



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۲

جلد ۱۶

سال ۱۴۰۵

(شماره پیاپی: ۴۰)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

۲۶۹..... ساخت و ارزیابی ماشین نشاکار برنج به صورت خشکه کاری
احمد سادین، محمدحسین آق خانی، محمدعلی ابراهیمی نیک، جلال برادران مطیع

ارتباط عملکرد محصول انگور با شاخص های گیاهی سنجش از دور: ترکیبی تصاویر سنتینل راداری و اپتیکی
و مدل های یادگیری ماشین..... ۲۸۹
حمیدرضا ملکی، مهرانه خدامرادپور، حسنی محمدی منور

تشخیص میوه خیار روی بوته در محیط گلخانه با استفاده از الگوریتم تشخیص اشیاء YOLOv8..... ۳۰۵
علی رضا سلیمانی پور

بهینه سازی چندمتغیره کیفیت خاک وورزی گاوآهن برگردان دار با استفاده از روش سطح پاسخ..... ۳۱۹
محمد اکبری، عیسی حزباوی، مصطفی جعفریان

بررسی و مقایسه انرژی و مدل سازی عملکرد شلتوک ارقام محلی و پرمحصول با مدل برنامه نویسی ژنتیک چندژنی..... ۳۳۷
سینا شریفی، عباس عساکره، مصطفی کیانی ده کیانی، سمیه جنت رستمی

طراحی و ساخت شاسی حامل هرس بشقابی در محیط انبارخاک و اندازه گیری نیروی کششی آن ۳۵۵
حسین شعبانی شش پلی، محمد عسکری، داود کلاتری

نشریه ماشین های کشاورزی

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

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

تابستان ۱۴۰۵

جلد ۱۶ شماره ۲

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد

استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین

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

آغباشلو، مرتضی

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

ابونجمی، محمد

گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، ایران

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

مدرس رضوی، محمدرضا

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

نصیراحمدی، ابودر

گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه کاسل، آلمان

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

DOAJ, CABI, Web of Science: Emerging Sources Citation Index™ (ESCI), Scopus, AGRIS

Internet Archive, Google scholar, EBSCO, پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC), سامانه نشریات علمی ایران و

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

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

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

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۲۶۹ ساخت و ارزیابی ماشین نشاکار برنج به صورت خشکه کاری
احمد سادین، محمد حسین آق خانی، محمد علی ابراهیمی نیک، جلال برادران مطیع
- ۲۸۹ ارتباط عملکرد محصول انگور با شاخص های گیاهی سنجش از دور: ترکیبی تصاویر ستینل راداری و اپتیک و مدل های یادگیری ماشین
حمیدرضا ملکی، مهرانه خدامرادپور، حسنی محمدی منور
- ۳۰۵ تشخیص میوه خیار روی بوته در محیط گلخانه با استفاده از الگوریتم تشخیص اشیاء YOLOv8
علی رضا سلیمانی پور
- ۳۱۹ بهینه سازی چندمتغیره کیفیت خاک ورزی گاواهن برگردان دار با استفاده از روش سطح پاسخ
محمد اکبری، عیسی جزاوی، مصطفی جعفریان
- ۳۳۷ بررسی و مقایسه انرژی و مدل سازی عملکرد شلتوک ارقام محلی و پرمحصول با مدل برنامه نویسی ژنتیک چندژنی
سینا شریفی، عباس عساکره، مصطفی کیانی ده کیانی، سمیه جنت رستمی
- ۳۵۵ طراحی و ساخت شاسی حامل هرس بشقابی در محیط انباره خاک و اندازه گیری نیروی کششی آن
حسین شعبانی شش پلی، محمد عسکری، داود کلانتری

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 267-285

Manufacturing and Evaluation of a Dry land Rice Transplanter

A. Sadin¹, M. H. Aghkhani¹, M. A. Ebrahimi-Nik¹, J. Baradaran Motie^{1*}

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

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

Received: 23 September 2023
Revised: 25 November 2023
Accepted: 29 November 2023
Available Online: 08 March 2025

How to cite this article:

Sadin, A., Aghkhani, M. H., Ebrahimi-Nik, M. A., & Baradaran Motie, J. (2026). Manufacturing and Evaluation of a Dry land Rice Transplanter. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 267-285. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2023.84424.1190>

Introduction

Planting rice seedlings in the main field followed by periodic or intermittent irrigation is often considered a form of dry farming. Research suggests that flood irrigation in rice cultivation is primarily favored by farmers for its ability to control weeds and ensure a reliable water supply, rather than necessarily enhancing rice quality or yield. Depending on the rice variety, intermittent irrigation can sometimes improve both the quality and yield per unit area. The transplanting process in this method can be carried out manually without machinery or through mechanized methods using a planter.

Materials and Methods

Conventional rice transplanters designed for use in flooded land are not suitable for transplanting in dry land farming due to technical constraints. Therefore, it is necessary to develop a specialized rice transplanter tailored for such soil condition. This transplanter encompasses essential components, including a furrow opener, coverer, seedling storage tank or tray, seedling mechanism (distributor), seedling transfer mechanism (seedling transport piston), end separator for seedlings in the soil, power transmission system, depth adjustment shoe, and main and sub chassis. To evaluate the planter's performance, various parameters were assessed, including the percentage of lost plants, the average vertical angle of plant orientation, the average spacing between plants in the crop row, and the average number of seedlings per plant. Moreover, a factorial randomized block design was employed, with three replications for each level of the independent variables. The independent variables were forward speed (X1) at three levels of 0.25, 0.5, and 1 m s⁻¹, planting depth (X2) at three levels of 4, 8, and 12 cm, and the size of the outlet opening of the seedling tray (X3) in three levels of 10, 15, and 20 mm.

Results and Discussion

The developed single-row planter features key specifications, including a working width of 250 mm, a power requirement of 0.57 kW, a theoretical field capacity of 0.06 ha h⁻¹, and a field efficiency of 66.67%. The research findings revealed that forward speed, planting depth, and outlet opening size, along with their interactions, significantly impact the percentage of lost plants at the 99% confidence level. Among the three levels of forward speed (X1), the best speed level is 0.25 m s⁻¹, as it results in the lowest percentage of lost seedlings. As the forward speed increases, the percentage of lost seedlings increases. The lowest percentage of lost plants (Y1) occurs at the planting depth of 8 cm and an outlet opening size of 20 mm. Furthermore, forward speed, planting depth, and their interaction have a noteworthy influence on the vertical angle of plants are established, at the 99% confidence level. With the increase of forward speed and planting depth, the average vertical angle of seedling establishment deviates from the vertical position. The forward speed of 0.25 meters per second and the planting depth of 8 cm show the best results for the establishment of seedlings. The sole factor affecting the spacing between plants in the row is the forward speed. The size of seedling tray's outlet opening significantly affects the number of seedlings per plant at the 99% confidence level, while planting depth affects it at the 95%



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.84424.1190>

confidence level.

Conclusion

Given the recent water crisis, adopting the dry rice farming method and using transplanters offers a viable solution for managing and conserving water in agriculture. Implementing dry planting with a custom-made transplanter yields several benefits, including reduced water consumption, lower cultivation costs, improved soil aeration, increased efficiency, and simplified planting processes. Utilizing this transplanter is an effective strategy to decrease both the time and expenses related to transplanting, while also mechanizing rice planting in dry fields.

Keywords: Dry farming, Forward speed, Rice paddy, Transplanter

ساخت و ارزیابی ماشین نشاکار برنج به صورت خشکه کاری

احمد سادین^{۱*}، محمدحسین آق خانی^{۱*}، محمدعلی ابراهیمی نیک^{۱*}، جلال برادران مطیع^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۸

چکیده

استفاده از روش خشکه کاری و به کارگیری آبیاری دوره‌ای یا تناوبی، می‌تواند سبب کاهش مصرف آب در کشت برنج شود. استفاده از نشاکارهای مرسوم جهت نشای برنج در خاک امکان‌پذیر نبوده و این نشاکارها برای کار در زمین غرقاب طراحی شده‌اند. در این پژوهش نشاکار خشکه کاری برنج که می‌تواند عملیات نشاکاری را در خاک انجام دهد، طراحی و ساخته شد. اجزای اصلی این نشاکار شامل شیار بازکن، پوشاننده، مخزن ذخیره نشا یا سینی نشا، مکانیزم بوته ساز (موزع)، مکانیزم انتقال بوته به خاک (پیستون حمل نشا)، جداکننده انتهایی بوته در خاک، سیستم انتقال توان، کفشک تنظیم عمق، شاسی اصلی و فرعی بود. مشخصات کلی نشاکار طراحی و ساخته شده به ازای یک ردیف، شامل عرض کار ۲۵۰ mm، توان دورانی مورد نیاز ۰/۵۷ kW، ظرفیت مزرعه‌ای تئوری ۰/۰۶ ha hr⁻¹ و بازده مزرعه‌ای ۶۶/۶۷ درصد است. به منظور ارزیابی عملکرد نشاکار ساخته شده، صفات درصد بوته‌های از دست‌رفته، میانگین زاویه‌ای استقرار بوته‌ها نسبت به افق، میانگین فاصله نشاها روی ردیف کشت و میانگین تعداد نهال در بوته مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون‌ها با استفاده از آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح سرعت پیشروی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و عمق نشاکاری در سه سطح ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر و اندازه دهانه خروجی سینی نشا در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات سرعت پیشروی، عمق نشاکاری و اندازه دهانه خروجی و اثر متقابل سرعت و عمق در سطح ۹۹ درصد بر روی درصد بوته‌های از دست‌رفته دارای تاثیر معنادار بود. همچنین متغیرهای مستقل سرعت پیشروی، عمق نشاکاری و اثر متقابل آن‌ها بر زاویه استقرار بوته در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود. تنها متغیر مستقل سرعت پیشروی بر فاصله بین بوته‌ها روی ردیف تاثیر معنی‌دار بود. همچنین، اثرات اندازه دهانه خروجی سینی نشا در سطح ۹۹ درصد و عمق نشاکاری در سطح ۹۵ درصد بر روی تعداد نهال در بوته معنادار بودند.

واژه‌های کلیدی: خشکه کاری، سرعت پیشروی، نشاکار، نهال برنج

مقدمه

میلیون تن شلتوک تولید شد که سه کشور چین، هند و اندونزی به ترتیب رتبه‌های اول، دوم و سوم را در تولید شلتوک داشته‌اند (FAO, 2020). سهم ایران از نظر سطح زیر کشت برنج در حدود ۴ درصد کل سطح زیر کشت برنج در جهان (معادل ۵۶۰ هزار هکتار) می‌باشد. تولید این محصول در ایران از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۶ به میزان ۶۲/۸ درصد روند صعودی داشته و در سال زراعی ۹۶-۹۷ بیش از ۳ میلیون تن شلتوک تولید کرده است (Farahmandfar et al., 2009). از نظر سطح زیر کشت، استان‌های مازندران و گیلان (حدود ۷۵ درصد کل کشت برنج کشور) به ترتیب دارای مقام‌های اول و دوم هستند. از مجموع ۷/۸ میلیون هکتار اراضی فاریاب ایران، ۷/۴ درصد به کشت برنج اختصاص یافته است، در صورتی که ۱۲/۶ درصد از ۸۳ میلیون مترمکعب آب بخش کشاورزی برای آبیاری شالیزارها به مصرف می‌رسد (Alizadeh, Minaei, Tavakoli, & Khoshtaghaza, 2006).

شیوه رایج و مرسوم تولید برنج در بسیاری از مناطق جهان از

بیشترین سطح زیر کشت بعد از گندم در جهان به برنج اختصاص دارد (Awika, 2011; Ghanbarian, Valaei, Ghasemi, Varnamkhasti, & Aghagoolzade, 2017). این غله غذای اصلی هفتاد درصد از مردم دنیا و تامین‌کننده حداقل نیمی از انرژی مورد نیاز آن‌ها می‌باشد (Rabbani & Ali, 2009). برنج در ایران نیز پس از گندم، دومین غذای اصلی به‌شمار می‌رود و به‌عنوان منبع درآمد هزاران خانوار شالی‌کار ایرانی محسوب می‌شود (Farahmandfar, Farahmandfar, & Ramezani, 2009). بر اساس آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، در جهان ۷۸۲

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

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: j.baradaran@um.ac.ir)

 <https://doi.org/10.22067/jam.2023.84424.1190>

استفاده نمود (Hafeez, Bouman, Van de Giesen, & Vlek, 2007). کیانی و همکاران (Kiani, Al-Azmani, & Feyz-Bakhsh, 2023) تحقیقی را در استان گلستان بر روی سه شیوه کشت برنج: مرسوم نشایی، مستقیم نشاء و مستقیم بذر در بستر غیرگلخراپ انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که مقدار مصرف آب در سه شیوه اشاره شده به ترتیب ۱۳۸۳۰، ۸۳۰۰ و ۸۴۴۰ مترمکعب در هکتار بود و عملکرد متناظر ۸۰۹۴، ۳۶۴۵ و ۶۳۷۶ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. لذا روش کشت مستقیم با آبیاری قطره‌ای را به جای روش سنتی برنج به دلیل کاهش مقدار آب و افزایش بهره‌وری، پیشنهاد نمودند و برای فراگیر کردن این شیوه، توصیه کردند در انتخاب رقم با دوره رشد کوتاه، تاریخ مناسب کاشت و تغذیه مناسب برای کاهش اختلاف عملکرد توجه و دقت لازم به عمل آید.

سینک و همکاران (Singh, Singh, Johnson, & Mortimer, 2005) نیز عملکرد روش‌های خشکه‌کاری و مرسوم برنج را در منطقه هشیارپور هند مورد ارزیابی قرار داد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش خشکه‌کاری سبب کاهش فرسایش و افزایش فواصل آبیاری شده و حدود ۲۵ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی شده است. همچنین این روش در مقایسه با روش مرسوم، هزینه تولید را ۱۳۰۰۰ روپیه کاهش داده است. وینای و همکاران (Vinay, Kumar, Parkash, & Kumari, 2016) گزارش دادند که خشکه‌کاری برنج نسبت به شیوه مرسوم از لحاظ اقتصادی موجه و سودآورتر است. چاندراسخارارائو و همکاران (Chandrasekhararao, Jitendranath, & Murthy, 2013) نیز نتیجه گرفتند که خشکه‌کاری طول دوره زراعی را کاهش (۸ تا ۱۰ روز) و باعث افزایش عملکرد در کشت‌های تابستانه و بهاره به میزان ۸/۳ و ۱۱ درصد شده است.

با توجه به مطالب بیان‌شده و بحران آب در سال‌های اخیر، به‌کارگیری روش خشکه‌کاری در زراعت برنج ضروری است. ساخت نشاکاری که بتواند نهال‌های برنج را در خاک مزرعه نشا کند و نوار آبیاری قطره‌ای را کنار آن‌ها قرار دهد، می‌تواند عملیات خشکه‌کاری برنج را مکانیزه کند. به‌کارگیری نشاکار خشکه‌کاری برنج می‌تواند باعث کاهش هزینه کشت، افزایش سرعت کار و سهولت عملیات نشاکاری در خاک شود.

مواد و روش‌ها

نشاکارهای متداول بوته برنج را درون گل یا زمین غرقاب به صورت پانچی قرار می‌دهند، در حالی که این کار را نمی‌توان در خاک خشک انجام داد چون باعث آسیب دیدن بوته نشا و انگشتی‌های نشاکار می‌شود. به‌منظور نشای برنج در شرایط خشکه‌کاری، نشاکار خشکه‌کاری برنج در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۱ در هنرستان کشاورزی امام خمینی علی آباد کنول ساخته شد. نشاکار از

جمله ایران، کشت نشایی است. بدین معنی که نشاء بعد از آماده‌سازی زمین در بستر گل‌خراپ^۱ کاشته و سپس رژیم آبیاری غرقاب دائم در آن برقرار می‌شود. افزایش دسترسی به مواد مغذی و مهار علف‌های هرز از مزایای این شیوه کشت محسوب می‌شود (Singh, Sharma, & Prasad, 2001). از طرفی تلفات زیاد آب، تبخیر سطحی، نفوذ عمقی آب، نیاز فراوان به نیروی کار و در نتیجه حاشیه سود از معایب آن است (Pandey & Velasco, 1999). بسیاری از محققان بر این باورند که روش آبیاری غرقابی برای زراعت برنج ضرورتی ندارد و فقط ابزار مدیریتی مناسبی برای کنترل آفات، دسترسی آسان به مواد غذایی و جلوگیری از تنش آبی است. با این حال، به‌کارگیری روش غرقابی نیاز به مصرف مقادیر زیاد آب دارد (Brown, Turner, Thomas, Deuel, & Keener, 1977). از آن‌جا که منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی رو به کاهش می‌باشد، به یک عامل محدودکننده کشت و تولید برنج تبدیل شده است. از این‌رو تغییر شیوه سنتی و مرسوم کاشت برنج ضرورت دارد (Farooq, Wahid, Lee, Ito, & Siddique, 2009).

نشای بوته برنج در خاک مزرعه و سپس آبیاری دوره‌ای یا تناوبی، به‌عنوان یکی از روش‌های خشکه‌کاری مطرح است. عملیات نشای برنج در این روش می‌تواند دستی و غیرمکانیزه و یا توسط نشاکار^۲، مکانیزه باشد. از سال ۱۹۵۰، تغییر شیوه کاشت برنج از مرسوم به خشکه‌کاری در کشورهای در حال توسعه از جمله کشورهای جنوب شرقی آسیا رخ داده است (Pandey & Velasco, 2002; Pandey & Velasco, 2005). به‌طور کلی در سال ۲۰۰۷ حدود ۲۳ درصد برنج در سطح جهان به‌صورت خشکه‌کاری تولید شده است (Rao, Johnson, Sivaprasad, Ladha, & Mortimer, 2007). بر اساس تحقیقات انجام‌شده، روش آبیاری غرقابی در زراعت برنج، تنها به‌دلیل کنترل علف‌های هرز و ایجاد یک ذخیره مطمئن آبی، مطلوب کشاورزان می‌باشد و الزاماً تأثیر مثبتی بر کیفیت و عملکرد برنج ندارد و بسته به رقم برنج، در برخی موارد استفاده از آبیاری تناوبی، موجب بهبود خواص کیفی و عملکرد برنج در واحد سطح می‌شود (Usefian, Arabzade, Soodaee Mashae, & Mohammadi Nesheli, 2014). نتایج تحقیقی در مازندران نشان داد برای رقم شیروودی (پرمحصول) با در نظر گرفتن همه عوامل بهترین روش آبیاری تناوبی است که پس از ناپدید شدن آب از سطح زمین، آبیاری به ارتفاع ۵ سانتی‌متر انجام گردد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان عنوان کرد در ارقام پرمحصول الزامی به غرقاب نمودن دائم مزرعه نیست. خصوصاً در شرایط خشک‌سالی سال‌های اخیر می‌توان از روش کم‌آبیاری یا آبیاری تناوبی به‌جای آبیاری کامل

- 1- Puddling
- 2- Transplanter

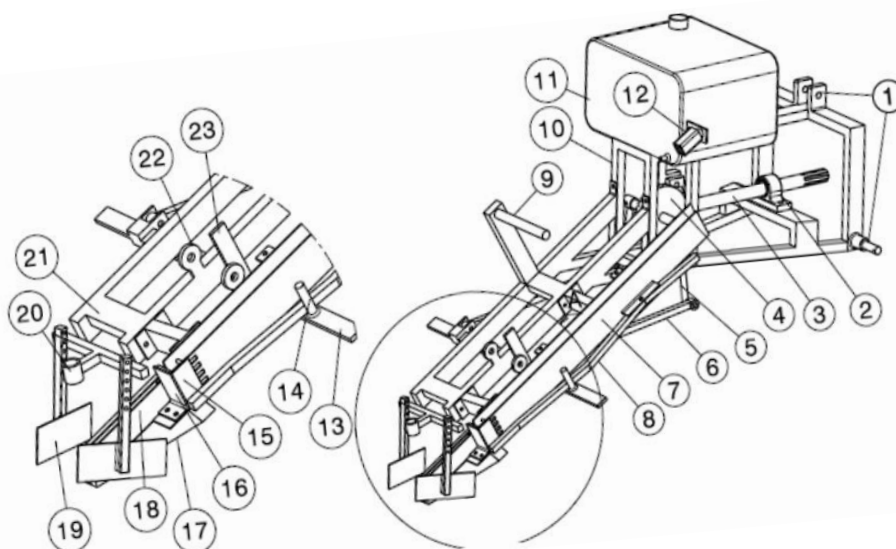
نوع سوارشونده پشت تراکتوری است. برای طراحی و ساخت این نشاکار در بعضی قسمت‌ها از مکانیزم سایر کارنده‌ها الگوبرداری شد. در این نشاکار برای انتقال نشا به خاک از مکانیزم پیستونی رفت و برگشتی استفاده شد. سایر قسمت‌های نشاکار بعد از ساخت مدل‌های آزمایشی متعدد و انتخاب بهترین مکانیزم، ساخته شدند. در شکل ۱ تصویری از نشاکار ساخته شده مشاهده می‌شود.

اجزای اصلی نشاکار

در شکل ۲، ریز اجزای نشاکار خشکه کاری برنج نشان داده شده است.



شکل ۱- نشاکار خشکه کاری برنج
Fig.1. Dry farm rice transplanter



شکل ۲- اجزای مختلف نشاکار

Fig.2. Transplanter parts

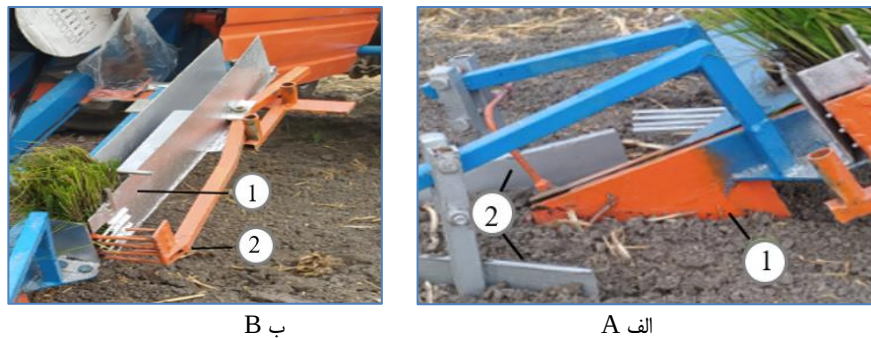
- (۱- محل اتصال سه نقطه، ۲- یاتاقان نگهدارنده محور پنیون، ۳- محور پنیون، ۴- کرانویل، ۵- میل لنگ، ۶- شاتون یا دسته پیستون، ۷- محفظه ذخیره یا سینی نشا، ۸- بازوی بوته‌ساز یا چنگال بوته‌ساز، ۹- نگهدارنده بسته نوار آبیاری، ۱۰- شاسی اصلی، ۱۱- مخزن آب، ۱۲- محل نصب دوربین، ۱۳- رابط شاتون و پیستون، ۱۴- محرک بازو یا چنگال بوته‌ساز، ۱۵- تنظیم‌کننده بازو یا چنگال بوته‌ساز، ۱۶- تنظیم‌کننده انتهای محفظه ذخیره نشا، ۱۷- شیار بازکن، ۱۸- محفظه پیستون انتقال نشا، ۱۹- پوشاننده، ۲۰- محل قرارگیری نازل آبیاری، ۲۱- شاسی فرعی، ۲۲- محل قرارگیری حسگر نوری یا آشکارساز حرکتی و ۲۳- مانع قطع‌کننده سیگنال حسگر نوری)
- (1- Three-point hitch, 2- Bearing of pinion shaft, 3- Pinion shaft, 4- Crown wheel, 5- Crankshaft, 6- Connecting rod, 7- Paddy tray, 8- Distributor handle or fork, 9- Drip irrigation strip hanger, 10- Main chassis, 11- Water tank, 12- Camera position, 13- Piston connector, 14- Driver of distributor fork, 15- Distributor regulator, 16- Tray end regulator, 17- Furrow opener, 18- Guard of Piston, 19- Covering device, 20- Irrigation nozzle position, 21- Sub chassis, 22- Optical sensor position, and 23- Signal interrupter)

در ادامه به معرفی قسمت‌های اصلی نشاکار و وظیفه هر بخش پرداخته می‌شود.

شیاربازکن و پوشاننده

به منظور باز کردن شیار در خاک خاک‌ورزی شده مزرعه، با

الگوبرداری از سایر کارنده‌ها از شیاربازکن کاردی یا خنجری در نشاکار ساخته شده استفاده شد. برای خاک‌دهی طرفین بوته‌های نشاشده از پوشاننده صفحه‌ای مستطیلی استفاده شد. عمق و زاویه صفحات پوشاننده با توجه به شرایط خاک و نشا قابل تنظیم است. تصویر شیاربازکن و پوشاننده در شکل ۳ قسمت الف نشان داده شده است.



شکل ۳- الف) ۱- شیاربازکن، ۲- پوشاننده؛ ب) ۱- سینی نشا، ۲- موزع
Fig.3. A) 1- Furrow opener, 2- Coverer; B) 1- Planting tray, 2- Distributor

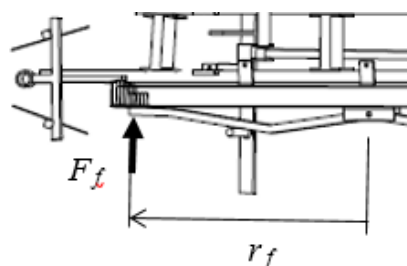
رابطه مستقیم دارد. چنگال تغذیه در هر بار حرکت خود یک بوته نشا را جداسازی کرده و درون دهانه محفظه پیستون قرار می‌دهد. در شکل ۳ قسمت ب چنگال تغذیه موزع نشان داده شده است. توان مورد نیاز موزع نشاکار مطابق شکل ۴ پس از اندازه‌گیری نیروی لازم جهت انتقال نشا از سینی به سمت خاک توسط نیروسنج دیجیتالی با دقت ۵ گرم و دانستن سرعت رفت و برگشت پیستون حمل نشا و موزع طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است (Spotts, Shob, & Horen, 2004; Berger, 2004).

مخزن ذخیره نشا یا سینی نشا

سینی نشا قسمتی از نشاکار است که نهال‌های برنج در آن قرار می‌گیرند. حجم و اندازه سینی نشا باید به اندازه‌ای باشد که نیاز به نهال‌گذاری در فواصل زمانی خیلی کوتاه نباشد. در شکل ۳ قسمت ب سینی نشاکار نشان داده شده است.

موزع یا مکانیزم بوته‌ساز

موزع نشاکار طوری ساخته شده است که تعداد رفت و برگشت چنگال تغذیه در واحد موزع با تعداد دوران محور P.T.O تراکتور



شکل ۴- اندازه‌گیری نیروی لازم جهت انتقال بوته‌ها از سینی نشا به سمت خاک

Fig.4. Measuring the force required to transfer the plants from the seedling tray to the soil

شاتون و پیستون اجزایی هستند که حرکت دورانی را به حرکت رفت و برگشتی تبدیل می کنند. پس از جداسازی و قرارگیری بوته نشا درون محفظه پیستون، بوته نشا توسط پیستون به سمت خاک انتقال می یابد. اجزای سیستم انتقال توان در شکل ۵ نشان داده شده است. توان مورد نیاز جهت انتقال بوته نشا توسط پیستون به سمت خاک طبق رابطه (۲) به دست می آید (Spotts et al., 2004).

$$P_p = \frac{F_p \cos(\alpha) \times r_m \times n_m}{9550} \quad (2)$$

در این رابطه:

P_p توان مورد نیاز پیستون حمل نشا (kW)

F_p نیروی مورد نیاز جهت حمل بوته توسط پیستون حمل کننده نشا (N)

r_m شعاع لنگ میل لنگ (m)

α زاویه بین پیستون حمل کننده نشا و شاتون (درجه)

n_m سرعت دورانی میل لنگ (rpm)

$$P_f = \frac{F_f \times r_f \times n_f}{9550} \quad (1)$$

در این رابطه:

P_f توان مورد نیاز موزع نشاکار (kW)

r_f طول بازوی چنگال تغذیه کننده (m)

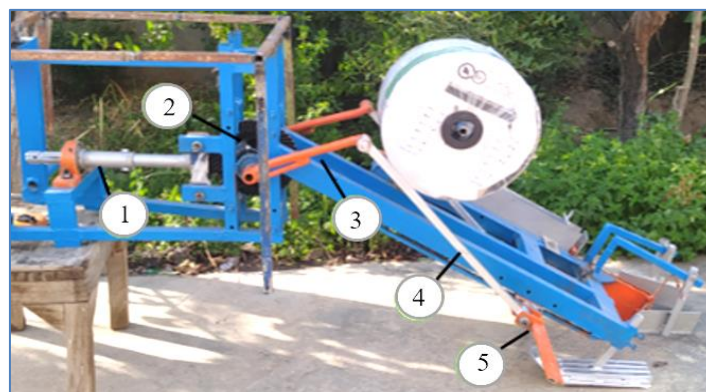
F_f نیروی مورد نیاز جهت جداسازی و انتقال بوته نشا از سینی

نشاکار به درون محفظه پیستون (N)

n_f تعداد رفت و برگشت چنگال تغذیه (سیکل بر دقیقه)

سیستم انتقال توان

اجزای سیستم انتقال توان شامل محور پنیون و پنیون، کرانویل، میل لنگ، دسته پیستون (شاتون)، رابط شاتون و پیستون و پیستون حمل نشا می باشد. محور پنیون دوتکه ساخته می شود و توسط پیچ بریده شونده به هم متصل می شود. نسبت دور سیستم انتقال توان کاهش و برابر ۵:۱ است یعنی هرگاه محور پنیون پنج دور بچرخد، محور خروجی کرانویل یک دور می چرخد. میل لنگ و شاتون و رابط



شکل ۵- اجزای سیستم انتقال توان (۱- محور پنیون، ۲- پنیون و کرانویل، ۳- میل لنگ، ۴- دسته پیستون یا شاتون و ۵- رابط شاتون به پیستون)

Fig.5. Components of the power transmission system (1- Pinion axis, 2- Pinion and crankshaft, 3- Crankshaft, 4- Piston handle or connecting rod, and 5- Connecting rod to piston)

$$d_o^3 = \frac{256 \times f_s}{15\pi \times 0.5 \sigma_{yp}} \sqrt{(c_m M)^2 + (c_i T)^2} \quad (4)$$

در این رابطه:

d_o قطر خارجی محور (m)

f_s ضریب اطمینان

σ_{yp} تنش نقطه تسلیم (pa)

M ممان خمشی وارد بر محور (N.m)

T گشتاور پیچشی وارد بر محور (N.m)

c_m ضریب عددی ضربه ای و خستگی ممان خمشی و c_i ضریب

توان دورانی کل مورد نیاز نشاکار طبق رابطه (۳) از مجموع توان مورد نیاز واحد موزع و توان مورد نیاز واحد پیستون حمل کننده نشا حاصل می شود.

$$P_T = P_f + P_p \quad (3)$$

در این رابطه P_T توان دورانی کل مورد نیاز برای یک واحد نشاکار بر حسب کیلووات است که توسط محور تواندهی تراکتور تامین می گردد.

قطر خارجی محور پنیون و محور میل لنگ از رابطه (۴) قابل محاسبه است (Popov, 1976).

TFC ظرفیت زراعی تئوری نشاکار ($ha\ hr^{-1}$)

W_{at} عرض کار نشاکار (m)

S سرعت پیشروی متوسط نشاکار (kph)

ظرفیت زراعی واقعی یا سرعت کار عبارت است از مساحت واقعی نشاشده توسط نشاکار تقسیم بر زمان کل نشاکاری که از رابطه (۸) به دست می‌آید (ANTAM, 2017).

$$AFC = \frac{A_t}{T_t} \quad (8)$$

که در این رابطه:

AFC ظرفیت زراعی واقعی نشاکار ($ha.hr^{-1}$)

A_t مساحت واقعی نشاشده توسط نشاکار (ha)

T_t زمان کل نشاکاری (h)

بهره‌وری زراعی از تقسیم ظرفیت زراعی واقعی بر ظرفیت زراعی تئوری طبق رابطه (۹) به دست می‌آید (ANTAM, 2017).

$$E = \frac{AFC}{TFC} \times 100 \quad (9)$$

که در این رابطه E بهره‌وری زراعی بر حسب درصد می‌باشد. به منظور ارزیابی عملکرد نشاکار از روش فاکتوریل الگوی بلوک کامل تصادفی استفاده شد و برای هر سطح از متغیرهای مستقل سه تکرار انجام شد. در هر تکرار به طول ۲۰ متر عملیات نشاکاری صورت گرفت که ۵ متر ابتدا و انتهای نمونه به منظور یکنواخت شدن کار نشاکار حذف شدند و بوته‌های ۱۰ متر میانی ملاک نتایج داده‌برداری قرار گرفتند. متغیرهای مستقل یا تیمارهای آزمایش، سرعت پیشروی ($X1$) در سه سطح ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه، عمق نشاکاری ($X2$) در سه سطح ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر و اندازه دهانه خروجی سینی نشا ($X3$) در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. متغیرهای وابسته درصد بوته‌های از دست‌رفته ($Y1$)، میانگین زاویه استقرار بوته‌ها ($Y2$)، میانگین فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ($Y3$) و میانگین تعداد نهال در بوته ($Y4$) انتخاب شدند (Mohammadzamani, Ghezavati, & Nazari, 2015; Hosseini & Logavi, 2009).

نتایج و بحث

در این فصل ابتدا نتایج به دست آمده برای قسمت‌های مهم نشاکار در قالب جداول مشخصات آورده می‌شود. در ادامه به نتایج ارزیابی مزراحه‌ای نشاکار پرداخته می‌شود.

مشخصات کلی نشاکار

در جدول ۱ نتایج مربوط به موارد اشاره شده در بخش مواد و روش‌ها در قالب مشخصات کلی و اطلاعات فنی نشاکار آورده شده است.

عددی ضربه‌ای و خستگی گشتاور پیچشی می‌باشند.

زاویه پیچش برای محور پنیون و میل لنگ که تحت گشتاور پیچشی قرار دارند طبق رابطه (۵) به دست می‌آید (Popov, 1976).

$$\phi = \frac{T \times l}{G \times I_p} \quad (5)$$

در این رابطه:

ϕ زاویه پیچش (rad)

T گشتاور پیچشی ($N.m$)

l طول محور (m)

G مدول برشی یا مدول صلابت برای جنس محور (pa)

I_p ممان اینرسی قطبی (m^4)

می‌توان با استفاده از رابطه (۶) بار مجاز یا عمر بلبرینگ محور پنیون و محور میل لنگ را مشخص کرد (Spotts et al., 2004).

$$\frac{N_e}{10^7} = \left(\frac{C}{P_e}\right)^3 \quad (6)$$

در این رابطه:

N_e تعداد دور چرخش در طول عمر بلبرینگ

C بار مجاز بلبرینگ برای عمر یک میلیون دور (lb)

P_e بار مجاز برای عمر مشخص (lb)

ارزیابی مزراحه‌ای نشاکار

ارزیابی مزراحه‌ای نشاکار با نشای رقم طارم فجر و بر اساس استاندارد ارایه شده توسط دبیرخانه آسیایی اقیانوسیه ماشین‌های کشاورزی (ANTAM) ۱ زمانی انجام شد که سن نشاها ۳۵ روز و در مرحله ۳-۵ برگی و ارتفاع آن‌ها به ۲۰ سانتی‌متر رسید. ارزیابی در زمینی به مساحت ۱۰۰۰ متر مربع و بافت خاک رسی و درصد رطوبت ۱۲ درصد در مزارع شهرستان آزادشهر استان گلستان صورت گرفت. خاک‌ورزی اولیه و ثانویه از قبل در مزراحه انجام شد. در ارزیابی مزراحه‌ای ظرفیت زراعی تئوری ۲، ظرفیت زراعی واقعی یا سرعت کار ۳ و بهره‌وری زراعی ۴ اندازه‌گیری شدند. ظرفیت زراعی تئوری بر حسب مساحت نشاشده بر واحد زمان بیان می‌شود و از حاصل ضرب عرض کار نشاکار ۵ در سرعت پیشروی متوسط نشاکار ۶ طبق رابطه (۷) به دست می‌آید (ANTAM, 2017).

$$TFC = \frac{W_{at} \times S}{10} \quad (7)$$

که در این رابطه:

- 1- Asian and Pacific Network for Testing of Agricultural Machinery
- 2- Theoretical field capacity
- 3- Actual field capacity or rate of work
- 4- Field efficiency
- 5- Working width
- 6- Average operational speed

جدول ۱- مشخصات کلی نشاکار خشکه کاری برنج

Table 1- General characteristics of rice dry-planter

واحد Unit	مقدار Value	کمیت Quantity
mm	1830×1100×1210	ابعاد نشاکار (ارتفاع × عرض × طول) Dimensions of the planter (height×width×length)
kg	98	وزن خالص (بدون ضمايم)* Net weight (without attachments)*
kW	0.57	توان دورانی مصرفی کل Total rotational power consumption
mm	900×10	ابعاد سینی نشا (عرض × طول) Planting tray dimensions (width x length)
-	1	تعداد ردیف Number of rows
mm	250	عرض کار effective width
m s ⁻¹	1	حداکثر سرعت پیشروی Maximum forward speed
ha hr ⁻¹	0.09	ظرفیت مزرعه‌ای تئوری Theoretical farm capacity
ha hr ⁻¹	0.06	ظرفیت مزرعه‌ای واقعی Real farm capacity
%	66.67	ضریب بازده مزرعه‌ای Farm efficiency coefficient

* ابعاد و وزن نشاکار بدون احتساب مخزن آب و بسته نوار آبیاری می‌باشد.

* The dimensions and weight of the planter does not include the water tank and the irrigation tape.

شیار بازکن و پوشاننده

در ارزیابی مزرعه ای نشاکار، شیار بازکن و پوشاننده از کارایی مطلوبی در باز کردن شیار و پوشاندن طرفین نشا برخوردار بودند. عرض شیار باز شده توسط شیار بازکن ۳ سانتی متر می‌باشد. شیار بازکن و پوشاننده صفحه‌ای به کار گرفته شده با انجام تنظیمات توانستند عمق نشاکاری ۴ تا ۱۸ سانتی متر را حاصل نمایند.

مخزن ذخیره نشا یا سینی نشا

در ارزیابی مزرعه‌ای نشاکار مساحت حداقل مورد نیاز مقطع مخزن یا سینی نشاکار برای مدت ۳۰ دقیقه نشاکاری پیوسته ۹۰۰ سانتی متر مربع به دست آمد. با توجه به این که عرض سینی نشاکار ۱۰ سانتی متر است، طول حداقل مورد نیاز سینی ۹۰ سانتی متر است.

توان مورد نیاز موزع، پیستون حمل کننده و دورانی کل نشاکار

در نشاکار ساخته شده مقدار حداکثر توان مورد نیاز موزع نشاکار و حداکثر توان مورد نیاز جهت انتقال بوته نشا به خاک به ترتیب برابر ۰/۴۱ kW و ۰/۱۶ kW محاسبه شد. توان دورانی کل مورد نیاز برای یک واحد نشاکار مقدار ۰/۵۷ kW است و توسط محور توان دهی

تراکتور تامین می‌گردد. از لحاظ تئوری به ازای افزایش هر واحد نشاکار، مقدار ۰/۵۷ kW به توان دورانی مورد نیاز نشاکار افزوده می‌شود. توان مصرفی نشاکار شامل توان کششی و توان دورانی است. توان کششی شامل توان مورد نیاز جهت پیشروی نشاکار در خاک است. با این حال در نشاکار یک ردیفه که در خاک خاک‌ورزی شده کار می‌کند، توان کششی مورد نیاز نشاکار در برابر توان تراکتور قابل صرف نظر کردن است.

قطر، زاویه پیچش و یاتاقان‌های مورد استفاده محور پنیون

در سرعت ۵۴۰ rpm محور توان دهی تراکتور، گشتاور پیچشی وارد بر محور پنیون برابر ۱۰/۰۸ N.m به دست خواهد آمد. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲، قطر خارجی مورد نیاز محور پنیون طبق رابطه (۴) برابر ۱۷ mm به دست آمد. طبق رابطه (۵) مقدار پیچش محور پنیون بر حسب رادیان و درجه به ترتیب برابر ۰/۱۲ و ۰/۶۷ محاسبه شد. با استفاده از رابطه (۶) و جداول استاندارد بلبرینگ‌های یک ردیفه، بلبرینگ ۳۰۳ با قطر رینگ داخلی ۱۷ mm و قطر خارجی ۴۷ mm برای طول عمر حداقل ۷۰۲ hr برای محور پنیون به کار گرفته شد. اگر هر روز کاری ۸ ساعت فرض شود، حداقل زمان

کارکرد بلبرینگ انتخاب‌شده ۸/۸۷ روز است. مقادیر قطر خارجی محور پنیون، توان دورانی لازم و گشتاور پیچشی وارده به محور پنیون برای نشاکار یک تا چهار ردیفه با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان مختلف، در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر قطر خارجی، توان دورانی مورد نیاز و گشتاور پیچشی وارد بر محور پنیون برای نشاکار در ضرایب اطمینان مختلف

Table 2- The value of the external diameter, the required rotational power, and the twisting torque on the pinion axis for the planter at different confidence levels

قطر خارجی محور پنیون (mm) Outer diameter of the pinion shaft					گشتاور پیچشی وارده بر محور (N.m) Torsional torque on the axis	توان دورانی مورد نیاز* (kW) Required rotational power*	ردیف نشاکار Row of planters
4	3	2	1	= f _s			
21.52	19.54	17.00	13.55		10.08	0.57	1
21.99	19.98	17.40	13.85		20.16	1.14	2
22.67	20.60	17.99	14.28		30.24	1.71	3
23.49	21.34	18.64	14.80		40.32	2.28	4

* سرعت چرخشی محور پنیون برای محاسبه توان دورانی در همه موارد ۵۴۰ rpm در نظر گرفته شده است.

* For calculating the rotational power, the rotation speed of the pinion axis is considered to be 540 rpm in all cases.

جدول ۳- مقادیر زاویه پیچش محور پنیون به ازای تعداد ردیف‌های نشاکار و ضرایب اطمینان مختلف

Table 3- Pinion axis twist angle values for the number of planter rows at different confidence levels

زاویه پیچش محور پنیون (deg) The twist angle of the pinion axis					گشتاور پیچشی وارده بر محور پنیون (N.m) Torsional torque on the pinion axis	ردیف نشاکار Row of planters
4	3	2	1	= f _s		
0.25	0.39	0.67	1.67		10.08	1
0.45	0.71	1.23	3.06		20.16	2
0.60	0.89	1.60	4.07		30.24	3
0.68	1.02	1.86	4.70		40.32	4

چهار ردیفه در ضرایب اطمینان مختلف آورده شده است. در جدول ۵ مقادیر عددی زاویه پیچش محور میل لنگ برای نشاکار یک تا چهار ردیفه با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان مختلف آورده شده است.

همان‌طور که از جدول ۳ برآورد می‌شود، با انتخاب ضریب اطمینان بیشتر، زاویه پیچش محور پنیون کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد ردیف‌های نشاکار، چون گشتاور پیچشی افزایش پیدا می‌کند، بنابراین زاویه پیچش محور پنیون افزایش می‌یابد.

ارزیابی مزرعه‌ای نشاکار

در ادامه نتایج ارزیابی مزرعه‌ای نشاکار و تاثیر مولفه‌های مستقل بر صفات مورد بررسی آورده شده است.

درصد بوته‌های از دست‌رفته

جدول ۶ نتایج تجزیه واریانس سه سطح متغیرهای مستقل سرعت پیشروی، عمق نشاکاری و اندازه دهانه خروجی سینی نشا بر درصد بوته‌های از دست رفته (Y1) را نشان می‌دهد. تجزیه واریانس بر اساس مدل فاکتوریل در نرم‌افزار Minitab 18 انجام شده است.

قطر، زاویه پیچش و یاتاقان‌های مورد استفاده محور میل لنگ

طبق روابط (۴)، (۵) و (۶) با اعمال ضریب اطمینان ۲ و جنس فولاد، اندازه‌های قطر خارجی محور میل لنگ، نیروی مماسی وارد بر قطر خارجی محور میل لنگ، بار وارد بر بلبرینگ‌های محور میل لنگ و طول عمر بلبرینگ محور میل لنگ به‌ترتیب برابر ۱۷/۴۸ mm، N، ۱۶۰۰ و ۲۳۴۵/۶۷ hr است. در جدول ۴ مقادیر قطر خارجی و گشتاور پیچشی وارد بر محور میل لنگ برای نشاکار یک تا

جدول ۴- مقادیر قطر خارجی و گشتاور پیچشی وارد بر محور میل لنگ برای نشاکار یک تا چهار ردیفه در ضرایب اطمینان مختلف

Table 4- Values of outer diameter and torque applied to the crankshaft axis for one to four row planter at different confidence levels

قطر خارجی محور میل لنگ* (mm)				گشتاور پیچشی وارد بر محور میل لنگ (N.m)	تعداد ردیف نشاکار
Outer diameter of the crankshaft shaft*				Torsional torque on the pinion axis	Row of planters
4	3	2	1 = f _s		
22.03	20.01	17.48	13.87	50.40	1
27.75	25.21	22.03	17.48	100.80	2
31.77	28.87	25.21	20.01	151.20	3
34.98	31.78	27.76	22.03	201.60	4

* قطر داخلی محور میل لنگ نصف قطر خارجی آن در نظر گرفته شده است.

* The inner diameter of the crankshaft is half its outer diameter

جدول ۵- مقادیر زاویه پیچش محور میل لنگ به ازای تعداد ردیف‌های نشاکار و ضرایب اطمینان مختلف

Table 5- Values of crankshaft torsion angle for the number of planter rows at different confidence levels

زاویه پیچش محور پینون (deg)				گشتاور پیچشی وارد بر محور میل لنگ	تعداد ردیف نشاکار
The twist angle of the pinion axis				Torsional torque on the pinion axis (N.m)	Row of planters
4	3	2	1 = f _s		
0.68	1.00	3.14	4.29	50.40	1
0.54	0.80	1.37	3.44	100.80	2
0.47	0.69	1.19	3.02	151.20	3
0.43	0.61	1.08	2.73	201.60	4

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس تغییرات سه متغیر مستقل بر درصد بوته‌های از دست‌رفته

Table 6- Variance analysis of the changes of three independent variables on the percentage of missing plants

منبع تغییر	درجه آزادی	سهم مشارکت	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS		
Model	26	97.44%	3705.77	142.53	79.10	0.000**
X1= Forward speed (m.s ⁻¹)	2	10.00%	380.29	190.15	105.52	0.000**
X2= Planting depth (cm)	2	64.62%	2457.45	1228.73	681.87	0.000**
X3= Opening size (mm)	2	20.54%	781.34	390.67	216.80	0.000**
X1*X2	4	1.07%	40.64	10.16	5.64	0.001**
X1*X3	4	0.20%	7.44	1.86	1.03	0.399 ^{ns}
X2*X3	4	0.85%	32.42	8.11	4.50	0.003**
X1*X2*X3	8	0.16%	6.18	0.77	0.43	0.899 ^{ns}
Error	54	2.56%	97.31	1.80		
Total	80	100.00%				

* و ** به ترتیب معناداری در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ و ns عدم معناداری

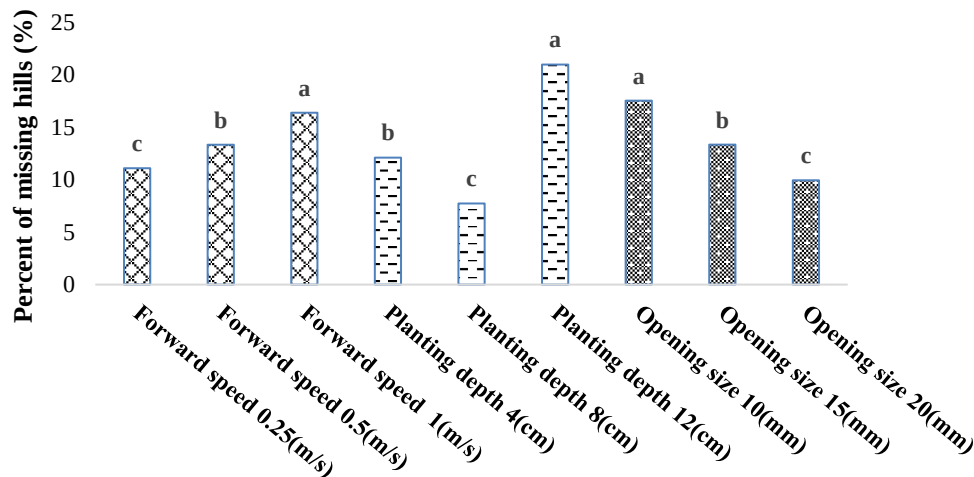
* and ** significance at the confidence level of 95% and 99%, respectively, and ns is not significant

خروجی‌های مدل در تخمین درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1) اطمینان کرد. بر اساس مقادیر P-value به دست‌آمده از تجزیه واریانس، متغیرهای سرعت پیشروی (X1)، عمق نشاکاری (X2)، اندازه دهانه خروجی سینی نشا (X3) و تاثیرات متقابل X1*X2 و X2*X3 در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر درصد بوته‌های از دست‌رفته

ضریب تبیین مدل برای متغیر وابسته درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1)، بر اساس داده‌های ورودی به نرم‌افزار، ۹۷/۴۴ به دست آمد. این بدان معنی است که مدل فاکتوریل توانسته به میزان ۹۷/۴۴ درصد بر روی پیش‌بینی مقادیر درصد بوته‌های از دست‌رفته تاثیر گذار باشد. به عبارت دیگر به میزان ۹۷/۴۴ درصد می‌توان به

خطا نیز در مدل انتخاب شده ۲/۵۶ درصد می‌باشد. نمودار شکل ۶ نتایج مقایسه میانگین درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1) در سه سطح سرعت پیشروی (X1)، عمق نشاکاری (X2) و اندازه دهانه خروجی سینی نشا (X3) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را بر اساس روش فیشر (Fisher LSD Method) نشان می‌دهد.

(Y1) تاثیر معنادار دارند. سایر عوامل اثر معناداری بر متغیر وابسته ایجاد نکردند. بیشترین تاثیر بر روی درصد بوته‌های از دست‌رفته را متغیر عمق نشاکاری (X2) به خود اختصاص داده است. از بین سه متغیر مستقل مورد بحث، تغییرات متغیر مستقل سرعت پیشروی (X1) کمترین تاثیر را بر روی تعداد بوته‌های از دست‌رفته دارد. سهم

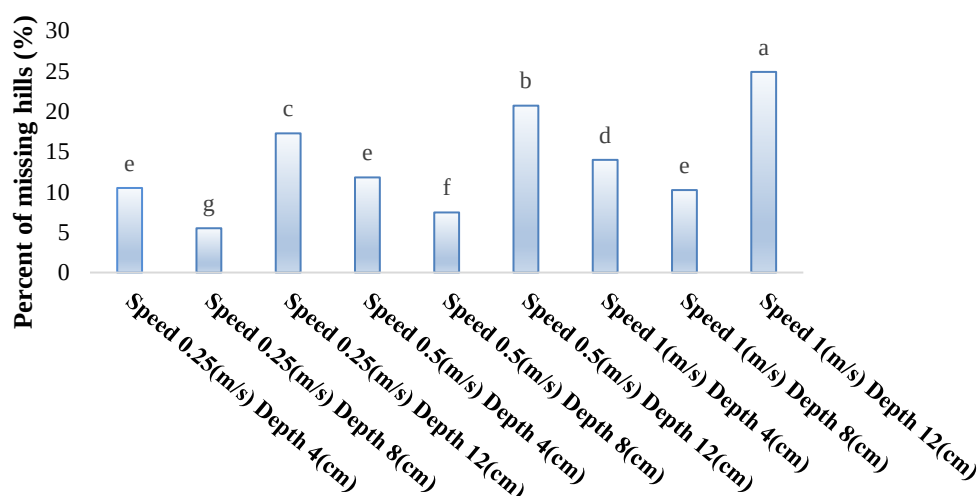


شکل ۶- نمودار مقایسه میانگین اثرات X1 و X2 و X3 بر Y1 با استفاده از روش فیشر
Fig.6. Average Comparison; Effects of X1, X2, and X3 on Y1 using Fisher's method

دست‌رفته در حالت سرعت پیشروی ۱ متر بر ثانیه و عمق نشاکاری ۱۲ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. با توجه به نمودار شکل ۷ می‌توان استنباط کرد که افزایش هم‌زمان سرعت پیشروی و عمق نشاکاری، تاثیر مضاعف بر درصد بوته‌های از دست‌رفته دارند. نمودار شکل ۸ نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل عمق نشاکاری (X2) و اندازه دهانه خروجی سینی نشا (X3) بر درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را بر اساس روش فیشر نشان می‌دهد. بهترین حالت اثرات متقابل X2*X3 در عمق نشاکاری ۸ سانتی‌متر و اندازه دهانه ۲۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است چون در این حالت کمترین درصد تلفات بوته را داریم. بیشترین درصد بوته‌های از دست‌رفته در وضعیت عمق نشاکاری ۱۲ سانتی‌متر و اندازه دهانه ۱۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. حسینی و لغوی (Hosseini & Logavi, 2009) به‌منظور ارزیابی دستگاه نشاکار گل‌دان کاغذی، دو فاکتور سرعت پیشروی در سه سطح و نشای چغندر در دو سطح (۴ و ۶ برگ) به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب کردند. فاکتورهای میانگین فاصله بین بوته‌ها روی ردیف، انحراف جانبی از روی ردیف، درصد بوته‌های از دست‌رفته و درصد بوته‌های آسیب‌دیده به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که سرعت پیشروی بر میانگین فاصله بوته‌ها روی ردیف و انحراف جانبی بوته‌ها از ردیف و شاخص نکاشت تاثیر معنادار بودند.

