for distance measurement from ground surface. *Journal of Terramechanics*, 33(3), 155-165. [https://doi.org/10.1016/s0022-4898\(96\)00016-x](https://doi.org/10.1016/s0022-4898(96)00016-x)
 28. Lin, B. B., & Richards, P. L. (2007). Soil Random Roughness and Depression Storage on Coffee Farms of Varying Shade Levels. *Agricultural Water Management*, 92(3), 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.014>
 29. Maleki, M. R., Mouazen, A. M., De Ketelaere, B., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2008). On-the-go variable rate phosphorus fertilization based on a VIS-NIR. *Biosystems Engineering*, 99(1), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.007>
 30. Marinello, P. F., Gasparini, A., Arvidsson, F., & Sartori, J. L. (2015). Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization. *Precision Agriculture*, 16(6), 601-612. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9398-5>
 31. Martinez-Agirre, A., Alvarez-Mozos, J., & Gimenez, R. (2016). Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter. *Soil and Tillage Research*, 161, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.013>
 32. Marzahn, P., Seidel, M., & Ludwig, R. (2012). Decomposing dual scale soil surface roughness for microwave remote sensing applications. *Remote Sensor Journal*, 4, 2016-2032. <https://doi.org/10.3390/rs4072016>
 33. Matthias, A. D., Fimbres, A., Sano, E. E., Post, D. F., Accioly, L., Batchily, A. K., & Ferreira, L. G. (2000). Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1035-1041. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431035x>
 34. Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2022). Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 215, 105216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105216>
 35. Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2023). Laboratory evaluation of infrared and ultrasonic range-finder sensors for on-the-go measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 229, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105678>
 36. Moreno, R. G., Álvarez, M. C. D., Alonso, A. T., Barrington, S., & Requejo, A. S. (2008). Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions. *Soil and Tillage Research*, 98(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.006>
 37. Mouazen, A. M., Maleki, M. R., De Baerdemaeker, J., & Ramon H. (2007). On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.009>
 38. Nayerifard, T. (2015). *Extraction of three-dimensional soil surface profile using laser based on digital image processing*, Faculty of Agriculture. Bu Ali Sina University. (in Persian with English abstract).
 39. Podmore, T. H., & Huggins, L. F. (1981). An automated profile meter for surface roughness measurements. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24(3), 663-665. <https://doi.org/10.13031/2013.34317>
 40. Römkens, M. J. M., Singarayar, S., & Gantzer, C. J. (1986). An automated non-contact surface profile meter. *Soil and Tillage Research*, 6, 193-202. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90454-x](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90454-x)
 41. Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6), 527-529. <https://doi.org/10.1080/00224561.1993.12456826>
 42. Sharda, A., Franzen, A., David, E., Clay, J., & Luck, D. (2019). *Precision Variable Equipment*. Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. P. 155-168. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0094>
 43. Smith, M.W. (2014). Roughness in the earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 136, 202-225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.016>

44. Thomsen, L. M., Baartman, J. E. M., Barneveld, R. J., Starkloff, T., & Stolte, J. (2015). Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. *Soil*, 1(1), 399-410. <https://doi.org/10.5194/soil-1-399-2015>
45. Vermang, J., Norton, L. D., Baetens, J. M., Huang, C., Cornelis, W. M., & Gabriels, D. (2013). Quantification of soil surface roughness evolution under simulated rainfall. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 56(2), 505-514. <https://doi.org/10.13031/2013.42670>
46. Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., & Bing, Z. (2002). Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 238-246. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00347-9](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00347-9)
47. Zribi, M., Ciarletti, V., & Taconet, O. (2000). Validation of a rough surface model based on fractional brownian geometry with SIRC and ERASME radar data over orgeval. *Remote Sensing of Environment*, 73, 65-72. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(00\)00082-1](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00082-1)

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 567-585

Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province

B. Dosti¹, A. Asakereh^{1*}

1- Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: A.Asakereh@scu.ac.ir)

Received: 04 December 2024

Revised: 26 January 2025

Accepted: 19 February 2025

Available Online: 07 June 2025

How to cite this article:Dosti, B., & Asakereh, A. (2025). Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 567-585. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319>

Introduction

Proper lighting and safety equipment on roads are essential for the optimal use of roadside services and the timely, safe transportation of goods. Supplying electricity for road lighting, especially in remote and hard-to-reach areas via the power grid, involves high costs for building power transmission infrastructure. Using renewable energy enables electricity generation directly at the point of use and on a local scale. This approach reduces transmission and distribution costs and significantly lowers the environmental impact associated with fossil fuel-based electricity generation. Kermanshah province plays a key role in road transportation, yet most of its roads lack lighting systems. The province has significant wind energy potential, but wind power has not been utilized to supply electricity for road lighting. This suggests that installing small-scale wind turbines along the roads could be a promising solution. This study aims to assess the wind energy potential for powering road lighting and to prioritize the counties of Kermanshah province for installing small-scale wind turbines to supply electricity to road lighting systems.

Materials and Methods

The main steps of the study include data collection, preparation of the wind atlas, identification of locations with high wind potential, determination of effective factors and indicators for siting wind turbines, weighting of these factors and indicators, scoring counties based on them, and finally ranking the counties for installing wind turbines to supply electricity for the road lighting system using multi-criteria decision-making models. Using the wind atlas, we evaluated wind energy potential within a 3 km buffer zone around roads and identified 46 points with high wind potential. Based on these points, the counties of Kermanshah province were assessed and ranked for installing small-scale turbines to power the road lighting system. The indicators considered to determine suitable turbine locations included wind energy potential, distance from roads, traffic volume, distance from high-voltage power lines, distance from protected areas, distance from rivers and flood-prone zones, distance from faults, distance from residential areas, and land slope. Counties were scored on these indicators based on previous studies and expert opinions. A decision-making matrix was created using these scores, and indicator weights were calculated using Shannon entropy combined with expert evaluation. The SAW, TOPSIS, ELECTRE, and VIKOR methods were then applied to rank and prioritize the counties.

Results and Discussion

The energy potential of wind, with a weight of 0.360, was the most important indicator for selecting locations



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319>

for wind turbine installation and road lighting systems. Traffic and distance from the road were the next most significant factors, with weights of 0.228 and 0.151, respectively. Kermanshah County had the highest wind energy potential, featuring seven high-potential sites, while Sarpole Zahab and Qasr Shirin counties each had only one suitable site, indicating lower wind potential. The top three counties in terms of wind energy potential were Kermanshah, Ravansar, and Paveh. Kermanshah County also had the highest traffic volume, carrying the greatest weight in that category. For distance from the road, Sanghar and Sahneh ranked first and second, with unscaled weights of 0.094 and 0.070, respectively, and Kermanshah ranked third with 0.047. Kermanshah County scored highest on all indicators except distance from faults and protected areas. Across all decision-making methods, Kermanshah and Sanghar consistently ranked first and second. Overall, Kermanshah, Sanghar, and Ravansar were prioritized as the top three counties for installing wind turbines to supply electricity for road lighting systems.

Conclusion

According to the wind atlas, 46 points with suitable wind potential for the road lighting system were determined. Based on multi-criteria decision-making methods, Kermanshah, Sanghar, and Ravansar counties were prioritized for installing road lighting systems powered by wind turbines.

Acknowledgement

The authors would like to thank Shahid Chamran University of Ahvaz and its Vice Chancellor for Research and Technology for their financial support in the form of funding (SCU.AA1400.29747).

Keywords: GIS, Multi-criteria decision making, Road lighting system, Traffic, Wind energy atlas, Wind turbine

امکان‌سنجی و مکان‌یابی نصب سامانه روشنایی جاده‌ای با استفاده از انرژی باد در استان کرمانشاه

بهروز دوستی^۱، عباس عساکره^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

چکیده

بهره‌برداری مؤثر از مراکز خدمات‌رسانی بین‌راهی و حمل به‌موقع و ایمن کالاها، نیازمند وجود راه‌هایی با سیستم روشنایی و تجهیزات ایمنی مناسب است. استفاده از انرژی باد با نصب توربین‌های بادی در حاشیه جاده‌ها، یک راهکار امیدوارکننده در راستای افزایش ایمنی و تسهیل حمل و نقل جاده‌ای مبتنی بر انرژی پایدار، پاک و تجدیدپذیر با حداقل اثرات زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود. هدف این مطالعه، ارزیابی پتانسیل انرژی باد برای تولید برق سیستم روشنایی جاده‌ها و اولویت‌بندی شهرستان‌های استان کرمانشاه برای نصب سامانه روشنایی مبتنی بر انرژی باد است. با استفاده از اطلس باد، مناطق با پتانسیل باد بالا در محدوده ۳ کیلومتری جاده‌ها شناسایی شدند که در نتیجه، ۴۶ نقطه در استان کرمانشاه شناسایی گردید و تحلیل‌های مکان‌یابی بر اساس این نقاط انجام شد. سپس شهرستان‌های استان کرمانشاه بر اساس معیارهای مختلف شامل پتانسیل انرژی باد، فاصله از جاده‌ها، حجم ترافیک، فاصله از خطوط برق فشار قوی، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، نوع کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل، فاصله از گسل‌ها، فاصله از مناطق مسکونی و شیب زمین، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت نصب سیستم روشنایی جاده‌ای مبتنی بر انرژی باد اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان دادند که پتانسیل انرژی باد، حجم ترافیک و فاصله از جاده‌ها بیشترین اهمیت را در تعیین مکان نصب سامانه روشنایی دارند. شهرستان‌های کرمانشاه، سنقر و روانسر به‌ترتیب در اولویت نصب سامانه روشنایی با توربین بادی قرار گرفتند، در حالی که شهرستان‌های قصر شیرین و سرپل ذهاب در رتبه‌های پایین‌تری قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: اطلس انرژی باد، ترافیک، تصمیم‌گیری چندمعیاره، توربین باد، سامانه روشنایی جاده‌ای، سیستم اطلاعات جغرافیایی

مقدمه

ضروری است. منبع اصلی تأمین انرژی سیستم‌های روشنایی جاده‌ای، برق شبکه سراسری است که نه‌تنها هزینه بالای آن را به همراه دارد بلکه عمدتاً از منابع سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود که موجب انتشار حجم عظیمی از گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها می‌گردد و اثرات مخرب زیست‌محیطی به همراه دارد (Soleymani, Keyhani, & Omid, 2018). تأمین برق برای سیستم روشنایی در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور از طریق شبکه برق سراسری، مستلزم صرف هزینه‌های بالا و ایجاد تأسیسات سنگین برای تولید و انتقال برق است (Hatefi Ardekani & Rezaei Moghaddam, 2016).

برخلاف سیستم‌های تولید انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی که معمولاً متمرکز هستند، انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان به‌صورت غیرمتمرکز در محل مصرف استفاده کرد. این قابلیت به کاهش هزینه‌های انتقال و توزیع، کاهش حجم سرمایه‌گذاری و تسهیل ورود بخش خصوصی کمک کرده و همچنین امنیت و پایداری تأمین انرژی را افزایش می‌دهد و تبعات مالی و اجتماعی ناشی از تولید برق را کاهش می‌دهد (Hasnaki, 2018). یکی از ویژگی‌های مهم منابع

ایمنی در حمل و نقل، نقشی اساسی در دستیابی به توسعه اجتماعی، اقتصادی و سیاسی هر کشور ایفا می‌کند. جمعیت یک جامعه به‌عنوان مهم‌ترین سرمایه و عامل پیشرفت آن کشور تلقی می‌شود و حفظ امنیت و ایمنی افراد، مسئولیتی است که هرگونه تعلل در ارتقای آن می‌تواند مانع تعالی و پیشرفت جامعه گردد. یکی از فاکتورهای اصلی حوادث، شبکه‌های جاده‌ای کشور و نیز عدم توجه به تأمین و نصب تجهیزات ایمنی و ایجاد سامانه‌های روشنایی جاده‌ای است. جاده‌ها و راه‌های کشور به‌عنوان زیرساخت‌های اساسی، نقش مهمی در حمل و نقل و رونق اقتصادی دارند. برای بهره‌برداری مؤثر از مراکز خدمات‌رسانی بین‌راهی و حمل به‌موقع و ایمن کالاها، به‌ویژه مواد فاسدشدنی، وجود راه‌ها با سامانه‌های روشنایی و تجهیزات ایمنی

۱- گروه مهندسی بیوسستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
* - نویسنده مسئول: (Email: A.asakereh@scu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319>

در نظر گرفته شدند که از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی جهت وزن‌دهی آن‌ها استفاده گردید. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای پتانسیل‌سنجی ایجاد نیروگاه بادی استفاده گردید (Rezaei, Karami, & Shakeri, 2021). جلوخانی و حاجیلو (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016) سرعت باد، فاصله از راه‌های ارتباطی، مناطق شهری، روستایی، مناطق حفاظت‌شده، کاربری اراضی، گسل‌ها و رودخانه‌ها را به‌عنوان معیارهای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی انتخاب کردند. رفعتی و همکاران (Rafati, Daliri, & Karimi, 2019) به ارزیابی اقتصادی انرژی باد و کارایی توربین‌های بادی در استان کرمانشاه با ملاحظات اقلیمی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که احداث نیروگاه در محدوده ایستگاه گیلان غرب در تمامی انواع مختلف توربین صرفه اقتصادی بیشتری در مقایسه با مناطق دیگر استان دارد. در مطالعه دیگری پتانسیل انرژی باد و انتخاب مکان بهینه، جهت احداث نیروگاه بادی در استان کرمانشاه بر اساس داده‌های بلندمدت سه‌ساعته ایستگاه‌های همدید استان کرمانشاه مورد ارزیابی قرار گرفت. چگالی توان باد در ایستگاه‌های کرمانشاه، کنگاور، سرپل ذهاب، روانسر و اسلام‌آباد غرب به‌ترتیب ۶۶/۸، ۱۴۶/۱، ۲۷۰/۹، ۲۴۵/۴ و ۱۰۰/۸ وات بر مترمربع محاسبه شد. در نهایت ایستگاه همدید روانسر به‌عنوان مکانی مناسب جهت بهره‌برداری از انرژی باد پیشنهاد شد (Bafkar, Azari, & Ahmadi, 2012). نتایج مطالعه‌ای در منطقه دهلران نشان داد که پتانسیل بالای انرژی باد منطقه با اوج مصرف برق کشور در طول روز، ماه‌های گرم سال و فصل تابستان تقارن زمانی دارد و با احداث مزارع بادی در این مناطق می‌توان به افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سید انرژی کشور و پایداری و ثبات برق منطقه در ایام گرم سال کمک نمود (Omidi, Alimardani, & Khanali, 2019). بررسی پتانسیل انرژی باد در شهر پارس‌آباد واقع در شمال غربی ایران، نشان داد که این شهر از نظر پتانسیل تولید انرژی باد در موقعیت ضعیف تا متوسط قرار دارد. بنابراین، این منطقه می‌تواند برای پروژه‌های اتصالات غیرشبه‌ای مناسب باشد، که به معنای امکان استفاده از انرژی باد در مقیاس‌های کوچک است. در نهایت، این تحقیق بر اهمیت برنامه‌ریزی دقیق برای شناسایی و گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تأکید می‌کند (Keyhani Nasab, Mesri, Gundoshmian, & Zargar Ershadi, 2018). در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در کشور تایلند از ترکیب مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS با در نظر دادن معیارهای ارتفاع، پتانسیل باد، ناهمواری‌های سطح زمین، فاصله از روستا، نقاط زیستی، فرودگاه، مناظر طبیعی، بزرگراه‌ها و رودخانه‌ها استفاده گردید (Bennui, Rattanamane, Puetpaiboon, Phukpattaranont, & Chetpattananondh, 2007). در مطالعه‌ای پتانسیل انرژی باد در هشت نقطه از شمال قبرس مورد مطالعه قرار گرفت. داده‌های سرعت

انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت بالای آن‌ها در فراهم کردن انرژی مقرون به‌صرفه برای جوامع دورافتاده و توسعه‌نیافته است (Ghobadian, Najafi, Rahimi, & Yusaf, 2009). بنابراین، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین برق سامانه‌های روشنایی در طول و حاشیه جاده‌ها می‌تواند به‌عنوان یک هدف مهم و بلندمدت در راستای افزایش ایمنی و تسهیل حمل و نقل جاده‌ای مطرح شود. در این میان، تولید برق از انرژی باد معمولاً نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر هزینه کمتری داشته و دارای تکنولوژی ساده‌تری است (Esfahani, Ifaei, Kim, & Yoo, 2016). سرمایه‌گذاری در انرژی باد نه تنها فرصتی برای تولیدکنندگان انرژی، بلکه برای مصرف‌کنندگان و ارائه‌دهندگان تسهیلات تولید انرژی نیز به‌شمار می‌آید. توربین‌های بادی با ظرفیت حدود یک کیلووات یا کمتر برای مناطق مسکونی و همچنین توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ برای تولید برق در دسترس هستند (Asakereh, Omid, Alimardani, & Sarmadian, 2015). مطالعات متعددی در زمینه استفاده از انرژی باد برای تأمین روشنایی خیابان‌ها و جاده‌ها انجام شده است؛ برخی از این مطالعات به‌صورت مستقل و برخی به‌صورت سامانه‌های هیبریدی همراه با انرژی خورشیدی بوده‌اند (Ali & Ammari, 2022; Ibrahim & Asari, 2019; Khare, Nema, & Baredar, 2016; Wadi, Shobole, Tur, & Baysal, 2018). بررسی مصرف انرژی توسط چراغ‌های روشنایی جاده‌ای که با توربین‌های بادی کوچک تأمین می‌شوند، در منطقه بیتلیس-رہوا صورت گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی کوچک در مقیاس کوچک بر روی تیرک‌های روشنایی امکان‌پذیر است و میزان انرژی تولیدی بیشتر از مصرف چراغ‌های روشنایی خواهد بود (Oral, 2023). مطالعات نشان می‌دهد که نصب توربین‌های بادی علاوه بر نیاز به ارزیابی پتانسیل انرژی باد، مستلزم توجه به عوامل و معیارهای مختلفی همچون مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. بنابراین، انتخاب مکان مناسب برای نصب توربین از اهمیت زیادی برخوردار است. مرشدی و همکاران (Morshedi, Borna, Asgharipour, Ahmadi, & Zaheri, 2011) در مطالعه‌ای با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و GIS، بر اساس معیارهای اقلیمی، جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی به مکان‌یابی سایت‌های احداث توربین‌های بادی پرداخته‌اند. همچنین، در تحلیل تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS استفاده شده که نتایج حاکی از مناسب بودن برخی نواحی در منطقه می‌باشد (Jafari, Azizi, Nasiri, & Abedi, 2013). فاصله از کانون زلزله، گسل‌ها، مناطق حفاظت‌شده، رودخانه‌ها، راه‌های ارتباطی، شهرها، روستاها، ارتفاع، شیب، سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما به‌عنوان معیارهای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در استان سمنان

دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. استان کرمانشاه دارای ۱۴ شهرستان است که شامل اسلام‌آباد غرب، پاوه، جوانرود، سرپل ذهاب، سنقر، صحنه، قصر شیرین، کرمانشاه، کنگاور، گیلان غرب و هرسین می‌باشند. شهر کرمانشاه مرکز شهرستان و استان کرمانشاه است. این استان در مسیر جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای قرار داشته که در اثر برخورد با رشته‌کوه زاگرس، ریزش نزولات آسمانی را به‌وجود می‌آورد.

مراحل کلی پژوهش

فرآیند کلی پژوهش کنونی شامل جمع‌آوری اطلاعات، تهیه اطلس باد، تعیین مکان‌ها با پتانسیل بالای باد، تعیین شاخص‌های تعیین‌کننده و امتیازدهی به شاخص‌ها، امتیازدهی به شهرستان‌ها بر اساس شاخص‌ها و در نهایت رتبه‌بندی شهرستان‌ها جهت نصب سامانه روشنایی جاده‌ها با استفاده از انرژی باد می‌باشد. جهت رتبه‌بندی شهرستان‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده گردید. داده‌های سه‌ساعته ۱۰ ساله سرعت باد از ایستگاه‌های هواشناسی موجود سطح استان جمع‌آوری گردید. بررسی موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و راه‌ها نشان داد که داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی قابلیت تسری یافتن به تمامی نقاط استان کرمانشاه به‌خصوص راه‌های مواصلاتی با فاصله زیادی از ایستگاه‌های هواشناسی را ندارد. لذا از داده‌های اطلس جهانی باد استفاده گردید و نقشه رستری باد استان کرمانشاه با دقت ۱۰ در ۱۰ متر استخراج گردید. جهت صحت‌سنجی از داده‌های ایستگاهی استفاده گردید. داده‌های مختلفی مانند سرعت متوسط باد، چگالی انرژی باد، نمودارهای سرعت ساعتی، روزانه و ماهیانه سرعت باد، گلباد باد از این اطلس قابل‌استخراج می‌باشد. نقشه‌های ویکتوری و رستری کاربری اراضی، راه‌ها و جاده‌های استان کرمانشاه، شهرها، روستاها، مناطق حفاظت‌شده، گسل، خطوط برق فشار قوی، راه‌آهن و نقشه رقومی ارتفاع^۱ از سازمان نقشه‌برداری کشور و اداره منابع طبیعی استان کرمانشاه تهیه گردید. ترافیک جاده‌های استان کرمانشاه از اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای استان کرمانشاه تهیه گردید.

انتخاب شاخص‌های مکان‌یابی

در مطالعات، شاخص‌ها و معیارهای متعددی برای انتخاب مکان مناسب جهت نصب توربین بادی مانند عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، اقلیمی، زمین‌شناسی، اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شده است (Al-Yahyai, Charabi, Gastli, & Al-Badi, 2012; Noorollahi, Yousefi, & Mohammadi, 2016;

باد از اداره هواشناسی جمع‌آوری و ویژگی‌های سرعت و پتانسیل انرژی باد تحلیل شد. نتایج نشان‌دهنده منابع ضعیف انرژی باد است. با این حال، استفاده از توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق در این مناطق مناسب است و توربین ۵ کیلوواتی می‌تواند نیازهای انرژی سالانه یک خانه متوسط را تأمین کند (Alayat, Kassem & Çamur, 2018).

کرمانشاه، به‌عنوان یکی از استان‌های غرب کشور، به دلیل مرز مشترک با کشور عراق و همچنین هم‌مرز بودن با چهار استان دیگر، از نظر تردد و حمل و نقل جاده‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، بخش قابل‌توجهی از راه‌های این استان فاقد سیستم روشنایی است. بر اساس داده‌های اداره راهداری و حمل و نقل جاده‌ای استان کرمانشاه، طول کلی راه‌های این استان در سال ۱۴۰۱ حدود ۸۰۵۱ کیلومتر بوده و تنها ۱۳۶ کیلومتر آن با بهره‌گیری از ۶۰۴۰ شعله دارای سامانه روشنایی است، که عموماً از شبکه برق سراسری تأمین می‌شود. این وضعیت نشان می‌دهد که تجهیز راه‌ها و جاده‌های این استان به سامانه روشنایی با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، مانند توربین‌های بادی منفصل یا متصل به شبکه‌ی برق سراسری، می‌تواند به‌عنوان یک ایده و راهکار جدی در راستای افزایش ایمنی و سلامتی سرنشینان ناوگان حمل و نقل مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات نشان داده است که برخی از مناطق استان کرمانشاه از نظر انرژی باد، پتانسیل مناسبی دارند (Rafati et al., 2019).

با توجه به عدم استفاده از سامانه‌های روشنایی و گستردگی جاده‌های استان کرمانشاه، تجهیز این راه‌ها به سامانه‌های روشنایی با توربین بادی می‌تواند یک راهکار امیدوارکننده باشد تا برق سیستم روشنایی به‌صورت محلی و از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین گردد و هزینه انتقال شبکه به مناطق دورافتاده کاهش یابد. مطالعات گذشته عمدتاً بر تحلیل داده‌های هواشناسی جهت احداث نیروگاه‌های بادی با توربین‌های بزرگ تمرکز داشته و کمتر به تأمین برق سیستم روشنایی جاده‌ها از انرژی باد پرداخته‌اند. لذا در این مطالعه، به‌منظور تأمین برق سیستم روشنایی جاده‌ها استان کرمانشاه با استفاده از انرژی باد، موقعیت‌های مناسب جهت احداث توربین بادی و سیستم روشنایی جاده‌ای مبتنی بر انرژی باد تعیین گردید. همچنین شهرستان‌های استان کرمانشاه از نظر احداث سیستم روشنایی مبتنی بر انرژی باد اولویت‌بندی شدند.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه با حدود ۲ میلیون نفر جمعیت، ۴۳۴۲۴ کیلومتر مربع وسعت در میانه ضلع غربی کشور، بین ۳۳ درجه و ۳۶

مناطق از نظر این معیار توسط کارشناسان اداره راه و ترابری انجام گرفت که در راستای ایمن‌سازی، جاده‌ها با ترافیک و تردد وسایل نقلیه بیشتر امتیاز بالاتری دریافت کردند (جدول ۱).

جدول ۱- امتیازدهی از نظر معیار ترافیک

Table 1- Scoring based on traffic criteria			
	تردد کم	تردد متوسط	تردد زیاد
	Low traffic	Medium traffic	High traffic
امتیاز	3	6	9
Score			

فاصله نصب نیروگاه بادی از راه‌های ارتباطی از دو دیدگاه مورد توجه است. از دیدگاه حفظ ایمنی و کاهش سوانح رانندگی و ایجاد تاسیسات در حریم قانونی راه، یکی از عوامل افزایش سوانح رانندگی محسوب می‌شود. از نگاه دیگر، افزایش فاصله نیروگاه بادی از راه‌ها می‌تواند هزینه انتقال شبکه برق و نگهداری تاسیسات برقی را افزایش دهد و عوامل زیست‌محیطی و کاربری اراضی کشاورزی را به خطر اندازد (Gorsevski et al., 2013; Xu et al., 2020). براساس قوانین، حریم قانونی راه‌ها از ۱۲/۵ متر برای راه‌های روستایی تا ۶۰ متر برای آزادراه‌ها تعیین شده است که این محدوده‌ها غیرقابل استفاده برای نصب توربین می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، فاصله بیش از ۳ کیلومتر به جهت افزایش هزینه انتقال شبکه برق اقتصادی نمی‌باشد. در این مطالعه امتیازدهی نقاط انتخاب‌شده از نظر فاصله از جاده‌ها بر اساس جدول ۲ انجام گرفت. محدوده حریم جاده غیرقابل استفاده برای توربین بادی در نظر گرفته شد و فاصله تا ۱۰۰ متر از دو طرف جاده بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داد. با افزایش فاصله از جاده از امتیاز و اولویت مناطق جهت نصب توربین کاسته می‌شود.

ایجاد صدا و نویز و امکان اختلال در شبکه مخابراتی و رادیویی از معایب توربین بادی می‌باشد. همچنین توربین‌های بادی از منظر ایمنی و دیداری ممکن است مشکلاتی را برای مناطق مسکونی ایجاد کنند (Al-Yahyai et al., 2012; Arnette & Zobel, 2011). بنابراین یک حداقل فاصله اطمینان از مناطق مسکونی جهت نصب توربین بادی در نظر گرفته می‌شود که در این مطالعه بر اساس عباسی و همکاران (Abbasi, Monazzam Esmailpour, Akbarzadeh, Zakerian, & Ebrahimi, 2015) حداقل فاصله ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. فاصله بیشتر از مناطق مسکونی به‌عنوان مزیت محسوب می‌شود و امتیاز بیشتری دریافت می‌کند. نقاط با پتانسیل بالا (۴۶ نقطه) از نظر فاصله از مناطق مسکونی جهت نصب توربین بر اساس جدول ۳ امتیازدهی شدند.

