



نشریه علمی

بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)

جلد ۱۷ شماره ۴

زمستان ۱۴۰۴

شماره پیاپی ۶۶

شماره پیاپی ۶۶

عنوان مقالات

- واسنجی، پهنه‌سازی و ارزیابی الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBOOST برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.)
تحت تأثیر کودهای زیستی..... ۵۳۹
محسن جهان و مهدی نصیری محلاتی
- ارزیابی مدل SSM_Wheat برای تخمین مراحل فنولوژی گندم (*Triticum aestivum* L.)
تحت شرایط تاریخ کاشت و ارقام مختلف..... ۵۶۳
علی راحمی کاریزکی، فرامرز سیدی، حبیب‌الله سوقی، ارازقلیج معارفی، محسن صالحی شیخی و سعید باقری کیا
- واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و رشدی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) به کاربرد تلفیقی بیوجار و کود شیمیایی..... ۵۷۷
سجاد طورانی، معصومه نعیمی، عباس بیابانی و علی نخ‌زری مقدم
- اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر کیفیت علوفه در کشت مخلوط تریتیکاله (*Triticosecale* Wittmack) و ماشک (*Vicia sativa* L.)..... ۵۹۳
آرمان جمالی، غلامرضا حیدری، یوسف سهرابی و زاهد شریفی
- ارزیابی شاخص‌های تنوع، خودکفایی و بهره‌وری اقتصادی نظام‌های کشاورزی در دو روستای شهرستان ملگین شهر..... ۶۱۳
آبدین لویه، مرتضی برمکی، رقیه جهادی و سرین سادات سیدمحمد
- تأثیر سطوح تلفیح با کود زیستی، شیمیایی و محلول‌پاشی با ساینوکسین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.)
رقم پیشگام..... ۶۳۱
اسمعیل نی‌زاده و خدیجه احمدی
- پهنه‌بندی دمای، راهنمای مدیریت گیاهان زراعی در استان اصفهان..... ۶۴۷
امیرحسنگ جلالی و علیرضا لیکونی

نشریه بوم شناسی کشاورزی (فصلنامه)

دانشگاه فردوسی مشهد

با شماره پروانه ۸۹/۲۲۵۱۵ مورخه ۸۹/۹/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

درجه علمی پژوهشی شماره ۸۹/۳/۱۱/۵۲۴۷۹ مورخه ۸۹/۹/۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

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

زمستان ۱۴۰۴

شماره ۴

جلد ۱۷

صاحب امتیاز و ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر بهنام کامکار، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

سرمدیر: دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر داخلی: دکتر سرور خرم دل، دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

اعضای هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا)

دکتر امیربهزاد بذرگر، دانشگاه گوتلف، کانادا

دکتر مرتضی برمکی، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر محمد پسرکلی، استاد پژوهشی، دانشکده علوم گیاهی، دانشگاه آریزونا

دکتر همت اله پیردشتی، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

دکتر امیرحجاریپور، پژوهشگر، دانشگاه جولیوس کوهن، آلمان

دکتر سرور خرم دل، دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر عادل دباغ محمدی نسب، استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

دکتر مهدی راستگو، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر پرویز رضوانی مقدم، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر احمد زارع فیض آبادی، استاد، مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی

دکتر سعید زهتاب سلماسی، استاد، دانشگاه نیو مکزیکو، ایالات متحده آمریکا

دکتر حمید شاهنده، پژوهشگر علوم خاک، گروه علوم خاک و گیاهان زراعی، دانشگاه تگزاس A & M

دکتر امید عبدی، گروه علوم جنگل، دانشگاه هلسینکی، فنلاند

دکتر فرشید قادری فر، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

دکتر منصور قربانپور، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک

دکتر بهنام کامکار، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر محمدرضا مرادی تلاوت، استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

دکتر احمد مصدق منشادی، دانشیار، گروه علوم زراعی، دانشگاه منابع طبیعی و علوم زیستی، وین

دکتر مهدی نصیری محلاتی، استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، دبیرخانه نشریات علمی، دفتر نشریه بوم شناسی کشاورزی، صندوق

پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

نمابر: ۰۵۱-۳۸۷۸۷۴۳۰

تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۴۶۵۴

آدرس سایت: <https://agry.um.ac.ir>

پست الکترونیکی: agroecology@um.ac.ir

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:

DOAJ, CABI, Google Scholar, AGRIS, Internet Archive, Ebsco, Europub

پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

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



مندرجات

- ۵۳۹ واسنجی، بهینه‌سازی و ارزیابی الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBOOST برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) تحت تأثیر کودهای زیستی
محسن جهان و مهدی نصیری محلاتی
- ۵۶۳ ارزیابی مدل SSM_Wheat برای تخمین مراحل فنولوژی گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت شرایط تاریخ کاشت و ارقام مختلف
علی راحمی کاریزکی، فرامرز سیدی، حبیب‌الله سوقی، ارازقلیج معارفی، مجتبی صالحی شیخی و سعید باقری کیا
- ۵۷۷ واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و رشدی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) به کاربرد تلفیقی بیوجار و کود شیمیایی
سجاد طورانی، معصومه نعیمی، عباس بیابانی و علی نخزری مقدم
- ۵۹۳ اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر کیفیت علوفه در کشت مخلوط تریتیکاله (*Triticosecale* Wittmack) و ماشک (*Vicia sativa* L.)
آرمان جمالی، غلامرضا حیدری، یوسف سهرابی و زاهد شریفی
- ۶۱۳ ارزیابی شاخص‌های تنوع، خودکفایی و بهره‌وری اقتصادی نظام‌های کشاورزی در دو روستای شهرستان مشکین‌شهر
آیدین توبه، مرتضی برمکی، رقیه جهدی و نسرین سادات سیدمحمد
- ۶۳۱ تأثیر سطوح تلقیح با کود زیستی، شیمیایی و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم پیشگام
اسمعیل نبی‌زاده و خدیجه احمدی
- ۶۴۷ پهنه‌بندی دمایی، راهنمای مدیریت گیاهان زراعی در استان اصفهان
امیر هوشنگ جلالی و علیرضا نیکوئی



Calibration, Optimization, and Evaluation of the Integrated NSGA-II and XGBoost Algorithm for Predicting Corn (*Zea mays* L.) Yield Performance under the Influence of Biofertilizers: A Novel Approach in Low-Input Agriculture

Mohsen Jahan¹ and Mehdi Nassiri-Mahallati¹

1- Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding author's Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 13-07-2025
Revised: 02-01-2026
Accepted: 05-01-2026
Available Online: 21-01-2026

Jahan, M., & Nassiri-Mahallati, M. (2026). Calibration, optimization, and evaluation of the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm for predicting corn (*Zea mays* L.) yield performance under the influence of biofertilizers: A novel approach in low-input agriculture. *Journal of Agroecology*, 17(4), 537-559. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/agry.2026.94366.1245>

Introduction

Accurate prediction of maize (*Zea mays* L.) grain yield is critical for efficient resource management and enhancing productivity in sustainable agriculture, particularly in low-input systems. The integration of biofertilizers, such as plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), offers a promising avenue to improve crop performance while reducing environmental impacts. However, the complexity of ecophysiological data and their interactions necessitates advanced modelling techniques for precise yield prediction. Machine learning (ML) algorithms, combined with optimization methods, provide robust tools to address this challenge (Ingole et al., 2025). This study proposes a novel hybrid approach combining the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) for feature selection and the eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm for predictive modelling. By leveraging ecophysiological data, this approach aims to optimize maize yield predictions under biofertilizer applications, supporting precision agriculture and climate adaptation strategies. The objectives were to identify key predictive features, enhance model accuracy, and interpret the contributions of selected variables to yield outcomes.

Materials and Methods

The study utilized data from 96 experimental plots at the Ferdowsi University of Mashhad's research fields, collected over two years. A comprehensive dataset comprising 75 features (32 primary and 43 interaction terms) was compiled, including ecophysiological variables such as chlorophyll content index (SPAD), canopy temperature, maximum photosynthesis rate, specific root length, and soil phosphorus percentage. The methodology consisted of two main phases: feature selection and predictive modeling. First, NSGA-II, a multi-



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

<https://doi.org/10.22067/agry.2026.94366.1245>

objective optimization algorithm, was employed to select an optimal subset of features by simultaneously maximizing prediction accuracy (coefficient of determination, R^2) and minimizing the number of features. NSGA-II iteratively evaluated feature combinations to identify a Pareto-optimal set, balancing model simplicity and performance. Subsequently, the selected features were used to train an XGBoost model, a gradient-boosting framework known for its robustness in handling complex datasets. The model was validated using 5-fold cross-validation to ensure generalizability. Model interpretability was enhanced through SHapley Additive exPlanations (SHAP) and Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) methods. SHAP analysis provided global and local feature importance, while LIME elucidated individual prediction contributions. Counterfactual analysis was also conducted to assess the impact of removing key features on model predictions.

Results and Discussion

NSGA-II successfully identified nine key features critical for yield prediction, including canopy temperature at the dough stage (Canopy Temp_4), chlorophyll content index at the milk stage (SPAD_3), soil respiration rate, and maximum photosynthesis rate. These features were selected for their ability to maximize R^2 while maintaining model parsimony. The trained XGBoost model achieved an R^2 of 0.63 and a root mean square error (RMSE) of 2.171 tons per hectare, indicating moderate predictive accuracy suitable for agricultural applications. SHAP analysis revealed that SPAD_3 (mean SHAP value: 0.2603 t/ha) and Canopy Temp_4 (0.2512 t/ha) were the most influential predictors, positively contributing to yield predictions. Conversely, complex interactions, such as the interaction between leaf area index at the silking stage and the squared mean canopy temperature, had a slight negative effect (-0.0674 t/ha). LIME analysis further highlighted the negative influence of ear length (weight: -0.9252), suggesting its role in reducing predicted yields in specific cases. The Pareto front generated by NSGA-II corroborated the trade-off between feature count and prediction accuracy, while feature importance plots aligned with SHAP and LIME findings. Counterfactual analysis demonstrated that excluding key features significantly altered predictions, underscoring their importance. The integration of NSGA-II and XGBoost proved highly effective in optimizing maize yield predictions under biofertilizer influence, offering a robust framework for low-input agriculture. The selection of nine key features by NSGA-II reduced model complexity while maintaining predictive power, aligning with the principles of precision agriculture. The high influence of SPAD_3 and Canopy Temp_4 underscores the importance of physiological and environmental factors in yield determination, particularly in biofertilizer-enhanced systems. The negative contribution of certain interaction terms and ear length suggests the need for careful consideration of variable interactions in model development. The use of SHAP and LIME enhanced model transparency, providing actionable insights for farmers and researchers. Compared to traditional models, this hybrid approach outperformed baseline methods, achieving a higher R^2 and lower RMSE. The findings support the adoption of advanced ML techniques in sustainable agriculture, enabling precise resource allocation and adaptation to climatic variability. Future research could explore additional biofertilizer types and larger datasets to further refine predictive accuracy and generalizability.

Conclusion

In conclusion, this study successfully developed and validated a hybrid modelling framework integrating NSGA-II for multi-objective feature selection with XGBoost for predictive modelling, enabling accurate maize grain yield prediction under biofertilizer applications in low-input systems. By identifying a parsimonious set of nine key ecophysiological features—most notably chlorophyll content index at the milk stage (SPAD_3) and canopy temperature at the dough stage—the approach achieved a respectable R^2 of 0.63 and RMSE of 2.171 t/ha, demonstrating moderate yet practical predictive power suitable for precision agriculture in variable environments. Interpretability analyses using SHAP and LIME underscored the dominant positive contributions of physiological indicators while highlighting nuanced negative effects from certain interactions and traits such as ear length, providing valuable insights into biofertilizer-mediated yield dynamics. This methodology not only outperformed traditional baselines by balancing model complexity and accuracy but also supports sustainable resource management and climate-resilient strategies in arid and semi-arid regions. Future efforts should expand datasets, incorporate diverse biofertilizer regimes, and test generalizability across broader agroecological zones to further enhance predictive robustness and real-world applicability.

Keywords: Mycorrhizal fungi, Machine learning, Non-dominated sorting genetic algorithm, Rhizobacteria, SHAP analysis

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۵۳۷-۵۵۹

واسنجی، بهینه سازی و ارزیابی الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBOOST برای پیش بینی عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) تحت تأثیر کودهای زیستی

محسن جهان^{۱*} و مهدی نصیری محلاتی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

پیش بینی دقیق عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) برای مدیریت منابع و افزایش بهره‌وری در کشاورزی پایدار ضروری است. در این مطالعه ابتدا، الگوریتم NSGA-II برای انتخاب بهینه ویژگی‌ها به کار گرفته شد و سپس الگوریتم XGBoost با ویژگی‌های انتخاب شده برای پیش‌بینی آموزش داده شد. داده‌ها از ۹۶ نمونه از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد شامل ۷۵ ویژگی (۳۲ اصلی و ۴۳ تعاملی) طی دو سال آزمایش جمع‌آوری شدند. داده‌های اکوفیزیولوژیکی شامل متغیرهایی نظیر شاخص کلروفیل (SPAD)، دمای تاج‌پوشش، سرعت فتوسنتز بیشینه، طول ویژه ریشه، درصد فسفر خاک و غیره بودند. ابتدا، NSGA-II برای شناسایی مجموعه بهینه ویژگی‌ها به منظور حداکثر کردن دقت پیش‌بینی (R^2) و کمینه کردن تعداد ویژگی‌ها به کار گرفته شد. NSGA-II با بهینه‌سازی همزمان تعداد ویژگی‌ها و دقت، نه ویژگی کلیدی (مانند دمای تاج‌پوشش در مرحله خمیری دانه Canopy Temp_4)، شاخص کلروفیل برگ در مرحله سیری دانه (SPAD_3)، سرعت تنفس خاک و سرعت فتوسنتز بیشینه را انتخاب کرد. مدل XGBoost با اعتبارسنجی (پنج‌تایی) آموزش داده شد و ضریب تبیین (R^2) ۰/۶۳ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۲/۱۷۱ تن در هکتار به دست آمد. برای تفسیر مدل، از روش‌های شیب (SHAP) و لایم (LIME) استفاده شد. نمودارهای شیب (نمودارهای آبشاری و فورس پلات) نشان دادند که SPAD_3 با میانگین شیب ۰/۲۶۰۳ تن در هکتار و Canopy Temp_4 با ۰/۲۵۱۲ تن در هکتار، نقش کلیدی در افزایش پیش‌بینی داشتند، درحالی‌که تعاملات پیچیده مثل اثر متقابل شاخص سطح برگ در مرحله کاکل‌دهی و مجذور میانگین دمای تاج‌پوشش اثر منفی اندکی (-۰/۰۶۷۴) ایجاد کردند. تحلیل لایم نیز تأیید کرد که طول بلال با وزن ۰/۹۲۵۲- تأثیر منفی قابل توجهی دارد. این یافته‌ها با جبهه پاراتو و نمودار اهمیت ویژگی‌ها هم‌راستا بودند. علاوه بر این، تحلیل کانترفاکچوال نشان داد که حذف ویژگی‌های کلیدی، تغییرات قابل توجهی در پیش‌بینی ایجاد می‌کند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارایی بالای تلفیق NSGA-II و XGBoost در بهینه‌سازی مدل‌های پیش‌بینی کشاورزی است که به‌نوبه خود می‌تواند به مدیریت دقیق زراعی، انتخاب نهاده‌های طبیعی و سازگاری با تغییرات اقلیمی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک نامغلوب، باکتری‌های ریزوسفری، تحلیل شیب، قارچ میکوریزا، یادگیری ماشین

مقدمه

آربوسکولار^۲ و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه^۳ با بهبود جذب عناصر غذایی، راه‌حلی پایدار ارائه می‌دهند، اما روابط اکوفیزیولوژیکی پیچیده آن‌ها نیازمند تحلیل پیشرفته است (Brar et al., 2024). مطالعات قبلی با استفاده از هشت الگوریتم یادگیری ماشین

رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، تولید ذرت (*Zea mays* L.) را با چالش‌هایی مثل تنش‌های محیطی مواجه کرده است (Bracho-Mujica et al., 2024). کودهای زیستی مانند قارچ‌های میکوریز

۱- گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: jahan@ferdowsi.um.ac.ir)
* - نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/agry.2026.94366.1245>

2- Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)
3- Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPRs)

به کار رفته است. در انتخاب ویژگی، NSGA-II زیرمجموعه‌هایی از ویژگی‌ها را شناسایی می‌کند که عملکرد پیش‌بینی را به حداکثر می‌رسانند و در عین حال تعداد متغیرها را به حداقل می‌رسانند، که این امر خطرات بیش‌برازش را در مجموعه‌داده‌های با ابعاد بالا کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، مطالعاتی از NSGA-II برای بهینه‌سازی مجموعه‌های ویژگی در وظایف طبقه‌بندی در مجموعه‌داده‌هایی با هزاران ویژگی استفاده کرده‌اند و به دقت بهبودیافته و هزینه محاسباتی کمتری دست یافته‌اند (Mukhopadhyay et al., 2014). در تنظیم ابرپارامترها، NSGA-II پارامترهایی مانند نرخ‌های یادگیری یا عمق درختان را در مدل‌هایی مانند XGBoost بهینه می‌کند و توازن بین دقت و زمان آموزش را حفظ می‌کند. توانایی آن در مدیریت روابط غیرخطی و پیچیده، آن را برای مجموعه‌داده‌هایی با الگوهای پیچیده، مانند آن‌هایی که در تحقیقات کشاورزی وجود دارد، مناسب می‌سازد.