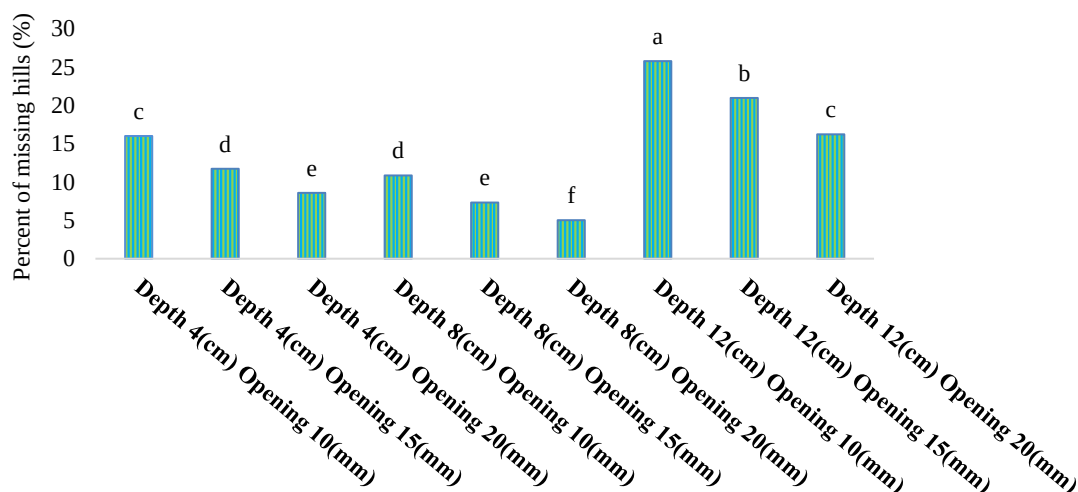
همان‌طور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود، از میان سه سطح سرعت پیشروی (X1)، بهترین سطح سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه است چون کمترین درصد بوته‌های از دست‌رفته مربوط به این سطح سرعت است. با بررسی ستون‌های نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش سرعت پیشروی، درصد بوته‌های از دست‌رفته افزایش می‌یابد. برای سطوح مختلف عمق نشاکاری (X2)، کمترین مقدار میانگین مربوط به درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1)، در عمق نشاکاری ۸ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. بر اساس نتایج آماری، کاهش و افزایش عمق نشاکاری سبب افزایش درصد بوته‌های از دست‌رفته می‌شود. اندازه دهانه خروجی سینی نشا (X3)، یکی دیگر از فاکتورهای مستقل است که بر روی درصد بوته‌های از دست‌رفته تاثیرگذار است. کمترین مقدار میانگین مربوط به درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1)، مربوط به اندازه دهانه ۲۰ میلی‌متر است. با توجه به نتایج مقایسه میانگین، هرچه دهانه خروجی سینی نشا در حالت بازتر قرار گیرد، درصد بوته‌های از دست‌رفته کاهش می‌یابد. نمودار شکل ۷ نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سرعت پیشروی (X1) و عمق نشاکاری (X2) بر درصد بوته‌های از دست‌رفته (Y1) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را بر اساس روش فیشر نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین درصد بوته‌های از دست‌رفته مربوط به حالت سرعت پیشروی ۰/۲۵ متر بر ثانیه و عمق نشاکاری ۸ سانتی‌متر است. بیشترین مقدار درصد بوته‌های از



شکل ۷- نمودار مقایسه میانگین اثرات متقابل $X1 \times X2$ بر $Y1$ با استفاده از روش فیشر

Fig.7. Average Comparison; Interaction effects of $X1 \times X2$ on $Y1$ using Fisher's method



شکل ۸- نمودار مقایسه میانگین اثرات متقابل $X2 \times X3$ بر $Y1$ با استفاده از روش فیشر

Fig.8. Average Comparison; Interaction effects of $X2 \times X3$ on $Y1$ using Fisher's method

($X2$) و تاثیرات متقابل $X1 \times X2$ در سطح اطمینان ۹۹ درصد و اثرات متقابل $X1 \times X2 \times X3$ در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر متغیر وابسته درصد بوته‌های از دست‌رفته ($Y1$) تاثیر معنادار دارند. سهم تاثیر خطی متغیرهای مستقل بدون اثرات متقابل آن‌ها ۹۲/۶۱ درصد است که بیشترین تاثیر در خروجی‌های مدل را متغیر عمق نشاکاری ($X2$) با ۶۳/۵۹ درصد دارد. نمودار شکل ۹ نتایج مقایسه میانگین زاویه استقرار بوته‌ها ($Y2$) در سه سطح سرعت پیشروی ($X1$) و عمق نشاکاری ($X2$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را بر اساس روش فیشر نشان می‌دهد.

میانگین زاویه استقرار بوته‌های نشا

جدول ۷ نتایج تجزیه واریانس سه سطح متغیرهای مستقل سرعت پیشروی، عمق نشاکاری و اندازه دهانه خروجی سینی نشا بر میانگین زاویه استقرار بوته‌های نشا ($Y2$) در خاک را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های ورودی ضریب تبیین مدل برای خروجی ($Y2$) مقدار ۹۹/۲۱ به‌دست آمد. این بدان معنی است که این مدل توانسته به میزان ۹۹/۲۱ درصد بر روی پیش‌بینی مقادیر درصد بوته‌های از دست‌رفته تاثیرگذار باشد یا به میزان ۹۹/۲۱ درصد می‌توان به خروجی‌های مدل اطمینان کرد. بر اساس مقادیر P به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس، متغیرهای سرعت پیشروی ($X1$)، عمق نشاکاری

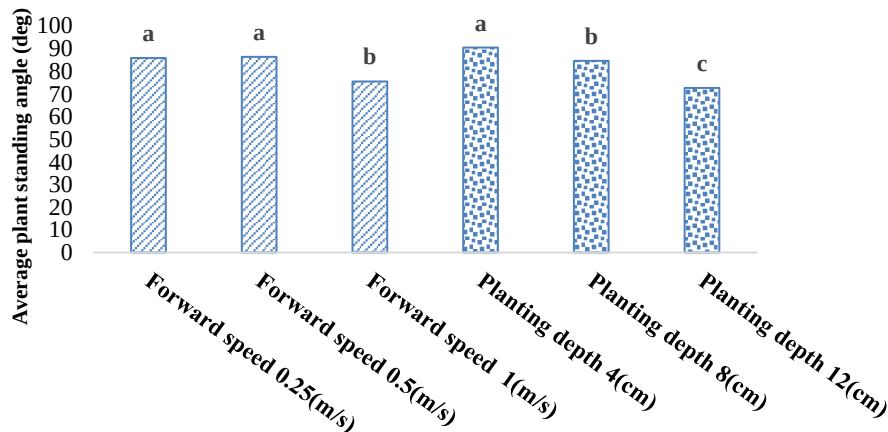
جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس تغییرات سه متغیر مستقل بر میانگین زاویه استقرار بوته

Table 7- Variance analysis of the changes of three independent variables on the average plant standing angle

منبع تغییر Source	درجه آزادی DF	سهم مشارکت Contribution	مجموع مربعات Adj SS	میانگین مربعات Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	99.21%	6940.42	266.94	259.84	0.000**
X1= Forward speed (m s ⁻¹)	2	28.99%	2028.42	1014.21	987.25	0.000**
X2= Planting depth (cm)	2	63.59%	4448.51	2224.25	2165.12	0.000**
X3= Opening size (mm)	2	0.03%	2.13	1.06	1.04	0.362 ^{ns}
X1*X2	4	6.14%	429.25	107.31	104.46	0.000**
X1*X3	4	0.01%	0.83	0.21	0.20	0.936 ^{ns}
X2*X3	4	0.13%	9.42	2.35	2.29	0.071 ^{ns}
X1*X2*X3	8	0.31%	21.86	2.73	2.66	0.015*
Error	54	0.79%	55.47	1.03		
Total	80	100.00%				

* و ** به ترتیب معناداری در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ و ns عدم معناداری

* and ** significance at the confidence level of 95% and 99%, respectively, and ns is not significant



شکل ۹- نمودار مقایسه میانگین اثرات X1 و X2 بر Y2 با استفاده از روش فیشر

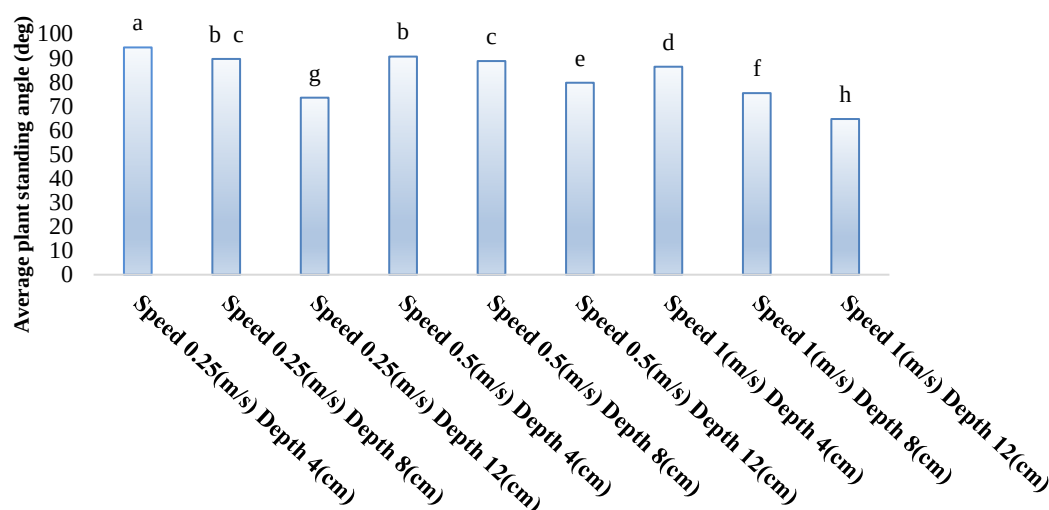
Fig.9. Average Comparison; Effects of X1 and X2 on Y2 using Fisher's method

سرعت پیشروی ثابت، افزایش عمق نشاکاری، سبب کاهش میانگین زاویه استقرار بوته‌ها می‌شود.

جاویدان و محمدزمانی (Javidan & Mohammadzamani, 2019) به منظور نشای مکانیزه گوجه‌فرنگی، نشاکار نیمه‌خودکار با موزع فنجانی مخروطی را مورد طراحی، ساخت و ارزیابی قرار دادند. در ارزیابی مزرعه‌ای نشاکار، متغیرهای فاصله بین نشاها روی ردیف کشت، درصد نشاهای آسیب‌دیده و زاویه استقرار نشاها نسبت به خط قائم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که سرعت پیشروی بر زاویه استقرار بوته و درصد بوته‌های آسیب‌دیده دارای تاثیر معنادار بود. عمق کاشت فقط عامل موثری در زاویه استقرار بود.

هرچه زاویه استقرار بوته نسبت به افق به مقدار ۹۰ درجه نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر است. بنابراین با انتخاب سطح سرعت پیشروی ۰/۵ متر بر ثانیه و عمق نشاکاری ۴ سانتی‌متر بهترین نتایج برای میانگین زاویه استقرار بوته‌ها (Y2) حاصل می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی و عمق نشاکاری، میانگین زاویه استقرار بوته‌ها از حالت عمود فاصله می‌گیرد. شکل ۱۰ نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سرعت پیشروی (X1) و عمق نشاکاری (X2) بر میانگین زاویه استقرار بوته‌ها (Y2) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان می‌دهد.

نزدیک‌ترین مقدار میانگین به زاویه ۹۰ درجه در نمودار مربوط به ستون دوم (b c) است که سرعت پیشروی ۰/۲۵ متر بر ثانیه و عمق نشاکاری ۸ سانتی‌متر است. با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل X1*X2 بر Y2 با استفاده از روش فیشر می‌توان گفت در



شکل ۱۰- نمودار مقایسه میانگین اثرات متقابل $X1 \times X2$ بر $Y2$ با استفاده از روش فیشر

Fig.10. Average Comparison; Interaction effects of $X1 \times X2$ on $Y2$ using Fisher's method

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس تغییرات سه متغیر مستقل بر میانگین فاصله بوته‌ها

Table 8- Variance analysis of the changes of three independent variables on the average distance of hills

منبع تغییر	درجه آزادی	سهم مشارکت	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS		
Model	26	94.76%	37.1939	1.4305	37.57	0.000**
X1= Forward speed ($m.s^{-1}$)	2	92.52%	36.3158	18.1579	476.89	0.000**
X2= Planting depth (cm)	2	0.06%	0.0248	0.0124	0.33	0.724 ^{ns}
X3= Opening size (mm)	2	0.37%	0.1452	0.0726	1.91	0.158 ^{ns}
X1*X2	4	0.36%	0.1398	0.0349	0.92	0.460 ^{ns}
X1*X3	4	0.22%	0.0848	0.0212	0.56	0.695 ^{ns}
X2*X3	4	0.58%	0.2278	0.0569	1.50	0.216 ^{ns}
X1*X2*X3	8	0.65%	0.2557	0.0320	0.84	0.572 ^{ns}
Error	54	5.24%	2.0561	0.0381		
Total	80	100.00%				

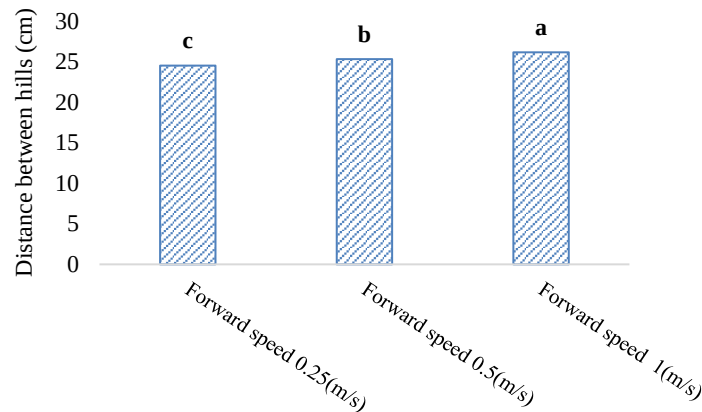
* و ** به ترتیب معناداری در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ و ns عدم معناداری

* and ** significance at the confidence level of 95% and 99%, respectively, and ns is not significant

میانگین فاصله بوته‌ها روی ردیف

جدول ۸ نتایج تجزیه واریانس سه سطح متغیرهای مستقل سرعت پیشروی، عمق نشاکاری و اندازه دهانه خروجی سینی نشا بر میانگین فاصله بوته‌ها ($Y3$) روی ردیف نشا شده را نشان می‌دهد. ضریب تبیین مدل ۹۴/۷۶ به دست آمد. این بدان معنی است که به میزان ۹۴/۷۶ درصد می‌توان به خروجی‌های مدل برای تخمین فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ($Y3$) اطمینان کرد. بر اساس مقادیر P به دست آمده از تجزیه واریانس، فقط متغیر سرعت پیشروی ($X1$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر متغیر وابسته فاصله بوته‌ها روی ردیف

($Y3$) تاثیر معنادار دارند. سایر متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آن‌ها در سطوح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد دارای تاثیر معناداری بر فاصله بوته‌ها روی ردیف ($Y3$) نیستند. سهم تاثیر متغیرهای مستقل بدون اثرات متقابل آن‌ها ۹۲/۹۶ درصد است که بیشترین تاثیر در خروجی‌های مدل را متغیر سرعت پیشروی ($X1$) با ۹۲/۵۲ درصد دارد. سهم درصد خطا در مدل انتخاب شده ۵/۲۴ درصد می‌باشد. شکل ۱۱ نمودار ستونی میانگین‌های متغیر وابسته فاصله بوته‌ها روی ردیف ($Y3$) در سطوح مختلف متغیر سرعت پیشروی ($X1$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱ - نمودار مقایسه میانگین اثرات سطوح مختلف X1 بر Y3 با استفاده از روش فیشر
Fig.11. Average Comparison; Effects of X1 level on Y3 using Fisher's method

نشان داد که اثر تغییر سرعت پیشروی دستگاه، عمق کشت و اثر متقابل آن‌ها بر تمام صفات مورد بررسی معنادار بودند.

میانگین تعداد نهال در بوته

جدول ۹ نتایج تجزیه واریانس سه سطح متغیرهای مستقل سرعت پیشروی، عمق نشاکاری و اندازه دهانه خروجی سینی نشا بر میانگین تعداد نهال‌ها در بوته‌های نشاشده را نشان می‌دهد. برای متغیر وابسته Y4 (میانگین تعداد نهال‌ها در بوته)، بر اساس داده‌های ورودی، ضریب تبیین مدل ۹۹/۲۱ به دست آمد. این بدان معنی است که این مدل توانسته به میزان ۹۹/۲۱ درصد بر روی پیش‌بینی مقادیر درصد بوته‌های از دست‌رفته تأثیرگذار باشد یا به میزان ۹۹/۲۱ درصد می‌توان به خروجی‌های مدل اطمینان کرد.

فاصله کشت تنظیم‌شده نشاکار با توجه به چرخ‌دنده‌های به‌کاررفته در مسیر انتقال توان به‌صورت تئوری ۲۵ سانتی‌متر مورد انتظار و مطلوب ما است. با توجه به نتایجی که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، سطح سرعت پیشروی ۰/۵ متر بر ثانیه، دقیق‌ترین فاصله بین بوته‌ها روی ردیف را نتیجه می‌دهد. انتخاب سرعت پیشروی کمتر منجر به کاهش فاصله بوته‌ها روی ردیف و افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش فاصله بوته‌ها روی ردیف نسبت به حالت تنظیم‌شده می‌گردد. محمدزمانی و همکاران (Mohammadzamani et al., 2015) به‌منظور کشت ماشینی نشای گوجه‌فرنگی، یک نشاکار تمام خودکار را مورد طراحی، ساخت و ارزیابی قرار دادند. به‌منظور ارزیابی عملکرد دستگاه، صفات درصد آسیب‌های مکانیکی به نشاها، زاویه استقرار نشاها از خط قایم و تغییر فاصله نشاها روی ردیف کشت مورد بررسی قرار گرفتند. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح سرعت پیشروی و عمق کشت در دو سطح بودند. نتایج این تحقیق

جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس تغییرات سه متغیر مستقل بر میانگین تعداد نهال در بوته

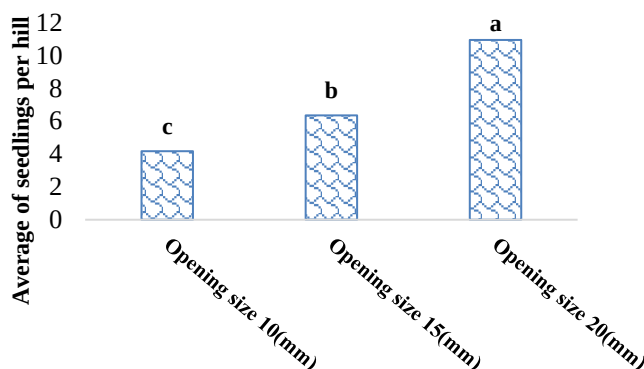
Table 9- Variance analysis of the changes of three independent variables on the average number of seedlings per plant

منبع تغییر Source	درجه آزادی DF	سهم مشارکت Contribution	مجموع مربعات Adj SS	میانگین مربعات Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	99.21%	646.720	24.874	260.20	0.000**
X1= Forward speed (m s ⁻¹)	2	0.05%	0.298	0.149	1.56	0.220 ns
X2= Planting depth (cm)	2	0.10%	0.626	0.313	3.27	0.045*
X3= Opening size (mm)	2	98.87%	644.495	322.248	3370.92	0.000**
X1*X2	4	0.04%	0.238	0.059	0.62	0.649 ns
X1*X3	4	0.03%	0.194	0.048	0.51	0.731 ns
X2*X3	4	0.11%	0.696	0.174	1.82	0.138 ns
X1*X2*X3	8	0.03%	0.173	0.022	0.23	0.984 ns
Error	54	0.79%	5.162	0.096		
Total	80	100.00%				

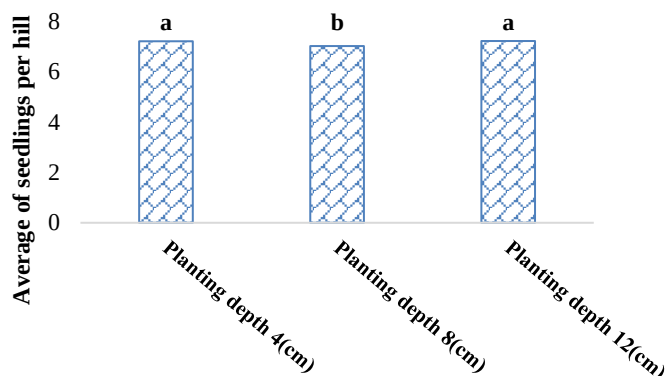
* و ** به ترتیب معناداری در سطح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ و ns عدم معناداری

* and ** significance at the confidence level of 99% and 95%, respectively, and ns of non-significance

شکل ۱۲ نمودار ستونی میانگین‌های متغیر وابسته تعداد نهال‌ها در بوته‌ها (Y4) در سطوح مختلف متغیر اندازه دهانه خروجی سینی نشا (X3) در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نمایش می‌دهد. با افزایش اندازه دهانه خروجی سینی نشا، میانگین تعداد بوته‌ها در نهال‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ نمودار ستونی میانگین‌های متغیر وابسته تعداد نهال‌ها در بوته‌ها (Y4) در سطوح مختلف متغیر عمق نشاکار (X2) در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲ - نمودار مقایسه میانگین اثرات سطوح مختلف X3 بر Y4 با استفاده از روش فیشر
Fig.12. Average Comparison; Effects of X3 level on Y4 using Fisher's method



شکل ۱۳ - نمودار مقایسه میانگین اثرات سطوح مختلف X2 بر Y4 با استفاده از روش فیشر
Fig.13. Average Comparison; effects of X2 level on Y4 using Fisher's method

- توان دورانی مصرفی از محور توان‌دهی تراکتور به‌ازای هر واحد نشاکار مقدار ۰/۵۷ kW است که ۰/۴۱ kW مربوط به موزع (چنگال بوته‌ساز) و ۰/۱۶ kW مربوط به پیستون حمل نشا می‌باشد. با دو برابر شدن تعداد واحدهای نشاکار، توان مصرفی نشاکار دو برابر می‌شود.
- با به‌کارگیری ضریب اطمینان بزرگ‌تر در طراحی، قطر مورد نیاز محور پنیون و محور میل لنگ افزایش و زاویه پیچش آن‌ها کاهش می‌یابد.
- افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش تعداد بوته‌های از

عمق نشاکاری ۴ و ۱۲ سانتی‌متر تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد نهال در بوته با یکدیگر ندارند. البته معنادار شدن عمق نشاکاری بر تعداد نهال در بوته غیرمنطقی و دور از انتظار است و ممکن است در اثر خطای داده‌برداری یا تاثیر شرایط دیگر (مانند غیریکنواخت بودن نهال‌های برنج) باشد.

نتیجه‌گیری

با جمع‌بندی نتایج این پژوهش به‌روشنی می‌توان دریافت که:

- کاربری نتایج و یافته‌های این تحقیق می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان بخش کشاورزی را در شناسایی و اتخاذ راه‌کارهایی به‌منظور حفاظت از منابع آبی با حفظ درآمد کشاورزان یاری نماید.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد بابت حمایت مالی در قالب طرح پژوهشی با کد ۳/۴۸۴۸۷، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

احمد سادین: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، شبیه‌سازی کامپیوتری، استخراج متن اولیه
محمدحسین آق‌خانی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، مشاوره فنی، تحلیل آماری، ویرایش متن
محمدعلی ابراهیمی‌نیک: مشاوره فنی، تحلیل آماری
جلال برادران مطیع: مشاوره فنی، تحلیل آماری، ویرایش متن، روش‌شناسی

دست‌رفته و فاصله گرفتن زاویه استقرار بوته‌ها از حالت عمود می‌گردد. همچنین افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش فاصله بوته‌ها روی ردیف می‌شود اما تاثیر معناداری بر تعداد نهال در بوته‌ها ندارد.

- بهترین اندازه عمق نشاکاری ۸ سانتی‌متر می‌باشد چون در این عمق تعداد بوته‌های از دست‌رفته کمترین است. از طرف دیگر انتخاب عمق کم باعث استقرار نامناسب بوته و تسریع درخشک شدن ریشه‌های نشا می‌شود. عمق زیاد برای بوته‌های کوتاه سبب دفن شدن کل بوته یا تعدادی از برگ‌ها می‌شود که باعث اختلال در رشد نشا می‌شود. افزایش و کاهش عمق نشاکاری سبب فاصله گرفتن زاویه استقرار بوته‌ها از حالت عمود می‌شود. تغییرات در عمق نشاکاری بر فاصله بوته‌ها روی ردیف و تعداد نهال در بوته تاثیر معناداری ندارد.
- تغییر در اندازه دهانه خروجی سینی نشا تاثیر مستقیم در تعداد نهال در بوته‌ها دارد. افزایش و کاهش اندازه دهانه سینی نشا به ترتیب باعث افزایش و کاهش تعداد نهال در بوته می‌گردد. همچنین افزایش اندازه دهانه باعث کاهش بوته‌های از دست‌رفته می‌شود. تغییرات در اندازه دهانه خروجی سینی نشا، تاثیر معناداری در زاویه استقرار بوته‌ها و فاصله بوته‌ها روی ردیف ندارد.

References

1. Alizadeh, M., Minaei, S., Tavakoli, T., & Khoshtaghaza, M. (2006). Effect of de-awning on physical properties of paddy. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9(9), 1726-1731. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2006.1726.1731>
2. Asian and Pacific Network for Testing of Agricultural Machinery (ANTAM). (2017). ANTAM. Retrieved from <https://www.un-csam.org>
3. Awika, J. M. (2011). Major cereal grains production and use around the world. *Advances in cereal science: implications to food processing and health promotion* (pp. 1-13): ACS Publications. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001>
4. Brown, K., Turner, F., Thomas, J., Deuel, L., & Keener, M. (1977). Water balance of flooded rice paddies. *Agricultural Water Management*, 1(3), 277-291. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(77\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0378-3774(77)90006-3)
5. Chandrasekhararao, C., Jitendranath, S., & Murthy, T. (2013). Resource optimisation in rice through direct seeding by drum seeder. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 4(3), 239-246.
6. FAO. (2020). *Food and Agricultural Organization Statistical Yearbook*. <https://doi.org/10.4060/cb1329en>
7. Farahmandfar, R., Farahmandfar, E., & Ramezani, A. (2009). Physical properties of rough rice. *International Journal of Food Engineering*, 5(5). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1573>
8. Farooq, M., Wahid, A., Lee, D. J., Ito, O., & Siddique, K. H. (2009). Advances in drought resistance of rice. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(4), 199-217. <https://doi.org/10.1080/07352680902952173>
9. Ghanbarian, D., Valaei, M., Ghasemi Varnamkhasti, M., & Aghagoolzade, H. (2017). Discussion of Influence of parboiling in milling rice yield and head rice yield. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(2), 299-304. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.62471>
10. Gutaker, R. M., Groen, S. C., Bellis, E. S., Choi, J. Y., Pires, I. S., Bocinsky, R. K., Slayton, E. R., Wilkins, O., Castillo, C. C., Negrão, S., & Oliveira, M. M. (2020). Genomic history and ecology of the geographic spread of rice. *Nature Plants*, 6(5), 492-502. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0659-6>
11. Hafeez, M., Bouman, B., Van de Giesen, N., & Vlek, P. (2007). Scale effects on water use and water productivity in a rice-based irrigation system (UPRIIS) in the Philippines. *Agricultural Water Management*, 92(1-2), 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.006>
12. Hosseini, S. M., & Loghavi, M. (2009). Design, Development and Evaluation of a Paper-Pot Transplanter. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 40(1).

- <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084803.1388.40.1.1.3>
13. Javidan, S. M., & Mohammad zamani, D. (2019). Design, Construction and Evaluation of Semi-Automatic Transplanter with Conical Distributing Cups. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 20(72), 179-190. <https://doi.org/10.22092/erams.2019.120477.1239>
14. Kiani, A., Al-Azmani, A., & Feyz-Bakhsh, M. T. (2023). Comparison of direct rice cultivation under drip irrigation with conventional transplanting in terms of water usage and yield. *Shalizar Extension Journal*, 5(2), 20-26. Retrieved from https://rfj.areeo.ac.ir/article_132614.html
15. Mohammadzamani, D., Ghezavati, J., & Nazari, M. (2015). Designing manufacturing and evaluation of automated tomato planter. *Journal of Agriculture Mecanization*, 16(65), 79-92. <https://doi.org/10.22092/erams.2016.105955>
16. Pandey, S., & Velasco, L. (1999). *Economics of alternative rice establishment methods in Asia: a strategic analysis*. Social Sciences Division Discussion Paper, International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 1(1), 12-18.
17. Pandey, S., & Velasco, L. (2002). Economics of direct seeding in Asia: Patterns of adoption and research priorities. In S. Pandey, M. Mortimer, L. Wade, T. P. Tuong, K. Lopez & B. Hardy (Eds.), *Direct Seeding: Research Strategies and Opportunities* (pp. 3-14). International Rice Research Institute. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.281820>
18. Pandey, S., & Velasco, L. (2005). Trends in crop establishment methods in Asia and research issues. In K. Toriyama, K. L. Heong & B. Hardy (Eds.), *Rice Is Life: Scientific Perspectives for the 21st Century* (pp. 178-181). International Rice Research Institute.
19. Popov, E. P. (1976). *Mechanics of materials* (2nd ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. ISBN 0-13-571356-0.
20. Rabbani, G., & Ali, M. (2009). New ideas and concepts, rice bran: a nutrient dense mill-waste for human nutrition. *The ORION Medical Journal*, 32(3), 694-701.
21. Rao, A., Johnson, D., Sivaprasad, B., Ladha, J., & Mortimer, A. (2007). Weed management in direct-seeded rice. *Advances in Agronomy*, 93, 153-255. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)93004-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)93004-1)
22. Singh, S., Sharma, S., & Prasad, R. (2001). The effect of seeding and tillage methods on productivity of rice-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research*, 61(3-4), 125-131. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00188-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00188-4)
23. Singh, Y., Singh, G., Johnson, D., & Mortimer, M. (2005). Changing from transplanted rice to direct seeding in the rice-wheat cropping system in India. In K. Toriyama, K. L. Heong, & B. Hardy (Eds.), *Rice Is Life: Scientific Perspectives for the 21st Century* (pp. 198-201). International Rice Research Institute & Japan International Research Center for Agricultural Sciences.
24. Spotts, M. F., Shob, T. A., & Horen Berger, L.A., (2004). *Design of Machine Elements* (8th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education. ISBN 978-0130489890.
25. Usefian, M., Arabzade, B., Soodaee Mashae, S., & Mohammadi Nesheli, Y. (2014). Evaluation of different levels of Irrigation on yield and qualitative properties of two rice varieties. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 27(104), 69-75.
26. Vinay, M., Kumar, U., Parkash, V., & Kumari, S. (2016). Impact of direct seeded rice on economics of paddy crop in Haryana. *International Journal of Agriculture Sciences*, 8(62), 3525-3528.

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 287-301

Linking Grape Yield Performance to Remote Sensing Vegetation Indices: A Fusion of Sentinel Radar and Optical Imagery with Machine Learning Models

H. R. Maleki¹, M. Khodamorad Pour^{2*}, H. Mohamadi Monavar¹

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

2- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

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

Received: 31 December 2024

Revised: 19 February 2025

Accepted: 15 March 2025

Available Online: 28 July 2025

How to cite this article:Maleki, H. R., Khodamorad Pour, M., & Mohamadi Monavar, H. (2026). Linking Grape Yield Performance to Remote Sensing Vegetation Indices: A Fusion of Sentinel Radar and Optical Imagery with Machine Learning Models. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 287-301. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91357.1325>

Introduction

Remote sensing is considered a key management tool in precision agriculture, particularly for monitoring and identifying plant coverage. Grapes are among the most valuable horticultural crops, with Hamedan province accounting for approximately 7.3 % of Iran's total vineyard area. This study evaluates the accuracy of vineyard identification in Hamedan province using machine learning algorithms including support vector machine (SVM), minimum distance (MD), and random forest (RF) models along with normalized difference vegetation index (NDVI) and normalized difference water index (NDWI) estimated from combined optical and radar images of Sentinel (Sentinel-1 and Sentinel-2). Based on the most accurate vineyard identification map, the maximum time series of NDVI and NDWI of the MODIS satellite in vineyards was estimated between 2007 and 2020, and their correlation with the actual yield of the grape crop was examined.

Materials and Methods

In this research, we first extracted images of pivotal remote sensing vegetation indicators, including NDVI and NDWI, from Sentinel-2 images in Hamedan province in 2020. The approach of addressing speckle noise through median pixels allowed for the acquisition of median radar images from Sentinel-1 over the designated study area. To create high-accurate images, spectral composition was used to combine these images with the NDVI and NDWI from Sentinel-2 images. Using these images, vineyard identification maps were generated through classification algorithms, including support vector machine, random forest, and minimum distance models. Training samples were used to train these algorithms. Samples from six land coverage classes involving vineyards, were collected using a combination of field observations and Google Earth imagery. Of these, 70% were used for training and 30% for testing the classification models. In order to assess the accuracy of the vineyard identification maps, indicators including overall accuracy and kappa coefficient were examined. Subsequently, the vineyard map with the highest assessment indicator was selected. Finally, using this accurate vineyard identification map, the maximum monthly NDVI and NDWI indices estimated from MODIS sensor images in the vineyards were calculated from 2007 to 2020, and their correlation with yields of the grape crop was computed using Pearson correlation.

Results and Discussion

Based on the comparison of different classification algorithms for distinguishing vineyards, random forest model along with NDVI and NDWI indices outperformed support vector machine and minimum distance models. With regard to accuracy, however, the random forest along with the NDWI has the best overall accuracy (95%) and kappa coefficient (0.95). The superior performance of NDWI is attributed to the high moisture levels

Authors retain the copyright. 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.2025.91357.1325>

in vineyards resulting from irrigation, as NDWI is particularly sensitive to variations in vegetation water content. The lower accuracy of vineyard identification using SVM and MD models can be linked to shadow effects caused by the canopy structure of grapevines, as well as imbalanced training data used for the support vector machine model. Correlation analysis of real grape yields with NDVI and NDWI of MODIS extracted from the highest accuracy vineyards map indicates NDVI (correlation coefficient 0.81) has a stronger linear relationship with yield than NDWI (correlation coefficient 0.75). This can be explained by NDVI's sensitivity to leaf chlorophyll changes, which results in a strong correlation with yield.

Conclusion

Vineyards can be accurately identified using machine learning algorithms and remote sensing vegetation indices derived from combined radar and optical satellite images. Furthermore, the strong correlation between NDVI and grape yield enable reliable yield prediction based on NDVI time series analysis. The outcomes of this study facilitate the identification of grape cultivation areas, improved water resource management, the development of optimized irrigation strategies, pre-harvest yield estimation, and the exploration of export options.

Keywords: Minimum Distance model, NDVI index, NDWI index, Random Forest model, Support Vector Machine model

ارتباط عملکرد محصول انگور با شاخص‌های گیاهی سنجش از دور: ترکیبی تصاویر سنتینل راداری و اپتیکی و مدل‌های یادگیری ماشین

حمیدرضا ملکی^۱، مهرانه خدامرادپور^{۲*}، حسنی محمدی منور^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

چکیده

امروزه سنجش از دور به عنوان یک ابزار مدیریتی در کشاورزی دقیق محسوب می‌شود، که نقش مهمی در شناسایی پوشش‌های گیاهی متفاوت دارد. انگور از ارزشمندترین محصولات باغبانی است که استان همدان حدود ۷/۳ درصد از وسعت تاکستان‌های کشور را در اختیار دارد. با این حال توزیع جغرافیایی از تاکستان‌ها در این استان وجود ندارد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی رابطه عملکرد محصول انگور با شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی در تاکستان‌های استان همدان است. به همین منظور، دقت شناسایی تاکستان‌های استان همدان توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل: ماشین بردار پشتیبان (SVM) و حداقل فاصله (MD) و جنگل تصادفی (RF) با شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی شامل: شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی (NDVI) و شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI) برآورد شده از تصاویر ترکیبی اپتیکی و راداری سنتینل (Sentinel-1 و Sentinel-2) انجام شد. سپس براساس دقیق‌ترین نقشه شناسایی تاکستان‌ها، سری زمانی ماکزیمم شاخص‌های NDVI و NDWI سنجده‌ی مودیس در تاکستان‌ها در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ برآورد شد و همبستگی آن‌ها با عملکرد واقعی محصول انگور بررسی شد. مقایسه دقت طبقه‌بندی الگوریتم‌های متفاوت بیانگر برتری الگوریتم RF با شاخص NDWI با بالاترین دقت کلی (۹۵٪) و ضریب کاپا (۰/۹۵) بود. هم‌چنین تحلیل همبستگی بین شاخص‌های NDVI و NDWI سنجده مودیس مستخرج از نقشه تاکستان‌ها با عملکرد واقعی انگور نشان از رابطه خطی قوی‌تری بین شاخص NDVI نسبت به NDWI دارد. یافته‌های این پژوهش که بیانگر دقت بالای شاخص‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تاکستان‌ها است می‌تواند در پیش‌بینی عملکرد محصول انگور قبل از برداشت، بهبود کیفیت انگور و مدیریت بهینه‌ی آبیاری نقش مهمی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص NDVI، شاخص NDWI، مدل حداقل فاصله، مدل جنگل تصادفی، مدل ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

بالایی برخوردار است و مصرف جهانی بالا و سطح زیرکشت زیاد باعث افزایش اهمیت این گیاه شده است. درخت این گیاه در ایران با نام مو و اغلب به نام تاک نام‌گذاری شده است. علاوه بر پراکندگی و فراوانی سطح زیر کشت انگور در ایران، این میوه از لحاظ خواص و فواید نیز جایگاه ویژه‌ای در بین میوه‌ها دارد که باعث افزایش اهمیت آن شده است. محاسبه سطح زیرکشت و مساحت زمین‌های باغی و زراعی نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت کشاورزی، بازاریابی، پخش نهاده‌ها، تعیین قیمت، تنظیم توازن میان واردات و صادرات محصولات، بیمه و برآورد خسارات در حوزه مدیریت کشاورزی دارد (Mirzaei, Abbasi, Marofi, Solgi, & Karimi, 2018). سنجش از دور به روشی پرکاربرد و مؤثر برای برآورد سطح زیرکشت تبدیل شده است (Vintrou et al., 2012)، که در زمینه‌ی مطالعات پوشش‌های گیاهی به‌ویژه محصولات زراعی و باغی می‌تواند با در دسترس قرار دادن تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک‌های زمانی و

انگور (*Vitis Vinifera*) گیاهی چند ساله است که در سراسر جهان کشت می‌شود. طبق گزارش سازمان بین‌المللی دلا ویگن و دو وین^۳ سطح زیر کشت تاکستان‌ها در سال ۲۰۱۸ حدود ۷/۴ میلیون هکتار بوده است. عوامل زیادی در رشد و نمو و عملکرد انگور تاثیر دارد که مهم‌ترین آن‌ها آب و هوا، خاک و شیوه‌های کشت است (Avalos & Araujo, 2021). انگور از نظر اقتصادی از اهمیت

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

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: mkhodamorad@basu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91357.1325>

3- De La Vigne Et Du Vin

MD^۶ از روش‌های پارامتری در پژوهش‌های مرتبط با طبقه‌بندی پوشش کاربری اراضی و تفکیک تاکستان‌ها استفاده می‌شوند (Basheer et al., 2022). به‌عنوان مثال، ژاو و همکاران (Zhao, Li, Zhang, Wang, & Du, 2019) در تفکیک تاکستان‌ها از مزارع زراعی در کشور چین از سری زمانی شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی شامل: NDVI، EVI^۷ و GCVI^۸ استخراج‌شده از تصاویر سنتینل-۲ و روش‌های طبقه‌بندی شبکه عصبی CNN^۹ و RF استفاده کردند. آن‌ها با اعمال تبدیل موجک پیوسته CWT^{۱۰} برای هر سری زمانی بازسازی‌شده قبلی برای تولید اسکالوگرام^{۱۱} دریافتند که ترکیب CWT و CNN عملکرد دقیق‌تری نسبت به RF در شناسایی تاکستان داشت. بریتخوف و همکاران (Brinkhoff, Vardanega, & Robson, 2019) به شناسایی ۱۲ محصول از جمله تاکستان‌ها، با تلفیق تصاویر سنتینل-۱ و سنتینل-۲ با الگوریتم‌های SVM، RF، CART و بیشترین مقدار شاخص NDVI ماهانه در استرالیا پرداختند. نتیجه این پژوهش نشان داد که نقشه‌های تولیدشده با استفاده از الگوریتم‌های CART و RF با باندهای یکسان، دقت کمتری نسبت به SVM داشتند. در پژوهشی هارتلینگ و همکاران (Hartling, Sagan, Sidike, Maimaitijiang, & Carron, 2019) با مقایسه‌ی الگوریتم‌های SVM و RF در شناسایی گونه‌های درخت شهری دریافتند که دقت کلی الگوریتم RF (۴۳/۴۱ درصد) بالاتر از الگوریتم SVM (۳۲/۵۲ درصد) بود.

پال و همکاران (Pal, Pandey, Sharma, & Nair, 2022) در هند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، به طبقه‌بندی پوشش اراضی پرداختند که با استفاده از الگوریتم MD اراضی را به پنج کلاس طبقه‌بندی کردند. یافته‌های این پژوهش بیانگر دقت بالای طبقه‌بندی MD با ضریب کاپا در حدود ۰/۸۲ و دقت کلی حدود ۸۷٪ بود. کریمی و همکاران (Karimi, Sheshangosht, & Eftekhari, 2022) به تفکیک مزارع با استفاده از الگوریتم SVM با شاخص‌های سنجش از دور شامل: NDVI، NDWI و GNDVI پرداختند. نتایج این پژوهش نشان از دارا بودن دقت بالای الگوریتم SVM در تفکیک مزارع به‌ترتیب توسط شاخص‌های NDVI، NDWI و GNDVI بود، درحالی‌که اختلاف بسیار کوچکی بین دقت مدل با شاخص‌های NDVI و NDWI بود. تفکیک تاکستان‌های شهرستان ملکان در استان آذربایجان شرقی با الگوریتم درخت تصمیم CART و شاخص NDVI مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای SPOT5 نشان از دقت بالای این الگوریتم (دقت کلی ۹۵٪) داشت (Faizizadeh &

مکانی مناسب و منظم نقش مهمی در بهبود شرایط ویژه کشاورزی ایفا کند. در حال حاضر، بررسی شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های رایج بررسی وضعیت کمی و کیفی پوشش گیاهی زراعی، باغی و مراتع است (Nematollahi, Ashourloo, Alimohammadi, Khodabandehloo, & Radiom, 2018). این شاخص‌ها با روابط ریاضی یکسان در تمام پیکسل‌ها با توان تفکیک زمانی و مکانی بالا، بدون فرضیات قبلی محاسبه می‌شوند و بیانگر وضعیت پوشش زمین و نوع خاک هستند (Ahmad, 2012). شاخص تفاضلی نرمال‌شده گیاه NDVI^۱، از پرکاربردترین شاخص‌های گیاهی در اکولوژی، جنگل‌داری، کشاورزی، حیات وحش، تنوع زیستی و سایر رشته‌ها است (Robinson et al., 2017). شاخص NDVI براساس بازتاب در باند قرمز و مادون قرمز نزدیک برآورد می‌شود (Junges, Fontana, Anzanello, & Bremm, 2017). شاخص NDVI واقع مقدار کلروفیل برگ را اندازه‌گیری می‌کند، درحالی‌که شاخص تفاضلی نرمال‌شده آب NDWI^۲ با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه، آب موجود در پوشش گیاهی را اندازه‌گیری می‌کند (Gu et al., 2007). هم‌چنین پژوهش‌ها نشان دادند که شاخص‌های سنجش از دور گیاهی براساس رابطه خطی با عملکرد می‌توانند نقش مهمی در بهبود کیفیت محصول انگور در مراحل مختلف رشد و افزایش عملکرد تاکستان‌ها داشته باشند، به طوری‌که شاخص NDVI بالاتر بیانگر انگور سالم‌تر و عملکرد بالاتر است (Borgogno-Mondino & Lessio, 2018; Vélez, Barajas, Blanco, Rubio, & Castrillo, 2021). شاخص سنجش از دور گیاهی NDWI براساس رابطه خطی قوی با رطوبت خاک (شاخص مهم در رشد انگور) می‌تواند به منجر به بهبود کیفیت انگور تاکستان‌ها با برآورد بهینه‌ی آب در دسترس گیاه شوند (Borgogno-Mondino & Lessio, 2018). با این حال این شاخص‌ها باید از نقشه‌های تفکیک‌شده دقیق تاکستان‌ها استخراج شوند و با توجه به عدم دسترسی به این نقشه‌ها در مقیاس‌های مکانی بزرگ، می‌توان از روش‌های طبقه‌بندی تصاویر ماهواره شامل: طبقه‌بندی نظارت‌شده و غیرنظارت‌شده استفاده کرد. به‌طورکلی طبقه‌بندی نظارت‌شده به روش‌های پارامتریک و ناپارامتریک تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های نظارت‌شده پیشرفته مانند: جنگل تصادفی RF^۳، الگوریتم درخت رگرسیون CART^۴، ماشین بردار پشتیبان SVM^۵ از روش‌های ناپارامتری و روش حداقل فاصله

6- Minimum Distance

7- Enhanced Vegetation Index

8- Green Chlorophyll Vegetation Index

9- Convolutional Neural Network

10- Continuous Wavelet Transform

11- Scalogram

1- Normalized Difference Vegetation Index

2- Normalized Difference Water Index

3- Random Forest

4- Classification and Regression Tree

5- Support Vector Machine

(Haydari, 2008).

سنجنده‌های سنتینل-۱ و سنتینل-۲ با توان تفکیک مکانی بالا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین متفاوت شامل: MD، SVM و RF می‌پردازد. همچنین بعد از انتخاب دقیق‌ترین نقشه تفکیک تاکستان‌ها، شاخص‌های سنجش از دور سنجنده مودیس در تاکستان‌های شناسایی شده، با توجه به دسترسی به سری زمانی طولانی تصاویر سنجنده مودیس (از سال ۲۰۰۰ تاکنون) استخراج شده و ارتباط خطی بین آن‌ها و عملکرد واقعی سالانه بررسی شد. نتایج این مطالعه می‌تواند در مطالعات مختلفی شامل: پیش‌بینی عملکرد محصول ماه‌ها قبل از برداشت انگور، برآورد بهینه آب مصرف شده و افزایش کیفیت انگور با هدف افزایش عملکرد، که اکثراً بر اساس رابطه خطی قوی بین متغیرهای مستقل و وابسته است، کاربرد داشته باشد. همچنین این اهداف ذکر شده از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشند که تاکنون به این شکل در پژوهش‌های پیشین در تاکستان‌های استان همدان انجام نشده است.

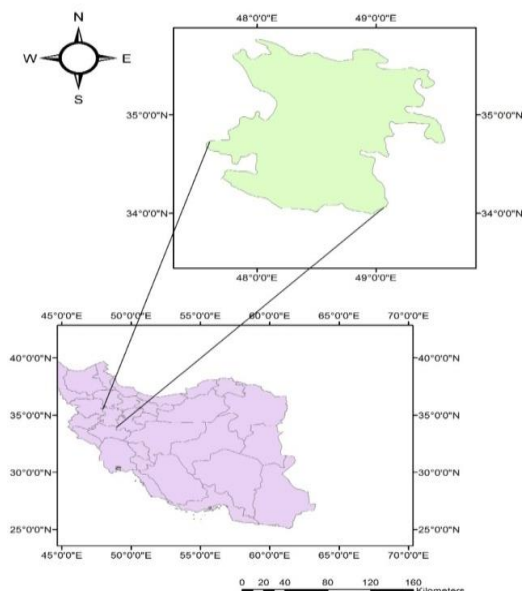
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این تحقیق استان همدان است که در شکل ۱ تصویری از منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. استان همدان در بخش شمال غرب کشور بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱).

نتایج پیشینه تحقیق نشان داد که با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان مزارع و تاکستان‌ها را تفکیک نمود، اما تفاوت‌های قابل توجه در ویژگی طیفی محصولات و مراحل چرخه فنولوژی محصولات مختلف می‌تواند منجر به نتایج متفاوت الگوریتم‌های طبقه‌بندی در تفکیک محصولات گردد. بر همین اساس مطالعات منطقه‌ای برای تفکیک محصولات مختلف با الگوریتم‌های متفاوت طبقه‌بندی ضروری است. لذا، در این پژوهش بر اساس مطالعات انجام شده، سه مدل یادگیری ماشین از ساده تا پیشرفته شامل: MD، SVM و RF، که بر اساس پژوهش‌های ذکر شده نتایج مناسبی در تفکیک مزارع داشتند استفاده شد. استان همدان با توجه به اقلیم سرد و نیمه‌خشک از نواحی مناسب کشور در تولید انگور است و با دارا بودن حدود ۷/۳٪ از تاکستان‌های ایران، بیش از ۱۲٪ انگور کل کشور را تامین می‌کند (Agricultural statistics, 2023). اما با توجه به در دسترس نبودن مناطق کشت آن، تاکنون پژوهشی در راستای تهیه نقشه تاکستان‌ها در این استان انجام نشده است. نتایج این پژوهش می‌تواند نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب و انرژی، برنامه‌ریزی صادرات با توجه به تخمین دقیق عملکرد قبل از برداشت، شناسایی نواحی مستعد کشت و تغییرات پوشش گیاهی و تاثیر آن بر عملکرد محصول داشته باشد.