(Rediske et al., 2021; Xu et al., 2020). در این مطالعه ابتدا شاخص‌های موثر با استفاده از مطالعات گذشته استخراج گردید و سپس با توجه به محدودیت دسترسی به اطلاعات و داده‌ها و همچنین شرایط منطقه و تایید کارشناسان، معیارها و شاخص‌های نهایی انتخاب شدند. شاخص‌های نهایی در نظر گرفته‌شده شامل پتانسیل انرژی باد (C1)، حجم ترافیک (C2)، فاصله از جاده‌ها (C3)، فاصله از شهرها و روستاها (مناطق مسکونی) (C4)، فاصله از مناطق حفاظت‌شده (C5)، فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل (C6)، فاصله از خطوط برق فشار قوی (C7)، فاصله از گسل (C8) و شیب زمین (C9) می‌باشند.

سرعت بالای باد و وجود پتانسیل کافی انرژی باد شرط ضروری در نصب توربین و تولید برق است (Xu et al., 2020). بنابراین تعیین نقاط و مناطق با سرعت و چگالی انرژی بالای باد جهت تجزیه و تحلیل نصب توربین بادی الزامی است. از سوی دیگر توربین‌های بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها باید در اطراف جاده نصب شوند به طوری که فاصله بیش از ۳ کیلومتر از جاده به جهت افزایش هزینه شبکه انتقال برق اقتصادی نیست. از این رو مناطق و نقاطی که دارای بیشترین سرعت و پتانسیل انرژی باد بر اساس نقشه حاصل از اطلس جهان باد بودند و در محدوده ۳ کیلومتر از جاده‌های استان کرمانشاه قرار دارند، برای تجزیه و تحلیل نصب توربین بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها انتخاب شدند. بر این اساس ۴۶ نقطه شناسایی گردید که با توجه به موقعیت مکانی آن‌ها، شهرستان‌ها جهت نصب سیستم روشنایی بادی امتیازبندی و به‌عنوان گزینه‌ها در روش‌های مجموع ساده وزین^۱، تاپسیس^۲، الکت^۳ و ویکور^۴ به کار گرفته شدند. جهت امتیازدهی به پتانسیل انرژی باد از تابع عضویت فازی ارائه‌شده توسط عساکره (Asakereh, 2014) استفاده شد. این تابع بر اساس سطح‌بندی انرژی باد توسط آزمایشگاه ملی انرژی باد وزارت نیروی ایالات متحده آمریکا و تحقیقات صورت‌گرفته استخراج گردیده است. ایجاد امنیت ناوگان عبوری و کاهش سوانح جاده‌ای از اهداف مهم نصب سامانه‌های روشنایی می‌باشد. با افزایش حجم تردد، خطر سوانح رانندگی افزایش می‌یابد، لذا مناطق با ترافیک بالا از امتیاز بالاتری جهت نصب سامانه روشنایی برخوردار می‌باشند. تعداد ۸۲ دستگاه نقلیه‌شمار توسط سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور، در کف جاده‌های استان نصب می‌باشد که موقعیت مکانی و اطلاعات آن‌ها جهت تعیین ترافیک راه‌ها استفاده گردید. امتیازدهی

- 1- Simple Additive Weighting (SAW)
- 2- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
- 3- Elimination et Choice Translating Reality (ELECTRE)
- 4- Vise Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR)

جدول ۲- امتیازدهی از نظر فاصله از جاده‌ها

Table 2- Scoring based on distance from roads

امتیاز Score	فاصله از جاده Distance from roads (m)							
	حریم جاده‌ها Road buffer	حریم جاده تا ۱۰۰ متر Road buffer to 100 m	100-200	200-500	500-1000	1000-2000	2000-3000	>3000
	0	9	8	7	6	4	2	0

جدول ۳- امتیازدهی از نظر فاصله از محدوده مناطق مسکونی

Table 3- Scoring based on distance from residential areas

امتیاز Score	فاصله از محدوده مناطق مسکونی Distance from residential areas (m)				
	0- 500	500-1000	1000-2000	2000-3000	>3000
	0	3	5	7	9

داشته باشد (Arnette & Zobel, 2011; Xu et al., 2020). جلوخانی و حاجیلو (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016) حداقل فاصله از مناطق حفاظت‌شده برای نصب توربین بادی را ۵۰۰ متر در نظر گرفتند. فاصله بیشتر مکان نصب توربین بادی از مناطق حفاظت‌شده مزیت است و از اولویت بالاتری برخوردار می‌باشد. جدول ۴ نشان می‌دهد، به مناطق حفاظت‌شده و ۵۰۰ متر اطراف آن، امتیاز صفر داده شد و بیشترین امتیاز به مناطق با فاصله بیش از ۲ کیلومتر از مناطق حفاظت‌شده، تعلق گرفت.

توجه به مسائل زیست‌محیطی در مکان‌یابی نیروگاه بادی یکی از مهم‌ترین معیارها و شاخص‌هایی است که در مطالعات در نظر گرفته شده است. در مقایسه با توربین‌های بادی بزرگ و متوسط، اثرات زیست‌محیطی توربین‌های کوچک بسیار کمتر می‌باشند، ولی در حد امکان باید مسائل زیست‌محیطی در نظر گرفته شوند تا اثرات جانبی نصب توربین به حداقل برسد. نصب توربین بادی ممکن است خطراتی را جهت عبور پرندگان و زیستگاه جانوری ایجاد کند. برای جلوگیری از برخورد پرندگان توربین باید دارای کمینه فاصله مشخص تا مسیر پرواز پرندگان یا زیستگاه آن‌ها و مناطق حفاظت‌شده را

جدول ۴- امتیازدهی از نظر فاصله تا مناطق حفاظت‌شده

Table 4- Scoring based on distance to protected areas

امتیاز Score	فاصله از مناطق حفاظت‌شده Distance to protected areas (m)				
	0-500	500-1000	1000-1500	1500-2000	>2000
	0	3	5	7	9

جهت جلوگیری از تخریب سازه‌های نیروگاهی ناشی از حرکت سیلاب و آب رودخانه در مواقع بارندگی شدید، حداقل حریم لازم جهت نصب توربین بادی بر اساس مطالعات گذشته ۵۰۰ متر منظور گردید (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016). امتیازدهی از نظر فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل در جدول ۵ نشان داده شده است.

هرچند نصب یک توربین بادی منفرد رده کوچک در زمین کشاورزی فضای زیادی را برخلاف مزارع بادی اشغال نمی‌کند و می‌توان در حاشیه آن عملیات کشاورزی را به‌طور معمول داشت، اما حفظ مناطق با کاربری کشاورزی و باغی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و حتی‌الامکان نباید مراکز نیروگاهی در این مناطق ایجاد شود. از این‌رو محدوده اراضی کشاورزی و باغات و همچنین محدوده سایر سازه‌های انسان‌ساز به‌عنوان مناطق غیرقابل‌استفاده در نظر گرفته شد.

جدول ۵- امتیاز دهی از نظر فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل

Table 5- Scoring based on distance from river and flood-prone areas

امتیاز Score	فاصله از رودخانه و مناطق سیل خیز Distance from river and flood-prone areas (m)			
	0-500	500-1000	1000-2000	>2000
	0	3	6	9

نظر فاصله از خطوط برق فشار قوی در جدول ۶ نشان داده شده است. گسل‌ها و مناطق زلزله‌خیز یکی از عوامل مخرب جهت نصب تجهیزات نیروگاهی محسوب می‌شوند. در بعضی منابع حریم حداقل ۵۰۰ متر برای گسل منظور گردیده است (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016). جدول ۷ امتیازدهی از نظر فاصله از گسل را نشان می‌دهد.

احداث نیروگاه بادی در مجاورت خطوط انتقال برق فشار قوی می‌تواند خطرات احتمالی زیادی را ایجاد کند. بر اساس مصوبه هیات وزیران در سال ۱۳۹۴ فاصله حریم قانونی از خطوط برق فشار قوی با ولتاژ ۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰، ۴۰۰ و ۷۵۶ کیلووات به ترتیب ۱۶، ۱۸، ۲۴، ۲۸ و ۵۰ متر از دو طرف منظور شده که در این پژوهش بر اساس مطالعات گذشته، حداقل فاصله مجاز ۵۰ متر منظور گردید (Jelokhani Niyaraki & Hajiloo, 2016). امتیازدهی منطقه از

جدول ۶- امتیازدهی از نظر فاصله از خطوط برق فشار قوی

Table 6- Scoring based on distance from high voltage power lines

امتیاز Score	فاصله از خطوط انتقال برق فشار قوی Distance from high voltage power lines (m)					
	0-50	50-200	200-500	500-800	800-1000	>1000
	0	3	5	7	8	9

جدول ۷- امتیازدهی از نظر فاصله از گسل

Table 7- Scoring in terms of distance from faults

امتیاز Score	فاصله از گسل Distance from fault (m)				
	0-500	500-700	700-1000	1000-1500	>1500
	0	3	5	7	9

بیشینه شیب مناسب جهت نصب توربین بادی در پژوهش‌های مختلف ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان شده است (Al-Yahyai et al., 2012; Arnette & Zobel, 2011). امتیازدهی نقاط از نظر شیب زمین در جدول ۸ نشان داده شده است.

با افزایش شیب منطقه عملیات نقل و انتقال تجهیزات توربین بادی و خاک‌برداری و تسطیح زمین افزایش می‌یابد. هرچه شیب زمین کمتر باشد، نصب سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و ایجاد زیرساخت‌ها، راحت‌تر و بهتر است و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

جدول ۸- امتیازدهی از نظر شیب زمین

Table 8- Scoring based on terrain slope

امتیاز Score	شیب زمین (درصد) Slope (%)					
	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30
	9	7	5	3	1	0

وزن‌دهی به شاخص‌ها

جهت وزن‌دهی به معیارها و شاخص‌ها از روش آنتروپی شانون^۱ همراه با امتیازدهی کارشناسان استفاده گردید. آنتروپی یک مفهوم عمده در رشته‌ها و زمینه‌های مختلف علمی است که نشان‌دهنده مقدار عدم اطمینان موجود از مقدار انتظار اطلاعاتی از هر پیام است. در این روش، شاخص‌هایی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند که پراکندگی مقادیر آن‌ها بیشتر است و در مقایسات می‌تواند تمایز بیشتری بین گزینه‌ها ایجاد کند. در این روش ابتدا باید ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد گردد که ردیف‌ها و ستون‌ها به ترتیب نشان‌دهنده‌ی گزینه‌ها و شاخص‌ها می‌باشند (Momeni, 2022). در مطالعه کنونی، شهرستان‌های استان کرمانشاه به‌عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شدند و بر اساس ۴۶ نقطه انتخاب‌شده و موقعیت مکانی آن‌ها از نظر شاخص‌ها، امتیازدهی شدند. مراحل به‌دست آوردن وزن شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون در منابع مختلف با جزئیات ذکر شده است (Asgharpour, 2023).

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

مدل SAW^2 یکی از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است. در این روش، نیاز به تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری و تعیین وزن شاخص‌ها وجود دارد. از مزایای این روش می‌توان به سادگی و قابل فهم بودن آن، قابلیت استفاده از داده‌های کمی و کیفی، اجتناب از تصمیم‌گیری غیرمنطقی، قابلیت مقایسه گزینه‌های مختلف و انعطاف‌پذیری اشاره کرد. با این حال، این مدل دارای معایبی نیز هست، از جمله حساسیت به وزن‌دهی، عدم در نظر گرفتن تعاملات بین معیارها و حساسیت به تخصیص نادرست وزن‌ها. همچنین، هنگامی که تعداد معیارها زیاد باشد، سازمان‌دهی و ارزیابی آن‌ها می‌تواند زمان‌بر و پیچیده شود. مراحل پیاده‌سازی روش SAW در یک مسأله تصمیم‌گیری چندمعیاره با n معیار و m گزینه شامل تشکیل ماتریس تصمیم، بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم، ایجاد ماتریس وزن‌دار و در نهایت انتخاب گزینه برتر است. در ماتریس تصمیم، سطرها و ستون‌ها به ترتیب نمایان‌گر گزینه‌ها و معیارها هستند و مقدار هر سلول نشان‌دهنده ارزیابی هر گزینه نسبت به هر معیار است. جهت بی‌مقیاس‌سازی، از روش بی‌مقیاس‌سازی خطی استفاده می‌شود، به این صورت که اگر معیار مثبت باشد، هر یک از اعداد آن ستون بر بزرگ‌ترین عدد ستون تقسیم می‌گردد، و اگر معیار منفی باشد، کمترین مقدار آن ستون بر هر یک از اعداد آن ستون تقسیم می‌شود. ماتریس وزن‌دار از ضرب ماتریس بی‌مقیاس‌شده در

ماتریس وزن‌ها به‌دست می‌آید. همان‌طور که بیان شد، در این مطالعه، ماتریس وزن‌ها با استفاده از آنتروپی شانون محاسبه گردید. در نهایت، گزینه‌ای که وزن آن بیشتر باشد، به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود (Asgharpour, 2023; Momeni & Sharifi Salim, 2017).

مدل TOPSIS از روش‌های مهم تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به‌طور گسترده استفاده می‌گردد. در این روش شاخصی به نام نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت و دوری از راه‌حل ایده‌آل منفی تعریف می‌شود و بر اساس این فاصله‌ها، گزینه‌ها ارزیابی و اولویت‌بندی می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به توانایی در مدیریت معیارها، مقیاس‌پذیری، ارائه یک فرآیند یکپارچه به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب گزینه‌های مناسب، استفاده از داده‌های کمی و کیفی، ارزیابی گزینه‌ها بدون نیاز به وزنی کردن معیارها، توانایی مدیریت تناخ و تعلقات بین معیارها و گزینه‌ها اشاره کرد. حساسیت به وزن‌دهی، عدم در نظر گرفتن تعاملات بین معیارها (فرض مستقل بودن معیارها از هم)، عدم ارائه یک مدل پیش‌فرض در مورد وزنی کردن معیارها، محاسبات پیچیده، احتمال بازنگری مجدد در گزینه‌ها از معایب این روش می‌باشد. در این روش m گزینه به‌وسیله n شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که شامل شش مرحله زیر است (Asgharpour, 2023; Momeni & Sharifi Salim, 2017).

مرحله اول: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه (۱) انجام می‌شود.

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_i a_{ij}^2}} \quad (1)$$

مرحله دوم: اگر N نشان‌دهنده ماتریس بی‌مقیاس‌شده و $W_{n \times n}$ نشان‌دهنده ماتریس قطری وزن‌ها باشد، ماتریس بی‌مقیاس‌موزون (V) با استفاده از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$V = N \times W_{n \times n} \quad (2)$$

مرحله سوم: تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و راه‌حل ایده‌آل منفی بدین صورت که بردار بهترین مقادیر هر شاخص ماتریس V ، راه‌حل ایده‌آل مثبت (V_j^+) و بردار بدترین مقادیر هر شاخص ماتریس V ، راه‌حل ایده‌آل منفی (V_j^-) را تشکیل می‌دهند.

مرحله چهارم: فاصله اقلیدسی هر گزینه از ایده‌آل مثبت (d_j^+) و ایده‌آل منفی (d_j^-) بر اساس رابطه (۳) و (۴) حساب می‌شود.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

مرحله پنجم: محاسبه نزدیکی نسبی (CL_i^*) یک گزینه به راه‌حل ایده‌آل از رابطه (۵) تعیین می‌گردد.

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (5)$$

1- Shannon entropy

2- Simple Additive Weighting

اوزان شاخص‌های متعلق به مجموعه‌ی هماهنگ حاصل می‌شود (رابطه ۱۲).

$$I_{kl} = \sum W_j, \quad j \in A_{kl} \quad (12)$$

این معیار (I_{kl}) بیان‌کننده‌ی اهمیت نسبی A_k نسبت به A_l است. مقدار این معیار، عددی بین صفر و یک است و هرچه این مقدار بیشتر باشد نشانگر این است که A_k ارجحیت بیشتری بر A_l دارد و برعکس.

مرحله پنجم شامل تعیین ماتریس ناهماهنگ (NI) با استفاده از رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$NI_{kl} = \frac{\text{Max}|v_{kj} - v_{lj}|, \quad j \in D_{kl}}{\text{Max}|v_{kj} - v_{lj}|, \quad j \in \text{همه شاخصها}} \quad (13)$$

این معیار نسبت عدم مطلوبیت مجموعه ناهماهنگ k و l را به کل ناهماهنگی در شاخص‌ها اندازه‌گیری می‌کند.

در مرحله ششم ماتریس هماهنگ موثر (H) محاسبه می‌شود. برای ایجاد این ماتریس، ابتدا باید یک حد آستانه‌ای را تعیین کرد و اگر هر عنصر ماتریس I بزرگ‌تر یا مساوی آن باشد، آن مؤلفه در ماتریس H ، مقدار یک به خود می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. یک معیار عمومی برای مشخص شدن این حد، عبارت است از میانگین مقادیر ماتریس I (رابطه ۱۴). این ماتریس نشان‌دهنده‌ی ارجحیت یک گزینه بر گزینه دیگر است.

$$\bar{I} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m I_{kl} / m(m-1) \quad (14)$$

در مرحله هفتم ماتریس ناهماهنگ موثر (G) مانند ماتریس هماهنگ موثر به دست می‌آید. حد آستانه برای این ماتریس از رابطه (۱۵) محاسبه گردید.

$$\bar{NI} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m NI_{kl} / m(m-1) \quad (15)$$

$$G_{kl} = 1 \quad \leftarrow \quad NI_{kl} \leq \bar{NI}$$

$$G_{kl} = 0 \quad \leftarrow \quad NI_{kl} > \bar{NI}$$

در مرحله هشتم با ترکیب ماتریس هماهنگ موثر (H) و ماتریس ناهماهنگ موثر (G)، "ماتریس کلی موثر" (F) بر اساس رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$F_{kl} = H_{kl} \times G_{kl} \quad (16)$$

این ماتریس، نشان‌دهنده‌ی ترتیب برتری راهکارهای مختلف، نسبت به یکدیگر می‌باشد، یعنی اگر $F_{kl}=1$ باشد، نشان‌دهنده‌ی ارجحیت و تسلط A_k بر A_l می‌باشد.

روش VIKOR یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه سازشی است که مبتنی بر ماتریس تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین گزینه براساس معیارها می‌باشد. این روش در مواردی که گزینه‌ها دارای تضاد بین معیارهای مختلف هستند، می‌تواند بسیار مفید باشد. تمرکز

مرحله ششم: گزینه با مقدار CL بزرگ‌تر باشد، رتبه بهتری دارد. مدل ELECTRE یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای انتخاب بهترین گزینه بر مبنای روابط غیررتبه‌ای است. از مزایای این روش می‌توان به مناسب بودن برای مسائل پیچیده تصمیم‌گیری چندمعیاره، قابلیت کار با داده‌های کیفی و کمی، انعطاف‌پذیری در انتخاب معیارها، استفاده از مفهوم برتری و عدم برتری (کمک به تشخیص دقیق‌تر گزینه‌ها)، تمرکز بیشتر بر مقایسه و رتبه‌بندی و حساسیت کمتر به مقادیر دقیق اشاره کرد. از مهم‌ترین معایب این روش می‌توان به ضروری بودن تعیین آستانه‌ها برای برتری و عدم برتری است. انتخاب این آستانه‌ها می‌تواند بر نتایج نهایی تأثیر بگذارد و ممکن است نیاز به آزمایش و تنظیم دقیق داشته باشد. از دیگر معایب این روش عدم ارائه رتبه‌بندی قطعی در همه موارد و پیچیدگی در محاسبه شاخص‌های سازگاری و ناسازگاری و وابستگی به وزن‌دهی معیارها است. تشکیل ماتریس تصمیم در این روش ضروری است. مراحل کلی این روش در ادامه بیان شده است (Momeni & Sharifi Salim, 2017).

در مرحله اول بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم بر اساس نورم اقلیدسی با استفاده از رابطه (۶) انجام می‌گیرد.

$$N = [n_{ij}] \quad n_{ij} = \frac{a_{ij}}{(\sum_{i=1}^m a_{ij}^2)^{0.5}} \quad (6)$$

در مرحله دوم با استفاده از رابطه (۷)، ماتریس بی‌مقیاس‌شده موزون (۷) تشکیل می‌گردد.

$$V = [N * W_{n \times n}] \quad (7)$$

در مرحله سوم تمامی گزینه‌ها نسبت به تمام شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و مجموعه‌ی "هماهنگ و ناهماهنگ" تشکیل می‌شود. مجموعه هماهنگ از گزینه‌های k و l که با S_{kl} نشان داده می‌شود، مشتمل بر کلیه شاخص‌هایی خواهد بود که در آن‌ها گزینه A_k بر گزینه A_l به‌ازای آن‌ها مطلوبیت بیشتری داشته باشد. اگر شاخص مورد نظر جنبه مثبت داشته باشد از رابطه (۸) و اگر شاخص جنبه منفی داشته باشد از رابطه (۹) استفاده می‌گردد.

$$S_{kl} = \{j | V_{kj} \geq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$S_{kl} = \{j | V_{kj} \leq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

مجموعه ناهماهنگ D_{kl} نیز شامل شاخص‌هایی است که در آن‌ها، گزینه A_k نسبت به گزینه A_l مطلوبیت کمتری داشته باشد که برای شاخص با جنبه مثبت از رابطه (۱۰) و برای شاخص با جنبه منفی از رابطه (۱۱) استفاده می‌گردد.

$$D_{kl} = \{j | V_{kj} \leq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$D_{kl} = \{j | V_{kj} \geq V_{lj}\} \quad j = 1, \dots, m \quad (11)$$

مرحله چهارم شامل تشکیل ماتریس هماهنگ (I) بر اساس مجموعه‌های هماهنگ است. این ماتریس یک ماتریس $m \times m$ بوده که قطر آن فاقد عنصر می‌باشد. سایر عناصر این ماتریس نیز از جمع

مطالعه از روش‌های ادغام میانگین رتبه‌ها، بردا^۱ و کپلند^۲ استفاده شده است. در روش میانگین رتبه‌ها که ساده‌ترین روش ادغام می‌باشد، میانگین رتبه‌های به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه محاسبه می‌گردد و بر اساس آن اولویت‌بندی صورت می‌گیرد. روش بردا بر اساس قاعده اکثریت استوار است. در این روش ماتریسی مربعی به طول تعداد گزینه‌ها تشکیل می‌گردد و گزینه‌ها دو به دو بر اساس تعداد تفوق در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه با هم مقایسه می‌شوند. اگر گزینه در سطر نسبت به گزینه در ستون در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بیشتری، رتبه بهتری داشته است از M و در غیر این صورت از X استفاده می‌گردد. در واقع M به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و X به منزله ارجحیت ستون بر سطر یا مساوی بودن است. تعداد M ها (تعداد بردها) برای هر سطر محاسبه می‌شود و گزینه‌هایی که تعداد M بیشتری دارند در اولویت قرار می‌گیرند. روش کپلند با پایان روش بردا شروع می‌شود. امتیازی که کپلند به هر گزینه می‌دهد با کم کردن تعداد باخت‌ها از تعداد بردها محاسبه می‌شود (Momeni, 2022).

نتایج و بحث

وزن شهرستان‌ها از نظر معیارها

جدول ۹ وضعیت شهرستان‌ها از نظر ترافیک بر اساس داده‌های ۷۹ نقطه از راه‌های استان کرمانشاه را نشان می‌دهد که شهرستان کرمانشاه با ۱۶ نقطه بیشترین نقاط مورد بررسی را به خود اختصاص داد. اکثر راه‌های مورد بررسی در شهرستان‌های مختلف دارای ترافیک نیمه‌سنگین یا سنگین می‌باشند. شهرستان پاوه، سرپل ذهاب و صحنه کمترین امتیاز ترافیک را کسب کردند. این نقاط مورد بررسی، ترافیک راه‌هایی هستند که نقلیه‌شمار در آن‌ها نصب شده است. طبیعی است که نقلیه‌شمار در راه‌هایی قرار داده می‌شود که معمولاً تردد در آن‌ها از سایر راه‌ها بیشتر است و نشان‌دهنده‌ی ترافیک کل راه‌های استان یا شهرستان‌ها نیست، ولی به دلیل این‌که در هر شهرستان راه‌های پرتردد برای این منظور در نظر گرفته می‌شوند، می‌توانند دید کلی مناسبی از حجم ترافیک شهرستان نسبت به هم را نشان دهد. از نظر این معیار، بیشترین امتیاز به ترتیب شهرستان‌های کرمانشاه، هرسین و اسلام‌آباد غرب تعلق گرفت.

در جدول ۱۰ وضعیت فاصله و امتیاز نقاط با پتانسیل بالای انرژی باد از جاده و امتیاز شهرستان‌ها از نظر فاصله تا جاده نشان داده شده است. اکثر نقاط در فاصله بیش از ۱ کیلومتر از جاده قرار دارند، به همین دلیل امتیاز آن‌ها پایین است. بر اساس نقاط مورد بررسی فاصله

بر راه‌حل سازش و امکان وزن‌دهی به معیارها از مهم‌ترین مزایای این روش می‌باشند. مراحل انجام این روش به شرح زیر است (Kumar & Samuel, 2017; San Cristóbal, 2011).

مرحله اول: تشکیل ماتریس تصمیم با m گزینه و n معیار تشکیل می‌گردد.

مرحله دوم: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم بر اساس رابطه (۶) انجام می‌شود.

مرحله سوم: تعیین ایده‌آل مثبت و منفی همانند روش TOPSIS انجام می‌گیرد.

مرحله چهارم: محاسبه مقادیر سودمندی (S)، تاسف (R) به ترتیب بر اساس رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) انجام می‌شود.

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_j \cdot \frac{V_i^+ - V_{ij}}{V_i^+ - V_i^-} \quad (17)$$

$$R_j = \text{Max}(W_j \cdot \frac{V_i^+ - V_{ij}}{V_i^+ - V_i^-}) \quad (18)$$

مرحله پنجم: در این مرحله شاخص ویکور بر اساس رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = v \left[\frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} \right] + (1 + v) \left[\frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \right] \quad (19)$$

$$S^- = \text{Min}S_i, \quad S^+ = \text{Max}S_i,$$

$$R^- = \text{Min}R_i, \quad R^+ = \text{Max}R_i,$$

پارامتر v بر اساس تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود که در این مطالعه برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد.