یانگ و همکاران (Yang et al., 2025) گزارش کردند که مدیریت آبیاری که توسط الگوریتم NSGA II بهینه شد، عملکرد گندم زمستانه (*Triticum aestivum* L.) و بهره‌وری آب را به ترتیب از ۹/۳ درصد تا ۱۴/۵ درصد، و از ۱۱/۸ درصد تا ۲۳/۷ درصد افزایش داد. در مطالعات مربوط به بهینه‌سازی کاربری اراضی، NSGA-II با در نظر گرفتن اهداف متضادی مانند کاهش فرسایش خاک و افزایش بازدهی اقتصادی، الگوهای بهینه‌ای را پیشنهاد داده که منجر به بهبود مدیریت منابع شده است (Shayegan et al., 2011). نتایج پژوهشی با عنوان بهینه‌سازی چند هدفه‌الگوی کشت با تأکید بر منافع اقتصادی و تأمین امنیت زنجیره غذایی نشان داد که برای حصول سود اقتصادی بیشتر با مدیریت مصرف آب تخصیصی بهینه، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه (الگوریتم ژنتیک نامغلوب NSGA-II) نسبت به روش‌های تک هدفه عملکرد بهتری دارد. این پژوهش پیشنهاد شد که توجه به رعایت حداقل سطح زیرکشت راهبردی گندم و افزایش کشت‌های دانه روغنی کلزا (*Brassica napus* L.) و علوفه‌ای گیاه تریتیکاله (*Triticale* sp.) مدل پیشنهادی از لحاظ تأمین امنیت زنجیره غذایی و دیدگاه پدافند غیرعامل عملکرد بهینه بوده و تناسب دارد (Amin et al., 2023). نتایج پژوهشی با کاربرد NSGA II بهینه‌سازی تخصیص آب نشان داد که این الگوریتم سبب افزایش بهره‌وری آب کشاورزی به میزان ۷۶ درصد برای مرکبات، ۴۷ درصد برنج (*Oryza sativa* L.)، ۶۰،

(ANFIS^۱، Transformer^۲، ANN^۳، SVR^۴، LightGBM^۵، XGBoost^۶، Enhanced DNN^۷، SVM^۸) نشان داده‌اند که مدل‌های شبکه عصبی (R^2 تا ۰/۵۵۵) نسبت به مدل‌های درختی (R^2 تا ۰/۳۸۵) و SVM ($R^2 = ۰/۳۲۵$) عملکرد بهتری دارند. با این حال، انتخاب ویژگی‌های بهینه و کاهش ابعاد داده هنوز چالش برانگیز است. الگوریتم NSGA-II^۹ یک الگوریتم تکاملی چند هدفه بوده که برای بهینه‌سازی مسائلی با چند تابع هدف متضاد طراحی شده است. این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط Deb و همکاران معرفی شد و یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی چند هدفه محسوب می‌شود. در بسیاری از مسائل واقعی (مثل طراحی مهندسی، مدیریت مزرعه، یا انتخاب ارقام گیاهی)، بیش از یک معیار برای بهینه‌سازی وجود دارد که معمولاً با یکدیگر در تضاد هستند (مثلاً بهینه‌سازی عملکرد در مقابل کمینه‌سازی هزینه). در این موارد، به جای یک پاسخ بهینه، مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیرمغلوب^{۱۰} مد نظر است. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های مثبت NSGA-II عبارتند از: به پارامتر وزن‌دهی برای توابع هدف، نیاز ندارد؛ تنوع جواب‌ها را در امتداد مرز پارتو^{۱۱} حفظ می‌کند؛ نسبت به نسخه‌های قبلی پیچیدگی زمانی بهینه‌تری دارد. الگوریتم NSGA-II با بهینه‌سازی چندمنظوره (کمینه‌سازی تعداد ویژگی‌ها و بهینه‌سازی دقت) و ترکیب آن با XGBoost، رویکردی نوین برای غلبه بر این محدودیت‌ها ارائه می‌دهد. NSGA-II به‌طور گسترده‌ای در یادگیری ماشین برای وظایفی مانند انتخاب ویژگی، تنظیم ابرپارامترها و بهینه‌سازی مدل‌ها

- 1- ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System): سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی
- 2- Transformer: Transformer (یا Transformer Model): مدل ترانسفورمر (معماری مبتنی بر توجه در یادگیری عمیق)
- 3- ANN (Artificial Neural Network): شبکه عصبی مصنوعی
- 4 - SVR (Support Vector Regression): رگرسیون بردار پشتیبان
- 5- LightGBM (Light Gradient Boosting Machine): ماشین گرادیان بوستینگ سبک
- 6- XGBoost (eXtreme Gradient Boosting): گرادیان بوستینگ افراطی
- 7- Enhanced DNN (Enhanced Deep Neural Network): شبکه عصبی عمیق بهبودیافته / تقویت‌شده
- 8- SVM (Support Vector Machine): ماشین بردار پشتیبان
- 9- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
- 10- Pareto-optimal
- 11- Pareto front

قدرتمند در زمینه پیش‌بینی عملکرد محصولات راهبردی چون ذرت، این مطالعه با هدف ترکیب الگوریتم فوق با الگوریتم درختی ایکس جی‌بوست، بهینه‌سازی و انتخاب ویژگی‌های مؤثر بر عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر کودهای زیستی انجام گرفت. نتایج این پژوهش می‌تواند مدیریت کارآتر نهاده‌ها و عناصر غذایی در سیستم‌های زراعی کم‌نهاده را فراهم آورده و گذار به‌سوی کشاورزی پایدار را تسهیل نماید.

مواد و روش‌ها

مکان و شرایط آزمایش

آزمایش‌ها در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد (۳۶°۱۵' شمالی، ۵۹°۲۸' شرقی و ۹۸۵ متر ارتفاع از سطح دریا) با آب‌وهوای نیمه‌خشک (بارندگی ۲۵۲ میلی‌متر و دمای متوسط ۱۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شد. خاک مزرعه لومی با کربن آلی متوسط بود. بذر ذرت دانه‌ای مورد استفاده هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ بود و هنگام کاشت با مایه تلقیح دوگونه قارچ میکوریز آرباسکولار و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (شامل ازتوباکتر *Azotobacter* sp. و آروسپیریلوم *Azospirillum* sp.) به‌روش استاندارد آغشته و سپس کشت شدند. از بیان جزئیات بیشتر به‌دلیل ضروری نبودن آن‌ها و نیز محدودیت در تعداد صفحه مقاله صرف نظر می‌شود (کسب اطلاعات بیشتر از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول مقاله امکان‌پذیر است).

مجموعه داده

داده‌ها شامل ۹۶ نمونه (هر سال ۴۸ نمونه) و ۷۵ ویژگی (۳۲ ویژگی اصلی مثل سرعت فتوسنتز و ۴۳ تعاملی مثل PmaxMean_LeafAreaIndex) بودند که طی دو سال جمع‌آوری شدند. داده‌ها به ۷۰ درصد آموزش، ۱۵ درصد اعتبارسنجی و ۱۵ درصد تست تقسیم و به‌وسیله StandardScaler استاندارد شدند.

مهندسی ویژگی

ویژگی‌های تعاملی براساس دانش اکوفیزیولوژیکی طراحی شدند. مثلاً $\text{Leaf Area Index} \times (\text{Canopy Temp_Mean})^2$ تعامل دما و سطح برگ را نشان می‌دهد.

درصد دانه‌های روغنی، ۵۹ درصد ذرت‌دانه‌ای، ۶۴ درصد گندم، ۷۷ درصد سبزیجات و ۷۶ درصد پنبه برای سناریوی سوم که یک سناریوی بیابانی است، گردید. به‌طور کلی، با بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی ضمن صرفه‌جویی چشم‌گیر در آب مصرفی، محصول تولیدی به‌ازای آب مصرفی و همچنین سود اقتصادی نیز بسته به جواب انتخابی می‌تواند افزایش یابد (Sahabifard et al., 2024). در پژوهشی دیگر گزارش شد که بازتخصیص بهینه آب در میان مصرف کنندگان بخش کشاورزی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک-فازی با هدف افزایش درآمد و عدالت در توزیع، باعث افزایش ۴۰/۷ درصدی درآمد کل شبکه و همچنین افزایش ۵۴/۵ درصدی عدالت توزیع آب شد (Kakavand et al., 2023). نتایج پژوهشی با عنوان تخمین عملکرد گندم آبی با استفاده از روش الگوریتم ترکیبی شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک نشان داد که نیتروژن کل خاک به‌عنوان مؤثرترین ویژگی در کیفیت و کمیت عملکرد گندم براساس ماتریس همبستگی پیرسون ایجادشده بین ویژگی‌ها و عملکرد بود. همچنین کارآیی مدل ژنتیک - عصبی با موفقیت برای تشریح رابطه بین عملکرد گندم و ویژگی‌های زودبافت صورت گرفت، به‌طوری‌که دارای ضریب تبیین بالا (۰/۸۷) و میانگین انحراف مربعات خطا کم (۴۷۳/۵) بود و در نهایت، نتیجه گرفته شد که مدل هیبریدی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در تخمین عملکرد گندم باشد (Barikloo et al., 2018). به‌کارگیری تلفیقی الگوریتم NSGA II و مدل AquaCrop در یک منطقه خشک، به‌منظور بهینه‌سازی راهبردهای آبیاری گندم زمستانه نشان داد که تلفیق این دو مدل، کارآیی بالایی در این منطقه نشان داد و جبهه پارتو ایجادشده در الگوریتم NSGA II امکان بهینه‌سازی مطلوبی را در شبیه‌سازی پوشش تاج‌پوشش ($R^2=0.75$) و زیست‌توده بالای خاک ($R^2=0.94$) فراهم نمود (Lyu et al., 2022).

درحالی‌که به‌کارگیری NSGA-II در کشاورزی امیدبخش بوده است، اما پیچیدگی محاسباتی آن می‌تواند برای مجموعه‌داده‌های بسیار بزرگ یک محدودیت باشد. علاوه بر این، بیشتر مطالعات بر تخصیص کاربری اراضی، بهینه‌سازی راهبردهای آبیاری و الگوی کشت تمرکز دارند و به‌طور عمده بر انتخاب ویژگی تمرکز دارند تا پیش‌بینی مستقیم، که نشان‌دهنده نیاز به رویکردهای ترکیبی است که NSGA-II را با مدل‌های پیشرفته‌ای مانند XGBoost ترکیب کند. با توجه به کمبود دانش موجود در زمینه به‌کارگیری این الگوریتم

اجرای الگوریتم

در این مطالعه، برای بهینه‌سازی انتخاب ویژگی‌ها و پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت، از یک رویکرد دو مرحله‌ای استفاده شد:

مرحله اول: NSGA-II - ابتدا، NSGA-II به‌عنوان یک الگوریتم چند هدفه^۱ به کار گرفته شد تا مجموعه‌ای از ویژگی‌های بهینه را با در نظر گرفتن دو هدف (حداقل‌سازی تعداد ویژگی‌ها و حداکثرسازی ضریب تبیین^۲) شناسایی کند. این الگوریتم با استفاده از یک جمعیت اولیه ۱۰۰ تا ۱۰۰ نسل^۳ اجرا شد تا جبهه پاراتو^۴ را تولید کند. سپس، از میان راه‌حل‌های پاراتو، بهترین مجموعه ویژگی‌ها (براساس بالاترین R^2) انتخاب شد و به‌عنوان ورودی به مدل XGBoost منتقل گردید. این رویکرد ترکیبی، این امکان را فراهم آورد تا هم ابعاد مدل کاهش یابد و هم دقت پیش‌بینی بهبود پیدا کند.

مرحله دوم: XGBoost - بعد از انتخاب ویژگی‌ها، ایکس‌جی‌بوست وارد عمل می‌شود و با استفاده از ویژگی‌های انتخاب‌شده، مدل را آموزش داده و پیش‌بینی نهایی را انجام می‌دهد. در این مرحله، دیگر NSGA-II نقشی ندارد و فقط نتیجه آن (ویژگی‌ها) به‌منظور پیش‌بینی عملکرد (دانه) به کار می‌رود.

بهینه‌سازی با NSGA-II

مراحل اصلی بهینه‌سازی توسط NSGA-II به قرار زیر است:

- ۱- جمعیت اولیه از جواب‌های تصادفی تولید می‌شود.
- مرتب‌سازی نامغلوب^۵: جمعیت به چندین سطح پارتو تقسیم می‌شود.
- جواب‌هایی که توسط هیچ کدام از بقیه جواب‌ها مغلوب نشده‌اند در سطح اول قرار می‌گیرند، و به همین ترتیب سطوح بعدی تشکیل می‌شود.
- ۲- محاسبه فاصله ازدحام^۶:

- برای حفظ تنوع جمعیت، فاصله جواب‌ها در فضای

هدف محاسبه می‌شود.

- الگوریتم، جواب‌هایی را ترجیح می‌دهد که در نواحی کم‌تراکم باشند.
- ۳- انتخاب والدین:
- از یک مقایسه دوگانه تورنمنتی^۸ استفاده می‌شود، که در آن، انتخاب براساس رتبه پارتو و فاصله ازدحام انجام می‌شود.
- ۴- اعمال عملگرهای ژنتیکی:
- ترکیب^۹ و جهش^{۱۰} روی والدین انجام می‌شود تا نسل جدیدی ایجاد شود.
- ۵- ادغام جمعیت‌ها و انتخاب نسل بعد:
- والدین و فرزندان با هم ترکیب می‌شوند و از میان آن‌ها براساس پارتو و تنوع، بهترین‌ها برای نسل بعد انتخاب می‌شوند (Deb et al., 2002).

تنظیمات و روش‌های الگوریتم‌های NSGA-II و XGBoost

۱- الگوریتم NSGA-II

- معماری و هدف: الگوریتم تکاملی برای بهینه‌سازی چندمنظوره که تعداد ویژگی‌ها را کمینه و ضریب تبیین (R^2) را بیشینه می‌کند. تعداد متغیرها برابر با ۷۵ (تعداد ستون‌های X_{scaled}) است.
- تنظیمات اولیه:
- $pop_size=50$ اندازه جمعیت اولیه.
- $n_gen=50$ تعداد نسل‌ها برای تکامل.
- $n_var=X.shape[1]$ تعداد متغیرها (۷۵ فیچر).
- $n_obj=2$ دو هدف (کمینه‌سازی تعداد ویژگی‌ها و بیشینه‌سازی R^2).
- $xl=0$ و $xu=1$ محدوده مقادیر باینری برای انتخاب ویژگی‌ها (۰ یا ۱).
- $seed=42$ برای تکرارپذیری نتایج.
- بهینه‌سازی و هایپرپارامترها:
- از روش K-Fold Cross-Validation (پنج اسپلیت،

- 1- Multi-objective optimization
- 2- R^2
- 3- $Pop_size=100$
- 4- Generations
- 5- Pareto front
- 6- Non-dominated sorting
- 7- Crowding distance

- 8- Tournament selection
- 9- Crossover
- 10- Mutation

shuffle=

○ random_state=42, True برای ارزیابی دقت هر راه‌حل استفاده شد.

○ هایپرپارامترها (pop_size و n_gen) به صورت دستی تنظیم شدند و با آزمایش‌های اولیه (تغییر pop_size بین ۳۰ تا ۱۰۰ و n_gen بین ۲۰ تا ۱۰۰) بهینه شدند. بهترین ترکیب (۵۰ و ۵۰) تعادل بین زمان محاسبه و دقت را فراهم کرد.

○ انتخاب راه‌حل بهینه براساس حداکثر R^2 میانگین از جبهه پاراتو انجام شد.

• تحلیل حساسیت:

○ حساسیت به pop_size و n_gen بررسی شد. افزایش pop_size فراتر از ۵۰ زمان، محاسبه را به صورت غیرخطی افزایش داد بدون بهبود قابل توجه R^2 (کمتر از یک درصد تغییر). کاهش n_gen به زیر ۳۰ منجر به انتخاب ویژگی‌های غیربهینه (R^2 کاهش پنج درصد) شد.

NSGA-II با pop_size=50 و n_gen=50 اجرا شد تا تعداد ویژگی‌ها را کمینه و R^2 را بیشینه کند. بهترین راه‌حل شامل نه فیچر بود (جدول ۱).

۲- الگوریتم XGBoost

• معماری و هدف: مدل رگرسیون مبتنی بر بوستینگ برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت با ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط XGBOOST.

• تنظیمات اولیه:

○ n_estimators=100-200 تعداد درختان تصمیم.