این پژوهش ابتدا به مقایسه دقت تفکیک تاکستان‌های استان همدان با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور شامل: NDVI و NDWI، برآورده شده از تصاویر ترکیبی تصاویر راداری و اپتیکی



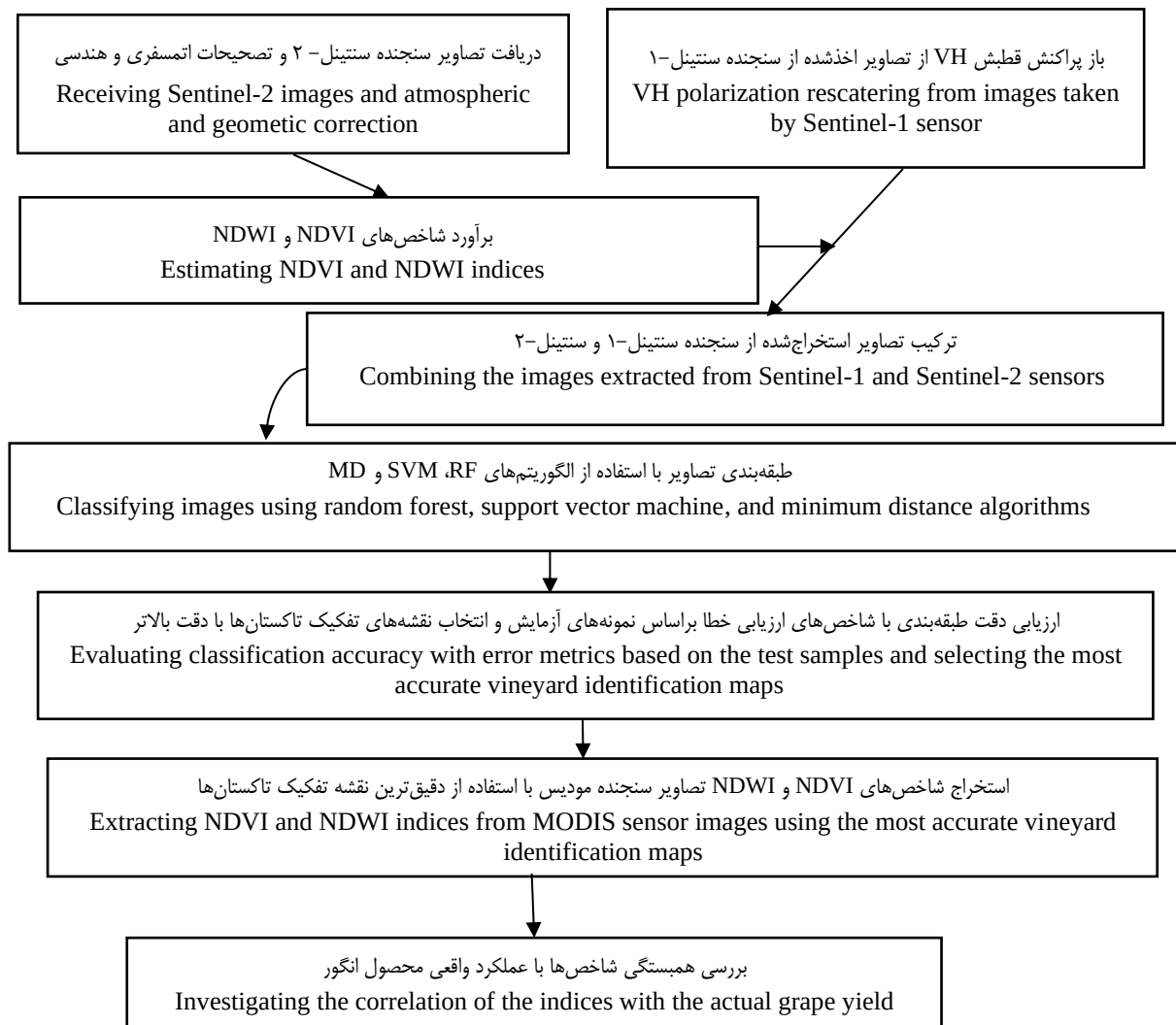
شکل ۱- منطقه محدوده مورد مطالعه در ایران

Fig.1. Study area in Iran

فرآیند انجام پژوهش

فرآیند انجام این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس شکل ۲، ابتدا تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر سنتینل-۲ در سال ۱۳۹۹ در محدوده استان همدان اعمال می‌شود و سپس بیشترین مقدار ماهانه شاخص‌های NDVI و NDWI در هر پیکسل برای کاهش تأثیر ابر اعمال می‌شود. حضور ابرها بر باندهای نوری تأثیر منفی دارد و سبب نویزی شدن شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی می‌شود. رویکرد مقدار بیشینه‌ی این شاخص‌ها در بازه‌های مختلف زمانی (مانند ماهانه) منجر به مقدار دقیق‌تری از وضعیت پوشش گیاهی می‌شود و تأثیر داده‌های نویزی را به شدت کاهش می‌دهد (Holben, 1986; Zhu & Woodcock, 2012). سپس تصویر میانه راداری منطقه مورد مطالعه برای فصل تابستان

سال ۱۳۹۹ از داده‌های ماهواره سنتینل-۱ استخراج و با مجموعه داده‌های بیشینه‌ی ماهیانه شاخص‌های NDVI و NDWI سنتینل-۲ با روش چندطیفی ترکیب شد، به‌طوری‌که به شکل یک باند جدید به تصویر میانه راداری اضافه شد تا تصاویری با دقت بالا ایجاد شود. تصویر میانه از میانه هر پیکسل در سری زمانی تصاویر ایجاد می‌شود که برای کاهش تأثیر نویز اسپکل در تصاویر راداری، با توجه به مقاوم بودن میانه به داده‌های پرت، بسیار مفید است و در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده می‌شود (Bovolo, & Bruzzone, 2007; Lopez-Martinez & Fabregas, 2002). سپس بر اساس این تصاویر ترکیبی شاخص‌ها و الگوریتم‌های طبقه‌بندی شامل: MD، SVM و RF تاکستان‌ها تفکیک می‌شوند و دقت تفکیک تاکستان‌ها در هر روش بررسی می‌شود.



شکل ۲- فرآیند انجام پژوهش

Fig.2. Research process

است. استفاده ترکیبی از داده‌های راداری و اپتیک موجب تولید نقشه‌های نوع کشت دقیق‌تری می‌شود. در این پژوهش از تصاویر سنتینل-۱ باند C و قطبش VH استفاده شد.

شاخص‌های سنجش از دور گیاهی

NDVI شاخصی است که با استفاده از روابط ریاضی بین باندهای طیفی مادون قرمز نزدیک (NIR^2) و قرمز (RED) مختلف اجرا می‌شود و در زمینه کشاورزی کاربرد فراوانی دارد (Sekeretkin & Zadbagher, 2021). این شاخص از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

شاخص پوشش گیاهی NDVI وضعیت پوشش گیاهی از قبیل کلروفیل را اندازه‌گیری می‌کند و ارتباط مستقیم با ظرفیت فتوسنتزی و جذب انرژی تاج پوشش گیاهی دارد (Arab, Noguchi, Matsushita, & Ahamed, 2021). شاخص NDVI در محدوده ۱ تا -۱ متغیر است، که مقادیر منفی نشان‌دهنده آب، مقادیر صفر تا ۰/۲ محدوده خاک و ۰/۲ تا یک بیانگر پوشش گیاهی است (Alex, Ramesh, & Sridevi, 2017). هرچه مقادیر NDVI به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تراکم بیشتر پوشش گیاهی است (Filgueiras, Mantovani, Althoff, FernandesFilho, & Cunha, 2019).

شاخص نرمال شده تفاضلی آب گیاه NDWI به‌عنوان شاخص دیگری برای طبقه‌بندی تصاویر مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص NDWI از باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز کوتاه (SWIR³) براساس رابطه (۲) محاسبه می‌گردد و میزان رطوبت گیاه را اندازه‌گیری می‌کند (Goa, 1996).

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

لازم به ذکر است که شاخص‌های NDVI و NDWI از باندهای B4 (Red)، B8 (NIR) و B11 (SWIR) تصاویر سنتینل-۲ و باندهای B1 (Red)، B2 (NIR) و B5 (SWIR) تصاویر سنجنده مودیس بعد از اعمال تصحیح اتمسفری (به‌منظور کاهش اثرات جو) و رادیومتری (در راستای تصحیح اختلافات ناشی از زاویه سنجش و تابش) محاسبه شد.

الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصاویر

الگوریتم SVM از مهم‌ترین الگوریتم‌های طبقه‌بندی یادگیری ماشین است که هدف آن تعیین مکان مرزهای تصمیم‌گیری است که

لازم به ذکر است که برای آموزش و ارزیابی الگوریتم‌های طبقه‌بندی از حدود ۱۲۰۰ نمونه از برداشت‌های میدانی و تصاویر رزولوشن بالای شرکت دیجیتال گلوب در گوگل‌ارث با پراکندگی مناسب در کلاس‌های مختلف شامل: تاکستان‌ها (۲۰۳ نمونه)، کوه‌ها و زمین‌های غیر کشاورزی (۲۱۳ نمونه)، آب (۵۰ نمونه)، زمین‌های زراعی کشت‌نشده (۳۴۸ نمونه)، زمین‌های زراعی کشت‌شده (۳۴۳ نمونه) و جنگل (۴۳ نمونه) استفاده شد، به طوری که به شکل تصادفی، ۷۰٪ پیکسل‌ها برای آموزش (۳۰٪ از این ۷۰٪ هم برای صحت‌سنجی) و ۳۰٪ برای آزمایش استفاده شد. لازم به ذکر است که تمام این مراحل در سامانه ابری گوگل‌ارث انجین^۱ تحت وب انجام می‌شود که با دسترسی و امکان پردازش سریع سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای هزینه زمان و محاسبات را بسیار کاهش داده است (Kumar & Mutanga, 2018). سپس با انتخاب دقیق‌ترین نقشه تفکیک تاکستان‌ها، بیشینه‌ی شاخص‌های ماهانه NDVI و NDWI از تصاویر سنجنده مودیس، با توجه به سری زمانی طولانی در دسترس، در مکان تاکستان‌ها در دوره زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ استخراج گردید و همبستگی آن‌ها با عملکرد واقعی محصول انگور استان همدان، دریافت‌شده از سازمان جهادکشاورزی همدان، در نرم‌افزار R نسخه 4.4.3 بررسی شد.

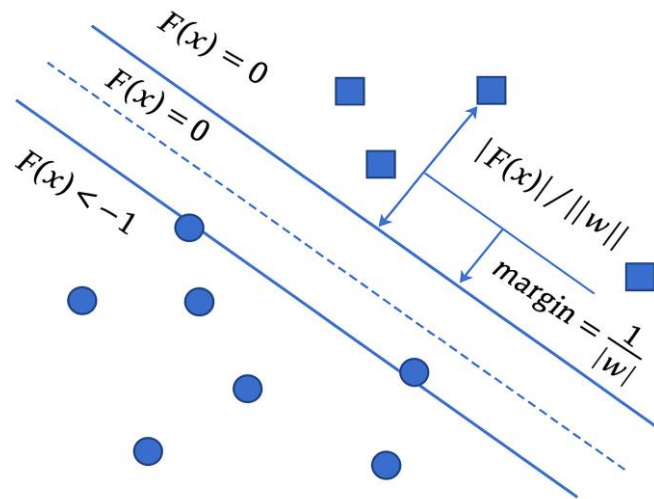
تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل داده‌ها

تصاویر سنتینل-۲ و سنتینل-۱ توسط آژانس فضایی اروپا برای جمع‌آوری اطلاعات از زمین طراحی شده‌اند که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. ماهواره سنتینل-۲، شامل دو سنجنده‌ی تصویربرداری به نام‌های سنتینل-۲a و سنتینل-۲b است. این تصاویر دارای توان تفکیک مکانی متغیر ۱۰ تا ۶۰ متر و شامل ۱۳ باند در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه است. علاوه بر این، سنتینل-۲ دارای عرض برداشت تصاویر ۲۹۰ کیلومتر و توان تفکیک زمانی ۵ روز در استوا است (Phiri et al., 2020). ماهواره سنتینل-۱ نیز در سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد. این ماهواره دارای میدان دید وسیع و توانایی تصویربرداری در تمامی شرایط آب و هوایی و طی شب و روز و توان تفکیک زمانی بالا (سه تا پنج روز) است. این ماهواره دارای یک سنجنده SAR در باند C در طول موج میکروویو در قطبش‌های مختلف VH، VV، HH و HV تصویربرداری می‌کند (Torres et al., 2012). امواج راداری (ماهواره‌های فعال) با توجه به حساس بودن به ویژگی‌های فیزیکی پدیده‌های مختلف از جمله ارتفاع گیاه و عدم تأثیر شرایط ابری بر تصاویر آن، امکان شناسایی هرچه بهتر نوع کشت را فراهم آورده

2- Near Infrared
3- Short wave Infrared

1- Google Earth Engine

برچسب کلاس برای داده‌ها است. این الگوریتم با یافتن ابرصفحه دو کلاس را طوری از هم جدا می‌کند که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی از دو کلاس با این ابرصفحه از یکدیگر بیش‌تر شود (Mohamadi Monavar & Zibazaseh, 2022).



شکل ۳- تابع طبقه‌بندی SVM: ابرصفحه که حاشیه را به‌صورت دوطرفه‌ای به حداکثر می‌رساند

Fig. 3. SVM classification function: Hyperplane that maximizes the margin in two dimensions (Yu & Kim, 2012)

در این پژوهش استفاده شد، که براساس توسعه درخت‌های تصمیم ضعیف ایجاد می‌شود (Breiman, 2001). این الگوریتم به‌دلیل دقت و توانایی آن در فضاهای ویژگی با ابعاد بالا، به‌راحتی پتانسیل استفاده در سیستم‌های بزرگ واقعی را دارد (Biau & Scorne, 2016). جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین نظارت‌شده می‌باشد که از مجموعه‌ای از درختان تصمیم تشکیل شده است. در مرحله اول این الگوریتم، جنگلی شامل k درخت تصمیم به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود، که از روش کیسه‌گذاری (Bagging) برای ساخت جنگل استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی داده‌ها، ابتدا هر درخت پیش‌بینی را انجام می‌دهد و در مرحله آخر پیش‌بینی‌های ایجادشده درختان ترکیب می‌شوند. مدل RF براساس میانگین‌گیری از نتایج حاصل از تمام درخت‌های تصمیم است. دقت این روش از الگوریتم درخت تصمیم بالاتر است، زیرا با میانگین‌گیری منجر به کاهش بیش‌برازش می‌شود (Immitzer, Vuolo, & Atzberger, 2016).

شاخص‌های ارزیابی روش‌های طبقه‌بندی

ماتریس خطا که ماتریس درهم‌ریختگی^۱ نیز نامیده می‌شود، که با مقایسه پیکسل به پیکسل، پیکسل‌های معلوم (داده‌های اعتبارسنجی) با پیکسل‌های متناظر در نتایج طبقه‌بندی محاسبه می‌شود. از این

جداسازی بهینه کلاس‌ها را ایجاد می‌کند (Pal & Mather, 2005). الگوریتم SVM برای تفکیک دو کلاس به‌صورت زوج‌های مرتب داده‌های آموزشی $\{x_i, y_i\}$, $i=1, \dots, n$, $y_i \in \{1, -1\}$, $x_i \in \mathbb{R}^d$ قابل‌ارائه هستند. در این رابطه x_i ویژگی‌های نقطه‌ای i ام و y_i

$$F(x) = WX - b \quad (3)$$

الگوریتم SVM ابرصفحه‌هایی را با حداکثر حاشیه به‌دست می‌آورد که دسته‌ها را جدا می‌کنند (شکل ۳). در این الگوریتم داده‌هایی که به‌صورت خطی جداپذیر نباشند به فضایی با ابعاد بیشتر نگاشت پیدا می‌کنند. رابطه (۳) جداساز در الگوریتم SVM را نشان می‌دهد که در آن X و W نشان‌دهنده بردارهای واقعی و وزن است که بر ابرصفحه عمود هستند (Yu & Kim, 2012). هم‌چنین b بیانگر بایاس اریبی است که موقعیت ابرصفحه را نسبت به فضای ویژگی اولیه تنظیم می‌کند.

روش MD در این پژوهش به‌عنوان روش دوم برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده شد. روش طبقه‌بندی MD، در سنجش از دور برای شناسایی نوع محصولات در نظر گرفته شده است که در این روش طبقه‌بندی، یک نمونه (گروهی از بردارها) در گروهی طبقه‌بندی می‌شوند که توزیع شناخته‌شده شباهت زیادی به نمونه تخمینی نمونه دارد (Wacker & Landgrebe, 1972). در این روش طبقه‌بندی پس از این که میانگین ارزش طیفی نمونه‌های انتخابی هر طبقه برای هر پیکسل اختصاص یافت، فاصله پیکسل‌های طبقه‌بندی‌نشده با پیکسل‌های میانگین مقایسه می‌شوند و به کلاسی که نزدیک‌ترین فاصله با میانگین دارد تعلق می‌گیرد.

الگوریتم تجمعی RF به‌عنوان روش سوم برای طبقه‌بندی تصاویر

1- Confusion matrix

(Thatte, 2017).

نتایج و بحث

دقت طبقه‌بندی تفکیک تاکستان‌ها براساس الگوریتم‌های RF، MD و SVM با شاخص‌های NDVI و NDWI و داده‌های آزمون نمونه‌برداری (۳۰٪ کل داده‌های نمونه‌برداری ترکیبی از برداشت‌های میدانی و تصاویر گوگل ارث) براساس شاخص‌های ارزیابی خطا ارزیابی شد (جدول ۱). این نتایج نشان از برتری الگوریتم RF با شاخص NDVI (با دقت کلی ۹۵ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۴) نسبت به الگوریتم SVM با شاخص NDVI (با دقت کلی ۷۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۶۱) و الگوریتم MD با شاخص NDVI (با دقت کلی ۵۲ درصد و ضریب کاپا ۰/۳۹)، به دلیل دقت و ضریب کاپای بالاتر، در تفکیک تاکستان‌ها دارد. همچنین طبقه‌بندی با شاخص NDWI با الگوریتم RF (با دقت کلی ۹۵ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۵) نسبت به الگوریتم SVM (دقت کلی ۷۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۱) و الگوریتم MD (دقت کلی ۴۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۳۴) عملکرد بالاتری دارد (جدول ۱). به طور کلی نتایج نشان از عملکرد مناسب طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از الگوریتم RF توسط هر دو شاخص NDVI و NDWI نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد، در حالی که طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم MD توسط شاخص NDVI و الگوریتم‌های RF و SVM با شاخص NDWI عملکرد بهتری نسبت به طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم MD با شاخص NDWI و دو الگوریتم دیگر با شاخص NDVI داشت (جدول ۱).

ماتریس می‌توان دقت کلی (P_j) از رابطه (۴) و ضریب کاپا ($Kappa$) از رابطه (۵) را به عنوان شاخص‌های ارزیابی برآورد کرد.

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^c E_{ij}}{\sum_{k=1}^m t_{kj}} \quad (4)$$

$$Kappa = \frac{p_o - p_c}{1 - p_c} \quad (5)$$

که در رابطه (۴)، C شماره کلاس‌ها، t_{kj} تعداد کل پیکسل‌های معلوم و E_{ij} اعضای قطری ماتریس خطا یا پیکسل‌های دارای کلاس صحیح هستند (Lewis, & Brown, 2001). در رابطه (۵) نیز، p_c توافق مورد انتظار و p_o توافق درستی مشاهده است (Zare Khoramizi, Ghafarian Malamiri, & Mortaz, 2020).

ضریب همبستگی

ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی مانند NDVI یا NDWI (x) با عملکرد سالانه تاکستان‌ها (y) (دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی) از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد (Pearson, 1896). به طوری که $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب مقادیر میانگین‌های x و y هستند.

$$S_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

ضریب همبستگی در محدوده ۱ و -۱ متغیر است، به طوری که ضریب همبستگی ۱+ (-۱) نشان‌دهنده رابطه قوی خطی مستقیم (معکوس) بین دو متغیر است. همچنین، ضریب همبستگی برابر صفر بیانگر عدم وجود رابطه خطی بین دو متغیر است (Gogtay &

جدول ۱- ارزیابی دقت طبقه‌بندی با استفاده از شاخص‌های ارزیابی خطا

Table 1- Evaluating classification accuracy using metric errors

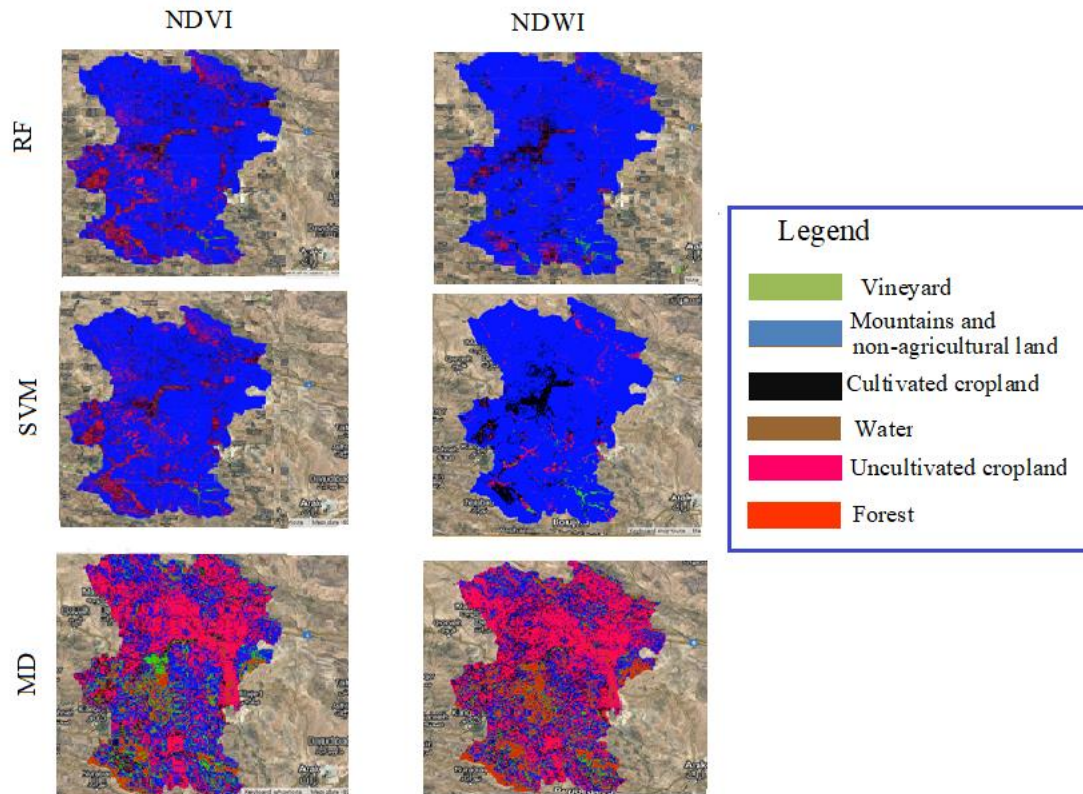
ضریب کاپا Kappa Coefficient	دقت کل (درصد) Total Accuracy (%)	الگوریتم Algorithm	شاخص سنجش از دور Remote sensing index
0.94	95	RF	NDVI
0.61	70	SVM	
0.39	52	MD	
0.95	95	RF	NDWI
0.71	77	SVM	
0.34	47	MD	

الگوریتم MD بیانگر کلاس‌های اشتباه بیشتری در کلاس زمین‌های کشاورزی کشت‌نشده یا زمین بایر بود و تاکستان‌ها نیز به اشتباه در کل نقشه طبقه‌بندی پراکنده شده‌اند، که با واقعیت مطابقت ندارند. همچنین زمین‌های کشاورزی کشت‌نشده نیز به خوبی شناسایی نشده است، که با نتایج اعتبارسنجی در جدول ۱ مبنی بر کمترین دقت و شاخص کاپا مطابقت دارد. با این حال نقشه‌های طبقه‌بندی شده با

نقشه‌های طبقه‌بندی شده در کلاس‌های مختلف شامل: تاکستان‌ها، کوه‌ها و زمین‌های غیر کشاورزی، آب، زمین‌های زراعی کشت‌نشده، زمین‌های زراعی کشت‌شده و جنگل با استفاده از شاخص‌های NDVI و NDWI و الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل RF، SVM و MD در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی تصاویر طبقه‌بندی شده با استفاده از شاخص‌های NDVI و NDWI توسط

در هر دو الگوریتم عملکرد بهتری داشت. این نتایج با نتایج جدول ۱ درخصوص دقت بالاتر توسط این دو الگوریتم، به‌ویژه با شاخص NDWI توافق دارد.

استفاده از شاخص‌های NDVI و NDWI توسط الگوریتم‌های RF و SVM مشابهت بالایی در مکان کلاس تاکستان‌ها در نیمه جنوب شرقی و بخش کوچکی در نیمه جنوب غربی دارند، هرچند که تفکیک کلاس تاکستان‌ها توسط شاخص NDWI نسبت به شاخص NDVI

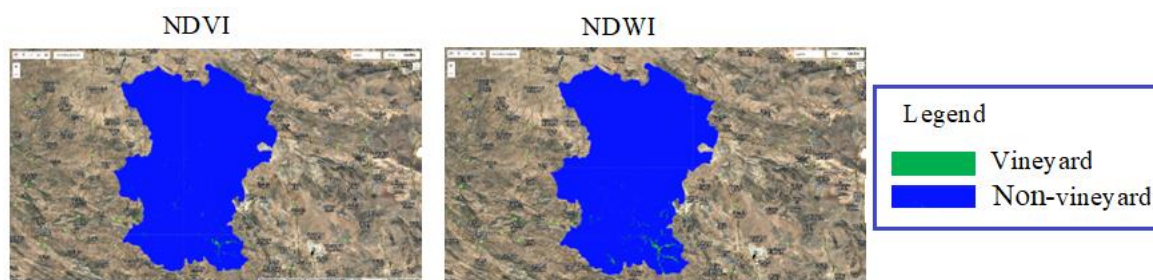


شکل ۴- تصاویر طبقه‌بندی شده تاکستان‌ها با شاخص‌های NDVI و NDWI توسط الگوریتم‌های متفاوت یادگیری ماشین در استان همدان
Fig.4. Classified images of vineyards with NDVI and NDWI indices using various machine learning algorithms in Hamedan province

ماهانه شاخص‌های NDVI و NDWI برآورد شده از تصاویر سنجنده مودیس در تاکستان‌ها (با استفاده از نقشه تفکیک شده تاکستان‌ها براساس شاخص NDWI و الگوریتم RF در شکل ۵) و عملکرد واقعی محصول انگور در سطح معناداری ۵٪ در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ در استان همدان است. نتایج همبستگی بیانگر همبستگی بالاتر شاخص NDVI با عملکرد محصول (ضریب همبستگی ۰/۸۱) نسبت به همبستگی شاخص NDWI با عملکرد محصول (ضریب همبستگی ۰/۷۵) است. هم‌چنین همبستگی بسیار بالایی بین شاخص‌های سنجش از دور NDVI با NDWI (۰/۹) وجود دارد.

بنابراین با توجه به پراکندگی صحیح و دقت بالاتر الگوریتم RF، نقشه شناسایی تاکستان‌ها تحت این الگوریتم با شاخص‌های NDVI و NDWI در دو کلاس تاکستان و غیرتاکستان جهت بررسی بیشتر، با توجه به اختلاف خیلی کم، در شکل ۵ ارائه شده است. شکل ۵ بیانگر تجمع اکثر تاکستان‌ها در منطقه شهرستان ملایر (واقع در جنوب شرقی استان) نسبت به دیگر مناطق استان، به‌ویژه با شاخص NDWI، است که با واقعیت تطابق دارد. بنابراین نتایج نقشه تفکیک تاکستان‌ها با شاخص NDWI و الگوریتم RF، با توجه به بالاترین دقت انتخاب شد.

جدول ۲، بیانگر ماتریس ضریب همبستگی پیرسون بین ماکزیمم



شکل ۵- نقشه تاکستان‌های استخراج‌شده استان همدان با شاخص‌های NDVI و NDWI توسط الگوریتم RF
Fig. 5. Extracted vineyard maps of Hamadan province with NDVI and NDWI indices using the RF algorithm

ویژگی‌های تاکستان‌ها می‌شود. این امر اهمیت انتخاب الگوریتم مناسب براساس پیچیدگی داده‌ها را برجسته می‌کند، در شرایطی که انعطاف‌پذیری و مقاوم بودن مدل RF می‌تواند منجر به مزیت قابل توجهی نسبت به فرضیات ساده مدل MD و حساسیت‌های به پارامتر مدل SVM باشد.

نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین درخصوص برتری عملکرد مدل RF نسبت به SVM در طبقه‌بندی اراضی کاربری توسط آدام و همکاران (Adam, Mutanga, & Odindi, & Abdel-Rahman, 2014) در نواحی ساحلی و آدوگنا و همکاران (Adugna, Xu, & Fan, 2022) در آفریقا مطابقت دارد. همچنین نتایج این پژوهش توسط غیور و همکاران (Ghayour et al., 2021) تایید می‌شود که الگوریتم SVM نسبت به الگوریتم MD، با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ عملکرد بهتری در طبقه‌بندی کاربری اراضی در شهرستان سقر داشت. در تضاد با این نتایج، بشیر و همکاران (Basheer et al., 2022) با مقایسه دقت الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده پوشش اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در کانادا دریافتند که الگوریتم SVM عملکرد بهتری از الگوریتم‌های RF، MD، و CART دارد. از دلایل این عدم تطابق می‌توان به ویژگی‌های اقلیمی متفاوت منطقه مورد مطالعه و نوع گیاهان متفاوت کشت‌شده (گیاهان سردسیری) اشاره کرد. همچنین از دلایل عدم دقت مناسب الگوریتم SVM در این پژوهش، می‌توان به عدم توازن در کلاس‌های نمونه‌برداری اشاره کرد، که نقش مهمی در برآورد کلاس‌های طبقه‌بندی دارد و کلاس‌هایی با نمونه‌های بیشتر را بهتر برآورد می‌کند. همچنین دقت بالاتر مدل‌های RF و SVM در طبقه‌بندی با شاخص NDWI نسبت به شاخص NDVI در تفکیک تاکستان‌ها می‌تواند به دلیل محتوای آب بالاتر تاکستان‌ها نسبت به سایر پوشش‌های گیاهی، با توجه به آبیاری و رطوبت بالای خاک باشد، زیرا این شاخص به تغییرات آب موجود در پیکره گیاهی حساس است. این نتایج با نتایج پژوهش هوانگ و همکاران (Huang, Chen, & Cosh, 2009) درخصوص عملکرد بالای NDWI در شرایطی که رطوبت خاک و ویژگی‌های آبی اهمیت

جدول ۲- ماتریس ضریب همبستگی پیرسون شاخص‌های سنجش از دور گیاهی با عملکرد محصول (سطح معناداری ۵٪)

Table 2- Pearson correlation coefficient matrix of remote sensing vegetation indices with crop yield (Significance at the 5% level)

	NDVI	NDWI
NDWI	0.9	1
NDVI	1	0.9
Yield	0.81	0.75

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که طبقه‌بندی تاکستان‌ها تحت الگوریتم‌های RF و SVM، به‌ویژه RF، نسبت به الگوریتم MD با استفاده از هر دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و NDWI دقت بالاتری دارد، هرچند که بالاترین دقت در طبقه‌بندی تاکستان‌ها در الگوریتم‌های RF و SVM با شاخص NDWI (دقت کل ۹۵٪ با الگوریتم RF) مشاهده شد. از دلایل دقت بالای مدل RF می‌توان به توانایی آن در مدل کردن بهینه‌ی روابط پیچیده و غیرخطی و مقاوم به داده‌های پرت و نویز اشاره کرد (Liaw & Wiener, 2002). در حالی که RF چندین درخت تصمیم را برای بهبود دقت طبقه‌بندی ترکیب کرده و مهم‌ترین ویژگی‌ها را در طبقه‌بندی استفاده می‌کند، الگوریتم MD مبتنی بر مرزهای تصمیم‌گیری خطی و با فرض توزیع‌های گاوسی منجر به دقت پایین در تفکیک کلاس‌های پیچیده می‌شود (Negri, Dutra, Sant'Anna, & Lu, 2016). به‌طور مشابه، SVM اگرچه در ایجاد مرزهای تصمیم غیرخطی از طریق بخش هسته (Kernel) قدرتمند است، اما نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای خود دارد و به شدت به کیفیت داده‌های ورودی حساس است. علاوه بر این، SVM می‌تواند تحت‌تاثیر نویز قرار گیرد و ممکن است در مواردی با کلاس‌های دارای همپوشانی یا مجموعه داده‌های نامتعادل با مشکل مواجه شود (Cortes & Vapnik, 1995). با این حال، حساسیت MD به نقاط پرت نیز می‌تواند منجر به عدم دقت پایین آن در طبقه‌بندی شود. در حالی که مدل RF براساس ماهیت تجمعی، با محاسبه میانگین، منجر به شناسایی قابل‌قبول‌تری از

نتایج همبستگی با این پژوهش می‌تواند به دلیل استفاده از سنجنده لندست باشد که توان تفکیک مکانی بسیار بالاتری نسبت به سنجنده مودیس دارد.

نتیجه‌گیری

طبقه‌بندی دقیق اراضی کشاورزی می‌تواند منجر به مدیریت بهینه منابع طبیعی، منابع آب و خاک، برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و اقتصادی، اطلاعات دقیقی از نوع و وسعت اراضی در زمینه انتخاب کشت‌های مناسب و بهینه‌سازی تولید و انتخاب کشت‌های پایدار و مقاوم به خشکی شود. نتایج این پژوهش دقت قابل قبول شاخص‌های سنجش از دور پوشش گیاهی ترکیب تصاویر ماهواره‌ای اپتیک و راداری شامل: سنتینل-۲ و سنتینل-۱ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شناسایی تاکستان‌ها را با نسبت به سایر محصولات زراعی بود، به طوری که طبقه‌بندی تصاویر با ترکیب الگوریتم RF و شاخص NDWI بالاترین دقت را دارد. همچنین رابطه خطی قوی بین عملکرد با شاخص NDVI نسبت به NDWI در تاکستان‌های استان همدان وجود دارد، که می‌تواند در پیش‌بینی برآورد عملکرد انگور در ماه‌های قبل از برداشت استفاده شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در راستای برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و مدیریت بهینه منابع انرژی در تاکستان‌ها نیز نقش قابل توجهی داشته باشد.

سپاسگزاری

از همکاری جهاد کشاورزی استان همدان به دلیل ارائه داده‌های عملکرد انگور استان همدان سپاس‌گزاریم.

مشارکت نویسندگان

حمیدرضا ملکی: روش‌شناسی، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن
مهرانه خدامرادپور: مفهوم‌سازی، تحلیل آماری، نظارت و مدیریت، تصویرسازی داده‌ها، مشاوره فنی و ویرایش متن
حسنا محمدی منور: مشاوره فنی، اعتبارسنجی، تصویرسازی نتایج و ویرایش متن

بیشتری دارند مطابقت دارد. این ویژگی به‌ویژه در مناطقی که با تنش‌های آبی مواجه هستند، از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا NDWI می‌تواند به‌خوبی تغییرات رطوبت را در نظر بگیرد و سبب افزایش دقت طبقه‌بندی گردد (Keria et al., 2024). همچنین شواهد موجود از تحقیقاتی که در زمینه طبقه‌بندی پوشش گیاهی انجام شده، نشان می‌دهد که NDVI معمولاً برای شناسایی پوشش گیاهی سالم و زنده مناسب است، اما در شرایطی که رطوبت و آب در گیاهان نقش مهمی دارد، شاخص NDWI می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری ارائه دهد (Tucker, 1979). از طرفی، از دلایل پایین بودن دقت طبقه‌بندی تاکستان‌ها با الگوریتم‌های MD و SVM می‌توان به اثر سایه (Shadow effect) در تاکستان‌ها اشاره کرد، که با توجه به شکل قرارگیری برگ و سایه‌اندازی روی زمین باعث اختلاف دمای 2°C بین برگ‌های واقع در سایه و برگ‌های در معرض نور مستقیم می‌شود (Lu et al., 2022). توماس و همکاران (Tomas, Samuel, Dongryeol, 2018) نیز نشان دادند که اثر سایه در تاکستان‌ها بالا و حدود ۴۳٪ است. با این حال نتایج کریمی و همکاران (Karimi et al., 2022) درخصوص برتری عملکرد تفکیک مزارع با شاخص NDVI نسبت به NDWI برآورد شده از تصاویر لندست ۸ و الگوریتم طبقه‌بندی SVM با نتایج این پژوهش مغایرت دارد، که از دلایل آن می‌توان به اختلاف در نوع تصاویر ماهواره مطالعه شده، اختلاف در دوره‌های زمانی مورد مطالعه و نوع پوشش‌های گیاهی با چرخه فنولوژی متفاوت اشاره کرد.

مقایسه همبستگی بین شاخص‌های ماکزیمم NDVI و NDWI مستخرج از سنجنده مودیس در تاکستان‌ها (با استفاده از نقشه تفکیک تاکستان‌ها با شاخص NDWI و الگوریتم RF) با عملکرد واقعی محصول انگور نشان از رابطه خطی قوی‌تری بین شاخص NDVI نسبت به NDWI با عملکرد انگور دارد. بنابراین، شاخص NDVI نسبت به NDWI رابطه نزدیک‌تری با عملکرد واقعی دارد. دلیل این نتیجه می‌تواند وابستگی بالای شاخص NDVI به تغییرات کلروفیل در برگ باشد که منجر به وابستگی بالا و رابطه خطی قوی و مستقیم با عملکرد محصول گردد. این نتایج توسط نتایج عرب و همکاران (Arab et al., 2021) تایید می‌شود، به طوری که بالاترین همبستگی بین عملکرد محصول انگور با شاخص NDVI (۰/۹۵) برآورد شده از تصاویر سنجنده لندست ۸ در تاکستان‌ها بود. اختلاف در

References

- Alex, E. C., Ramesh, K. V., & Sridevi, H. (2017). Quantification and understanding the observed changes in land cover patterns in Bangalore. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(4), 597-603.
- Adam, E., Mutanga, O., & Odindi, J., & Abdel-Rahman, E. M. (2014). Land-use/cover classification in a heterogeneous coastal landscape using Rapid Eye imagery: Evaluating the performance of random forest and support vector machines classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 3440-3458. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.903435>
- Adugna, T., Xu, W., & Fan, J. (2022). Comparison of Random Forest and Support Vector Machine Classifiers for

- Regional Land Cover Mapping Using Coarse Resolution FY-3C Images. *Remote Sensing*, 14(3), 574. <https://doi.org/10.3390/rs14030574>
4. Ahmad, F. (2012). Detection of change in vegetation cover using multi-spectral and multi-temporal information for district Sargodha, Pakistan. *Sociedade & Natureza*, 24(3), 557-571. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000300014>
5. Arab, S. T., Noguchi, R., Matsushita, S., & Ahamed, T. (2021). Prediction of grape yields from time-series vegetation indices using satellite remote sensing and a machine-learning approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100485>
6. Avalos, J. M. M., & Araujo, E. S. (2021). Optimization of Vineyard Water Management: Challenges Strategies, and Perspectives. *Water*, 13(6), 1-32. <https://doi.org/10.3390/w13060746>
7. Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *Test*, 25(2), 197-227. <https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>
8. Borgogno-Mondino, E., & Lessio, A. (2018). A FFT-Based approach to explore periodicity of vines/soil properties in vineyard from time series of satellite-derived spectral indices. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 9078-9081). <https://doi.org/10.1109/igarss.2018.8519437>
9. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
10. Brinkhoff, J., Vardanega, J., & Robson, A. J. (2019). Land Cover Classification of Nine Perennial Crops Using Sentinel-1 and -2 Data. *Remote Sensing*, 12(1), 1-26. <https://doi.org/10.3390/rs12010096>
11. Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2007). A split-based approach to unsupervised change detection in large-size multitemporal images: Application to tsunami-damage assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6), 1658-1670. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.895835>
12. Basheer, S., Wang, X., Farooque, A. A., Nawaz, R. A., Liu, K., Adekanmbi, T., & Liu, S. (2022). Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 14(19), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs14194978>
13. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
14. Filgueiras, R., Mantovani, E. C., Althoff, D., FernandesFilho, E. I., & Cunha, F. F. D. (2019). Crop NDVI monitoring based on sentinel 1. *Remote Sensing*, 11(12), 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs11121441>
15. Faizizadeh, B. & Haydari, H. (2008). Estimation of vineyards cultivated area of in using SPOT5 satellite image. *Journal of Geography and Planning*, 14(27), 47-60. (in Persian). Retrieved from <https://sid.ir/paper/203804/en>
16. Ghayour, L., Neshat, A., Paryani, S., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., Ansari, N. A., Geertsema, M., Amiri, M. P., Gholamnia, M., Dou, J., & Ahmad, A. (2021). Performance evaluation of sentinel-2 and landsat8 OLI data for land cover/use classification using a comparison between machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7), 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs13071349>
17. Goa, B. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing Environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
18. Gogtay, N. J., & Thatte, U. M. (2017). Principles of correlation analysis. *Journal of the Association of Physicians of India*, 65(3), 78-81. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28462548/>
19. Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
20. Hartling, S., Sagan, V., Sidike, P., Maimaitijiang, M., & Carron, J. (2019). Urban tree species classification using a WorldView-2/3 and LiDAR data fusion approach and deep learning. *Sensors*, 19(6), 1284. <https://doi.org/10.3390/s19061284>
21. Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417-1434. <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>
22. Huang, J., Chen, D., & Cosh, M.H. (2009). Sub-pixel reflectance unmixing in estimating vegetation water content and dry biomass of corn and soybeans cropland using normalized difference water index (NDWI) from satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8), 2075-2104. <https://doi.org/10.1080/01431160802549245>
23. Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing*, 8(3), 166. <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
24. Junges, A. H., Fontana, D. C., Anzanello, R., & Bremm, C. (2017). Normalized difference vegetation index obtained by ground-based remote sensing to characterize vine cycle in Rio Grande do Sul, Brazil. *Ciencia E Agrotecnologia*, 41(5), 543-553. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017415049016>
25. Karimi, N., Sheshangosht, S., & Eftekhari, M. (2022). Crop type detection using an object-based classification method and multi-temporal Landsat satellite images. *Paddy Water Environment*, 20(3), 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10333-022-00901-x>
26. Keria, H., Bensaci, E., Zoubiri, A., & Ben Si Said, Z. (2024). Long-term dynamics of remote sensing indicators to monitor the dynamism of ecosystems in arid and semi-arid areas: contributions to sustainable resource

- management. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1532-1550. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.409>
27. Kumar, L., & Mutanga, O. (2018). Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sensing*, 10(10), 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
 28. Lewis, H. G., & Brown, M. (2001). A generalized confusion matrix for assessing area estimates from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 22(16), 3223-3235. <https://doi.org/10.1080/01431160152558332>
 29. Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by RandomForest. *R News*, 2, 18-22. Retrieved from <https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-022/RN-2002-022.pdf>
 30. Lopez-Martinez, C., & Fabregas, X. (2002). Modeling and reduction of SAR interferometric phase noise in the wavelet domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12), 2553-2566. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.806997>
 31. Lu, S., Xuan, J., Zhang, T., Bai, X., Tian, F., & Ortega-Farias, S. (2022). Effect of the shadow pixels on evapotranspiration inversion of vineyard: A high-resolution UAV-based and ground-based remote sensing measurements. *Remote Sensing*, 14(9), 2259. <https://doi.org/10.3390/rs14092259>
 32. Mirzaei, M., Abbasi, M., Marofi, S., Solgi, E., & Karimi, R. (2018). Spectral discrimination of important orchard species using hyperspectral indices and artificial intelligence approaches, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(2), 76-92. (in Persian). Retrieved from <https://sanad.iau.ir/Journal/girs/Article/902480>
 33. MohamadiManavar, H., & Zibazadeh, S. (2022). Distinguishing rain-fed and irrigated crops in Hamadan province using spectral indices of satellite images. *Journal of Agricultural Machinery*, 12(4), 529-542. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69074.1022>
 34. Nematollahi, H., Ashourloo, D., Alimohammadi, A., Khodabandehloo, & Radiom, S. (2018). Development and application of crop and field condition indices using time-series satellite images of Sentinel-2. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(3), 105-122. (in Persian with English abstract). Retrieved from https://gisj.sbu.ac.ir/article_96575.html
 35. Negri, R. G., Dutra, L. V., Sant'Anna, S. J. S., & Lu, D. (2016). Examining region-based methods for land cover classification using stochastic distances. *International Journal of Remote Sensing*, 37(8), 1902-1921. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1165883>
 36. Pal, S., Pandey, S. K., Sharma, S. K., & Nair, R. (2022). Land use and land cover classification of Jabalpur district using minimum distance classifier. *The Pharma Innovation*, 11(11), 1161-1163. Retrieved from <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue11S/PartO/S-11-11-148-831.pdf>
 37. Pal, M., & Mather, P. M. (2005). Support vector machines for classification in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 26(5), 1007-1011. <https://doi.org/10.1080/01431160512331314083>
 38. Pearson, K. (1896). Mathematical contributions to the theory of evolution III. Regression, heredity and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 187, 253-318. <https://doi.org/10.1098/rsta.1896.0007>
 39. Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote sensing*, 12(14), 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
 40. Robinson, N. P., Allred, B. W., Jones, M. O., Moreno, A., Kimball, J. S., Naugle, D. E., Erickson, T. A., & Richardson, A. D. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8), 64-77. <https://doi.org/10.3390/rs9080863>
 41. Sekertekin, A., & Zadbagher, E. (2021). Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area. *Ecological Indicators*, 122, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107230>
 42. Tomas, P., Samuel, O. F., Dongryeol, R. (2018). Automatic Coregistration Algorithm to Remove Canopy Shaded Pixels in UAV-Borne Thermal Images to Improve the Estimation of Crop Water Stress Index of a Drip-Irrigated Cabernet Sauvignon Vineyard. *Sensors*, 18, 397. <https://doi.org/10.3390/s18020397>
 43. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
 44. Torres, R., Snoeijs, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E. & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote sensing of Environment*, 120, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
 45. Vélez, S., Barajas, E., Blanco, P., Rubio, J. A., & Castrillo, D. (2021). Spatio-temporal analysis of satellite imagery (NDVI) to identify terroir and vineyard yeast differences according to appellation of origin (AOP) and biogeographic origin. *Multidisciplinary Scientific Journal*, 4(3), 244-256. <https://doi.org/10.3390/j4030020>
 46. Vintrou, E., Desbrosse, A., Begue, A., Traore, S., Baron, C., & Lo seen, D. (2012). Crop area mapping in West Africa using landscape stratification of MODIS time series and comparison with existing global land products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.06.010>
 47. Wacker, A. G., & Landgrebe, D. A. (1972). Minimum Distance Classification in Remote Sensing. *LARS Technical Reports*. Paper 25, 1-20. Retrieved from <https://docs.lib.purdue.edu/larstech/25/>

48. Yu, H., & Kim, S. (2012). SVM Tutorial: Classification, Regression and Ranking. *Handbook of Natural Computing*, 1, 479-506. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92910-9_15
49. Zare Khormizi, H., Ghafarian Malamiri, H. R., & Mortaz, M. (2020). Evaluation of supervised classification capability of Landsat-8 and Sentinel-2A Satellite images in determining type and area of Pistachio Cultivars. *Journal of Rs and Gis for natural Resources*, 11(1), 84-103. (in Persian with English abstract). Retrieved from <https://srb.sanad.iau.ir/en/Article/902735>
50. Zhao, L., Li, Q., Zhang, Y., Wang, H., & Du, X. (2019). Integrating the Continuous Wavelet Transform and a Convolutional Neural Network to Identify Vineyard Using Time Series Satellite Images. *Remote Sensing*, 11(22), 2641. <https://doi.org/10.3390/rs11222641>
51. Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028>

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 303-316

Detection of Cucumber Fruit on Plant in a Greenhouse Environment Using the YOLOv8 Object Detection Algorithm

A. Soleimanipour^{1*}

1- Department of Biosystem Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(*- Corresponding Author Email: asoleimani@gau.ac.ir)

Received: 06 February 2025
Revised: 09 April 2025
Accepted: 12 April 2025
Available Online: 14 July 2025

How to cite this article:

Soleimanipour, A. (2026). Detection of Cucumber Fruit on Plant in a Greenhouse Environment Using the YOLOv8 Object Detection Algorithm. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 303-316. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92068.1339>

Introduction

The increasing demand for automation in agriculture, particularly for repetitive and labor-intensive tasks, has driven the development of robotic harvesting systems. Recent advances in computer vision, deep learning, and the availability of large image datasets have made it possible to create robust object detection models for agricultural applications. Traditional harvesting methods, such as bulk harvesting, often lead to fruit damage and loss owing to non-selective picking. Selective harvesting, particularly with the use of robotic systems, offers a promising alternative by combining the precision of human labor with the efficiency of automation. This study presents a deep learning-based model for detecting cucumber fruits on plants in a real greenhouse environment, which is an essential step towards developing autonomous harvesting robots that selectively pick ripe cucumbers.

Materials and Methods

A dedicated image dataset was curated in a commercial greenhouse, comprising 300 images of cucumber plants captured under various lighting conditions (morning, noon, and evening), to ensure robustness against real-world variability. Images were manually labeled to identify the cucumber fruits and their pedicels. To enhance the model training and prevent overfitting, data augmentation techniques were applied to the training set. Several architectures of the YOLO (You Only Look Once) object detection algorithm were evaluated, including the nano-scale versions YOLOv5n and YOLOv8n, and the small-scale YOLOv8s, in addition to the RT-DETR model.

The YOLOv8 algorithm is known as one of the state-of-the-art algorithms in computer vision because of its high speed, detection accuracy, and adaptability. The YOLOv8 architecture consists of three main parts: backbone, neck, and head, which are responsible for extracting image features, combining and enriching features, and predicting bounding boxes and object classes, respectively.

These models were trained, and their performances were compared based on the detection accuracy and inference time metrics. Training and evaluation were conducted using a suitable computational platform.

Results and Discussion

The performances of different YOLO models and RT-DETR were rigorously evaluated. The results demonstrated that the YOLOv8n model achieved the highest detection accuracy of 87.5%, surpassing the performances of the other tested models. Importantly, the YOLOv8n model also exhibited a favorable balance between the accuracy and inference time, making it suitable for real-time applications. The analysis considered the trade-off between the number of parameters and detection speed, highlighting the efficiency of YOLOv8n.

The YOLOv8n model demonstrated superior performance in terms of pedicel detection accuracy compared



Authors retain the copyright. 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.2025.92068.1339>

to YOLOv5n, achieving a fitness score of 91.08% (calculated as a weighted average of mAP@50 and mAP@50-95). While exhibiting strong performance in fruit and pedicel detection (Figure 6), the sensitivity of the model for pedicel detection (88.0%) was comparatively lower than that for fruit detection (96.1%). The highest F1 score (0.89) was observed at a confidence level of 39.5%, indicating the effectiveness of the model in balancing the precision and recall for pedicel detection. Overall, YOLOv8n outperformed the other tested models in identifying the class and location of the fruit pedicel. The superior performance of YOLOv8n can be attributed to its architectural advancements and optimized training processes.

Conclusion

This study successfully developed a deep learning-based model for accurate and efficient cucumber fruit detection in a greenhouse environment. The YOLOv8n model demonstrated superior performance compared with the other evaluated architectures, achieving a detection accuracy of 87.5% while maintaining a good processing speed. These findings suggest that the YOLOv8n model has significant potential for integration into autonomous vegetable harvesting robots, contributing to the automation of agricultural processes and increased efficiency in greenhouse operations. Future works should explore further optimization and testing under diverse environmental conditions.