مرحله ششم: گزینه‌ها بر اساس مقادیر Q, R, S در سه گروه از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. گزینه‌ای که در هر سه مقدار رتبه برتر باشد، بهترین گزینه است، در غیر این صورت گزینه برتر گزینه‌ای است که کوچک‌ترین Q را داشته باشد و دو شرط زیر برقرار باشند. شرط اول: اگر گزینه A1 و A2 در میان m گزینه رتبه اول و دوم را داشته باشند، باید رابطه (۲۰) برقرار باشد.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{m-1} \quad (20)$$

شرط دوم: گزینه A1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به‌عنوان رتبه برتر شناخته شود. اگر یکی از شرط‌ها برقرار نباشد هر دو گزینه بهترین گزینه خواهند بود

روش‌های ادغام

نتایج روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه ممکن است به نتایج متفاوتی ختم شود. برای تفوق بر این وضعیت، روش‌های مختلفی مطرح شده است که به روش‌های ادغام معروفند. در این

1- Borda

2- Copeland

نشان داده شده است. شهرستان کرمانشاه در همه شاخص‌ها وضعیت مطلوبی دارد و به جز فاصله از گسل و مناطق حفاظت‌شده، بیشترین امتیاز را به دست آورد. وجود نقاط با پتانسیل مناسب باد بیشتر در شهرستان کرمانشاه که حداکثر ۳ کیلومتر از جاده‌ها فاصله دارند، در بیشتر شدن امتیاز این شهرستان اثر مستقیم دارد.

از جاده‌ها، شهرستان‌های سنقر، صحنه و کرمانشاه به ترتیب در اولویت اول تا سوم قرار دارند و بیشترین وزن به آن‌ها تعلق گرفت. برای جاده‌ها بستگی به نوع جاده محدوده بافر مختلفی در نظر گرفته شد. امتیاز شهرستان‌ها از نظر سایر شاخص‌های در نظر گرفته شده براساس تعداد و وضعیت نقاط برداشت‌شده محاسبه و در جدول ۱۱

جدول ۹- وزن شهرستان‌ها از نظر معیار ترافیک
Table 9- Weight of counties in terms of traffic criteria

شهرستان County	تعداد نقاط نقلیه شمار The number of automatic vehicle counting devices	حجم عبور وسایل نقلیه (وزن) Traffic (Weight)			مجموع وزنی Weighted sum
		سبک Low (3)	متوسط Medium (6)	زیاد High (9)	
کرمانشاه Kermanshah	16	0	4	12	132
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e-Gharb	10	0	2	8	84
دالاهو Dalahu	2	0	0	2	18
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	2	0	2	0	12
گیلانغرب Gilangharb	8	2	6	0	42
قصر شیرین Qasre Shirin	6	1	5	0	33
هرسین Harsin	10	0	2	8	84
صحنه Sahneh	2	0	2	0	12
کنگاور Kangavar	6	0	2	4	48
سنقر Sonqor	4	1	3	0	21
روانسر Ravansar	3	1	1	1	18
پاوه Paveh	2	0	2	0	12
جوانرود Javanrud	4	0	2	2	30
ثلاث Salas	4	2	2	1	27

احداث سامانه روشنایی راه‌ها با استفاده توربین بادی دارا می‌باشند. کمترین امتیاز به سرپل ذهاب و قصر شیرین با امتیاز ۷ و ۹ تعلق گرفت. همان‌طور که بیان شد همه نقاط انتخابی دارای پتانسیل باد مناسب می‌باشند ولی اختلاف سرعت باد در آن‌ها و تعداد نقاط موجود در هر شهرستان باعث گردید امتیازات شهرستان‌ها از نظر پتانسیل انرژی باد متفاوت باشد.

در شکل ۱ امتیاز شهرستان‌ها از نظر پتانسیل انرژی باد نشان داده شده است که بر اساس تعداد نقاط برداشت‌شده در هر شهرستان و سرعت باد می‌باشد. بیشترین نقاط دارای پتانسیل باد بالا با ۷ مکان مربوط به شهرستان کرمانشاه و کمترین نقاط با یک مکان در قصر شیرین و سرپل ذهاب بود. از دیدگاه این شاخص، شهرستان‌های کرمانشاه و روانسر به ترتیب با امتیاز ۵۳ و ۵۰ بیشترین امتیاز را از نظر

وزن شاخص‌ها

بر اساس امتیازات شهرستان‌ها از نظر هر شاخص، ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل گردید و با استفاده روش آنتروپی شانون، وزن شاخص‌ها محاسبه گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است. پتانسیل انرژی باد با وزن ۰/۳۶۰ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داد. ترافیک و فاصله از جاده به ترتیب با وزن ۰/۲۲۸ و ۰/۱۵۱ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. با افزایش حجم ترافیک، معمولاً خطر سوانح رانندگی افزایش می‌یابد، لذا نصب سیستم روشنایی در جاده‌ها با حجم بالاتر تردد وسایل نقلیه در اولویت قرار دارد. فاصله از جاده یک معیار مهم در نصب توربین و سیستم روشنایی است که هر قدر کمتر باشد باعث کاهش هزینه شبکه انتقال برق و نگهداری تاسیسات برق می‌شود. همچنین کمتر بودن فاصله از جاده موجب تخریب کمتر اراضی و آسیب کمتر به محیط‌زیست می‌شود.

ماتریس بی‌مقیاس‌شده موزون محاسبه و در جدول ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد شهرستان کرمانشاه در همه شاخص‌ها به‌جز فاصله از جاده، فاصله از مناطق حفاظت‌شده و فاصله از گسل بیشترین وزن را به خود اختصاص داد. از نظر شاخص پتانسیل انرژی باد، پس از شهرستان کرمانشاه، شهرستان روانسر و پاوه به ترتیب با وزن موزون ۰/۱۴۲ و ۰/۱۲۸ در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند. در شاخص ترافیک که دومین شاخص مهم مکان‌یابی در این مطالعه بود، شهرستان هرسین و اسلام‌آباد غرب با وزن موزون ۰/۰۹۶ پس از شهرستان کرمانشاه در اولویت بعدی قرار گرفتند. از نظر فاصله از جاده، شهرستان‌های سنقر و صحنه به ترتیب با وزن موزون ۰/۰۹۴ و ۰/۰۷۰ در اولویت اول و دوم قرار دارند و شهرستان کرمانشاه با وزن موزون ۰/۰۴۷ در رتبه سوم قرار گرفت.

جدول ۱۰ - نقاط مناسب هر شهرستان و وزن شهرستان‌ها از نظر فاصله از جاده

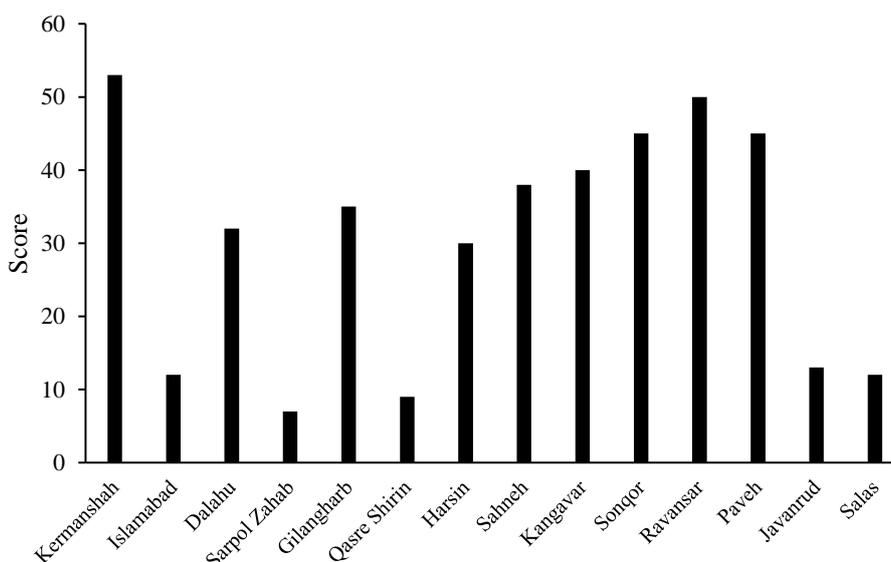
Table 10- Weight of counties in terms of distance from roads

شهرستان County	تعداد نقاط مناسب The number of suitable places	فاصله از جاده بر حسب متر (امتیاز) Distance from the road in meters (score)					مجموع امتیاز وزنی Sum of weighted points	
		Road buffer to 100 m (9)	100-200 (8)	200-500 (7)	500-1000 (6)	1000-2000 (4)		2000-3000 (2)
		کرمانشاه Kermanshah	7	0	7	0		0
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e- Gharb	2	0	2	0	0	0	2	4
دالاهو Dalahu	4	0	2	0	0	2	2	12
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	1	0	0	0	0	1	0	4
گیلانغرب Gilangharb	4	0	4	0	0	0	4	8
قصر شیرین Qasre Shirin	1	0	1	0	0	0	1	2
هرسین Harsin	2	0	1	0	0	1	1	6
صحنه Sahneh	4	0	1	1	2	0	1	21
کنگاور Kangavar	3	1	1	0	0	1	1	6
سنقر Sonqor	6	0	0	2	1	2	0	28
روانسر Ravansar	4	1	4	0	0	0	4	8
پاوه Paveh	4	1	3	0	1	0	3	12
جوانرود Javanrud	2	1	2	0	0	0	2	4
ثلاث Salas	2	1	0	0	0	2	0	8

جدول ۱۱- وزن شهرستان‌ها از نظر معیارهای مختلف

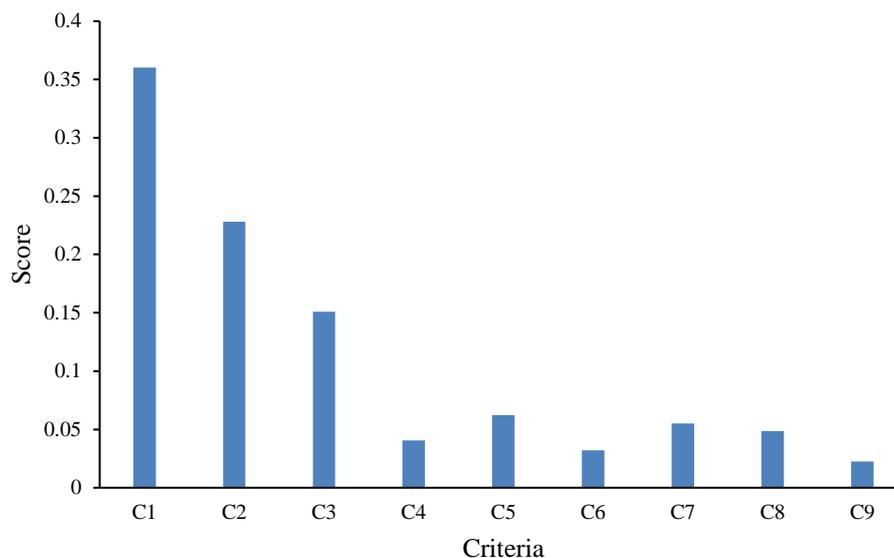
Table 11- Weight of counties in terms of different criteria

شهرستان County	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
کرمانشاه Kermanshah	63	45	53	63	32	15
اسلام‌آباد غرب Eslamabad- e-Gharb	18	19	16	18	15	9
دالاهو Dalahu	10	36	36	34	35	14
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	5	9	9	9	6	5
گیلانغرب Gilangharb	34	36	35	36	27	14
قصرشیرین Qasre Shirin	7	9	9	9	9	7
هرسین Harsin	18	9	16	17	4	2
صحنه Sahneh	22	36	30	36	26	11
کنگاور Kangavar	23	27	27	27	27	9
سنقر Sonqor	36	54	38	49	45	12
روانسر Ravansar	34	36	36	36	10	9
پاوه Paveh	28	27	34	36	27	6
جوانرود Javanrud	14	9	16	18	18	7
ثلاث Salas	9	18	12	9	18	7



شکل ۱- امتیاز شهرستان‌ها از نظر پتانسیل انرژی باد

Fig.1. Score of counties in terms of wind energy potential



شکل ۲- وزن شاخص‌های انتخاب مکان توربین بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها

Fig. 2. Weighting of wind turbine location selection indicators for road lighting systems

هرسین، پاره، صحنه و گیلانغرب با تعداد ۵ چیرگی در رتبه ۴ قرار گرفتند، در حالی که در روش VIKOR شهرستان‌های گیلانغرب، روانسر و هرسین به ترتیب در رتبه‌های چهارم تا ششم قرار گرفتند. در این دو روش نیز شهرستان‌های ثلاث، جوانرود، قصر شیرین و سرپل ذهاب در رتبه‌های آخر قرار گرفتند. بررسی روش‌های ادغام نشان می‌دهد که در کل شهرستان کرمانشاه، سنقر و روانسر در اولویت اول تا سوم قرار دارند و شهرستان کنگاور در اولویت چهارم جهت نصب سامانه‌های روشنایی جاده‌ها مبتنی بر توربین بادی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه شهرستان‌های استان کرمانشاه به منظور استفاده از انرژی باد جهت تامین سیستم روشنایی جاده‌ها با استفاده از معیارهای پتانسیل انرژی باد، فاصله از جاده‌ها، حجم تردد وسایل نقلیه، فاصله از خطوط برق فشار قوی، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، فاصله از رودخانه و مناطق در معرض سیل، فاصله از گسل، فاصله از مناطق مسکونی و شیب زمین، مورد مطالعه قرار گرفتند. براساس نقشه اطلس باد، ۴۶ نقطه با پتانسیل مناسب باد در محدوده ۳ کیلومتری جاده‌ها شناسایی شدند که برای نصب توربین بادی جهت سیستم روشنایی جاده‌ها بر اساس معیارها تجزیه و تحلیل شدند.

در جدول ۱۳ وزن نهایی و اولویت شهرستان‌های استان کرمانشاه از نظر کل شاخص‌های مورد بررسی نصب توربین بادی جهت تامین برق سیستم روشنایی جاده‌های استان کرمانشاه نشان داده شده است. در همه روش‌های چندشاخصه، شهرستان کرمانشاه و سنقر به ترتیب در اولویت اول و دوم قرار دارند. وزن‌های شهرستان کرمانشاه و سنقر در روش SAW ۰/۹۰۱ و ۰/۷۰۹ و در روش TOPSIS به ترتیب ۰/۸۰۷ و ۰/۵۲۸ به دست آمد. در این دو روش تصمیم‌گیری شهرستان کرمانشاه با اختلاف زیادی در اولویت اول قرار دارد. امتیاز شهرستان سنقر نیز با سایر شهرستان‌ها در دو روش ذکر شده اختلاف قابل توجهی دارد ولی بین شهرستان‌ها در رتبه‌های بعدی اختلاف امتیازات کم می‌باشد. شهرستان روانسر در روش SAW با وزن ۰/۵۵۴ در اولویت سوم است، در حالی که در روش SAW با وزن ۰/۴۵۸ در رتبه چهارم قرار گرفت. شهرستان هرسین در روش تاپسیس با وزن ۰/۴۶۷ در رتبه سوم قرار دارد ولی در روش SAW با وزن ۰/۴۳۷ در رتبه ۹ قرار گرفت. در هر دو روش تصمیم‌گیری شهرستان‌های ثلاث، جوانرود، قصر شیرین و سرپل ذهاب در رتبه‌های آخر قرار گرفتند. در روش ELECTRE تعداد چیرگی شهرستان کرمانشاه برابر با ۱۳ شده است که با اختلاف در رتبه اول قرار گرفته است. همانند دو روش دیگر شهرستان سنقر در رتبه دوم قرار دارد. شهرستان کنگاور در دو روش ELECTRE و VIKOR در رتبه سوم قرار دارد. در روش ELECTRE شهرستان‌های روانسر،

جدول ۱۲ - ماتریس بی‌مقیاس شده موزون
Table 12- Scale-free weighted matrix

شهرستان County	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
کرمانشاه Kermanshah	0.150	0.151	0.047	0.025	0.002	0.016	0.032	0.017	0.009
اسلام‌آباد غرب Eslamabad-e-Gharb	0.034	0.096	0.013	0.007	0.009	0.005	0.009	0.008	0.006
دالاهو Dalahu	0.091	0.021	0.040	0.004	0.018	0.011	0.017	0.019	0.009
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	0.020	0.014	0.013	0.002	0.004	0.003	0.005	0.003	0.003
گیلانغرب Gilangharb	0.099	0.048	0.027	0.014	0.018	0.010	0.018	0.014	0.009
قصر شیرین Qasre Shirin	0.026	0.038	0.007	0.003	0.004	0.003	0.005	0.005	0.004
هرسین Harsin	0.085	0.096	0.020	0.007	0.004	0.005	0.009	0.002	0.001
صحنه Sahneh	0.108	0.014	0.070	0.009	0.018	0.009	0.018	0.014	0.007
کنگاور Kangavar	0.113	0.055	0.020	0.009	0.013	0.008	0.014	0.014	0.006
سنقر Sonqor	0.128	0.024	0.094	0.014	0.026	0.011	0.025	0.024	0.007
روانسر Ravansar	0.142	0.021	0.027	0.014	0.018	0.001	0.018	0.005	0.006
پاوه Paveh	0.128	0.014	0.040	0.011	0.013	0.010	0.018	0.014	0.004
جوانرود Javanrud	0.037	0.034	0.013	0.006	0.004	0.005	0.009	0.010	0.004
ثلاث Salas	0.034	0.031	0.027	0.004	0.009	0.004	0.005	0.010	0.004

سیاسگزاری

از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر حمایت مالی در قالب پژوهانه (SCU.AA98.29747) تشکر و قدردانی می‌شود.

مشارکت نویسندگان

بهرروز دوستی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه، روش‌شناسی، اعتبارسنجی، تصویرسازی نتایج، خدمات نرم‌افزاری.
عباس عساکره: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، مشاوره فنی، ویرایش متن.

با استفاده از آنتروپی شانون و وزن‌دهی نسبی کارشناسان، شاخص‌های پتانسیل انرژی باد، حجم ترافیک و فاصله از جاده بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. برای رتبه‌بندی شهرستان‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده گردید. از نظر پتانسیل انرژی باد، شهرستان‌های کرمانشاه و روانسر به‌ترتیب در اولویت احداث سامانه روشنایی راه‌ها با استفاده توربین بادی قرار دارند. از دیدگاه ترافیک بیشترین امتیاز به شهرستان کرمانشاه و هرسین تعلق گرفت. از نظر فاصله از جاده‌ها، شهرستان‌های سنقر، صحنه و کرمانشاه به‌ترتیب در اولویت اول تا سوم قرار گرفتند. نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان داد که شهرستان کرمانشاه، سنقر و روانسر در اولویت احداث سامانه روشنایی راه‌ها با توربین بادی می‌باشند و شهرستان‌های ثلاث، جوانرود، قصر شیرین و سرپل ذهاب به‌ترتیب در رتبه‌های آخر قرار دارند.

جدول ۱۳- وزن و اولویت نهایی شهرستان‌ها از نظر نصب سیستم روشنایی راه‌ها با استفاده از انرژی باد

Table 13- Final weight and priority of counties in terms of installing road lighting systems using wind energy

شهرستان County	SAW		VIKOR		ELECTRE		TOPSIS		رتبه در روش‌های ادغام Rank in integration methods		
	وزن Weight	رتبه Rank	وزن Weight	رتبه Rank	چیرگی Dominance	رتبه Rank	شاخص ویکور VICOR index	رتبه Rank	میانگین رتبه‌ها Mean of ranks	بردا Borda	کپلند Copeland
کرمانشاه Kermanshah	0.901	1	0.807	1	13	1	0	1	1	1	1
سنقر Sonqor	0.709	2	0.528	3	10	2	0.357	2	2	2	2
روانسر Ravansar	0.554	3	0.458	4	5	4	0.464	5	3	3	3
کنگاور Kangavar	0.515	7	0.447	5	7	3	0.389	3	4	3	4
هرسین Harsin	0.437	9	0.467	3	5	4	0.479	6	5	4	5
صحنه Sahneh	0.541	4	0.430	7	5	4	0.496	7	7	4	5
پاوه Paveh	0.531	5	0.432	6	5	4	0.501	8	6	5	6
گیلانغرب Gilanegharb	0.519	6	0.408	8	5	4	0.407	4	8	5	6
دالاهو Dalahu	0.470	8	0.349	10	4	5	0.520	9	9	6	7
اسلام‌آباد غرب Eslamabad- e-Gharb	0.336	10	0.350	9	4	5	0.798	10	10	7	8
ثلاث Salas	0.241	11	0.245	11	2	6	0.857	12	12	8	9
جوانرود Javanrud	0.237	12	0.136	12	2	6	0.847	11	11	9	10
قصرشیرین Qasreshirin	0.177	13	0.113	13	1	7	0.942	13	13	10	11
سرپل ذهاب Sarpole Zahab	0.131	14	0.032	14	0	8	1	14	14	11	12

References

- Abbasi, M., Monazzam Esmailpour, M. R., Akbarzadeh, A., Zakerian, S. A., & Ebrahimi, M. H. (2015). Investigation of the Effects of Wind Turbine Noise Annoyance on the Sleep Disturbance Among Workers of Manjil Wind Farm. *Journal of Health & Safety at Work*, 5(3), 51-62. (in Persian with English abstract). <http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5303-fa.html>
- Alayat, M. M., Kassem, Y., & Çamur, H. (2018). Assessment of Wind Energy Potential as a Power Generation Source: A Case Study of Eight Selected Locations in Northern Cyprus. *Energies*, 11(10), 2697. <https://doi.org/10.3390/en11102697>
- Ali, N. M., & Ammari, H. (2022). Design of a Hybrid Wind-Solar Street Lighting System to Power LED Lights on Highway Poles. *AIMS Energy*, 10(2), 177-190. <https://doi.org/10.3934/energy.2022010>
- Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., & Al-Badi, A. (2012). Wind Farm Land Suitability Indexing Using Multi-criteria Analysis. *Renewable Energy*, 44, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.004>

5. Arnette, A. N., & Zobel, C. W. (2011). Spatial Analysis of Renewable Energy Potential in the Greater Southern Appalachian Mountains. *Renewable Energy*, 36(11), 2785-2798. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.024>
6. Asakereh, A. (2014). Implementation of fuzzy multiple-criteria decision support system for prioritizing and selecting the appropriate areas for developing some of renewable energies in Shoeibieh region using GIS. PhD thesis, Tehran University. (in Persian with English abstract).
7. Asakereh, A., Omid, M., Alimardani, R., & Sarmadian, F. (2015). Investigating Potential of Wind Energy in Mahshahr, Iran. *Wind Engineering*, 39(4), 369-384. <https://doi.org/10.1260/0309-524x.39.4.369>
8. Asgharpour, M. J. (2023). *Multi-criteria decision making* (20th ed.). Tehran: University of Tehran Press. ISBN 978-964-03-3220-7. (in Persian).
9. Bafkar, A., Azari, A., & Ahmadi, M. (2012). Estimation of Wind Energy and its Application for the Site Selection of Wind Power Plant in Kermanshah Province. *Journal of Meteorological Organization*, 36, 11-24. (in Persian). https://nivar.irimo.ir/article_13190.html
10. Bennui, A., Rattanamane, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., & Chetpattananondh, K. (2007). Site selection for large wind turbine using GIS. In *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment* (pp. 561-566). Phuket, Thailand
11. Esfahani, I. J., Ifaei, P., Kim, J., & Yoo, C. (2016). Design of Hybrid Renewable Energy Systems with Battery/Hydrogen Storage Considering Practical Power Losses: a MEPoPA (Modified Extended-Power Pinch Analysis). *Energy*, 100, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.074>
12. Ghobadian, B., Najafi, G., Rahimi, H., & Yusaf, T. F. (2009). Future of Renewable Energies in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 689-695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.010>
13. Gorsevski, P. V., Cathcart, S. C., Mirzaei, G., Jamali, M. M., Ye, X., & Gomezdelcampo, E. (2013). A Group-Based Spatial Decision Support System for Wind Farm Site Selection in Northwest Ohio. *Energy Policy*, 55, 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.013>
14. Hasnaki, N. (2018). Technical and Economic Feasibility Study of Heat and Power Production in Karoon Sugar Factory Using a Hybrid System of Biomass, Photovoltaic, and Natural Gas. MSc Thesis. Shahid Chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian with English abstract).
15. Hatefi Ardekani, M., & Rezaei Moghaddam, M. H. (2016). Application of Satellite Images and GIS in the Feasibility of the Use of Solar Energy for Providing Lighting Systems (Case Study: Zanjan-Tabriz Highway). *Arid Regions Geographic Studies*, 6(21), 105-124. (in Persian with English abstract). https://jargs.hsu.ac.ir/article_161398.html?lang=en
16. Ibrahim, Z., & Asari, A. R. (2019). The Development of Wind Power Energy for Lighting System in the Highway. *Malaysian Journal of Industrial Technology*, 2(1), 1-6.
17. Jafari, H. R., Azizi, A., Nasiri, H., & Abedi, S. (2013). Analysis of Land Suitability to Locate Wind Power Plant in Ardabil Province Using AHP and SAW Methods in GIS Environment. *Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 23-41. (in Persian with English abstract). <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/839048>
18. Jelokhani Niyaraki, M., & Hajiloo, F. (2016). Site Selection for Wind Power Plants Using ANP-OWA Model (Case Study of Zanjan Province, Iran). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 6(1), 73-86. (in Persian with English abstract). <https://jgst.issgeac.ir/article-1-424-en.html>
19. Keyhani Nasab, F., Mesri Gundoshmian, T., & Zargar Ershadi, Sh. (2018). Potential Assessment of Wind Power as a Source of Electricity Production in the City of Parsabad, Iran. *Journal of Agricultural Machinery*, 8(2), 449-461. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v8i2.64742>
20. Khare, V., Nema, S., & Baredar, P. (2016). Solar-Wind Hybrid Renewable Energy System: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>
21. Kumar, M., & Samuel, C. (2017). Selection of Best Renewable Energy Source by Using VIKOR Method. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40866-017-0024-7>
22. Momeni, M. & Sharifi Salim, A. (2017). *Multi-attribute decision-making models and software*. Third edition. Moalef Press, Tehran. (in Persian).
23. Momeni, M. (2022). *New topics in operations research*, Tehran University Press, Tehran. (in Persian).
24. Morshedi, J., Borna, R., Asgharipour, A., Ahmadi, H., & Zaheri, A. (2011). Wind Power Plants Site Selection Using Analytical Hierarchy Process (AHP) in GIS Environment. *Geographic Information and Remote Sensing in Planning*, 1(2), 97-111. (in Persian with English abstract).
25. Noorollahi, Y., Yousefi, H., & Mohammadi, M. (2016). Multi-criteria Decision Support System for Wind Farm Site Selection Using GIS. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 13, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.11.007>
26. Omid, A., Alimardani, R., A., & Khanali, M. (2019). Study of Potential, Characteristics and Parameters of the Wind Energy Case study: Dehloran County. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(1), 195-208. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i1.64905>
27. Oral, F. (2023). Use of Small-Scale Wind Turbines in Road Lighting. *Light & Engineering*, 31(3), 109-117.