• بهینه‌سازی و هایپرپارامترها:

○ در این مطالعه، چندین مدل XGBoost با تنظیمات مختلف پارامترها (شامل تعداد برآوردکننده‌ها، نرخ یادگیری، و عمق درخت) از طریق آزمون و خطا و به صورت سیستماتیک آزمایش شدند. ابتدا، به منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل، از روش GridSearchCV با اعتبارسنجی متقابل ۵-فولدی استفاده شد تا پارامترهای بهینه (مانند n_estimators, learning_rate و max_depth) تعیین گردند. با این حال، نتایج نشان داد که اعمال این بهینه‌سازی منجر به کاهش ضریب

تعیین (R^2) از مقادیر اولیه (مانند ۰/۶۳۶) به مقادیر پایین‌تر (مانند ۰/۳۴) شد. گزارش شده است که برخی مواقع بهینه‌سازی با گریدرچ سی وی، واریانس یا تغییرپذیری مدل را زیاد کرده و در نتیجه سبب افت ضریب تبیین می‌شود (Probst et al., 2019). بر این اساس، تصمیم گرفته شد که مدل بدون استفاده از بهینه‌سازی پارامترها و با تنظیمات پیش‌فرض یا دستی (مانند learning_rate=0.01 و n_estimators=200) به کار گرفته شود، که عملکرد بهتری در پیش‌بینی متغیر هدف (عملکرد دانه) ارائه داد. برخی دلایل احتمالی برای این پدیده بیان شده‌اند:

○ بیش‌برازش به دلیل پیچیدگی بیش از حد: بهینه‌سازی ممکن است مدل را بیش از حد به داده‌های آموزشی تطبیق دهد، به ویژه با افزایش عمق درخت یا تعداد برآوردکننده‌ها، که تعمیم‌پذیری را کاهش می‌دهد. این پدیده می‌تواند در مجموعه داده‌های کوچک (مانند ۹۶ نمونه در این مطالعه) تشدید شود (Probst et al., 2019).

○ تعادل ناکافی بین سوگیری^۱ (تعصب) و واریانس: تنظیم بیش از حد پارامترها ممکن است واریانس مدل را افزایش دهد، درحالی‌که تنظیمات ساده‌تر تعادل بهتری بین سوگیری و واریانس ایجاد می‌کند (Hastie et al., 2009). یادگیری ماشین، وقتی bias بالا است، مدل کم‌برازش^۲ می‌شود، یعنی هم روی داده‌های آموزش و هم تست عملکرد ضعیفی دارد.

○ محدودیت‌های داده: با توجه به تعداد محدود نمونه‌ها و ویژگی‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی ممکن است به دام راه‌حل‌های محلی بیفتد یا نتواند الگوهای عمومی را به خوبی شناسایی کند (Bergstra & Bengio, 2012).

○ عدم تطابق معیار بهینه‌سازی: معیار R^2 ممکن است با هدف واقعی مطالعه (مانند پیش‌بینی دقیق‌تر در شرایط خاص) هم‌راستا نباشد، به ویژه اگر داده‌ها اختلال^۳ زیادی داشته باشند.

○ n_estimators در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰.

○ learning_rate در بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۱.

1- Bias

2- Underfitting

1- Noise

مثال، در این مطالعه با ۹۶ نمونه (شامل ۶۷ نمونه آموزشی، ۱۴ نمونه تست و ۱۴ نمونه اعتبارسنجی)، اعتبارسنجی اطمینان از عملکرد مناسب مدل بر روی ۱۴ نمونه اعتبارسنجی را پیش از قضاوت نهایی با ۱۴ نمونه تست ممکن می‌سازد.

نحوه اجرا: در این پژوهش، اعتبارسنجی با جداسازی بخشی از داده‌ها (۱۵ درصد یا ۱۴ نمونه) و استفاده از آن به‌عنوان مجموعه ارزیابی موقت انجام شد. مراحل اجرایی به‌شرح زیر است:

۱. تقسیم داده‌ها: داده‌ها به سه مجموعه تقسیم شدند: ۷۰ درصد برای آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی و ۱۵ درصد برای تست.

۲. آموزش مدل: مدل با استفاده از ۶۷ نمونه آموزشی آموزش داده شد.

۳. ارزیابی موقت: عملکرد مدل با محاسبه معیارهایی نظیر ضریب تبیین^۵ و ریشه میانگین مربعات خطا^۶ بر روی ۱۴ نمونه اعتبارسنجی ارزیابی گردید.

۴. تنظیم و تکرار: در صورت عدم دستیابی به نتیجه مطلوب، پارامترهای مدل اصلاح و فرآیند تکرار شد.

۵. ارزیابی نهایی: پس از بهینه‌سازی، مدل با ۱۴ نمونه تست ارزیابی شد.

این رویکرد تضمین می‌کند که مدل به‌صورت مؤثر بهینه‌سازی شده و قابلیت تعمیم‌پذیری بالایی داشته باشد.

○ max_depth در بازه ۳ تا ۶.

○ بهترین ترکیب (۲۰۰، ۰.۰۱، ۴) براساس حداکثر R^2 میانگین انتخاب شد.

○ regularization L2 (lambda=1) برای کاهش بیش‌برازش اعمال شد.

• تحلیل حساسیت:

○ حساسیت به learning_rate بررسی شد: افزایش به R^2 ۰/۱ را به ۰/۵۹۸ کاهش داد (بیش‌برازش چهار درصد). کاهش به ۰/۰۰۱ زمان آموزش را دو برابر کرد بدون بهبود R^2 .

○ تغییر max_depth به ۶ R^2 را به ۰/۶۳ رساند، اما زمان محاسبه ۳۰ درصد افزایش یافت.

ارزیابی^۱ و تعیین اعتبار^۲

اعتبارسنجی: اعتبارسنجی یکی از مراحل اساسی در فرآیند یادگیری ماشینی است که به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل پیش از انجام ارزیابی نهایی با مجموعه داده‌های تست به کار گرفته می‌شود. این روش از جنبه‌های متعددی حائز اهمیت است:

• پیشگیری از بیش‌برازش^۳: مدل ممکن است عملکرد مطلوبی بر روی داده‌های آموزشی نشان دهد، اما در پیش‌بینی داده‌های جدید ناکارآمد باشد. اعتبارسنجی به ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری مدل به داده‌های نادیده‌گرفته‌شده (که در مجموعه‌های آموزشی و تست حضور ندارند) کمک می‌کند.

• بهینه‌سازی پارامترهای فراگیر^۴: با بهره‌گیری از مجموعه داده‌های اعتبارسنجی، پارامترهایی نظیر تعداد برآوردکننده‌ها یا نرخ یادگیری در الگوریتم ایکس‌جی‌بوست قابل تنظیم هستند تا بهینه‌ترین عملکرد حاصل شود، بدون وابستگی به داده‌های تست.

• ارزیابی بی‌طرفانه: مجموعه داده‌های تست برای ارزیابی نهایی محفوظ نگه داشته می‌شوند، و اعتبارسنجی امکان بررسی اولیه و مکرر مدل را پیش از مرحله نهایی فراهم می‌کند. به‌عنوان

-
- 2- Evaluation
 - 3- Validation
 - 4- Overfitting
 - 5- Hyperparameters

6- R^2
7- RMSE

جدول ۱- ویژگی‌های منتخب توسط NSGA-II

Table 1- Selected features by NSGA-II

ویژگی Feature	شرح Description
Pmax1	سرعت فتوسنتز بیشینه در مرحله ظهور برگ پرچم Maximum photosynthesis rate at the flag leaf emergence stage
SPAD_3	محتوای کلروفیل برگ در مرحله کاکل‌دهی Leaf chlorophyll content at the silking stage
Canopy Temp_4	دمای تاج‌پوشش در مرحله خمیری دانه Canopy temperature at the dough stage
Canopy Temp_Mean	میانگین دمای تاج‌پوشش (چهار مرحله) Mean canopy temperature (4 stages)
Cob_Length	طول بلال Cob length
%P soil	درصد فسفر خاک (در انتهای فصل رشد) Soil phosphorus percentage (at the end of the growing Season)
(SPAD_Mean) ^2	مجدور میانگین (سه مرحله) محتوای کلروفیل برگ Squared mean leaf chlorophyll content (3 stages)
(Soil Respiration Rate) ^2	مجدور سرعت تنفس خاک Squared soil respiration rate
(Canopy Temp_Mean) ^2×Leaf Area Index	برهم‌کنش مجدور میانگین دمای تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ Interaction of squared mean canopy temperature and leaf area index

نرم‌افزارهای مورد استفاده

تحلیل‌ها با استفاده از پایتون نسخه ۳/۹ در محیط Spyder (Scientific PYthon Development EnviRonment) 6.0.4 انجام شد و از کتابخانه‌هایی مانند pymoo برای NSGA-II، shap برای مدل‌سازی، scikit-learn برای پیش‌پردازش، lime و برای تحلیل تفسیری، و Matplotlib و Pandas برای تولید نمودارها بهره گرفته شد. استانداردسازی داده‌ها با استفاده از StandardScaler از کتابخانه scikit-learn انجام شد تا ویژگی‌ها میانگین صفر و انحراف معیار یک داشته باشند، که این موضوع برای آموزش مؤثر شبکه‌های عصبی ضروری است. تفسیر خروجی‌های الگوریتم‌ها و رسم نمودارهای وابستگی جزئی، نمودارهای تصمیم، اهمیت نسبی ویژگی‌ها، و فورس پلات با استفاده از کتابخانه SHAP (Shapley Additive exPlanations) صورت گرفت. برای تحلیل Counterfactual تغییرات ۱۰ درصدی در انحراف معیار ویژگی‌ها بررسی شد. نمودار LIME برای توضیحات محلی تولید گردید.

نتایج و بحث

بهینه‌سازی با الگوریتم NSGA-II

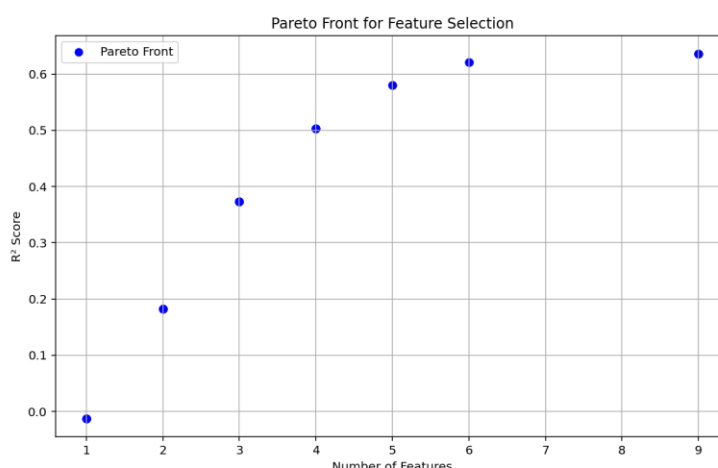
نمودار پارتو^۱ نشان می‌دهد که چگونه تعداد ویژگی‌های انتخاب شده برای مدل‌سازی بر ضریب تبیین (میزان تبیین واریانس) تأثیر می‌گذارد. NSGA-II با کاهش ۷۱ فیچر به ۹ فیچر، جبهه پاراتو را بهینه کرد و ضریب تبیین را به ۰/۶۳۶ رساند که تعادل مناسبی بین تعداد ویژگی‌ها و دقت مدل فراهم نمود (شکل ۱). محور افقی نشان می‌دهد که تعداد ویژگی‌های انتخاب‌شده از ۱ تا ۹ در نوسان است. محور عمودی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد ویژگی‌ها، ضریب تبیین (میزان تبیین واریانس) افزایش می‌یابد و به سمت مقدار بهینه نزدیک می‌شود. هر نقطه آبی در نمودار یک ترکیب بهینه از تعداد ویژگی‌ها و ضریب تبیین را نشان می‌دهد. این نقاط تشکیل یک جبهه پاراتو^۲ را می‌دهند که مرز بهینه‌های موجود است. به‌طور کلی، این نمودار به محققان و مدل‌سازان کمک می‌کند تا تعداد بهینه ویژگی‌ها را برای حداکثر ضریب تبیین انتخاب کنند و به یک تعادل بین تعداد

1- Pareto

2- Pareto front

انتخاب نه ویژگی می‌تواند بهترین تعادل باشد، زیرا ضریب تبیین به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. البته اگر محدودیت‌هایی مانند زمان آموزش یا پیچیدگی مدل وجود داشته باشد، انتخاب شش ویژگی نیز می‌تواند گزینه مناسبی باشد.

ویژگی‌ها و دقت مدل برسند. براساس قاعده پارتو، هرچه تعداد ویژگی‌ها بیشتر باشد، ضریب تبیین بهتر می‌شود، اما افزایش ویژگی‌ها بعد از یک نقطه، بازدهی کمتری خواهد داشت. در پژوهش حاضر با انتخاب شش ویژگی، ضریب تبیین حدود ۰/۵۵ است، و با انتخاب نه ویژگی، ضریب تبیین به حدود ۰/۶۳ می‌رسد. بنابراین، در این مورد،



شکل ۱- نمودار جبهه پاراتو نشان‌دهنده تعادل بین تعداد ویژگی‌ها و ضریب تبیین در الگوریتم NSGA-II

Fig. 1- Pareto front diagram showing the trade-off between the number of features and the coefficient of determination in the NSGA-II algorithm

گرفته شده بودند، بهبود نشان داد،^۳ ANFIS ($R^2=0.555$ ،
Transformer ($R^2=0.545$ ، $RMSE=2.804$)،
ANN ($R^2=0.518$ ، $RMSE=2.917$). این نتایج از طریق تعیین
اعتبار روی مجموعه داده‌های مستقل به دست آمده و حاکی از برتری
الگوریتم پیشنهادی در پیش‌بینی عملکرد دانه است.

نمودار پراکنش نمونه‌های پیش‌بینی‌شده در مقابل نمونه‌های
مشاهده‌شده برای الگوریتم مورد ارزیابی در شکل ۲ نشان داده شده
است. ضریب تبیین برابر با ۰/۶۳ و جذر میانگین مربعات خطا برابر با
۲/۱۷ تن در هکتار، که از طریق تعیین اعتبار به دست آمده، حاکی از
دقت خوب مدل در پیش‌بینی می‌باشد. مور و همکاران (Moore et al., 2013)، دامنه زیر را برای تفسیر ضریب تبیین (شاخصی از نکویی

ارزیابی و تعیین اعتبار الگوریتم تلفیقی

تعیین اعتبار، بخشی از فرآیند ارزیابی است. ارزیابی کل فرآیند،
بررسی عملکرد مدل را شامل می‌شود. این فرآیند شامل استفاده از
داده‌های آموزش، اعتبارسنجی، تست^۱ برای اندازه‌گیری نهایی عملکرد
(مثل R^2 یا $RMSE$) و همچنین استفاده از داده‌های اعتبارسنجی^۲
برای تنظیم مدل یا انتخاب هایپرپارامترها می‌شود. تعیین اعتبار، یک
مرحله خاص در این فرآیند ارزیابی است که روی مجموعه داده‌های
جداگانه انجام می‌شود و هدف آن، بررسی مدل پیش از ارزیابی نهایی،
تنظیم هایپرپارامترها، یا پیشگیری از بیش‌برازش است. تعیین اعتبار
معمولاً قبل از ارزیابی نهایی با داده‌های تست انجام می‌شود.

مدل نهایی، ضریب تبیین برابر با $R^2=0.636$ و جذرمیانگین
مربعات خطا برابر با $RMSE=2.171$ تن در هکتار داشت که نسبت
به الگوریتم‌های مشابه که در مطالعات قبلی به همین منظور به کار

3- ANFIS ($R^2=0.555$ ، $RMSE=2.804$)، Transformer
($R^2=0.545$ ، $RMSE=2.834$)، ANN
($R^2=0.518$ ، $RMSE=2.917$)

1- Test set
2- Validation set

مختلف (یا نمونه‌های مختلف) مدل، نوسان زیادی دارد، به عبارت دیگر، مدل نسبت به این ویژگی در برخی موارد آن را خیلی مهم و در موارد دیگر کم‌اهمیت ارزیابی کرده، که می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی متغیر، اثرات فصلی، یا تعاملات پیچیده با سایر متغیرها باشد. پهنای زیاد این ویولن‌ها در هر دو ناحیه منفی و مثبت محور افقی نشان می‌دهد که مقدار اهمیت این ویژگی‌ها در بین نمونه‌های مختلف زیاد است، و بسته به ماهیت ویژگی، تفسیر متناسب آن توسط رنگ (قرمز برای تأثیر مثبت و آبی برای تأثیر منفی بر خروجی مدل) صورت می‌گیرد. به‌طور کلی، هرچه در سمت راست خط پایه، پهنای ویولن‌ها بیشتر و رنگ‌ها به قرمز متمایل‌تر باشند، حاکی از تأثیر پدیدار آن ویژگی‌ها در بین نمونه‌های مختلف است. ویژگی‌های با رتبه‌های ۱ تا ۶ (شکل ۳؛ طول بلال، دمای تاج‌پوشش، شاخص کلروفیل برگ، درصد فسفر خاک و سرعت تنفس خاک)، به‌ویژه در مناطق با تغییرات دمایی زیاد، شرایط رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و مدل به‌خوبی اهمیت آن‌ها را پیش‌بینی کرده است (Taiz et al., 2018; Slafer et al., 2023). گزارش شده است که در پیش‌بینی عملکرد ذرت با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، SVR، REPT و M5P Decision Tree، بهترین کارایی و دقت مربوط به جنگل تصادفی بود، به‌ویژه هنگامی که با داده‌های آبیاری، باندهای طیفی و دما به‌عنوان ویژگی‌های مهم به کار گرفته شد (Baio et al., 2023). این نتایج با ویژگی‌های مجموعه داده پژوهش حاضر، مانند Canopy Temp_4 و Leaf Area Index هم‌راستا است.