Keywords: Cucumber, Deep learning, Greenhouse, Harvesting robots, YOLO

تشخیص میوه خیار روی بوته در محیط گلخانه با استفاده از الگوریتم تشخیص اشیاء YOLOv8

علی‌رضا سلیمانی پور^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده

در سال‌های اخیر، توسعه اتوماسیون و کاربرد ربات‌ها برای انجام عملیات تکرارشونده و سنگین کشاورزی سرعت بیشتری پیدا کرده است. این امر ناشی از افزایش قدرت رایانه‌ها در پردازش اطلاعات، توسعه پایگاه داده‌های تصویری کلان، و همچنین توسعه مدل‌ها و الگوریتم‌های کاربردی در هوش مصنوعی است. در این مقاله، یک مدل تشخیص میوه خیار روی بوته در محیط واقعی گلخانه، مبتنی بر یادگیری عمیق و بینایی رایانه‌ای، طراحی و توسعه داده شد. ابتدا یک پایگاه تصویری مشتمل بر ۳۰۰ تصویر با میزان شدت نور مختلف که در اوقات مختلف روز تهیه شده بود ایجاد شد. پس از برچسب‌گذاری تصاویر، عملیات داده‌افزایی روی تصاویر آموزشی انجام شد. سپس، با آموزش الگوریتم تشخیص اشیاء YOLO میوه خیار و ساقه آن در محیط طبیعی گلخانه تشخیص داده شد. عملکرد چندین معماری مختلف الگوریتم YOLO شامل نسخه ۵ در مقیاس نانو (YOLOv5n) و نسخه ۸ در مقیاس نانو و کوچک (YOLOv8n و YOLOv8s) و همچنین مدل RT-DETR بر روی پایگاه تصویر جمع‌آوری شده آموزش و ارزیابی شد. نتایج مدل‌ها براساس پارامترهای مختلف دقت و سرعت تشخیص با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد مدل YOLOv8n، در مقایسه با سایر مدل‌های هم‌ارز از دقت تشخیص بالاتری برخوردار است. صحت تشخیص این مدل در تشخیص میوه خیار و ساقه آن، به‌ترتیب برابر با ۹۶/۱ و ۸۸/۰ درصد بود. این در حالی بود که این مدل به لحاظ تعداد پارامتر و سرعت تشخیص هم عملکرد بسیار خوبی داشت. از این سامانه می‌توان در توسعه روبات برداشت صیفی‌جات خودران استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: خیار، ربات برداشت محصول، گلخانه، مدل YOLO، یادگیری عمیق

مقدمه

نظر کشاورزی و اقتصادی است. ایران پس از چین و ترکیه در رتبه سوم تولید خیار در جهان قرار دارد (FAO, 2023). با این حال مقدار تولید و سطح زیر کشت خیار در ایران را در بازه ۱۰ ساله اخیر روند نزولی داشته است. عوامل مختلف اقتصادی و مرتبط با فناوری تولید می‌تواند در این موضوع موثر باشد. به‌عنوان مثال؛ (۱) هزینه‌های بالای نیروی کار باعث کاهش سودآوری و رقابت‌پذیری محصولات شده است، (۲) ظهور قوی کشورهای با مزیت‌های رقابتی مانند هزینه‌های پایین زمین، دستمزد پایین و در برخی موارد با تکنولوژی کشت و تولید بالاتر، (۳) و دشواری فزاینده در یافتن نیروی کار به دلیل فصلی بودن مشاغل مرتبط، شرایط کاری سخت و جذابیت کم به دلیل یک شغل کم مهارت بودن، از عمده دلایل هستند. به‌طور مشخص، سرعت رشد میوه خیار بالا است و نیاز به برداشت میوه‌ها دو یا سه بار در هفته دارد. این فراوانی بالا یکی از دلایلی است که کار برداشت خیار را نسبت به هر میوه سبزی دیگر فشرده‌تر می‌کند. این موارد نیاز به طراحی راهبردهای موثری برای تقویت مزیت‌های تولید

خیار^۲، یک محصول کشاورزی از خانواده cucurbitaceae، حاوی فیبر، پتاسیم، منگنز، منیزیم و ویتامین A، C، K و نیز شامل گروهی از ویتامین‌های گروه B مانند تیامین، ریبوفلاوین و B-6 هستند که به متابولیسم و تولید انرژی کمک می‌کنند (Mallick, 2022). در سال ۲۰۲۱، تولید جهانی خیار تازه‌خوری^۳ و خیارشور یا خیار مناسب برای ترشی^۴ در جهان ۹۳/۵ میلیون تن بود که سبزیجات را از نظر حجم کل تولید بعد از گوجه‌فرنگی و پیاز در رتبه سوم قرار داد. این آمار نشان‌دهنده اهمیت جهانی خیار و خیارشور از

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*)- نویسنده مسئول
(Email: asoleimani@gau.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92068.1339>

2- *Cucumis sativus*

3- Cucumber

4- Gherkins

به صورت طولانی مدت ترکیب کنند (Shewfelt & Prussia, 2022). با توسعه سریع و مداوم فناوری‌های هوش مصنوعی و رباتیک، اعتقاد بر این است که رویکرد برداشت رباتیک می‌تواند جایگزین کارگران برداشت محصول شود (Bharad & Khanpara, 2024; Droukas et al., 2023; Kootstra, Wang, Blok, Hemming, & Van Henten, 2021; Park et al., 2023).

الگوریتم‌های تشخیص شیء مبتنی بر یادگیری عمیق به دو دسته تک‌مرحله‌ای (مانند YOLO، SSD و RetinaNet) و دو مرحله‌ای (مانند Faster R-CNN و FPN) تقسیم می‌شوند. مدل‌های تک‌مرحله‌ای به سرعت بالاتر در تحلیل تصویر معروف هستند و در کاربردهای بلادرنگ موثرترند، در مقابل مدل‌های دو مرحله‌ای معمولاً از دقت تشخیص بالاتری برخوردارند (Tajane, KhutaleKore, Khairmode, & Girawale, 2024). نسخه‌های اخیر مدل تک‌مرحله‌ای YOLO پیشرفت خوبی در دقت و سرعت تشخیص نسبت به نسخه‌های پیشین داشته است (Jocher, Chaurasia, & Qiu, 2023; Mahani & Karami, 2023). با وجود قابلیت بالای مدل YOLO، کاربرد این مدل در تشخیص میوه نسبتاً کم است. در تحقیقی، محققان از مدل YOLO-V3 بهبودیافته برای تشخیص گوجه‌فرنگی استفاده کردند. آن‌ها در الگوریتم مورد استفاده ابتدا ساختار شبکه در بخش لایه‌های متراکم^۱ مربوط به مدل YOLO-V3 را بهبود دادند و در مرحله دوم الگوریتم حذف غیر حداکثرها^۲ را بهبود دادند. در نتیجه مدل حاصل در پیش‌بینی مکان گوجه‌فرنگی در تصاویر عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم Yolo-V3 داشت (Liu, Nouaze, Touko Mbouembe, & Kim, 2020). در تحقیق دیگری، کوزنتسوا و همکاران (Soloviev, 2020) با استفاده از برخی تکنیک‌های پیش‌پردازش و پس‌پردازش نتایج خوبی از لحاظ مدت زمان تشخیص برای استفاده از الگوریتم YOLO-V3 در تشخیص سیب به دست آوردند. سرعت تشخیص بالا راحتی قابل توجهی را برای برداشت ربات فراهم می‌کرد. نتایج پیاده‌سازی در محیط واقعی نیز نشان داد که استفاده از این الگوریتم، میانگین زمان تشخیص را کاهش می‌دهد و نرخ خطای پایین را حفظ می‌کند. با معرفی مدل YOLO-V4، دقت در تشخیص اشیایی که قسمتی از آن‌ها در تصویر مخفی است بهبود پیدا کرد (Bochkovski, Wang, & Liao, 2020). در پژوهشی، وو و همکاران (Wu, Lv, Jiang, & Song, 2020) از YOLO-V4 برای تشخیص شکوفه‌های سیب استفاده کردند. این مدل تشخیص سیب را ساده‌تر کرد و کانال‌ها را برای اطمینان از سرعت و کارایی تشخیص کوتاه کرد. این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های Faster R-CNN، YOLO-V3، YOLO-V2 و سایر الگوریتم‌ها، عملکرد بهتری داشت

این محصول کشاورزی را برجسته می‌کند که در نتیجه بهبود کارایی فرآیندهای درگیر در عملیات تولید آن حاصل می‌شود. ربات‌های خدماتی در حال تبدیل شدن به بخش کلیدی بسیاری از بخش‌های جامعه، از جمله کشاورزی دقیق هستند، جایی که از آن‌ها خواسته می‌شود نقش مهمی در بهبود رقابت و تولید پایدار ایفا کنند (Fernandez et al., 2018).

دو نوع رویکرد برداشت توسط متخصصان کشاورزی برای کاهش هزینه‌های کارگری باغات اجرا شده است: برداشت فله و برداشت انتخابی. روش برداشت فله بر اساس اصل اعمال ارتعاش در درخت میوه برای جداسازی اجباری میوه است (Mehta, MacKunis, & Burks, 2016). این روش توسط پرورش‌دهندگان میوه‌های مختلف مانند سیب، پرتقال و گیلاس پذیرفته شده است (Zhang et al., 2020). اگرچه سیستم‌های برداشت انبوه با راندمان بالایی همراه هستند (Sola-Guirado, Castro-Garcia, Blanco-Roldán, Gil-Ribes, & González-Sánchez, 2020)، معایب قابل توجهی نیز وجود دارد. آسیب بیش از حد به میوه‌ها (Moseley, House, & Roka, 2012) و تلفات ناشی از برداشت میوه‌های نارس و بیش از حد بالغ (Zhou, Wang, Au, Kang, & Chen, 2022) از آن جمله‌اند. برداشت انتخابی یک روش برداشت برای سامانه‌های رباتیک است که از بازوهای مکانیکی با عملگرهای نهایی برای گرفتن میوه استفاده می‌کنند. این گروه ربات‌ها معمولاً با نصب یک عملگر نهایی روی یک پلتفرم متحرک و تجهیز آن به بینایی ماشین برای چیدن انتخابی میوه‌های رسیده پیاده‌سازی می‌شوند (Bac, Van Henten, Hemming, & Edan, 2014).

تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای از گذشته تاکنون در رابطه با سامانه‌های رباتیک برداشت محصولات کشاورزی صورت گرفته است. قبل از ظهور فناوری هوش مصنوعی به شکل امروزی، از روش‌های سنتی پردازش تصویر و یادگیری ماشین استفاده می‌شد (Xiao et al., 2023). هرچند با گسترش مفهوم و کاربرد یادگیری عمیق، عمده تحقیقات در زمینه ربات‌های برداشت بر استفاده از این الگوریتم‌ها متمرکز شده است (Jin & Han, 2024). برداشت رباتیک با استفاده از یادگیری عمیق، در مقایسه با روش‌های سنتی پردازش تصویر و یادگیری ماشین، مزایای متعددی دارد؛ این مزایا عبارتند از: افزایش دقت در شناسایی و برداشت محصولات، قابلیت انطباق با انواع مختلف محصولات زراعی، توانایی تصمیم‌گیری فوری و بلادرنگ در حین برداشت، مدیریت و پردازش صحنه‌های پیچیده مزرعه، یادگیری مستقیم از داده‌های خام تا تصمیم نهایی، کاهش نیاز به دخالت انسانی و در نهایت کاهش هزینه‌های عملیاتی در بلندمدت (Alaudeen, Selvarajan, Manoharan, & Jhaveri, 2024; Salim & Mohammed, 2024). به‌طور کلی، سامانه‌های رباتیک به‌طور بالقوه می‌توانند کارایی ماشین‌ها را با گزینش‌پذیری انسان‌ها

1- Dense layers

2- Non-maximum suppression

و توانست به تشخیص لحظه‌ای و دقیق گل‌های سبب دست یابد.

اخیراً، از الگوریتم بهبودیافته YOLOv8 در زمینه تشخیص میوه گوجه‌فرنگی استفاده شده است (Yue et al., 2023). در این پژوهش، یک شبکه بهبودیافته از YOLOv8s-Seg برای تشخیص برخط و مؤثر میوه گوجه‌فرنگی، رنگ سطح و ویژگی‌های سطحی معرفی شد. با انجام اصلاحاتی از قبیل جایگزینی ماژول $C2f$ با ماژول $RepBlock$ (شامل $RepConv$ انباشته)، این الگوریتم بهبود قابل توجهی در قابلیت ترکیب ویژگی‌ها از خود نشان داد. علاوه بر این، ادغام کانولوشن $SimConv$ ، استفاده از تابع $ReLU$ به جای تابع $SiLU$ به عنوان تابع فعال‌سازی در شبکه ترکیب ویژگی‌ها^۱، و جایگزینی لایه‌های کانولوشن معمولی باقی‌مانده با $SimConv$ به بهبود عملکرد الگوریتم کمک می‌کرد. در تحقیق دیگری، فاتحی و همکاران (Fatehi, Bagherpour, & Amiri Parian, 2025) از الگوریتم YOLOv8s برای شناسایی گل‌های محمدی شکفته در مزرعه روباز استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل YOLOv8s در مقایسه با نسخه‌های قدیمی‌تر، شامل YOLOv5s و YOLOv6s، از عملکرد بهتری به لحاظ دقت و سرعت تشخیص برخوردار بود.

یافته‌های این مطالعات بر پتانسیل الگوریتم‌های مبتنی بر مدل YOLO و به‌طور ویژه مدل YOLOv8 در پیشبرد روش‌های فناورانه در تشخیص میوه‌ها در محیط واقعی تأکید می‌کند و راه‌حلی امیدوارکننده برای کاربردهای بلادرنگ و استخراج کارآمد ویژگی‌های سطحی ارائه می‌دهد. این موضوع دورنمای ارزشمندی را در این زمینه تحقیقاتی در رابطه با کاربرد مورد بینایی رایانه و پردازش تصویر کشاورزی نشان می‌دهد. تکامل مداوم این الگوریتم‌ها با هدف پرداختن به چالش‌ها در تشخیص و تجزیه و تحلیل خودکار میوه‌ها در محیط واقعی یک موضوع تحقیقاتی مهم و به‌روز به‌شمار می‌رود. بنابراین، در این تحقیق عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری عمیق مبتنی بر مدل YOLOv8 در تشخیص میوه خیار در محیط واقعی گلخانه و تحت شرایط نورپردازی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ایجاد یک پایگاه تصویر از میوه خیار در شرایط واقعی محیط گلخانه، تصاویری از بوته‌های خیار درختی در داخل گلخانه گرفته شد. تصاویر از دو گلخانه مختلف تهیه شد و رقم خیار کشت‌شده در این گلخانه‌ها رقم ناگین بود. این دو گلخانه واقع در شهرستان پاکدشت، استان تهران بودند. تصاویر در طول روز و در سه وعده صبح، ظهر و عصر تهیه شدند و تصویرگیری تحت نورپردازی طبیعی روز بود و هیچ نورپردازی دیگری انجام نشد. تصاویر از فاصله

۷۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری دوربین از بوته‌ها گرفته شدند. قابل ذکر است، تصاویر با استفاده از یک دوربین تلفن همراه مدل Samsung Galaxy A12 گرفته شدند. ابعاد تصاویر گرفته‌شده 3000×3000 پیکسل بود. البته در مرحله پیش‌پردازش برای کاهش حجم داده، ابعاد تصاویر کاهش داده شد. از آنجایی که مدل تشخیص اشیاء YOLO در فرآیند تحلیل تصویر، تصاویر را به‌صورت جزئی به مربع‌های 32×32 بررسی می‌کند، بنابراین بهتر است ابعاد تصاویر ضریبی از عدد ۳۲ باشد. با توجه به جزئیات موجود در تصاویر خیار در محیط واقعی گلخانه، ابعاد تصاویر پایگاه داده با بالاترین مقدار ممکن برای مدل YOLO نسخه P5 برابر ۶۴۰ است، بنابراین ابعاد تصویر در هنگام آموزش مدل‌ها به 640×640 کاهش داده شد.

به‌طور کلی پایگاه تصویر مورد استفاده در این تحقیق شامل ۳۰۰ تصویر از بوته خیار درختی بود. در مجموع ۱۲۰۹ برچسب روی تصاویر زده شد که ۷۳۳ مورد میوه خیار با وضوح خوب در تصور و ۴۷۶ مورد ساقه متصل به خیار بود. علت برابر نبودن تعداد میوه و ساقه متصل به آن در تصاویر، پوشانده شدن ساقه برخی میوه‌های موجود با برگ، میوه و یا ساقه اصلی است. در برخی موارد نیز فقط بخشی از میوه در تصویر وجود داشت و قسمت ساقه آن نمایان نبود. در شکل ۱ نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده برای آموزش مدل‌های مورد نظر آورده شده است. از این شکل کامل مشخص است که با اعمال تغییرات مختلف در مرحله داده‌افزایی (جدول ۱)، پیچیدگی در تصاویر به مقدار زیادی افزایش یافته است. بدیهی است این موضوع منجر به قوی‌تر شدن مدل‌های آموزش‌یافته خواهد شد. با انجام عملیات داده‌افزایی، تعداد تصاویر مورد استفاده در مرحله آموزش مدل به ۳ برابر افزایش داده شد.

الگوریتم YOLOv8

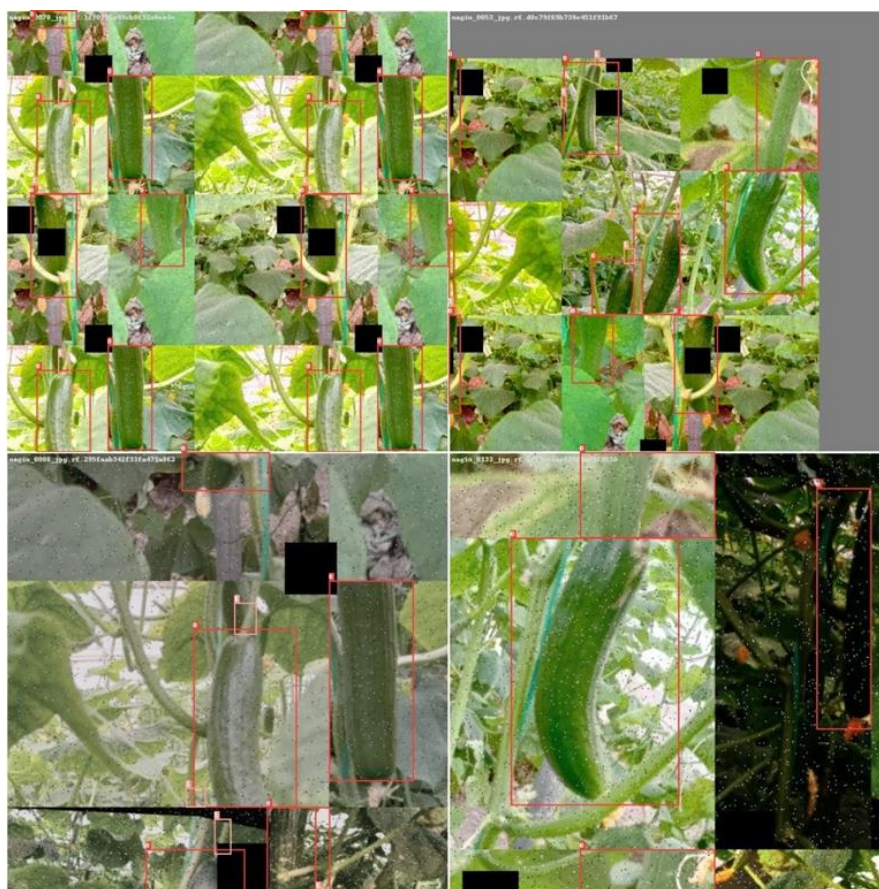
الگوریتم YOLOv8، یکی از قوی‌ترین نسخه‌های مدل تشخیص اشیاء You Only Look Once است که در سال ۲۰۲۳ معرفی شد. این الگوریتم در سرعت تحلیل تصویر، دقت تشخیص و تطبیق‌پذیری جزو الگوریتم‌های پیشرو در زمینه بینایی رایانه است و این قابلیت‌ها آن را به انتخابی جذاب برای کاربردهای مختلف تبدیل می‌کند. برای درک بهتر قابلیت‌های این الگوریتم، آشنایی با پیچیدگی‌های معماری آن ضروری است. معماری الگوریتم YOLO در شکل ۲ نشان داده شده است. نسخه‌های مختلف این الگوریتم دارای سه بخش اصلی شامل ستون فقرات^۲، گردن^۳ و سر^۴ است.

2- Backbone

3- Neck

4- Head

1- Feature Fusion network



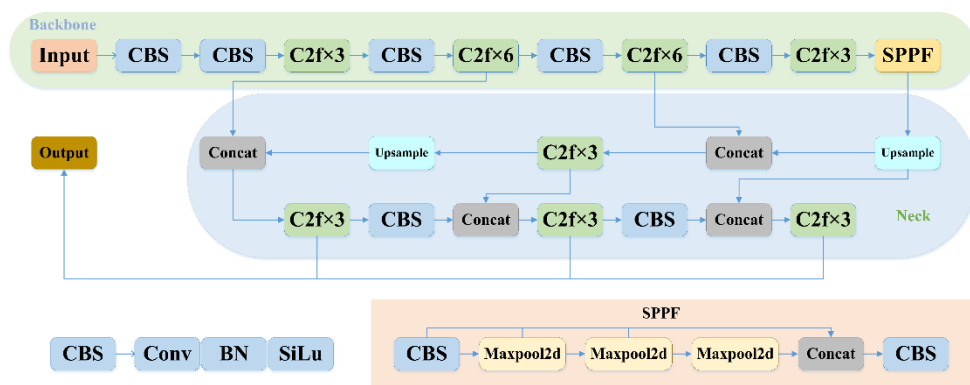
شکل ۱- نمونه از تصاویر مورد استفاده برای آموزش مدل‌های مورد نظر

Fig. 1. Sample of images used to train the models

جدول ۱- نوع عملیات داده‌افزایی و مشخصات هر یک برای تقویت پایگاه تصاویر

Table 1- Type of operations and specifications performed for image dataset augmentation

نوع عملیات داده‌افزایی	مشخصات
Type of augmentation	Specification
برگردان	Horizontal, Vertical
Flip	
چرخش	Between -15° and +15°
Rotation	
رنگ	Between -15° and +15°
Hue	
اشباع	Between -25% and +25%
Saturation	
روشنایی	Between -15% and +15%
Brightness	
درخشندگی	Between -10% and +10%
Exposure	
نوفه	Up to 0.1% of pixels
Noise	



شکل ۲- معماری الگوریتم YOLOv8

Fig. 2. YOLOv8 architecture

ویژگی‌های اولیه، نرمال‌سازی دسته‌ای برای بهبود پایداری آموزش و تابع فعال‌سازی *SiLU* برای ایجاد غیرخطی بودن. برخلاف ماژول‌های پیچیده‌تری مانند *C2f*، ماژول *SimConv* به دنبال انجام وظایف اساسی با کمترین پیچیدگی است. این ماژول معمولاً در لایه‌های ابتدایی شبکه استفاده می‌شود تا ابعاد تصاویر را کاهش دهد یا تعداد کانال‌های ویژگی را تنظیم کند. این کار باعث می‌شود که پردازش‌های بعدی توسط ماژول‌های پیچیده‌تر مانند *C2f* سریع‌تر و کارآمدتر انجام شود. ماژول *SimConv* با تمرکز بر سرعت و کارایی، به YOLOv8 کمک می‌کند تا تشخیص اشیاء را به صورت بلادرنگ و با حفظ ساختار ساده و قابل تغییر انجام دهد. همچنین، ماژول *C2f* از چندین لایه کوچک و موازی برای استخراج جزئیات بیشتر از تصاویر استفاده می‌کند. این کار باعث می‌شود مدل بتواند اشیاء را با دقت بالاتری تشخیص دهد، در حالی که حجم محاسبات آن زیاد نمی‌شود. به همین دلیل، مدل سریع و سبک باقی می‌ماند و برای استفاده در برنامه‌هایی که نیاز به پردازش سریع دارند مناسب است. از دیگر تغییرات انجام‌شده در مدل YOLOv8 نسبت به نسخه‌های پیشین می‌توان به ماژول *++PANet*^۱ (موثر در ترکیب اطلاعات از سطوح مختلف ویژگی‌های تصویر)، سر تشخیص جداسازی (موثر در پیش‌بینی دقیق‌تر با جداسازی پیش‌بینی مختصات جعبه محصورکننده شیء^۲، احتمال شیء بودن و احتمالات کلاس) و استفاده از مکانیسم‌های توجه فضایی و کانالی برای تمرکز بر مناطق مرتبط و حذف نویز که کیفیت تشخیص را بهبود می‌بخشد، اشاره کرد (Jocher et al., 2023). امکان انجام بخش‌بندی نمونه^۴ و تشخیص حالت^۵ با مدل YOLO از نسخه ۸ به آن اضافه شده است.

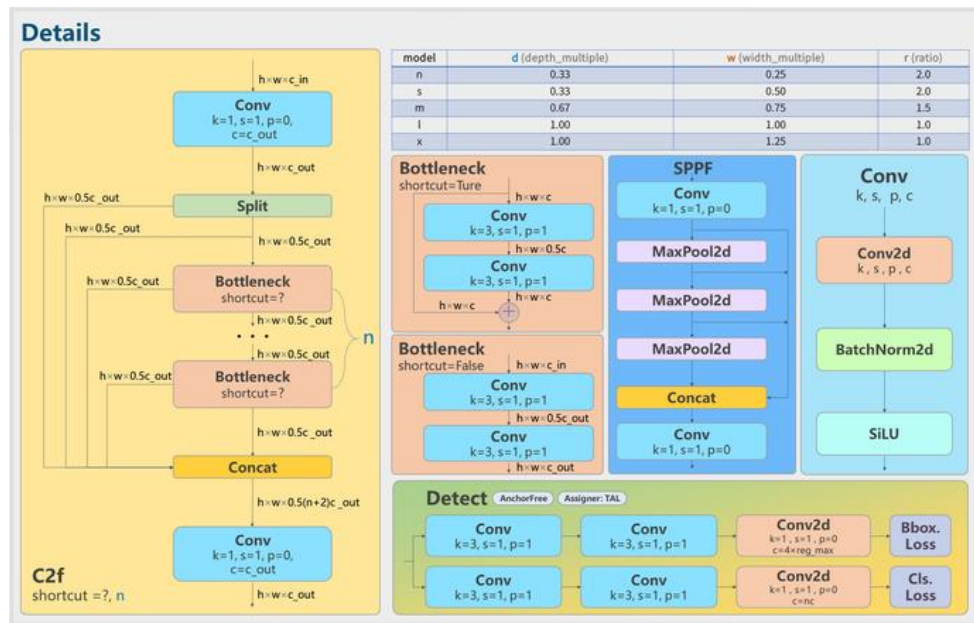
ستون فقرات: به عنوان بلوک پایه، مسئول استخراج ویژگی‌های معنی‌دار از تصاویر ورودی است. مدل YOLOv8 از ماژول CSPDarknet53، که نسخه‌ای ارتقا یافته از معماری Darknet است، استفاده می‌کند که از اتصالات باقی‌مانده و اتصالات جزئی بین مرحله‌ای استفاده می‌کند. این اتصالات جریان کارآمد اطلاعات را در سراسر شبکه تضمین می‌کنند و به بخش ستون فقرات اجازه می‌دهد تا نشانه‌های بصری متنوعی مانند اشکال، بافت‌ها و لبه‌ها را استخراج کند.

گردن: ویژگی‌های استخراج‌شده در مقیاس‌های مختلف وجود دارند. گردن به عنوان پلی عمل می‌کند که این ویژگی‌های چند مقیاس را در یک نمایش واحد ترکیب می‌کند. الگوریتم YOLOv8 برای این کار از یک ماژول *C2f* جدید استفاده می‌کند. این ماژول از مکانیسم‌های ادغام ویژگی و توجه فضایی برای ترکیب موثر ویژگی‌های سطح بالا و سطح پایین استفاده می‌کند، فضای ویژگی را غنی می‌کند و به محلی‌سازی دقیق اشیاء کمک می‌کند. جزئیات ماژول‌های استفاده‌شده در الگوریتم YOLOv8 در شکل ۳ نشان داده است.

سر: ویژگی‌های پردازش‌شده را می‌گیرد و آن‌ها را به پیش‌بینی تبدیل می‌کند. این بخش شامل چندین ماژول تشخیص است که هر کدام مسئول شناسایی اشیاء با اندازه‌ها و مقیاس‌های مختلف هستند. این ماژول‌ها از جعبه‌های لنگر برای پیش‌بینی جعبه‌های محدودکننده و نمرات اطمینان برای اشیاء احتمالی استفاده می‌کنند. خروجی نهایی لیست تصفیه‌شده‌ای از اشیاء شناسایی‌شده با جعبه‌های محدودکننده و احتمالات مربوطه است.

در نسخه ۸ مدل تشخیص شیء YOLO تغییرات زیادی نسبت به نسخه‌های پیشین ایجاد شده است. ماژول *SimConv* (جایگزین ماژول *Conv* در نسخه‌های قبل) در YOLOv8 مانند یک ابزار ساده و سریع برای پردازش ابتدایی تصاویر است. این ماژول از سه بخش اصلی تشکیل شده: یک لایه کانولوشن استاندارد برای استخراج

- 1- Enhanced path aggregation network
- 2- Decoupled detection head
- 3- Bounding box
- 4- Instance segmentation
- 5- Pose detection



شکل ۳- جزئیات ماژول‌های موجود در الگوریتم YOLOv8

Fig. 3. Details of modules in YOLOv8 algorithm

پردازنده Intel® Core™ i5-13600KF (دارای ۱۴ هسته و ۲۰ رشته محاسباتی)، حافظه موقت RAM ۳۲ گیگابایت و سیستم عامل Windows 11 استفاده شد. قابل ذکر است اندازه هر بسته آموزش برابر با ۴ انتخاب شد و تعداد تکرار آموزش مدل‌ها برابر با ۲۰۰ قرار داده شد. سایر هایپرپارامترهای مدل‌ها همان مقادیر پیش فرض آن‌ها در نظر گرفته شدند. در جدول ۲ مقادیر هایپرپارامترهای مورد استفاده در آموزش مدل‌ها آورده شده است.

آموزش مدل و ارزیابی عملکرد

پایگاه تصویر جمع‌آوری شده به دو بخش تصاویر آموزش و آزمون به نسبت ۲ به ۱ تقسیم شد. به این ترتیب که برای آموزش هر مدل ۲۰۰ عکس و ۱۰۰ عکس باقی‌مانده برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. البته تصاویر آموزش با استفاده از تکنیک‌های مختلف داده‌افزایی، تصاویر به سه برابر افزایش داده شدند. مدل پیشنهادی با استفاده از فریمورک Pytorch پیاده‌سازی شد. آموزش مدل پیشنهادی و مدل YOLOv8 با مقیاس‌های مختلف بر روی تصاویر آموزش از یک رایانه پردازش سریع با مشخصات کارت گرافیک NVIDIA®

جدول ۲- هایپرپارامترهای مورد استفاده در آموزش مدل‌های مختلف YOLOv8

Table 2- Hyperparameters used in training different YOLOv8 models

هایپرپارامتر	مقدار	توصیف
Hyperparameter	Value	Description
epochs	200	Number of epochs to train for
patience	50	Epochs to wait for no observable improvement for early stopping of training
Batch	4	Number of images per batch (-1 for AutoBatch)
Imgsz	640	Size of input images as integer
device	gpu	Device to run on, i.e. cuda device = 0 or device = 0, 1, 2, 3 or device = cpu
optimizer	'auto'	Optimizer to use, choices = [SGD, Adam, Adamax, AdamW, NAdam, RAdam, RMSProp]
Freeze	None	Freeze the first n layers (int or list, optional), or freeze the list of layer indices during training
lr0	0.01	Initial learning rate (i.e. SGD = 1E-2, Adam = 1E-3)
Lrf	0.01	Final learning rate (lr0 * lrf)
momentum	0.937	SGD momentum/Adam beta1
weight_decay	0.0005	Optimizer weight decay 5E-4
warmup_epochs	3.0	Warmup epochs (fractions ok)
warmup_momentum	0.8	Warmup initial momentum
warmup_bias_lr	0.1	Warmup initial bias lr

یادگیری عمیق، شامل مدل تشخیص اشیاء YOLOv8 در دو مقیاس مختلف، نانو (YOLOv8n) و کوچک (YOLOv8s)، مدل YOLOv5 در مقیاس نانو (YOLOv5n)، و مدل مبدل تشخیص زمان-واقعی (RT-DETR) با استفاده از داده‌های آموزشی آموزش داده شدند. در ادامه عملکرد هر یک از این مدل‌ها در تشخیص درست میوه و ساقه متصل به آن و نیز تشخیص صحیح محل قرارگیری آن‌ها در تصویر آورده شده است.

با توجه به جدول ۳ و عملکرد چهار مدل آموزش‌یافته با تصاویر پایگاه داده این تحقیق و ارزیابی آن‌ها براساس منحنی‌های دقت-اطمینان، بازیابی-اطمینان، امتیاز F1-اطمینان و منحنی دقت-بازیابی، عملکرد مدل YOLOv8n با دقت تشخیص کلی ۸۸/۸۷ درصد بهترین عملکرد را داشت. این مدل در بسیاری از پارامترها بهتر و یا هم‌تراز با سایر مدل‌های حجیم‌تر از خود عمل می‌کند و به‌طور کلی کارایی این مدل در دقت و سرعت تشخیص و یافتن محل قرار گرفتن میوه خیار در تصویر بسیار خوب ارزیابی می‌شود. این موضوع از آنجایی اهمیت دارد که مدل مدنظر برای پیاده‌سازی باید قابلیت تشخیص به‌صورت زمان-واقعی در کاربردهای برخط داشته باشد. خصوصاً در حالتی که رایانه مورد استفاده در پیاده‌سازی مجهز به واحد پردازش گرافیکی (GPU) نباشد.

نتایج عملکرد مدل YOLOv8n برای کلاس‌های مختلف شامل میوه خیار و ساقه متصل به آن در جدول ۴ گزارش شده است. به‌طور مشخص عملکرد این مدل در تشخیص میوه خیار خیلی بهتر از عملکرد آن در تشخیص ساقه می‌باشد. با توجه به این که میوه خیار و ساقه متصل به آن دقیقاً هم‌رنگ با برگ و سایر قسمت‌های ساقه گیاه می‌باشد، وجود خطای بالا خصوصاً در تشخیص ساقه متصل به میوه اجتناب‌ناپذیر است. یک راهکار برای کاهش این خطا، توسعه یک الگوریتم دو مرحله‌ای است که در آن ابتدا فقط میوه تشخیص داده شود و سپس الگوریتم دیگری در نواحی سر و ته میوه به دنبال ساقه بگردد. هرچند با دو مرحله‌ای شدن، زمان تشخیص اندکی بیشتر می‌شود. اما پیش‌بینی می‌شود با این روش دقت تشخیص ساقه به دقت تشخیص میوه نزدیک‌تر شود. این موضوع در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مدت‌زمان صرف‌شده برای ارزیابی یک تصویر نیز یک معیار مهم در بررسی عملکرد مدل‌ها می‌باشد. طبق جدول ۵ مدل‌های مختلف مورد استفاده سرعت‌های تشخیص نزدیک به هم داشتند و به‌طور جزئی مدل YOLOv5n عملکرد بهتری داشت. در جدول ۵ عملکرد مدل‌های مختلف براساس پارامترهای مهم برای ارزیابی سرعت آن‌ها گزارش شده است. سرعت پردازش در سامانه‌های بینایی ماشین بسیار متأثر از نوع سخت‌افزار است (Hussain, 2024).

ارزیابی مدل‌ها براساس معیارهای دقت^۱، حساسیت^۲، معیار F1 و میانگین دقت متوسط^۳ انجام شد. فرمول هر یک از این معیارها به‌صورت زیر است.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۱)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۲)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۳)$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (۴)$$

$$AP = \int_0^1 P dR \quad (۵)$$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n AP_i \quad (۶)$$

در رابطه‌های (۱) تا (۶)، TP تعداد اشیای درست تشخیص داده‌شده، FP تعداد اشیایی که در تصویر نیست اما به اشتباه تشخیص داده شده‌اند و FN تعداد اشیایی است که در تصویر وجود دارند ولی به اشتباه تشخیص داده نشده‌اند. همچنین AP مساحت زیر منحنی دقت و حساسیت است.

نتایج و بحث

در آموزش همه مدل‌ها تعداد دفعات آموزش ۲۰۰ تنظیم شد. هرچند تا انتهای دفعات آموزش، تابع زیان^۴ در حال کاهش و مقادیر دقت، حساسیت و میانگین دقت متوسط برای تصاویر آموزش در حال افزایش بود. اما برای تصاویر مربوط به ارزیابی مدل‌ها، این موارد در دفعه آموزش حدود ۱۶۰ به بعد روند نسبتاً ثابتی داشتند و بهبود قابل‌توجهی قابل‌مشاهده نبود (شکل ۴). این نشان می‌دهد که تعداد دفعه آموزش ۲۰۰ انتخاب خوبی برای آموزش مدل‌ها بود. پس از تکمیل آموزش، مدل مورد آموزش دو فایل که حاوی وزن‌های مدل آموزش‌یافته بود به‌دست می‌داد. فایل last.pt حاوی وزن‌های مدل در ۲۰۰ امین بار آموزش بود و فایل best.pt حاوی وزن‌های مدل در آن دفعه آموزشی‌ای بود که بهترین عملکرد را داشت. در ارزیابی مدل‌ها از مدل با وزن‌های best.pt استفاده شد. همچنین، مدت زمان لازم برای آموزش برای مدل‌های مختلف متفاوت بود که کمترین آن ۰/۱۹۴ برای مدل YOLOv8n و طولانی‌ترین زمان آموزش مربوط به مدل YOLOv8x و برابر با ۰/۳۸۵ ساعت بود.

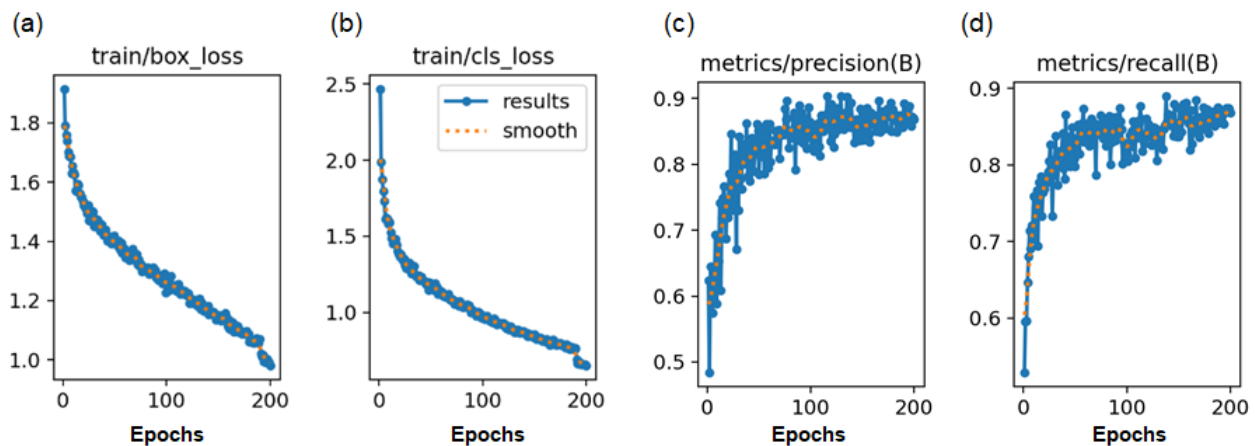
در این تحقیق چهار مدل مختلف تشخیص اشیاء مبتنی بر

1- Precision

2- Recall

3- mAP

4- Loss Function



شکل ۴- نمودار تغییرات مقادیر تابع زیان، دقت و حساسیت در طی آموزش مدل YOLOv8n

Fig. 4. Trends in (a) bounding box loss, (b) classification loss, (c) precision, and (d) sensitivity during YOLOv8n model training

جدول ۳- مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف مورد استفاده در تشخیص کلاس و مکان قرارگیری اشیاء در تصاویر پایگاه داده آموزش و ارزیابی

Table 3- Performance comparison of different models used in detecting the class and location of the objects

نام مدل Model	دقت		حساسیت		میانگین دقت ۵۰٪		میانگین دقت ۵۰ تا ۹۵٪		برازندگی Fitness
	Precision		Recall		mAP50		mAP50-95		
	آموزش Train	ارزیابی Test	آموزش Train	ارزیابی Test	آموزش Train	ارزیابی Test	آموزش Train	ارزیابی Test	
YOLOv5n	0.9039	0.8841	0.8902	0.8748	0.9082	0.9024	0.5598	0.5603	0.5945
YOLOv8n	0.8990	0.8887	0.9073	0.8922	0.9240	0.9207	0.5780	0.5787	0.6129
YOLOv8s	0.8989	0.8835	0.9153	0.8878	0.9239	0.9224	0.5638	0.5633	0.5992
RT-DETR	0.9102	0.8853	0.9622	0.8801	0.9325	0.9075	0.5640	0.5642	0.5985

جدول ۴- عملکرد مدل YOLOv8n از لحاظ دقت، بازیابی mAP50 و mAP50-95

Table 4- Performance of the YOLOv8n model in terms of precision, recall, mAP50, and mAP50-95

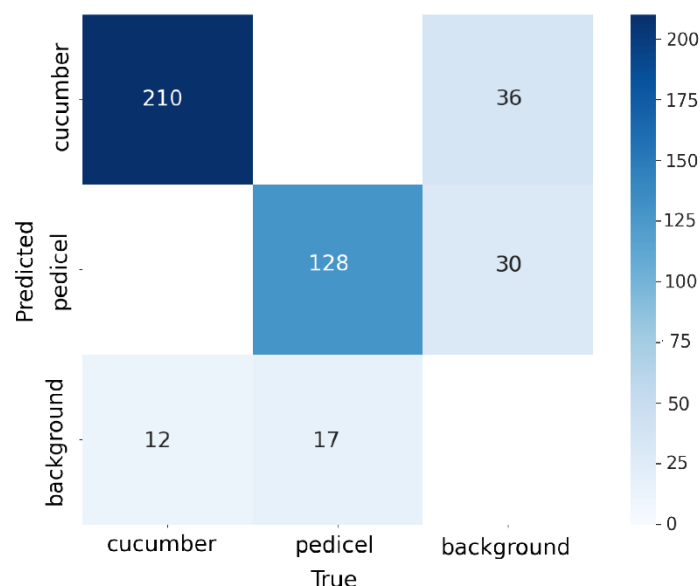
نام کلاس Class name	تعداد تصویر Image No.	تعداد نمونه Sample No.	دقت Precision		حساسیت Recall		میانگین دقت ۵۰٪ mAP50		میانگین دقت ۵۰ تا ۹۵٪ mAP50-95	
			آموزش Train		ارزیابی Test		آموزش Train		ارزیابی Test	
			Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test
همه کلاس‌ها All	90	367	0.899	0.889	0.907	0.892	0.924	0.921	0.578	0.579
خیار Cucumber	90	222	0.921	0.905	0.964	0.95	0.973	0.968	0.797	0.796
ساقه متصل به میوه Pedicel	90	145	0.877	0.863	0.812	0.8	0.84	0.837	0.322	0.325

مشخص، ماژول‌های سخت‌افزاری Jetson محصول شرکت Nvidia گزینه مناسبی برای اجرای مدل‌های یادگیری عمیق در شرایط مزرعه‌ای می‌باشند. مصرف انرژی کم و توان پردازشی بالا از ویژگی‌های منحصر به فرد این سخت‌افزارها است.

با توجه به نتایج جدول ۵، در صورت بهره‌گیری از سخت‌افزار مورد استفاده در این تحقیق، همه مدل‌های موردبررسی را می‌توان در کاربردهای زمان-واقعی استفاده کرد. مقایسه سرعت پردازش بین مدل‌ها زمانی اهمیت پیدا می‌کند که از سیستم‌های مبتنی بر CPU و یا با کارت گرافیک ضعیف‌تر برای پیاده‌سازی استفاده شود. به‌طور

جدول ۵- سرعت تشخیص و اندازه مدل‌های آموزش‌یافته
Table 5- Inference time and size of trained models

نام مدل Model	تعداد لایه Layers No.	تعداد پارامتر Parameters No.	GFLOPs	زمان آموزش Training time (hr)	دفعات آموزش Epochs	سرعت تشخیص Inference (ms)	حجم مدل Volume (MB)
YOLOv5n	193	2503334	7.1	0.948	200	4.1	5.3
YOLOv8n	168	3006038	8.1	0.502	200	7.7	6.3
YOLOv8s	168	11126358	28.4	0.316	123	5.7	22.5
RT-DETR	498	31987850	86.28	0.775	80	9.2	66.1

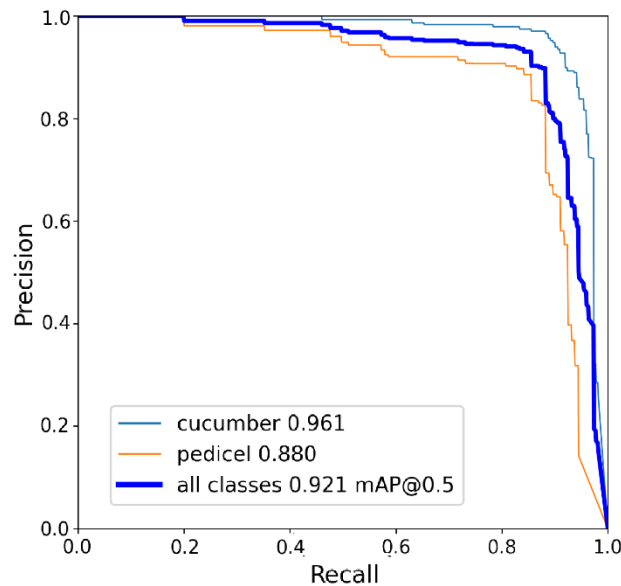

شکل ۵- ماتریس درهم‌ریختگی مدل YOLOv8n
Fig. 5. Confusion matrix of the YOLOv8n model

وزنی میانگین دقت متوسط ۵۰ (به میزان اثرگذاری ۱۰٪) و میانگین دقت متوسط ۵۰ تا ۹۵ (با میزان اثرگذاری ۹۰٪) به‌دست می‌آید. علی‌رغم دقت خوب مدل YOLOv8n در تشخیص خیار و ساقه متصل به آن، حساسیت این مدل برای تشخیص ساقه بسیار ضعیف‌تر از حساسیت آن در تشخیص میوه است (شکل ۶). حداکثر مقدار امتیاز F1 برای این مدل در درصد اطمینان ۳۹/۵ درصد رخ داده و برابر با ۰/۸۹ است. از آنجایی‌که این پارامتر میانگین هندسی دقت و حساسیت است، معیار بهتری نسبت به این دو در ارزیابی مدل محسوب می‌شود. به‌طور کلی، این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های موردبررسی در این تحقیق بهترین عملکرد را در تشخیص کلاس و مکان قرارگیری ساقه متصل به میوه را داشت. صحت تشخیص این مدل در تشخیص میوه خیار و ساقه آن، به‌ترتیب برابر با ۹۶/۱ و ۸۸/۰ درصد بود.

در شکل ۵ ماتریس درهم‌ریختگی مدل YOLOv8n آورده شده است. این ماتریس برای تصاویر دسته ارزیابی این مدل ترسیم‌شده است که مجموعاً حاوی ۲۲۲ شیء از کلاس میوه خیار و ۱۴۵ شیء از کلاس ساقه میوه می‌باشد. به توجه با این شکل، ۱۲ مورد (۵ درصد) میوه موجود در پایگاه تصاویر ارزیابی به اشتباه پس‌زمینه تشخیص داده شده‌اند. در مقابل ۱۷ مورد (۱۲ درصد) ساقه متصل به میوه موجود در تصاویر به اشتباه زمینه تشخیص داده شده‌اند. نکته دیگر این‌که هیچ موردی از خطای مدل در تشخیص اشتباه میوه به جای ساقه و یا ساقه به جای میوه گزارش نشده است.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل YOLOv8n، منحنی دقت-بازیابی این مدل بر روی تصاویر ارزیابی در شکل ۶ آورده شده است. این مدل نسبت به مدل هم‌ارز خود از نسخه پنج (YOLOv5n) عملکرد بهتری در دقت تشخیص ساقه داشت. تابع برازندگی^۱ این مدل ۹۱/۰۸ درصد به‌دست آمد. این تابع از میانگین

1- Fitness



شکل ۶- منحنی دقت- حساسیت مدل YOLOv8n
Fig. 6. Precision-Recall Curve of the YOLOv8n Model

در تشخیص میوه و ساقه بود. غالب مدل‌ها عملکرد نسبتاً خوبی در تشخیص میوه داشتند ولی در تشخیص ساقه متصل به میوه عملکرد خوبی مشاهده نشد. این موضوع می‌تواند به دلیل هم‌رنگ و هم‌شکل بودن ساقه متصل به میوه با سایر بخش‌های ساقه گیاه باشد. برای فائق آمدن بر این چالش، توسعه الگوریتم‌های دو مرحله‌ای که ساقه را صرفاً در قسمتی از تصویر جستجو کند که در آن میوه کشف شده است، پیشنهاد می‌شود. این رویکرد می‌تواند به بهبود عملکرد الگوریتم‌های یادگیری عمیق در تشخیص بهتر ساقه متصل به میوه کمک کند. افزایش تعداد تصاویر پایگاه داده با تمرکز بر بهبود کیفیت نمایش ساقه متصل به میوه در تصاویر نیز می‌تواند بر عملکرد بهتر تشخیص ساقه منجر شود.

مشارکت نویسندگان

علی‌رضا سلیمانی‌پور: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن.

نتیجه‌گیری

چندین مدل تشخیص اشیاء مبتنی بر یادگیری عمیق شامل YOLO (دو نسخه ۵ و ۸) و RT-DETR برای تشخیص میوه خیار و ساقه متصل به آن از روی تصاویر گرفته‌شده در محیط واقعی گلخانه آموزش داده‌شده و ارزیابی شدند. پایگاه تصاویر مورد استفاده شامل ۳۰۰ تصویر گرفته‌شده در شرایط بدون نورپردازی و در اوقات مختلف روز بود. تصاویر مورد استفاده برای آموزش الگوریتم‌ها با تکنیک‌های مختلف به سه برابر افزایش داده شدند تا مدل حاصل با تنوع بیشتری از تصاویر آموزش داده شود. ارزیابی مدل‌های آموزش‌یافته نشان داد، مدل آموزش‌یافته با تکنیک یادگیری انتقالی روی مدل YOLOv8n از سایر مدل‌های مورد نظر عملکرد بهتری در تشخیص میوه و ساقه دارد. به‌طور مشخص، اختلاف عملکرد مدل YOLOv8 با مقیاس‌های مختلف چندان زیاد نبود، ولی نسبت به مدل‌های دیگر برتری داشتند. این برتری در عملکرد را می‌توان به معماری کارآمد، قابلیت‌های استخراج ویژگی قوی و سازگاری با مجموعه داده‌های محدود نسبت داد. نکته دیگر تفاوت عملکرد مدل‌ها

References

- Alaudeen, K. M., Selvarajan, S., Manoharan, H., & Jhaveri, R. H. (2024). Intelligent robotics harvesting system process for fruits grasping prediction. *Scientific Reports*, 14(1), 2820. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52743-8>
- Bac, C. W., Van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2014). Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*, 31(6), 888-911. <https://doi.org/10.1002/rob.21525>
- Bharad, N. B., & Khanpara, B. M. (2024). Agricultural fruit harvesting robot: An overview of digital agriculture.