- <https://doi.org/10.33383/2022-118>
28. Rafati, S., Daliri, A., & Karimi, M. (2019). Wind Energy Economic Assessment and Performance of Wind Turbines in Kermanshah Province with Climatic Considerations. *Journal of Spatial Planning*, 23(2), 195-216. (in Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16059689.1398.23.2.7.0>
 29. Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., & Siluk, J. C. M. (2021). Wind Power Plant Site Selection: A Systematic Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111293>
 30. Rezaei, H., Karimi, M., & Shakeri, F. (2021). Site Selection of Wind Farms in Semnan Province by Using AHP Method. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(12), 51-64. (in Persian with English abstract). <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/837086>
 31. San Cristóbal, J. R. (2011). Multi-criteria Decision-making in the Selection of a Renewable Energy Project in Spain: The Vikor Method. *Renewable Energy*, 36(2), 498-502. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>
 32. Soleymani, M., Keyhani, A., & Omid, M. (2018). Life Cycle Assessment, Ethanol, Sugarcane, Biofuel. *Agricultural Engineering*, 40(2), 13-27. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/agen.2018.15602.1213>
 33. Wadi, M., Shobole, A., Tur, M. R., & Baysal, M. (2018). Smart hybrid wind-solar street lighting system fuzzy based approach: Case study Istanbul-Turkey. In *2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)* (pp. 71–75). IEEE.
 34. Xu, Y., Li, Y., Zheng, L., Cui, L., Li, S., Li, W., & Cai, Y. (2020). Site Selection of Wind Farms Using GIS and Multi-criteria Decision Making Method in Wafangdian, China. *Energy*, 207, 118222. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118222>

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 587-603

Field and Economic Evaluation of Spraying Drones Versus Boom Sprayers for Weed and Yellow Rust control in Wheat fields

M. Safaeinejad¹, M. Ghasemi-Nejad Raeini^{1*}, M. Taki¹

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: 15 December 2024
Revised: 10 February 2025
Accepted: 12 February 2025
Available Online: 28 April 2025

How to cite this article:

Safaeinejad, M., Ghasemi-Nejad Raeini, M., & Taki, M. (2025). Field and Economic Evaluation of Spraying Drones Versus Boom Sprayers for Weed and Yellow Rust control in Wheat fields. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 587-603. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>

Introduction

One of the key structural factors in agricultural mechanization is the selection of appropriate technology. Today, examining the effects of technology application and development on agricultural production remains of highly importance. Innovative technologies, such as spraying drones, play a critical role in advancing agriculture and ensuring food security. Without these technologies and proper input management, environmental impacts are likely to intensify. Achieving sustainable production and ensuring food security is a major challenge for researchers and global policymakers. This study evaluates and compares the performance of spraying drones and boom sprayers in controlling weeds and yellow rust disease in wheat fields. The aim of this study is to optimize pesticide use and achieve sustainable agriculture.

Materials and Methods

This research was conducted to evaluate the field performance and economic feasibility of using spraying drones compared to boom sprayers for controlling weeds and yellow rust disease in wheat fields. Experiments were carried out in regional Khorramabad, Iran, using a DJI Agras MG-1P spraying drone and a 400-liter 400B8 TF boom sprayer. The aim was to investigate the impact of modern technology, specifically spraying drones, compared to traditional methods, such as boom sprayers, for managing weeds and yellow rust disease. Additionally, the study assessed the profitability of these technologies. The experiments followed a randomized complete block design with three treatments: boom sprayer, spraying drone, and control. They were conducted in two separate, independent fields to examine treatment effects on weeds and yellow rust in wheat. For weeds control, 2-4-D herbicide was applied at 1.5 L ha⁻¹, and for yellow rust control, Tilt fungicide was used at 0.5 L ha⁻¹.

Results and Discussion

Results showed that the deposition rate of pesticides in boom sprayers (82.8%) was higher than with drone spraying (69.9%). Furthermore, the average dry weight of weeds in boom sprayer was 172 g m⁻², and in drone spraying, it was 163 g m⁻², which was not statistically significant. Additionally, the average weed density was 25 plants per square meter for boom sprayers and 29.3 plants per square meter for drone spraying, with no statistically significant difference. The average harvest index in weed control experiments was 44% for boom sprayer and 41% for drone spraying, which was statistically significant at the 1% level. The average severity of



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>

yellow rust infection in wheat fields was 30.7% for boom sprayer and 25.3% for drone spraying, which was not statistically significant at the 1% level, but both treatments were significantly different from the control (68.3%). The harvest index in yellow rust experiments was better in drone spraying (43.8%) compared to boom sprayer (41.9%). The total annual cost for drone owners in the studied region (2980.3 million rials) was higher than the total cost for boom sprayer owners (513.48 million rials). However, the benefit-cost ratio for drone owners (1.215) exceeded that of boom sprayer owners (1.030), demonstrating economic viability for both sprayers. Overall, drones are found to be more economical for spraying than boom sprayers due to their higher efficiency and profitability. The use of drones can significantly increase the efficiency and profitability of spraying operations.

Conclusion

The results of this study showed that both drone and boom sprayer were effective in reducing the dry weight of weeds, but there was no statistically significant difference between them. Weed density was higher with drone spraying, and the harvest index was better with drone spraying compared to boom sprayer. The costs of using drones were higher than boom sprayers, but despite the higher costs, drones are superior option for spraying due to their increased efficiency and profitability.

Keywords: Boom Sprayer, Cost-Benefit, Drone, Effectiveness, Spray Deposition

ارزیابی مزرعه‌ای و اقتصادی استفاده از پهیاد سم‌پاش در مقایسه با سم‌پاش بوم‌دار به منظور کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد در مزارع گندم

مجتبی صفائی نژاد^۱، محمود قاسمی نژاد رائینی^{۱*}، مرتضی تاکی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

چکیده

یکی از عوامل ساختاری مهم در حوزه مکانیزاسیون کشاورزی، انتخاب فناوری مناسب است. امروزه بررسی اثرات استفاده از فناوری و توسعه تکنولوژی و مکانیزاسیون بر تولید بخش کشاورزی دارای اهمیت زیادی است. ارزیابی اثربخشی فناوری‌ها در تولید محصولات کشاورزی، با سنجش تأثیرات این فناوری‌ها و تحلیل منافع اقتصادی، ضروری است. در این راستا، اثرات استفاده از فناوری نوین (پهیاد در سم‌پاشی) در مقایسه با فناوری مرسوم (سمپاش بوم‌دار) برای کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد گندم و همچنین بررسی سود و زیان این فناوری‌ها برای تولید گندم در شهرستان خرم‌آباد بررسی شد. آزمایش‌ها در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار (دو تیمار سمپاش بوم‌دار و پهیاد در مقایسه با تیمار شاهد) اجرا شدند. این آزمایش‌ها برای بررسی اثرات تیمارها بر علف‌های هرز و زنگ زرد گندم و همچنین میزان نشست سم به هدف در دو مزرعه کاملاً جدا و مستقل انجام شد. برای ارزیابی اثرات سم‌پاش‌ها بر علف‌های هرز، از علف‌کش 2-4-D به میزان ۱/۵ لیتر در هکتار و برای ارزیابی اثرات زنگ زرد، از سم تیلت به میزان ۰/۵ لیتر در هکتار استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان نشست سم در سم‌پاش بوم‌دار (۸۲/۸ درصد) بیشتر از میزان نشست در سم‌پاشی با پهیاد (۶۹/۹ درصد) بود. میانگین وزن ماده خشک علف‌های هرز در سم‌پاش بوم‌دار ۱۷۲ گرم بر مترمربع و در سم‌پاشی با پهیاد ۱۶۳ گرم بر مترمربع بود که از نظر آماری تفاوت معناداری نداشتند. همچنین، میانگین تراکم علف‌های هرز در سم‌پاش بوم‌دار ۲۵ عدد و در سم‌پاشی با پهیاد ۲۹/۳ عدد بود که از نظر آماری تفاوت معناداری نداشتند. میانگین شاخص برداشت در آزمایش‌های کنترل علف‌های هرز، در سم‌پاش بوم‌دار ۴۴ درصد و در سم‌پاشی با پهیاد ۴۱ درصد بود که از نظر آماری در سطح ۱ درصد تفاوت معناداری نداشتند. میانگین شدت آلودگی به بیماری زنگ زرد در مزارع گندم در سم‌پاش بوم‌دار ۳۰/۷ درصد و در سم‌پاشی با پهیاد ۲۵/۳ درصد بود که از نظر آماری در سطح ۱ درصد تفاوت معناداری نداشتند، ولی نسبت به شاهد (۶۸/۳ درصد) هر دو تیمار تفاوت معناداری نداشتند. شاخص برداشت در آزمایش‌های مربوط به بیماری زنگ زرد، در سم‌پاشی با پهیاد (۴۳/۸ درصد) وضعیت بهتری نسبت به سم‌پاش بوم‌دار (۴۱/۹ درصد) داشت. هزینه کل سالیانه مالکان پهیادسمپاش در این منطقه (۲۹۸۰/۳ میلیون ریال) بیشتر از هزینه کل سالیانه دارندگان سم‌پاش بوم‌دار (۵۱۳/۴۸ میلیون ریال) برآورد گردید. شاخص منفعت به هزینه در مالکان پهیادسمپاش (۱/۲۱۵) وضعیت بهتری نسبت به مالکان سم‌پاش بوم‌دار (۱/۰۳۰) داشت و نتایج نشان داد به‌کارگیری هر دو سم‌پاش اقتصادی است. در مجموع، پهیادسمپاش به دلیل کارایی و درآمدزایی بیشتر، گزینه اقتصادی‌تری برای سم‌پاشی نسبت به سم‌پاش بوم‌دار است. استفاده از پهیادها در سم‌پاشی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: اثربخشی، پهیاد، سم‌پاش بوم‌دار، منفعت به هزینه، نشست سم

مقدمه

آفت‌ها، بیماری‌های گیاهی و علف‌های هرز از چالش‌های اصلی

در تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌روند. بر اساس گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی، این عوامل سالانه حدود ۳۰ درصد از محصولات کشاورزی را در سطح جهانی نابود می‌کنند (Jafar, Bibi, Naqvi, Sadegi-Niaraki, & Jeong, 2024). روش سم‌پاشی همچنان به‌عنوان رایج‌ترین راهکار برای مقابله با این مشکلات استفاده می‌شود. تخمین زده می‌شود که حدود ۴۰ درصد از عملکرد محصولات کشاورزی تحت تأثیر سم‌پاشی قرار دارد (Khan et al., 2023). هزینه‌های مرتبط با سموم شیمیایی و وابستگی به آن‌ها برای

۱- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>

Mozaffari Gonbari, Yosefzadeh Taheri, & Soleymani,) (2019).

در بحث نشست سم به هدف، در پژوهشی میزان نشست محلول سم از هواپیماهای بدون سرنشین در محصولات برنج و مرکبات بررسی شد. نتایج نشان داد که شرایط محیطی، نوع مواد شیمیایی، خواص برگ‌ها و سیستم پاشش بر الگوی پاشش تأثیر دارند. همچنین، جریان هوای روتور پهپادها که ناشی از حرکت چرخشی تیغه‌ها است، باعث حرکت غیرقابل کنترل قطرات سم در همه جهات می‌شود. این وضعیت بر الگوی پاشش تأثیر گذاشته و منجر به تلفات آفت کش می‌شود (Zhang, Hewitt, Chen, Li, & Tang, 2023).

در تحقیقی به منظور "ارزیابی سیستم سم‌پاش هوشمند در تولید هلو" گزارش شد که سیستم سم‌پاش هوشمند در مقایسه با سم‌پاش‌های معمولی توانست حجم سم‌پاشی را تا ۴۷ درصد کاهش دهد. همچنین، پراکندگی سموم به‌طور متوسط ۴۰ درصد کمتر بود. این سیستم در کنترل آفات و بیماری‌ها به اندازه سم‌پاش‌های معمولی موثر بود، اما با مصرف کمتر سموم، بهره‌وری بیشتری داشت (Boatwright, Zhu, Clark, & Schnabel, 2020). همچنین اورک و همکاران (۲۰۲۱) به مطالعه "طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سم‌پاش خودکار به‌منظور تشخیص برخط علف‌هرز گیاه در مزارع چغندرکنند" پرداختند و گزارش نمودند سیستم سم‌پاش خودکار با استفاده از فناوری بینایی ماشین توانست مصرف سموم را تا ۳۵٪ کاهش دهد. این سیستم با شناسایی دقیق علف‌های هرز و سم‌پاشی هدفمند، کارایی بالایی در کنترل علف‌های هرز داشت و مصرف سموم به‌طور قابل توجهی کاهش یافت (Orak, Abdanan, Mehdi-zadeh, Asoodar, & Elahifard, 2021). ظرفیت نشاط و همکاران، به مطالعه "ارزیابی کارایی سم‌پاش‌های پهپادی در کنترل آفات مزارع برنج" پرداختند و گزارش نمودند پهپادهای سم‌پاش توانستند مصرف سموم را کاهش دهند. این پهپادها با شناسایی دقیق نقاط آلوده، تنها همان نقاط را سم‌پاشی کردند که منجر به کاهش مصرف سموم و افزایش بهره‌وری در کنترل آفات شد. همچنین، کارایی سم‌پاشی بهبود یافت و پوشش سموم به‌طور یکنواخت‌تری انجام شد (Zarifneshat, Saeidirad, Safari, Motamed, Alshriati, & Naseri, 2022).

پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای در راستای افزایش کارایی و کاهش مصرف سموم بوده است. این مطالعات به‌ویژه در ارزیابی اثرات فناوری‌ها بر کنترل آفات و بیماری‌ها و تجزیه و تحلیل اقتصادی آن‌ها موفق عمل کرده‌اند، با این حال هنوز کمبودهایی در بررسی اثرات بخشی این فناوری‌ها وجود دارد. هدف پژوهش حاضر، مطالعه مزرعه‌ای و اقتصادی استفاده از پهپاد سم‌پاش در مقایسه با روش‌های سنتی، با تأکید بر کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد گندم است. این تحقیق به‌منظور پرکردن

بهبود تولید، چالشی اقتصادی برای کشاورزی به‌وجود آورده است (Khan et al., 2023).

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات عملیات سم‌پاشی سنتی، توزیع یکنواخت سموم در تمامی نقاط مزرعه است که منجر به آسیب به محصولات کشاورزی، انسان‌ها، منابع و محیط‌زیست می‌شود. بدون استفاده از فناوری‌های نوین، نمی‌توان انتظار داشت که مصرف سموم بهینه و کارآمد باشد (Hamuda, Glavin, & Jones, 2016; Lu et al., 2023; Patil, Mailapalli, & Singh, 2024; Tillett, al., 2023; Haghe, Grundy, & Dedousis, 2008). با وجود این که ماهیت سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی تغییرناپذیر است، اما می‌توان با به‌کارگیری بهترین روش‌ها برای تجزیه و تحلیل نهاده‌ها، به حداکثر بهره‌وری دست یافت. (Hercher-Pasteur, Loiseau, Sinfort, Hellas, 2020; Taheri-Rad, Khojastepour, Khoramdel, & Nikkhah, 2017; Usigbe et al., 2024). مصرف غیربهینه عوامل و نهاده‌های تولید در کشاورزی پیامدهای ناگواری خواهد داشت و در صورت عدم دستیابی و استفاده از فناوری‌های نوین و اقدامات لازم برای مدیریت صحیح نهاده‌ها، اثرات زیست‌محیطی در آینده بیش از پیش افزایش می‌یابد (Baweja, Kumar, Kumar, 2020; Patil, & Mailapalli, 2020; Springmann et al., 2018).

هزینه‌های مربوط به‌کارگیری مکانیزاسیون در کشاورزی، به‌ویژه برای کنترل و مبارزه با آفات و بیماری‌ها، یکی از عوامل هزینه‌زا برای کشاورزان است (Daum, 2023; Salcedo et al., 2019). دو و همکاران گزارش کردند که استفاده از تکنیک‌های سنتی در تولید محصولات کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای باعث ایجاد تناقض بین توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست می‌شود (Dou et al., 2018).

استفاده از پهپادها (پرنده هدایت‌پذیر از دور) در زندگی بشر امروزی تقریباً مرسوم شده است. این فناوری در دهه اخیر رشد قابل توجهی داشته و کاربردهای متنوعی برای آن به‌وجود آمده است که بخش کشاورزی نیز از جمله آن‌ها است. پهپادها می‌توانند به‌عنوان بخشی از تجهیزات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند و در حال حاضر برای سم‌پاشی محصولات کشاورزی در دفع آفات به‌کار می‌روند (Bernier & Chojnaki, 2017).

در پژوهشی به‌منظور بررسی عملکرد فنی و کارایی سم‌پاش‌های پستی با مکانیزم‌های مختلف در کنترل ترپیس پیاز در منطقه خسروشاه استان آذربایجان شرقی، نتایج نشان داد که بین تیمارهای مورد بررسی (سم‌پاش موتوری پستی لانس‌دار، اتومايزر، میکرونر و الکتروستاتیک) اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت. در این میان، سم‌پاش میکرونر با میانگین ۵۶/۶۴ درصد تأثیر بر کنترل ترپیس پیاز، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داد

این تحقیق به منظور ارزیابی اثربخشی دو نوع سمپاش (پهپاد و سمپاش بوم‌دار) در مبارزه با علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد در مزرعه گندم رقم هشترود و همچنین ارزیابی اقتصادی این دو مدل سمپاش، آزمایش‌های این تحقیق در شهرستان خرم‌آباد اجرا شد. برای مطالعه، از پهپاد سم‌پاش مدل DJI Agras MG-1P و سم‌پاش بوم‌دار ۴۰۰ لیتری سوارشونده مدل B8 TF400 شرکت درخشان استفاده شد (شکل ۱).

خلأهای موجود در پژوهش‌های قبلی و ارائه راهکارهای نوآورانه و پایدار برای بهینه‌سازی بهره‌وری و سودآوری در کشاورزی انجام شده است و همچنین ابزارهای تحلیلی و تصمیم‌گیری بهتری را به کشاورزان ارائه می‌دهد تا آن‌ها بتوانند انتخاب‌های آگاهانه‌تری در استفاده از فناوری‌های نوین داشته باشند.

مواد و روش‌ها

مشخصات پهپاد

Specifications of the spraying drone

- مارک و مدل: DJI Agras MG-1P
 Brand and Model: DJI Agras MG-1P
 تعداد موتور: ۶ عدد
 The number of motors: 6
 مداومت پروازی: ۲۰ دقیقه
 Flight time: 20 Min
 ظرفیت مخزن: ۱۰ لیتر
 Tank volume: 10 Liter
 عرض پاشش: ۵ متر
 Spray width: 5 meters
 دوربین FPV (دید لحظه‌ای): ۱ عدد
 Number of FPV cameras: 1
 تعداد LED: ۲ عدد جهت پرواز در شب
 Number of LED: 2
 نوع نازل و تعداد: ۴ عدد، تی‌جت
 Number and type of nozzles: 4 TeeJet
 حداکثر ظرفیت اسپری: پنج لیتر در دقیقه
 Maximum spray capacity: 5 L Min⁻¹

مشخصات سم‌پاش بوم‌دار

Specifications of the boom sprayer

- مارک و مدل: B8 TF400
 Brand and Model: B8 TF400
 ظرفیت مخزن: ۴۰۰ لیتر
 Tank volume: 400 Liter
 جنس مخزن: پلی‌اتیلن
 Material of the tank: Polyethylene
 مدل پمپ: راتون ۸۰
 Pump model: Raton 80
 عرض پاشش: ۱۶ متر
 Spraying width: 16 meters
 نوع نازل: پاشش خطی (تی‌جت)
 Nozzle type: Flat fan (TeeJet)
 سیستم انتقال قدرت
 Power train system: PTO
 نوع فشارشکن: سه شیر دستی
 Pressure relief valve: Manual, three valves
 محدوده قابل تنظیم فشار: ۱ تا ۵ بار
 Pressure range: 1-5 bar



شکل ۱- مشخصات فنی دو سم‌پاش (سم‌پاش بوم‌دار و پهپاد)

Fig.1. Technical specifications of the two sprayers (boom sprayer and drone sprayer)

(Spencer, Khan, & Higgins, 2003).

روش اندازه‌گیری میزان نشست سم

قبل از انجام آزمایش‌های مربوط به پخش علف‌کش، آزمایشی جهت ارزیابی میزان نشست سم روی گیاه با استفاده از مخلوط آب و رنگ تارترازین آزرده رنگ (با فرمول شیمیایی: $C_{16}H_{9}N_4NA_3O_9S_2$) طراحی و اجرا گردید. این رنگ، نوعی رنگ خوراکی است که به میزان ۵ تا ۶ گرم بر لیتر در آب حل می‌شود (Gil, Gallart, Llorens, & Balsari, 2013). به‌منظور بررسی میزان نشست سم در واحد سطح، محلول آب و تارترازین بر اساس مقادیر مشخص و تنظیم‌شده سمپاشی اجرا شد و میزان نشست محلول سم روی گیاه (نقاط هدف و غیرهدف) مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام عملیات سمپاشی، جمع‌کننده‌هایی (پتری‌دیش) استفاده شد. آزمایش‌های طیف‌سنجی نوری میزان نشست پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه، نمونه‌ها (جمع‌کننده‌ها) با آب مقطر شستشو داده شدند و با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری، غلظت ماده ردیاب اندازه‌گیری شد (Pergher & Petris, 2008). به‌منظور انجام طیف‌سنجی نوری از دستگاه اسپکتروفتومتری مدل Biochrom Libra S22 UV-Vis که در شکل ۲ آورده شده است استفاده شد. این دستگاه قابلیت نمایش طول موج‌های مختلف در غلظت‌های متفاوت و میزان غلظت‌های مختلف در طول موج ثابتی را دارد (BehzadiPour, Ghasemi Nejad Raeini, Asoodar, Marzban, & Abdanan Mehdizadeh, 2017; Fathi, Ghasemi-Nejad Raeini, Abdanan Mehdizadeh, Taki, & Mardani Najafabadi, 2024; Soheilifard, Marzban, Raini, Taki, & van Zelm, 2020). در این روش، غلظت ماده ردیاب بر اساس قرائت دستگاه طیف‌سنج و روابط (۱) و (۲) محاسبه شد (Garcerá, Moltó, & Chueca, 2017).

$$C_{\text{target}} = \frac{V_w \times A_w}{D_t \times f} \quad (1)$$

$$C = \frac{C_{\text{collector}}}{S} \quad (2)$$

در این روابط، C_{target} : مقدار نشست سم در ناحیه مشخص (هدف) بر حسب میکرولیتر در هر جمع‌کننده (پتری‌دیش) A_w : قرائت دستگاه (بر حسب میکرولیتر در میلی‌لیتر آب) V_w : حجم آب استفاده‌شده برای شستشوی پتری‌دیش (میلی‌لیتر) D_t : غلظت ماده ردیاب در سمپاشی (بی‌بعد) f : درصد بازایی ماده ردیاب مورد استفاده در سمپاشی C : مقدار نشست سم در واحد سطح (بر حسب میکرولیتر بر

بر اساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده، سمپاش‌های بوم‌دار ۴۰۰ لیتری یکی از متداول‌ترین نوع سمپاش‌های پشت‌تراکتوری در بین کشاورزان منطقه می‌باشد. همچنین، پهپاد سمپاش مدل DJI Agras MG-1P نیز یکی دیگر از پهپادهای رایج در منطقه است که به این دلایل در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۱ مشخصات این دو سمپاش آورده شده است. گرچه در سال‌های اخیر به دلیل تقاضای موجود، شرکت‌های دیگری به تولید و یا واردات پهپاد سمپاشی اقدام کرده‌اند، ولی پهپادهای شرکت DJI در این منطقه به دلیل سابقه بیشتر و فراوانی بیشتر استفاده شده‌اند.

بررسی مزرعه‌ای دو سمپاش

برای بررسی اثربخشی دو نوع سمپاش (پهپاد و سمپاش بوم‌دار) در مبارزه با علف‌های هرز در مزرعه گندم رقم هشترود در شهرستان خرم‌آباد، آزمایشی در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار و سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل سمپاش بوم‌دار، پهپاد و شاهد بودند. از علف‌کش 2-4-D به مقدار ۱/۵ لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز و سم تیلت به مقدار نیم لیتر در هکتار برای کنترل بیماری زنگ زرد گندم استفاده شد. تیمارها به‌صورت تصادفی در مزرعه آزمایشی انتخاب شدند. همچنین میزان نشست سم بر روی گیاه با آزمایش‌های طیف‌سنجی بررسی شد. برای تعیین تراکم علف‌های هرز از کوادرات به مساحت یک مترمربع استفاده شد و تعداد علف‌های هرز موجود در هر کوادرات به‌عنوان تراکم علف‌های هرز در نظر گرفته شد. سپس بعد از ۲۱ روز تعداد علف‌های هرز شمارش و پس از کف‌بردن، آن‌ها را در کیسه قرار داده و جهت تعیین وزن تر و خشک به آزمایشگاه انتقال یافتند. وزن اندام هوایی علف‌های هرز موجود در یک مترمربع از هر واحد آزمایشی بعد از برداشت اندام‌های هوایی آن‌ها در نظر گرفته شد (Alipour, Karimmojeni, Zali, Razmjoo, & Jafari, 2022). شاخص برداشت با استفاده از تقسیم عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک تعیین شد. برای این کار عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک برای هر واحد آزمایشی مشخص شد و پس از آن جهت تعیین وزن خشک در داخل آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند (Porker, Straight, & Hunt, 2020). جهت ارزیابی بیماری قارچی زنگ زرد گندم نیز یک آزمایش مجزا در یک مزرعه مستقل و در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تیمار و سه تکرار اجرا گردید. ارزیابی چشمی نمره‌دهی بعد از ۱۰ روز در بازه صفر تا ۱۰۰ بر اساس شاخص استاندارد EWRC^۱ انجام گرفت. زمان سمپاشی با بازدیدهای مرتب روزانه و شروع شیوع آفت تعیین و اجرا شد (Dear, Sandral,

سانتی‌متر مربع) مقدار نشست سم در هر جمع‌کننده (بر حسب $C_{collector}$: میکرولیتر در جمع‌کننده) مساحت هر پتری‌دیش یا جمع‌کننده (بر حسب سانتی‌متر مربع) است.



شکل ۲- نمای از دستگاه طیف‌سنج نوری جهت اندازه‌گیری طول موج‌های به‌منظور تعیین غلظت ماده ردیاب
Fig. 2. A view of the optical spectrometer used for measuring wavelengths to determine the concentration of the tracer substance

شدت آلودگی به‌صورت چشمی و تقریبی بر اساس درصد سطح آلوده هر بوته در مساحت مورد نظر تخمین زده شد (Rezaei Moradali, Eivazi, & Shir Alizadeh, 2020).

علف‌های هرز مزارع

به‌منظور فراهم‌سازی شرایط یکسان برای آزمایش، عملیات آماده‌سازی زمین و کشت گندم در هر دو مزرعه به‌صورت مشابه برنامه‌ریزی و اجرا شد. این مزارع از نظر ترکیب فلور علف‌های هرز (تراکم و تنوع) تا حد بسیار زیادی یکسان بودند و برای اطمینان از این یکنواختی، ارزیابی‌های اولیه‌ای نیز انجام گرفت. در ادامه، علف‌کش در مرحله پنجه‌زنی، یعنی زمانی که تمامی علف‌های هرز به‌طور کامل ظاهر شده بودند، اعمال شد و اثرگذاری آن پس از سه هفته مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری تعداد علف‌های هرز، از چارچوب‌های مربعی استفاده شد و تعداد علف‌های هرز در هر نقطه شمارش گردید. سپس میانگین تعداد علف‌های هرز در هر مترمربع محاسبه شد. برای ارزیابی وزن ماده خشک، نمونه‌های علف‌های هرز جمع‌آوری شده و در دمای حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند (Ghaseminejad Raeini *et al.*, 2014).