نمودار تصمیم^۴

شکل ۴، یک نمودار تصمیم مبتنی بر مقادیر شیپ برای الگوریتم تلفیقی ان‌اس‌جی‌ای و ایکس‌جی‌بوست است که برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر کودهای بیولوژیک رسم شده است. مقادیر شیپ، ابزار قدرتمندی برای درک نحوه اثرگذاری هر ویژگی ورودی بر پیش‌بینی مدل هستند.

برازش^۱ پیشنهاد کرده‌اند: $R^2 < 0.25$: بسیار ضعیف؛ $0.25 \leq R^2 < 0.50$: ضعیف؛ $0.50 \leq R^2 < 0.75$: متوسط؛ $R^2 \geq 0.75$: قابل توجه. براساس راهنمای کوهن (Cohen, 1988)، ضرایب تبیین مساوی یا بزرگ‌تر از ۰/۲۶ در محدوده قابل توجه^۲ قرار می‌گیرند. اگرچه ضریب تعیین به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان شاخصی از برازش مدل در رگرسیون خطی و چندگانه به کار می‌رود، اما تفسیر آن در زمینه یادگیری ماشین – به‌ویژه با الگوریتم‌های غیرخطی باید با احتیاط صورت گیرد. دلیل این امر آن است که R^2 لزوماً ظرفیت پیش‌بینی یا توان تعمیم مدل‌های پیچیده را به‌طور کامل نشان نمی‌دهد و در برخی موارد ممکن است که خوش‌بینانه یا گمراه‌کننده باشد، به‌ویژه در شرایطی با ابعاد بالا یا بیش‌برازش. بنابراین توصیه می‌شود که علاوه بر R^2 ، از شاخص‌هایی مانند RMSE، MAE یا اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل استفاده گردد (Kuhn & Johnson, 2013). فاشوتو و همکاران (Fashoto et al. 2021) اظهار داشتند که مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد عملکرد محصول ذرت نسبت به روش‌های سنتی (رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام حذفی پس‌رونده/افزودنی پیش‌رونده) برتری دارند. گزارش شده است که مدل جنگل تصادفی در تخمین فعالیت‌های آنزیمی خارج سلولی خاک در زمین‌های شور ساحلی بازسازی‌شده کشاورزی عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون‌های خطی چندگانه داشته است (Xie et al., 2021).

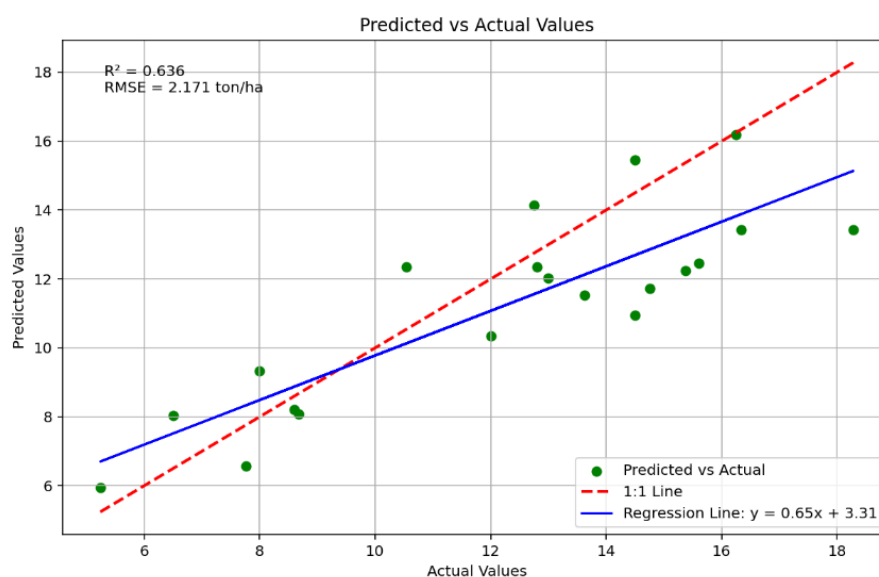
تحلیل شیپ^۳

شکل ۳، توزیع اهمیت استاندارد شده ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی و خاکی مؤثر بر عملکرد دانه ذرت را براساس الگوریتم تلفیقی NSGA II+XGBoost نشان می‌دهد. تحلیل شیپ نشان داد که ویژگی‌هایی مانند طول بلال (Cob_Length) و میانگین دمای تاج‌پوشش (Canopy Temp_Mean) بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی مدل دارند، که با دانش اکوفیزیولوژیکی هم‌راستا است. ویژگی‌ها براساس میانگین اهمیت از بالا به پایین مرتب شده‌اند و هر نمودار ویولن، تراکم و پراکندگی مقادیر اهمیت را برای یک ویژگی خاص به تصویر می‌کشد. در یک متغیر خاص، وقتی که پهنای ویولن در کل محور افقی یکسان باشد، نشان می‌دهد که اهمیت آن متغیر در شرایط

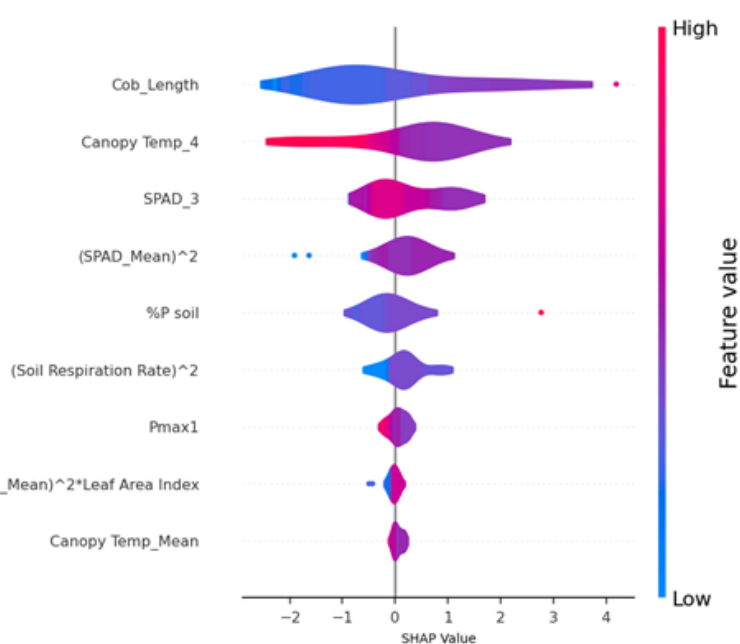
4- Goodness-of-fit

1- Substantial

2- SHapley Additive exPlanations (SHAP)



شکل ۲- نمودار پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی عملکرد دانه ذرت توسط الگوریتم ترکیبی XGBoost و NSGA-II
Fig. 2- Scatter plot of predicted vs. actual maize grain yield values using the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm



شکل ۳- نمودار ویولونی اهمیت نسبی ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی XGBoost و NSGA-II
Fig. 3- Violin plot of the relative importance of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm

ویژگی را بر پیش‌بینی عملکرد نشان می‌دهد (مثلاً افزایش یا کاهش عملکرد). محور عمودی ویژگی‌های مدل را فهرست کرده است (مانند دمای تاج‌پوشش، شاخص کلروفیل، تعداد بلال، سرعت تنفس خاک و

در این تصویر، تغییرات مقادیر شیپ برای هر ویژگی نسبت به مقادیر آن ویژگی در نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود. در این نمودار، محور افقی نمایانگر مقدار شیپ است، که میزان تأثیر هر

هکتار، به مقدار قبلی افزوده و عملکرد دانه را به حدود ۱۲/۲ تن در هکتار رسانده است. در ادامه، درصد فسفر خاک با افزودن ۰/۷۷۹۴ تن در هکتار به عملکرد دانه، عملکرد را به حدود ۱۳ تن در هکتار رسانده است. پس از آن، مجذور سرعت تنفس خاک، مجذور میانگین شاخص کلروفیل برگ و در نهایت طول بلال، عملکرد دانه را به ۱۶/۱۸ تن در هکتار رساندند. میزان تأثیر هر کدام از ویژگی‌ها علاوه بر عدد جلوی هر ویژگی در نمودار، از طول هر پیکان قرمز نیز قابل مشاهده و ارزیابی است. قرار گرفتن شاخص کلروفیل برگ، سرعت تنفس خاک، درصد فسفر خاک، دمای تاج‌پوشش و سرعت فتوسنتز بیشینه، به عنوان ویژگی‌های پیش‌برنده عملکرد، با نتایج حاصله در تحلیل‌های قبلی (شیپ و یولون، شیپ دسیژن و واترفال پلات) مطابقت دارد. بهینه‌سازی NSGA II در پنج الگوی تنظیمی مختلف نشان داد که این الگوریتم در ترکیب با مدل DSSAT از عملکرد بالایی برای بهینه‌سازی راهبردهای آبیاری و کوددهی ذرت برخوردار بود که به نوبه خود اثربخشی الگوریتم بهبودیافته را تأیید کرد (Du et al., 2024).

تحلیل اهمیت نسبی ویژگی‌ها^۴

در شکل ۶، اهمیت نسبی^۵ ویژگی تشخیص داده شده توسط الگوریتم در افزایش پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت تحت کاربرد کودهای زیستی، به ترتیب نشان داده شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، ترتیب ویژگی‌ها با نمودار فورس پلات، همخوانی دارد. گزارش شده است که تلفیق الگوریتم‌های یادگیری ماشین مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی به همراه مهندسی ویژگی‌ها، در پیش‌بینی عملکرد سویا (*Glycine max L.*)، میانگین خطای مطلق را ۱۲ درصد و ضریب تبیین را ۲۵ درصد بهبود بخشید (Ingole et al., 2025).

تحلیل اثرات متقابل ویژگی‌ها

شکل ۷ نشان می‌دهد که چطور تعامل بین ویژگی‌ها روی پیش‌بینی مدل تأثیر می‌گذارد. هر میله نشان‌دهنده اثر کلی یک ویژگی با نشان دادن اثرات متقابل آن با تمام ویژگی‌های برتر بر خروجی مدل با استفاده از قدر مطلق میانگین مقدار شیپ است. این مقدار، ترکیب تأثیرات فردی و تعاملی ویژگی‌ها را نشان می‌دهد. به طور کلی، نمودار اینتراکشن شیپ، بیش ارزشمندی در مورد اهمیت

غیره). هر خط بیانگر یک نمونه (سال-مکان)^۱ در اینجا منظور عملکرد دانه ذرت در یک کرت آزمایشی در یکی از دو سال آزمایش است) می‌باشد. هر کدام از این خط‌های رنگی هنگام عبور از یک ویژگی (مثلاً دمای کمینه روزانه)، به سمت چپ یا راست منحرف می‌شوند: اگر به سمت چپ برود یعنی شیپ منفی بوده و عملکرد کاهش می‌یابد. اگر خط به سمت راست خط پایه منحرف شود یعنی شیپ مثبت بوده و عملکرد افزایش یافته است. در ویژگی‌هایی که قدرت توضیح‌دهندگی بالایی دارند، این انحراف‌ها زیاد و شدید هستند. اگر خطوط در یک ویژگی به صورت قابل توجهی از هم جدا شوند (باز شوند)، یعنی آن ویژگی اثر زیادی در خروجی مدل دارد. اگر خطوط تقریباً صاف یا هم‌راستا باقی بمانند، آن ویژگی اثر چندانی در مدل نداشته است. اثر یک ویژگی همیشه خطی یا یکنواخت نیست؛ یعنی مقدار بیشتر یک ویژگی لزوماً همیشه به معنای بهتر یا بدتر بودن نیست، بلکه ممکن است از یک نقطه به بعد، اثر آن ویژگی کاهش پیدا یافته یا حتی برعکس شود. تحلیل نمودار تصمیم، حاکی از همخوانی کامل آن با نمودار ویولونی می‌باشد و بر اهمیت و تأثیر ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی از جمله دمای تاج‌پوشش، شاخص کلروفیل برگ، سرعت تنفس خاک و سرعت فتوسنتز بیشینه که همگی تحت تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم کودهای زیستی به کاررفته در این تحقیق بودند، صحنه گذاشت (Brar et al., 2024).

نمودار فورس^۲

فورس پلات، یک نمایش تعاملی یا ساکن است که توسط matplotlib تولید می‌شود و نشان می‌دهد که چطور هر ویژگی برای یک نمونه خاص، پیش‌بینی مدل را از مقدار پایه^۳ به مقدار نهایی می‌برد. تأثیر مثبت (با رنگ قرمز) و منفی (با رنگ آبی) هر ویژگی را برای یک ردیف مشخص از دیتا (مثلاً X_test[0] در مطالعه حاضر) یا میانگین داده‌های نمونه‌های تست نشان می‌دهد. به طور کلی، نمودار فورس یک داستان بصری از تغییرات پیش‌بینی را نشان می‌دهد. در شکل ۵، ابتدا سرعت فتوسنتز بیشینه در مرحله ظهور برگ پرچم، مقدار عملکرد دانه را ۰/۰۱۵ تن در هکتار افزایش داده است. سپس دمای تاج‌پوشش در مرحله پر شدن دانه، به میزان ۰/۲۳۴۷ تن در

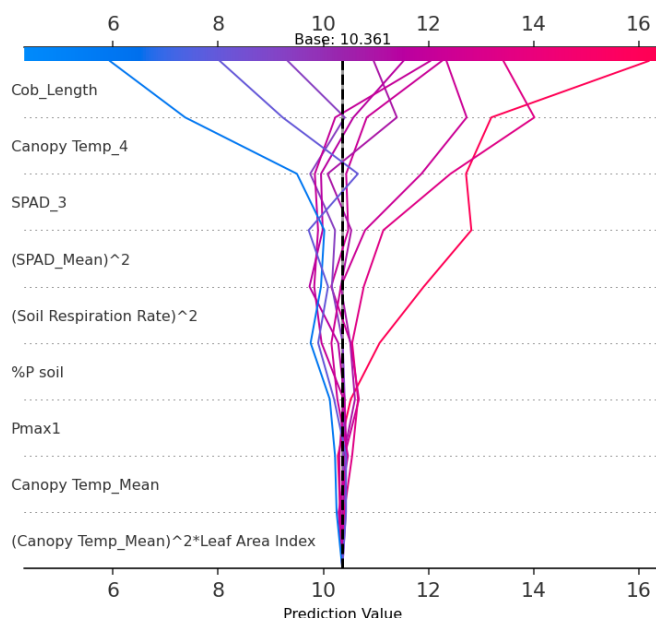
- 1- Year-location
- 2- Force plot
- 3- Base value

اختصاص داده است، بنابراین یکی از متغیرهای مهم مدل محسوب می‌شود.

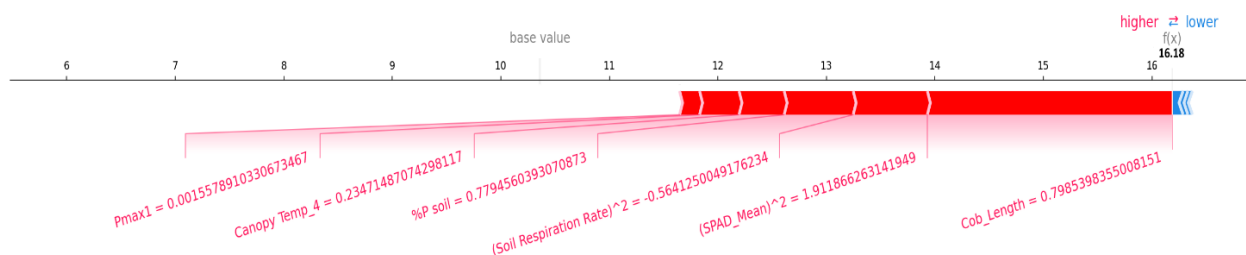
۳. شاخص کلروفیل برگ در مرحله کاکل‌دهی SPAD_3: این ویژگی میانگین مقدار شیب متوسطی دارد، یعنی تأثیری قابل توجه اما نه به اندازه دو ویژگی قبلی بر خروجی مدل دارد.
۴. مجذور شدت تنفس خاک $(\text{Soil Respiration Rate})^2$: این ویژگی میانگین مقدار شیب نسبتاً بالایی دارد، و حاکی از آن است که یک جزء غیرخطی مهم در مدل می‌باشد.