- Plant Archives*, 24, 154-160. <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2024.v24.SP-GABELS.023>
4. Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection. *ArXiv Preprint ArXiv:2004.10934*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934>
5. Droukas, L., Doulgeri, Z., Tsakiridis, N. L., Triantafyllou, D., Kleitsiotis, I., Mariolis, I., ..., & Bochtis, D. (2023). A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(2), 21. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01793-z>
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). FAOSTAT: 2021 food and agriculture data [Online database]. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
7. Fatehi, F., Bagherpour, H., & Amiri Parian, J. (2025). Investigating the Potential of the Innovative YOLOv8s Model for Detecting Bloomed Damask Roses in Open Fields. *Journal of Agricultural Machinery*, (in Press). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88066.1249>
8. Fernandez, R., Montes, H., Surdilovic, J., Surdilovic, D., Gonzalez-De-Santos, P., & Armada, M. (2018). Automatic detection of field-grown cucumbers for robotic harvesting. *IEEE Access*, 6, 35512-35527. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851376>
9. Jin, T., & Han, X. (2024). Robotic arms in precision agriculture: A comprehensive review of the technologies, applications, challenges, and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 221, 108938. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108938>
10. Hussain, M. (2024). Sustainable machine vision for industry 4.0: a comprehensive review of convolutional neural networks and hardware accelerators in computer vision. *AI*, 5(3), 1324-1356. <https://doi.org/10.3390/ai5030064>
11. Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). YOLO by Ultralytics (Version 8.0.0) [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7867787>
12. Kootstra, G., Wang, X., Blok, P. M., Hemming, J., & Van Henten, E. (2021). Selective harvesting robotics: current research, trends, and future directions. *Current Robotics Reports*, 2, 95-104. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00034-1>
13. Kuznetsova, A., Maleva, T., & Soloviev, V. (2020). Using YOLOv3 algorithm with pre-and post-processing for apple detection in fruit-harvesting robot. *Agronomy*, 10(7), 1016. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071016>
14. Liu, G., Nouaze, J. C., Touko Mbouembe, P. L., & Kim, J. H. (2020). YOLO-tomato: A robust algorithm for tomato detection based on YOLOv3. *Sensors*, 20(7), 2145. <https://doi.org/10.3390/s20072145>
15. Mahani, S. F. N., & Karami, A. (2023). Maize tassel detection and counting using deep learning techniques. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 175-194. <https://doi.org/10.22067/jam.2022.72477.1062>
16. Mallick, P. K. (2022). Evaluating potential importance of cucumber (*Cucumis sativus* L.-Cucurbitaceae): a brief review. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 10(1), 12-15. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v10i1.44152>
17. Mehta, S. S., MacKunis, W., & Burks, T. F. (2016). Robust visual servo control in the presence of fruit motion for robotic citrus harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 362-375. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.007>
18. Moseley, K. R., House, L., & Roka, F. M. (2012). Adoption of mechanical harvesting for sweet orange trees in Florida: addressing grower concerns on long-term impacts. *International Food and Agribusiness Management Review*, 15(1030-2016-82762), 83-98. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.127108>
19. Park, Y., Seol, J., Pak, J., Jo, Y., Kim, C., & Son, H. I. (2023). Human-centered approach for an efficient cucumber harvesting robot system: Harvest ordering, visual servoing, and end-effector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108116. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108116>
20. Salim, N. O., & Mohammed, A. K. (2024). Comparative Analysis of Classical Machine Learning and Deep Learning Methods for Fruit Image Recognition and Classification. *Traitement du Signal*, 41(3). <https://doi.org/10.18280/ts.410322>
21. Shewfelt, R. L., & Prussia, S. E. (2022). Challenges in handling fresh fruits and vegetables. In *Postharvest Handling* (pp. 167-186). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822845-6.00006-3>
22. Sola-Guirado, R. R., Castro-Garcia, S., Blanco-Roldán, G. L., Gil-Ribes, J. A., & González-Sánchez, E. J. (2020). Performance evaluation of lateral canopy shakers with catch frame for continuous harvesting of oranges for juice industry. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(3), 88-93. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201303.4998>
23. Tajane, K., Khutale, P., Kore, A., Khairmode, A., & Girawale, S. (2024). Object Detection: A comprehensive study of famous Deep Learning approaches with case study of Helmet Detection dataset. In *2024 2nd International Conference on Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing (AKGEC)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/akgec62572.2024.10868812>
24. Wu, D., Lv, S., Jiang, M., & Song, H. (2020). Using channel pruning-based YOLO v4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105742>
25. Xiao, F., Wang, H., Li, Y., Cao, Y., Lv, X., & Xu, G. (2023). Object detection and recognition techniques based

- on digital image processing and traditional machine learning for fruit and vegetable harvesting robots: An overview and review. *Agronomy*, 13(3), 639. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030639>
26. Yue, X., Qi, K., Na, X., Zhang, Y., Liu, Y., & Liu, C. (2023). Improved YOLOv8-Seg Network for Instance Segmentation of Healthy and Diseased Tomato Plants in the Growth Stage. *Agriculture*, 13(8), 1643. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081643>
27. Zhang, Z., Igathinathane, C., Li, J., Cen, H., Lu, Y., & Flores, P. (2020). Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105606. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105606>
28. Zhou, H., Wang, X., Au, W., Kang, H., & Chen, C. (2022). Intelligent robots for fruit harvesting: Recent developments and future challenges. *Precision Agriculture*, 23(5), 1856-1907. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09913-3>

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 317-334

Multivariate Optimization of Moldboard Plow Tillage Quality Using Response Surface Methodology

M. Akbari¹, I. Hazbawi^{1*}, M. Jafarian²

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- North Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shirvan, Iran

(*- Corresponding Author Email: hazbawi.i@lu.ac.ir)

Received: 16 March 2025

Revised: 19 May 2025

Accepted: 01 June 2025

Available Online: 14 July 2025

How to cite this article:

Akbari, M., Hazbawi, I., & Jafarian, M. (2026). Multivariate Optimization of Moldboard Plow Tillage Quality Using Response Surface Methodology. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 317-334. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92680.1357>

Introduction

Tillage of rainfed lands is performed using moldboard plows to a depth of 30 cm. Due to the influence of soil surface roughness and crop residues on moisture absorption and erosion reduction, investigation of the relationship between tillage implements' performance and the aforementioned factors is essential. Therefore, considering the importance of preserving precipitation and preventing soil erosion, this study was conducted to investigate and optimize the effects of forward speed and tillage depth on soil surface roughness and the percentage of buried crop residue using response surface methodology.

Materials and Methods

This research was conducted in the Khomeyn region, Iran during the 2023-2024 growing season, utilizing a moldboard plow and an MF399 tractor. The objective was to investigate the effects of plowing depth and speed on soil surface roughness and the burial of plant residues. Soil surface roughness was measured using a pin meter, while the percentage of burial of plant residues was determined using image processing techniques and ImageJ software. Wheat straw residue with an initial moisture content of 8-9% was uniformly distributed at a rate of 100 g m⁻² along the designated paths. Images were captured before and after the tillage operation for subsequent processing and analysis.

To optimize the process, a central composite design (CCD) with three levels of speed (5, 7.5, and 10 km h⁻¹) and three levels of tillage depth (17.5, 22.5, and 27.5 cm) was employed. The objective was to determine the optimal factor levels for maximizing surface roughness and minimizing residue burial. Data were analyzed using a second-order model and Design Expert V11 software. The best model was selected based on statistical criteria.

Results and Discussion

Modeling soil surface roughness and crop residue incorporation revealed that the second-order regression model, with high coefficients of determination ($R^2 = 0.983$ and 0.96), was capable of accurately predicting these indices. The interaction effects of tillage speed and depth were significant ($P < 0.01$). In this study, the effect of tillage depth on soil surface roughness was greater than that of tractor speed. The regression model indicated that tillage depth plays a primary role in the amount of crop residue incorporation. Moldboard plowing demonstrated that increasing depth, particularly at high speeds, leads to increased roughness and residue incorporation, whereas increasing speed, especially at shallow depths, reduces roughness and increases incorporation. The maximum roughness was observed at the deepest tillage depth and lowest speed, while the shallowest depth and highest speed resulted in the minimum roughness.



Authors retain the copyright. 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.2025.92680.1357>

Tillage depth and speed influence soil surface roughness and bulk density. Higher speeds decrease furrow depth and ridge height; thus, lower speeds are recommended for creating greater roughness. The highest residue incorporation (85%) was achieved at a depth of 27.5 cm and speeds of 5 and 10 km h⁻¹, while the lowest (70%) occurred at a depth of 17.5 cm and a speed of 5 km h⁻¹. Depth was more influential than speed, and nonlinear models are necessary for more accurate modeling. The developed model, with a desirability of 81%, provides the maximum roughness (10.96 cm) and minimum residue incorporation (69.34%) for a moldboard plow at a speed of 5 km h⁻¹ and a tillage depth of 17.5 cm.

Conclusion

This study investigated the effects of conventional tillage methods in dry land areas on soil surface roughness and the extent of crop residue burial. The results indicate that increasing tillage depth leads to an increase in both indices, while reducing tractor speed increases roughness and decreases residue burial. The optimization model revealed that at a speed of 5 km h⁻¹ and a depth of 17.5 cm, minimum roughness and maximum residue incorporation can be achieved. To improve regional tillage practices, it is advised to conduct further research into the long-term effects of different tillage systems. This effort will ensure a well-informed selection and implementation of the most effective methods.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the University of Lorestan.

Keywords: Burial of plant residues, Forward speed, Soil surface roughness, Tillage depth

بهینه‌سازی چندمتغیره کیفیت خاک‌ورزی گاوآهن برگردان‌دار با استفاده از روش سطح پاسخ

محمد اکبری^۱، عیسی حزباوی^{۱*}، مصطفی جعفریان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

چکیده

حفظ بقایا و ناهمواری خاک در اراضی دیم، فرسایش را تقلیل داده و خاک‌ورزی حفاظتی با بهبود رشد گیاه، در پایداری کشاورزی نقش اساسی دارد. با توجه به اهمیت این روش‌ها و کمبود پژوهش‌های دقیق، مطالعه حاضر به‌منظور انتخاب بهینه‌ترین روش خاک‌ورزی حفاظتی انجام پذیرفت. این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی کیفیت خاک‌ورزی (ناهمواری سطح و دفن بقایا) با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار انجام شد. هدف، تعیین بهترین سرعت و عمق شخم گاوآهن برای دستیابی به کیفیت مطلوب خاک‌ورزی است. به‌منظور تعیین شرایط بهینه، تأثیر سرعت پیشروی تراکتور (۵، ۷/۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و عمق شخم (۱۷/۵، ۲۲/۵ و ۲۷/۵ سانتی‌متر) با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی شد. به‌منظور سنجش ناهمواری سطح خاک و تعیین درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، به‌ترتیب از دستگاه پین‌متر و روش پردازش تصویر استفاده شد. نتایج حاکی از تأثیر معنادار کلیه فاکتورهای مستقل بر هر دو شاخص بود ($P < 0.01$). نتایج نشان داد که افزایش عمق شخم منجر به افزایش ۳۶/۷۸ درصدی در میزان ناهمواری سطح خاک گردید، در حالی که کاهش عمق شخم با افت ۱۳/۷۴ درصدی در مدفون شدن بقایای گیاهی همراه بود. همچنین، کاهش سرعت پیشروی، کاهش ۷/۷۸ درصدی در مدفون شدن بقایا و افزایش ۳۲/۸۲ درصدی در ناهمواری سطح خاک را نشان داد. در شرایط بهینه، مقادیر ۱۰/۹۶ سانتی‌متر برای ناهمواری سطح خاک و ۶۹/۳۴ درصد برای مدفون شدن بقایای گیاهی مشاهده شد. این نتایج در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت و عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: سرعت پیشروی، عمق شخم، مدفون شدن بقایای گیاهی، ناهمواری سطح خاک

مقدمه

دارد (Liu et al., 2021)، هدف از خاک‌ورزی، بهبود محیط خاک برای استقرار و نمو گیاه، کاهش رواناب و ارتقای خواص فیزیکی آن است (Shevchenko et al., 2024). پوشش گیاهی مناسب و بقایای آلی کافی نیز با کاهش رواناب و افزایش نفوذ آب، ضمن بهبود شرایط خاک و آزادسازی مواد مغذی، از فرسایش جلوگیری می‌کنند (Li, Shen, Wang, Wang, & Gao, 2021). مطالعات مزرعه‌ای نشان داده‌اند که کاهش دور آبیاری با کاهش رواناب و افزایش بهره‌وری محصول همراه است (Langer, 2021).

بقایای محصولات سطحی نقش مهمی در عملکردهای مختلف زراعی، از جمله حفظ آب خاک، کنترل فرسایش و سرکوب علف‌های هرز ایفا می‌کنند (Ranaivoson et al., 2017). در کشاورزی حفاظتی، ادوات خاک‌ورزی مختلف، تأثیرات متفاوتی بر میزان دفن بقایای گیاهی و میزان اختلال خاک دارند. نوع دیسک و عمق کار، جابه‌جایی خاک و اختلاط بقایا را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌طوری‌که افزایش عمق کار منجر به اختلال بیشتر خاک و اختلاط بیشتر بقایا

فعالیت‌های انسانی در کنار عوامل طبیعی، خاک را دستخوش تغییر و فرسایش می‌کند، به طوری که مدیریت فرسایش خاک‌های زراعی به شاخصی کلیدی در پایداری کشاورزی تبدیل شده است (Sharafi, Mohammadi Ghaleni, & Dragovich, 2023). ناهموارسازی سطح خاک با ادوات خاک‌ورزی، راهکاری مرسوم برای کاهش فرسایش و افزایش جذب رطوبت در اراضی آیش و بهبود ساختمان خاک است (Ma et al., 2022). از آنجا که وضعیت خاک پس از خاک‌ورزی تأثیر مستقیمی بر عملکرد و کیفیت محصولات

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان شمالی، شیروان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: hazbawi.i@lu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92680.1357>

می‌شود (Zeng, Thoms, Chen, & Ma, 2021). در راستای کشاورزی پایدار، حفظ کیفیت خاک و بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق انتخاب و بهره‌برداری از ادوات خاک‌ورزی با کمترین اثر مخرب، از اولویت‌های اساسی مدیریت خاک به‌شمار می‌رود (Orzech, Wanic, & Zaluski, 2021). به‌منظور درک بهتر اندرکنش ادوات خاک‌ورزی با خاک، انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای تحت شرایط واقعی ضروری است، اما پیچیدگی عوامل مؤثر، این مهم را دشوار می‌سازد. لذا، آزمایش‌های کنترل‌شده در مقیاس کوچک، راهکاری مؤثر برای تسهیل این فرآیند پیچیده به‌شمار می‌رود (Fechete-Tutunaru, Gaspar, & Gyorgy, 2019).

در پژوهشی، رابطه بین سرعت و عمق خاک‌ورزی با جرم مخصوص ظاهری خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش سرعت خاک‌ورزی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شده و برعکس، افزایش عمق خاک‌ورزی منجر به افزایش این ویژگی می‌شود (Mahmoudi, Jalali, Valizadeh, & Skandari, 2015). در تحقیقی، با بهره‌گیری از روش‌های زمین‌آماری، تغییرات مکانی فشردگی خاک پس از عملیات خاک‌ورزی به دقت بررسی شد. هدف اصلی این مطالعه، یافتن بهترین مدل برای تخمین دقیق فشردگی خاک در نقاط مختلف زمین بود (Bahrpour, Rouhani, 2018). (Abbaspour-Fard, Zarifneshat, & Aghkhani, 2018). محققان با استفاده از تصاویر اسکن‌شده باکیفیت از سطح خاک پس از عملیات خاک‌ورزی، موفق به استخراج دقیق ویژگی‌های کلوخه‌ها مانند موقعیت و رمز آن‌ها شدند. این کار با محاسبه شاخص‌های مختلف تصویر انجام شده است (Chimi-Chiadjeu, Le Hegarat-2014). (Masclé, Vannier, Taconet, & Dusseaux, 2014).

در تحقیقی، تاثیر سرعت پیشروی تیغه پنجه‌غازی (۵، ۷/۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) بر مشخصات پروفیل خاک پس از خاک‌ورزی با استفاده از مدل شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن بود که افزایش سرعت، با پخش گسترده‌تر خاک، کاهش ارتفاع پشته‌ها و افزایش پرتاب خاک، عمق شیار و عرض ناحیه به‌هم‌خورده همراه است. شکل مثلث متساوی‌الساقین پروفیل خاک در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت مشاهده شد (Liu, Chen, & Kushwaha, 2010). نتایج یک مطالعه منطقه‌ای در شمال غرب ایران حاکی از آن است که گاواهن برگردان‌دار (۵۷ سانتی‌متر) در مقایسه با گاواهن چیزل (۲۰ سانتی‌متر) و روش کم‌خاک‌ورزی (۱۵ سانتی‌متر)، بیشترین میزان جابه‌جایی خاک را موجب می‌شود (Kouselou et al., 2018). پیچیدگی اندرکنش عوامل محیطی و مدیریتی در مزرعه و دشواری تعمیم نتایج مقیاس کوچک، در کنار نیاز به تعادل اهداف خاک‌ورزی و محدودیت‌های به‌کارگیری روش‌های حفاظتی، چالش‌های اساسی در این حوزه محسوب می‌شوند. این موانع، ضرورت یافتن راهکارهای بهینه و کارآمد در عملیات خاک‌ورزی را برجسته

می‌سازند. روش سطح پاسخ به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات خاک‌ورزی جهت بهینه‌سازی و مدل‌سازی پارامترهای کلیدی مختلف از جمله نیروی کشش، عرض شکست و کارایی انرژی سیستم‌های تراکتور-ادوات به‌کار رفته و نتایج پیش‌بینی‌شده تطابق مطلوبی با داده‌های تجربی نشان داده‌اند. این روش برای ارزیابی شیوه‌های مدیریتی جهت کنترل فرسایش خاک استفاده شده است (Shirazi, Khademalrasoul, & Safieddin Ardebili, 2020). در عملیات خاک‌ورزی، روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رابطه بین ویژگی‌های خاک و نیروی کشش ادوات خاک‌ورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Rahmatian, Nematollahi, Yeganeh, & Sharifi, 2021). این روش همچنین برای بهینه‌سازی طراحی و شرایط کاری یک تیغه خاک‌ورزی جدید به‌کار رفته و منجر به بهبود کارایی تراکتور و کاهش مصرف سوخت شده است (Mohammadi, Karparvarfard, Kamgar, & Rahmatian, 2020).

شخم اراضی دیم با گاواهن‌های برگردان‌دار تا عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام می‌شود. به دلیل تاثیر ناهمواری خاک و بقایای گیاهی بر جذب رطوبت و کاهش فرسایش، بررسی رابطه بین دستگاه خاک‌ورز و عوامل مذکور ضروری است، اما تاکنون تحقیق جامعی در این زمینه صورت نگرفته است. این تحقیق با هدف بررسی و بهینه‌سازی تاثیر سرعت پیشروی و عمق شخم بر ناهمواری سطح خاک و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی به روش سطح پاسخ، با توجه به اهمیت حفظ نزولات جوی و جلوگیری از فرسایش خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در عملیات خاک‌ورزی به‌وسیله گاواهن برگردان‌دار (۳ خیش به عرض ۹۰ سانتی‌متر) و تراکتور MF399 در شهر خمین (استان مرکزی) با ارتفاع ۱۸۱۵ متر از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۶۳ دقیقه عرض شمالی اجرا گردید.

تعیین کمیت ناهمواری سطح خاک

نقش تعیین‌کننده ناهمواری سطح خاک پس از عملیات خاک‌ورزی در جذب رطوبت و کنترل فرسایش، به‌ویژه در دوره آیش، لزوم اندازه‌گیری دقیق آن را ایجاب می‌کند. بدین منظور، در این مطالعه از پین‌متر معرفی‌شده توسط زینلی و همکاران (Zeinli, Mousavi, Jafarian, & Bayati, 2012) (شکل ۱) به‌عنوان ابزاری ساده و کم‌هزینه بهره گرفته شده است (Thomsen, Baartman, 2015). (Barneveld, Starkloff, & Stolte, 2015). در این آزمایش، از یک سازه فلزی عمودی با طول ۲ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، مجهز به ۴۰ سوراخ با فاصله ۵ سانتی‌متر، استفاده شد. این سازه بر روی سطح

$$BPR = 100 \times \frac{RS_1 - RS_2}{RS_1} \quad (2)$$

در این رابطه، BPR^2 درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، RS_1 سطح پوشیده‌شده از بقایا قبل از عبور دستگاه (پیکسل) و RS_2 سطح پوشیده‌شده از بقایا پس از عبور دستگاه (پیکسل) است.

طراحی آزمایش و تحلیل آماری

به‌منظور بهینه‌سازی فرآیندهایی با پاسخ‌های چندگانه، از طرح مرکب مرکزی (CCD^3) به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و بررسی اثر متغیرها استفاده می‌شود. این آزمایش شامل سه سطح سرعت پیشروی تراکتور (۵، ۷/۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و سه عمق شخم (۱۷/۵، ۲۲/۵ و ۲۷/۵ سانتی‌متر) بود. انتخاب سطوح مورد نظر بر مبنای بررسی جامع منابع علمی و رویه‌های متداول در منطقه انجام شده است. به‌منظور بهبود برازش مدل و تخمین دقیق‌تر خطای آزمایش، نقطه مرکزی پنج مرتبه تکرار گردید. برای بقیه تیمارها میانگین سه تکرار لحاظ شده است (جدول ۱). طرح CCD به‌صورت صاف^۴ اجرا شد. مقادیر سرعت پیشروی و عمق شخم، با توجه به عرف منطقه، انتخاب شدند.

هدف از این پژوهش، تعیین سطوح بهینه فاکتورها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM^5) و نرم‌افزار Design Expert v11 بود. مقادیر بهینه سرعت پیشروی تراکتور و عمق شخم به گونه‌ای تعیین شد که حداکثر ناهمواری سطح خاک و حداقل مدفون شدن بقایای گیاهی حاصل شود. تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل درجه دوم کامل و اثرات متقابل بین فاکتورها انجام شد (رابطه ۳). پس از ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف، بهترین مدل بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مانند مقادیر عدم برازش، P و R^2)، برگزیده شد (Hazbawi & Safaeinezhad, 2023).

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i V_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} V_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} V_i V_j \quad (3)$$

در این رابطه، Y متغیر پاسخ (مقدار مدفون شدن بقایا و مقدار ناهمواری سطح خاک)، b_0 مقدار عرض از مبدأ، b_i ($i = 1, 2, \dots, k$) ضریب مدل مرتبه اول، b_{ij} اثر متقابل، و b_{ii} ضرایب درجه دوم V_i را نشان می‌دهند. V_i و V_j متغیرهای ورودی هستند که بر متغیر پاسخ تأثیر می‌گذارند.

خاک قرار گرفت و با توجه به شیب زمین در هر نقطه، تنظیم گردید. اندازه‌گیری شیب زمین با تراز زاویه‌سنج و تعیین ارتفاع پین‌ها نسبت به سطح مبنا انجام شد. شاخص ناهمواری سطح خاک با محاسبه انحراف معیار داده‌های ارتفاعی (رابطه ۱) در نرم‌افزار اکسل محاسبه و به‌عنوان معیاری کمی برای ناهمواری خاک مورد استفاده قرار گرفت (Thomsen et al., 2015). قطعات آزمایشی با ابعاد 4×140 متر در جهت طولی زمین برای هر تیمار تعیین گردید. پنج قرائت در نقاطی با فاصله ۲۰ متر انجام و میانگین آن‌ها به‌عنوان یک واحد تکرار در نظر گرفته شد.

$$SSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n}} \quad (1)$$

در این رابطه، SSR^1 معرف شاخص ناهمواری سطح خاک، h_i معرف مقدار ارتفاع میله (پین) i ام نسبت به سطح مبنا (میلی‌متر)، $\bar{h}$ معرف میانگین مقادیر h_i و n تعداد میله‌های به‌کار گرفته‌شده در هر قرائت است.

تعیین میزان مدفون شدن بقایای گیاهی

با توجه به محدودیت‌های روش سنتی چارچوب‌های یک مترمربعی در تعیین دقیق درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، در این مطالعه از تکنیک تصویربرداری و پردازش تصویر به‌عنوان روشی نوین و دقیق‌تر برای نمونه‌برداری و تحلیل استفاده شد. کاه گندم با رطوبت اولیه ۸ تا ۹ درصد به میزان ۱۰۰ گرم بر مترمربع، پس از مشخص شدن مسیر حرکت دستگاه خاک‌ورزی، به‌صورت یکنواخت در مسیرهای تعیین‌شده پخش شد. (Akbari, Dahmardeh, Morshedi, Ghanbari, & Khorramdel, 2019).

به‌منظور ثبت تغییرات سطح خاک، قبل و بعد از عبور دستگاه، از دوربین دیجیتال مستقر در موقعیتی ثابت، تصویربرداری انجام شد (شکل ۲). با استفاده از نرم‌افزار ImageJ v1.52 تصاویر پردازش و درصد مدفون شدن بقایا با تعیین مساحت پوشش گیاهی (قبل و بعد از عبور دستگاه) در قالب مربعی فرضی ($a \times a$) و بر اساس رابطه (۲) محاسبه گردید. به‌منظور کاهش اثر حاشیه‌های تصویر، ابعاد قاب مجازی معادل ۸۰ درصد عرض کاری دستگاه تعیین گردید (Vidal-Vazquez, Miranda, & Paz Gonzalez, 2007). روش مورد استفاده برای تعیین میزان مدفون شدن بقایای گیاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. این روش شامل تصویربرداری توسط دوربین (A)، تراکتور و ادوات خاک‌ورزی (B)، مسیر حرکت (E) و با استفاده از یک قاب مشخص (F) است. تصاویر نمونه قبل (C) و بعد (D) از انجام عملیات خاک‌ورزی در این شکل نشان داده شده‌اند.

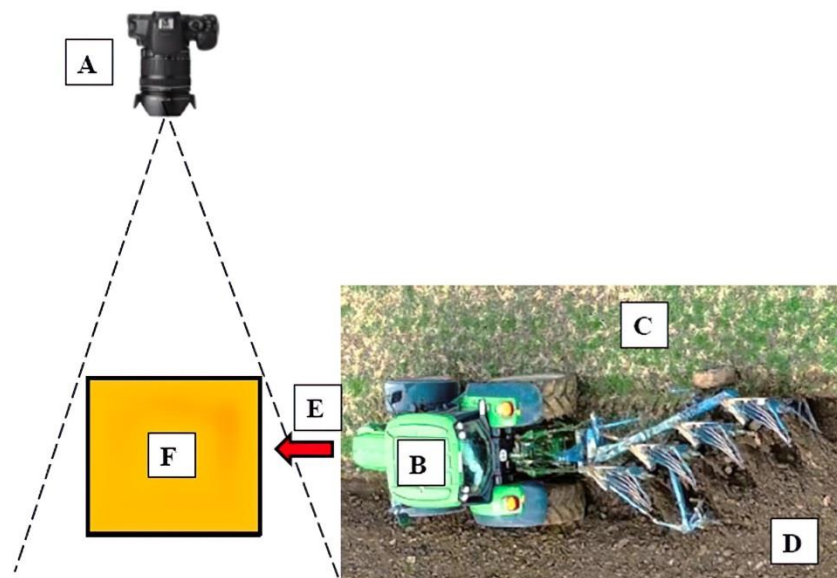
2- Burial of Plant Residues
3- Central Composite Designs
4- Face centered
5- Response surface method

1- Soil Surface Roughness



شکل ۱- اندازه‌گیری ناهمواری سطح خاک با استفاده از دستگاه پین متر ساخته شده

Fig.1. Soil surface roughness measurement procedure using a custom-built pin meter



شکل ۲- نحوه قرارگیری دوربین برای محاسبه درصد مدفون شدن بقایای گیاهی: (A) دوربین، (B) تراکتور و ادوات خاک‌ورزی، (C) قبل از خاک‌ورزی، (D) بعد از خاک‌ورزی، (E) مسیر حرکت و (F) قاب مشخص

Fig.2. Camera positioning for calculating the percentage of the buried plant residue: (A) Camera, (B) Tractor and tillage equipment, (C) Before tillage, (D) After tillage, (E) Path of movement, and (F) Specific frame

نتایج و بحث

ارزیابی و مدل‌سازی میزان ناهمواری سطح خاک

ناهمواری‌های سطح خاک، عبارات خطی، درجه دوم و اثرات دوگانه متغیرهای مستقل سرعت پیشروی تراکتور و عمق شخم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($P < 0.01$). به‌منظور دستیابی به برازش مطلوب در مدل رگرسیونی، ضریب تبیین (R^2) باید حداقل ۰/۸ باشد (Danbaba et al., 2014). در مطالعه حاضر، مدل پیشنهادی سطح پاسخ برای ناهمواری‌های سطح خاک، از نوع درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۸۳ به‌دست آمد (جدول ۳). این یافته‌ها نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی ناهمواری‌های سطح خاک است.

با توجه به نتایج جدول ۲، مدل درجه دوم برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی انتخاب شد. نتایج تحلیل واریانس مدل به روش سطح پاسخ در جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی درجه دوم از لحاظ آماری معنی‌دار ($P < 0.01$) و فاقد برازش نامناسب است. لذا، این مدل قادر به پیش‌بینی تاثیر متغیرهای مستقل بر ناهمواری سطح خاک می‌باشد. این مدل، ناهمواری‌های سطح خاک را با ۵ عبارت (درجه آزادی) توانسته شبیه‌سازی کند. در مدل شبیه‌سازی‌شده

جدول ۱- مقادیر تیمارها براساس طرح CCD

Table 1- Treatment values based on CCD design

عمق شخم Ploughing depth (cm)	سرعت تراکتور Tractor speed (km h ⁻¹)	مقدار ناهمواری سطح خاک Soil surface roughness	مدفون شدن بقایای گیاهی Buried plant residues (%)
17.5	5	11.0±0.98	70.0±3.3
17.5	7.5	8.1±0.69	72.0±3.8
17.5	10	7.0±0.42	80.0±4.2
22.5	5	10.8±0.97	70.0±3.6
22.5	7.5	8.2	72.8
22.5	7.5	8.0	69.2
22.5	7.5	8.5	72.0
22.5	7.5	9.0	69.5
22.5	7.5	8.7	72.7
22.5	10	8.0±0.73	79.0±3.9
27.5	5	13.0±0.95	85.0±4.3
27.5	7.5	11.5±1.01	82.5±3.7
27.5	10	11.2±1.05	85.0±4.6

جدول ۲- معیارهای آماری برای انتخاب مدل برازش در روش سطح پاسخ برای ناهمواری‌های سطح خاک

Table 2- Statistical criteria for model selection in response surface methodology for soil surface roughness

منبع Source	مقدار P متوالی Sequential p-value	مقدار P عدم برازش Lack of Fit p-value	ضریب تعیین تعدیل‌شده Adjusted R ²	ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده Predicted R ²
خطی Linear	0.002	0.016	0.644	0.391
تعاملی 2FI	0.334	0.015	0.646	-0.219
درجه دوم Quadratic	<0.0001	0.948	0.970	0.965
درجه سوم Cubic	0.882	0.739	0.961	0.918

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سرعت و عمق شخم بر ناهمواری‌های سطح خاک

Table 3- ANOVA of the effect of tillage speed and depth on soil surface roughness

منبع تغییر Source	جمع مربعات SS	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS	مقدار F F-value	p-value
مدل رگرسیون Model	38.67	5	7.73	79.47	< 0.0001
عمق شخم (D) Depth	15.36	1	15.38	157.82	< 0.0001
سرعت شخم (S) Speed	12.33	1	12.33	126.66	< 0.0001
S×D	1.21	1	1.21	12.43	0.0096
D ²	4.23	1	4.23	43.49	0.0003
S ²	1.94	1	1.94	19.93	0.0029
مانده Residual	0.68	7	0.09		
عدم برازش Lack of fit	0.05	3	0.02	0.11	0.948
خطای خالص Pure error	0.63	4	0.15		
کل تصحیح‌شده Cor Total	39.35	12			

R² = 0.983

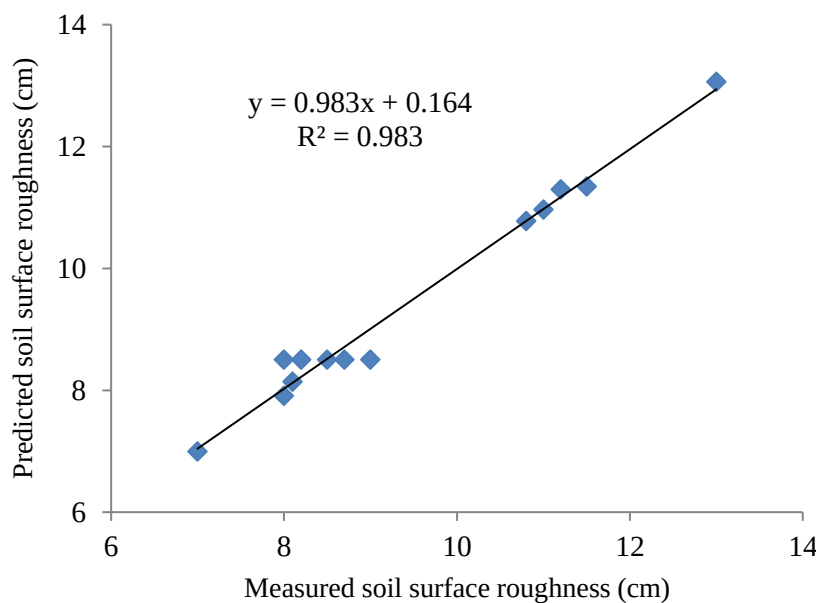
شکل ۳، نمایشگر تطابق بین داده‌های مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل منحنی سطح پاسخ است. ضریب تعیین بالای مدل ($R^2=0.983$) نشان‌دهنده توانایی بالای آن در پیش‌بینی ناهمواری سطح خاک می‌باشد. نزدیکی نقاط داده‌شده به خط نیمساز، گویای دقت بالای مدل است.

بر اساس نتایج جدول ۴، مدل چند جمله‌ای درجه دوم، پس از حذف عوامل غیرمرتبط، نشان می‌دهد که عمق شخم، به‌عنوان یک عامل مستقل خطی، در مقایسه با سرعت پیشروی تراکتور، تأثیر بیشتری بر ناهمواری سطح خاک دارد. عمق شخم و سرعت پیشروی بر ناهمواری‌های سطح خاک، به‌ترتیب اثر مستقیم و معکوس دارند.

جدول ۴- ضرایب مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو برای پیش‌بینی مقدار ناهمواری سطح خاک

Table 4- Coefficients of the second-degree polynomial regression model for predicting soil surface roughness

b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
8.5 ± 0.13	1.6 ± 0.13	$-1.43 \pm 0.0.12$	0.55 ± 0.16	1.24 ± 0.19	0.84 ± 0.18



شکل ۳- مطابقت بین مقادیر تخمینی و تجربی برای مقدار ناهمواری سطح خاک

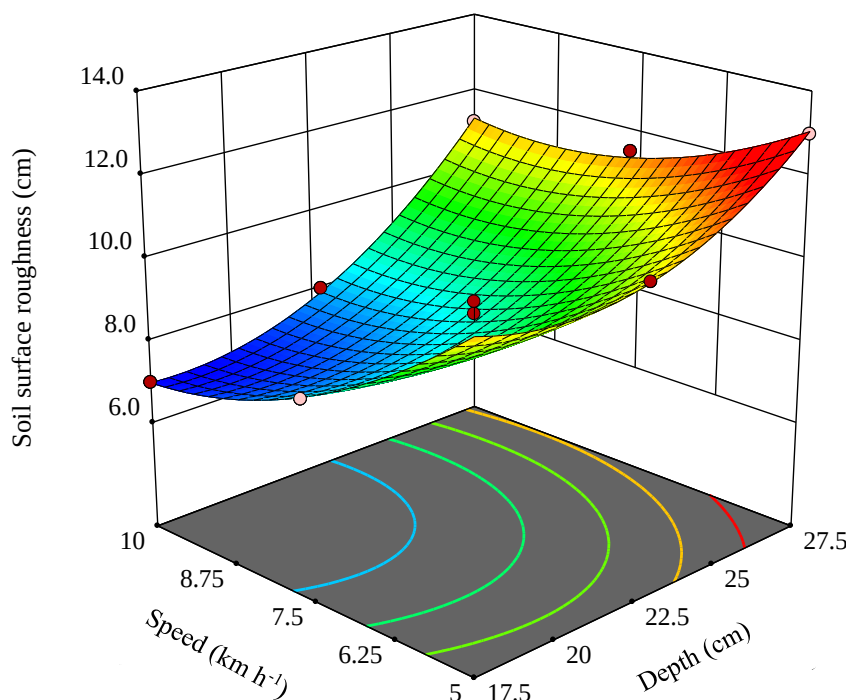
Fig.3. Agreement between estimated and experimental values for soil surface roughness

عمق شخم، به تشدید ناهمواری‌ها می‌انجامد (Mohammadi, Maleki, & Khodaei, 2022). با این حال، در شرایط استفاده از گاواهن برگردان‌دار، افزایش سرعت پیشروی (از ۵ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت) می‌تواند میزان ناهمواری سطح خاک را کاهش دهد، به‌ویژه در سطوح پایین عمق شخم (۱۷/۵ سانتی‌متر). در سرعت‌های بالای پیشروی تراکتور، افزایش عمق شخم، تشدید ناهمواری سطح خاک را در پی دارد. این امر ناشی از کاهش زمان لازم برای ته‌نشینی و تسطیح خاک در سرعت‌های بالاست. همچنین، افزایش نیروی اصطکاک بین تیغه و خاک با افزایش عمق شخم، به تشدید ناهمواری‌ها می‌انجامد. با این وجود، در شرایط استفاده از گاواهن برگردان‌دار، افزایش سرعت پیشروی می‌تواند به کاهش ناهمواری سطح خاک منجر شود. این تأثیر به‌ویژه در سطوح پایین عمق شخم

شکل ۴ چگونگی تأثیر عمق شخم و سرعت حرکت تراکتور را بر ناهمواری سطح خاک در زمان استفاده از گاواهن برگردان نشان می‌دهد. با افزایش عمق شخم از ۱۷/۵ به ۲۷/۵ سانتی‌متر، میزان ناهمواری سطح خاک بیشتر شده و این موضوع به‌ویژه در سرعت بالا (۱۰ کیلومتر بر ساعت)، بارزتر است. دلیل این پدیده، افزایش حجم خاکی است که جابه‌جا می‌شود و این امر، احتمال ایجاد پشته‌ها و فرورفتگی‌های بیشتر را در سطح خاک بالا می‌برد. در سرعت‌های بالای پیشروی تراکتور، افزایش عمق شخم تأثیر به‌سزایی در تشدید ناهمواری سطح خاک دارد. این امر ناشی از کاهش زمان لازم برای ته‌نشینی و تسطیح خاک در سرعت‌های بالاست که منجر به برجسته‌تر شدن ناهمواری‌های ایجادشده توسط شخم می‌شود. علاوه بر این، افزایش نیروی اصطکاک بین تیغه شخم و خاک با افزایش

سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت رخ داده است، در حالی که کمترین ناهمواری (۷ سانتی‌متر) در عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۱۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده شده است. با توجه به معنی‌دار بودن اثر درجه دوم عمق شخم و سرعت پیشروی، انحناى سطح پاسخ قابل مشاهده است.

مشهودتر است و احتمالاً به دلیل برخورد سریع‌تر تیغه با خاک و برش یکنواخت‌تر آن در سرعت‌های بالا می‌باشد (Celik & Altikat, 2022; Mohammadi et al., 2022). با افزایش عمق شخم، تأثیر سرعت پیشروی بر کاهش ناهمواری خاک کاهش می‌یابد. این پدیده با افزایش حجم خاک جابه‌جاشده در اعماق بیشتر مرتبط است. بیشترین ناهمواری سطح خاک (۱۳ سانتی‌متر) در عمق شخم ۲۷/۵



شکل ۴- نمودار سه‌بعدی اثر سرعت و عمق شخم بر ناهمواری‌های سطح خاک

Fig.4. Three-dimensional plot of the effect of tillage speed and depth on soil surface roughness

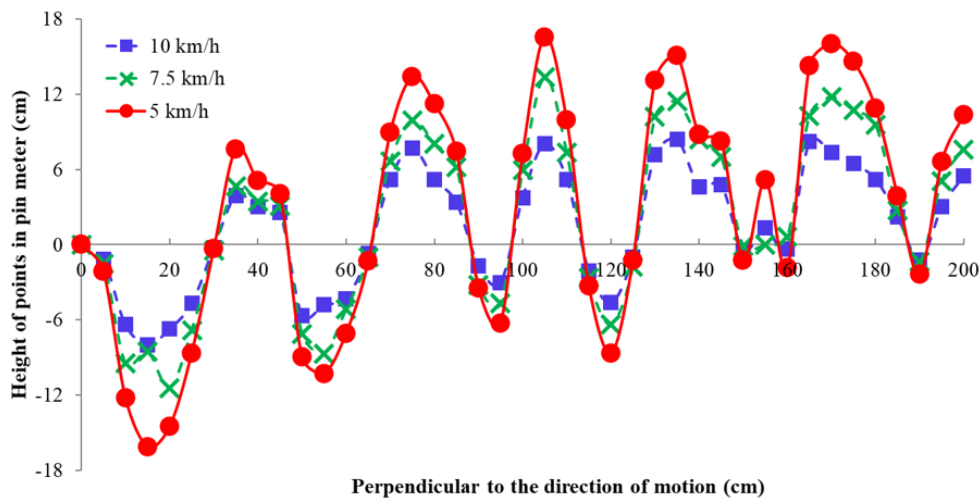
مطالعات متعددی به بررسی تأثیر سرعت و عمق شخم بر ناهمواری سطح خاک پرداخته‌اند. کاهش سرعت شخم‌زنی با افزایش ناهمواری سطح خاک همراه بوده است (Herodowicz-Mleczak, 2022). افزایش سرعت شخم می‌تواند منجر به کاهش زبری سطح خاک شود و بر جریان سطحی-زیرسطحی و فرسایش خاک تأثیر بگذارد (Ma et al., 2022). همچنین گزارش شده است که اثر کاهش سرعت بر افزایش ناهمواری می‌تواند توسط بقایای گیاهی تعدیل شود (Panachuki, Bertol, Alves, Oliveira, & Rodrigues, 2015). در مورد عمق شخم، افزایش آن عموماً با افزایش ناهمواری سطح خاک مرتبط دانسته شده است (Feng et al., 2024)، علاوه بر آن بیان شده است که این افزایش ناهمواری می‌تواند جریان زیرسطحی را بهبود بخشد (Ma et al., 2022). با این

مطالعات نشان داده است که تنظیم عمق شخم و سرعت پیشروی تراکتور تأثیر به‌سزایی در میزان ناهمواری سطح خاک دارد. بهینه‌سازی این دو پارامتر می‌تواند به افزایش جذب آب باران و بهبود مدیریت منابع آب منجر شود. همچنین، تحقیقات حاکی از آن است که افزایش سرعت خاک‌ورزی با کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک همراه است که احتمالاً به دلیل کاهش زمان کافی برای اعمال فشار تراکتور و ادوات بر خاک است (Mahmoudi et al., 2015). یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد، زیرا در سطوح حاکی با ناهمواری کمتر، چگالی ظاهری خاک پایین‌تر است. همچنین، نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد، چرا که تأثیر معنادار سرعت پیشروی و نوع خاک‌ورز بر چگالی و ناهمواری خاک گزارش شده است (Muhsin, 2017).

این داده‌ها که توسط دستگاه پین‌متر ثبت شده‌اند، نشان می‌دهند که با افزایش سرعت پیشروی، عمق جوی و ارتفاع پشته‌ها کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل کاهش زمان نفوذ تیغه در خاک در سرعت‌های بالاتر و یا به دلیل ضربه شدیدتر کلوخه‌ها باشد. در نتیجه، برای ایجاد ناهمواری بیشتر در خاک، سرعت‌های پایین‌تر تراکتور توصیه می‌شود.

حال، گزارش شده است که افزایش عمق شخم لزوماً منجر به افزایش زبری سطح خاک نمی‌شود، که نشان‌دهنده پیچیدگی این رابطه و احتمالاً تأثیر عوامل دیگر مانند نوع خاک و نوع ادوات خاک‌ورزی است (Zhou, Ren, Chen, & Zhang, 2023).

شکل ۵ نمایانگر تغییرات پروفیل خاک ناشی از شخم گاوآهن برگردان‌دار در سرعت‌های گوناگون است (در عمق ۱۷/۵ سانتی‌متر).



شکل ۵- منحنی‌های پروفیل خاک پس از شخم در سرعت‌های مختلف (عمق ۱۷/۵ سانتی‌متر)

Fig.5. Soil profile curves after tillage at various speeds (17.5 cm depth)

رگرسیونی درجه دوم با برازش مناسب ($P > 0.05$) و معناداری آماری ($P < 0.01$) جهت پیش‌بینی اثر متغیرهای مستقل بر شاخص مدفون شدن بقایای گیاهی به کار گرفته شد (جدول ۶). این مدل قادر به شبیه‌سازی شاخص مذکور با پنج درجه آزادی بود و اثرات خطی، درجه دوم و متقابل عمق شخم و سرعت پیشروی معنی‌دار بودند ($P < 0.01$). مدل رگرسیونی درجه دوم با ضریب تعیین 0.96 برای پیش‌بینی میزان دفن بقایای گیاهی، کارایی بالایی از خود نشان داد و به‌عنوان روشی دقیق برای برآورد این شاخص معرفی می‌شود (جدول ۶).

ارزیابی و مدل‌سازی میزان مدفون شدن بقایای گیاهی

به‌منظور توسعه کشاورزی پایدار و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، مدل‌سازی کمی عملیات خاک‌ورزی حائز اهمیت است. در این پژوهش، مدلی ریاضی درجه دوم برای پیش‌بینی میزان مدفون شدن بقایای گیاهی با استفاده از روش سطح پاسخ توسعه داده شد (جدول ۵). نتایج تحلیل واریانس نشان داد که مدل پیشنهادی، توانایی بالایی در توصیف این فرآیند پیچیده دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای بهینه‌سازی استفاده از بقایای گیاهی و بهبود کیفیت خاک مورد استفاده قرار گیرد. مدل

جدول ۵- معیارهای آماری برای انتخاب مدل برازش در روش سطح پاسخ برای مدفون شدن بقایای گیاهی

Table 5- Statistical criteria for model selection in response surface methodology for burial of plant residues

منبع	مقدار P متوالی	مقدار P عدم برازش	ضریب تعیین تعدیل‌شده	ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده
Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²
خطی	0.034	0.017	0.390	-0.051
Linear				
تعاملی	0.313	0.016	0.399	-1.050
2FI				
درجه دوم	0.0002	0.646	0.930	0.830
Quadratic				
درجه سوم	0.407	0.821	0.931	0.911
Cubic				

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر سرعت و عمق شخم بر مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

Table 6- ANOVA of the effect of tillage speed and depth on the amount of burial of plant residues

منبع تغییر	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	p-value
Source	SS	df	MS	F-value	
مدل رگرسیون	419.64	5	83.93	32.77	0.0001
Model					
عمق شخم (D)	155.04	1	155.04	60.54	0.0001
Depth					
سرعت شخم (S)	60.17	1	60.17	23.49	0.0019
Speed					
S×D	25.01	1	25.01	9.76	0.0167
D ²	91.75	1	91.75	35.83	0.0006
S ²	25.09	1	25.09	9.79	0.0166
مانده	17.93	7	2.56		
Residual					
عدم برازش	5.61	3	1.87	0.61	0.646
Lack of fit					
خطای خالص	12.33	4	3.08		
Pure error					
کل تصحیح‌شده	437.57	12			
Cor Total					

R² = 0.959

می‌دهد. شخم عمیق، ساختار خاک را بیشتر مختل کرده و با شکستن کلوخه‌ها، فضاهای خالی بیشتری ایجاد می‌کند که امکان نفوذ بقایای گیاهی را فراهم می‌سازد. افزایش عمق شخم، سطح تماس خاک و بقایا را افزایش داده و تجزیه و ادغام آن‌ها را تسریع می‌کند. تماس طولانی‌تر بین خاک و بقایا در سرعت‌های پایین، به ادغام آن‌ها کمک می‌کند. نتایج این تحقیق با نتایج محققان دیگر (Celik & Altikat, 2022; Pereira et al., 2017) مطابقت دارد. شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش سرعت تراکتور (از ۵ به ۱۰ کیلومتر بر ساعت) با گاواهن برگردان‌دار، به‌ویژه در عمق‌های شخم کم‌تر (۱۷/۵ سانتی‌متر)، به‌طور چشمگیری درصد مدفون شدن بقایا را از ۷۰ به ۸۰ درصد افزایش می‌دهد. این افزایش، که به‌صورت غیرخطی است، احتمالاً ناشی از پرتاب ذرات خاک و بقایا به اطراف و افزایش سطح تماس آن‌ها است. ضرایب مدل و نمودار سطح پاسخ (شکل ۷ و جدول ۷) تأثیر مثبت و معنی‌دار سرعت و عمق شخم بر مدفون شدن بقایا را تأیید می‌کنند. در راستای تایید نتایج این تحقیق، نتایج مشابهی نیز گزارش شده است (Isaak, Azawi, & Turkey, 2024).

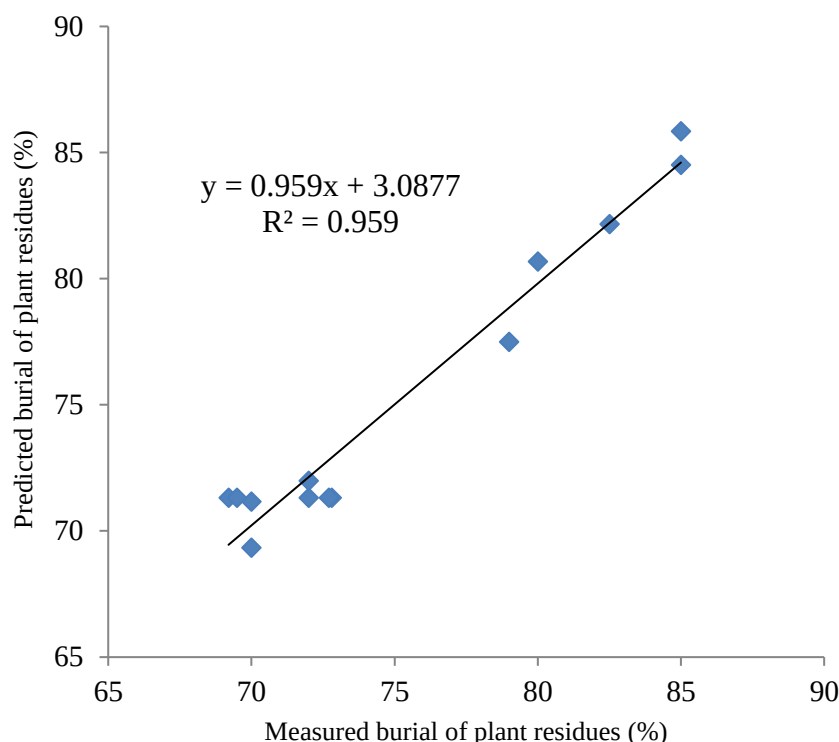
مدل رگرسیونی درجه دوم ارائه‌شده در جدول ۷، تأثیر عوامل مختلف را بر میزان مدفون شدن بقایای گیاهی بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که عمق شخم، در مقایسه با سرعت پیشروی، تأثیر بیشتری بر این فرآیند دارد. به‌طور کلی، هر دو عامل به‌طور مستقیم بر میزان مدفون شدن بقایای گیاهی مؤثرند. شکل ۶ تطابق بالایی بین داده‌های واقعی و مدل‌سازی‌شده مدفون شدن بقایای گیاهی را نشان می‌دهد. ضریب تعیین ($R^2=0.96$) نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی این پارامتر است. این دقت، مدل را به ابزاری مفید برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی تبدیل می‌کند.

شکل ۷ نشان می‌دهد که کارایی گاواهن برگردان‌دار در مدفون شدن بقایای گیاهی، تابعی از تعامل سرعت پیشروی تراکتور و عمق شخم است. افزایش عمق شخم (از ۱۷/۵ تا ۲۷/۵ سانتی‌متر)، به‌طور غیرخطی، درصد مدفون شدن بقایا را افزایش می‌دهد. این تأثیر در سرعت‌های پایین‌تر (۵ کیلومتر بر ساعت)، به دلیل افزایش حجم خاک جابه‌جاشده و ظرفیت بیشتر پوشش بقایا، مشهودتر است. کاهش سرعت، زمان لازم برای اختلاط و جابه‌جایی بقایا در خاک را افزایش

جدول ۷- ضرایب مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

Table 7- Coefficients of the second-degree polynomial regression model for predicting burial of plant residues

b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₂	b ₁₁	b ₂₂
71.31±0.66	5.08±0.65	3.17±0.64	-2.5±0.80	5.76±0.96	3.01±0.95



شکل ۶- مطابقت بین مقادیر تخمینی و تجربی برای مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

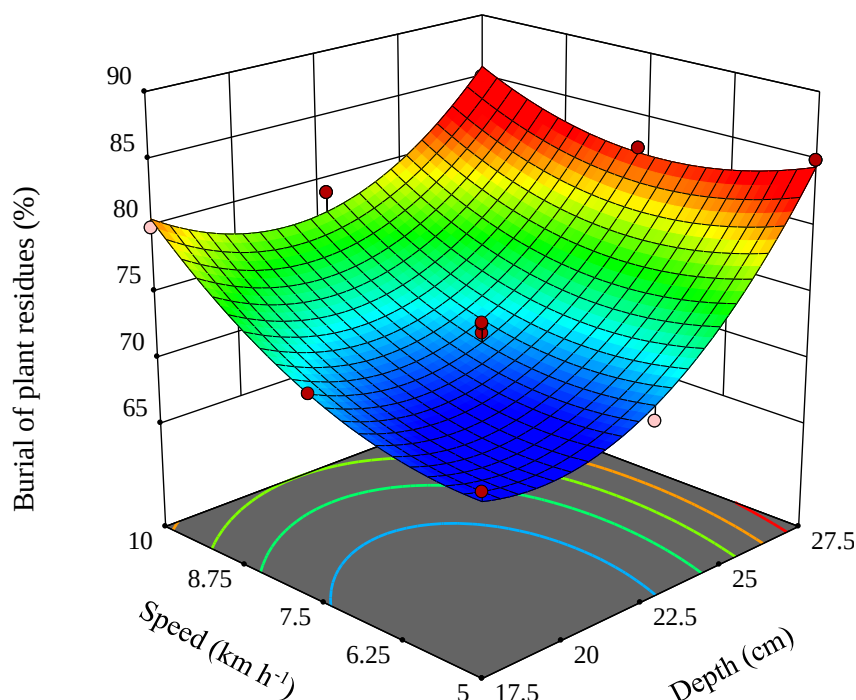
Fig.6. Agreement between estimated and experimental values for the amount of burial of plant residues

خاک‌ورزی نیز در میزان برگرداندن بقایا مؤثر است (Zarifneshat, Saeidi Rad, & Safari, 2020). در شکل ۸، وضعیت بقایای گیاهی مزرعه قبل و بعد از خاک‌ورزی با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۷۰ درصد از بقایا در خاک دفن شده است. این میزان با استفاده از تصاویر پردازش‌شده و شاخص مدفون شدن بقایا محاسبه شده است (رابطه ۲).