بررسی و ارزیابی اقتصادی دو سم‌پاش

یکی از اهداف اصلی در کشاورزی، سودآوری است. باید تا حد امکان نرخ بهره‌وری و نهایتاً سودآوری در تولید را افزایش داد (Eskouinejad, 2020). در این تحقیق جهت ارزیابی اقتصادی دو سم‌پاش از دو شاخص اقتصادی، نسبت منفعت به هزینه (B/C) و

شاخص برداشت^۱

شاخص برداشت به نسبت عملکرد دانه به کل ماده خشک تولیدشده اطلاق می‌شود. این شاخص به‌عنوان یکی از معیارهای مهم کارایی در ارزیابی عملکرد گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص برداشت نشان‌دهنده توانایی گیاه در تبدیل ماده خشک تولیدشده به محصول نهایی قابل‌برداشت بوده و به‌طور مستقیم بازتاب‌دهنده بهره‌وری گیاه در تخصیص منابع به بخش‌های اقتصادی و اصلی آن است (Ghaseminejad Raeini *et al.*, 2014; Shabani & Sepaskhah, 2019).

$$HI = \left(\frac{GY}{BY} \right) \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، GY عملکرد دانه و BY عملکرد بیولوژیک است.

درصد بوته‌های آلوده^۲ و شدت آلودگی^۳ به زنگ زرد

درصد بوته‌های آلوده نشان‌دهنده نسبت بوته‌های آلوده به کل بوته‌ها در یک مزرعه است، در حالی که شدت آلودگی میزان یا درجه آلودگی هر بوته را مشخص می‌کند و معمولاً به‌صورت درصدی از سطح بوته که به بیماری آلوده شده است، بیان می‌شود. برای اندازه‌گیری درصد بوته‌های آلوده، ده روز پس از عملیات سم‌پاشی، تعداد بوته‌های آلوده در هر مترمربع شمارش شد و این مقدار نسبت به کل بوته‌های موجود در همان مساحت محاسبه گردید. همچنین،

- 1- Harvest index
- 2- Percentage of infected plants
- 3- Infection severity

شاخص کل هزینه به شرح ذیل استفاده شد.

محاسبات به کار گرفته شد.

شاخص B/C (نسبت منفعت به هزینه)^۱

شاخص نسبت منفعت به هزینه یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اقتصادی برای ارزیابی طرح‌ها است. این شاخص از تقسیم ارزش فعلی منفعت یک سامانه بر ارزش فعلی هزینه‌های آن به دست می‌آید. شاخص نسبت منفعت به هزینه از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Eskouinejad, 2020).

$$B/C = \frac{\text{ضررها} - \text{منافع}}{\text{هزینه‌ها (مخارج)}} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و انتخاب یکی از دو روش ارزش فعلی یا یکنواخت سالیانه^۲ می‌توان رابطه (۵) را نوشت.

$$B/C = \frac{\text{ارزش فعلی منفعت}}{\text{ارزش فعلی مخارج}} = \frac{PW_B}{PW_C} \quad (5)$$

چنانچه $B/C \geq 1$ باشد طرح اقتصادی است و اگر $B/C < 1$ باشد طرح غیراقتصادی خواهد بود.

همچنین با بررسی به عمل آمده در سال ۱۴۰۲ در منطقه (مصاحبه و اطلاعات پرسشنامه‌ای) مشخص گردید که به طور میانگین میزان استفاده از پهپادها (کارکرد در سال) در این منطقه سالانه ۶۱۵ هکتار و دستمزد هر هکتار سمپاشی با پهپاد به طور متوسط ۵/۸۹ میلیون ریال می‌باشد و در مقابل استفاده سالانه از سمپاش بوم‌دار ۱۳۵/۵ هکتار و نرخ اجاره بها با این نوع سمپاشی ۳/۹ میلیون ریال می‌باشد.

شاخص کل هزینه

هزینه کل از مجموع هزینه ثابت و متغیر به دست می‌آید. در این پژوهش هزینه برحسب میلیون ریال محاسبه شد. هزینه‌ی کل از مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر به دست آمد (Ying & Tsai, 2017). در این تحقیق هزینه‌های متغیر شامل هزینه سموم، کود شیمیایی و حیوانی، نیروی انسانی، ماشین، الکتریسیته، سوخت، بذر، مورد نیاز برای سیستم کشت گندم در نظر گرفته شد. میزان استهلاک، هزینه سرویس و نگهداری، هزینه تعمیرات، و عمر ماشین‌ها بر اساس استاندارد ASAE D497.7 و منابع معتبر لحاظ شد (Almasi, 2011; Kiani, & Louimi, 2014). هزینه‌های متغیر شامل هزینه سوخت، هزینه نیروی انسانی و سایر هزینه‌ها بر اساس نرخ رایج در کشور و عرف منطقه در نظر گرفته شد. سایر اطلاعات مورد نیاز شامل ظرفیت مزرعه‌ای ماشین‌ها و سرعت پیشروی از منابع مختلف (اندازه‌گیری در مزرعه و پرسشنامه) استخراج گردید و در

نتایج و بحث

بررسی اثر نوع سمپاش بر پارامترهای فنی میزان نشست

سم در سمپاشی

جدول ۱ تجزیه واریانس، اثر نوع سمپاش بر میزان نشست سمپاشی را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که اثر نوع سمپاش بر این شاخص در سطح یک درصد معنی‌دار است. این بدین معناست که سمپاشی بوم‌دار در مقایسه با سمپاشی با پهپاد، میزان نشست بالاتری از خود نشان می‌دهد. مطالعات مشابه نشان داده‌اند که نوع سمپاش و سرعت پیشروی آن تأثیر قابل توجهی بر کیفیت سمپاشی دارند. به عنوان مثال، در تحقیقی که به مقایسه سمپاش‌های نرخ ثابت و نرخ متغیر پرداخته شد، نتایج نشان دادند که سمپاش‌های نرخ متغیر در سرعت‌های پیشروی مختلف، میزان نشست سم و کارایی پاشش بهتری دارند. همچنین، استفاده از افشانک‌های کمک هوا در سمپاش‌های بوم‌دار باعث کاهش بادبردگی و افزایش یکنواختی پاشش شده است (Fathi et al., 2024).

شکل ۳ اثر نوع سمپاش (سمپاش بوم‌دار و پهپاد) بر شاخص میزان نشست را نشان می‌دهد. میانگین میزان نشست در حالت سمپاش بوم‌دار برابر با ۸۲/۷ درصد و در حالت سمپاشی با پهپاد برابر با ۶۹/۹ درصد به دست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با هم دارند. این نتایج با مطالعات سعید ظریف‌نشاط و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد که نشان می‌دهد پهپاد سمپاش دارای بیشترین میزان بادبردگی و در نتیجه کمترین میزان نشست قطرات سم در مقایسه با سمپاش‌های بوم‌دار می‌باشد (Zarifneshat et al., 2022).

جدول ۲ تجزیه واریانس، اثر تیمار نوع سمپاش در مبارزه با علف‌های هرز در مزارع گندم را نشان می‌دهد. این جدول نشان داد که اثر این تیمارها بر تراکم (تعداد) علف‌های هرز در مزرعه معنی‌دار نشد اما وزن ماده خشک علف‌های هرز و شاخص برداشت مزرعه گندم در هر دو سمپاش نسبت به شاهد در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. با توجه به معنی‌دار شدن اثر سمپاشی بر وزن خشک علف‌های هرز، شاخص برداشت در این دو تیمار سمپاشی نسبت به شاهد مقدار بالاتری به خود اختصاص دادند.

شکل ۴ تأثیر نوع سمپاش (سمپاش بوم‌دار و پهپاد) را بر وزن ماده خشک علف‌های هرز و شاخص برداشت در مقایسه با تیمار شاهد نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که وزن ماده خشک علف‌های هرز در هر دو روش سمپاشی به طور معناداری کمتر از تیمار شاهد است. میانگین وزن ماده خشک علف‌های هرز در سمپاش بوم‌دار برابر با ۱۷۲ گرم بر مترمربع و در سمپاشی با پهپاد سمپاش برابر با ۱۶۳ گرم بر مترمربع بوده و از نظر آماری تفاوت معناداری نداشته‌اند.

1- Benefit–Cost Ratio

2- Equivalent Uniform Annual Benefit (EUAB) or Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)

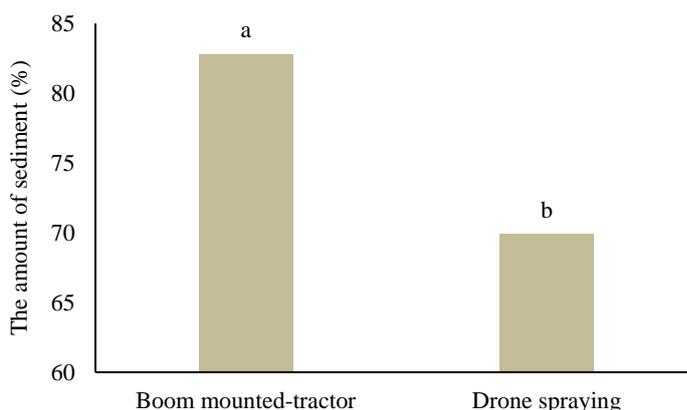
جدول ۱- تجزیه واریانس اثر نوع سم‌پاش بر میزان نشست سم در سم‌پاشی

Table 1- Analysis of variance (ANOVA) for the effect of sprayer type on pesticide deposition amount in spraying

پارامترها Parameters	منابع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F	Sig.
میزان نشست Deposition amount	بین گروهی Between Groups	748.845	748.845	128.321	0.000**
	درون گروهی Within Groups	93.371	5.836		
	کل Total	842.216			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, and **Significant at the probability level of 1%



شکل ۳- اثر نوع سم‌پاش بر پارامترهای فنی سم‌پاشی: نمودار میزان نشست

Fig. 3. Effect of sprayer type on technical spraying parameters: settlement rate diagram

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر دو تیمار سم‌پاشی بوم‌دار و پهپاد سم‌پاش نسبت به تیمار شاهد، جهت کنترل علف‌های هرز در مزرعه گندم

Table 2- Analysis of Variance (ANOVA) of the effects of boom and drone spraying treatments compared to the control treatment on weed control in wheat fields

پارامترها Parameters	منابع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F	Sig.
تعداد علف‌های هرز Number of weeds	بین گروهی Between groups	324.22	162.11	4.17	0.073 ^{ns}
	درون گروهی Within groups	233.33	38.89		
	کل Total	557.55			
وزن ماده خشک علف‌های هرز Dry matter weight of weeds	بین گروهی Between groups	97068.22	48538.11	23.99	0.001**
	درون گروهی Within groups	12135.33	2022.55		
	کل Total	109203.55			
شاخص برداشت Harvest Index	بین گروهی Between groups	40.93	20.46	11.26	0.009**
	درون گروهی Within groups	10.9	1.81		
	کل Total	51.83			

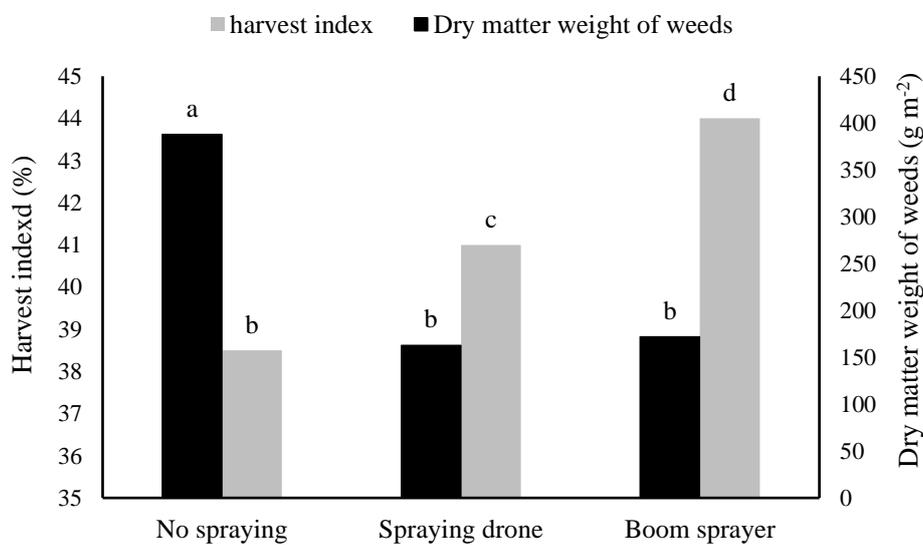
ns: غیر معنی‌دار، ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, and **Significant at the probability level of 1%

حجم بیشتر پخش در مزرعه و پوشش کامل‌تر علف‌های هرز، به نظر می‌رسد که اثربخشی آن زودتر و مدت طولانی‌تری بوده است. این امر سبب شده است که رقابت علف‌های هرز با گندم زودتر کنترل گردد و شاخص برداشت مطلوب‌تری در سمپاش بوم‌دار حاصل شود. نتایج این پژوهش با یافته‌های ظریف‌نشاط و همکاران که عملکرد پهپاد سمپاش را در مقایسه با سمپاش بوم‌دار تراکتوری و سمپاش توریب بررسی کرده بودند، هم‌خوانی دارد. آن‌ها نیز اثربخشی مشابهی برای هر دو روش گزارش کرده‌اند (Zarifneshat *et al.*, 2022).

علاوه بر این، شاخص برداشت نیز در هر دو روش سمپاشی نسبت به تیمار شاهد بهبود یافته است. میانگین شاخص برداشت در سمپاش بوم‌دار ۴۴ و در سمپاشی با پهپاد سمپاش ۴۱ بوده است که از نظر آماری تفاوت معناداری را نشان داده‌اند. همچنین، تراکم علف‌های هرز در این دو روش سمپاشی تفاوت معناداری نداشت؛ به طوری که میانگین تراکم علف‌های هرز در سمپاش بوم‌دار ۲۵ و در سمپاشی با پهپاد سمپاش ۲۹/۳ به دست آمد.

این یافته‌ها بیانگر آن است که هر دو روش سمپاشی در کنترل علف‌های هرز کارآمد بوده‌اند. با این حال، سمپاش بوم‌دار به دلیل



شکل ۴- اثر روش‌های سمپاشی نسبت به شاهد بر شاخص برداشت و وزن خشک علف‌های هرز در مزرعه گندم

Fig. 4. Effect of spraying methods compared to control on harvest index and dry weight of weeds in wheat fields

این میانگین در حالت سمپاش بوم‌دار برابر با ۳۰/۷ درصد و در سمپاشی با پهپاد برابر با ۲۵/۳ درصد به دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری دارند. همچنین، میانگین درصد بوته‌های آلوده به بیماری زنگ زرد در سمپاش بوم‌دار و پهپاد به ترتیب ۱۶/۳ و ۱۶/۶۷ به دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری ندارند.

نتایج تحقیق نشان می‌دهند که استفاده از سم تبلیث به‌عنوان یک قارچ‌کش مؤثر در کنترل بیماری زنگ زرد (*Puccinia striiformis*) در هر دو روش سمپاشی (سمپاش بوم‌دار و پهپاد سمپاش) از گسترش قارچ جلوگیری کرده است. همچنین، مزارع سمپاشی شده نسبت به مزارع شاهد آلودگی کمتری به این قارچ داشتند که این کاهش آلودگی به دلیل اثربخشی این سم در مهار گسترش قارچ بوده است. با این حال، به نظر می‌رسد که تمامی بوته‌ها قبل از انجام سمپاشی به‌صورت نهان به بیماری زنگ زرد آلوده شده

جدول ۳ تجزیه واریانس، اثر نوع سمپاش در مبارزه با بیماری زنگ زرد گندم را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان داد که درصد بوته‌های آلوده بیماری زنگ زرد غیرمعنی‌دار اما شاخص‌های شدت آلودگی بیماری زنگ زرد، و شاخص برداشت مزرعه گندم در دو نوع سمپاش نسبت به شاهد در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. با توجه به معنی‌دار شدن اثر سمپاشی بر بیماری زنگ زرد گندم، شاخص برداشت در این دو تیمار نسبت به شاهد مقدار بالاتری به خود اختصاص دادند.

شکل ۵، اثر نوع سمپاش (سمپاش بوم‌دار و پهپاد) بر سه شاخص شدت آلودگی بیماری زنگ زرد، درصد بوته‌های آلوده به این بیماری و شاخص برداشت مزرعه گندم را نسبت به تیمار شاهد نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، میانگین شدت آلودگی بیماری زنگ زرد در سمپاش بوم‌دار و سمپاشی با پهپاد نسبت به تیمار شاهد بیشتر است.

است. این یافته‌ها با نتایج سایر مطالعات موجود هم‌راستا هستند (Safavi, 2019). همچنین، نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات لوست فیهو و همکاران و سوبرامانیان و همکاران هم‌خوانی دارد. این مطالعات بیان می‌کنند که به‌کارگیری فناوری‌های نوین، به‌ویژه استفاده از پهپاد، می‌تواند به بهبود کارایی کنترل آفات، کاهش استفاده از مواد شیمیایی و نهایتاً کمک به مدیریت بهتر آفات و بیماری‌ها منجر شود. بر اساس نتایج این تحقیق، گرچه از نظر مبارزه با بیماری زنگ زرد در دو روش سم‌پاشی تفاوتی مشاهده نشد، اما در شاخص برداشت، استفاده از پهپاد نسبت به سم‌پاش بوم‌دار عملکرد بهتری داشت که به نظر می‌رسد این تفاوت به دلیل نفوذ بهتر محلول سم به داخل مزرعه و اثر باد ایجادشده توسط روتورهای پهپاد باشد. در سم‌پاشی با پهپاد، نفوذ محلول سم به تمام قسمت‌های گیاه به دلیل باد ایجادشده توسط روتورها کنترل آلودگی بهتری نشان داد، که با نتایج مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد (Iost Filho, Heldens, Kong & Lango, 2020; Subramanian, Pazhanivelan, & Srinivasan, Santhi & Sathiah, 2021).

بودند. بنابراین، نقش سم‌پاشی، بیشتر در کاهش سرعت گسترش و شدت آلودگی بوده است تا جلوگیری کامل از آن. این یافته‌ها نشان می‌دهند که سم تیلیت می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در مدیریت بیماری زنگ زرد استفاده شود، اما برای جلوگیری کامل از آلودگی، زمان‌بندی مناسب سم‌پاشی و استفاده از روش‌های پیش‌گیرانه دیگر ضروری است. میانگین شاخص برداشت در هر دو روش سم‌پاشی نسبت به تیمار شاهد بهتر بود. این میزان در سم‌پاش بوم‌دار برابر با ۴۰/۷ و در سم‌پاشی با پهپاد برابر با ۴۳/۸ به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری دارند. بیماری زنگ زرد تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد گندم دارد و عامل آن *Puccinia striiformis f. sp. tritici* یکی از مخرب‌ترین بیماری‌های گندم نان در سطح جهانی به‌شمار می‌رود. این بیماری به‌عنوان تهدیدی دائمی برای تولید گندم در بسیاری از کشورهای آسیای مرکزی و غربی شناخته می‌شود (Safavi, 2019).

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که نوع سمپاش (بوم‌دار و پهپاد) در کنترل بیماری زنگ زرد مؤثر بوده و در نهایت موجب بهبود شاخص برداشت در مزارع سم‌پاشی شده نسبت به مزارع شاهد گردیده

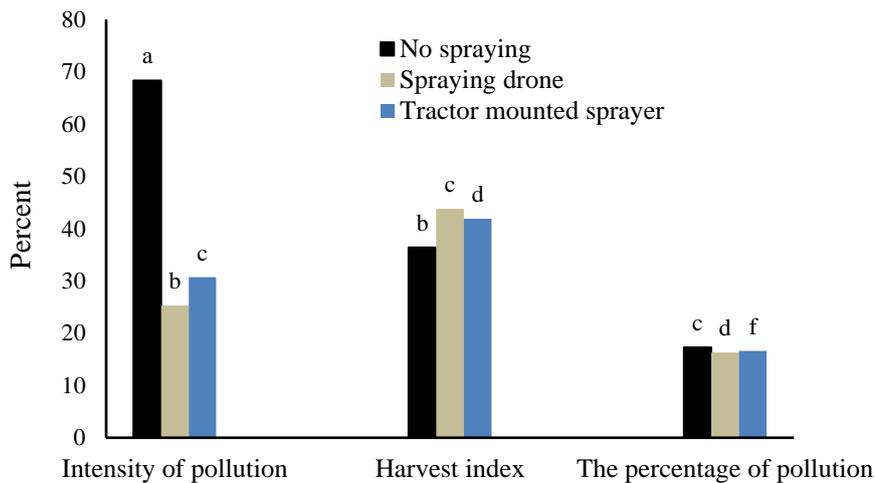
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر دو تیمار سم‌پاشی بوم‌دار و پهپاد نسبت به شاهد، جهت مبارزه با بیماری زنگ زرد گندم

Table 3- Analysis of Variance (ANOVA) of the effects of boom and drone spraying treatments compared to control on yellow rust disease in wheat fields

پارامترها Parameters	منابع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F	Sig.
درصد بوته‌های آلوده Infected plants percentage	بین گروهی Between groups	1.56	0.78	0.101	0.905 ^{ns}
	درون گروهی Within groups	46	7.67		
	کل Total	47.56			
شدت آلودگی Infection severity	بین گروهی Between groups	3296.22	1648.11	69.63	0.000**
	درون گروهی Within groups	142	23.66		
	کل Total	3438.22			
شاخص برداشت Harvest Index	بین گروهی Between groups	88.14	44.07	101.71	0.000**
	درون گروهی Within groups	2.6	0.43		
	کل Total	90.7			

ns: غیر معنی‌دار، ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, and **Significant at the probability level of 1%



شکل ۵- اثر روش‌های سم‌پاشی نسبت به شاهد بر درصد بوته‌های آلوده، شدت آلودگی و شاخص برداشت در مبارزه با بیماری زنگ زرد گندم
Fig.5. Effect of spraying methods compared to control on the percentage of infected plants, infection intensity, and harvest index in controlling yellow rust disease in wheat fields

استهلاک با ۱۱۸/۶۱ میلیون ریال (۲۳/۱ درصد از هزینه کل) است. این داده‌ها نشان‌دهنده سهم بالاتر هزینه‌های ثابت نسبت به متغیر در سمپاش بوم‌دار است. به‌طور کلی، تحلیل داده‌ها بیانگر آن است که سمپاشی با پهپاد به دلیل هزینه‌های بالای تعمیرات و بهره‌سرمايه، هزینه‌های سالیانه و هکتاری بیشتری در مقایسه با سمپاشی بوم‌دار به خود اختصاص می‌دهد.

نسبت منافع به هزینه

جدول ۵ خلاصه اطلاعات هزینه‌ها و درآمدها و همچنین شاخص منفعت به هزینه در دو سم‌پاش بوم‌دار و پهپاد را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، میزان کارکرد پهپاد ۴/۵ برابر بیشتر از سم‌پاش بوم‌دار است (البته ۱۳/۴ درصد از کارکرد تراکتور در سال به عملیات سم‌پاشی اختصاص می‌یابد و ۸۶/۶ درصد از کارکرد تراکتور مربوط به سایر عملیات‌ها است) و همچنین متوسط دستمزد سم‌پاشی با پهپاد ۱/۵ برابر سم‌پاش بوم‌دار می‌باشد. میانگین درآمد سالانه در به‌کارگیری و مالکیت پهپاد در منطقه ۳۶۲۲/۳۵ میلیون ریال و برای سم‌پاش بوم‌دار ۵۲۹/۱۲ میلیون ریال به‌دست آمد. میانگین هزینه سالیانه به‌کارگیری و مالکیت پهپاد (۲۹۸۰/۳ میلیون ریال) بیشتر از سم‌پاش بوم‌دار (۵۱۳/۴۸ میلیون ریال) است. شاخص منفعت به هزینه این جدول نشان داد که به‌کارگیری هر دو سم‌پاش در منطقه بر اساس میانگین کارکرد سالیانه اقتصادی است، زیرا این شاخص در هر دو سم‌پاش بیشتر از ۱ به‌دست آمد. شاخص منفعت به هزینه در پهپاد (۱/۲۱۵) بهتر از سم‌پاش بوم‌دار (۱/۰۳) شد. در مجموع نتایج نشان می‌دهد که پهپادها، با وجود هزینه‌های بالاتر، به دلیل کارایی و

ارزیابی شاخص‌های اقتصادی

هزینه کل سم‌پاشی (هزینه سالیانه)

در جدول ۴ کل هزینه‌های سالیانه استفاده از دو نوع سم‌پاش شامل هزینه‌های اولیه (سرمايه اولیه) و همچنین هزینه‌های ثابت و متغیر به‌دست آمده است. مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر استفاده از پهپاد و تجهیزات جانبی سالانه ۲۹۸۰/۳ میلیون ریال و مجموع هزینه‌های استفاده از سم‌پاش بوم‌دار ۵۱۳/۴۸ میلیون ریال محاسبه شد.

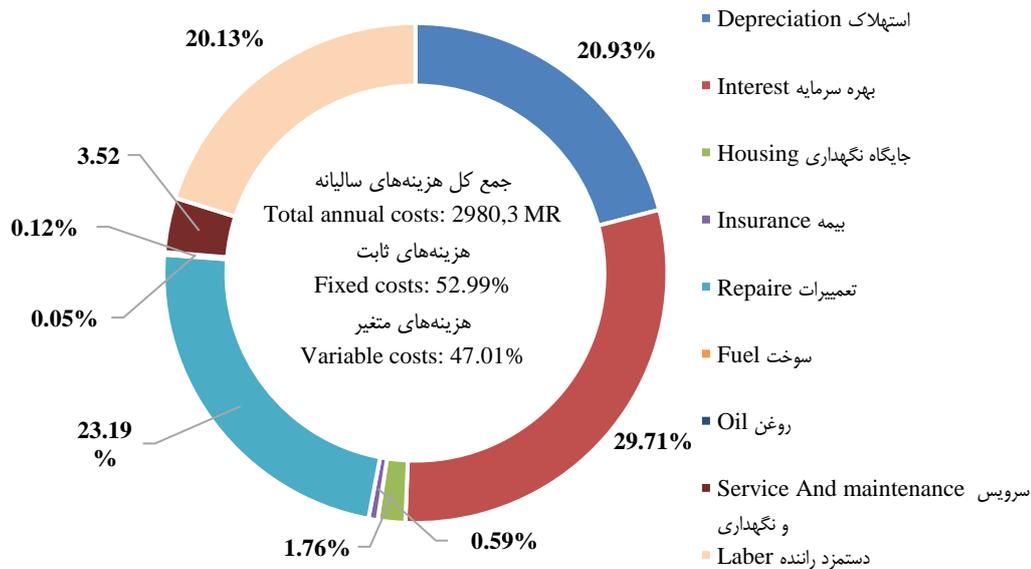
شکل ۶، نمودار درصد هزینه‌های ثابت و متغیر سالیانه در سمپاشی با پهپاد را نشان می‌دهد. هزینه‌های ثابت در این روش برابر با ۱۵۷۹/۲ میلیون ریال (۵۲/۹۹ درصد از هزینه کل) و هزینه‌های متغیر برابر با ۱۴۰۱/۱ میلیون ریال (۴۷/۰۱ درصد از هزینه کل) است. بیشترین سهم هزینه در این نوع سم‌پاشی مربوط به بهره‌سرمايه، معادل ۸۸۵/۵ میلیون ریال (۲۹/۷۱ درصد از هزینه کل) است و در رتبه دوم، هزینه تعمیرات با میزان ۶۹۱ میلیون ریال (۲۳/۱۹ درصد از هزینه کل) قرار دارد. افزایش هزینه تعمیرات عمدتاً به دلیل هزینه تعویض باتری است.