نسبی و تعامل ویژگی‌های مدل ارائه می‌دهد و کمک می‌کند تا محرک‌های اصلی خروجی مدل شناسایی شوند و در صورت لزوم، تلاش‌های بیشتری برای مهندسی ویژگی‌ها انجام گیرد. براساس تحلیل انجام گرفته، نه تعامل برتر به شرح زیر هستند:

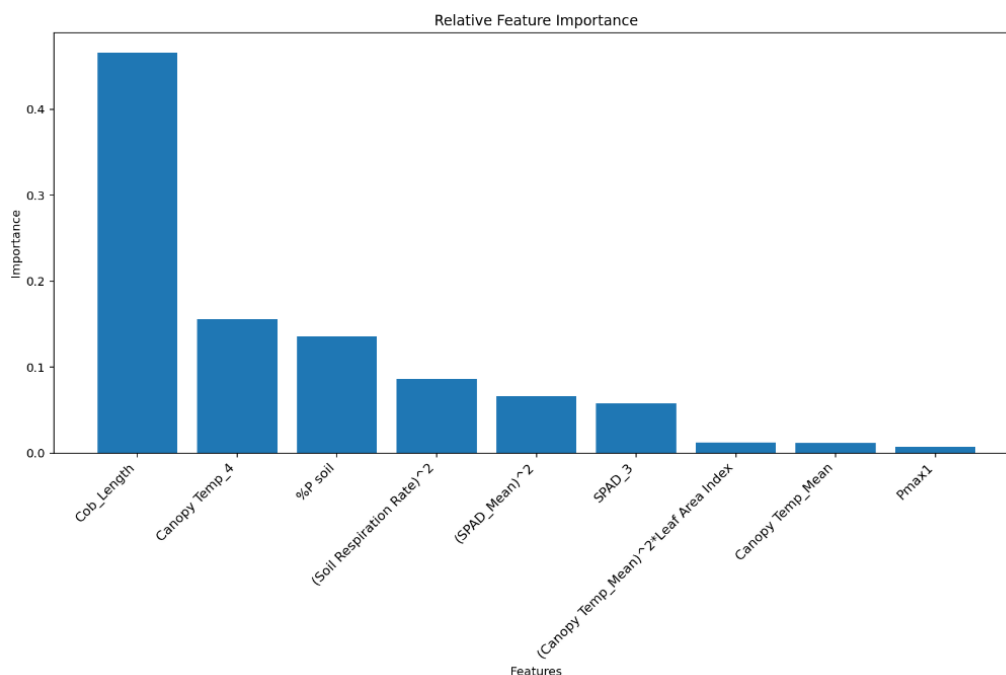
۱. طول بلال (Cob_Length): این ویژگی بالاترین میانگین مقدار شیب را دارد، یعنی مهم‌ترین متغیر توسط مدل تشخیص داده شده است.
۲. دمای تاج‌پوشش در مرحله پر شدن دانه (Canopy Temp_4): این ویژگی نیز میانگین مقدار شیب بالایی را به خود



شکل ۴- نمودار تصمیم برای ۱۰ نمونه و ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم ترکیبی XGBoost و NSGA-II
Fig. 4- Decision plot for ten samples and selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm



شکل ۵- فورس پلات برای نشان دادن تأثیر ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی XGBoost و NSGA-II
Fig. 5- Force plot showing the impact of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm



شکل ۶- نمودار اهمیت نسبی ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost
Fig. 6- Relative importance plot of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm

تحلیل اکوفیزیولوژیکی ویژگی‌های برتر حاکی از تأثیر مثبت کاربرد کودهای زیستی در پژوهش حاضر می‌باشد. به عبارت دیگر، می‌توان اثرات مثبت این کودها را به افزایش فسفر قابل دسترس در خاک و بهبود روابط آبی و به دنبال آن افزایش سطح برگ با محتوای کلروفیل بیشتر و تشدید فعالیت سیستم فتوسنتزی گیاه نسبت داد. گزارش‌های متعددی در تأیید چنین اثرات و روابط توسط محققان مختلف ارائه شده است (Salvador et al., 2022; Mitra et al., 2023; Khoso et al., 2024; Bhupenchandra et al., 2024).

نمودار آبشاری^۱ یا اثرات تجمعی^۲ ویژگی‌ها

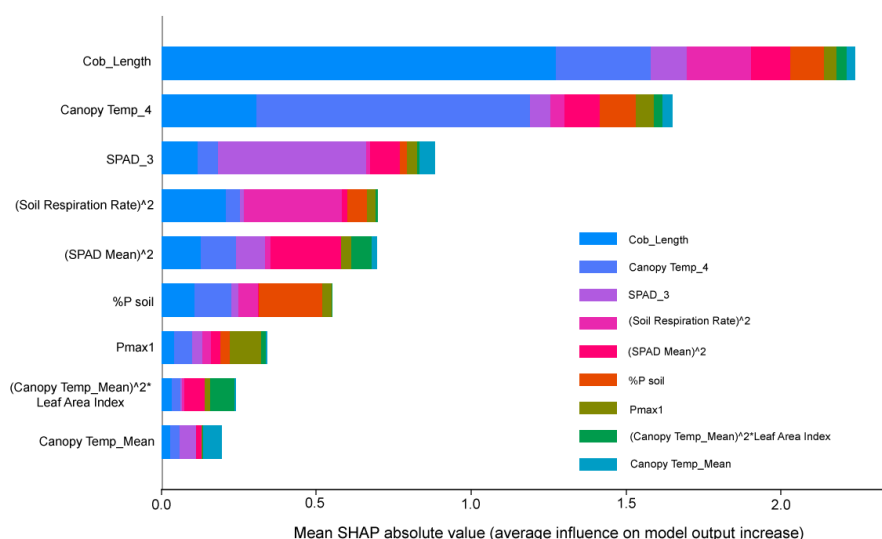
شیپ واتر فال پلات، تغییرات تجمعی یا انباشتی تأثیر هر ویژگی بر روی پیش‌بینی مدل برای یک نمونه خاص (در مطالعه حاضر) یا میانگین نمونه‌ها در داده‌های تست را نشان می‌دهد. هر فلش یا میله نشان‌دهنده اثر یک ویژگی (یا برهم‌کنش) روی پیش‌بینی است و محور عمودی نشان می‌دهد که چطور این تأثیرات با هم جمع می‌شوند تا به خروجی نهایی (عملکرد دانه) برسند. فلش قرمز معمولاً

۵. مجذور میانگین شاخص کلروفیل برگ $(SPAD_Mean)^2$: این ویژگی میانگین مقدار شیپ متوسطی دارد، یعنی یک رابطه غیرخطی مهم را در داده‌ها منعکس می‌کند.
۶. درصد فسفر خاک (%P soil): این ویژگی میانگین مقدار شیپ نسبتاً بالایی دارد، پس پیش‌بینی‌کننده مهمی در مدل محسوب می‌شود.
۷. سرعت فتوسنتز بیشینه در مرحله ظهور برگ پرچم Pmax1: این ویژگی میانگین مقدار شیپ متوسطی دارد، به عبارت دیگر، به خروجی مدل کمک می‌کند، اما این نقش در حد متوسط است.
۸. اثر متقابل مجذور میانگین دمای تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ $(Canopy_Temp_Mean)^2 \times Leaf_Area_Index$: این جزء تعاملی میانگین مقدار شیپ متوسطی دارد، و نشان می‌دهد که رابطه غیرخطی مهمی بین دمای تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ وجود دارد.
۹. میانگین دمای تاج‌پوشش $(Canopy_Temp_Mean)$: این ویژگی میانگین مقدار شیپ نسبتاً پایینی دارد، و نسبت به دیگر ویژگی‌ها اهمیت کمتری در خروجی مدل دارد.

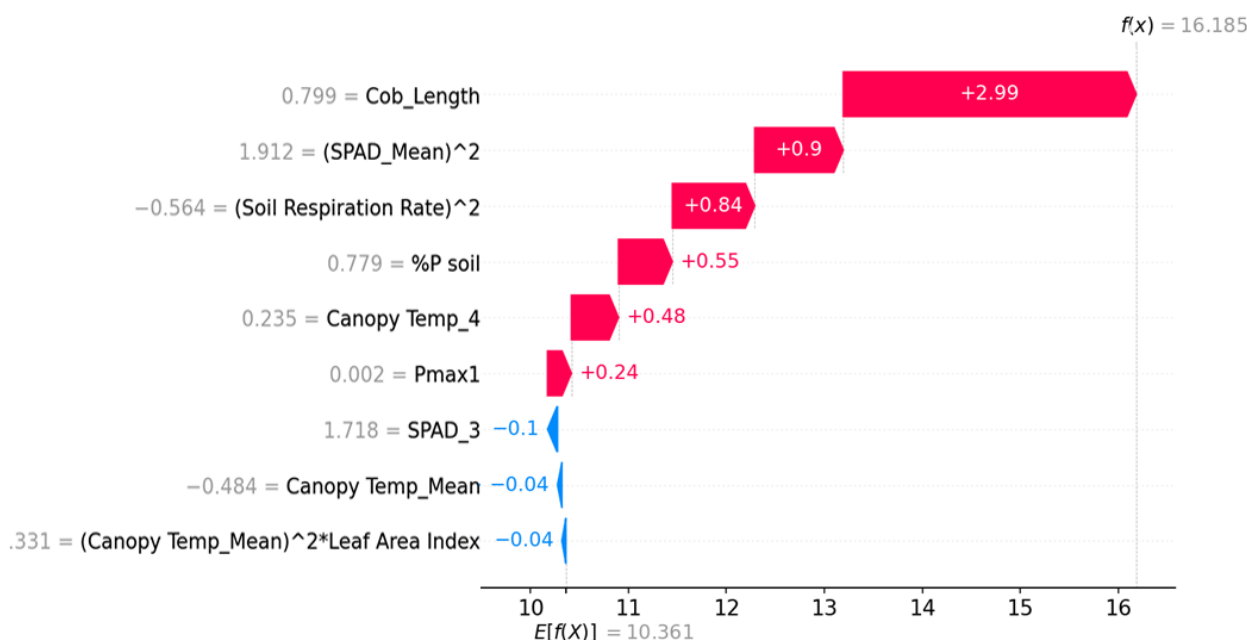
1- Waterfall plot
2- Cumulative

کمک کرده است. مقدار کنار اسم ویژگی (محور عمودی) که با رنگ خاکستری نمایش داده شده، مقدار اثر خالص ویژگی بر افزایش یا کاهش عملکرد دانه را نشان می‌دهد (شکل ۸).

نشان‌دهنده تأثیری است که پیش‌بینی را به سمت افزایش (مثبت) می‌برد. فلش آبی نشان‌دهنده تأثیری است که پیش‌بینی را به سمت کاهش (منفی) می‌برد. مقدار داخل فلش نشان‌دهنده مقدار شیپ برای آن ویژگی یا تعامل است، که نشان می‌دهد چقدر به تغییر پیش‌بینی



شکل ۷- نمودار شیپ اثر متقابل ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost
Fig. 7- SHAP interaction plot of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm



شکل ۸- نمودار آبشاری دویعدی ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost
Fig. 8- Two-dimensional Waterfall Plot of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm

باعث افزایش عملکرد دانه شدند. "مجذور سرعت تنفس خاک" منفی شده (۰/۸-) که نشان می‌دهد تعامل یا اثر این ویژگی در این نقطه

"طول بلال" و "مجذور میانگین شاخص کلروفیل" اثر مثبتی دارند (فلش قرمز با مقادیر مثبت) که نشان می‌دهد این ویژگی‌ها

پیچیده کمک می‌کند. این نمایش برای تحلیل نمونه‌های خاص، مثل ردیف اول X_test ، اطلاعات مکمل را نسبت به واتر فال دوبعدی فراهم می‌سازد.

تحلیل سناریوی معکوس^۱ یا وضعیت فرضی

شکل ۱۰ (نمودار کانتر فکچوال) نشان‌دهنده تأثیرات انباشتی

ویژگی‌ها بر پیش‌بینی عملکرد دانه برای یک نمونه خاص است. مقادیر شیب با واحد در هکتار نشان می‌دهند که هر ویژگی، با فرض تغییر به اندازه حدود ۱۰ درصد انحراف معیار خود، چقدر به افزایش یا کاهش پیش‌بینی کمک کرده است. نتایج به شرح زیر تفسیر می‌شوند:

- $(-0.457) \text{ (Canopy Temp_Mean)}^2$: این ویژگی با بیشترین اثر منفی، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه کاهش‌دهنده است. مجذور میانگین دمای تاج‌پوشش، با تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار، به دلیل دمای بالای تاج‌پوشش، تنش حرارتی ایجاد کرده و عملکرد دانه را به میزان 0.457 تن در هکتار کاهش داده است. این اثر منفی می‌تواند به رابطه غیرخطی دما با عملکرد اشاره داشته باشد، جایی که دماهای خیلی بالا اثر معکوس دارند.
- $0.424 \text{ (Fv/Fm Ratio_2)}$: این ویژگی با بیشترین اثر مثبت، نقش کلیدی در افزایش پیش‌بینی دارد. نسبت Fv/Fm (کارایی فتوشیمیایی)، با تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار، به عنوان شاخصی از سلامت فتوسنتز، با ارزش 0.424 تن در هکتار به بهبود عملکرد دانه کمک کرده است. این نتیجه با دانش اکوفیزیولوژیک هم‌راستاست، زیرا Fv/Fm بالاتر معمولاً با نمود^۲ بهتر گیاه همراه است.
- $0.128 \text{ (Dry Matter Yield)}$: این ویژگی اثر مثبتی دارد و با تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار، به میزان 0.128 تن در هکتار به افزایش پیش‌بینی عملکرد دانه کمک کرده است. عملکرد ماده خشک به عنوان یک شاخص رشد، عامل اصلی در حمایت از تولید دانه به عنوان عملکرد نهایی گیاه است.
- -0.067 (Pmax1) : سرعت فتوسنتز بیشینه در مرحله ظهور برگ پرچم ($Pmax1$)، با تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار، اثر منفی کوچکی با 0.067 واحد دارد. این می‌تواند به این معنی

خاص، 0.8 واحد به سمت کاهش پیش‌بینی (عملکرد دانه) کمک کرده است. در کنار اسم این ویژگی، مقدار 0.864 - با رنگ خاکستری نشان‌دهنده اثر خالص این ویژگی بر کاهش عملکرد دانه است (**شکل ۸**). در تفسیر این نتیجه که اندکی غیرمعمول به نظر می‌رسد باید به نکاتی چند توجه داشت: آ- تأثیر متغیر: واتر فال پلات، تأثیر هر فیچر را برای یک نمونه خاص (مثلاً ردیف اول داده‌های تست) نشان می‌دهد. اگر ارزش "مجذور سرعت تنفس خاک" در این نمونه خاص بالا باشد، ممکن است اثر منفی شدیدی داشته باشد، حتی اگر در بقیه دیتاست اثر آن متعادل یا مثبت باشد. فلش قرمز فقط نشان‌دهنده جهت کلی اثر است (مثبت یا منفی)، نه اینکه همیشه مثبت باشد. ب- تعاملات پیچیده: در مدل‌های پیچیده (مثل ایکس‌جی‌بوست)، اثر یک ویژگی به تنهایی معیار نیست، بلکه به تعامل آن با ویژگی‌های دیگر بستگی دارد، مثلاً "مجذور سرعت تنفس خاک" ممکن است در ترکیب با "طول بلال" یا "مجذور میانگین شاخص کلروفیل" یک اثر منفی ایجاد کرده باشد، که در این نمونه خاص غالب شده باشد. پ- انباشت تأثیرات: واتر فال پلات، تأثیرات را به صورت انباشتی نشان می‌دهد. اگر ویژگی‌های قبلی (مثل "طول بلال") پیش‌بینی را زیاد بالا برده باشند، اثر منفی "مجذور سرعت تنفس خاک" می‌تواند یک تعدیل‌کننده باشد تا پیش‌بینی به واقعیت نزدیک‌تر شود. رنگ خاکستری (0.864 -) نشان می‌دهد که این ویژگی به طور کلی کاهش‌دهنده است، ولی مقدار 0.8 - در این نمونه خاص نشان می‌دهد که اثر آن اینجا شدیدتر است. گزارش شده است که تنفس خاک تحت تأثیر کاربرد نهاده‌های شیمیایی تشدید می‌شود و همین نکته مقایسه و تحلیل نهایی آن را با سیستم‌های زراعی کم‌نهاده با مشکل مواجه می‌سازد. زیرا در سیستم‌های کم‌نهاده، محتوای بالای ماده آلی خاک سبب گسترش جمعیت ریزجانداران خاک می‌شود که به نوبه خود، تشدید تنفس خاک را به دنبال دارد. تفکیک تنفس ناشی از جمعیت ریزجانداران خاک (مثبت) از تنفس تشدیدشده ریشه به سبب کاربرد نهاده‌های شیمیایی (منفی)، همچنان به عنوان یک موضوع چالش برانگیز باقی مانده است.