سرعت شخم از عوامل مؤثر بر میزان مدفون شدن بقایای گیاهی است. کاهش سرعت شخم‌زنی به‌طور معمول منجر به کاهش دفن بقایا می‌گردد (Azimi-Nejadian, Karparvarfard, & Naderi-Boldaji, 2022) و این امر به دلیل اختلاط کمتر بقایا با خاک، سبب افزایش پوشش سطحی بقایا می‌شود (Celik & Altikat, 2022). علاوه بر این، کاهش سرعت شخم می‌تواند به کاهش کلی در میزان مدفون شدن بقایای گیاهی منجر شود (Lekavicienė, Sarauskis, Naujokienė, & Kriauciunienė, 2019). در ارتباط با اثر عمق شخم، کاهش عمق شخم‌زنی همواره منجر به کاهش مدفون‌سازی بقایا نمی‌شود (Guo et al., 2022). با این حال، کاهش عمق شخم در کنار حفظ بقایای گیاهی می‌تواند سبب افزایش تثبیت کربن آلی خاک در اراضی زراعی گردد (Clay et al., 2015)، اگرچه ممکن است پایداری کربن آلی خاک در مقایسه با شخم عمیق‌تر کاهش یابد (Alcantara, Don, Vesterdal, Well, & Nieder, 2017).

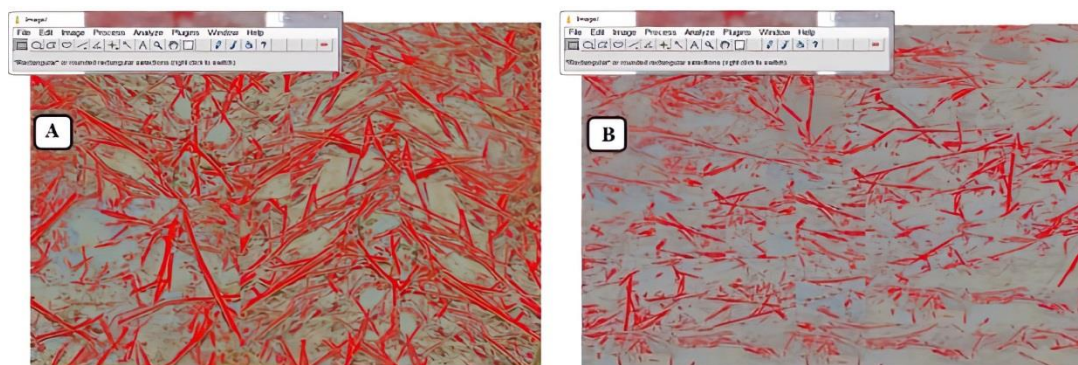
بیشترین میزان مدفون شدن بقایای گیاهی (۸۵٪) با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار در عمق شخم ۲۷/۵ سانتی‌متر و سرعت‌های ۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت حاصل شد. کمترین میزان مدفون شدن (۷۰٪) در عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت مشاهده گردید. عمق شخم در مقایسه با سرعت، عامل مؤثرتری در مدفون شدن بقایا بود (شکل ۷ و جدول ۷). برای مدل‌سازی دقیق، استفاده از مدل‌های غیرخطی ضروری است. تنظیم عمق و سرعت شخم می‌تواند به کاهش مدفون شدن بقایا و بهبود نفوذپذیری خاک کمک کند.

کشاورزی پایدار بر حفظ بقایای گیاهی بر سطح خاک برای بهبود ویژگی‌های خاک استوار است، نه دفن کامل آن‌ها. روش‌های مدیریتی بقایا باید با در نظر گرفتن شرایط خاص هر منطقه و محصول انتخاب شوند. گاوآهن برگردان‌دار با اختلاط زیاد خاک و بقایا، بیشتر بقایا را مدفون و مقدار کمی را در سطح مزرعه باقی می‌گذارد که با یافته‌های تحقیقاتی مطابقت دارد (Ahmadi Moghaddam, Eftekhari, Mardani, & Khodaverdilo, 2016). مطالعه‌ای پیرامون تأثیر شیوه‌های خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی بر ویژگی‌های خاک نشان داد که نوع خاک‌ورزی بر میزان برگرداندن بقایای گیاهی مؤثر است. بیشترین میزان برگرداندن بقایا (۸۹/۲۲ درصد) با گاوآهن برگردان‌دار و کمترین آن با روش‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی حاصل شد. نوع تیغه و ساختمان ادوات



شکل ۷- نمودار سه‌بعدی اثر سرعت و عمق شخم بر مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

Fig.7. Three-dimensional plot illustrating the effect of tillage speed and depth on burial of plant residues



شکل ۸- تصویر بقایای گیاهی: (A) قبل و (B) پس از عبور دستگاه خاکورز

Fig.8. Image of plant residues: (a) before and (b) after tillage operation

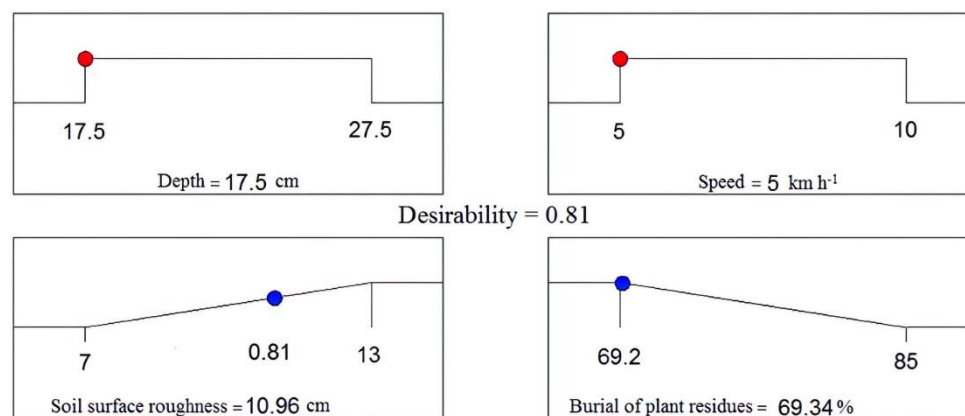
مطلوبیت (DI^1) که نشانگر دقت مدل در تعیین ترکیب تیمارها برای دستیابی به متغیرهای وابسته بهینه است، با مقادیر نزدیک به یک، دقت بالای مدل را در شبیه‌سازی متغیرهای وابسته تحت تاثیر متغیرهای مستقل نشان می‌دهد (Luis-Perez, 2021). برای عملیات

بهینه‌سازی عملیات خاک‌ورزی به روش سطح پاسخ

مطالعه حاضر به بررسی تاثیر سرعت و عمق شخم بر شرایط بهینه خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخت. نتایج بهینه‌سازی در شکل ۹ ارائه شده است. شاخص

سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت محقق می‌گردد. در این شرایط، ناهمواری سطح خاک ۱۳/۱ سانتی‌متر و مدفون شدن بقایای گیاهی ۸۴/۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. در مقابل، هدف حداقل‌سازی مدفون شدن بقایای گیاهی نیز با مطلوبیت کامل (۱۰۰ درصد) در عمق شخم ۱۹/۹۲ سانتی‌متر و سرعت ۶/۲ کیلومتر بر ساعت حاصل شده و مقادیر ناهمواری و مدفون شدن بقایا به ترتیب ۹/۱ سانتی‌متر و ۶۸/۷ درصد تخمین زده می‌شود. این یافته‌ها نمایانگر وجود یک رابطه معکوس بین ناهمواری سطح خاک و مدفون شدن بقایای گیاهی در پاسخ به تغییرات عمق شخم و سرعت پیشروی کمباین است.

خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار، با هدف به حداکثر رساندن ناهمواری سطح خاک به همراه حداقل درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، مدل ارائه شده با مطلوبیت ۸۱ درصد (۰/۸۱) به این مهم خواهد رسید. در این حالت ناهمواری سطح خاک ۱۰/۹۶ سانتی‌متر و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی برابر با ۶۹/۳۴ درصد خواهد بود. این حالت بهینه در سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت و عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر به دست می‌آید (شکل ۹). تحلیل سناریوهای بهینه‌سازی تک‌هدفه نشان می‌دهد که هدف ماکزیمم‌سازی ناهمواری سطح خاک با مطلوبیت ۱۰۰ درصد در عمق شخم ۲۷/۵ سانتی‌متر و

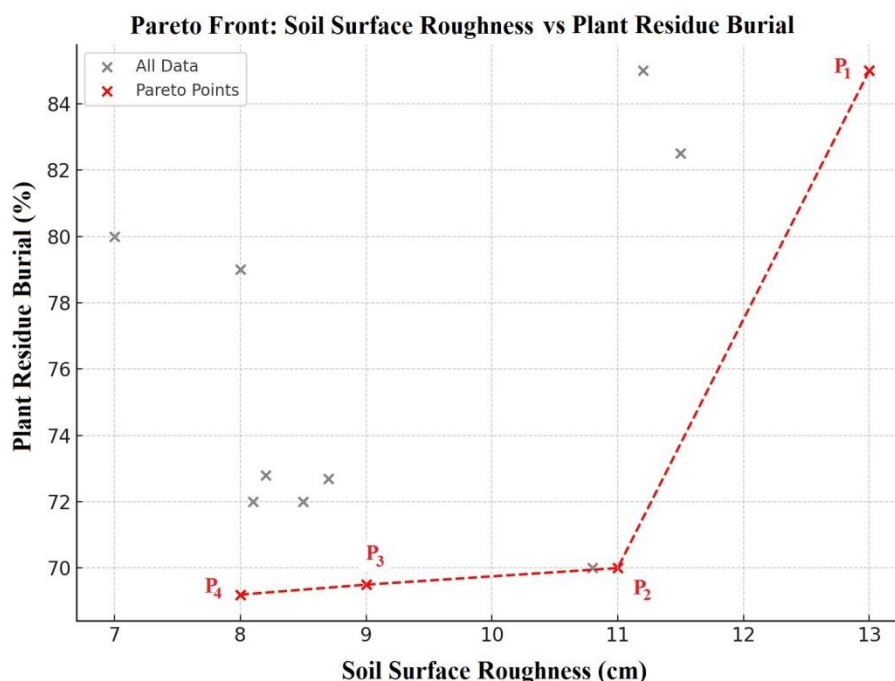


شکل ۹- مقادیر بهینه برای حداکثر نمودن ناهمواری سطح خاک و حداقل نمودن مدفون شدن بقایای گیاهی
Fig.9. Optimal values for maximizing soil surface roughness and minimizing plant residue burial

پایین‌تری از ناهمواری را نشان می‌دهند و برای دستیابی به این سطوح می‌توان به مقادیر کمتری از دفن بقایا نیز دست یافت (مانند نقطه قرمز در حدود ناهمواری ۸ سانتی‌متر و دفن ۶۹ درصد). در مقابل، نقاط واقع در سمت راست مرز پارتو (ناهمواری زیاد) برای دستیابی به سطوح بالاتر ناهمواری (حدود ۱۳ سانتی‌متر)، مدفون شدن بقایای بیشتری (حدود ۸۵٪) را نشان می‌دهند. نقاط میانی مرز پارتو، مصالحه‌هایی بین این دو حد نهایی ارائه می‌دهند (مانند ناهمواری حدود ۱۱ سانتی‌متر و دفن ۷۰٪). نقاط خاکستری واقع در بالا و سمت چپ مرز پارتو، راه‌حل‌های غیربهینه هستند زیرا توسط نقاط پارتو با ناهمواری مشابه اما دفن کمتر مسطوط شده‌اند. به طور مشابه، نقاط پایین و سمت راست مرز پارتو نیز غیربهینه هستند. نقاط (حداکثر ناهمواری با بیشترین دفن)، P2 (کاهش دفن با حفظ نسبی ناهمواری)، P3 (ناهمواری متوسط رو به بالا با دفن پایین‌تر) و P4 (کمترین دفن با ناهمواری قابل قبول) نمونه‌هایی از نقاط روی مرز پارتو هستند که بسته به اولویت‌ها و شرایط خاص، راه‌حل‌های بهینه متفاوتی را ارائه می‌دهند.

شکل ۱۰، نمودار پارتو^۱ حاصل از تحلیل بهینه‌سازی چندهدفه را به تصویر می‌کشد که در آن اهداف متضاد حداقل‌سازی مدفون شدن بقایای گیاهی (محور عمودی) و حداکثرسازی ناهمواری سطح خاک (محور افقی) هستند. نقاط قرمز روی این نمودار، مرز پارتو را تشکیل می‌دهند و نشان‌دهنده مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمسلط هستند. هر نقطه قرمز، ترکیبی از ناهمواری سطح خاک و دفن بقایای گیاهی را ارائه می‌دهد که در آن هیچ ترکیب دیگری به طور هم‌زمان ناهمواری بالاتر و دفن کمتر را فراهم نمی‌کند. نقاط خاکستری نیز تمامی داده‌های حاصل از ارزیابی‌های مختلف را نشان می‌دهند و فضای راه‌حل‌های ممکن را در رابطه با این دو هدف ترسیم می‌کنند. تحلیل مرز پارتو نشان می‌دهد که یک تعادل بین این دو هدف وجود دارد؛ دستیابی به ناهمواری سطح خاک بیشتر احتمالاً مستلزم پذیرش مدفون شدن بقایای بیشتر است و بالعکس.

با در نظر گرفتن هدف حداقل‌سازی دفن بقایا و حداکثرسازی ناهمواری سطح خاک، می‌توان نکات کلیدی را از مرز پارتو استنباط کرد. نقاط واقع در سمت چپ مرز پارتو (ناهمواری کم) سطوح



شکل ۱۰- نمودار پارتو برای بهینه‌سازی چندهدفه در مدیریت دفن بقایای گیاهی و ناهمواری سطح خاک

Fig.10. Pareto front for multi-objective optimization in the management of burial of plant residues and soil surface roughness (P₁ to P₄: Pareto points)

نتیجه‌گیری

بهینه، ناهمواری سطح خاک به ۱۰/۹۶ سانتی‌متر و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی به ۶۹/۲۴ درصد می‌رسد. این وضعیت در سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت و عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر حاصل می‌شود. پژوهش نشان داد که روش سطح پاسخ ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار تحت تأثیر سرعت و عمق شخم است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از حمایت‌های مالی دانشگاه لرستان ابراز می‌دارند.

مشارکت نویسندگان

محمد اکبری: جمع‌آوری داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه، روش‌شناسی، مفهوم‌سازی
عیسی حزب‌بوی: پردازش داده‌ها، ویرایش متن، نظارت و مدیریت، تصویرسازی نتایج، تحلیل آماری
مصطفی جعفریان: ویرایش متن، خدمات نرم‌افزاری، پردازش داده‌ها، مشاوره فنی

اثر روش‌های خاک‌ورزی مرسوم اراضی دیم بر شاخص ناهمواری سطح خاک و میزان مدفون شدن بقایای گیاهی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شد. هدف از این مطالعه، انتخاب تیماری با بیشترین شاخص ناهمواری و کمترین میزان مدفون شدن بقایا به‌منظور کاهش فرسایش بادی و آبی و حفظ خاک حاصلخیز و جذب حداکثری نزولات جوی بود. مطالعه حاضر به بررسی اثر سرعت حرکت تراکتور و عمق شخم بر میزان ناهمواری سطح خاک و مدفون شدن بقایای گیاهی پرداخت. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی برای هر دو پاسخ (مدفون شدن بقایای گیاهی و ناهمواری سطح خاک) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند. افزایش عمق شخم، هم مدفون شدن بقایا و هم ناهمواری خاک را افزایش داد. در مقابل، افزایش سرعت تراکتور با گاواهن برگردان‌دار، موجب افزایش مدفون شدن بقایا و کاهش ناهمواری خاک شد. با استفاده از گاواهن برگردان‌دار، شاخص ناهمواری سطح خاک بین ۷ تا ۱۳ سانتی‌متر و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی بین ۶۹/۳ تا ۸۷ درصد اندازه‌گیری شد. مدل ارائه شده با مطلوبیت ۸۱ درصد، قادر به بهینه‌سازی این دو پارامتر (حداکثر ناهمواری و حداقل مدفون شدن بقایا) است. در شرایط

References

1. Ahmadi Moghaddam, P., Eftekhari, L., Mardani, A., & Khodaverdilo, H. (2016). Determination of crop residues and the physical and mechanical properties of soil in different tillage systems. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 102-113. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.32700>
2. Akbari, F., Dahmardeh, M., Morshedi, A., Ghanbari, A., & Khorramdel, S. (2019). Effect of tillage systems and crop residues on soil bulk density and chemical properties under corn (*Zea mays* L.)-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping. *Agroecology*, 11(3), 1123-1138. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v11i3.72178>
3. Alcantara, V., Don, A., Vesterdal, L., Well, R., & Nieder, R. (2017). Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils-implications for carbon stocks. *Scientific Reports*, 7(1), 5511. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05501-y>
4. Azimi-Nejadian, H., Karparvarfard, S. H., & Naderi-Boldaji, M. (2022). Weed seed burial as affected by mouldboard design parameters, ploughing depth and speed: DEM simulations and experimental validation. *Biosystems Engineering*, 216, 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.02.005>
5. Bahrpour, V., Rouhani, A., Abbaspour-Fard, M. H., Zarifneshat, S., & Aghkhani, M. H. (2018). Spatial Variability Analysis and Zoning of Soil Compaction Using Different Geostatistical Methods. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49(3), 329-340. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.227916.664911>
6. Celik, A., & Altikat, S. (2022). The effect of power harrow on the wheat residue cover and residue incorporation into the tilled soil layer. *Soil and Tillage Research*, 215, 105202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105202>
7. Chimi-Chiadjeu, O., Le Hegarat-Masclé, S., Vannier, E., Taconet, O., & Dusseaux, R. (2014). Automatic clod detection and boundary estimation from digital elevation model images using different approaches. *Catena*, 118, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.003>
8. Clay, D. E., Reicks, G., Carlson, C. G., Moriles-Miller, J., Stone, J. J., & Clay, S. A. (2015). Tillage and corn residue harvesting impact surface and subsurface carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 44(3), 803-809. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.07.0322>
9. Danbaba, N., Nkama, I., Badau, M. H., Ukwungwu, M. N., Maji, A. T., Abo, M. E., & Oko, A. O. (2014). Optimization of rice parboiling process for optimum head rice yield: a response surface methodology (RSM) approach. *Focus*, 18, 154-165. <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20140403.02>
10. Fechete-Tutunaru, L. V., Gaspar, F., & Gyorgy, Z. (2019). Soil-tool interaction of a simple tillage tool in sand. *E3S Web of Conferences*, 85, 08007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198508007>
11. Feng, Z., Zheng, X., Li, X., Liu, H., Tao, Z., Wang, C., ..., & Song, J. (2024). Soil Surface Roughness Characteristics Under Different Agricultural Tillage Practices-A Case Study in the Black Soil Region of Northeast China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/jstars.2024.3405952>
12. Guo, X., Wang, H., Yu, Q., Ahmad, N., Li, J., Wang, R., & Wang, X. (2022). Subsoiling and plowing rotation increase soil C and N storage and crop yield on a semiarid Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 221, 105413. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105413>
13. Hazbawi, I., & Safaiezhad, M. (2023). Optimizing the Effect of Spike Density and Combine Speed for Reducing Wheat Loss Using Response Surface Methodology. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 2(2), 19-27. <https://doi.org/10.22103/BBR.2023.22269.1055>
14. Herodowicz-Mleczak, K., Piekarczyk, J., Kazmierowski, C., Nowosad, J., & Mleczak, M. (2022). Estimating soil surface roughness with models based on the information about tillage practises and soil parameters. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(3), e2021MS002578. <https://doi.org/10.1029/2021ms002578>
15. Isaak, M., Azawi, A., & Turkey, T. (2024). Influence of various tillage systems and tillage speed on some soil physical properties. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 20(1), 37-47. <https://doi.org/10.1556/446.2024.00070>
16. Kouselou, M., Hashemi, S., Eskandari, I., McKenzie, B., Karimi, E., Rezaei, A., & Rahmati, M. (2018). Quantifying soil displacement and tillage erosion rate by different tillage systems in dryland northwestern Iran. *Soil Use and Management*, 34(1), 48-59. <https://doi.org/10.1111/sum.12395>
17. Langer, S. (2021). Improving irrigation management on hillslope pastures. *Journal of New Zealand Grasslands*, 83, 135-144. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2021.83.3495>
18. Lekavicienė, K., Sarauskis, E., Naujokienė, V., & Kriauciunienė, Z. (2019). Effect of row cleaner operational settings on crop residue translocation in strip-tillage. *Agronomy*, 9(5), 247. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050247>
19. Li, H., Shen, H., Wang, Y., Wang, Y., & Gao, Q. (2021). Effects of ridge tillage and straw returning on runoff and soil loss under simulated rainfall in the mollisol region of northeast China. *Sustainability*, 13(19), 10614. <https://doi.org/10.3390/su131910614>

20. Liu, J., Chen, Y., & Kushwaha, R. L. (2010). Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep. *Soil and Tillage Research*, 109(1), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.014>
21. Liu, Z., Cao, S., Sun, Z., Wang, H., Qu, S., Lei, N., & Dong, Q. (2021). Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation. *Scientific Reports*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84191-z>
22. Luis-Perez, C. J. (2021). On the Application of a Design of Experiments along with an ANFIS and a Desirability Function to Model Response Variables. *Symmetry*, 13(5), 897. <https://doi.org/10.3390/sym13050897>
23. Ma, Y., Li, Z., Deng, C., Yang, J., Tang, C., Duan, J., Zhang, Z., & Liu, Y. (2022). Effects of tillage-induced soil surface roughness on the generation of surface-subsurface flow and soil loss in the red soil sloping farmland of southern China. *Catena*, 213, 106230. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106230>
24. Mahmoudi, A., Jalali, A., Valizadeh, M., & Skandari, I. (2015). The effects of forward speed and depth of conservation tillage on soil bulk density. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(2), 368-380. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v5i2.28533>
25. 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>
26. Mohammadi, M., Karparvarfard, S. H., Kamgar, S., & Rahmatian, M. (2020). Optimization and Evaluation of Working Conditions of New Tillage Blade for Use in Tillage Tools. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(2), 273-287. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.73914>
27. Muhsin, S. J. (2017). Performance study of moldboard plow with two types of disc harrows and their effect on some soil properties under different operating conditions. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 30(2), 1-15. <https://doi.org/10.37077/25200860.2017.37>
28. Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, 11(7), 666. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070666>
29. Panachuki, E., Bertol, I., Alves, T., Oliveira, P. T. S. D., & Rodrigues, D. B. B. (2015). Effect of soil tillage and plant residue on surface roughness of an oxisol under simulated rain. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 39(1), 268-278. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150187>
30. Pereira, R. C., Hedley, M. J., Arbestain, M. C., Bishop, P., Enongene, K. E., & Otene, I. J. J. (2017). Evidence for soil carbon enhancement through deeper mouldboard ploughing at pasture renovation on a Typic Fragiaqualf. *Soil Research*, 56(2), 182-191. <https://doi.org/10.1071/sr17039>
31. Rahmatian, M., Nematollahi, M., Yeganeh, R., & Sharifi Malvajerdi, A. (2021). Modeling and predicting the relationship between cone index and soil shear strength with draft force of a symmetrical tillage. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 22(77), 101-118. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/erams.2020.342455.1346>
32. Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoché, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., & Corbeels, M. (2017). Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0432-z>
33. Sharafi, S., Mohammadi Ghaleni, M., & Dragovich, D. (2023). Simulated Runoff and Erosion on Soils from Wheat Agroecosystems with Different Water Management Systems, Iran. *Land*, 12(9), 1790. <https://doi.org/10.3390/land12091790>
34. Shevchenko, S., Derevenets-Shevchenko, K., Desyatnyk, L., Shevchenko, M., Sologub, I., & Shevchenko, O. (2024). Tillage effects on soil physical properties and maize phenology. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 393-402. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320032>
35. Shirazi, M., Khademalrasoul, A., & Safieddin Ardebili, M. (2020). Evaluation of different supervised learning smart methods and response surface method to optimize factors affecting erosion (case study: Emamzadeh Watershed of Baghmalek). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7), 1653-1666. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.296715.668485>
36. 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>
37. Vidal-Vazquez, E., Miranda, J. G. V., & Paz Gonzalez, A. (2007). Describing soil surface microrelief by crossover length and fractal dimension. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14(3), 223-235. <https://doi.org/10.5194/npg-14-223-2007>
38. Zarifneshat, S., Saeidi Rad, M. H., & Safari, M. (2020). Effect of Conservation and Conventional Tillage on Some Machine and Soil Parameters in Cold Regions of Khorasan Razavi Province. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(4), 939-949. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.268169.665106>
39. Zeinli, A., Mousavi, R., Jafarian, M., & Bayati, M. R. (2012). Investigation of the Effect of Plow Type, Plowing Speed and Working Depth on Soil Distribution Model on Land. 7th National Congress on Agricultural Machinery

-
- Engineering and Mechanization, Shiraz University, Shiraz, Iran. (in Persian).
40. Zeng, Z., Thoms, D., Chen, Y., & Ma, X. (2021). Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage. *Scientific Reports*, 11(1), 2537. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82270-9>
 41. Zhou, S., Ren, J., Chen, Q., & Zhang, Z. (2023). Dynamic change patterns of soil surface roughness and influencing factors under different tillage conditions in typical mollisol areas of Northeast China. *Agronomy*, 13(7), 1817. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071817>

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 335-352

Analysis and Comparison of Energy and Yield Modeling of Local and High-Yielding Rice Cultivars Using the Multi-Gene Genetic Programming Model

S. Sharifi¹, A. Asakereh^{1*}, M. Kiani Deh Kiani¹, S. Janatrostami²

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

2- Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.asakereh@scu.ac.ir)

Received: 31 March 2025

Revised: 25 April 2025

Accepted: 06 May 2025

Available Online: 20 August 2025

How to cite this article:Sharifi, S., Asakereh, A., Kiani Deh Kiani, M., & Janatrostami, S. (2026). Analysis and Comparison of Energy and Yield Modeling of Local and High-Yielding Rice Cultivars Using the Multi-Gene Genetic Programming Model. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 335-352. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2025.92838.1364>

Introduction

Global challenges threaten food security. In Iran, rice is a staple, with 770,000 ha under cultivation and an annual production of 3.75 million tonnes. The northern provinces of Guilan and Mazandaran dominant rice production, with Guilan only supplying about 50% of the nation's demand. Advanced computational techniques such as metaheuristic algorithms and artificial intelligence offer powerful tools for problem-solving and modeling inspired by the adaptability of living organisms, and are increasingly applied to support agricultural management and sustainability. However, multi-gene genetic programming (MGP) has not yet been used for rice yield modeling in Iran. This study addresses that gap by evaluating the effectiveness of MGP and exploring its potential to enhance agricultural decision-making.

Materials and Methods

This research examines the yield performance of local rice cultivars, namely Hashemi and Ali Kazemi alongside high-yielding cultivars, including Fajr and Shiroudi in Rasht County, Iran. It utilizes library documents, face-to-face interviews, and MGP analysis. Data were collected from 385 randomly selected farmers and landowners in the region, during the 2020-2024 rice production years. Inputs from the energy sector, including fuel and electricity, water pumping equipment, agricultural machinery, fertilizers, pesticides, organic materials, and the energy output of paddy production, were examined. Energy equivalents were used to convert various types of energy into a common unit. To predict the yield of the two types of paddy cultivars using MGP, the structure of MGP trees was first designed with two objectives: maintaining the model accuracy and avoiding structural complexity. Parameter setting include population, generation and tournament sizes, gene limits, tree depth and size, and probabilities for elitism, crossover, and mutation. Additionally, various mathematical functions were utilized.

Results and Discussion

In examining total energy consumption and production in local and high-yielding cultivar farms, the results indicated a significant difference between the two varieties. In farms producing local varieties, the average energy consumption was 41,081.4 MJ, while the average energy production in these farms reached 23,771.9 MJ. In contrast, the average energy consumption in high-yielding cultivar farms was estimated at 41,118.8 MJ,



Authors retain the copyright. 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.2025.92838.1364>

whereas the average energy production in these farms was 42,220.04 MJ. The energy ratio, energy productivity, and specific energy indices for high-yielding varieties were 76.47%, 76.92%, and 77.70% higher, respectively, compared to local varieties, with the net energy gain index showing an improvement of more than 15 times. The higher energy ratio and energy productivity, along with lower specific energy and net energy gain, indicate that the high-yielding cultivar is more energy-efficient in terms of energy consumption. The MGP model converged after 100 iterations, providing the optimal solution. Changes in the best and mean fitness values indicated that as the iterations increased, the error gradually decreased and eventually stabilized, reflecting continuous improvement of the model during the training process and parameter tuning. Through cross-validation with varying training data set sizes, the findings revealed that the MGP model, when utilizing 65% of the total dataset, generated results that were remarkably similar to those achieved with 80% of the data. Hence, 65% is established as the optimal proportion for the training dataset. The coefficient of determination (R^2) for the regression line in the training data set was higher than in the test phase for both varieties. In evaluating the MGP equations to assess the accuracy of the proposed model, the tree depth was increased from 4 to 12. For the local cultivar, the highest coefficient of determination (R^2) at a tree depth of 4 was 0.95, while for the high-yielding cultivar, it was 0.94. The simpler structure at depth 4 resulted in a simpler mathematical equation. Finally, the effects of independent variables on the dependent variable, paddy yield, were examined. It was found that organic materials, such as compost, seed, rice straw and husks, were the most significant factors influencing the estimation of paddy yield in both varieties.

Conclusion

Since modeling focuses on predicting crop yield and making data-driven scientific and practical decisions, the results of this study represent an important step toward advancing sustainable agriculture. It is recommended that farmers seek up to date insights from consultants and participate in workshops to increase their sustainable yields.

Keywords: Energy indices, Guilan, Rice, Simulation

بررسی و مقایسه انرژی و مدل‌سازی عملکرد شلتوک ارقام محلی و پرمحصول با مدل برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی

سینا شریفی^۱، عباس عساکره^{۱*}، مصطفی کیانی ده کیانی^۱، سمیه جنت‌رستمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

چکیده

برنج، به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین محصولات کشاورزی، نقشی اساسی در تأمین تغذیه و معیشت مردم دارد و با توجه به سطح زیرکشت، تولید و مصرف، از جایگاه مهمی برخوردار است. در این راستا، این پژوهش با استفاده از مطالعات اسنادی، مصاحبه‌های میدانی و تحلیل‌های مبتنی بر مدل برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی، به بررسی، مقایسه شاخص‌های انرژی و مدل‌سازی عملکرد ارقام محلی هاشمی و علی‌کاظمی و پرمحصول فجر و شیرودی پرداخته است و داده‌های آن از ۳۸۵ مالک و کشاورز این دو نوع رقم در شهرستان رشت جمع‌آوری شده است. در مقایسه با ارقام محلی، ارقام پرمحصول از نظر شاخص‌های نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی ویژه به‌ترتیب ۷۶/۴۷، ۷۶/۹۲، ۷۷/۷۰ درصد و افزوده خالص انرژی بیش از ۱۵ برابر بهبود داشت. در مدل برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی، اعتبارسنجی متقاطع نشان داد مدل با ۶۵ درصد داده‌ها نتایجی مشابه استفاده از ۸۰ درصد داده‌ها ارائه می‌دهد. با افزایش عمق درخت از ۴ به ۱۲، بیشترین ضریب تبیین برای عمق درخت ۴ در رقم محلی ۰/۹۵ و در رقم پرمحصول ۰/۹۴ بود. همچنین، در تحلیل حساسیت اثر نهاده‌های مواد آلی (کمپوست، بذر، کاه و کلش برنج) و سوخت و برق به‌عنوان عامل اصلی در برآورد عملکرد شلتوک در دو رقم شناسایی شدند. نهاده‌های مواد آلی با بهبود حاصلخیزی خاک، و سوخت و برق با تأثیرگذاری بر عملکرد ماشین‌های کشاورزی و کارایی عملیات زراعی، نقش کلیدی در عملکرد پایدار مزارع شلتوک دارند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به تولیدکنندگان کمک کند تا با مدیریت مناسب منابع مصرفی، کیفیت و کمیت محصول خود را بهبود بخشند.

واژه‌های کلیدی: برنج، شاخص‌های انرژی، شبیه‌سازی، گیلان

مقدمه

افزایش دمای جهانی، کمبود آب، رشد جمعیت و تغییر اقلیم باعث شده است که تأمین غذای جهان به چالشی اساسی برای ذی‌نفعان و ذی‌نفعان تبدیل شود (Tchoukang, Onyeaka & Nkoutchou, 2024). برنج و شلتوک، در کنار گندم، از مهم‌ترین غلات تأمین‌کننده تغذیه و معیشت مردم در کشور محسوب می‌شوند. کشت شلتوک در ۲۱ استان کشور، با سطحی معادل ۷۷۰ هزار هکتار از اراضی زراعی، انجام می‌شود و سالانه بیش از ۳/۷۵ میلیون تن

تولید دارد. استان‌های گیلان و مازندران، با سهمی معادل ۷۳ درصد از تولید و ۷۶ درصد از سطح زیرکشت، اصلی‌ترین مناطق تولید این محصول به‌شمار می‌روند. در استان گیلان، ۱۴۲۵ واحد شالیکوبی با ظرفیت تبدیل سالانه ۲۰۰ تا ۴۰۰۰ تن برنج سفید فعالیت دارند. این استان حدود ۵۰ درصد از نیاز برنج کشور را تأمین کرده و بخش کشاورزی برای بیش از نیمی از ساکنان روستایی آن نقش اساسی دارد. میزان تولید برنج در گیلان ۷۲۰ هزار تن برآورد شده است. درحالی‌که میانگین مصرف سرانه برنج در ایران ۳۴ تا ۳۶ کیلوگرم است، این میزان در گیلان به ۵۳ کیلوگرم می‌رسد که بر اهمیت کشت و تولید برنج در این استان تأکید دارد (Kavoosi Kalashami, Zanipoor, Yavari, & Adibi, 2017).

با پیشرفت علوم، روش‌های فرااکتشافی^۳ و هوش مصنوعی^۴ در

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(Email: a.asakereh@scu.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92838.1364>

3- Metaheuristics

4- Artificial intelligence

حل مسائل پیچیده و مدل‌سازی به‌عنوان مجموعه‌ای از تکنیک‌های مؤثر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها با شبیه‌سازی رفتار ارگانیزم‌های زنده، از جمله گیاهان، حیوانات و انسان‌ها، ویژگی‌های انعطاف‌پذیری، تطابق‌پذیری و هوشمندی آن‌ها را در فرآیندهای محاسباتی بازآفرینی می‌کنند (Janatrostami, Kholghi, & Bozorg Haddad, 2010; Ayoubikia, Janatrostami, Ashrafzadeh, & Shafiei, 2019). در این راستا، مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند به محققان و تولیدکنندگان در ارزیابی راهکارهای بهینه مدیریت محصولات کشاورزی، با توجه به شرایط پیچیده اقلیمی، کمک کرده و به بهبود بهره‌وری و پایداری کشاورزی یاری رسانند (Panahi, Samadianfard, & Nazemi, 2021).

در پژوهشی از مدل شبکه عصبی مصنوعی^۱ (ANN) برای ارزیابی حداقل پارامترهای ورودی مورد نیاز جهت تعیین عملکرد ذرت و همچنین پیش‌بینی عملکرد ذرت در سطوح مختلف آب و نیتروژن استفاده کردند. آنان گزارش کردند در صورتی که حداقل سه متغیر آب، کود نیتروژن و درجه روز رشد به‌عنوان ورودی به مدل ANN معرفی شوند، می‌توان عملکرد ماده خشک ذرت را با دقت بیشتری پیش‌بینی کرد. همچنین بیان کردند مدل پیشنهادی می‌تواند به اتخاذ تصمیم‌های صحیح توسط تولیدکنندگان منجر شود (Bagheri, Gheysari, Ayoubi, & Lavaee, 2013). در مطالعه‌ای با هدف مدل‌سازی جریان انرژی برای تولید ارقام مختلف برنج در استان گلستان نتایج نشان داد که مدل ANN استفاده شده با ضریب تبیین^۲ (R^2) معادل ۰/۹۹ و ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) برابر با ۱/۹۳ کیلوگرم در هکتار، دقت بالایی داشته است (Taheri-Rad, Khojastehpour, Rohani, Khoramdel, & Nikkhah, 2017). در یک تحقیق مدل ترکیبی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک^۴ (GA) توانست رابطه بین ویژگی‌های ژنتیکی و عملکرد گندم در استان آذربایجان شرقی را با دقت بالا تبیین، توضیح و پوشش دهد. این مدل با ضریب تعیین ۰/۸۷ دقت بالایی در تخمین عملکرد گندم نشان داد (Barikloo, Alamdari, Moravej, & Servati, 2017). ایشان بیان کردند افزایش راندمان تولید کشاورزی مستلزم مدیریت صحیح و درک روابط میان ویژگی‌های محیطی و عملکرد محصول است. در تحقیقی مشابه، از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات^۵ (PSO) برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر در استان خوزستان استفاده شد که نتایج نشان از بهبود دقت پیش‌بینی داشته است، به‌گونه‌ای که ترکیب این الگوریتم‌ها با شبکه عصبی موجب کاهش خطا و افزایش ضریب همبستگی شده است (Hafezi, 2024).

رویکرد جدیدی که به‌منظور ارائه مدل در طیف وسیعی از شاخه‌های علمی کشاورزی و زیست‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است، برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی^۹ می‌باشد (Peng, Guan, Zeng, 2024).

- 1- Artificial neural network
- 2- Coefficient of determination
- 3- Root mean squared error
- 4- Genetic algorithm
- 5- Particle swarm optimization algorithm

6- Hyperparameters

7- 5-fold cross validation

8- Reinforced Random Forest Algorithm

9- Multi-gene Genetic Programming

با بررسی پیشینه تحقیق و با توجه به این که تاکنون از برنامه نویسی ژنتیکی برای مدل سازی عملکرد شلتوک در استان گیلان استفاده نشده است، نیاز به انجام این پژوهش وجود داشت. این تحقیق با هدف بررسی کارایی این روش در مدل سازی عملکرد شلتوک انجام شده و می تواند به بهبود تصمیم گیری در حوزه کشاورزی کمک کند.

مواد و روش ها

موقعیت منطقه مورد پژوهش

این پژوهش در شهرستان رشت در طول جغرافیایی $49^{\circ}59'21''$ تا $49^{\circ}56'11''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}17'96''$ تا $37^{\circ}37'30''$ در بازه زمانی $1398-1403$ انجام شده است. موقعیت جغرافیایی تحقیق در شکل ۱ آمده است. میانگین سالانه بارندگی در این شهرستان 1359 میلی متر است. میانگین دمای سالانه هوا $15/9$ درجه سلسیوس و میانگین سالانه رطوبت نسبی هوا در رشت $81/9$ درصد گزارش شده است. همچنین، مجموع ساعات آفتابی سالانه در این شهرستان 1621 ساعت می باشد.

گردآوری اطلاعات

برحسب هدف، این پژوهش از نوع کاربردی است، زیرا نتایج آن می تواند برنامه ریزان و سیاست گذاران صنعت برنج را در بهبود تصمیم گیری های کشاورزی یاری دهد و با بهره گیری از یافته های پژوهش، راهکارهای مؤثرتری برای مدیریت این صنعت ارائه کند. به طور کلی، این پژوهش از روش محاسباتی-تحلیلی استفاده می کند که بر پایه مطالعات کتابخانه ای (اسنادی)، مصاحبه های میدانی و تحلیل های مبتنی بر مدل برنامه نویسی ژنتیک انجام می پذیرد. داده ها از پرسشنامه ها، منابع اسنادی و مصاحبه های میدانی گردآوری شد. جامعه آماری این پژوهش شامل 160 هزار کشاورز و مالک زمین بود. نمونه گیری به روش تصادفی ساده و بر اساس فرمول کوکران (Cochran, 1977) انجام شد. در نهایت، 385 کشاورز و مالک زمین که ارقام محلی هاشمی و علی کاظمی و ارقام پرمحصول فجر و شیرودی را کشت می کردند، انتخاب شدند. این ارقام به دلیل کیفیت بالاتر، عطر مطلوب و بازارپسندی بیشتر، سهم قابل توجهی از سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده اند.

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

(Zhang, 2024). برنامه نویسی ژنتیک شاخه ای از الگوریتم ژنتیک است که بر توسعه خودکار برنامه های کامپیوتری متمرکز می شود. در این روش یک جمعیت اولیه از توابع مرکب که نشان دهنده الگوهای پیش بینی هستند، به صورت تصادفی ایجاد می شوند. سپس، هر یک از افراد آن (ژن ها) با استفاده از توابع برازش ارزیابی می شوند تا مؤثرترین نمونه ها در ماهیت پدیده شناسایی شوند. در مرحله بعد، ژن های برتر برای تکثیر، جهش، جفت گیری و تولید افراد جدید با صفات اصلاح شده (فرزندان) انتخاب می شوند. این فرآیند توسعه تکراری بر روی فرزندان اعمال شده و تا دستیابی به بهترین پاسخ ادامه می یابد.

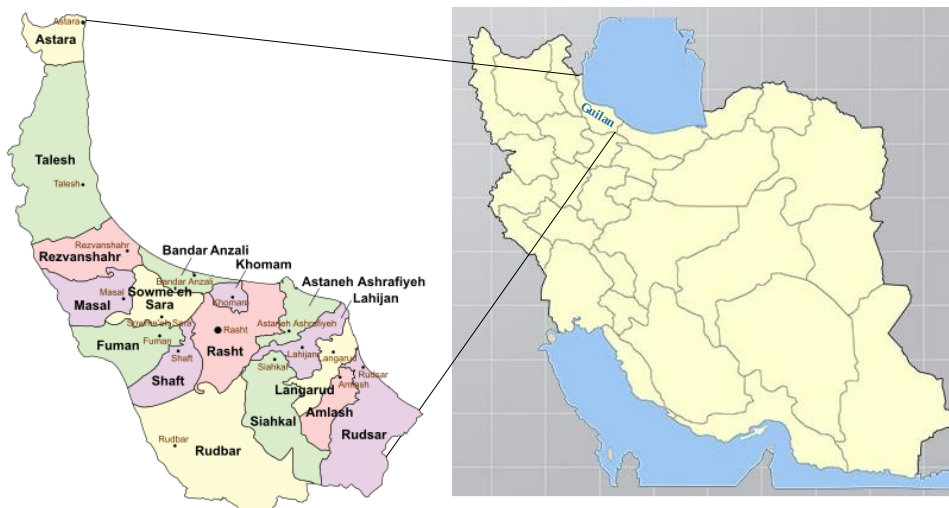
کارایی مطلوب برنامه نویسی ژنتیک چندژنی در تحقیقات مختلف مانند پیش بینی اثرات تغییر آب و هوا بر جمعیت ماهی قزل آلا در تایوان (Tung, Lee, Yang, & Chen, 2009)، طبقه بندی پوشش های گیاهی در کشورهای امریکای جنوبی و آفریقا (Lu et al., 2022) و مدل سازی نوسانات سطح ایستابی آب های زیرزمینی در استان خوزستان (Zeinalie, Golabi, Azari, & Farzi, 2022) نشان داده شده است.

این رویکرد به تازگی در مدل سازی عملکرد محصولات کشاورزی استفاده شده است و توانسته است نتایج مطلوبی در پیش بینی متغیرها ارائه دهد. مدل سازی عملکرد محصولات دیمی در شهر تبریز با استفاده از مدل شبیه سازی برنامه نویسی ژنتیک چندژنی نتایج نشان داده است که برای محصول یونجه این روش نسبت به روش رگرسیون بردار پشتیبان^۱ (SVR) کارایی به نسبت مطلوب تری داشته است. متغیرهای دما، بارندگی، تبخیر-تعرق و شاخص های خشکسالی جزو سناریوها و ترکیب های مختلف داده ورودی بودند. همچنین بیان شده است بهره گیری از مدل های شبیه سازی، ابزاری کارآمد برای تحلیل روندهای آبی در سیستم های پیچیده کشاورزی به شمار می آید. این مدل ها می توانند پژوهشگران، نهادهای دولتی و تولیدکنندگان را در شناسایی و ارزیابی بهینه ترین شرایط مدیریتی برای محصولات کشاورزی، متناسب با وضعیت اقلیمی، یاری رسانند (Panahi et al., 2021). در پژوهشی به پیش بینی مکانی عملکرد گندم با استفاده از نقشه برداری رقومی خاک در منطقه گتوند پرداخته شد. داده های این تحقیق از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره ای بود. مدل برنامه نویسی ژنتیک با استفاده از مجموع داده ها ارزیابی شد و نتایج آن بیانگر میانگین ریشه مربعات خطا $525/11$ و ضریب تبیین مطلوب $0/82$ بود (Taghizadeh Merjerdi, Seyed Jalali, & Sarmadian, 2016). در جدول ۱ خلاصه تحقیقات پیرامون برنامه نویسی ژنتیک و مدل سازی عملکرد محصولات کشاورزی آورده شده است.

جدول ۱- خلاصه تحقیقات انجام شده مرتبط با برنامه‌نویسی ژنتیک و مدل‌سازی عملکرد محصولات کشاورزی

Table 1- Summary of studies related to genetic programming and agricultural crop yield modeling

منبع Source	هدف Aim	منطقه Region	شاخص خطا Error indices
(Kima, Traore, Wang, & Chung, 2014)	بررسی و مدل‌سازی واکنش عملکرد برنج دیم نسبت به متغیرهای اقلیمی Rainfed rice yield response to climatic variables was studied and modeled	سه ناحیه در بورکینافاسو Three regions in Burkina Faso	coefficient of correlation = 0.88 to 0.97 root relative square error = 0.261 to 0.474 relative absolute error = 0.070 relative root mean squared error $\approx$ 2.107 to 23.638%
(Ali, Deo, Downs, & Maraseni, 2018)	پیش‌بینی و مدل‌سازی عملکرد پنبه Cotton yield was predicted and modeled	سه ناحیه در پاکستان Three regions in Pakistan	relative mean absolute error $\approx$ 1.771 to 22.652% correlation coefficient $\approx$ 0.982 root mean squared error $\approx$ 209.25 kg ha ⁻¹ mean absolute error $\approx$ 182.84 kg ha ⁻¹
(Ali & Deo, 2020)	پیش‌بینی و مدل‌سازی عملکرد گندم Wheat yield was predicted and modeled	هشت ناحیه در پاکستان Eight regions in Pakistan	root mean squared error = 80.8 kg ha ⁻¹ coefficient of correlation = 0.91
(Babae, Maroufpoor, Jalali, Zarei, & Elbeltagi, 2021)	پیش‌بینی و مدل‌سازی عملکرد شلتوک برنج Rice paddy yield was predicted and modeled	ساری در ایران Sari in Iran	



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش در ایران

Fig.1. Location of the study area in Iran

وضوح و سادگی را تأیید می‌کند.

نهاده‌های بخش انرژی شامل سوخت و برق، نیروی کار، ماشین‌های کشاورزی، کودها و سموم شیمیایی، مواد آلی، و ستانده بخش انرژی شلتوک مورد بررسی قرار گرفت. برای تبدیل انواع مختلف انرژی به یکدیگر از ضریب هم‌ارز انرژی^۲ استفاده شد. به عبارت دیگر، میزان انرژی مصرفی از طریق ضرب مقدار نهاده‌های

جایی که $N =$ جامعه آماری، $q = 0.05$ و p به ترتیب احتمال بهینه‌بودن و نبودن متغیرها، $Z^2 = 3.8416$ سطح اطمینان ۹۵ درصد و $d = 0.05$ حداکثر دقت نمونه‌گیری و $n =$ حجم نمونه بود. جهت بررسی پایایی پرسشنامه‌ها از آزمون ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد و برابر با ۰/۹۲ به دست آمد که قابل قبول است. همچنین، شاخص CVI^1 برابر با ۰/۸۹ به دست آمد که کیفیت مناسب سوالات از نظر ارتباط،

کشاورزی کمباین، تراکتور، روتیواتور، نشاءکار، خرمن کوب و سوخت آن ها، بذر و کمپوست، آب، کودهای شیمیایی نیترات، فسفات، پتاس و سولفات روی، سموم شیمیایی قارچ کش، حشره کش و علف کش جمع آوری گردید.

مصرفی و شلتوک تولیدی در ضرایب متناظر انرژی به دست آمد (جدول ۲). میزان مصرف انرژی در هر یک از مراحل آماده سازی زمین و خاکورزی اولیه، عملیات خزانه گیری، خاکورزی ثانویه و کاشت، عملیات داشت و برداشت محصول به صورت تفکیک شده محاسبه شد. در این راستا، داده های نیروی کار مرد و زن، ماشین های

جدول ۲- ضرایب انرژی ورودی ها و خروجی در تولید شلتوک

Table 2- Energy coefficients of inputs and output of the paddy production

نهاد و ستانده Input & Output	Unit	Energy-eq (Ref.)	نهاد و ستانده Input & Output	Unit	Energy-eq (Ref.)
الف) نهاد A) Input			سوخت ها و برق Fuels & Electricity		
ماشین های کشاورزی Agricultural Machinery			دیزل Diesel	MJ L ⁻¹	47.8 (6)
تراکتور Tractor	MJ h ⁻¹	10.944 (1)	بنزین Gasoline	MJ L ⁻¹	46.3 (6)
روتیواتور Rotavator	MJ h ⁻¹	10.283 (1)	برق Electricity	MJ kWh ⁻¹	12 (6)
نشاءکار Transplanter	MJ h ⁻¹	9.405 (1)	مواد آلی Organic matter		
دروگر Reaper	MJ h ⁻¹	5.518 (1)	بذر برنج Rice seed	MJ kg ⁻¹	14.70 (2)
خرمنکوب Thresher	MJ h ⁻¹	7.524 (1)	کمپوست Compost	MJ kg ⁻¹	0.3 (7)
کمباین Combine	MJ h ⁻¹	171 (1)	کاه و کلش برنج Rice straw	MJ kg ⁻¹	6.5 (3)
کودهای شیمیایی Fertilizers			سموم شیمیایی* Biocides*		
نیتروژن Nitrogen	MJ kg ⁻¹	78.7 (6)	علف کش Herbicide	MJ kg ⁻¹	120 (5)
فسفات Phosphate	MJ kg ⁻¹	17.4 (6)	آفت کش Pesticide	MJ kg ⁻¹	120 (5)
پتاس Potash	MJ kg ⁻¹	13.7 (6)	قارچ کش Fungicide	MJ kg ⁻¹	120 (5)
سولفات روی Zinc sulphate	MJ kg ⁻¹	20.9 (1)	ب) ستانده B) Output		
			شلتوک Paddy	MJ kg ⁻¹	14.70 (2)

1- Nassiri and Singh (2009), 2- Ozkan, Akcaoz, and Fert (2004), 3- Gummert *et al.* (2020), 4- Van-hung *et al.* (2019), 5- Chauhan, Mohapatra, and Pandey (2006), 6- Kitani, Jungbluth, Peart, and Ramdani (1999), 7- Taheri-Rad, Khojastehpour, Rohani, & Khoramdel (2017)

*به ازای هر کیلوگرم ماده موثره

* Per kilogram of active ingredient

در رابطه (۲)، ME انرژی کاربرد ماشین های کشاورزی (مگاژول در هکتار)، G جرم ماشین ها (کیلوگرم)، t مدت زمان کاربرد ماشین ها (ساعت در هکتار)، M_p انرژی مواد اولیه و T عمر مفید ماشین ها (ساعت) می باشد. در جدول ۳ عمر مفید ماشین های کشاورزی بر حسب ساعت آمده است.

انرژی مصرف شده توسط ماشین های کشاورزی یکی از فاکتور اساسی در بررسی انرژی تولید محصولات کشاورزی به شمار می رود. برای تعیین میزان انرژی به کاررفته در ماشین آلات مورد استفاده، از رابطه (۲) بهره گرفته شد.

$$ME = \frac{G \times M_p \times t}{T} \quad (2)$$

جدول ۳- عمر مفید ماشین‌های کشاورزی (ساعت)

Table 3 - lifetime of agricultural machinery (hr)

تراکتور	10000
Tractor	
روتیواتور	3000
Rotavator	
نشاءکار	3000
Transplanter	
دروگر	3000
Reaper	
خرمنکوب	3000
Thresher	
کمباین	3000
Combine	

(Almassi, Kiani & Loveimi, 2014)

شلتوک برحسب مگاژول بر هکتار، Input energy برابر با انرژی مصرفی برحسب مگاژول بر هکتار و Yield میزان تولید شلتوک بر حسب کیلوگرم بر هکتار بود.