در مقابل، هزینه‌های ثابت در سمپاش بوم‌دار معادل ۳۲۳/۹ میلیون ریال (۶۳/۰۸ درصد از هزینه کل) و هزینه‌های متغیر برابر با ۱۸۹/۵۸ میلیون ریال (۳۶/۹۲ درصد از هزینه کل) است. برخلاف سم‌پاشی با پهپاد، سهم هزینه‌های متغیر در سمپاش بوم‌دار کمتر است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین سهم هزینه‌ها در این نوع سم‌پاشی مربوط به بهره‌سرمايه، معادل ۱۹۰/۲۵ میلیون ریال (۳۷/۰۵ درصد از هزینه کل)، و در رتبه دوم، هزینه

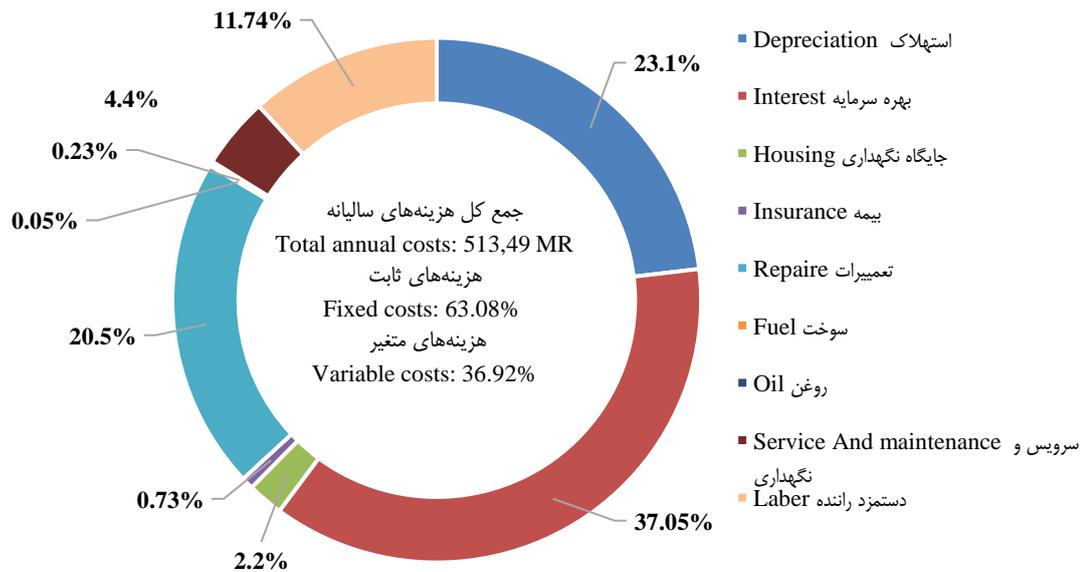
درآمذزایی بیشتر، گزینه‌های اقتصادی‌تر برای سم‌پاشی در مقایسه با سم‌پاش‌های بوم‌دار هستند. استقبال بیشتر کشاورزان از فناوری پهپاد، قابلیت کارکرد پهپاد در شرایط نامطلوب رطوبتی مزرعه، عدم لهیدگی محصول در زمان استفاده از دلایل اصلی این منفعت بیشتر است. بنابراین، استفاده از پهپادها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد.

جدول ۴- کل هزینه‌های سالیانه مالکیت سم‌پاشی مزرعه گندم با کاربرد دو نوع سم‌پاش پهپاد و مرسوم
Table 4- Total annual costs of wheat field spraying using drone and conventional sprayers

هزینه‌ها Costs	نوع هزینه Cost type	پهپاد سم‌پاش Drone sprayer (Million rials per year)		تراکتور (کل عملیات‌ها) Tractor (total costs)	سم‌پاش بوم‌دار Boom sprayer (Million rials per year)	
		پهپاد Drone	ژنراتور Generator		تراکتور (سه‌م هزینه‌ای عملیات سم‌پاشی: ۱۳/۴٪ از کل عملیات‌ها است) Tractor (Cost share of spraying operations: 13.4% of total operations)	سم‌پاش بوم‌دار Boom sprayer
هزینه اولیه Initial cost	سرمایه اولیه Initial capital	6700	300	6000	897.8	700
	جمع Sum		7000		1597.8	
هزینه‌های ثابت Fixed costs	استهلاک Depreciation	603	20.7	415	55.61	63
	بهره سرمایه Interest	847.55	37.95	795	101.7	88.55
	جایگاه نگهداری ماشین Housing	50.25	2.25	45	6.03	5.25
	بیمه Insurance	16.75	0.75	15	2.01	1.75
	جمع هزینه‌های ثابت Total Fixed costs	1517.55	61.65		165.35	158.55
هزینه‌های متغیر Variable costs	تعمیرات Repaire	670	21	420	56.28	49
	سوخت Fuel	0	3.6	1.8	0.24	0
	روغن Oil	0	1.5	9	1.2	0
	سرویس و نگهداری Service and maintenance	100.5	4.5	90	12.06	10.5
	دستمزد راننده Labor	600	0	450	60.3	0
جمع هزینه‌های متغیر Total Variable costs	1370.5	30.6		130.08	59.5	
جمع کل هزینه‌های سالیانه Total annual costs		2888.05	92.25		295.43	218.05
		2980.3 (MR yr ⁻¹)			513.48 (MR yr ⁻¹)	
		4.846 (MR ha ⁻¹)			3.789 (MR ha ⁻¹)	



شکل ۶- درصد هزینه‌های ثابت و متغیر سالیانه در سم‌پاشی با پهپاد
Fig. 6. The annual fixed and variable costs percentage in drone spraying



شکل ۷- درصد هزینه‌های ثابت و متغیر سالیانه در سم‌پاشی بوم‌دار
Fig. 7. The annual fixed and variable costs percentage in boom spraying

معناداری داشت. شاخص‌های شدت آلودگی، درصد بوته‌های آلوده و شاخص برداشت در دو نوع سم‌پاش نسبت به شاهد در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. میانگین شدت آلودگی در سم‌پاش بوم‌دار ۳۰/۷ درصد و در پهپاد ۲۵/۳ درصد بود. شاخص برداشت مزارع سم‌پاشی شده با پهپاد (۴۳/۸) بهتر از سم‌پاش بوم‌دار (۴۱/۹) بود که تفاوت آماری معناداری داشت. همچنین درصد میزان نشست سم در

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که سم‌پاش بوم‌دار به دلیل میزان نشست سم بالاتر نسبت به سم‌پاشی با پهپاد کارایی بیشتری دارد. میانگین تراکم علف‌های هرز در سم‌پاش بوم‌دار ۲۵ عدد و در سم‌پاشی با پهپاد ۲۹/۳ بود که از نظر آماری تفاوت معناداری داشت. میانگین شاخص برداشت در سم‌پاش بوم‌دار ۴۴ و در سم‌پاشی با پهپاد ۴۱ بود که تفاوت آماری

سم‌پاشی در مقایسه با سمپاش‌های بوم‌دار در این منطقه و احتمالاً در ایران هستند. استقبال بیشتر کشاورزان از فن‌آوری پهپاد، قابلیت کارکرد پهپاد در شرایط نامطلوب رطوبتی مزرعه، عدم لهیدگی محصول در زمان استفاده و دستمزد بالاتر به‌کارگیری پهپاد از دلایل اصلی این منفعت بیشتر است. بنابراین، استفاده از پهپادها می‌تواند به‌طور قابل توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد.

سم‌پاش‌بوم‌دار بهتر از سم‌پاشی با پهپاد بود. مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر استفاده از پهپاد و تجهیزات جانبی سالانه آن ۲۹۸۰/۳ میلیون ریال در سال و برای سمپاش بوم‌دار ۵۱۳/۴۸ میلیون ریال در سال محاسبه شد. شاخص منفعت به هزینه در پهپاد (۱/۲۱۵) بهتر از سم‌پاش‌بوم‌دار (۱/۰۳۰) بود. در مجموع با توجه به شاخص منفعت به هزینه، نتایج نشان می‌دهد که پهپادها، با وجود هزینه‌های بالاتر، به دلیل کارایی و درآمدزایی بیشتر، گزینه‌های اقتصادی‌تری برای

جدول ۵- خلاصه میانگین اطلاعات کارگرد، دستمزد و شاخص منفعت به هزینه در سم‌پاش‌ها

Table 5- Summary of Average Labor Information, Wages, and Benefit-Cost Ratio in Sprayers

نوع سم‌پاش Type of sprayer	میانگین کارکرد سالانه Average annual operation (ha)	میانگین دستمزد Average salary (MR ha ⁻¹)	میانگین درآمد Average income (MR yr ⁻¹)	میانگین هزینه Average cost (MR yr ⁻¹)	شاخص منفعت به هزینه Benefit-cost index
پهپاد Drone	615	5.89	3622.35	2980.3	1.215
سم‌پاش بوم‌دار Boom sprayer	135.5	3.905	529.12	513.48	1.030

مشارکت نویسندگان

مجتبی صفائی نژاد: جمع‌آوری داده‌ها، خدمات نرم‌افزاری، استخراج و تهیه متن اولیه
 محمود قاسمی نژاد رائینی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، پردازش داده‌ها، ویرایش متن، تحلیل آماری، مشاوره فنی و تحلیل آماری
 مرتضی تاکی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، ویرایش متن و مشاوره فنی

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از رساله دکتری گروه مهندسی مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان می‌باشد. با تشکر از معاونت پژوهشی دانشگاه که حمایت مالی این پژوهش را بر عهده گرفت.

References

- Alipour, A., Karimmojeni, H., Zali, A. G., Razmjoo, J., & Jafari, Z. (2022). Weed management in *Allium hirtifolium* L. production by herbicides application. *Industrial Crops and Products*, 177, 114407. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114407>
- Almasi, M., Kiani, S., & Louimi, N. (2014). *Fundamentals of agricultural mechanization*. Goftehan Andisheh Moaser Press
- American Society of Agricultural Engineers. (2011). ASAE D497.7: *Agricultural machinery management data*. St. Joseph, MI: ASAE. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=36431>
- Baweja, P., Kumar, S., & Kumar, G. (2020). Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment. In *Soil Health* (pp. 265-285). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_15
- BehzadiPour, F., Ghasemi Nejad Raeini, M., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2017). The regression analysis of technical factors on the drift and droplets size at the spraying by using from Laboratory and software. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(1), 101-109. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61565>
- Berner, B., & Chojnacki, J. (2017). Influence of the air stream produced by the drone on the sedimentation of the liquid sprayed that contains entomopathogenic nematodes. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 3, 1-8.
- Boatwright, H., Zhu, H., Clark, A., & Schnabel, G. (2020). Evaluation of the Intelligent Sprayer System in peach production. *Plant Disease*, 104(12), 3207-3212. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-20-0696-RE>
- Daum, T. (2023). Mechanization and sustainable agri-food system transformation in the Global South. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, 16. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00868-x>

9. Dear, B. S., Sandral, G. A., Spencer, D., Khan, M. R. I., & Higgins, T. J. V. (2003). The tolerance of three transgenic subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) lines with the bxn gene to herbicides containing bromoxynil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54(2), 203-210. <https://doi.org/10.1071/AR02134>
10. Dou, H., Zhang, C., Li, L., Hao, G., Ding, B., Gong, W., & Huang, P. (2018). Application of variable spray technology in agriculture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 186(5), 012007. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/5/012007>
11. Eskouinejad, M. M. (2020). Engineering Economics (Economic Evaluation of Industrial Projects). *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 3, 1-8.
12. Fathi, R., Ghasemi-Nejad Raeini, M., Abdanan Mehdizadeh, S., Taki, M., & Mardani Najafabadi, M. (2024). Comparison and evaluation of common orchard sprayers with variable-rate sprayers. *Journal of Agricultural Machinery* 14(4), 405-427. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198>
13. Garcerá, C., Moltó, E., & Chueca, P. (2017). Spray pesticide applications in Mediterranean citrus orchards: Canopy deposition and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 599, 1344-1362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.029>
14. Ghaseminejad Raeini, M., Sheikh Davoodi, M., Almasi, M., Bahrami, H., Zand, E., & Alamisaieid, K. (2014). Effects of tillage, fertilization and weed control methods on corn yield in the northern part of Khuzestan. *World Applied Sciences Journal*, 20(4), 502-511. https://agrieng.scu.ac.ir/article_10475.html?lang=en
15. Gil, E., Gallart, M., Llorens, J., & Balsari, P. (2013). Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: The influence of environmental variables and sprayer settings. *Sustainability*, 9(5), 728. <https://doi.org/10.3390/su9050728>
16. Hamuda, E., Glavin, M., & Jones, E. (2016). A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 184-199. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.024>
17. Hercher-Pasteur, J., Loiseau, E., Sinfort, C., & Helias, A. (2020). Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 29. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2>
18. Iost Filho, F. H., Heldens, W. B., Kong, Z., & de Lange, E. S. (2020). Drones: Innovative technology for use in precision pest management. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 1-7. <https://doi.org/10.1093/jee/toz268>
19. Jafar, A., Bibi, N., Naqvi, R. A., Sadeghi-Niaraki, A., & Jeong, D. (2024). Revolutionizing agriculture with artificial intelligence: Plant disease detection methods, applications, and their limitations. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1356260. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1356260>
20. Khan, B. A., Nadeem, M. A., Nawaz, H., Amin, M. M., Abbasi, G. H., Nadeem, M., Ali, M., Ameen, M., Javaid, M. M., Maqbool, R., Ikram, M., & Ayub, M. A. (2023). Pesticides: Impacts on agriculture productivity, environment, and management strategies. In T. Aftab (Ed.), *Emerging contaminants and plants* (pp. 109-134). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5
21. Lu, X., Campos, J., Salas, B., Fabregas, F. X., Zhu, H., & Gil, E. (2023). Advanced spraying systems to improve pesticide saving and reduce spray drift for apple orchards. *Precision Agriculture*, 24, 1526-1546. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10007-x>
22. Mansfield, B., Werner, M., Berndt, C., Shattuck, A., Galt, R., Williams, B., Argüelles, L., Barri, F. R., Ishii, M., Kunin, J., Lapegna, P., Romero, A., Caicedo, A., Abhigya, Castro-Vargas, M. S., Marquez, E., Ojeda, D., Ramirez, F., & Tittor, A. (2023). A new critical social science research agenda on pesticides. *Agriculture and Human Values*, 41, 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10492-w>
23. Mozaffari Gonbari, M., Yosefzadeh Taheri, M. R., & Soleymani, J. (2019). Investigation of technical performance and efficiency of different backpack sprayers on onion thrips control. *Agricultural Mechanization Journal*, 4(2), 121-132. https://jam.tabrizu.ac.ir/article_9589.html?lang=en
24. Orak, H., Abdanan Mehdizadeh, S., Asoodar, M. A., & Elahifard, E. (2021). Design, construction, and evaluation of an automatic sprayer system for online weed-plant detection in sugar beet fields. *Journal of Sugar Beet*, 37(2), 223-238. <https://doi.org/10.22092/jsb.2022.355302.1298>
25. Patil, A. S., & Mailapalli, D. R. (2020). Fertilizers and pesticides: Their impact on soil health and environment. In *Sustainable Agriculture* (pp. 345-367). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_15
26. Patil, A. S., Mailapalli, D. R., & Singh, P. K. (2024). Drone technology reshaping agriculture: A meta-review and bibliometric analysis on fertilizer and pesticide deployment. *Journal of Biosystems Engineering*, 49, 382-398. <https://doi.org/10.1007/s42853-024-00240-1>
27. Pergher, G., & Petris, R. (2008). The effect of air flow rate on spray deposition in a Guyot-trained vineyard. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 10, 08010. <https://doi.org/10.13140/2.1.1488.4480>
28. Porker, K., Straight, M., & Hunt, J. R. (2020). Evaluation of G×E×M interactions to increase harvest index and yield of early sown wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11, 994. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00994>
29. Rezaei Moradali, M., Eivazi, A. R., & Shir Alizadeh, S. (2020). Effect of yellow rust disease on agronomic and physiological characteristics of winter and facultative bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Iranian*

- Journal of Crop Sciences*, 22(1), 81-93. <https://doi.org/10.29252/abj.22.1.81>
30. Safavi, S. (2019). Effectiveness of Resistance Genes to Stripe Rust and Virulence of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* During two Years Monitoring in Ardabil. *Journal of Applied Research in Plant Protection*, 8(3), 95-107. https://arpp.tabrizu.ac.ir/article_9730.html
 31. Salcedo, R., Pons, P., Llop, J., Zaragoza, T., Campos, J., Ortega, P., Gallart, M., & Gil, E. (2019). Dynamic evaluation of airflow stream generated by a reverse system of an axial fan sprayer using 3D-ultrasonic anemometers. Effect of canopy structure. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.006>
 32. Shabani, A., & Sepaskhah, A. R. (2019). Reviewing the harvest index estimation in crop modeling. *Iran Agricultural Research*, 38(2), 1-8. <https://doi.org/10.22099/iar.2019.5455>
 33. Soheilifard, F., Marzban, A., Raini, M. G., Taki, M., & van Zelm, R. (2020). Chemical footprint of pesticides used in citrus orchards based on canopy deposition and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 732, 139118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139118>
 34. Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519-525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
 35. Subramanian, K. S., Pazhanivelan, S., Srinivasan, G., Santhi, R., & Sathiah, N. (2021). Drones in insect pest management. *Frontiers in Agronomy*, 3, 640885. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.640885>
 36. Taheri-Rad, A., Khojastehpour, M., Rohani, A., Khoramdel, S., & Nikkhah, A. (2017). Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks. *Energy*, 135, 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.089>
 37. Tillett, N. D., Hague, T., Grundy, A. C., & Dedousis, A. P. (2008). Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, 99(2), 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.026>
 38. Usigbe, J., Asem-Hiablle, S., Uyeh, D. D., Iyiola, O., Park, T., & Mallipeddi, R. (2024). Enhancing resilience in agricultural production systems with AI-based technologies. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 21955-21983. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03588-0>
 39. Ying, K. C., & Tsai, Y. J. (2017). Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems. *International Journal of Production Research*, 55(10), 2978-2989. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1277594>
 40. Zarifneshat, S., Saeidirad, M. H., Safari, M., Motame AlShariati, H. R., & Naseri, M. (2022). Technical Evaluation of Agriculture drone sprayer for control of wheat weeds and comparison with conventional methods. *Agriculture System and Mechanization Research*, 23(82), 53-70. <https://doi.org/10.22092/amsr.2022.360045.1427>
 41. Zhang, R., Hewitt, A. J., Chen, L., Li, L., & Tang, Q. (2023). Challenges and opportunities of unmanned aerial vehicles as a new tool for crop pest control. *Pest Management Science*, 79(11), 4123-4131. <https://doi.org/10.1002/ps.7683>

Research Article

Vol. 15, No. 4, 2025, p. 605-617

Investigating the Effect of Sodium Acetate Substrate Concentration and Oxygenation Rate on System Voltage and Pollution Removal in a Plant Microbial Fuel Cell

Sh. Shokri¹, V. Rostampour^{1*}, K. Mollazade², S. Amiri³, A. Fathoolahi Qharachapogh⁴

1- Department of Mechanical Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

3- Department of Food Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Urmia, Iran

4- Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: v.rostampour@urmia.ac.ir)

Received: 01 January 2025

Revised: 19 January 2025

Accepted: 27 January 2025

Available Online: 27 July 2025

How to cite this article:

Shokri, Sh., Rostampour, V., Mollazade, K., Amiri, S., & Fathoolahi Qharachapogh, A. (2025). Investigating the Effect of Sodium Acetate Substrate Concentration and Oxygenation Rate on System Voltage and Pollution Removal in a Plant Microbial Fuel Cell. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4), 605-617. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91299.1326>

Introduction

The increasing global population has intensified the demand for sustainable energy solutions. Meeting this need requires leveraging renewable energy sources that also address pollution management and reduce greenhouse gas emissions. Plant microbial fuel cells (PMFCs) have gained attention as innovative systems that produce electricity by decomposing organic matter in their anodic chambers, providing a dual benefit of clean energy generation and environmental remediation. These systems align closely with global sustainable development goals and represent a novel approach to energy production from organic materials.

Materials and Methods

This research focused on a plant microbial fuel cell system designed to contribute to sustainable development objectives. The system employed *Cyperus* plant and *Shewanella oneidensis* microorganisms to decompose organic substrates, including carbohydrates secreted by plant roots or other external sources, within the anodic chamber. Voltage output was measured using a voltage sensor connected to an Arduino UNO board, with data collected at two-hour intervals. The experiment investigated the effects of two parameters: oxygenation rate in the cathodic chamber and sodium acetate concentration in the anodic chamber, on the system performance.

Results and Discussion

The results revealed significant effects of both oxygenation and sodium acetate concentrations on the voltage output of the PMFC system. Increasing the oxygenation rate from 0 to 1 liter per minute enhanced the voltage output from 103 mV to 185 mV. Similarly, increasing sodium acetate concentration from 0 to 10 g L⁻¹ raised the voltage from 103 mV to 170 mV. Furthermore, pollution removal efficiency was evaluated using chemical and biological oxygen demand (COD and BOD) measurements. At the highest levels of sodium acetate concentration (20 g L⁻¹) and oxygenation rate (3 L min⁻¹), the pollution removal rate reached 90%. These findings underscore the capability of PMFCs to combine energy production with effective environmental cleanup.

Conclusion



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

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91299.1326>

The microbial-plant fuel cell system demonstrates considerable potential as a dual-purpose solution for renewable energy generation and pollution removal. Its high efficiency in utilizing microorganisms and plants for these tasks suggests that it could play a critical role in sustainable development. Future research should focus on addressing the system's limitations and enhancing its scalability and reliability to support broader applications in renewable energy and environmental remediation.

Keywords: Cyperus plant, Plant microbial fuel cell, Phytoremediation, Pollution removal, Renewable energy, *Shewanella oneidensis*

بررسی اثر غلظت سوبسترا استات سدیم و میزان اکسیژن‌دهی بر ولتاژ سیستم و رفع آلاینده‌گی در پیل سوختی میکروبی-گیاهی

شهریار شکری^۱، وحید رستم‌پور^{۱*}، کاوه ملازاده^۲، صابر امیری^۳، ایوب فتح‌اللهی قره‌چپوق^۴ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

چکیده

با افزایش روزافزون جمعیت جهان، نیاز صنعت به تامین انرژی و یافتن راهکارهای تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر و همچنین توجه به ماهیت منابع انرژی تجدیدپذیر اعم از مدیریت آلاینده‌گی و کاهش گازهای گلخانه‌ای از اهمیت فراوانی برخوردار است. سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی همانند پیل سوختی میکروبی با تجزیه مواد آلی موجود در محفظه آندی توانایی تولید انرژی الکتریسته از مواد آلی را دارا می‌باشد. سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی مورد تحقیق در این پژوهش، سیستمی نوپا است که می‌تواند در راستای محقق نمودن اهداف توسعه پایدار به کار گرفته شود. این سیستم به کمک ریزسازواره‌های موجود در محفظه آندی، مواد کربوهیدراتی، که به‌وسیله ریشه گیاه و یا مواد آلی دیگر در محیط کشت گیاه قرار می‌گیرند، را تجزیه کرده و تولید انرژی الکتریسته می‌نماید. در این پژوهش پیل‌های سوختی میکروبی-گیاهی با به‌کارگیری گیاه سیبوس و همچنین ریزسازواره‌های شوانیلا آنودینس طراحی و راه‌اندازی شد و تأثیرات دو پارامتر میزان اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی و میزان تلقیح سوبسترای استات سدیم به محفظه آندی بر ولتاژ خروجی پیل مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. همچنین میزان رفع آلاینده‌گی بستر نیم پیل آندی به کمک اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی شیمیایی و بیولوژیکی گزارش گردید. در بهینه‌ترین حالت این پارامترها، ولتاژ ۲۹۰mV و میزان رفع آلاینده‌گی ۹۰ درصد به ثبت رسید.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، باکتری شوانیلا آنودینس، گیاه‌پالایی، گیاه سیبوس

مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون مبحث انرژی و همچنین توجه به تأثیرات مخرب منابع انرژی فسیلی بر محیط‌زیست و سلامت انسان، تحقیق در زمینه ارائه منابع انرژی تجدیدپذیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Doosti & Asakereh, 2025). سازمان ملل متحد به‌منظور تحقق اهداف توسعه پایدار طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، هدف را اولویت‌بندی کرده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نبود فقر، پایان دادن به گرسنگی، ارتقای سطح کیفی زندگی، آموزش با کیفیت، برابری، آب سالم و بهداشتی، تامین انرژی پاک در

دسترس و مسایل زیست‌محیطی اشاره نمود. بنابراین، سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی از طریق تامین انرژی پاک، مدیریت پساب‌ها و حفظ بهداشت محیط و همچنین کاهش آلاینده‌گی آب به توسعه پایدار کمک می‌نماید (Mishra et al., 2024).

پیل‌های سوختی میکروبی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که توانایی تولید انرژی الکتریکی پاک و تجدیدپذیر دارا می‌باشد. به دلیل توانایی این سیستم در تجزیه مواد آلی آلوده‌کننده محیط‌زیست، این سیستم سازگاری خوبی با محیط‌زیست دارد. سیستم پیل سوختی از ترکیب مستقیم سوخت و عامل اکسیدکننده بدون ایجاد آلودگی، انرژی الکتریسته را تولید می‌کند. در طول دو دهه گذشته، فناوری سلول سوختی میکروبی به دلیل تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی به سرعت رشد کرده است. استفاده از این فناوری به دلیل استفاده از منابع ارزان و در دسترس برای تامین سوخت خود و همچنین تولید انرژی و سوخت با ارزشی همانند گاز هیدروژن و نیز قابلیت به‌کارگیری به‌منظور تصفیه فاضلاب‌ها و رفع آلاینده‌گی‌های آب، توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی دارد (Logan,

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳- گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۴- گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*) نویسنده مسئول: v.rostampour@urmia.ac.ir (Email:)

(2009).

گیاه‌پالایی یا رفع آلاینده‌گی به کمک گیاهان روشی مرسوم در رفع آلاینده‌گی محیط و بستر کشت گیاه می‌باشد. در این روش از توانایی گیاهان مختلف برای رفع و تثبیت آلاینده‌گی در محیط استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال گیاهان خانواده غلات توانایی گرفتن نیتروژن از هوا و تثبیت آن در خاک را دارند. گیاهان خانواده نخل مرداب با توجه به رزوم گیاهی خود توانایی تولید آنزیم‌هایی برای شکسته شدن پیوندهای شیمیایی مواد آلی و همچنین تثبیت این مواد در اندام خود را دارا می‌باشند. به‌کارگیری گیاهان خانواده سیپروس به‌منظور رفع آلاینده‌گی، برای اولین بار در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی توسط تیمیرس و همکاران (Timmers, Strik, Hamelers, & Buisman, 2013) انجام گرفت. هدف از به‌کارگیری گیاه سیپروس توسط تیمیرس و همکاران تامین مواد هیدروکربنی باکتری‌ها در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی بود که بعداً با تحقیقات محققان توانایی این گیاهان در رفع آلاینده‌گی به اثبات رسید (Yadav, Srivastava, Yadav, & Kumar, 2024).