شکل ۹، تغییرات سبب‌بعدی تأثیر تجمعی ویژگی‌ها را بر پیش‌بینی

عملکرد دانه نشان می‌دهد و زاویه دید متفاوتی نسبت به شکل دوبعدی ارائه می‌کند. محور سوم، ارتباط بین ویژگی‌ها و شدت اثر آن‌ها را به صورت بصری برجسته ساخته و به درک بهتر تعاملات

1- Counterfactual analysis

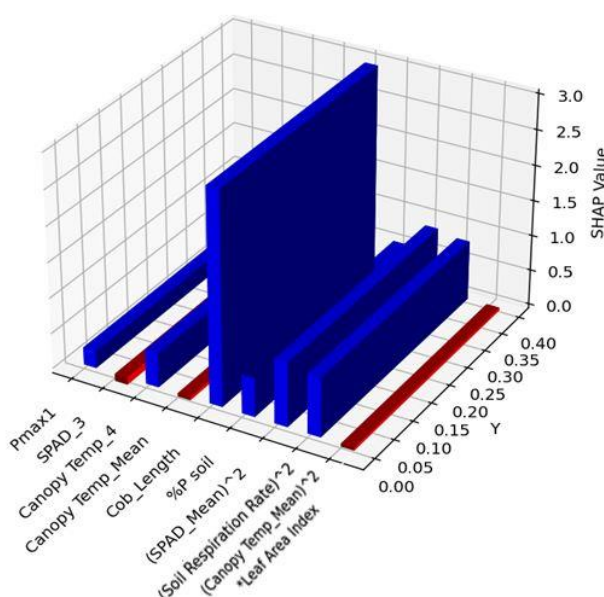
2- Performance

این موضوع می‌تواند به شرایط خاک (مثلاً کمبود آب در خاک‌های کم‌عمق، بافت خاک، ساختمان ضعیف خاک و غیره) اشاره کند که سیستم ریشه وسیع‌تر در این نمونه خاص مفید نبوده‌اند.

باشد که در این شرایط خاص (مثلاً نور شدید یا دمای بالا)، فتوسنتز بیش‌ازحد ممکن است به گیاه تنش وارد کرده و عملکرد را کمی کاهش داده باشد.

- Specific Root Length (-0.030): طول ویژه ریشه، با تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار، اثر منفی ۰/۰۳۰- تن در هکتار دارد.

SHAP Waterfall Surface Plot



شکل ۹- نمودار آبشاری سه بُعدی ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost

Fig. 9- Three-dimensional waterfall plot of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm

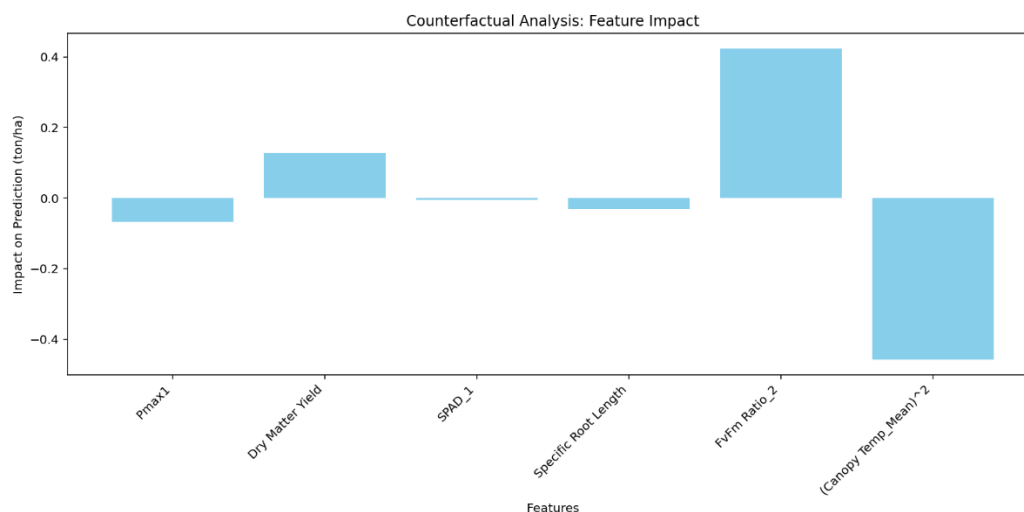
در نظر گرفته، و اثرات منفی ممکن است که به دلیل خروج از محدوده بهینه ویژگی‌ها باشد.

- نمونه خاص: این نتایج برای یک نمونه خاص و با فرض تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار هر ویژگی صدق می‌کند و ممکن است با میانگین کل دیتاست متفاوت باشد.

به‌طورکلی، این نمودار نشان می‌دهد که ویژگی‌های مرتبط با دمای تاج‌پوشش و نسبت فلورسانس کلروفیل برگ، بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی مدل دارند. این اطلاعات می‌تواند به بهبود مدیریت زراعی به‌منظور دستیابی به عملکرد بیشتر از طریق شناسایی متغیرهای کلیدی و بهبود مدل کمک کند.

- SPAD_1 (-0.005): این ویژگی، با تغییر ۱۰ درصد انحراف معیار، اثر منفی بسیار کم (۰/۰۰۵-) دارد و نشان می‌دهد که شاخص کلروفیل SPAD_1 در این نمونه خاص تأثیر قابل توجهی بر عملکرد دانه نداشته است.
- تحلیل عمیق‌تر سناریوی فرضی حاکی از اهمیت موارد زیر است: تعادل اثرات: مجموع اثرات مثبت (۰/۱۲۸+۰/۴۲۴) و منفی (۰/۵۵۲-) (۰/۵۵۹=-۰/۴۵۷-۰/۰۶۷-۰/۰۳۰-۰/۰۰۵) نشان می‌دهد که مدل با تعدیل این ویژگی‌ها، پیش‌بینی را به یک مقدار متعادل رسانده است. مقدار پایه که در نمودار مشخص است، نقطه شروع پیش‌بینی است که با این تأثیرات تنظیم می‌شود.

- رابطه غیرخطی: حضور مجذورهای مثل Canopy Temp_Mean^2 نشان می‌دهد که مدل روابط غیرخطی را



شکل ۱۰- نمودار کانترفاکچوآل ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost
Fig. 10- Counterfactual plot of selected features by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm

پیش‌بینی دارد. به عبارت دیگر، افزایش طول بلال می‌تواند منجر به افزایش پیش‌بینی شود.

۲. $(SPAD_Mean)^2$: این ویژگی نیز تأثیر مثبت و قوی بر پیش‌بینی دارد. یعنی افزایش مجذور میانگین شاخص کلروفیل برگ می‌تواند پیش‌بینی را بهبود ببخشد.

۳. Canopy Temp_4: این ویژگی، تأثیر منفی متوسطی بر پیش‌بینی دارد. به این معنی که افزایش دمای تاج‌پوشش در زمان پر شدن دانه می‌تواند منجر به کاهش پیش‌بینی شود.

۴. SPAD_3: این ویژگی، تأثیر مثبت قوی بر پیش‌بینی دارد. یعنی افزایش شاخص کلروفیل برگ در زمان شیر دانه می‌تواند پیش‌بینی را بهبود ببخشد.

۵. $(Soil\ Respiration\ Rate)^2$: این ویژگی، تأثیر منفی متوسطی بر پیش‌بینی دارد. به این معنی که افزایش مجذور سرعت تنفس خاک می‌تواند منجر به کاهش پیش‌بینی شود.

۶. %P soil: این ویژگی، تأثیر منفی متوسطی بر پیش‌بینی دارد. یعنی افزایش درصد فسفر خاک می‌تواند پیش‌بینی را کاهش دهد.

۷. Pmax1: این ویژگی، تأثیر منفی ضعیفی بر پیش‌بینی دارد.

۸. Canopy Temp_Mean: این ویژگی، تأثیر منفی متوسطی بر پیش‌بینی دارد. به این معنی که افزایش میانگین دمای تاج‌پوشش می‌تواند منجر به کاهش پیش‌بینی شود.

برای بهبود پیش‌بینی عملکرد دانه سویا در جنوب فرانسه، مدل جایگزینی مبتنی بر شبیه‌سازی‌های^۱ STICS، تکنیک‌های انتخاب ویژگی (فیلتر، رپر، تعبیه‌شده)^۲ و الگوریتم‌های رگرسیون (LR، SVR، RF، BPNN، LASSO و M5) توسعه یافت. مدل STICS با وجود دقت در پیش‌بینی زیست‌توده، در عملکرد دانه ضعیف عمل کرد. روش رپر با مدل‌های^۳ SVR $R^2=0.71$ ، ۶ متغیر و LR $R^2=0.69$ ، ۱۴ متغیر بهترین نتایج را داشت و پیش‌بینی‌ها را نسبت به STICS ($R^2=0.04$) به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید (Corrales et al., 2022).

تحلیل LIME^۳

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که هر یک از ویژگی‌ها به‌طور میانگین چه میزان بر پیش‌بینی نهایی مدل برای یک نمونه تست تأثیر گذاشته‌اند. ویژگی‌ها براساس مقدار وزن^۴ از بیشترین تأثیر منفی به مثبت مرتب شده‌اند، که از خروجی لایم برای داده‌های تست به دست آمده است.

۱. Cob_Length: این ویژگی، بیشترین تأثیر مثبت را بر

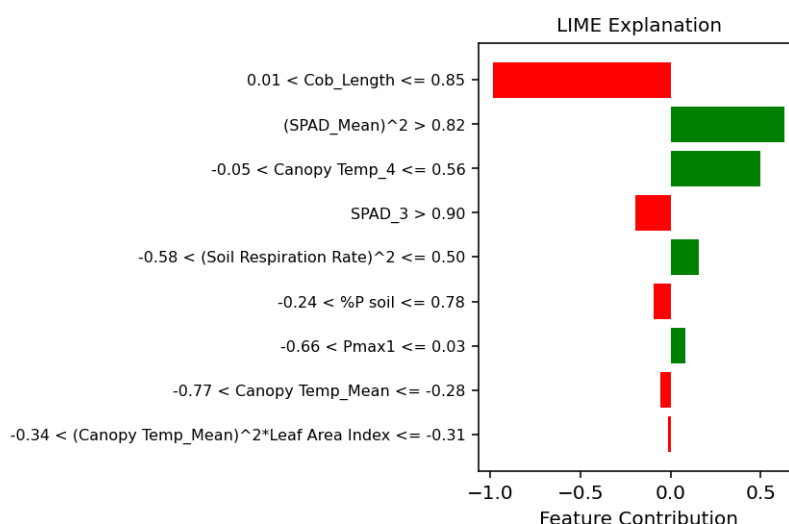
- 1- Multidisciplinary Simulator for Standard Crops
- 2- Filter, wrapper and embedded
- 3- Local Interpretable Model-agnostic Explanations
- 4- Weight

۹. $(\text{Canopy Temp_Mean})^2 \times \text{Leaf Area Index}$: این

ویژگی تعاملی، تأثیر منفی متوسطی بر پیش‌بینی دارد.

در مجموع، این نمودار لایم نشان می‌دهد که ویژگی‌های مرتبط

با طول بلال، شاخص کلروفیل برگ و دمای تاج‌پوشش، بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی مدل دارند. این اطلاعات می‌تواند به شناسایی متغیرهای کلیدی و بهبود عملکرد گیاه زراعی کمک کند.



شکل ۱۱- ویژگی‌های منتخب استاندارد شده رانشگر تشخیص داده شده توسط الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر کودهای زیستی

Fig. 11- Standardized driver features identified by the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm for predicting maize grain yield under biofertilizer influence

تحلیل وابستگی جزئی^۱

شکل ۱۲ که از کاربردی ترین خروجی‌های شیپ محسوب

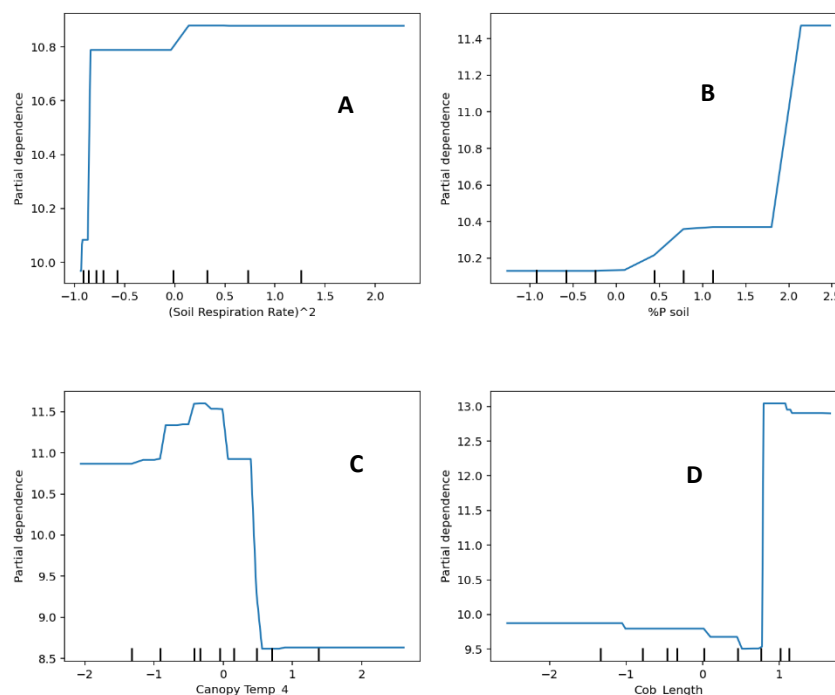
می‌شود، نمودار وابستگی جزئی یا پی دی پی (پارشیال دپندنس پلات) نام دارد که اثر مستقیم و جداگانه هر ویژگی بر عملکرد گندم را نمایش می‌دهد، درحالی‌که سایر ویژگی‌ها ثابت نگه داشته شده‌اند. در ساختار این نمودار، روی محور افقی، مقدار ویژگی (مثلاً مجذور میزان تنفس خاک، درصد فسفر خاک، دمای تاج‌پوشش در مرحله پر شدن دانه و طول بلال)، روی محور عمودی، مقدار پیش‌بینی شده عملکرد دانه (توسط مدل) قرار می‌گیرند. خطوط نمودار، منحنی پاسخ مدل نسبت به تغییرات هر ویژگی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲، با افزایش مجذور میزان تنفس خاک از ۱- تا حدود ۰/۳۵، عملکرد دانه حدود ۸۵۰ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد و به حدود ۱۱ تن در هکتار می‌رسد، و پس از آن ثابت ماند و به حالت تقریباً اشباع درآمد (یعنی افزایش بیشتر این ویژگی هیچ تأثیری بر عملکرد ندارد).

افزایش درصد فسفر خاک (شکل ۱۲ب) از حدود ۰/۱۱ تا ۲، مقدار عملکرد دانه را از ۱۰/۲ تن در هکتار به ۱۱/۴ تن در هکتار افزایش داد که حاکی از نقش پررنگ این ویژگی بر عملکرد دانه است. افزایش دمای تاج‌پوشش در مرحله پر شدن دانه (شکل ۱۲ج) از ۲- تا حدود ۰/۵ سبب نوسان عملکرد دانه در دامنه ۱۰/۹ تا ۱۱/۵ تن در هکتار شد. بیشتر شدن دمای تاج‌پوشش از حدود ۰/۵ منجر به سقوط ناگهانی عملکرد به حدود ۸/۶ تن در هکتار شد و تا رسیدن دمای تاج‌پوشش به ۲/۵ در همین محدوده باقی ماند. افزایش دما به‌ویژه در مراحل پایانی دوره رشد گیاه سبب وارد آمدن تنش به گیاه شده و همزمان تنفس را تشدید می‌کند و از این طریق، عملکرد نهایی گیاه را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. افزایش تعداد بلال (شکل ۱۲د) از ۲- به حدود ۱ سبب افزایش سه تنی در عملکرد دانه شد و در مقادیر بیشتر از یک تقریباً ثابت ماند. ارقام ذرت دانه‌ای برای تولید یک یا دو بلال اصلاح شده‌اند، بنابراین این نتایج با مبانی اصلاح نباتات و اکوفیزیولوژی همخوانی دارد.

این نمودارها به کارشناسان زراعت کمک می‌کنند تا درک بهتری

مدل، بهینه‌سازی کشت، انتخاب نهاده‌ها و مدیریت مزرعه در سال‌های آینده بهره ببرند.

از چگونگی تأثیر هر ویژگی بر روی متغیر هدف حاصل کنند و دلیل تصمیم‌گیری مدل‌ها را بهتر درک نمایند و از آن برای بهبود پیش‌بینی



شکل ۱۲- نمودار شیب وابستگی جزئی (پی دی پی) برای (A) مجذور سرعت تنفس خاک، (B) درصد فسفر خاک، (C) دمای تاج‌پوشش در مرحله خمیری دانه، (D) طول بلال، در الگوریتم تلفیقی NSGA-II و XGBoost در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر کودهای زیستی

Fig. 12- SHAP partial dependence plots for (a) squared soil respiration rate, (b) soil phosphorus percentage, (c) canopy temperature at dough stage, (d) ear length, using the integrated NSGA-II and XGBoost algorithm for predicting maize grain yield under biofertilizer influence

نتیجه‌گیری

یادگیری ماشین در بهینه‌سازی (مدل‌های) پیش‌بینی کشاورزی است که به‌نوبه خود می‌تواند به مدیریت کارآمد و دقیق زراعی، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم و بحران‌های خشکسالی زمانه حاضر کمک کند. به‌طور کلی، با در نظر داشتن اثرات کودهای زیستی بر ویژگی‌های گیاهی و خاکی و در ادامه، مدیریت مسیرهای اکوفیزیولوژیک مرتبط با این ویژگی‌ها شامل دمای تاج‌پوشش، طول ویژه ریشه، محتوای کلروفیل برگ، محتوای فسفر خاک، سرعت تنفس خاک، شاخص سطح برگ و سرعت فتوسنتز، می‌توان نسبت به دستیابی به عملکرد بهینه با مصرف حداقل نهاده‌ها (زیستی) اقدام نمود.