برنامه‌نویسی ژنتیک

برنامه‌نویسی ژنتیک برای ایجاد و کشف ساختار کلی تابع مناسب به کار می‌رود، در حالی که الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ضرایب یک تابع مشخص استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، برنامه‌نویسی ژنتیک تعیین می‌کند که چه تابعی برای یک مسئله مناسب‌تر است، در حالی که الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه ضرایب آن تابع را پیدا می‌کند. روش برنامه‌نویسی ژنتیک در جهت خودکاری‌سازی برنامه‌نویسی و استقراء برنامه‌ها توسعه داده شده است. در این روش اندازه کروموزوم‌ها یا پاسخ (به‌ازای مقادیر مختلف مصرف نهاده‌ها) به‌وسیله عملگرهای ژنتیک اصلاح‌شده، تغییر می‌کند. برخلاف، الگوریتم‌های ژنتیک، در این روش تفاوتی بین فضای جستجو و فضای نمایش وجود ندارد. فضای جستجو علاوه‌بر فضای مسأله، فضای نمایش را نیز در برمی‌گیرد و قادر به نمو نمایش مسأله است. در تئوری، فضای جستجوی عبارت است از فضای همه ترکیب‌های ممکن از سمبول‌های اولیه‌ای که مسأله از آن‌ها ساخته می‌شود. برنامه‌ها در قالب یک درخت ارائه شده و از تلفیق به‌عنوان عملگر اصلی در این روش استفاده می‌شود. در واقع الگوریتم‌های زیر درخت‌های مربوط به والدین را بدون این که خدشه‌ای در نحو برنامه ایجاد شود، با هم مبادله می‌کند. همچنین، جهش یک زیر درخت تصادفی ایجاد کرده و آن را جایگزین می‌کند. در این روش برنامه اولیه در جهت بهبود کارایی رشد می‌کند. البته رشد برنامه به گونه‌ای است که در نتیجه نهایی تغییری حاصل نشود. این روش قابل‌اعتماد، مطلوب و کارا در شرایط مواجه با عدم قطعیت‌های مختلف و داده‌های

همچنین برای محاسبه انرژی مصرفی پمپ تأمین آب از رابطه (۳) استفاده شد.

$$E_{wp} = \frac{\rho g H Q}{\eta_1 \times \eta_2} \times 10^{-6} \quad (3)$$

جایی که، E_{wp} برابر با انرژی مصرفی پمپ تأمین آب (برحسب مگاژول بر هکتار)، ρ برابر با چگالی آب (1000 kg m^{-3}) و g شتاب جاذبه (9.8 N kg^{-1})، H فشارکل پمپ (m)، Q ظرفیت مورد نیاز ($\text{m}^3 \text{ hr}^{-1}$)، η_1 بازده پمپ به‌صورت اعشار و معمولاً برابر 0.7 تا 0.9 در نظر گرفته می‌شود که در این تحقیق برابر با 0.8 بود و η_2 بازدهی کل تبدیل انرژی و توان به‌صورت اعشار و برای پمپ برقی 0.18 تا 0.22 در نظر می‌گیرند که در این تحقیق 0.20 بود (Janatrostami & Mahmoudpour 2020).

از شاخص‌های انرژی نسبت انرژی^۱، بهره‌وری انرژی^۲، انرژی ویژه^۳ و افزوده خالص انرژی^۴ برای بررسی و مقایسه دو نوع رقم محلی و پرمحصول براساس رابطه‌های (۴) تا (۷) استفاده شد.

$$ER = \frac{\text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

$$EP = \frac{\text{Yield (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (5)$$

$$SE = \frac{\text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Yield (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (6)$$

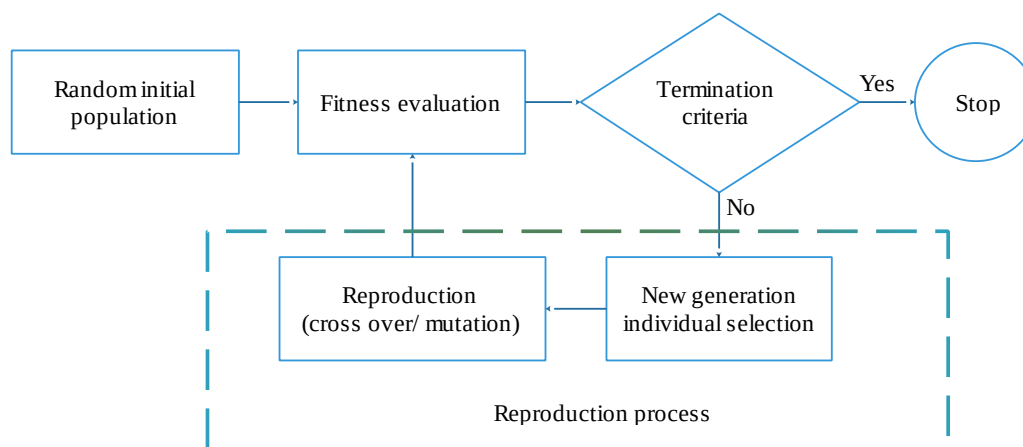
$$NEG = \text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

در رابطه‌های مذکور، Output energy برابر با انرژی تولید

- 1- Energy Ratio (ER)
- 2- Energy Productivity (EP)
- 3- Specific Energy (SE)
- 4- Net Energy Gain (NEG)

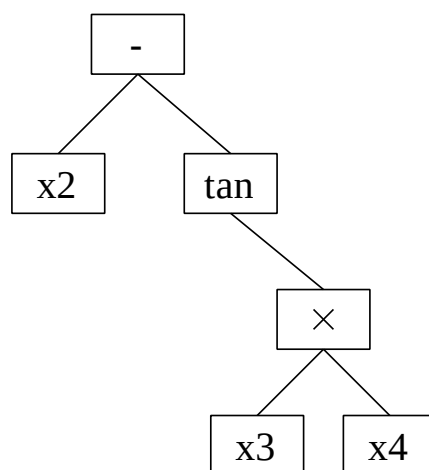
برنامه نویسی ژنتیک چندژنی استفاده می شود. به عنوان مثال، شکل ۳ بیان کننده نمایش مدل برنامه ژنتیکی $x_2 - \tan(x_3 \times x_4)$ است.

گسترده می باشد که در یک سیستم کشاورزی وجود دارد. شکل ۲ طرحواره مدل برنامه نویسی ژنتیک چندژنی را نشان می دهد. در این مطالعه برای مدل سازی عملکرد شلتوک از مدل



شکل ۲- فلوچارت برنامه نویسی ژنتیک چندژنی

Fig.2. Flowchart of multi-gene genetic programming



شکل ۳- نمایش برنامه ژنتیکی $x_2 - \tan(x_3 \times x_4)$

Fig.3. Display genetic program of $x_2 - \tan(x_3 \times x_4)$

عبارتند از: ماشین های کشاورزی (AM)، کودهای شیمیایی (Fe)، سوخت ها و برق (FE)، مواد آلی (OM)، سموم شیمیایی (B)، پمپ آب (WP) و شلتوک (P).

جدول ۵ تنظیمات پارامترهای مختلف در برنامه نویسی ژنتیک را نشان می دهد که برای افزایش دقت و کاهش خطا مدل از روش آزمون و خطا استفاده شد. افزایش عمق درختان باعث افزایش میزان دقت و پایین آمدن خطا می شود، اما بر میزان پیچیدگی مدل نهایی می افزاید. انتخاب عمق مناسب درخت باید دارای پیچیدگی نه چندان زیاد همراه با دقت و خطا مطلوب باشد.

در شکل ۳، برگ های درخت، متغیرهای مستقل x_2 ، x_3 و x_4 می باشند که به آن ها ترمینال گفته می شود. به عبارت دیگر، این نمودار درختی شامل مجموعه ای از نقاط انتهایی (متغیرهای تصمیم و مقادیر ثابت) و گره ها (علائم ریاضی) است که بر این اساس نمودار رابطه ها به دست خواهد آمد. عملگرهای محاسباتی در شکل ۳ ($\times$ و $\tan$) مجموعه توابع نامیده می شوند. توابع و ترمینال ها در کنار هم مجموعه اولیه یک نمونه از مدل غیرخطی برنامه ژنتیکی را تشکیل می دهند (Hushyar & Ashraf Talesh, 2016). ورودی مدل، محتوای انرژی نهاده های مصرفی و شلتوک تولیدی می باشد که در محیط نرم افزار MatLab 2016 بررسی شد. این ورودی ها و نمادهای آنان

جدول ۴- تنظیم پارامترها در برنامه‌نویسی ژنتیک

Table 4- Parameter setting in genetic programming

تنظیمات Settings	پارامترها Parameters
100, 400, 800, 1000	اندازه جمعیت Population size
100, 300, 500, 700	تعداد نسل Number of generations
4, 8, 10, 12	بیشینه تعداد ژن Maximum number of genes
4, 8, 10, 12	بیشینه عمق درخت Maximum tree depth
12	اندازه تورنمنت Tournament size
0.01	احتمال نخبه‌گرایی Elitism probability
0.85	احتمال تقاطع Crossover probability
0.1	احتمال جهش Mutation probability
+, -, *, /, ^, sin, cos, tanh, log, sqrt	مجموعه توابع Function set

خطایابی و بررسی صحت نتایج مدل‌سازی

مدل‌های غیرخطی ریاضی براساس ویژگی‌های مقدار خطا توسط مدل برنامه‌نویسی ژنتیک توسعه می‌یابند. به‌منظور ارزیابی، مقایسه و پیش‌بینی پارامترهای اندازه‌گیری شده در مورد دقت و صحت اطلاعات در شرایط مختلف، از شاخص‌های ارزیابی مانند جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) ضریب تبیین^۲ (R^2)، درصد میانگین مطلق خطا^۳ (MAPE) و فاکتور بازده مدل^۴ (EF) استفاده خواهد شد (رابطه‌های ۹ تا ۱۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2} \quad (9)$$

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

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right|}{n} \quad (11)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{P}_i)^2} \quad (12)$$

اندازه جمعیت و تعداد نسل به‌ترتیب تعداد برنامه‌ها در جمعیت و تعداد سطوح الگوریتم مورد استفاده قبل از توقف اجرا را تعیین می‌کنند. بیشینه تعداد ژن، تعداد ژن‌های مجاز در یک پاسخ (کوروموزوم) را نشان می‌دهد. براساس جدول ۴ و ردیف‌های ۱ تا ۴، $۲۵۶=۴ \times ۴ \times ۴ \times ۴$ آرایش پارامتری وجود خواهد داشت. تمامی این ترکیبات (معادلات) همراه با ۲ تکرار برای هر کدام مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. بنابراین، $۵۱۲ = ۲۵۶ \times ۲$ اجرای منحصربه‌فرد انجام می‌شود. در واقع با تنظیمات پارامتری در فرآیندهای مرتبط با شبیه‌سازی روند تکامل یک ساختار جمعیتی ایجاد می‌شود و براساس قوانین انتخاب، تلفیق و جهش، جمعیت پرورش داده می‌شوند. سپس جمعیت پرورش‌یافته ارزیابی شده و در نهایت تعیین می‌شود که کدامیک از آن‌ها در جمعیت جدید ابقا شود. شرط توقف در برنامه‌نویسی ژنتیک و شبیه‌سازی روند تکامل ساختار جمعیتی بیشترین شایستگی در نظر گرفته شد. یعنی برنامه زمانی متوقف شد که بهترین مقدار شایستگی حاصل از تابع شایستگی یا برازندگی مشخص شد. تابع شایستگی در تحقیق حاضر برابر بود با افزایش یا بیشینه‌سازی مقدار مشاهده‌شده تولید برنج، که در این صورت تابع شایستگی برابر بود با رابطه (۸):

$$r(i, t) = \sum |s(i, j) - c(j)| \quad (8)$$

جایی که $s(i, j)$ مقدار حاصل از برنامه i برای معیار بیشینه‌سازی مقدار مشاهده‌شده j ، $C(j)$ مقدار محاسباتی برای این معیار در بازه زمانی $t = 5$ سال و r بیانگر میزان تابع شایستگی بود.

- 1- Root Mean Square Error
- 2- Coefficient of determination
- 3- Mean Absolute Percentage Error
- 4- Efficiency Factor

نهاده مهم مصرفی مورد استفاده قرار می گیرد. مطالعه [Gu and Yang \(2022\)](#) نیز نشان داده است که کود نیترا، به عنوان یکی از ارکان مدیریت مدرن کشاورزی، نقش مهمی در افزایش عملکرد محصول ایفا می کند و در زراعت برنج به عنوان راهکاری کلیدی برای تأمین نیازهای جمعیت در حال رشد محسوب می شود.

در ارقام محلی میانگین مصرف سموم شیمیایی برابر با ۲/۷۰ درصد مشاهده شد. این میزان در ارقام پرمحصول برابر با ۲/۵۴ درصد بود که نشان از مصرف بیشتر ۶/۲۹ درصدی در ارقام محلی نسبت به ارقام پرمحصول دارد. میانگین مصرف انرژی سوخت و برق در رقم محلی ۸/۸۱ درصد و در رقم پرمحصول ۸/۳۱ درصد بود. میانگین انرژی مصرفی ماشین های کشاورزی ۲/۰۷ درصد در رقم محلی و ۱/۹۱ درصد در رقم پرمحصول بوده است. نتایج حاکی از آن بود که در مزارع تحت کشت ارقام محلی، میانگین انرژی مصرفی پمپ آب در رقم محلی ۸/۶۷ درصد و در رقم پرمحصول ۷/۱۸ مترمکعب بر هکتار بوده است.

در بررسی مجموع انرژی مصرفی و انرژی حاصل از تولید شلتوک در مزارع ارقام محلی و پرمحصول، نتایج نشان دهنده تفاوت قابل توجهی بین دو نوع رقم مورد مطالعه بود. در مزارع کشت ارقام محلی، میانگین انرژی مصرفی برابر با ۴۱۰۸۱/۴ مگاژول بوده است، در حالی که میانگین انرژی حاصل از تولید شلتوک در این مزارع به ۲۳۷۷۱/۹ مگاژول می رسد. در مقابل، میانگین انرژی مصرفی در مزارع ارقام پرمحصول ۴۱۱۱۸/۸ مگاژول برآورد شده است، در حالی که میانگین انرژی حاصل از شلتوک تولیدی در این مزارع برابر با ۴۲۲۲۰/۰۴ مگاژول بوده است.

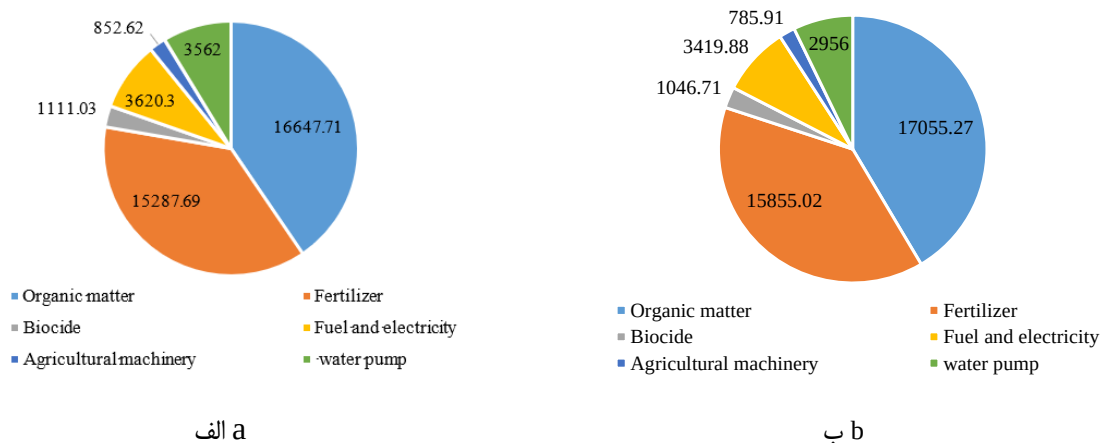
جدول ۵ شاخص های انرژی مربوط به دو نوع رقم محلی و پرمحصول را نشان می دهد. نوع رقم پرمحصول در همه شاخص های انرژی عملکرد بهتری نسبت به نوع رقم محلی داشت. شاخص نسبت انرژی در رقم پرمحصول ۷۷/۵ درصد نسبت به رقم محلی از خود بهبود نشان داد. شاخص های بهره وری انرژی و انرژی ویژه در ارقام پرمحصول نسبت ارقام محلی به ترتیب ۰/۰۳ به ازای هر مگاژول و ۱۱/۱۲ به ازای هر کیلوگرم بهتر بود. علاوه بر این، افزوده خالص انرژی در رقم پرمحصول نسبت به رقم محلی بیش از ۱۵ برابر بهبود نشان داد. شاخص های نسبت انرژی و بهره وری انرژی بالاتر، و انرژی ویژه و افزوده خالص انرژی کمتر در نوع رقم پرمحصول نشان می دهد که ارقام پرمحصول فجر و شیرودی به لحاظ مصرف انرژی بهینه است. در تحقیق مشابه نسبت انرژی، بهره وری انرژی، انرژی ویژه و افزوده خالص انرژی برای محصول نیشکر به ترتیب ۱/۵۲، ۰/۰۶، ۱/۶۵ و ۴۸۲۲۳/۹- برآورد شد ([Haroni, Sheikhdavoodi, & Kiani Deh Kiani, 2018](#))؛ در پژوهش ایشان، مصرف بالای نهاده ها، به ویژه کود ازت و برق، عامل کاهش افزوده خالص انرژی بیان شد.

در رابطه های (۹) تا (۱۲)، $\bar{A}_i$ ، P_i ، $\bar{P}_i$ به ترتیب مقادیر پیش بینی، محاسباتی، میانگین مقدار محاسباتی و میانگین مقدار پیش بینی (در این تحقیق مدل MGP) برای i -مزرعه می باشد. بهترین عملکرد مدل ها برای تخمین مجموعه داده ها، زمانی به دست می آید که معیار خطا MAPE حداقل و نزدیک به صفر و معیارهای عملکردی شامل EF و R^2 حداکثر و نزدیک به یک باشد. ایجاد حداقل اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر پیش بینی شده دقت مدل برنامه نویسی ژنتیک را نشان می دهد. به طور معمول در روش های محاسبات نرم در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب از ۸۰ و ۲۰ درصد از مجموعه داده ها به صورت تصادفی استفاده می شود. در انتخاب تصادفی داده ها، احتمال بررسی نشدن برخی داده ها وجود دارد و ممکن است که نتایج مرحله های آموزش و آزمون در هر بار انتخاب مجموعه داده ها، متفاوت باشد. بنابراین در این مطالعه، از روش اعتبارسنجی متقاطع چندلایه ای^۱ استفاده شد. در این روش ابتدا مجموع داده ها به طور تصادفی مرتب شده و سپس به k (در این مطالعه ۵) زیرمجموعه دسته بندی شدند. یک زیرمجموعه برای آزمون و $k-1$ زیر مجموعه برای آموزش مدل استفاده شد. این رویه ۲۰ بار تکرار شد و در پایان میانگین و انحراف معیار شاخص های عملکردی مدل در دو مرحله محاسبه شد. از بین ۱۰۰ ($5 \times 20 = 100$) مجموعه، یک مجموعه به عنوان بهترین مجموعه داده تولید شده انتخاب شد. این مجموعه داده ها دارای دامنه تغییرات برابر با دامنه تغییرات کل مجموعه داده ها بوده و نیز عملکردی قابل قبول در مرحله های آموزش و آزمون می باشد.

نتایج و بحث

نتایج بررسی انرژی

در مزارع مورد بررسی، ارقام محلی هاشمی و علی کاظمی و ارقام پرمحصول فجر و شیرودی (شکل ۴) سهم قابل توجهی از کل انرژی مصرفی نهاده ها را به مواد آلی، به عنوان منبعی غنی از ترکیبات ازت (نیترا)، فسفات و پتاس، اختصاص داده اند. یافته ها نشان می دهد که این سهم در میان نهاده های مصرفی، در مزارع تحت کشت ارقام محلی به ۴۰/۵۲ درصد رسیده و بالاترین میانگین را به خود اختصاص داده است. در مزارع کشت ارقام پرمحصول نیز مواد آلی همچنان نقش مهمی در مصرف نهاده ها دارند، به گونه ای که سهم انرژی مصرفی آن ها به ۴۱/۴۷ درصد می رسد. پس از مواد آلی، کود شیمیایی در ارقام محلی ۳۷/۲۱ درصد و ارقام پرمحصول به میزان ۳۸/۵۵ بوده است که سهم چشم گیری را از میانگین انرژی مصرفی داشته اند. این مقادیر نشان می دهد که کود شیمیایی به عنوان یک



شکل ۴- میانگین انرژی ورودی در (الف) مزارع شلتوک محلی و (ب) مزارع شلتوک پرمحصول (MJ ha^{-1})
Fig.4. Average input energy in (a) local paddy farms, and (b) high-yielding paddy farms (MJ ha^{-1})

جدول ۵- مقایسه مقدار میانگین شاخص‌های انرژی در دو رقم
Table 5- Comparison of average value of energy indices in two cultivars

شاخص‌های انرژی Energy indices	واحد Unit	محلی Local	پرمحصول High yielding
نسبت انرژی Energy ratio	-	0.578	1.026
بهره‌وری انرژی Energy productivity	kg MJ^{-1}	0.039	0.069
انرژی ویژه Specific energy	MJ kg^{-1}	25.43	14.31
افزوده خالص انرژی Net energy gain	MJ ha^{-1}	-17309.5	1101.24

پرمحصول ارائه شده است. بهترین شرایط مدل زمانی حاصل می‌شود که با استفاده از داده‌های کمتر، تخمین‌های دقیق‌تری ارائه دهد و به عبارت دیگر، از تعمیم‌پذیری بالایی برخوردار باشد. بر اساس جدول ۶ و ۷ مدل برنامه‌نویسی ژنتیک با داشتن ۶۵ درصد از مجموع داده‌ها توانست نتایج تقریباً مشابه با ۸۰ درصد از مجموع داده‌ها ایجاد نماید. با کاهش اندازه مجموعه آموزش، نتایج مرحله آموزش بهبود یافت. ولی نتایج مرحله آزمون ضعیف‌تر شد، زیرا قابلیت تعمیم‌پذیری شبکه کاهش یافت. نتایج این تحقیق، در مقایسه با مطالعه مشابه با وجود استفاده از مجموعه داده‌های کوچک‌تر، عملکرد بهتری از نظر دقت و صحت مدل نشان داد (Sharifi, Hafezi & Aghkhani, 2025).

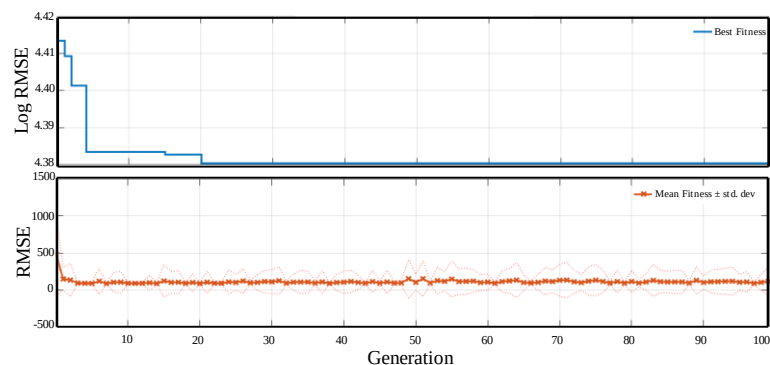
به ترتیب در شکل‌های ۶ پراکندگی مقادیر عملکرد پیش‌بینی شده و محاسباتی برای رقم محلی و پرمحصول آمده است. نتایج موید آن است که توافق بین مقادیر پیش‌بینی شده و محاسباتی در مرحله آموزش از مرحله آزمون بیشتر شده است؛ زیرا ضریب تبیین خط

نتایج مدل‌سازی

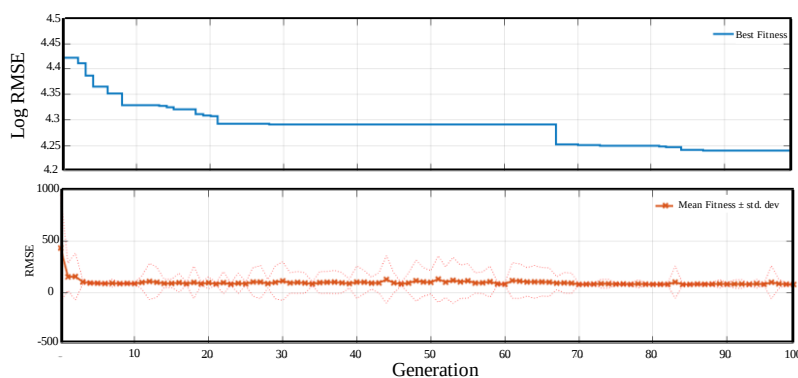
اجرای مدل برنامه‌نویسی ژنتیک نشان داد که پس از ۱۰۰ تکرار (نسل)، همگرایی حاصل شده و مدل به راه‌حل بهینه دست یافته است. شکل ۵ بهترین و میانگین تناسب را برحسب خطای مدل (RMSE و Log RMSE) در رقم محلی و در رقم پرمحصول نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تکرارها، میزان خطا به تدریج کاهش یافته و در نهایت به مقدار ثابتی رسیده است. این کاهش تدریجی خطا نشان‌دهنده بهبود مستمر مدل در طول فرآیند آموزش و تنظیم پارامترها است.

نتایج حاصل از دو مرحله آموزش و آزمایش در ارزیابی تعمیم‌پذیری مدل برنامه‌نویسی ژنتیک با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع بر اساس مقادیر مختلف مجموعه آموزش (۵۰ تا ۸۰ درصد از مجموع داده‌ها) در جدول ۶ برای رقم محلی و در جدول ۷ برای رقم

رگرسیون در داده های مرحله آموزش بالاتر از مقدار آن در مرحله آزمون می باشد. همچنین داده های خارج از دو خط $+10\%$ و -10% مشاهده نشد. این مورد نشان می دهد که مجموع داده ها در محدوده قابل قبول قرار دارند.



الف



ب

شکل ۵- مقدار خطای مدل در (الف) رقم محلی و (ب) رقم پرمحصول

Fig.5. Model error in (a) the local cultivar, and (b) the high-yielding cultivar

جدول ۶- بررسی قابلیت تعمیم پذیری مدل با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع برای رقم محلی

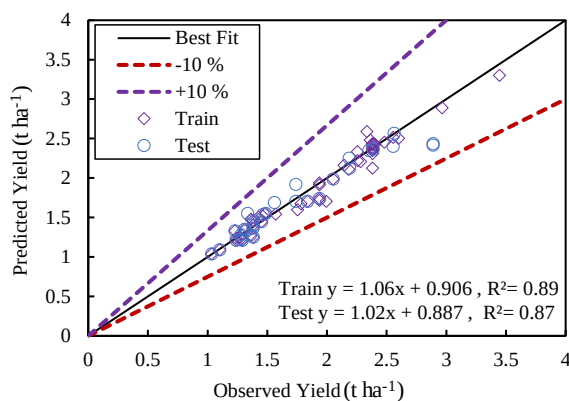
Table 6- Evaluating the generalization capability of the model using the cross-validation method in the local cultivar

درصد داده های آموزش یافته TS (%)	مرحله آموزش Train Phase				مرحله آزمون Test Phase			
	R^2 ($\bar{x} \pm sd$)	EF ($\bar{x} \pm sd$)	RMSE ($\bar{x} \pm sd$)	MAPE ($\bar{x} \pm sd$)	R^2 ($\bar{x} \pm sd$)	EF ($\bar{x} \pm sd$)	RMSE ($\bar{x} \pm sd$)	MAPE ($\bar{x} \pm sd$)
80	0.88 ± 0.1	0.90 ± 0.4	32.31 ± 5.3	10.02 ± 0.6	0.91 ± 0.0	0.92 ± 0.0	28.1 ± 7.8	10.55 ± 0.8
75	0.88 ± 0.0	0.90 ± 0.1	32.31 ± 5.1	10.02 ± 0.7	0.91 ± 0.2	0.92 ± 0.1	28.2 ± 7.9	10.56 ± 0.4
70	0.89 ± 0.1	0.90 ± 0.2	31.98 ± 5.2	10.02 ± 0.2	0.91 ± 0.1	0.92 ± 0.2	25.0 ± 6.0	10.51 ± 0.2
65	0.89 ± 0.1	0.90 ± 0.5	31.91 ± 6.4	10.02 ± 0.2	0.91 ± 0.4	0.93 ± 0.5	22.5 ± 5.0	10.50 ± 0.7
60	0.89 ± 0.1	0.90 ± 0.1	31.92 ± 5.2	10.03 ± 0.3	0.89 ± 0.5	0.91 ± 0.2	32.0 ± 7.3	12.55 ± 0.8
55	0.89 ± 0.1	0.90 ± 0.0	31.91 ± 5.0	10.02 ± 0.5	0.85 ± 0.9	0.90 ± 0.0	35.0 ± 7.1	13.54 ± 0.6
50	0.89 ± 0.1	0.90 ± 0.1	31.91 ± 4.4	10.02 ± 0.2	0.86 ± 0.4	0.90 ± 0.1	36.0 ± 7.0	13.51 ± 0.9

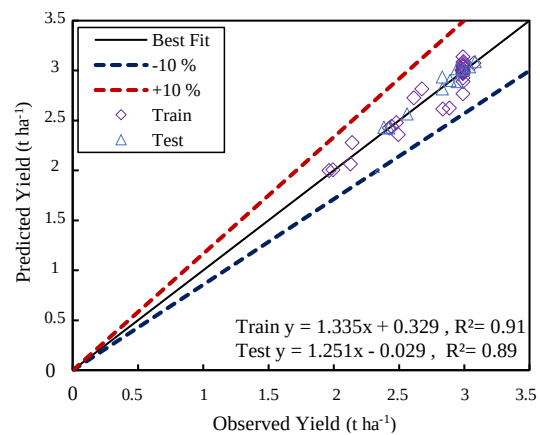
جدول ۷- بررسی قابلیت تعمیم‌پذیری مدل با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع برای ارقام پر محصول

Table 7- Evaluating the generalization capability of the model using the cross-validation method in the high-yielding cultivar

درصد داده‌های آموزش یافته TS (%)	مرحله آموزش Train Phase				مرحله آزمون Test Phase			
	R ² ($\bar{x} \pm sd$)	EF ($\bar{x} \pm sd$)	RMSE ($\bar{x} \pm sd$)	MAPE ($\bar{x} \pm sd$)	R ² ($\bar{x} \pm sd$)	EF ($\bar{x} \pm sd$)	RMSE ($\bar{x} \pm sd$)	MAPE ($\bar{x} \pm sd$)
80	0.84±0.1	0.86±0.0	15.01±2.5	8.52±1.1	0.95±0.0	0.86±0.0	18.1±5.1	9.50±0.9
75	0.84±0.0	0.86±0.3	15.01±2.5	8.52±1.0	0.95±0.1	0.86±0.0	18.3±5.2	9.53±0.5
70	0.84±0.1	0.86±0.3	15.05±1.9	8.52±1.1	0.95±0.2	0.86±0.1	18.5±5.1	9.48±0.1
65	0.84±0.1	0.86±0.0	15.00±1.9	8.52±1.0	0.96±0.4	0.86±0.0	18.0±5.2	9.41±0.6
60	0.84±0.1	0.86±0.1	15.00±2.0	8.51±1.1	0.94±0.2	0.82±0.2	19.0±5.1	9.57±0.7
55	0.84±0.0	0.86±0.1	15.01±1.8	8.51±1.1	0.93±0.3	0.81±0.1	19.1±5.0	9.59±0.9
50	0.84±0.2	0.86±0.1	15.00±2.0	8.51±1.0	0.91±0.8	0.80±0.2	19.1±5.3	9.60±0.7



الف a



ب b

شکل ۶- پراکندگی مقادیر محاسباتی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد در (الف) رقم محلی و (ب) رقم پرمحصول

Fig.6. Cross-correlation of the observed and predicted yield values in (a) the local cultivar and (b) the high-yielding cultivar

شده است. در این روش حذف هریک از این متغیرهای ورودی، اثر منفی بر کارایی پیش‌بینی مدل برنامه نویسی ژنتیک داشت. براساس نتایج جدول ۹ می‌توان گفت که متغیر مواد آلی مانند کمپوست، بذر و کاه و کلش برنج مهم‌ترین عامل موثر در برآورد عملکرد شلتوک در هر دو رقم می‌باشد. در پژوهش شهیدی کومله و همکاران (Shahdi, Kumleh, Seyedi, Haghighi Hasanalideh & Karamniya, 2021) استفاده از کودهای حیوانی عامل بسیار تاثیرگذار در افزایش عملکرد ارقام محلی و پرمحصول تلقی شده است. نتایج تحقیق صادقی (Sadeghi, 2023)، نشان داد که استفاده از کود حیوانی و کمپوست تأثیر به‌سزایی در کاهش مشکلات ناشی از مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی دارد. این مواد با جلوگیری از آلودگی منابع تجدیدپذیر، بهبود حاصل‌خیزی خاک، افزایش دسترسی و جذب عناصر غذایی، و تولید محصولی باکیفیت و سالم از نظر ویژگی‌های ارگانیک، نقش مهمی ایفا می‌کنند. پس از متغیر مواد آلی، متغیر سوخت و برق در برآورد میزان عملکرد شلتوک حائز اهمیت شد. این

معادلات برنامه‌نویسی ژنتیک به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی عملکرد ارقام محلی و پرمحصول در جدول ۸ آورده شده است. عمق درخت معادله برنامه‌نویسی ژنتیک از ۴ به ۱۲ افزایش یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معادله به‌دست‌آمده در عمق ۱۲ در هر دو رقم با وجود دقت بالا نسبت به سایر عمق‌ها پیچیده و دارای کمترین ضریب تبیین بود. در رقم محلی بیشترین ضریب تبیین در عمق درخت ۴ به میزان ۰/۹۸ و این میزان در رقم پرمحصول ۰/۹۶ بود. ساختار ساده‌تر در عمق ۴ منجر به رابطه ریاضی ساده‌تری شد که از این نظر با نتایج تحقیق هوشیار و اشرف طالش (Hushyar & Ashraf Talesh, 2016) همخوانی داشت.

برای بررسی اثرات هریک از شش متغیر مستقل ماشین‌های کشاورزی، کودهای شیمیایی، سوخت‌ها و برق، مواد آلی، سموم شیمیایی و پمپ آب بر متغیر وابسته برآورد میزان عملکرد شلتوک از روش تحلیل حساسیت استفاده شد. نتایج این روش در جدول ۹ آورده

متغیر یکی از مهم ترین نهاده های تعیین کننده در برآورد عملکرد محصولات کشاورزی به شمار می رود. نتایج تحقیق مشابه نشان داد که به ازای مصرف یک مگاژول سوخت و برق به ترتیب ۱/۸۸ و ۰/۵۸ کیلوگرم عملکرد مرکبات افزایش می یابد (Aghkhani, Ahmadipour, Soltanali, & Rohani, 2018).

متغیرهای کودها و سموم شیمیایی در اولویت بعدی قرار گرفتند و در نهایت، ماشین های کشاورزی و پمپ آب در رتبه های بعدی جای گرفتند.

جدول ۸- معادلات برنامه نویسی ژنتیک برای ارقام محلی و پرمحصول

Table 8- Genetic programming equations for local and high-yielding cultivar

رقم محلی Local cultivar		
عمق درخت Tree depth	معادله Equation	ضریب تبیین R ²
4	$P = \log AM + 0.66FE \times 2.03FE \times \sin 0.28B + \sqrt{0.2WP}$	0.95
8	$P = \sin 0.01AM \times \tanh 1.69FE \times 5.01OM + \cos 10WP + 0.93$	0.91
10	$P = \log AM \times 0.33FE + 3.66OM \times 5.62B + 0.24WP$	0.90
12	$P = \tanh 12AM + \log 0.3FE + 0.2FE \times \sqrt{5.3B} + \sin 0.2WP$	0.86
رقم پرمحصول High-yielding cultivar		
عمق درخت Tree depth	معادله Equation	ضریب تبیین R ²
4	$P = \sqrt{2.32AM} \times 0.52FE - \log 0.14OM \times 2.43B \times 15.59WP - 0.23$	0.94
8	$P = \log 2.55AM \times \sqrt{35.4FE} + \cos 61.5OM + 8.82B + \sin 0.47WP + 0.33$	0.90
10	$P = \sqrt{\log 0.32AM \times 1.22FE} \times 8.85OM + \sin 15.36B + \cos 3.2WP$	0.90
12	$P = 55.32AM \times 10.66FE \times 67.22FE + \cos 20.5OM \times 0.2B$	0.89

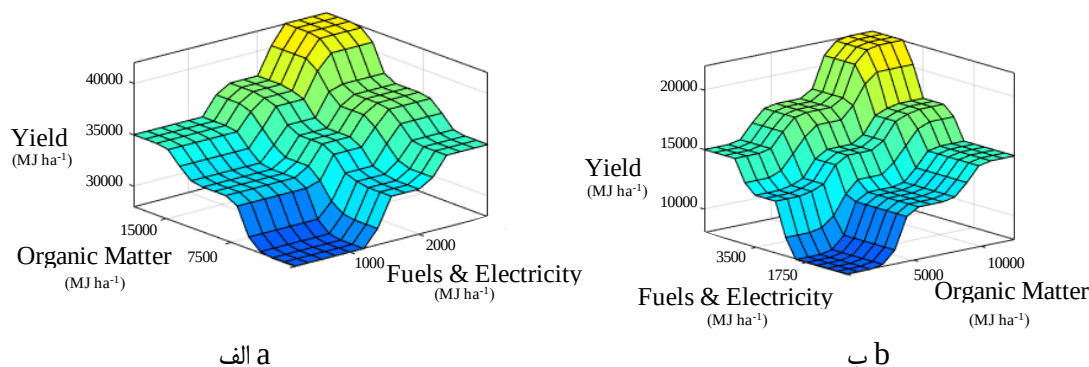
جدول ۹- تحلیل حساسیت مدل MGP در تخمین عملکرد شلتوک

Table 9- Sensitivity analysis of the MGP model in estimating paddy yield

متغیرهای ورودی variables Input	مرحله آموزش Train Phase				مرحله آزمون Test Phase			
	RMSE		R ²		RMSE		R ²	
	پرمحصول high-yielding	محلی local	پرمحصول high-yielding	محلی Local	پرمحصول high-yielding	محلی local	پرمحصول high-yielding	محلی Local
All	15.01	14.33	0.85	0.82	18.22	13.28	0.91	0.88
All-AM	32.10	32.63	0.83	0.84	32.14	32.87	0.85	0.89
All-Fe	36.33	36.10	0.80	0.81	33.80	32.55	0.80	0.81
All-FE	37.02	36.22	0.79	0.80	36.56	32.20	0.79	0.80
All-OM	40.27	39.91	0.77	0.78	40.30	32.37	0.78	0.78
All-B	33.28	33.33	0.82	0.82	33.12	33.13	0.81	0.82
All-WP	30.99	30.63	0.88	0.86	32.90	31.22	0.89	0.90

نتایج روش سطح پاسخ برای ارقام پرمحصول و محلی در شکل ۷ نشان داده شده است که به بررسی تأثیر متقابل مواد آلی و مصرف سوخت و برق بر عملکرد محصول برحسب مگاژول بر هکتار پرداخته است. بر این اساس عملکرد بیشینه، با مقدار متوسط تا بالای هر دو

متغیر ورودی به دست آمد. در هر دو نوع رقم شلتوک، عملکرد بیشینه در سطوح بالاتری از مواد آلی مشاهده شد. در مجموع، این تحلیل بیانگر آن است که برای دستیابی به بیشترین عملکرد، بهینه سازی همزمان مواد آلی و سوخت و برق مصرفی ضروری است.



شکل ۷- نمودار سطح پاسخ برای (الف) رقم پرمحصول و (ب) رقم محلی
Fig.7. Response surface methodology for (a) high-yield cultivar and (b) local cultivar

نتیجه‌گیری

میزان در رقم پرمحصول ۰/۹۴ بود. ساختار ساده‌تر در عمق ۴ منجر به رابطه ریاضی ساده‌تری شد. در پایان به بررسی اثرات هریک از شش متغیر مستقل بر متغیر وابسته عملکرد شلتوک پرداخته شد که متغیر مواد آلی مانند کمپوست، بذر و کاه و کلش برنج مهم‌ترین عامل موثر در برآورد عملکرد شلتوک در هر دو رقم بیان شد. با توجه به اهمیت بالای مواد آلی مانند کمپوست، بذر و کاه و کلش برنج در برآورد عملکرد شلتوک، به کشاورزان پیشنهاد می‌شود از این منابع به‌صورت هدفمند و منظم در مدیریت مزرعه بهره‌گیرند. استفاده از بذرهایی با کیفیت، گواهی شده و سازگار با شرایط منطقه، به‌کارگیری کمپوست و حفظ بقایای گیاهی در خاک می‌تواند به بهبود ساختار خاک، افزایش حاصلخیزی و ارتقای ظرفیت نگهداری آب منجر شود. همچنین، ترکیب مدیریت مواد آلی با کودهای شیمیایی و بهره‌گیری از دانش فنی به‌روز از طریق مشاوره با کارشناسان و شرکت در دوره‌های آموزشی، نقش مؤثری در افزایش پایداری و عملکرد محصول خواهد داشت.

سپاسگزاری

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

مشارکت نویسندگان

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

با توجه به توجه جهانی به مسئله انرژی در کشاورزی و اهمیت انرژی‌محور بودن این حوزه، همراه با روند رو به رشد مکانیزاسیون و ضرورت ایجاد تعادل در مصرف نهاده‌های کشاورزی، برقراری توازن در تولید محصولات کشاورزی امری حیاتی است. از این رو، هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه انرژی و مدل‌سازی عملکرد ارقام محلی هاشمی و علی کاظمی و پرمحصول فجر و شیروودی در شهرستان رشت بود. میانگین انرژی حاصل از تولید ارقام محلی شلتوک برابر با ۲۳۷۷۱/۹ مگاژول بود در حالی که میانگین انرژی مصرفی در این ارقام به ۴۱۰۸۱/۴ مگاژول رسید. در مقابل، میانگین انرژی مصرفی در مزارع ارقام پرمحصول ۴۱۱۱۸/۸ مگاژول بود در حالی که میانگین انرژی حاصل از شلتوک تولیدی در این مزارع برابر با ۴۲۲۲۰/۰۴ مگاژول بوده است. نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی ویژه در ارقام پرمحصول نسبت به ارقام محلی به‌ترتیب ۷۶/۴۷، ۷۶/۹۲، ۷۶/۷۰ درصد و شاخص افزوده خالص انرژی بیش از ۱۵ برابر از خود بهبود نشان دادند. مدل برنامه‌نویسی ژنتیک پس از ۱۰۰ تکرار به همگرایی رسید و راه‌حل بهینه را ارائه داد. تغییرات بهترین و میانگین تناسب نتایج حاکی از آن بود که با افزایش تکرارها، میزان خطا به‌تدریج کاهش یافته و در نهایت به مقدار ثابتی رسید، که بیانگر بهبود مستمر مدل در فرآیند آموزش و تنظیم پارامترها بود. با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع بر اساس مقادیر مختلف مجموعه آموزش نتایج نشان داد مدل برنامه‌نویسی ژنتیک با داشتن ۶۵ درصد از مجموع داده‌ها می‌تواند نتایج تقریباً مشابه با ۸۰ درصد از مجموع داده‌ها ایجاد نماید که ۶۵ درصد از مجموعه داده‌ها به‌عنوان مجموعه برتر انتخاب شد. ضریب تبیین خط رگرسیونی در داده‌های مرحله آموزش بالاتر از مقدار آن در مرحله آزمون در هر دو نوع رقم مورد بررسی بود. در بررسی معادلات برنامه‌نویسی ژنتیک برای بررسی دقت مدل پیشنهادی عمق درخت از ۴ به ۱۲ افزایش یافت. در رقم محلی بیشترین ضریب تبیین در عمق درخت ۴ به میزان ۰/۹۵ و این

مصطفی کیانی ده کیانی: مفهوم سازی، مشاوره فنی، اعتبار سنجی،
تصویر سازی نتایج، ویرایش متن
سمیه جنت رستمی: مفهوم سازی، مشاوره فنی، تصویر سازی
نتایج، ویرایش متن

Resources

1. Aghkhani, M. H., Ahmadipour, S., Soltanali, H., & Rohani, A. (2018). Greenhouse gas emissions, energy use, and cost analysis of citrus production: A case study of Mazandaran Province. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 4(3), 181-229. (in Persian with English abstract).
2. Ali, M., & Deo, R. C. (2020). Modeling wheat yield with data-intelligent algorithms: Artificial neural network versus genetic programming and minimax probability machine regression. In *Handbook of Probabilistic Models*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816514-0.00002-3>
3. Ali, M., Deo, R. C., Downs, N. J., & Maraseni, T. (2018). Cotton yield prediction with Markov Chain Monte Carlo-based simulation model integrated with genetic programming algorithm: A new hybrid copula-driven approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 428-448. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.002>
4. Almassi, M., Kiani, S., & Loveimi, N. (2014). *Principles of Agricultural Mechanization* (5th ed.). Gofteman Andisheh Moaser.
5. Ayoubikia, R., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., Shafiei-Sabet, B. (2019). Optimization of regional water resources allocation in Sefidroud river basin by social equity approach. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 205-218. (in Persian with English abstract).
6. Babaee, M., Maroufpoor, S., Jalali, M., Zarei, M., & Elbeltagi, A. (2021). Artificial intelligence approach to estimating rice yield. *Irrigation and Drainage*, 70(4), 732-742. <https://doi.org/10.1002/ird.2566>
7. Bagheri, S. M., Gheysari, S., Ayoubi, N., & Lavaee. (2013). Silage maize yield prediction using artificial neural networks. *Journal of Plant Production Research*, 19(14), 77-96. (in Persian with English abstract).
8. Barikloo, A., Alamdari, P., Moravej, K., & Servati, M. (2017). Prediction of irrigated wheat yield by using hybrid algorithm methods of artificial neural networks and genetic algorithm. *Journal of Water and Soil*, 31(3), 715-726. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i3.56158>
9. Chauhan, N. S., Mohapatra, P. K. J., & Pandey, K. P. (2006). Improving energy productivity in paddy production through benchmarking: An application of data envelopment analysis. *Energy Conversion and Management*, 47, 1063-1085. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.07.004>
10. Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. New York: John Wiley and Sons Publishing.
11. Gu, J., & Yang, J. (2022). Nitrogen (N) transformation in paddy rice field: Its effect on N uptake and relation to improved N management. *Crop and Environment*, 1(1), 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.03.003>
12. Gummert, M., Cabardo, C., Quilloy, R., Aung, Y. L., Thant, A. M., Kyaw, M. A., Labios, R., Htwe, N. M., & Singleton, G. R. (2020). Assessment of post-harvest losses and carbon footprint in intensive lowland rice production in Myanmar. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76639-5>
13. Guo, Y. (2024). Integrating genetic algorithm with ARIMA and reinforced random forest models to improve agriculture economy and yield forecasting. *Soft Computing*, 28, 1685-1706. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09516-8>
14. Hafezi, N., Bahrami, H., Sheikh Davoodi, M. J., & Alavi, S. E. (2020). Hybrid artificial neural network with metaheuristic algorithms for predicting sugarcane yield. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(3), 515-526. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.290905.665234>
15. Haroni, S., Sheikhdavoodi, M. J., Kiani Deh Kiani, M. (2018). Application of artificial neural networks for predicting the yield and GHG emissions of sugarcane production. *Journal of Agricultural Machinery*, 8(2), 389-401. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v8i2.52870>
16. Hushyar, N., & Ashraf Talesh, S. S. (2016). Optimum prediction of the T-shape mixing chamber behavior based on multi-objective genetic programming. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), 612-616. (in Persian with English abstract).
17. Janatrostami S, & Mahmoudpour H. (2020). Environmental assessment of groundwater pumping by using water and energy nexus. *Journal of Water and Soil Science*, 23 (4), 227-240. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jwss.23.4.40841>
18. Janatrostami, S., Kholghi, M., & Bozorg Haddad, O. (2010). Management of reservoir operation system using improved harmony search algorithm. *Water and Soil Science*, 20(3), 61-71. (in Persian with English abstract).
19. Kavooosi Kalashami, M., Zanipoor, M., Yavari, G., & Adibi, S. (2017). Evaluation of the effect of national plan implementation of increasing rice production on technical efficiency of paddy farms (A case study: Pirbazar region of Rasht city). *Cereal Research*, 7(2), 235-246. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22124/c.2017.2549>
20. Kima, A. S., Traore, S., Wang, Y. M., & Chung, W. G. (2014). Multi-genes programing and local scale regression for analyzing rice yield response to climate factors using observed and downscaled data in Sahel. *Agricultural*

- Water Management*, 146, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.007>
21. Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and Biomass Engineering*, 5, 330.
 22. Lu, M., Bi, Y., Xue, B., Hu, Q., Zhang, M., Wei, Y., Yang, P., & Wu, W. (2022). Genetic programming for high level feature learning in crop classification. *Remote Sensing*, 14, 3982. <https://doi.org/10.3390/rs14163982>
 23. Mahmud, T., Datta, N., Chakma, R., Das, U. K., Aziz, M. T., Islam, M., Salimullah, A. H. M., Hossain, M. S., & Andersson, K. (2024). An approach for crop prediction in agriculture: integrating genetic algorithms and machine learning. *IEEE Access*, 12, 173583-173598. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3478739>
 24. Malashin, I., Tynchenko, V., Gantimurov, A., Nelyub, V., Borodulin, A., & Tynchenko, Y. (2024). Predicting sustainable crop yields: Deep learning and explainable AI tools. *Sustainability*, 16, 9437. <https://doi.org/10.3390/su16219437>
 25. Nassiri, S. M., & Singh, S. (2009). Study on energy use efficiency for paddy crop using data envelopment analysis (DEA) technique. *Applied Energy*, 86(7), 1320-1325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.10.007>
 26. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
 27. Panahi, S., Samadianfard, S., & Nazemi, A. H. (2021). Modeling the yield of rain-fed wheat, barley and alfalfa products using support vector regression and genetic programming. *Journal of Water and Soil Science*, 32(2), 97-111. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/ws.2021.35741.2287>
 28. Peng, X., Guan, X., Zeng, Y., & Zhang, J. (2024). Artificial intelligence-driven multi-energy optimization: promoting green transition of rural energy planning and sustainable energy economy. *Sustainability*, 16, 4111. <https://doi.org/10.3390/su16104111>
 29. Sadeghi, S. M. (2023). Investigating the effect of water stress and different levels of organic and chemical fertilizers on rice yield and its components. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(5), 843-855. (in Persian with English abstract).
 30. Shahdi Kumleh, A., Seyedi S. R., Haghighi Hasanalideh A. R., & Karamniya, S. (2021). Effect of source and application rate of organic fertilizers on grain yield and quality of local and improved rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 23(3), 278-289. (in Persian with English abstract).
 31. Sharifi, S., Hafezi, N., & Aghkhani, M. H. (2025). Investigation and optimization of energy consumption and yield modeling of two rice cultivars using the genetic-artificial bee colony algorithm. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(2), 145-164. <https://doi.org/10.22067/jam.2022.77064.1108>
 32. Taghizadeh Merjerdi, R., Seyed Jalali, S. A., & Sarmadian, F. (2016). Spatial prediction of wheat crop yield using digital soil mapping in Gotvand, Khuzestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(1), 175-184. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.57989>
 33. Taheri-Rad, A., Khojastehpour, M., Rohani, A., & Khoramdel, S. (2017). Assessing the energy consumption efficiency of different long grain rice varieties in Golestan province. *Cereal Research*, 7(1), 51-66. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22124/c.2017.2428>
 34. 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, 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.089>
 35. Tchoukouang, R. D., Onyeaka, H., & Nkoutchou, H. (2024). Assessing the vulnerability of food supply chains to climate change-induced disruptions. *Science of The Total Environment*, 920, 171047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171047>
 36. Tung, C. P., Lee, T. Y., Yang, Y. C., & Chen, Y. J. (2009). Application of genetic programming to project climate change impacts on the population of Formosan Landlocked Salmon. *Environmental Modelling & Software* 24, 1062-1072. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.02.012>
 37. Van-Hung, N., Sander, B. O., Quilty, J., Balingbing, C., Castalone, A. G., Romasanta, R., Alberto, M. C. R., Sandro, J. M., Jamieson, C., & Gummert, M. (2019). An assessment of irrigated rice production energy efficiency and environmental footprint with in-field and off-field rice straw management practices. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53072-x>
 38. Zeinalie, M., Golabi, M. R., Azari, A., & Farzi, S. (2022). The study of the performance of the Modflow conceptual model and the genetic programming simulator meta model in the modeling of the hydrograph of the aquifer (Case Study: Lour-Andimeshk Plain). *Journal of Aqiufer and Qanat*, 1(4), 1-15. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22077/jaaq.2018.1236.1000>

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 353-363

Design and Construction of a Disc Harrow Carrier Chassis in a Soil Bin and Measuring Its Draft Force

H. Shaebani Shesh poli¹, M. Askari^{1*}, D. Kalantari¹

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

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

Received: 14 April 2025

Revised: 27 May 2025

Accepted: 07 July 2025

Available Online: 02 September 2025

How to cite this article:

Shaebani Shesh poli, H., Askari, M., & Kalantari, D. (2026). Design and Construction of a Disc Harrow Carrier Chassis in a Soil Bin and Measuring Its Draft Force. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 353-363. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2025.92582.1372>

Introduction

One of the most important parts of agricultural operations is tillage, which accounts for about 60% of the total energy consumed. Therefore, reducing tillage energy demand by lowering the number of passes through the development of cost-effective machinery is highly essential in modern farming. One of the main implements that helps farmers achieve this is the disc harrow. As the most important secondary tillage tool, the disc harrow improves soil structure, breaks up clods, and increases the penetration of water and air into the soil. However, its optimal performance is influenced by parameters such as disc diameter, disc edge type (toothed or plain), disc gang angle, and tractor forward speed. Soil bins, as controlled environments for testing tillage tools, serve as an ideal alternative to agricultural lands. They allow accurate simulation of field conditions while minimizing the effects of climate change and variable soil properties.