پیل سوختی میکروبی-گیاهی نوع خاصی از پیل‌های سوختی می‌باشد که از توانایی ریزسازواره‌ها^۱ در تجزیه مواد آلی هیدروکربنی و همچنین از گیاه به‌عنوان منبع تأمین‌کننده مواد آلی مورد استفاده این ریزسازواره‌ها، برای تولید انرژی الکتریسته بهره می‌گیرد. در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی، گیاه به‌عنوان منبع تولیدکننده سوخت مورد استفاده ریزسازواره‌ها به‌کار گرفته می‌شود و با توجه به این‌که رشد و رویش گیاه را می‌توان منبع تجدیدپذیر در نظر گرفت انتظار می‌رود پیل سوختی میکروبی-گیاهی در آینده نزدیک به‌عنوان منبع تجدیدپذیر انرژی الکتریسته نقش مهمی را ایفا کند (Helder et al., 2013).

باکتری شوانیلا آنودینس^۲ به‌عنوان یک میکروارگانیسم الکتروژن، نقش مهمی در تولید الکتریسته در پیل‌های سوختی میکروبی ایفا می‌کند. این باکتری قادر است الکترون‌ها را از طریق پروتئین‌های فعال الکتروشیمیایی مانند سیتوکروم‌های موجود بر روی غشای خارجی خود، مستقیماً به الکتروود منتقل کند. در پژوهش‌های تولید الکتریسته به کمک پیل‌های سوختی میکروبی از باکتری شوانیلا آنودینس گرم منفی به‌عنوان یکی از باکتری‌های تجزیه‌کننده مواد آلی و تولیدکننده الکترون استفاده کردند؛ مزیت‌های استفاده از باکتری شوانیلا آنودینس طبق گزارش‌های محققان (Helder et al., 2013; Timmers et al., 2013) خاکزی بودن این سویه و همچنین خطر انسانی کمتر عنوان شده است. لوگان (Logan, 2008) و همچنین تیمیرس و همکاران (Timmers et al., 2013) از باکتری شوانیلا به‌عنوان ریزسازواره فعال در سیستم پیل سوختی میکروبی استفاده

کردند.

گیاه سیپروس^۳، به‌ویژه گونه‌های آبی آن، به دلیل توانایی در رشد در محیط‌های غرقابی و تولید زیست‌توده بالا، گزینه‌ای مناسب برای استفاده در پیل‌های سوختی میکروبی-گیاهی محسوب می‌شود. این گیاهان از گونه باریک برگ‌ها در دسته گیاهان فتوسنتزی C4 می‌باشد که می‌توانند با ریشه‌های خود اکسیژن را به ناحیه ریزوسفری منتقل کرده و شرایط مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های الکتروژن فراهم کنند. این میکروارگانیسم‌ها قادرند مواد آلی ترشح‌شده توسط ریشه‌ها را اکسید کرده و الکترون‌های حاصل را به الکتروود آند منتقل کنند که در نهایت منجر به تولید الکتریسته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از گیاهان آبی در سیستم‌های ترکیبی تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی می‌تواند راندمان تصفیه پساب و تولید برق را افزایش دهد (Helder et al., 2013). آقابابایی و همکاران (Aghababaei, Farhadian, Jeihanipour, & Biria, 2015) بر روی عوامل تأثیرگذار بر انرژی پیل سوختی میکروبی-گیاهی تحقیق کردند و اندازه الکتروودها، غلظت مواد کربوهیدراتی، نوع باکتری مورد استفاده و ساختار پیل سوختی میکروبی را از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر پیل سوختی میکروبی-گیاهی گزارش دادند.

در این پژوهش یک سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی دومحفظه‌ای با به‌کارگیری گیاه سیپروس و باکتری شوانیلا آنودینس راه‌اندازی شد. هدف از انجام این پژوهش سنجش تأثیر عوامل موثر بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی شامل اثر غلظت سوبسترا استات سدیم و میزان اکسیژن‌دهی و همچنین بررسی تأثیر این عوامل بر توانایی سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی در رفع آلاینده‌گی محیط کشت گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

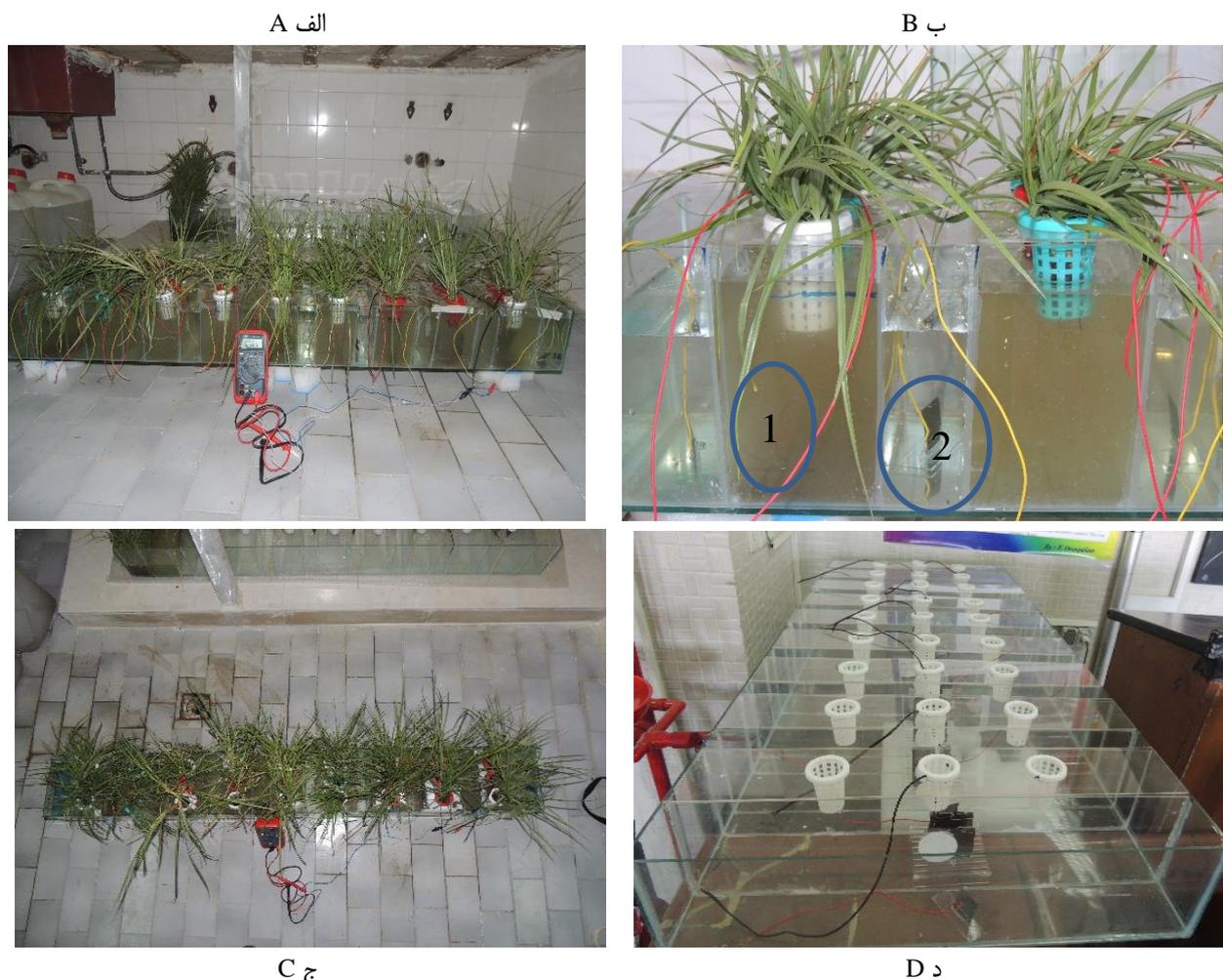
پیل سوختی میکروبی-گیاهی مورد استفاده به‌صورت دو محفظه‌ای (دو محفظه‌ای مجزای آندی و کاتدی) با الکتروود گرافیت ۹۹ درصد خلوص با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر مربع تهیه‌شده از شرکت نانو بازار ایران ساخته شد. این دو محفظه با حجم‌های ۳۰ و ۴۵ لیتر، از جنس شیشه به‌صورت کامل آب‌بندی شده و فقط به‌وسیله غشای تبادل یونی با هم در ارتباط بودند (شکل ۱). همچنین از غشای تبادل پروتونی^۴ ۰/۲ μm ساخت کشور فرانسه، شرکت مبرانس فیلتر استفاده گردید.

3- Cyperus

4- Polytetrafluoroethylene

1- Micro organism

2- Shewanella oneidensis



شکل ۱- پیل سوختی میکروبی-گیاهی راه‌اندازی شده: الف- تعداد ۹ تیمار بارگذاری شده، ب(۱)- نیم پیل آندی، ب(۲) نیم پیل کاتدی، ج- تصویر پیل کامل، د- پیل سوختی میکروبی گیاهی قبل از راه‌اندازی

Fig. 1. Plant microbial fuel cell startup: A- 9 loaded treatments, B(1)- Anodic half-cell, B(2)- Cathodic half-cell, C- Image of the complete cell, and D- Plant microbial fuel cell before startup

اکسیژن دمیده شده برابر 3 L min^{-1} بود همچنین سطح‌های استات با غلظت‌های 10 g L^{-1} و 20 از قبل آماده شد و به نیم پیل آندی اضافه گردید.

سطح اکسیژن و استات سدیم با توجه به یافته‌های لوگان (Logan, 2009) انتخاب گردید. لوگان گزارش داده بود با توجه به نسبت حجمی محفظه کاتد به آند که در این تحقیق ۱ به ۳ است میزان اکسیژن می‌تواند از ۱ تا ۳ لیتر در نظر گرفته شود با توجه به اهداف این تحقیق که بررسی اثر اکسیژن بر توان پیل سوختی میکروبی-گیاهی می‌باشد. سطح پایین‌تر اکسیژن صفر و سطح بالاتر اکسیژن 3 L min^{-1} در نظر گرفته شد. سطح استات سدیم هم با توجه به مول‌های آزادسازی الکترون توسط لوگان انتخاب شد. لوگان

به منظور بررسی اثرات دو متغیر اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی و استات سدیم تزریقی به محفظه آندی، پیل سوختی میکروبی-گیاهی ساخته شده مطابق جدول ۱ در نه تیمار بارگذاری شد. عدد مربوط به تیمار که عدد دو رقمی است بیان کننده سطح استات و اکسیژن هر تیمار می‌باشد به صورتی که عدد یکان مربوط به سطح اکسیژن و عدد دهگان مربوط به سطح استات می‌باشد، به عنوان مثال تیمار ۱۱ گویای کمترین سطح اکسیژن و کمترین سطح استات است و همچنین تیمار ۲۳ گویای بیشترین سطح اکسیژن 3 L min^{-1} و سطح استات 10 g L^{-1} به منظور تنظیم سطح‌های مختلف اکسیژن‌دهی پمپ دمنده اکسیژن دارای کلید تنظیم کننده توان پمپاژ سه‌حالتی بود که در حالت کم، اکسیژن پمپاژی 1 L min^{-1} و در بیشترین توان

گزارش داد به‌ازای هر مول هیدروکربن ۱۲ تا ۲۴ مول الکترون آزاد می‌شود از این‌رو میزان استات سه سطح $g L^{-1}$ ، ۰، ۱۰ و ۲۰ در نظر گرفته شد (Logan, 2009).

جدول ۱- تیمارها و میزان اکسیژن‌دهی و استات سدیم اعمالی در هر کدام از تیمارها

Table 1- Treatments and amount of oxygenation and sodium acetate application in each treatment

Treatment تیمار	11	12	13	21	22	23	31	32	33
استات ($g L^{-1}$) Acetate	0	10	20	0	10	20	0	10	20
اکسیژن ($L min^{-1}$) Oxygen	0	0	0	1	1	1	3	3	3

داده‌گیری به‌صورت هر دو ساعت یک بار در طول شبانه‌روز و به مدت ۲۳ روز انجام گرفت. به‌منظور تحلیل داده‌های آزمایش میانگین ثبت‌شده برای هر روز استفاده گردید زیرا میزان اختلاف پتانسیل در طول شبانه‌روز مقداری ثابت بود.

به‌منظور سنجش میزان غلظت اکسیژن، از دستگاه سنجش اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) مدل ۲ WTW استفاده شد. میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی محتوای نیم پیل آندی در شروع آزمایش و نیز با فاصله زمانی هر پنج روز یک بار اندازه‌گیری شد.

روش اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی شیمیایی و بیولوژیکی با استفاده از دستگاه‌های CODسنج و BODسنج:

برای اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی شیمیایی مقدار مشخصی از نمونه محتویات آندی (۱۰ میلی‌لیتر) اندازه‌گیری شده و در یک لوله واکنش COD قرار گرفت. محلول دی‌کرومات پتاسیم به‌عنوان ماده اکسیدکننده و اسید سولفوریک غلیظ (به‌همراه کاتالیزور نقره) اضافه شد. لوله در دستگاه COD هاضم قرار گرفته و نمونه در دمای ۱۵۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. پس از خنک شدن، نمونه را در دستگاه CODسنج قرار داده و مقدار COD اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی نمونه محتویات آند در یک بطری BODسنج قرار گرفت (معمولاً ۳۰۰ mL). نمونه با اکسیژن‌دهی اشباع شد تا اکسیژن محلول در نمونه به حداکثر مقدار خود برسد. مقدار اکسیژن محلول اولیه با استفاده از سنسور اکسیژن محلول اندازه‌گیری شد سپس بطری به مدت ۵ روز در دمای استاندارد (۲۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط تاریکی قرار داده شد و پس از ۵ روز، مجدداً مقدار اکسیژن محلول اندازه‌گیری شد. اختلاف بین اکسیژن اولیه و نهایی پس از ۵ روز، مقدار اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی را مشخص می‌کند.

گیاه سیپروس، که گیاه مردابی می‌باشد، از دریاچه زریبار واقع در شهر مریوان، استان کردستان تهیه گردید و به محل آزمایشگاه بیوتکنولوژی گروه صنایع غذایی دانشگاه ارومیه انتقال داده شد. این گیاه چون در محیط خاکی و مردابی رشد کرده بود؛ برای استفاده در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی به روش شستشوی بیولوژیکی استریل شد تا از آلوده کردن محیط آندی با ریزسازوره‌های متنوع جلوگیری به‌عمل آید. روش‌های شستشو مرحله‌ای، مورد استفاده شامل آب مقطر، آب ژاول ۵ درصد، اتانول ۷۰ درصد و همچنین استفاده از اشعه ماورابنفش به مدت ۲۰ دقیقه بود. در هر تیمار تعداد ۱۰ بوته گیاه سیپروس با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در هر آزمایش قرار داده شد (Fedosenko-Becker, 2019).

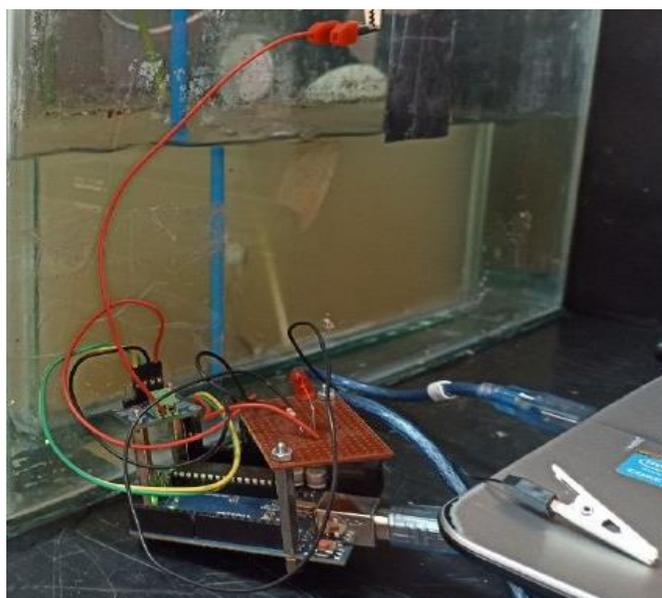
برای اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی، یک پمپ هوادهی آکواریومی با توان $3L min^{-1}$ ساخت کشور چین مدل AP-320 در خارج از سیستم به‌وسیله شلنگ هوادهی به محفظه کاتدی وصل گردید. برای تامین میزان اکسیژن متفاوت و سنجش تاثیر اکسیژن بر خروجی سیستم، از سه سطح متفاوت بدون اکسیژن، اکسیژن $1L min^{-1}$ و همچنین اکسیژن $3L min^{-1}$ استفاده شد (Aghababaie et al., 2015).

در محفظه کاتدی از محلول بافر فسفات $10g.L^{-1}$ به‌عنوان انتقال‌دهنده نهایی الکترون به اکسیژن استفاده گردید. برای بررسی اثر متغیرهای اکسیژن‌دهی و میزان غلظت استات سدیم بر خروجی ولتاژ پیل‌ها، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد استفاده قرار گرفت و تحلیل یافته‌ها به کمک نرم‌افزار SPSS انجام شد (Feng et al., 2024).

آزمایش‌ها در شرایط کاملاً استریل انجام شد. به‌منظور آماده‌سازی محیط کشت باکتری از دستگاه اتوکلاو با فشار ۱۰ bar به مدت ۱۰ min و دمای $120^{\circ}C$ استفاده شد. محیط کشت تریپیک سول برات^۱ (TSB) برای کشت باکتری از شرکت مرک المان تهیه شد و با غلظت $30g L^{-1}$ استریل شد. برای ثبت مقدار ولتاژ خروجی سیستم، از یک ماژول اندازه‌گیری جریان ولتاژ مدل NIA219 همراه یک برد آردینو جهت ارسال داده‌ها به رایانه استفاده گردید (شکل ۲).

2- Chemical Oxygen Demand
3- Biochemical Oxygen Demand

1- Tryptic Soy Broth



شکل ۲- ماژول اندازه‌گیری ولتاژ و برد آردونیو مورد استفاده جهت اندازه‌گیری ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی
Fig. 2. Voltage measurement module and Arduino board used to measure voltage of the plant microbial fuel cell

با توجه به شکل ۳، مقدار بیشینه نسبی در دو تیمار ۲۲ و ۳۳ مشاهده گردید. چنان‌که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌گردد، این دو تیمار به ترتیب مربوط به سطح اکسیژن 1 L min^{-1} و استات 1 g L^{-1} و همچنین سطح اکسیژن 3 L min^{-1} و استات 20 g L^{-1} می‌باشد. در تحلیل این مهم می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش مواد آلی در محفظه آندی میزان الکترون آزاد شده زیاد می‌شود و به همان نسبتی که الکترون آزاد می‌گردد باید پذیرنده نهایی الکترون، که در اینجا اکسیژن می‌باشد، به محفظه کاتدی تزریق شود که این امر سبب شار الکترون در مدار شده و مقاومت درونی سیستم کاهش پیدا می‌کند. مشابه این نتایج را دی‌لورنزو و همکاران (Di Lorenzo, Thomson, Schneider, Cameron, & Ieropoulos, 2014) گزارش کرده‌اند که در آن محفظه آندی ایزوله، که امکان تبادل آنیون-کاتیون تنها از طریق غشای تبادل‌کننده آنیون-کاتیون برقرار است، بوده و اگر چنان‌چه نشت اکسیژن به محفظه آندی صورت بگیرد، ولتاژ پیل سوختی کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به شکل ۴، در حالت بدون اعمال استات سدیم، افزایش سطح اکسیژن از صفر به 1 L min^{-1} ، ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی را از 103 mV به 185 mV افزایش داده است. اما با افزایش اکسیژن از سطح 1 L min^{-1} به 3 L min^{-1} ، ولتاژ پیل از 185 به 165 mV کاهش داشته است. دلیل این امر را می‌توان به نشت اکسیژن به محفظه آندی نسبت داد. این یافته‌ها منطبق بر یافته‌های دی‌لورنزو و همکاران می‌باشد (Di Lorenzo et al., 2014). در سطح اکسیژن صفر، افزایش سطح استات از 0 به 10 g L^{-1} ، ولتاژ پیل را از 103 به

رابطه (۱) بازده پیل سوختی میکروبی-گیاهی در رفع آلاینده‌گی را توجه به متغیرها اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی را بیان می‌کند.

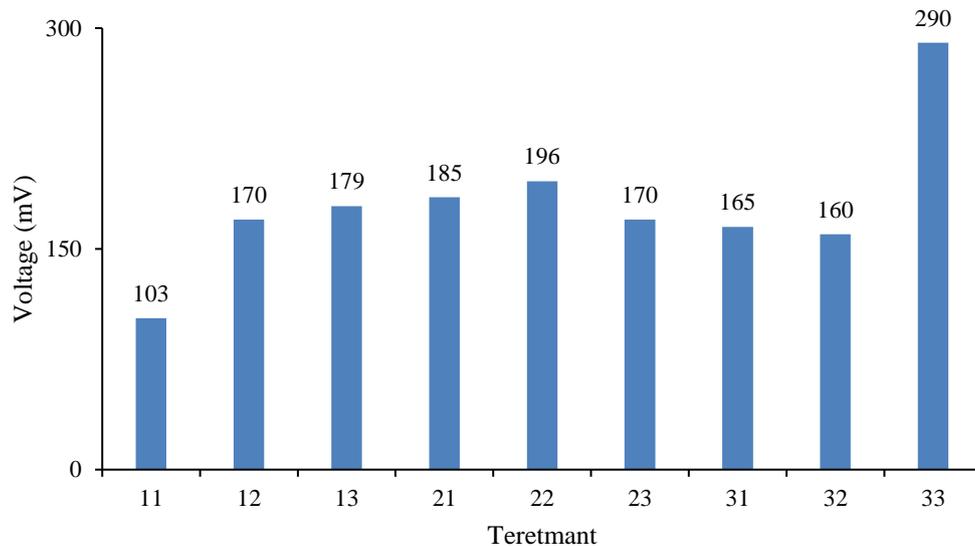
$$(1) \quad \text{مقدار نهایی اکسیژن‌خواهی} - \text{مقدار اولیه اکسیژن‌خواهی} = \frac{\text{مقدار اولیه اکسیژن‌خواهی}}{\text{مقدار اولیه اکسیژن‌خواهی}} \times \text{بازده رفع آلاینده‌گی}$$

نتایج و بحث

شکل ۳ بیشینه اختلاف پتانسیل ثبت‌شده در ۹ تیمار در مدت زمان انجام آزمایش را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۳ بیشترین ولتاژ پیل مربوط به تیمار ۳۳ با بیشترین سطح اکسیژن 3 L min^{-1} و استات 20 g L^{-1} می‌باشد، این امر به دلیل وجود مواد آلی بیشتر در پیل سوختی میکروبی است که موجب فعالیت بیشتر باکتری‌های الکتروژن شده و در پی این مهم، الکترون بیشتری آزاد می‌گردد. بنابراین، به موجب آزادسازی الکترون بیشتر در هر تیمار، اختلاف پتانسیل افزایش پیدا می‌کند همچنین با توجه به اکسیژن بیشتر در محفظه کاتدی پذیرنده نهایی الکترون مورد نیاز فراهم بوده و جریان الکترون و تولید انرژی الکتریکی بهتر صورت می‌گیرد. یافته‌های تحقیق منطبق بر گزارش تیمرس و همکاران (Timmers et al., 2013) می‌باشد؛ تیمرس نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده است به نحوی که در باتلاق‌ها و مرداب‌ها، به دلیل حجم بالای مواد آلی موجود در بستر این مکان‌ها، می‌توان انرژی الکتریسیته قابل‌توجهی برابر $10 \pm 2 \text{ mW m}^{-2}$ تولید نمود.

است که مواد آلی و هیدروکربنی‌ای که توسط باکتری‌ها تجزیه می‌شود منبع اصلی تولید الکترون می‌باشد و هر اندازه مقدار مواد آلی در دسترس باکتری بیشتر باشد، میزان الکترون تولیدی بیشتر است. در مورد مدت زمان تولید ولتاژ پیل مربوط به هر تیمار، میزان ولتاژ در طول مدت ۲۳ روز اندازه‌گیری شد و حداکثر ولتاژ به ثبت رسیده در روز ۱۰ تا ۱۶ در مدت زمان اندازه‌گیری تیمارها به ثبت رسید بعد از روز شانزدهم روند ثابت ولتاژ با نوسانات ۱۰ تا ۲۰ میلی‌ولت در طول اندازه‌گیری مشاهده شد.

۱۷۰ mV افزایش داد. همچنین در سطح اکسیژن 1 L min^{-1} ، با افزایش سطح استات از ۱۰ به 20 g L^{-1} ، ولتاژ پیل از ۱۸۵ به ۱۹۶ افزایش یافته است. این مهم با توجه به فراوانی مواد مورد مصرف ریزمغذی‌ها، که متقابلاً تجزیه مواد آلی را نتیجه می‌دهد، قابل‌استنتاج می‌باشد. به بیان دیگر، با افزایش مواد آلی مورد نیاز باکتری‌ها، عمل تجزیه این مواد و آزادسازی الکترون افزایش می‌یابد. این یافته‌ها مطابق نتایج گزارش شده توسط کاسماز و اکزاجیوگلو (Kacmaz & Eczacioglu, 2024) می‌باشد که در آن گزارش شده



شکل ۳- بیشینه ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی به ثبت رسیده در طول ۲۳ روز

Fig. 3. Maximum voltage of the plant microbial fuel cell recorded during 23 days

همچنین اثرات متقابل نیز معنا دار می‌باشد. با توجه به شکل ۵، افزایشی بودن نمودار آبی رنگ، که مربوط به تیمارهای بدون تزریق استات سدیم می‌باشد در ابتدا که اکسیژنی به محفظه کاتدی وارد نشده است در پایین‌ترین اختلاف پتانسیل خروجی می‌باشد سپس با پمپاژ اکسیژن به محفظه کاتدی اختلاف پتانسیل به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند که این امر تاییدکننده تاثیر اکسیژن‌دهی بر خروجی سیستم می‌باشد زیرا اکسیژن به عنوان پذیرنده نهایی الکترون باعث شار الکترون از محفظه آندی به محفظه کاتدی می‌شود. ذکر این نکته که میزان ابتدایی تولید انرژی در اکسیژن صفر به تجزیه هیدروکربن‌هایی که از ریزوم‌های گیاه و اندام ریشه آن در اختیار باکتری‌ها قرار می‌گیرد برمی‌گردد، حائز اهمیت می‌باشد (Di Lorenzo et al., 2014).