تلفیق NSGA-II برای انتخاب هدفمند نه ویژگی کلیدی و XGBoost برای پیش‌بینی، با کاهش ابعاد داده و بیش‌برازش، به ضریب تبیین ۰/۶۳۶ دست یافت، که از مدل‌های بررسی‌شده قبلی مانند ANFIS ($R^2=0.555$) و ANN ($R^2=0.518$) بهتر بود. انتخاب هدفمند ویژگی‌ها، بیش‌برازش را کاهش داد و منجر به برجسته شدن نقش ویژگی‌های برهم‌کنشی از جمله مجذور دمای تاج‌پوشش در مرحله کاکل‌دهی در شاخص سطح برگ شد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارایی بالای این رهیافت در تلفیق دو الگوریتم

References

1. Amin, S., Hesam, M., Jabbari, A., & Abdolhosseini, M. (2023). Multi-objective optimization of cropping patterns with emphasis on economic benefits and ensuring food supply chain security (A case study: Gonbad-e Kavus - Golestan Dam). *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(2), 119-139.

- <https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.21203.3637>
2. Baio, F.H.R., Santana, D.C., Teodoro, L.P.R., Oliveira, I.C.D., Gava, R., de Oliveira, J.L.G., Silva Junior, C.A.D., Teodoro, P.E., & Shiratsuchi, L.S. (2023). Maize yield prediction with machine learning, spectral variables and irrigation management. *Remote Sensing*, 15(1), 79. <https://doi.org/10.3390/rs15010079>
3. 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. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i3.56158>
4. Bergstra, J., & Bengio, Y. (2012). Random search for hyper-parameter optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 13(10), 281-305.
5. Bhupenchandra, I., Chongtham, S. K., Devi, A. G., Dutta, P., Sahoo, M. R., Mohanty, S., Kumar, S., Choudhary, A. K., Devi, E. L., Sinyorita, S., Devi, S. H., Mahanta, M., Kumari, A., Devi, H. L., Josmee, R. K., Pusparani, A., Pathaw, N., Gupta, S., Meena, M., ... Swapnil, P. (2024). Unlocking the potential of arbuscular mycorrhizal fungi: Exploring role in plant growth promotion, nutrient uptake mechanisms, biotic stress alleviation, and sustaining agricultural production systems. *Journal of Plant Growth Regulators*. 44, 6802–6840. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11467-9>
6. Bracho-Mujica, G., Rötter, R. P., Haakana, M., Palosuo, T., Fronzek, S., Asseng, S., Yi, C., Ewert, F., Gaiser, T., Kassie, B., Paff, K., Rezaei, E. E., Rodríguez, A., Ruiz-Ramos, M., Srivastava, A. K., Stratonovitch, P., Tao, F., & Semenov, M. A. (2024). Effects of changes in climatic means, variability, and agro-technologies on future wheat and maize yields at 10 sites across the globe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 346, 109887. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109887>
7. Brar, B., Bala, K., Saharan, B. S., Sadh, P. K., & Duhan, J. S. (2024). Bio-boosting agriculture: Harnessing the potential of fungi-bacteria-plant synergies for crop improvement. *Discover Plants*, 1, 21 <https://doi.org/10.1007/s44372-024-00023-0>
8. Cheng, E., Zhang, B., Peng, D., Zhong, L., Yu, L., Liu, Y., Xiao, C., Li, C., Li, X., Chen, Y., Ye, H., Wang, H., Yu, R., Hu, J., & Yang, S. (2022). Wheat yield estimation using remote sensing data based on machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*, 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1090970>
9. Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd Ed. New York: Routledge.
10. Corrales, C., Schoving, C., Raynal, H., et al. (2022). Rogate model based on feature selection techniques and regression learners to improve soybean yield prediction in southern France. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106578. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106578>
11. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
12. Du, J., Liu, R., Cheng, D., Wang, X., Zhang, T., & Yu, F. (2024). Enhancing NSGA-II algorithm through hybrid strategy for optimizing maize water and fertilizer irrigation simulation. *Symmetry*, 16(8), 1062. <https://doi.org/10.3390/sym16081062>
13. Fashoto, S., Mbunge, E., Opeyemi, O.G., & Van Den Burg, J. (2021). Implementation of machine learning for predicting maize crop yields using multiple linear regression and backward elimination. *Malaysian Journal of Computing*, 6, 679-697.
14. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer.
15. Kakavand, S., Mazandarani Zadeh, H., & Ramezani Etedali, H. (2023). Optimal redistribution of water among agricultural sector operators using a fuzzy multi-objective optimization model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), 77-93. <https://doi.org/10.22055/jise.2021.37122.1966>
16. Khoso, M.A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T.R., Manghwar, H., & Liu, F. (2024). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress*, 11, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341>.
17. Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied Predictive Modeling*. Springer Science & Business Media. 600 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
18. Ingole, V. S., Kshirsagar, U. A., Singh, V., Yadav, M. V., Krishna, B., & Kumar, R. (2025). A hybrid model for soybean yield prediction integrating convolutional neural networks, recurrent neural networks, and graph convolutional networks. *Computation*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.3390/computation13010004>
19. Lyu, J., Jiang, Y., Xu, C., Liu, Y., Su, Z., Liu, J., & He, J. (2022). Multi-objective winter wheat irrigation

- strategies optimization based on coupling AquaCrop-OSPy and NSGA-III: A case study in Yangling, China. *Science of the Total Environment*, 843, 157104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157104>
20. Mitra, D., Panneerselvam, P., Senapati, A., Chidambaranathan, P., Nayak, A.K., & Mohapatra, P.K.D. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi response on soil phosphorus utilization and enzymes activities in aerobic rice under phosphorus-deficient conditions. *Life (Basel)*, 13(5), 1118. <https://doi.org/10.3390/life13051118>
21. Moore, D.S., Notz, W.I., & Flinger, M.A. (2013). The Basic Practice of Statistics (6th Ed.). New York, NY: W. H. Freeman and Company. p. 138.
22. Mukhopadhyay, A., Maulik, U., Bandyopadhyay, S., & Coello, C.A.C. (2014). A survey of multi-objective evolutionary algorithms for data mining. *Applied Soft Computing*, 23, 184-199. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2290086>
23. Probst, P., Boulesteix, A.L., & Bischl, B. (2019). Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*, 20(53), 1-32.
24. Sahabifard, F. Z., Shahnazari, A., & Sadeghi, S. (2024). Increasing the productivity of agricultural water under the optimization scenario of water resource allocation using the algorithm (NSGA-II). *Journal of Water and Irrigation Management*, 14(2), 405-419. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.369097.1122>
25. Salvador, G.L.O., Araju, F.F., Pereira, A.P.A., Bonofacio, A., & Araujo, A.S.F. (2022). Rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus presented distinct and specific effects on soybean growth when inoculated with organic compost. *Rhizosphere*, 22, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100513>
26. Shayegan, M., Alimohammadi, A., & Mansourian, A. (2011). Multi objective optimization of land use assignment using NSGA II. *Remote Sensing and GIS in IRAN*, 4(2), 1-18. Available Online at: https://scj.sbu.ac.ir/article_94927.html
27. Slafer, G. A., Foulkes, M. J., Reynolds, M. P., Murchie, E. H., Carmo-Silva, E., Flavell, R., Gwyn, J., Sawkins, M., & Griffiths, S. (2023). A 'wiring diagram' for sink strength traits impacting wheat yield potential. *Journal of Experimental Botany*, 74(1), 40-71. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac410>
28. Tarbiat Modares University. (2016). Optimization of Water Resource Allocation for Agricultural Use Using Fuzzy Data Envelopment Analysis (FDEA) and NSGA-II Genetic Algorithm (Case Study: Varamin Plain). Available Online at: <https://civilica.com/doc/1283657/>
29. Taiz, L., E. Zeiger, I. M. Moller, et al. (2018). Fundamentals of Plant Physiology. New York, USA: Oxford University. Press. ISBN 978160535790
30. Xie, X., Wu, T., Zhu, M., Jiang, G., Xu, Y., Wang, X., & Pu, L. (2021). Comparison of random forest and multiple linear regression models for estimation of soil extracellular enzyme activities in agricultural reclaimed coastal saline land. *Ecological Indicators*, 120, 106925. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106925>
31. Yang, C., Liu, C., & Ma, X (2025). Multi-objective irrigation strategies and production prediction for winter wheat in China in future dry years using CERES-wheat model and non-dominated sorting genetic algorithm II . *Computers and Electronics in Agriculture*, 230, 109888. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109888>
32. Yang, C., Liu, C., Q.Z., Wang, S., Xing, X., & Ma, X. (2025). Multi-objective irrigation strategies and production prediction for winter wheat in China in future dry years using CERES-wheat model and non-dominated sorting genetic algorithm II. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230, 109888. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109888>



Evaluation of the SSM_Wheat Model for Estimating the Phenological Stages of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Planting Dates and Cultivar Conditions

Ali Rahemi Karizeki^{1*}, Faramarz Sayyedi², Habibollah Soughi², Arazqlych Moarfy¹, Mojtaba Salehi Shaikhi¹ and Saeed Bagherikia²

1- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad University, Gonbad, Iran

2- Agricultural and Horticultural Department, Golestan Province Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Gorgan, Iran

(* - Corresponding author's Email: alirahemi@yahoo.com)

Received: 07-08-2025
Revised: 05-11-2025
Accepted: 23-11-2025
Available Online: 10-05-2026

How to cite this article:

Rahemi Karizeki, A., Sayyedi, F., Soughi, H., Moarfy, A., Salehi Shaikhi, M., & Bagherikia, S. (2026). Evaluation of the SSM_Wheat model for estimating the phenological stages of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different planting dates and cultivar conditions. *Journal of Agroecology*, 17(4), 561-574. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94755.1248>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important cereal crops. A model is a tool that helps us interpret and understand the world we live in. Crop modeling, a branch of agricultural science, has been around for about 40 years, with the development of powerful and efficient computers playing a major role in its advancement. These models usually enable the determination of management options and can be used to explore a wide range of management strategies at low costs. Plant models have proven to be useful tools for estimating crop yield, integrating a comprehensive set of values under physiological conditions, and evaluating crop management options. One essential feature of simulation models is the accurate prediction of crop phenology. The key phenological stages required for simulating the physiological processes of growth and yield in wheat are as follows: Days from planting to emergence, days from emergence to tillering, days from tillering to stem elongation, days from stem elongation to booting, days from booting to heading, days from heading to anthesis, days from anthesis to physiological maturity, and days from physiological maturity to harvest. The aim of this research is to evaluate the SSM-Wheat model for predicting the phenological stages and yield of wheat.

Materials and Methods

The necessary information for simulating the phenological stages and yield of wheat was obtained from experimental data on 7 planting dates (November 1st, November 10th, November 20th, November 30th,



© Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94755.1248>

December 10th, December 20th, and December 30th) and four bread wheat genotypes (line N9-93 and the varieties Araz, Taktaz, and Arman) over two cropping years, 2019-2020 and 2020-2021. Data on the phenological stages and yield of wheat were used to evaluate the model. Daily meteorological data (maximum and minimum temperatures, precipitation, and solar radiation) were collected and defined in the model. Soil characteristics parameters were considered based on the model's default data.

Results and Discussion

The evaluation of the SSM-Wheat model showed that it accurately simulates phenological stages, including days to emergence, days to stem elongation, days to heading, days to flowering, and days to physiological maturity, as well as grain yield across different planting dates and wheat varieties under the climatic conditions of Gonbad. However, the model did not accurately predict days to tillering, biological yield, and harvest index. The highest coefficients of determination (R^2) were obtained for days to heading (0.79), days to flowering (0.77), and days to physiological maturity (0.92). Accurate prediction of crop phenology is a crucial feature of simulation models. Yield in crop simulation models is largely regulated by the timing of developmental stages. The poor prediction of biological yield and harvest index may be due to water stress and high temperatures during the grain-filling and maturity stages, which caused leaf drop and reduced biomass, leading to incomplete harvest by the combine. Delayed planting and low temperatures during the early growth stages in areas with very cold winters, due to inadequate plant establishment and growth to withstand autumn frosts, and high temperatures in hot, dry regions during the late growth stages, especially the grain-filling period, can reduce plant yield. Grain weight is a key component of final grain yield and is influenced by environmental stresses, particularly water stress.

Conclusion

The evaluation of the SSM-Wheat model showed that it was acceptable for simulating phenological stages, including days to emergence, days to stem elongation, days to heading, days to flowering, days to physiological maturity, and grain yield across different planting dates and cultivars under the climatic conditions of Gonbad Kavous. However, the model poorly predicted days to tillering, biological yield, and harvest index. It seems necessary to revalidate and refine the model accuracy using data from diverse experiments, and if the results of this review are confirmed, to incorporate them into the model equations. Nevertheless, this model can be used in field management planning, such as selecting planting dates, suitable cultivars, analyzing crop yield, and its limitations. Obviously, models become effective only when applied alongside analyses of physiological and ecological conditions, based on experimental measurements and observations from the system.

Keywords: Coefficient of determination, Grain yield, Harvest index, Physiological examination, Simulation

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۵۷۴-۵۶۱

ارزیابی مدل SSM_Wheat برای تخمین مراحل فنولوژی گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت شرایط تاریخ کاشت و ارقام مختلف

علی راحمی کاریزکی^{۱*}، فرامرز سیدی^۲، حبیب الله سوقی^۲، ارازقلیچ معارفی^۱، مجتبی صالحی شیخی^۱ و سعید باقری کیا^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات است که می‌توان با کمک مدل‌های رشد گیاهی، مراحل رشدی و عملکرد آن را در مناطق مختلف پیش‌بینی کرد. مدل SSM-Wheat یکی از مدل‌های اختصاصی توصیف رشد و عملکرد گندم است. لذا هدف از این تحقیق، ارزیابی مدل SSM-Wheat برای پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی و عملکرد گندم است. اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژی و عملکرد گندم از داده‌های تجربی مربوط به هفت تاریخ کاشت (۱۰ آبان، ۲۰ آبان، ۳۰ آبان، ۱۰ آذر، ۲۰ آذر، ۳۰ آذر و ۱۰ دی ماه) و چهار ژنوتیپ گندم نان (لاین N9-93 و ارقام آراز، تکتاز و آرمان) طی دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ به دست آمد. ارزیابی مدل SSM-Wheat نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی شامل روز تا سبز شدن، روز تا ساقه رفتن، روز تا خوشه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی، و همچنین عملکرد دانه را در تاریخ‌های کاشت مختلف و ارقام گندم تحت شرایط آب‌وهوایی مدیریتانه‌ای خشک به‌طور دقیق شبیه‌سازی می‌کند. با این حال، این مدل روز تا پنجه‌زنی، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت را به‌طور دقیق پیش‌بینی نکرد. بالاترین ضرایب تعیین (R^2) برای روز تا خوشه‌دهی (۰/۷۹)، روز تا گل‌دهی (۰/۷۷) و روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی (۰/۹۲) به دست آمد. در مجموع، با توجه به ارزیابی نسبتاً دقیق این مدل، می‌توان از آن در برنامه‌ریزی های مدیریت مزرعه، مانند انتخاب تاریخ کاشت، ارقام مناسب، تجزیه و تحلیل عملکرد محصول و ارزیابی محدودیت‌های آن استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: رسیدگی فیزیولوژیکی، شاخص برداشت، شبیه‌سازی، عملکرد دانه

مقدمه

تحقیقات مزرعه‌ای که برای تعیین راهکارهای بهینه به‌زراعی و به‌نژادی انجام می‌شوند، علاوه بر هزینه‌بر بودن، زمان‌بر نیز می‌باشند. مدل‌های شبیه‌سازی رشد که جایگزین مناسبی برای کاهش هزینه و مدت زمان انجام این‌گونه تحقیقات مزرعه‌ای محسوب می‌شوند، اثرات پیچیده عواملی مانند آب‌وهوا، خصوصیات خاک، و عوامل

مدیریتی را بر عملکرد گیاه در نظر می‌گیرند (Shiukhy Soqanloo

et al., 2023). توانایی مدل‌های شبیه‌سازی در پیش‌بینی رشد و نمو و عملکرد گیاهان زراعی، آن‌ها را قادر می‌سازد تا با استفاده از گزینه‌های کاهش‌دهنده، اثرات منفی مانند تنظیم تاریخ کشت و کشت ارقام مختلف را تسهیل کند (Raza et al., 2019).

کمّی‌سازی رشد و نمو یک گیاه زراعی در پاسخ به شرایط محیطی در یک سامانه، مدل‌سازی نامیده می‌شود که به کاربر کمک می‌کند تا در مدیریت گیاه زراعی تصمیم بهتری اتخاذ نماید (Kheiri & Kambouzia, 2022). مدل‌های رشد محصول، توسعه و رشد محصولات را به روشی پویا شبیه‌سازی می‌کنند و در نتیجه این عوامل و تعاملات آن‌ها را در نظر می‌گیرند (Berghuijs et al., 2023). یکی از جنبه‌های اصلی مدل‌های شبیه‌سازی محصول، امکان

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

۲- بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: alirahemi@yahoo.com

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94755.1248>

استفاده آن‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی است، به‌شرطی که مدل مورد نظر در دامنه وسیعی از شرایط مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته باشد (Kassie et al., 2016). یکی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی، پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی می‌باشد (Rahemi Karizaki et al., 2023). مطالعات اخیر تأثیر دما، تاریخ کاشت و واریته‌ها را بر فنولوژی گندم از طریق اقلیم‌های متنوع در مقیاس‌های منطقه‌ای با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نشان داده‌اند (Hu et al., 2022).