Materials and Methods

The present study was conducted with the aim of designing, constructing, and evaluating a disc harrow carrier chassis in the controlled environment of a laboratory soil bin. First, the design phase was carried out using SolidWorks 2020 software, followed by an analysis of the design performance under maximum load using the von Mises method. The next step was the construction of the design. After construction, the evaluation phase was performed by examining the effects of four independent input variables: forward speed (6.43 and 13.15 m min⁻¹), soil moisture content (2.37 and 13.25 percent on a wet basis), disc edge type (plain or toothed), and disc gang angle (0, 15, and 30 degrees), on the dependent output variable, draft force. Each test was replicated three times, resulting in a total of 72 tests.

Results and Discussion

The results showed that the engineered chassis exhibited sufficient strength during the initial evaluation tests, with all components performing well. The findings indicated that increasing forward speed and disc gang angle led to higher draft force, while higher soil moisture levels reduced draft force. Under low moisture conditions, plain discs generated greater draft force; however, this trend reversed as moisture increased. The highest draft requirement (3.588 N) was observed for plain discs at 2.37% moisture, while the lowest (1.724 N) occurred at 13.25% moisture. At a forward speed of 6.43 m min⁻¹, plain and toothed discs required equal draft, but at 13.15 m min⁻¹, the toothed discs required substantially more draft.

Conclusion

The experiments showed that there was no significant difference in draft force between disc gang angles of 0



Authors retain the copyright. 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.2025.92582.1372>

and 15 degrees. However, increasing the angle from 15 to 30 degrees caused a significant rise in draft force. This indicates that the initial increase in gang angle has a smaller effect, but beyond 15 degrees the impact becomes more pronounced. Therefore, selecting an appropriate disc gang angle can help reduce fuel consumption and improve the productivity of agricultural machinery. Both increasing disc gang angle and forward speed raise draft force because soil resistance to disc movement increases. At higher speeds, the disc must exert more force to cut and move the soil, leading to higher energy consumption and greater equipment wear. Conversely, at lower speeds, draft force decreases, but tillage efficiency may be reduced and plowing uniformity may be affected.

Keywords: Disc, Draft force, Soil bin, Soil-blade interaction, Tillage operation

طراحی و ساخت شاسی حامل هرس بشقابی در محیط انباره خاک و اندازه‌گیری نیروی کششی آن

حسین شعبانی شش پلی^۱، محمد عسکری^{۱*}، داود کلانتری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

چکیده

پژوهش حاضر با هدف طراحی و ساخت شاسی حامل هرس بشقابی در محیط انباره خاک آزمایشگاهی، اجرا شده است. پس از طراحی و ساخت، نیروی کششی مورد نیاز یک گروه ۴ بشقاب هرس بشقابی تحت اثر چهار متغیر مستقل در ورودی شامل سرعت پیشروی در دو سطح (۶/۴۳ و ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه)، رطوبت خاک در دو سطح (۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد بر مبنای وزن تر)، نوع لبه بشقاب در دو سطح (ساده و کنگره‌دار) و زاویه قرارگیری گروه بشقاب در سه سطح (۰، ۱۵ و ۳۰ درجه) اندازه‌گیری شد. نتایج ارزیابی اولیه نشان داد که شاسی طراحی شده از استحکام کافی در آزمون‌ها برخوردار بود. اثر رطوبت خاک، سرعت پیشروی، زاویه گروه بشقاب و اثر متقابل رطوبت در بشقاب همچنین بشقاب در سرعت بر نیروی کششی معنی‌دار بودند. افزایش سرعت پیشروی و زاویه گروه بشقاب موجب افزایش نیروی کششی اما افزایش رطوبت خاک موجب کاهش آن شد. در رطوبت ۲/۳۷ درصد، بشقاب‌های لبه صاف نیروی کشش بیشتری ایجاد کردند، اما در رطوبت ۱۳/۲۵ درصد این تفاوت معکوس شد. بیشترین (۳/۵۸۸ نیوتن) و کمترین (۱/۷۲۴ نیوتن) نیروی کششی مربوط به بشقاب لبه صاف به ترتیب در رطوبت ۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد بود. در سرعت ۶/۴۳ متر بر دقیقه، بشقاب ساده و کنگره‌دار، نیروی کششی تقریباً یکسانی نیاز داشتند اما در سرعت پیشروی ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه، بشقاب لبه کنگره‌دار به نیروی کششی بسیار بیشتری نیاز داشت. این نتایج نشان می‌دهند که تنظیم بهینه سرعت پیشروی، نوع لبه و زاویه گروه بشقاب با توجه به شرایط رطوبتی خاک می‌تواند عملکرد را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: برهمکنش خاک و تیغه، بشقاب، عملیات خاکورزی، مخزن خاک، نیروی کششی

مقدمه

یکی از بخش‌های مهم در کشاورزی، عملیات خاک‌ورزی می‌باشد که سهم بالایی (در حدود ۶۰ درصد) در انرژی مصرفی تولید محصول دارد (Askari, Shahgholi, & Abbaspour-Gilandeh, 2017). امروزه به‌منظور افزایش بهره‌وری عملیات خاک‌ورزی، استفاده از خاک‌ورزهای مرکب فراگیر شده است. این نوع خاک‌ورزها عموماً از چند قسمت مانند تیغه قلمی برای خاک‌ورزی اولیه در بخش جلو و هرس بشقابی و یا غلتک برای خاک‌ورزی ثانویه در بخش عقب تشکیل شده‌اند. از طرف دیگر، هرس بشقابی به عنوان پرکاربردترین ابزار خاک‌ورزی ثانویه، برای تهیه بستر بذر زمین‌هایی که در پاییز یا

بهار شخم خورده‌اند و برای پوشاندن روی بذرهایی که به‌صورت دستپاش کشت می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از هرس بشقابی بعد از عملیات شخم، باعث خرد شدن کلوخه‌ها، بسته شدن محفظه‌های هوا، مخلوط شدن بقایای گیاهی با خاک و محکم کردن خاک زیر بشقاب‌ها می‌شود تا بستر بذر یکنواخت و صافی به‌وجود آورد (Zhang, 2016). با توجه به موارد استفاده متعدد هرس بشقابی، در مجموع این وسیله پس از گاوآهن برگردان‌دار، مهمترین ماشین خاک‌ورزی محسوب می‌شود (Mansouri Rad, 2013).

متأسفانه زارعین حین استفاده از هرس بشقابی باتوجه به دامنه‌ی کاری بالا و پرکاربرد بودن در خاک‌ورزی انواع کشته‌ها و دارا بودن متغیرهای مهم فراوان بدون داشتن آگاهی درست از کارکرد آن، موجب هدررفت فراوان انرژی و بازدهی پایین خاک‌ورزی می‌شوند (Zeng, Chen, & Zhang, 2017).

از طرف دیگر، روش‌های نوین خاک‌ورزی به دنبال کاهش تعداد دفعات خاک‌ورزی به همراه کاهش عبور و مرور درون مزرعه و در

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(Email: m.askari@sanru.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول:

نتیجه کاهش انرژی مصرفی می‌باشد که این امر از طریق انجام پژوهش‌های علمی و شبیه‌سازی خاک‌ورزی درون مزرعه در محیط‌های آزمایشگاهی از قبیل انباره خاک و تحت شرایط کنترل شده صورت می‌پذیرد (Torotwa, Ding, Alele, & He, 2022). از این‌رو در پژوهش حاضر، شاسی حامل هرس بشقابی بر روی انباره خاک موجود در کارگاه گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، طراحی و ساخته شد. همچنین اندازه‌گیری نیروی کششی مورد نیاز هرس بشقابی به‌عنوان ارزیابی اولیه شاسی جدید در سرعت‌های متفاوت پیشروی، رطوبت‌های خاک متفاوت، بشقاب‌های متفاوت و زوایای متفاوت گروه بشقاب انجام شد.

انباره خاک موجود در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری برای شاخه‌های خاک‌ورز ثابت مانند زیرشکن و گاوآهن برگرداندار طراحی شده بود. اطلاعات به‌دست‌آمده از تحقیقات گذشته نشان داد که هرس بشقابی اغلب در مزارع کشاورزی مورد آزمون قرار گرفته و ارزیابی آن در انباره خاک اندک است. در نتیجه در این تحقیق، هرس بشقابی بر روی یک شاسی طراحی‌شده نصب شد به‌طوری‌که شاسی جدید به حامل انباره خاک متصل شد. سپس نیروی کششی مورد نیاز به‌عنوان متغیر خروجی با توجه به تغییرات متغیرهای ورودی شامل رطوبت خاک، نوع بشقاب‌ها (لبه کنگره‌دار و لبه صاف)، زاویه گروه بشقاب و سرعت پیشروی مورد ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور، از چهار بشقاب در غالب یک گروه بشقاب با ایجاد تغییرات در شاسی دستگاه خاک‌ورز و حامل (Carrier) مخزن خاک در انباره خاک مذکور در محیط آزمایشگاهی و مسقف استفاده شد. چالش اصلی در ارزیابی شاسی جدید این بود که آیا می‌توان شرایط اولیه خاک (قبل از تکرار اول تیمار اول) درون مخزن خاک را به گونه‌ای در آزمایش‌ها ثابت نگه داشت که شرایط آزمون در تمامی تیمارها یکسان باشد و به عبارت دیگر داده‌های به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر در شرایط یکسان به‌دست آمده باشند. اگر ثابت ماندن شرایط خاک درون مخزن در تکرارها و تیمارهای مختلف ایجاد گردد، آن‌گاه متغیرهای ورودی مدنظر اعم از رطوبت خاک، نوع لبه بشقاب شامل ساده و کنگره‌دار و ترکیبات متفاوت آن‌ها، زاویه قرارگیری گروه بشقاب‌ها، عمق کاری و سرعت پیشروی، نوع پوشش سطح (خاک یا حاوی بقایای گیاهی) و مانند آن قابل‌تغییر خواهند بود. در آن صورت، اثر آن‌ها بر متغیرهای خروجی مانند نیروهای وارده از طرف خاک بر بشقاب‌ها اعم از افقی، عمودی و جانبی به همراه پروفیل به‌هم‌خوردگی خاک، نحوه برش بقایای گیاهی و غیره مورد بررسی قرار می‌گیرد. در زمینه ارزیابی هرس‌های بشقابی در مزرعه تحقیقات زیادی صورت گرفته است. آی کاس و همکاران (Aykas, Cakir, & Gulsoylu, 2004) اثر سرعت پیشروی و زاویه گروه بشقاب در هرس بشقابی بر شرایط خاک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که

افزایش زاویه گروه بشقاب و سرعت پیشروی، نیروی کششی را افزایش داد. اثر زاویه گروه بشقاب بر نیروی کششی، چشمگیرتر بود. بادگاونکار و همکاران (Badegaonkar, Kamble, & Thakare, 2014) به ارزیابی عملکرد هرس بشقابی در انباره خاک توسط بشقاب‌های ساده و لبه کنگره‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که اثر سرعت پیشروی و نوع لبه بشقاب‌ها بر توان مصرفی موثر بوده و نیروی افقی در بشقاب لبه کنگره‌دار بیشتر از بشقاب ساده بود. اوپادیای و رحمان (Upadhyay & Raheman, 2018) اثرات سرعت، زاویه گروه بشقاب، عمق خاک‌ورزی و شاخص مخروطی (CI) بر نیروی کششی و توان مورد نیاز هرس بشقابی را مورد مطالعه قرار دادند. زنگ و همکاران (Zeng, Chen, & Qi, 2019) با بررسی برش خاک توسط هرس بشقابی با فاصله کم بین بشقاب‌ها با چیدمان‌های مختلف عنوان کردند که این نوع هرس بشقابی (CDH) یک نوع نسبتاً جدید از ابزارهای خاک‌ورزی حفاظتی است. آزمایش‌ها در انباره خاک با استفاده از یک CDH با واحدهای سه‌بشقابی انجام شد. بشقاب‌ها در دو عمق خاک‌ورزی متفاوت عمل می‌کردند. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله بشقاب‌ها از هم، نسبت سطح برش خاک (نسبت سطح آشفته به کل مساحت شیار) کاهش یافت. در مقابل، راندمان برش خاک (حجم برش خاک به‌زای واحد مقدار انرژی مصرف‌شده) در عمق خاک‌ورزی کم، ثابت ماند و در عمق خاک‌ورزی زیاد، افزایش یافت. توروتوا و همکاران (Torotwa, Ding, Makange, Liang, & He, 2021) به ارزیابی عملکرد یک هرس بشقابی با طراحی خاص برای خاک‌ورزی حفاظتی کودپاشی‌شده با کاه پرداختند. آزمایش‌ها درون انباره خاک روی ۳ هرس بشقابی در ۳ عمق خاک‌ورزی (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر) انجام شد. نتایج نشان داد که هرس بشقابی خاص در مقایسه با هرس بشقابی شیاردار ۲۱/۴ درصد کاهش در مقاومت عمودی و ۲۸/۷ درصد کاهش در نیروهای کششی را حاصل می‌کند ($P < 0.05$). باتوجه به منابع در دسترس و در مجموع، مطالعات کمی در خصوص ارزیابی عملکرد هرس بشقابی درون انباره خاک انجام شده است.

پژوهش حاضر با هدف طراحی و ساخت شاسی حامل هرس بشقابی در محیط انباره خاک آزمایشگاهی، اجرا شده است. پس از طراحی و ساخت شاسی جدید، نیروی کششی مورد نیاز یک گروه چهار بشقاب تحت اثر چهار متغیر مستقل در ورودی شامل سرعت پیشروی در دو سطح (۶/۴۳ و ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه)، رطوبت خاک در دو سطح (۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد بر مبنای وزن‌تر)، نوع لبه بشقاب در دو سطح (ساده و کنگره‌دار) و زاویه قرارگیری گروه بشقاب در سه سطح (۰، ۱۵ و ۳۰ درجه) اندازه‌گیری شد.

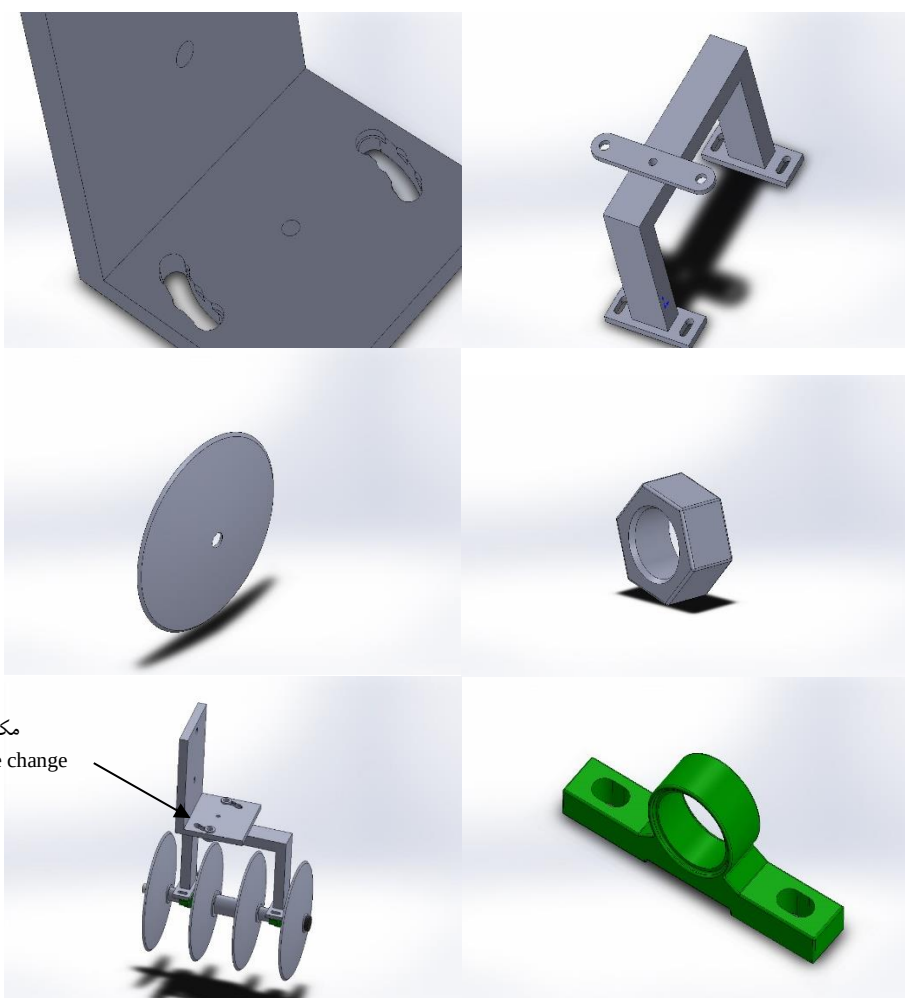
مواد و روش‌ها

طراحی شاسی و ارزیابی استحکام آن در نرم‌افزار

در ابتدا شاسی مورد نظر به همراه بشقاب‌ها، محور بشقاب و سایر اتصالات در نرم‌افزار سالی‌دورک (Solidworks) نسخه ۲۰۲۰ طراحی شدند. طراحی شاسی به نحوی بود که توانایی تغییر زاویه گروه بشقاب همچنین قابلیت اتصال بشقاب از یک عدد تا چهار عدد را داشته باشد (شکل ۱). به‌منظور ارزیابی شاسی طراحی‌شده در نرم‌افزار، با اعمال بیشینه نیروهای وارده بر حسب معیار وان میسز (Von Mises)، تنش‌ها و کرنش‌های (تغییر شکل ناشی از اعمال تنش) بیشینه و کمینه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با تقویت نقاطی که دارای کرنش زیاد بودند، ضریب اطمینان (FOS) بیش از ۲ برای تمامی اجزا

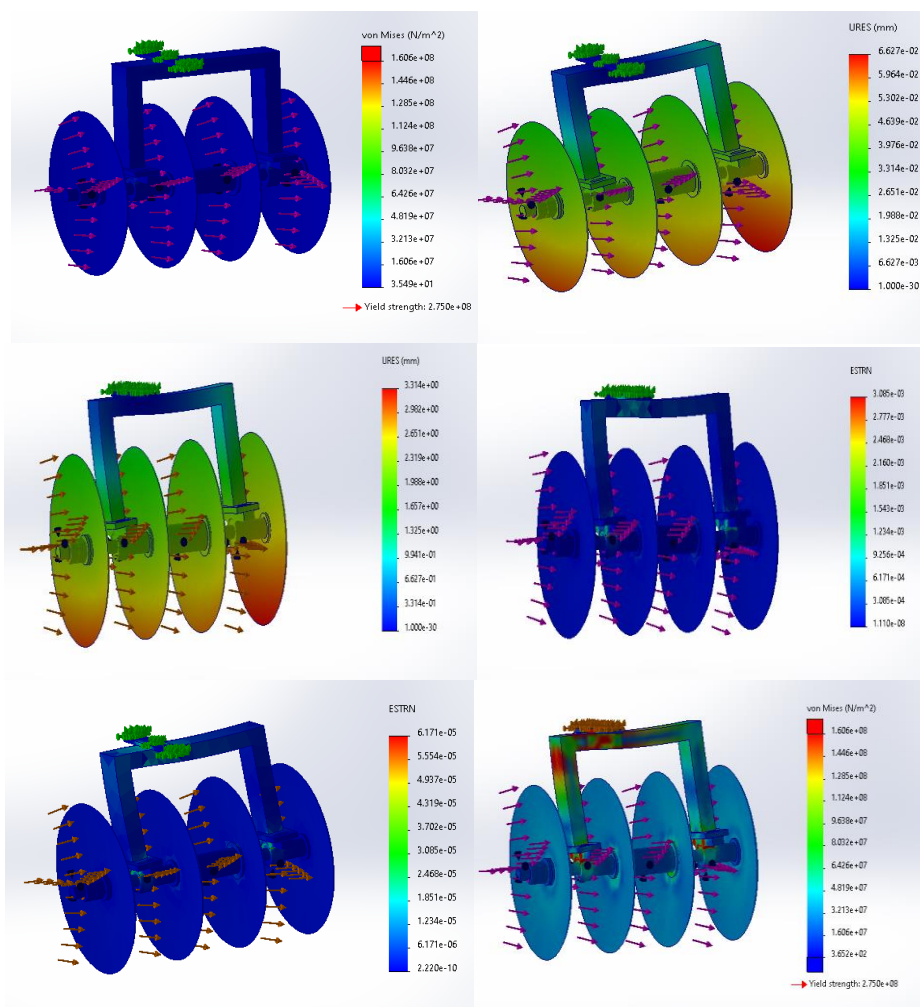
ساخت و نصب شاسی جدید

بعد از مرحله طراحی در نرم‌افزار، تحلیل نیرویی و حصول نتایج اطمینان‌بخش، فرایند ساخت شاسی جدید و نصب آن بر روی انبار خاک انجام شد.



شکل ۱- طراحی شاسی جدید هرس بشقابی، شامل قطعات تشکیل‌دهنده و مونتاژ آن‌ها

Fig. 1. Design of a new chassis for a disc harrow, including the parts and their assembly



شکل ۲- ارزیابی استحکام شاسی طراحی شده

Fig. 2. Evaluation of the designed chassis's strength



شکل ۳- نصب شاسی جدید بر روی حامل مخزن خاک جهت اندازه‌گیری نیروی کششی مورد نیاز بشقاب‌های (a) لبه صاف و (b) لبه کنگره‌دار به همراه (c) لودسل اندازه‌گیری نیروی کششی

Fig. 3. Installation of new chassis on the soil bin carrier for measuring the draft requirement of (a) plain and (b) toothed discs, and (c) draft force loadcell

آزمون اولیه

گروه چهار بشقاب هرس بشقابی تحت اثر پارامترهای ورودی تحت بررسی شامل نوع بشقاب در دو سطح لبه صاف و لبه کنگره‌دار،

آزمون اولیه در قالب اندازه‌گیری نیروی کششی مورد نیاز یک

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) داده‌ها را برای بررسی اثر متغیرهای مستقل شامل رطوبت خاک، نوع لبه بشقاب، سرعت پیشروی و زاویه گروه بشقاب همچنین اثرات متقابل آن‌ها را بر نیروی کششی مورد نیاز نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر رطوبت خاک، سرعت پیشروی، زاویه گروه بشقاب و اثر متقابل رطوبت در بشقاب همچنین بشقاب در سرعت بر نیروی کششی معنی‌دار هستند ($P < 0.01$). در بین عوامل اصلی، نوع بشقاب مورد استفاده در پژوهش حاضر تأثیر معنی‌داری بر میزان نیروی کششی مورد نیاز نداشت. محققین گزارش نموده‌اند که بشقاب‌های کنگره‌دار به دلیل توانایی بیشتر در شکستن کلوخه‌ها و نفوذ به لایه‌های سخت خاک، نیروی کشش بالاتری نیاز دارند. در مقابل، بشقاب‌های لبه صاف نیروی کشش کمتری نیاز دارند که در پژوهش حاضر این گونه نبود. در صورت وجود تفاوت معنی‌دار بین بشقاب‌های لبه صاف و لبه کنگره‌دار از نظر نیروی کششی مورد نیاز، نوع بشقاب باید با توجه به شرایط خاک و هدف از عملیات خاک‌ورزی انتخاب شود تا تعادل مناسبی بین نیروی کششی، مصرف انرژی و کیفیت کار ایجاد گردد. در ادامه به مقایسه میانگین اثرات معنی‌دار پرداخته خواهد شد.

سرعت پیشروی در دو سطح ۶/۴۳ و ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه، زاویه گروه بشقاب در سه سطح ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه و رطوبت خاک در دو سطح ۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد وزنی بر مبنای وزن تر انجام شد. بشقاب‌های لبه‌صاف و لبه‌کنگه‌دار با قطر ۲۵ سانتی‌متر هریک به تعداد ۴ عدد از کارخانه تولید ادوات کشاورزی هادی واقع در شهرستان جویبار تهیه شدند (شکل ۳- A و B). فاصله بین بشقاب‌ها و عمق خاک‌ورزی، ۱۰ سانتی‌متر تنظیم شدند. آزمایش‌ها در انباره خاک دارای ابعاد ۶ متر طول و ۱/۶ متر عرض و ۱ متر عمق و با ۳ تکرار و مجموعاً ۷۲ پیمایش اجرا گردید. روش آماری مورد استفاده در آزمون‌ها در قالب طرح بلوک کامل تصادفی (RCBD) بوده و تمامی متغیرهای مورد آزمون و تعداد سطوح هریک در سه تکرار مطابق استاندارد RNAM نسخه ۱۱۱۸ انجام گرفت. نیروی کششی توسط لودسل نصب‌شده در مسیر انتقال قدرت از موتور الکتریکی به حامل انباره خاک اندازه‌گیری شد (شکل ۳- C). تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰۲۰ انجام شد. به‌علاوه، برای رسم نمودارها از نرم‌افزار EXCEL نسخه ۲۰۱۹ استفاده شد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل مورد بررسی بر نیروی کششی

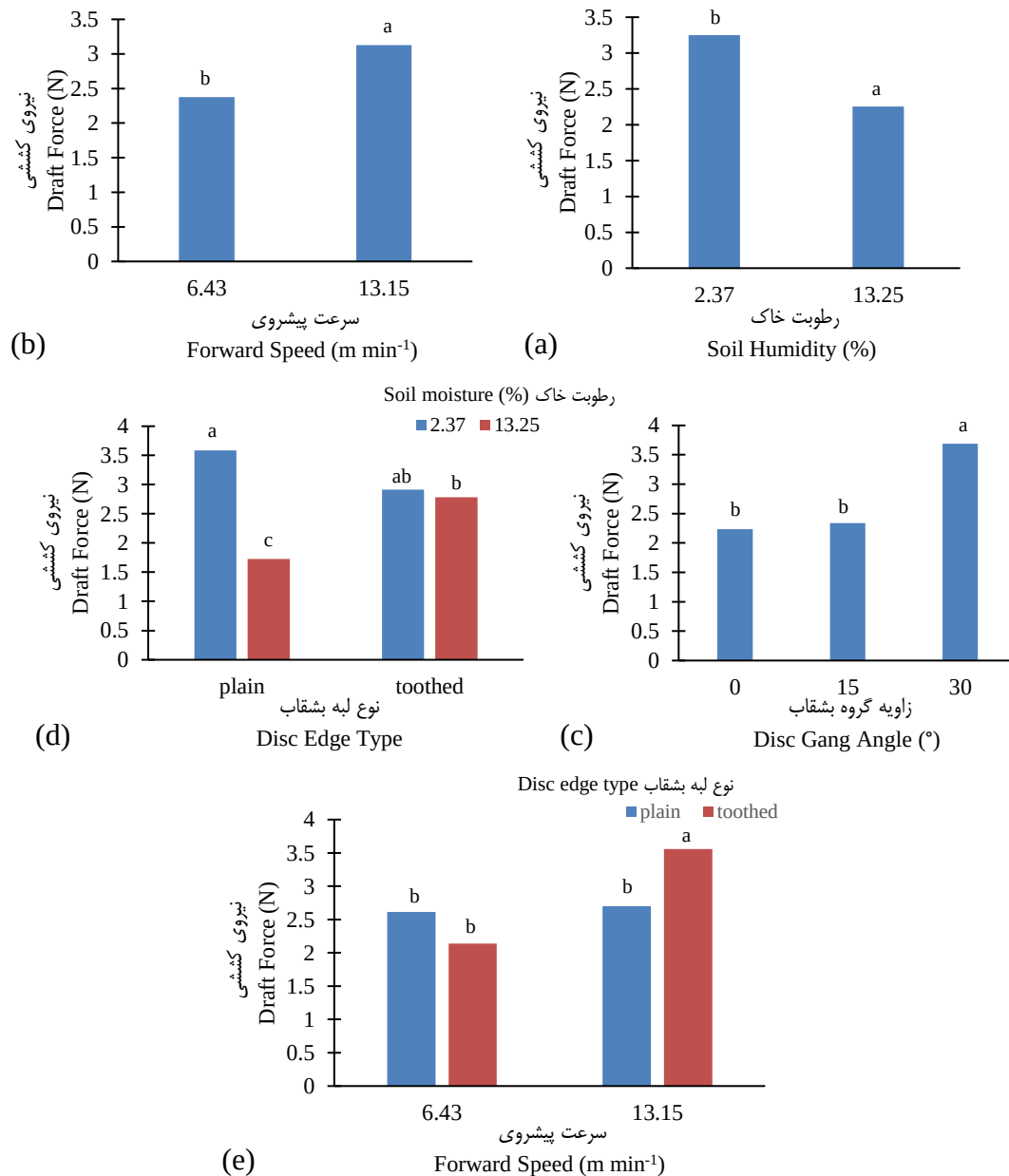
Table 1- ANOVA results on the effect of studied parameters on draft force

میانگین مربعات Mean of Squares	درجه آزادی Degree of Freedom	منابع تغییرات Source of Variation
17.885**	1	رطوبت خاک (A) Soil Humidity (A)
0.668 ^{ns}	1	نوع بشقاب (B) Disc type (B)
10.216**	1	سرعت پیشروی (C) Forward Speed (C)
15.790**	2	زاویه گروه بشقاب (D) Disc gang angle (D)
13.543**	1	رطوبت × بشقاب (A × B)
1.152 ^{ns}	1	رطوبت × سرعت (A × C)
2.096 ^{ns}	2	رطوبت × زاویه (A × D)
7.981**	1	بشقاب × سرعت (B × C)
1.467 ^{ns}	2	بشقاب × زاویه (B × D)
0.968 ^{ns}	2	سرعت × زاویه (C × D)
0.044 ^{ns}	1	رطوبت × بشقاب × سرعت (A × B × C)
0.815 ^{ns}	2	رطوبت × بشقاب × زاویه (A × B × D)
0.010 ^{ns}	2	رطوبت × سرعت × زاویه (A × C × D)
3.472 ^{ns}	2	بشقاب × سرعت × زاویه (B × C × D)
0.571 ^{ns}	2	رطوبت × بشقاب × سرعت × زاویه (A × B × C × D)
0.402	48	خطا Error
	71	کل Total
13.22143		C.V

ارائه شده است.

مقایسه میانگین اثرات عوامل معنی‌دار

مقایسه میانگین اثرات عوامل اصلی و متقابل معنی‌دار در شکل ۴



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر عوامل معنی‌دار (a) رطوبت خاک، (b) سرعت پیشروی، (c) زاویه گروه بشقاب، (d) اثر متقابل رطوبت خاک در نوع بشقاب و (e) اثر متقابل سرعت پیشروی در نوع بشقاب بر نیروی کششی

Fig. 4. Compare means of the effect of significant parameters of (a) soil moisture, (b) forward speed, (c) disc gang angle, (d) interaction between moisture and disc, and (e) interaction between forward speed and disc on the draft force

رطوبت خاک یکی از عوامل کلیدی در تعیین مقاومت خاک در برابر ابزارهای خاک‌ورزی است. در خاک‌های با رطوبت بالاتر، نیروی کشش مورد نیاز برای بشقاب‌ها کاهش می‌یابد، زیرا خاک نرم‌تر و

نتایج مندرج در شکل ۴-A نشان داد که در رطوبت بیشتر خاک (۱۳/۲۵ درصد)، نیروی کششی مورد نیاز هرس بشقابی تحت بررسی به‌طور معنی‌داری کمتر است. تحقیقات قبلی هم نشان دادند که

اما قبل از رسیدن به ۱۵ درجه، این اثر به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. سایر مطالعات نیز تأثیر قابل توجه زاویه گروه بشقاب و سرعت پیشروی را بر عملیات خاک‌ورزی نشان دادند. هان و گیسبیل (Hann & Giessibl, 1998) مشاهده کردند که تنظیم زاویه بهینه گروه بشقاب بین ۳۵ تا ۵۰ درجه نسبت به خط عمود بر مسیر حرکت برای به حداقل رساندن نیروی کششی و توان مورد نیاز الزامی است. عبدالله و همکاران (Abdalla et al., 2014) گزارش دادند که کاهش زاویه گروه باعث بهبود نفوذ بشقاب‌ها شد. آمانتایف و همکاران (Amantayev, Gaifullin, Kravchenko, Kushnir, & Nurushev, 2018) تشکیل شیار را توسط انواع مختلف بشقاب بررسی کرده و اشاره نمودند که زاویه گروه بشقاب بر ویژگی‌های شیار تأثیر می‌گذارد. زوبکو و همکاران (Zubko, Sokolik, Khvorost, & Melnyk, 2021) دریافتند که کیفیت خاک‌ورزی تحت تأثیر سرعت پیشروی، عمق کار و زاویه گروه بشقاب است. این یافته‌ها اهمیت پارامترهای بشقاب و سرعت پیشروی را در بهینه‌سازی عملیات خاک‌ورزی و بهبود اختلاط و پودر شدن خاک نشان داد.

شکل ۴-D نشان داد که اثر متقابل بین رطوبت خاک و نوع بشقاب تأثیر قابل توجهی بر نیروی کششی دارد. در شرایط رطوبت پایین، بشقاب‌های لبه صاف نسبت به بشقاب‌های لبه کنگره‌دار نیروی کششی بیشتری ایجاد کردند، اما با افزایش رطوبت، این تفاوت معکوس شد. تفاوت نیروی کششی بشقاب لبه صاف و لبه کنگره‌دار در رطوبت ۲/۳۷ درصد، معنی‌دار نیست اما این تفاوت در رطوبت ۱۳/۲۵ درصد بسیار معنی‌دار است. بیشترین (۳/۵۸۸ نیوتن) و کمترین (۱/۷۲۴ نیوتن) نیروی کششی مربوط به بشقاب لبه صاف به ترتیب در رطوبت ۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد بود. بر اساس نتایج مطالعات گذشته، رطوبت خاک و نوع لبه بشقاب به‌طور متقابل بر میزان نیروی کششی در عملیات خاک‌ورزی تأثیر می‌گذارند. مطالعات دیگر (Manuwa, Rashidi et al., 2013; 2009) تأکید می‌کنند که انتخاب بشقاب مناسب بر اساس رطوبت خاک می‌تواند بهینه‌سازی نیروی کششی مورد نیاز، کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت خاک‌ورزی را به همراه داشته باشد. بنابراین، درک تعامل بین رطوبت خاک و نوع بشقاب برای طراحی عملیات خاک‌ورزی کارآمد ضروری است.

شکل ۴-E نشان داد که نیروی کششی مورد نیاز بشقاب کنگره‌دار در سرعت پیشروی ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر حالات است اما نیروی کششی در بشقاب ساده در هر دو سرعت همچنین بشقاب کنگره‌دار در سرعت ۶/۴۳ متر بر دقیقه تفاوت معنی‌داری نداشتند. این نتیجه نشان می‌دهد که در سرعت ۶/۴۳ متر بر دقیقه، بشقاب ساده و کنگره‌دار، نیروی کششی تقریباً یکسانی نیاز داشتند اما در سرعت پیشروی ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه، بهتر است که از بشقاب لبه صاف استفاده کنیم چون بشقاب لبه کنگره‌دار به نیروی کششی بسیار بیشتری نیاز خواهد داشت. با این حال، رابطه بین

چسبنده‌تر می‌شود و برش آن آسان‌تر است. در مقابل، در خاک‌های بسیار خشک یا فشرده، نیروی کشش به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد زیرا خاک سخت‌تر و مقاوم‌تر می‌شود (Manuwa, 2009; Rashidi, Najjarzadeh, Jaberinasab, Emadi, & Fayyazi, 2013). تعامل بین محتوای رطوبت خاک (SMC) و عملیات خاک‌ورزی به‌طور قابل توجهی بر عملکرد کشش و مصرف انرژی تأثیر می‌گذارد. با افزایش SMC، پارامترهای عملکرد کشش کشنده خاک‌ورز مانند گشتاور محور، لغزش و ضریب کشش به‌طور کلی بهبود می‌یابند. با این حال، راندمان کششی در سطوح بالاتر رطوبت کمی کاهش می‌یابد (Kim, Kim, Park, & Kim, 2021). نیروهای کششی با افزایش SMC در سرعت‌های خاک‌ورزی ثابت، با محدوده SMC بهینه ۲/۵ تا ۲۵٪ برای شخم توسط بشقاب در خاک لومی ماسه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین، خواص مقاومت خاک با افزایش SMC و سرعت خاک‌ورزی کاهش می‌یابد (Nkakini & Fubara-Manuel, 2014). رابطه بین SMC، ترکیب خاک و مصرف انرژی خاک‌ورزی را می‌توان با استفاده از همبستگی‌های مشتق شده ارزیابی کرد (Afify, Kushwaha, & Gerein, 1998; Vilde, 2003).

شکل ۴-B نشان داد که سرعت پیشروی در عملیات خاک‌ورزی تأثیر مستقیمی بر نیروی کششی مورد نیاز بشقاب خاک‌ورز دارد. با افزایش سرعت، نیروی کشش مورد نیاز برای کشیدن بشقاب در خاک به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد، زیرا مقاومت خاک در برابر حرکت بشقاب بیشتر می‌شود. این مقاومت ناشی از عوامل مختلفی مانند چگالی خاک، رطوبت و نوع لبه بشقاب است. در سرعت‌های بالاتر، بشقاب باید نیروی بیشتری برای برش و جابه‌جایی خاک اعمال کند (Abdalla, Mohamed, El Naim, El Shiekh, & Zaid, 2014). از سوی دیگر برخی از محققین گزارش نمودند که افزایش سرعت حرکت ابزار در خاک می‌تواند موجب کاهش نیروی کششی شود؛ زیرا خاک در زمان کمتری برش خورده و جابه‌جا می‌شود. با این حال، اگر سرعت بیش از آن افزایش یابد، ممکن است به دلیل افزایش اصطکاک و نیروی اینرسی، نیروی کششی مجدداً افزایش یابد که در پژوهش حاضر حاصل شد. بنابراین، بهینه‌سازی سرعت ابزارهای خاک‌ورزی برای هم‌زمانی کاهش نیروی کششی و افزایش بازدهی عملیات خاک‌ورزی، امری ضروری است.

شکل ۴-C نشان داد که در آزمون‌ها، تفاوت معنی‌داری در نیروی کششی بین زاویه‌های ۰ و ۱۵ درجه گروه بشقاب مشاهده نشد. با این حال، تغییر زاویه گروه بشقاب از ۱۵ به ۳۰ درجه، افزایش قابل توجهی در نیروی کششی ایجاد کرد. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش ثانویه زاویه گروه بشقاب تأثیر بیشتری بر افزایش نیروی کششی دارد،

معناداری در نیروی کششی وجود ندارد. اما افزایش زاویه از ۱۵ به ۳۰ درجه باعث افزایش چشمگیری در نیروی کششی شد. این نشان می‌دهد که افزایش اولیه زاویه گروه بشقاب تأثیر کمتری بر افزایش نیروی کششی دارد، اما پس از رسیدن به ۱۵ درجه، این تأثیر افزایش می‌یابد. بنابراین، انتخاب زاویه مناسب گروه بشقاب می‌تواند موجب کاهش نیروی کششی مورد نیاز و مصرف سوخت همچنین افزایش بهره‌وری ماشین‌های کشاورزی شود.

در شرایط رطوبت پایین، بشقاب‌های لبه صاف نسبت به بشقاب‌های لبه کنگره‌دار نیروی کششی بیشتری نیاز داشتند، اما با افزایش رطوبت، این تفاوت معکوس شد. بیشترین (۳/۵۸۸ نیوتن) و کمترین (۱/۷۲۴ نیوتن) نیروی کششی مربوط به بشقاب لبه صاف به ترتیب در رطوبت ۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد بود. این موضوع نشان می‌دهد که اثر متقابل نوع بشقاب و میزان رطوبت خاک به طور معنی‌داری بر میزان نیروی کششی تأثیر دارند. در خاک‌های خشک، بشقاب‌هایی که طراحی بهتری برای برش دارند، کارایی بیشتری خواهند داشت، درحالی‌که در خاک‌های مرطوب، نیروی کشش کاهش یافته و تفاوت آن بین دو نوع بشقاب بیشتر می‌شود. این یافته می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا در شرایط مختلف رطوبت خاک، بشقاب مناسب‌تری را انتخاب کنند.

در سرعت ۶/۴۳ متر بر دقیقه، بشقاب ساده و کنگره‌دار، نیروی کششی یکسانی نیاز دارند اما در سرعت پیشروی ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه، بهتر است که از بشقاب لبه صاف استفاده کنیم چون بشقاب لبه کنگره‌دار به نیروی کششی بسیار بیشتری نیاز خواهد داشت. این نتایج نشان می‌دهند که تنظیم بهینه سرعت پیشروی، نوع لبه و زاویه گروه بشقاب با توجه به شرایط رطوبتی خاک می‌تواند عملکرد عملیات خاک‌ورزی را بهبود بخشد.

مشارکت نویسندگان

حسین شعبانی شش پلی: جمع‌آوری داده‌ها، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، استخراج و تهیه متن اولیه
محمد عسکری: نظارت و مدیریت، استخراج و تهیه متن اولیه، خدمات نرم‌افزاری، پردازش داده‌ها، اعتبارسنجی و تصویرسازی نتایج
داود کلانتری: ویرایش متن

سرعت ابزار و نیروی کشش بسیار پیچیده است. در حالی که برخی از مطالعات نشان دادند که افزایش سرعت برش منجر به افزایش مقاومت کششی می‌شود (Liskin, Lobachevsky, Mironov, Sidorov, & Panov, 2018)، برخی دیگر مشاهده کردند که راندن بشقاب‌ها با نسبت سرعت رو به جلو بالاتر می‌تواند به طور قابل توجهی نیروی کشش را کاهش دهد (Hann & Giessibl, 1998).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف طراحی و ساخت شاسی حامل هرس بشقابی در محیط انباره خاک آزمایشگاهی، اجرا شده است. پس از طراحی و ساخت شاسی جدید، نیروی کششی مورد نیاز یک گروه چهار بشقاب هرس بشقابی تحت اثر چهار متغیر مستقل در ورودی شامل سرعت پیشروی در دو سطح (۶/۴۳ و ۱۳/۱۵ متر بر دقیقه)، رطوبت خاک در دو سطح (۲/۳۷ و ۱۳/۲۵ درصد بر مبنای وزن‌تر)، نوع لبه بشقاب در دو سطح (ساده و کنگره‌دار) و زاویه قرارگیری گروه بشقاب در سه سطح (۰، ۱۵ و ۳۰ درجه) صورت پذیرفت. نتایج ارزیابی اولیه نشان داد که شاسی طراحی شده از استحکام کافی در آزمون‌ها برخوردار بود. در رطوبت بالا، شاهد کاهش نیروی کششی هستیم، زیرا خاک نرم‌تر و چسبنده‌تر بوده و برش آن راحت‌تر انجام می‌شود. اما در رطوبت پایین، شاهد افزایش نیروی کششی خواهیم بود، زیرا خاک سخت‌تر و فشرده‌تر شده و بشقاب برای نفوذ به آن نیاز به نیروی بیشتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت رطوبت خاک می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی نیروی کششی و کاهش مصرف سوخت داشته باشد.

افزایش سرعت پیشروی موجب افزایش نیروی کششی می‌شود، زیرا مقاومت خاک در برابر حرکت بشقاب بیشتر می‌شود. در سرعت‌های بالاتر، بشقاب باید نیروی بیشتری برای برش و جابه‌جایی خاک اعمال کند که این موضوع موجب افزایش مصرف انرژی و استهلاک تجهیزات می‌شود. از سوی دیگر، در سرعت‌های پایین‌تر، نیروی کششی کاهش می‌یابد اما ممکن است کارایی خاک‌ورز کمتر شده و یکنواختی شخم تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین، یافتن سرعت بهینه، نقش مهمی در بهبود عملکرد کشاورزی و کاهش هزینه‌های عملیاتی دارد.

در آزمایش‌ها مشاهده شد که بین زوایای ۰ و ۱۵ درجه تفاوت

References

1. Abdalla, O. A., Mohamed, E. A., El Naim, A. M., El Shiekh, M. A., & Zaied, M. B. (2014). Effect of disc and tilt angles of disc plough on tractor performance under clay soil. *Current Research in Agricultural Sciences*, 1(3), 83-94.
2. Afify, M., Kushwaha, R., & Gerein, M. (1998). Effect of combined disc angles on soil forces of coulter discs. 2001 ASAE Annual Meeting. <https://doi.org/10.13031/2013.4041>

3. Amantayev, M., Gaifullin, G., Kravchenko, R., Kushnir, V., & Nurushev, S. (2018). Investigation of the furrow formation by the disc tillage tools. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(4), 704-709.
4. Askari, M., Shahgholi, Gh., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2017). The effect of tine, wing, operating depth and speed on the draft requirement of subsoil tillage tines. *Research in Agricultural Engineering*, 63(4), 160-167. <https://doi.org/10.17221/4/2016-RAE>
5. Aykas, E., Cakir, E., & Gulsoylu, E. (2004). The effect of tillage parameters on the performance of the heavy duty offset disk harrow. *Asian Journal of Plant Sciences*, 3(4), 425-428. <https://doi.org/10.3923/ajps.2004.425.428>
6. Badegaonkar, U. R., Kamble, A. K., & Thakare, S. H. (2014). Performance evaluation of straw cutting mechanism under no-till crop residue conditions in the soil bin. *PKV Research Journal*, 38(1), 47-52.
7. Goryachkin, V. P. (1968). Collected Works in Three Volumes. 2nd Ed. TT71-50087. Springfield VA: Nat. Technical Information Service. U.S. Department of Commerce.
8. Hann, M., & Giessibl, J. (1998). Force measurements on driven discs. *Journal of agricultural engineering research*, 69(2), 149-157. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0241>
9. Kim, W. S., Kim, Y. J., Park, S. U., & Kim, Y. S. (2021). Influence of soil moisture content on the traction performance of a 78-kW agricultural tractor during plow tillage. *Soil and Tillage Research*, 207, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104851>
10. Liskin, I. V., Lobachevsky, Y. P., Mironov, D. A., Sidorov, S., & Panov, A. (2018). Laboratory study results of soil-cutting operating elements. *Agricultural Machinery and Technologies*, 12(4), 41-47. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-41-47>
11. Mansouri Rad, D. (2013). Tractors and agricultural machinery. 1 st edition. Bou ali sina university. 17 th print.
12. Manuwa, S. (2009). Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 399-405. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.004>
13. Nkakini, S., & Fubara-Manuel, I. (2014). Effects of soil moisture and tillage speeds on tractive force of disc ploughing in loamy sand soil. *European International Journal of Science and Technology*, 3(4), 157-164.
14. Rashidi, M., Najjarzadeh, I., Jaberinasab, B., Emadi, S. M., & Fayyazi, M. (2013). Effect of soil moisture content, tillage depth and operation speed on draft force of moldboard plow. *Middle East Journal of Scientific Research*, 16(2), 245-249. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.16.02.11675>
15. RNAM test codes and procedures for farm machinery. (1995). 468p.
16. Torotwa, I., Ding, Q., Alele, J. O., & He, R. (2022). 3D finite element analysis of the tillage and straw cutting performance of a curved-edged toothed disc. *Engineering Agriculture*, 42(2), 190-210. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n2e20210190/2022>
17. Torotwa, I., Ding, Q., Makange, N. R., Liang, L., & He, R. (2021). Performance evaluation of a biomimetically designed disc for dense-straw mulched conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 212105068. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105068>
18. Upadhyay, G., & Raheman, H. (2018). Performance of combined offset disc harrow (front active and rear passive set configuration) in soil bin. *Journal of Terramechanics*, 78, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.04.002>
19. Vilde, A. (2003). Impact of soil moisture and composition on its properties and energy consumption of tillage. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference about Environment. Technologies. Resources. <https://doi.org/10.17770/etr2003vol1.2022>
20. Zeng, Z. W., Chen, Y., & Qi, L. (2019). Soil Cutting by a compact disc harrow having various disc arrangements. *Transactions of the ASABE*, 62(2): 429-437. <https://doi.org/10.13031/trans.13106>
21. Zeng, Z. W., Chen, Y., & Zhang, X. (2017). Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.005>
22. Zhang, Y. (2016). On the mechanics of disc-soil-planter interaction. A thesis submitted to the college of graduate studies and research in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the department of mechanical engineering university of saskatchewan saskatoon. 219.
23. Zubko, V., Sokolik, S., Khvorost, T., & Melnyk, V. (2021). Factors affecting quality of tillage with disc harrow. 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF262>

Contents

Research Articles

Manufacturing and Evaluation of a Dry land Rice Transplanter	267
A. Sadin, M. H. Aghkhani, M. A. Ebrahimi-Nik, J. Baradaran Motie	
Linking Grape Yield Performance to Remote Sensing Vegetation Indices: A Fusion of Sentinel Radar and Optical Imagery with Machine Learning Models	287
H. R. Maleki, M. Khodamorad Pour, H. Mohamadi Monavar	
Detection of Cucumber Fruit on Plant in a Greenhouse Environment Using the YOLOv8 Object Detection Algorithm	303
A. Soleimanipour	
Multivariate Optimization of Moldboard Plow Tillage Quality Using Response Surface Methodology	317
M. Akbari, I. Hazbawi, M. Jafarian	
Analysis and Comparison of Energy and Yield Modeling of Local and High-Yielding Rice Cultivars Using the Multi-Gene Genetic Programming Model	335
S. Sharifi, A. Asakereh, M. Kiani Deh Kiani, S. Janatrostami	
Design and Construction of a Disc Harrow Carrier Chassis in a Soil Bin and Measuring Its Draft Force	353
H. Shaebani Shesh poli, M. Askari, D. Kalantari	

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 16

No. 2

2026

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
Aghbashlo, M.	Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran
Aghkhani, M. H.	Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Alimardani, R.	Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, 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 Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran
Nasirahmadi, A.	Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
Raji, A.	Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
Rohani, A.	Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Saiedirad, M. H.	Agricultural Engineering Research Institute, Mashhad, Iran
Sayasoonthorn, S	Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

Web Site: <https://jame.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 16

No. 2

2026

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

Manufacturing and Evaluation of a Dry land Rice Transplanter.....267
A. Sadin, M. H. Aghkhani, M. A. Ebrahimi-Nik, J. Baradaran Motie

Linking Grape Yield Performance to Remote Sensing Vegetation Indices: A Fusion of Sentinel Radar and Optical Imagery with Machine Learning Models.....287
H. R. Maleki, M. Khodamorad Pour, H. Mohamadi Monavar

Detection of Cucumber Fruit on Plant in a Greenhouse Environment Using the YOLOv8 Object Detection Algorithm.....303
A. Soleimanipour

Multivariate Optimization of Moldboard Plow Tillage Quality Using Response Surface Methodology317
M. Akbari, I. Hazbawi, M. Jafarian

Analysis and Comparison of Energy and Yield Modeling of Local and High-Yielding Rice Cultivars Using the Multi-Gene Genetic Programming Model.....335
S. Sharifi, A. Asakereh, M. Kiani Deh Kiani, S. Janatrostami

Design and Construction of a Disc Harrow Carrier Chassis in a Soil Bin and Measuring Its Draft Force.....353
H. Shaejabi Shesh poli, M. Askari, D. Kalantari