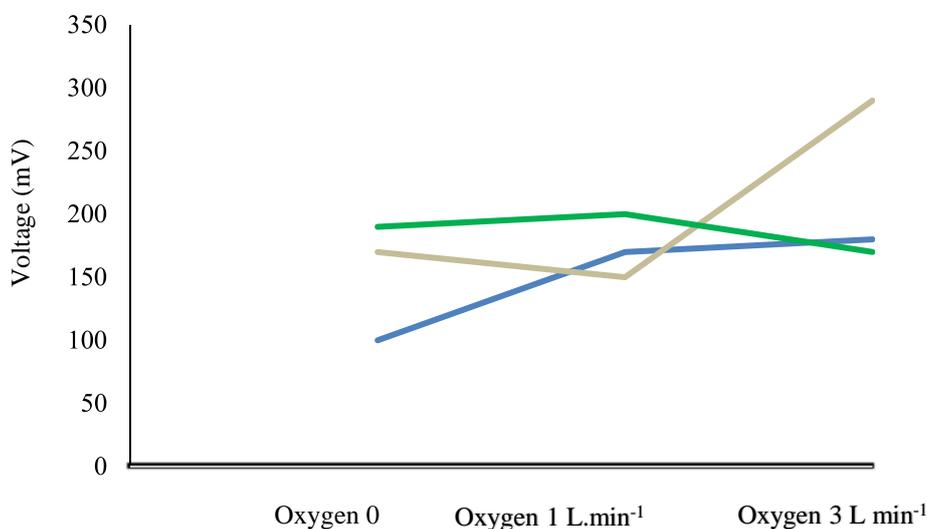
می‌توان دلیل ثابت بودن و نوسانات مشاهده شده را وجود گیاه در سیستم عنوان کرد که با توجه به فتوسنتز گیاهی مواد آلی مورد نیاز باکتری‌ها از طریق ریشه گیاه در اختیار باکتری قرار داده شد و در هنگام کاهش عمل فتوسنتز در طول شبانه‌روز نوسانات تجزیه مواد آلی به وسیله باکتری‌ها قابل‌استنتاج است مشابه نتایج ذکر شده در تحقیقات هلدر و همکاران (Helder et al., 2013) و تمیرس و همکاران (Timmers et al., 2012) گزارش شده است، هلدر عنوان کرد فتوسنتز گیاهی در طول روز بیشتر از شب است (Kacmaz & Eczacioglu, 2024).

در تحلیل جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) داده‌های ثبت شده از ۹ پیل بارگذاری شده میزان غلظت سوبسترا استات سدیم و اکسیژن تزریقی به نیم پیل کاتدی تاثیر معنادار بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی در سطح ۱ درصد داشت به گونه‌ای که با افزایش استات سدیم و اکسیژن میزان ولتاژ پیل افزایش پیدا می‌کند و

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس داده‌های ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی و بررسی سطح معنا داری در سطح ۱ و ۵ درصد

Table 2- Results of analysis of variance Voltage data at the 1% level

Source	Variable	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig
Oxygen	Voltage	10914.296	2	5457.148	3.603	0.048
	Current	114.000	2	57/000	3.819	0.041
Acetate	Voltage	15743.185	2	7871.593	5.198	0.017
	Current	164.667	2	82/333	5.516	0.014
Oxygen*Acetate	Voltage	26042.593	4	6510.648	4.299	0.013
	Current	249.333	4	62.333	176.4	0.014
Error	Voltage	27259.333	18	1514.407		
	Current	268.667	18	14.296		
Total	Voltage	889427.000	26			
	Current	8948.000	26			



شکل ۴- اثرات متقابل دو متغیر غلظت استات سدیم و اکسیژن بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی (● بدون استات، ● استات ۱۰ گرم بر لیتر، ● استات ۲۰ گرم بر لیتر)

Fig. 4. Mutual effects of sodium acetate and Oxygen concentration variables on plant microbial fuel cell voltage (●without acetate, ●acetate 10 g L⁻¹, and ●acetate 20 g L⁻¹)

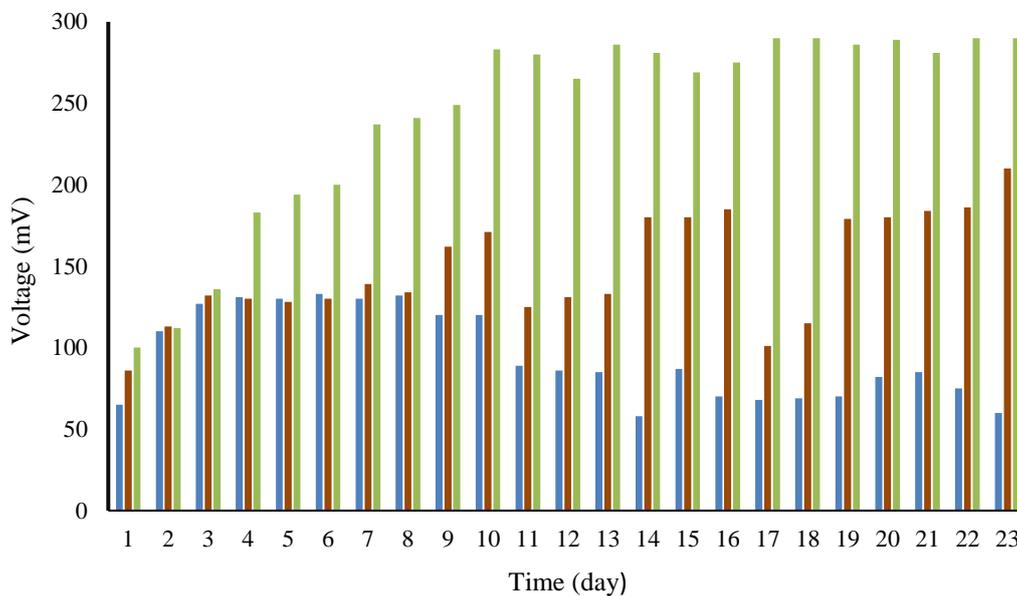
مشاهده کرد. علت نزولی بودن نمودار سبز رنگ در سطح اکسیژن ۳ L min⁻¹ را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که نبود تعادل بین میزان اکسیژن تزریق شده و همچنین تجزیه مواد هیدروکربنی توسط باکتری‌ها باعث کاهش بازده پیل‌ها می‌شود. به بیان دیگر هر الکترون که از محفظه آندی در اثر تجزیه مواد هیدروکربنی آزاد می‌شود باید به یک پذیرنده نهایی در محفظه کاتدی برسد و آن را احیا کند چنان‌چه میزان تزریق و تعادل بین این دو به هم بخورد، بازده سیستم و تولید نهایی انرژی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به بازده بالای باکتری شوانیلا انودینس در حالت بی‌هوازی نسبت به حالت هوازی می‌توان نشأت اکسیژن بیشتر به محفظه آندی را نیز بر این کاهش موثر

نمودار سبز رنگ مربوط به استات ۱۰ g L⁻¹ می‌باشد. این نمودار با اختلاف مشهودی که با نمودار آبی رنگ (بدون تزریق استات سدیم) دارد بیان‌کننده تاثیر سوبسترای تزریق شده در ابتدای راه‌اندازی پیل سوختی میکروبی-گیاهی می‌باشد. در ابتدای راه‌اندازی پیل سوختی میکروبی-گیاهی به علت شک و تغییر شرایطی که برای گیاه به‌وجود آمده بود، میزان فتوسنتز و همچنین آزادسازی مواد هیدروکربنی از طریق ریزوم‌های ریشه گیاه کم می‌باشد و این جواب‌گوی نیاز باکتری‌ها برای تولید انرژی زیاد نمی‌باشد. استات سدیم در این‌جا به‌عنوان جبران‌کننده مواد هیدروکربنی عمل کرده و می‌توان میزان تاثیر آن را در مقایسه دو نمودار آبی رنگ و سبز رنگ

دانست (Golzarian, Ghiasvand, Shokri, Bahreini, & Kazemi, 2024).

نمودار خاکستری مربوط به استات 20 g L^{-1} می‌باشد که در آن بیشترین میزان مواد آلی در اختیار باکتری‌ها قرار گرفته است. در این حالت، میزان ولتاژ پیل سوختی در سطح اکسیژن 0 تا 1 L min^{-1} ، روند ثابتی را طی کرده است. این امر به دلیل نبود تعادل بین الکترون تولیدی و اکسیژن پذیرنده آن می‌باشد. زمانی که سطح اکسیژن تزریقی بالا می‌رود، میزان شار و اختلاف پتانسیل هم افزایش پیدا می‌کنند و نمودار سیر صعودی بودن به خود می‌گیرد. نکته قابل توجه در اینجا روند صعودی بودن نمودار مذکور می‌باشد که با توجه به سطح دو برابری مواد آلی تزریق شده و همچنین تعادل بین میزان اکسیژن تزریقی و الکترون تولیدشده برقرار می‌شود. به بیان دیگر هر

مول الکترون که در نتیجه تجزیه مواد آلی تولید می‌شود به پذیرنده نهایی الکترون که اکسیژن می‌باشد می‌رسد و واکنش اکسایش و کاهش استکیومتری رخ می‌دهد که این امر سبب شار الکترونی می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که تولید الکترون و مصرف آن توسط اکسیژن بهینه شده است که در نتیجه این امر میزان تولید انرژی افزایش پیدا می‌کند. این داده‌ها در بازه زمانی دو هفته‌ای بعد از بارگذاری گلدان‌ها ثبت شده‌اند و چون در این مدت سطح مواد آلی بیشتر از میزان مصرف باکتری‌ها بوده است روند رو به رشد تولید انرژی افزایش داشته است و پیش‌بینی می‌شود همانند دو نمودار قبل، بعد از گذشت مدت زمانی که مواد آلی مصرف شود این نمودار نیز سیر نزولی گرفته و با گذشت زمان به دو نمودار قبل نزدیک شود.



شکل ۵- نمودار ولتاژ مربوط به سه تیمار با بیشترین مقدار استات (● اکسیژن صفر، ● اکسیژن ۱ لیتر بر دقیقه، ● اکسیژن ۳ لیتر بر دقیقه)
Fig. 5. The voltage diagram related to the three treatments with the highest amount of acetate (●without oxygen, ●oxygen 1 L min^{-1} , and ●oxygen 3 L min^{-1})

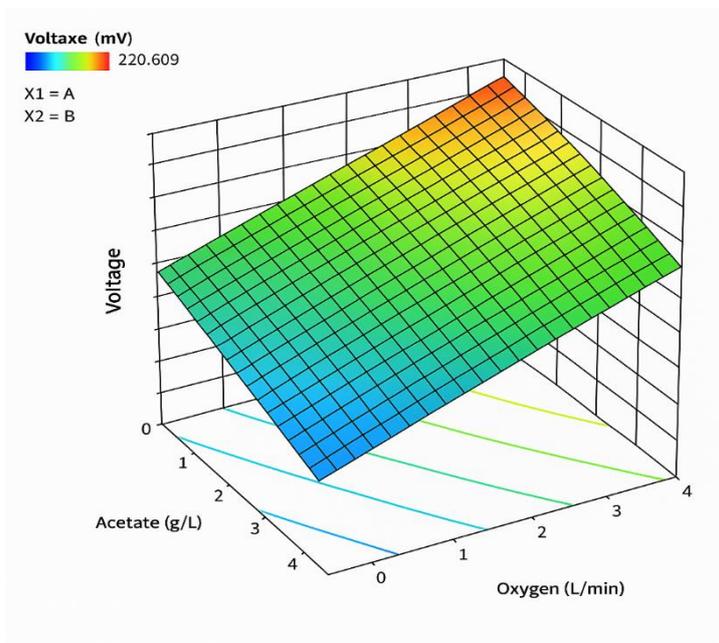
تامین کننده اکسیژن نسبت به کپسول خالص اکسیژن هزینه راه‌اندازی پیل سوختی میکروبی را کاهش می‌دهد اما با توجه به ۲۱ درصد اکسیژن موجود در هوا انتظار می‌رود اکسیژن خالص توان پیل سوختی میکروبی-گیاهی را بیشتر کند.

نمودار سبز رنگ با بیشترین سطح ولتاژ مربوط به سطح استات 20 g L^{-1} و اکسیژن 3 L min^{-1} می‌باشد و نمودار آبی رنگ مربوط به تیمار با سطح استات 20 g L^{-1} و سطح اکسیژن صفر را نشان می‌دهد. در دسترس بودن بیشتر مواد آلی مورد مصرف ریزمغزی‌ها باعث افزایش عمل تجزیه و متقابلاً افزایش آزادسازی الکترون توسط باکتری‌ها می‌شود. طبق یافته‌های گلزاریان و همکاران در طی تجزیه

در شکل ۵ مقادیر ولتاژ مربوط به سه تیمار ۱۳، ۲۳ و ۳۳ در مدت زمان ۱ تا ۲۳ روز ثبت ولتاژ پیل، گزارش شده است. با توجه به مقدار ولتاژ در روز اول سه تیمار ولتاژ نزدیک و برابر به هم ثبت کرده‌اند. با گذشت زمان اکسیژن تزریقی به نیم پیل کاتدی تاثیر معنادار بر میزان ولتاژ پیل را نشان می‌دهد. دی‌لورنزو و همکاران (Di Lorenzo et al., 2014) اکسیژن را به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون در سیستم پیل سوختی میکروبی استفاده کردند و اکسیژن را عامل تاثیرگذار بر میزان تولید انرژی پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای گزارش کردند. اکسیژن مورد استفاده در این تحقیق از طریق پمپاژ هوای محیط به نیم پیل کاتدی تامین گردید این امر با توجه به هزینه کمتر منبع

و تزریق استات سدیم به نیم پیل کاتدی بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی میکروبی-گیاهی آورده شده است. از این نمودار استنتاج می‌شود که با افزایش هر دو متغیر اکسیژن‌دهی و غلظت اعمالی استات سدیم، ولتاژ پیل افزایش می‌یابد. در شکل ۶ میانگین ولتاژ هر تیمار گزارش شده است

هر مول مواد آلی در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی ۸ مول الکترون آزاد می‌شود. از این یافته نتیجه می‌شود که هر اندازه مواد آلی بیشتر در دسترس باکتری‌ها قرار گیرد، میزان الکترون بیشتر و متقابلاً انرژی الکتریسته بیشتر تولید می‌شود (Golzarian et al., 2024). در شکل ۶ نمودار سه‌بعدی تاثیر اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی



شکل ۶- نمودار سه‌بعدی تاثیر اکسیژن‌دهی و غلظت اعمالی استات سدیم بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی (در این نمودار، میانگین ولتاژ هر تیمار گزارش شده است)

Fig. 6. Three-dimensional diagram of the effect of Oxygenation and applied concentration of sodium acetate on the voltage of the plant microbial fuel cell (In this diagram, the average voltage of each treatment is reported)

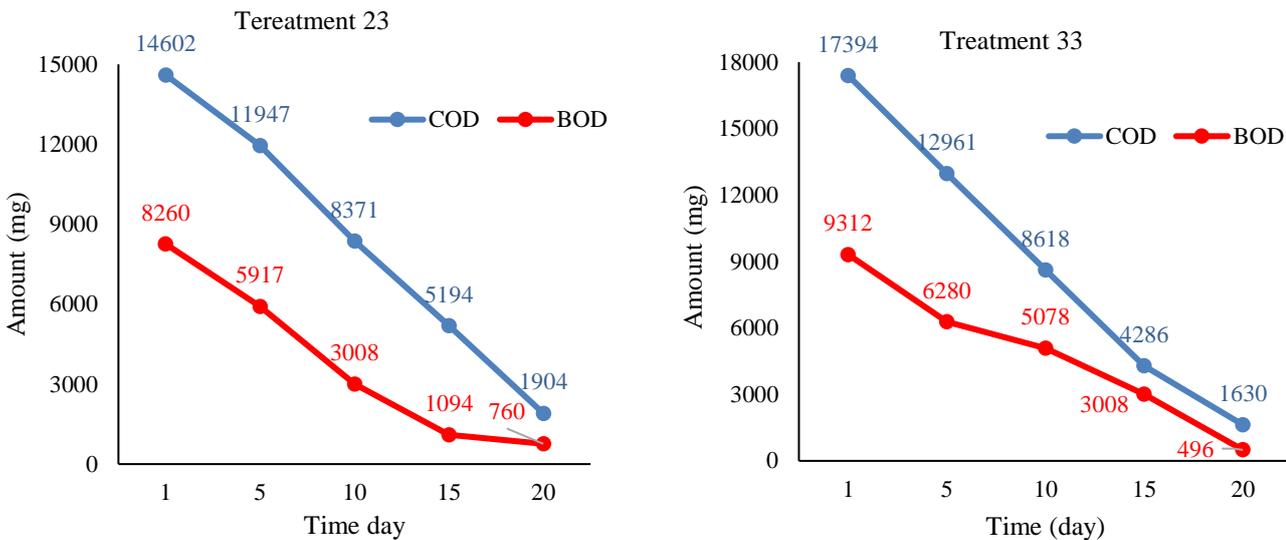
سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی قابلیت کاهش مواد آلی و در نتیجه رفع آلاینده‌گی از بستر رشد گیاه خود را دارا می‌باشد. کاهش آلاینده‌گی به سبب فعالیت میکروارگانیسم شوانیلا انودینس و همچنین گیاه‌پالایی و توانایی گیاه سیپروس در تثبیت آلاینده‌گی در اندام خود می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱) بازده رفع آلاینده‌گی بر اساس اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) برای تیمار ۲۳ برابر ۸۶ درصد و برای تیمار ۳۳ برابر ۹۰ درصد بوده است. رفع آلاینده‌گی بر اساس اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) برای تیمار ۲۳ برابر ۹۰ درصد و برای تیمار ۳۳ برابر ۹۸ درصد به‌دست آمد. این دو تیمار بیشترین رفع آلاینده‌گی را ثبت نموده‌اند.

نتایج رفع آلاینده‌گی بر اساس اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD):

با توجه به سنجش میزان اکسیژن‌خواهی محلول داخل محفظه آند می‌توان میزان آلاینده‌گی مواد هیدروکربنی موجود در نیم پیل آندی را اندازه‌گیری کرد. از این‌رو هر اندازه میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی و بیولوژیکی محلولی بالا باشد، مقدار آلاینده‌گی آن زیاد بوده است و در صورت رهاسازی در محیط موجب آلاینده‌گی زیستی می‌گردد در شکل ۷ میزان اکسیژن‌خواهی برای محلول نیم پیل آندی مربوط به دو تیمار با بیشترین سطح استات سدیم (تیمارهای ۲۳ و ۳۳) گزارش شده است.

با توجه به نمودارهای تغییرات اکسیژن‌خواهی در هر دو تیمار، کاهش مواد آلی استنتاج می‌شود. از این‌رو می‌توان عنوان داشت



شکل ۷- نمودار میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) مربوط به دو تیمار با بیشترین سطح استات سدیم (۲۳، ۳۳)

Fig. 7. Chemical oxygen demand (COD) and biological Oxygen demand (BOD) graphs related to two treatments with the highest levels of sodium acetate (treatments no. 23 and 33)

می‌باشد. اگر الکترون تولیدی در محفظه آندی باقی بماند و پذیرنده‌ای برای تکمیل شدن چرخه اکسایش و کاهش وجود نداشته باشد؛ نیم پیل آندی دچار مسمومیت شده و پیل توانایی تولید انرژی را نخواهد داشت. در این تحقیق به منظور کاهش هزینه‌ها و همچنین توجیه کارآمدی پیل سوختی میکروبی-گیاهی از هوا به‌عنوان منبع اکسیژن استفاده گردید. در صورتی که اگر از اکسیژن خالص استفاده می‌شد، می‌توان انتظار داشت که به نتایج بهتری در این زمینه دست یافت. با توجه به آزمایش‌های اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی و شیمیایی، سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی توانایی خوبی در رفع آلایندگی در آب‌های آلوده را از خود نشان داد به طوری که در این پژوهش میزان بازده سیستم در رفع آلایندگی ۹۰ درصد به دست آمد. این توانایی به دلیل وجود هم‌زمان باکتری تجزیه‌کننده مواد آلی و همچنین بهره‌گیری از گیاه سیپروس می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

شهریار شکری: نگارش مقاله، جمع‌آوری داده، انجام آزمایشات و حیدر رستم پور: نظارت و اجراء ویرایش متن، مشاور فنی کاوه ملازاده: مشاوره فنی، تحلیل آماری، طراحی سخت افزاری، برنامه نویسی
صابر امیری: طراحی آزمایشات، انجام آزمایشات، مشاور فنی ایوب فتح الهی قره‌چپوق: ویرایش متن و مشاوره

نتیجه‌گیری

باتوجه به آزمایش‌های انجام‌گرفته می‌توان نتیجه گرفت که میزان مواد آلی موجود در محیط آندی پیل سوختی میکروبی-گیاهی به‌صورت مستقیم بر تولید انرژی از این نوع پیل‌ها تاثیرگذار می‌باشد. اما نکات قابل‌توجه در این مورد نوع مواد آلی باید متناسب با باکتری مورد استفاده، انتخاب شود. زیرا باکتری‌هایی موجود می‌باشند که توانایی تجزیه مواد آلی با زنجیره بلند هیدروکربنی و یا ترکیبات قوی‌تر را دارا نمی‌باشند. لذا، باید مواد ساده‌تری که قابلیت تجزیه آسان‌تری به‌وسیله آنزیم‌های این باکتری‌ها را دارا می‌باشند به‌عنوان منبع اضافه مواد آلی مورد استفاده قرار گیرد. در سیستم‌های پیل سوختی میکروبی-گیاهی که گیاه به‌تنهایی به‌عنوان منبع تامین‌کننده مواد آلی مورد نیاز باکتری‌ها استفاده می‌شود؛ به دلیل محدود بودن تولید مواد به‌وسیله ریشه گیاه در طول شب/روز و کاهش عمل فتوسنتز گیاهی، ولتاژ خروجی پیل نوسان زیادی خواهد داشت. از این‌رو مواد سوسترای همچون نشاسته، استات سدیم به نیم پیل آندی به‌منظور جبران کمبود مواد مورد نیاز باکتری‌ها اضافه می‌شود. اکسیژن به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون در این سیستم نقش مهمی را دارا می‌باشد و به‌صورت مستقیم بر انرژی الکتریکی تولیدی تاثیرگذار می‌باشد. واکنش احیای اکسیژن در نیم پیل کاتدی یکی از چالش‌های محدودکننده انرژی پیل‌های سوختی میکروبی گیاهی

References

1. Aghababae, M., Farhadian, M., Jehanipour, A., & Biria, D. (2015). Effective factors on the performance of microbial fuel cells in wastewater treatment—a review. *Environmental Technology Reviews*, 4(1), 71-89 <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1077896>
2. Di Lorenzo, M., Thomson, A. R., Schneider, K., Cameron, P. J., & Ieropoulos, I. (2014). A small-scale air-cathode microbial fuel cell for on-line monitoring of water quality. *Biosensors and Bioelectronics*, 62, 182-188 <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.06.050>
3. Doosti, B., & Asakereh, A. (2025). Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4). (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319>
4. Fedosenko-Becker, T. N. (2019). *Surface Modification of Bipolar Plates for Fuel Cells by Plasma Treatment* (Doctoral dissertation). Universität Duisburg-Essen.
5. Feng, M., Meng, L., Zhang, Z., Zheng, Q., Wang, R., Yang, C., & Guo, W. (2024). Hierarchical modulation of extracellular electron transfer processes in microbial fuel cell anodes for enhanced power output through improved *Geobacter* adhesion. *Electrochimica Acta*, 487, 144165 <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144165>
6. Golzarian, M., Ghiasvand, M., Shokri, S., Bahreini, M., & Kazemi, F. (2024). Performance evaluation of a dual-chamber plant microbial fuel cell developed for electricity generation and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(7), 5947-5954. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05415-5>
7. Helder, M., Strik, D. P., Timmers, R. A., Raes, S. M., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2013). Resilience of roof-top plant-microbial fuel cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51, 1-7 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.011>
8. Kacmaz, G. K., & Eczacioglu, N. (2024). The mechanism of bioelectricity generation from organic wastes: Soil/plant microbial fuel cells. *Environmental Technology Reviews*, 13(1), 76-95 <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2283814>
9. Logan, B. E. (2008). *Microbial fuel cells*. John Wiley & Sons
10. Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), 375. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2113>
11. Mishra, M., Desul, S., Santos, C. A. G., Mishra, S. K., Kamal, A. H. M., Goswami, S., & Baral, K. (2024). A bibliometric analysis of sustainable development goals (SDGs): a review of progress, challenges, and opportunities. *Environment, Development and Sustainability*, 26(5), 11101-11143. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03225-w>
12. Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2013). Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass and Bioenergy*, 51, 60-67 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.002>
13. Yadav, V. S., Srivastava, M. P., Yadav, R. K., & Kumar, N. (2024). Phytoremediation potential of plants for heavy metal contaminated soil. *Library Progress International*, 44(3), 5400-5406.

Contents

Research Articles

- Evaluating the Effects of Grape Harvest Time and Vacuum Drying on the Physicochemical Properties of White Seedless Quchan Raisin Cultivar** 491
F. Kiumarsi Darbandi, Y. Selahvarzi, B. Abedy, M. Kamali, H. Sadrnia
- Investigating the Performance of Agricultural Mechanization Service Cooperatives in Gilan Province Using a Combined Delphi-AHP-SWOT Method** 511
M. Bamdad, M. Zangeneh, S. H. Payman
- Performance Analysis of a Walnut Peeler with a Rotating Cutting Plate** 529
H. Samimi Akhijahani, M. S. Barghi Jahromi
- Real-Time Measurement of In-Field Soil Surface Roughness Using Laser and Infrared Sensors** 547
N. Salehi Babamiri, H. Hajy Agha Alizade, M. Dowlati
- Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province** 567
B. Dosti, A. Asakereh
- Field and Economic Evaluation of Spraying Drones Versus Boom Sprayers for Weed and Yellow Rust control in Wheat fields** 587
M. Safaeinejad, M. Ghasemi-Nejad Raeini, M. Taki
- Investigating the Effect of Sodium Acetate Substrate Concentration and Oxygenation Rate on System Voltage and Pollution Removal in a Plant Microbial Fuel Cell** 605
Sh. Shokri, V. Rostampour, K. Mollazade, S. Amiri, A. Fathoolahi Qharachapogh

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 15

No. 4

2025

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Director-in-Charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editor-in-Chief: Prof. M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

- Abbaspour-Fard, M. H. Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Aboonajmi, M. Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
- Aghkhani, M. H. Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Alimardani, R. Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- Emadi, B. Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
- Ghazanfari Moghaddam, A. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
- Kadkhodayan, M. Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Khoshtaghaza, M. H. Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
- Loghavi, M. Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
- Modarres Razavi, M. Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Mohtasebi, S. S. Department of Mechanics of Biosystem, Faculty of Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- Nasirahmadi, A. Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
- Pourreza, A. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States of America
- Raji, A. Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
- Rohani, A. Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Saiedirad, M. H. Agricultural Engineering Research Institute, Mashhad, Iran
- Sayasoonthorn, S. Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

Web Site: <https://jame.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

Vol. 15

No. 4

2025

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

- Evaluating the Effects of Grape Harvest Time and Vacuum Drying on the Physicochemical Properties of White Seedless Quchan Raisin Cultivar** 491
F. Kiumarsi Darbandi, Y. Selahvarzi, B. Abedy, M. Kamali, H. Sadrnia
- Investigating the Performance of Agricultural Mechanization Service Cooperatives in Gilan Province Using a Combined Delphi-AHP-SWOT Method**511
M. Bamdad, M. Zangeneh, S. H. Payman
- Performance Analysis of a Walnut Peeler with a Rotating Cutting Plate**529
H. Samimi Akhijahani, M. S. Barghi Jahromi
- Real-Time Measurement of In-Field Soil Surface Roughness Using Laser and Infrared Sensors**.....547
N. Salehi Babamiri, H. Hajy Agha Alizade, M. Dowlati
- Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province**.....567
B. Dosti, A. Asakereh
- Field and Economic Evaluation of Spraying Drones Versus Boom Sprayers for Weed and Yellow Rust control in Wheat fields**587
M. Safaiejad, M. Ghasemi-Nejad Racini, M. Taki
- Investigating the Effect of Sodium Acetate Substrate Concentration and Oxygenation Rate on System Voltage and Pollution Removal in a Plant Microbial Fuel Cell**605
Sh. Shokri, V. Rostampour, K. Mollazade, S. Amiri, A. Fathoolahi Qharachapogh