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی جهان و منبع غذایی اولیه برای حدود ۳۵ درصد از جمعیت جهان است که به‌عنوان سلطان غلات شناخته می‌شود (Spanic et al., 2024). براساس آمار وزارت جهاد کشاورزی سطح زیرکشت، عملکرد در واحد سطح و تولید گندم کشور در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ بیش از شش میلیون هکتار ۱۳۷۰ کیلوگرم در هکتار برای زراعت دیم و ۴۲۰۰ کیلوگرم در هکتار برای زراعت آبی و ۱۲ میلیون تن تولید برآورد شده است. در ۱۰ سال اخیر، حدود یک میلیون تن گندم به‌طور میانگین در ۳۸۰ هزار هکتار زمین در استان گلستان تولید می‌شود که حدود ۱۰ درصد تولید کل کشور محسوب می‌شود (Iran's Agricultural Ministry, 2022).

مدل‌های ریاضی توصیف رشدونمو گیاهان زراعی در طی ۳۰ سال گذشته توسعه و بهبود یافته‌اند و تقریباً در تمام محصولات عمده از جمله سویا (*Glycine max* L.) (Rahemi Karizaki et al., 2020)، ذرت (*Zea mays*) (Rani et al., 2024)، سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) (Rahemi Karizaki et al., 2023)، جو (*Hordeum vulgare*) (Wahbi & Sinclair, 2005)، بادام زمینی (*Arachis hypogaea*) (Hammer et al., 1995)، نخود (*Cicer arietinum*) (Rahemi Karizaki et al., 2022) و گندم (Delghandi et al., 2014) مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی مدل شبیه‌سازی SSM-Wheat برای پیش‌بینی نمو رشد و عملکرد دو رقم گندم در استان کرمان نشان داد که علی‌رغم اختلافات مطلق بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، مدل SSM-Wheat می‌تواند واکنش نمو رشد و عملکرد ارقام مورد استفاده کرمان به تاریخ کاشت را به‌خوبی شبیه‌سازی کند (Bahramjerdi, 2015). طی پژوهشی که روی ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشدونمو گندم انجام گرفت، نتایج حاکی از آن

دارد که این مدل، مراحل مختلف فنولوژیکی گندم را درک و با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی نمود، به‌نحوی که روز تا گل‌دهی مشاهده شده و شبیه‌سازی‌شده به‌ترتیب ۱۸۱ و ۱۸۴ روز بود (Shiukhy Soqanloo et al., 2023).

درک چگونگی واکنش نمو فنولوژیک گندم به طول روز و دما، ایجاد مدلی برای پیش‌بینی زمان وقوع مراحل مختلف نمو این گیاه زراعی را میسر می‌سازد. انجام آزمایش‌ها و تحقیقات علمی روی محصول زراعی و یافتن شرایط مطلوب رشد آن‌ها مستلزم هزینه‌های گزاف و صرف وقت و دقت زیادی می‌باشد و این موضوع برای کشورهای در حال توسعه به علت کمبود امکانات و پژوهشگر دشوار است (Rahemi Karizaki et al., 2020). لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی مدل SSM-Wheat برای تخمین مراحل فنولوژی گندم تحت شرایط تاریخ کاشت و ارقام مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد کاووس با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی در ارتفاع ۴۵ متر از سطح دریا اجرا شد. اقلیم منطقه گنبدکاووس اقلیم مدیترانه‌ای براساس سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن بود. آمار هواشناسی محل اجرای آزمایش در طی دو سال آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

قبل از اجرای آزمایش، نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک انجام و خصوصیات خاک تعیین شد (جدول ۲). آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در هر دو سال زراعی اجرا شد. هفت تاریخ کاشت (۱۰ آبان، ۲۰ آبان، ۳۰ آبان، ۱۰ آذر، ۲۰ آذر، ۳۰ آذر و ۱۰ دی ماه) در کرت‌های اصلی و چهار ژنوتیپ گندم نان (شامل لاین امیدبخش-۹۳-۹ N و ارقام آراز، تکتاز و آرمان) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. هر کرت در عرض ۱/۲ متر و طول ۶/۶۶ متر با استفاده از ماشین کاشت آزمایش‌های وینتراشت‌ایگر کشت گردید. میزان بذر در کلیه کرت‌ها براساس تراکم ۳۵۰ دانه در مترمربع بر مبنای وزن هزار دانه ارقام محاسبه شد.

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کشاورزی گنبد کاووس در دو سال آزمایش (۱۳۹۹-۱۴۰۰)
Table 1- Meteorological statistics of Gonbad Kavous Agricultural Research Station in two years of (growing 2019-2020, 2020-2021)

ماه Month	بارش Precipitation (mm)		مجموع ساعات آفتابی Total hours of sunshine (hour)		میانگین دما Temperature mean (°C)	
	2019-2020	2020-2021	2019-2020	2020-2021	2019-2020	2020-2021
آبان October	16.5	23.5	192.9	182.4	16.5	13.4
آذر November	31.9	12.8	107.3	176.1	8.9	13.5
دی December	31.8	36.9	173.5	168.0	8.3	10.1
بهمن January	24.5	61.1	187.8	201.0	10.2	9.5
اسفند February	62.2	70.9	163.3	126.5	9.1	12.1
فروردین March	16.6	11.9	202.7	173.6	16.6	15.5
اردیبهشت April	20.0	87.6	240.1	147.5	22.3	19.9
خرداد May	12.2	2.2	279.0	334.0	28.2	26.3

آمار هواشناسی مربوط به ایستگاه هواشناسی گنبد کاووس است.

Meteorological statistics are related to the Gonbad Kavous weather station

جدول ۲- مشخصات خاک محل اجرای آزمایش
Table 1- Soil characteristics in experimental place

بافت خاک Soil texture	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر p (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن کل N	هدایت الکتریکی K (dS.m ⁻¹)	اسیدیته pH	کربن آلی Organic C	آهک Lime (%)
سیلت-لومی Silt-loam	895	11.4	9.52	1.2	7.7	1	18

توصیف مدل

برای شبیه‌سازی رشدونمو اثرات تاریخ کاشت و ارقام گندم از مدل SSM-WHEAT استفاده شد (Soltani et al., 2013). این مدل رشدونمو و عملکرد را به‌صورت روزانه به‌عنوان تابعی از شرایط آب‌وهوایی (با استفاده از شاخص‌های دمای بیشینه، کمینه، و تابش خورشیدی)، خصوصیات خاک و مدیریت زراعی (رقم، تاریخ کاشت، تراکم بوته و رژیم‌آبیاری) شبیه‌سازی می‌کند. از آنجایی که این مدل از صفحات برنامه اکسل شرکت مایکروسافت برای ورود و خروجی استفاده می‌کند، کار با آن ساده است. در این مدل، روش کمی‌سازی پیش‌بینی نمو فنولوژیکی در گندم تابعی از دما، طول دوره رشد

میزان کودهای شیمیایی مصرفی براساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تعیین گردید (جدول ۲). این آزمایش در شرایط مطلوب زراعی و عاری از آفات و بیماری‌ها انجام شد. در طول دوره آزمایش از کاشت تا برداشت مراحل فنولوژی مانند تاریخ‌های سبز شدن، ظهور سنبله، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک ثبت گردید. در پایان هر سال زراعی و پس از رسیدن محصول، برداشت با استفاده از کمباین آزمایشی انجام شد. مساحت برداشت هر کرت ۷/۲ مترمربع (۱/۲ متر عرض و ۶ متر طول) بود. عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت برای هر کرت اندازه‌گیری شدند.

دکتر سلطانی کالیبره شده است که آدرس سایت این مدل در لینک <https://sites.google.com/site/cropmodeling> می‌باشد.

نتایج و بحث

روز تا سبز شدن

جهت بررسی این شاخص، روز از کاشت تا سبز شدن مشاهده با روز تا سبز شدن پیش‌بینی‌شده توسط مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر مشاهده‌شده در آزمایش مزرعه‌ای با حداکثر، حداقل و میانگین به‌ترتیب ۲۳، ۸/۸ و ۱۵/۸ روز بود. در صورتی که این مقادیر در نتایج پیش‌بینی‌شده به‌ترتیب معادل ۲۹، ۶ و ۱۴/۴ روز بود. مقایسه بین روز تا سبز شدن واقعی و پیش‌بینی‌شده نشان داد که داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر کارایی خوب مدل می‌باشد (شکل ۱). ضریب تبیین بین این مقادیر در خصوص روز تا سبز شدن برابر ۵۳/۰ درصد به دست آمد. جذر میانگین مربعات خطا و مقدار نرمال‌شده آن به‌ترتیب برابر ۴/۷ و ۲۹/۸ درصد بود. براساس توضیحات رینادی و همکاران (Rinaldi et al., 2003)، در صورتی که میزان RMSEn کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰ درصد باشد، ضعیف برآورد می‌گردد. بنابراین دقت این مدل برای این صفت قابل قبول است.

نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L. حاکي از آن است که ضریب تبیین برای این مقادیر در خصوص روز از کاشت تا سبز شدن برابر ۷۳/۰ درصد به دست آمد؛ جذر میانگین مربعات خطا و مقادیر نرمال‌شده آن به‌ترتیب ۳۷ و ۱۳/۰ درصد محاسبه شد. این موضوع نشان‌دهنده این است که این مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق می‌باشد (Rahemi Karizaki et al., 2023).

تعداد روز تا پنجه‌دهی

نتایج نشان داد که این مدل روز تا پنجه‌دهی را تقریباً بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد، به‌نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده بین داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی‌شده از مدل به‌ترتیب معادل ۳۲/۱، ۱۳/۱ و ۲۷/۵۳ درصد بود. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده نشان داد که داده‌ها در

رویشی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه تعداد زیادی از فرایندهای فیزیولوژیکی و ریخت‌شناختی با مرحله فنولوژیک تغییر می‌کنند، کمی کردن دقیق مراحل نمو فنولوژیک برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی رشد ضروری است. مراحل مهم فنولوژیکی که برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیولوژیکی رشد و عملکرد گندم نیاز است به‌شرح زیر هستند: روز از کاشت تا سبز شدن، روز از سبز شدن تا پنجه‌دهی، روز از پنجه‌دهی تا ساقه رفتن، روز از ساقه رفتن تا آبستنی، روز از آبستنی تا سنبله رفتن، روز از سنبله رفتن تا گل‌دهی دانه، روز از گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک و روز از رسیدگی فیزیولوژیک تا زمان برداشت (Soltani et al., 2013). در این مدل می‌توان واحد دمایی تجمعی مورد نیاز برای یک مرحله را برحسب تعداد روز تقویمی مورد نیاز برای یک مرحله فنولوژیک بیان کرد که به اصطلاح به آن روز زیستی (روز بیولوژیک) مورد نیاز اطلاق می‌شود. جهت مقایسه داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های مزرعه‌ای، از شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ($NRMSE^2$) و خط ۱:۱ استفاده گردید (Rahemi Karizaki et al., 2021).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \times 100 \quad \text{معادله (۱)}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{معادله (۲)}$$

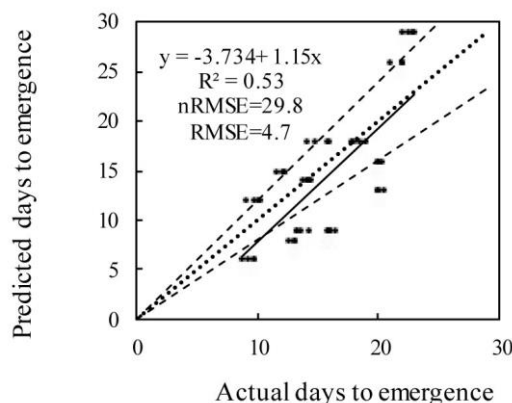
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن‌ها، P_i ، O_i و $\bar{O}$: به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی، مشاهده شده و میانگین مشاهدات برای متغیرهای مورد مطالعه و N : تعداد مشاهدات است. در صورتی که $NRMSE$ به‌دست‌آمده کمتر از ۱۰ درصد باشد، شبیه‌سازی بسیار عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، شبیه‌سازی خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی نسبتاً خوب و در صورتی که این شاخص آماری بزرگ‌تر از ۳۰ درصد باشد، شبیه‌سازی ضعیف خواهد بود. هرچه مقدار R^2 حاصل از رگرسیون خطی توابع و خط ۱:۱ به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بالا بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده است که نشان‌دهنده توصیف بهتر مدل در شبیه‌سازی صفت مورد نظر می‌باشد (Rahemi Karizaki et al., 2021). لازم به ذکر است که این مدل قبلاً توسط

1- Root mean square error

2- Normalized root mean square error

دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر دقت پایین مدل صفت روز تا پنجه‌دهی در شرایط شهرستان گنبد ضعیف می‌باشد. می‌باشد (شکل ۲). لذا با توجه به نتایج فوق، شبیه‌سازی مدل در مورد

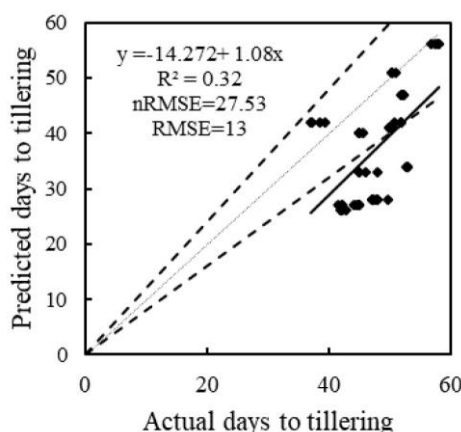


شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا سبز شدن گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 1- Simulated day to emergence versus actual

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively



شکل ۲- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا پنجه‌زنی گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 2- Simulated day of topping versus actual

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively

درصد از خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر کارایی عالی مدل می‌باشد (شکل ۳).

تعداد روز تا سنبله‌دهی

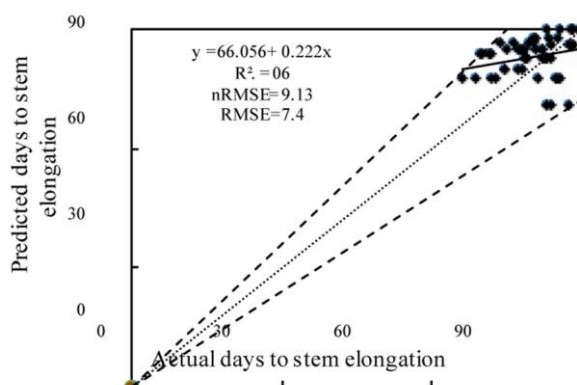
نتایج نشان داد که این مدل، روز تا سنبله‌دهی را به خوبی پیش‌بینی کرد، به نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده بین داده‌های به دست آمده از

تعداد روز تا ساقه رفتن

نتایج نشان داد که این مدل، روز تا ساقه رفتن را نیز به خوبی پیش‌بینی کرد، به نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده بین داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده از مدل به ترتیب معادل ۰/۰۶، ۷/۴ و ۹/۱۳ درصد بود. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان داد که داده‌ها در دامنه ۱۵

پیش‌بینی شده نشان داد اگر داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند، قابل قبول می‌باشد (شکل ۴). لذا با توجه به نتایج فوق، مدل می‌تواند شبیه‌سازی قابل قبولی در مورد صفت روز تا سنبله‌دهی در شرایط شهرستان گنبد کاووس ارائه دهد.

آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده از مدل به ترتیب معادل ۷۹/۰، ۷۹/۰ و ۹۰/۹۰ روز بود. مقایسه ضریب تبیین روز تا سنبله‌دهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم در شرایط گنبد نشان داد که این مدل، ارزیابی خوبی از این شاخص داشت ($R^2=0.79$). مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری شده و

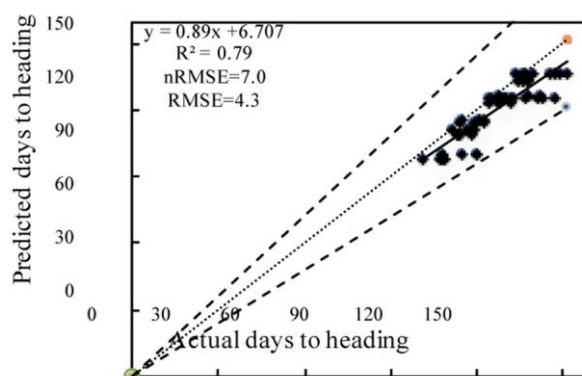


شکل ۳- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا ساقه رفتن در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 3- Simulated values of days to shoot versus their actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively.



شکل ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا سنبله رفتن گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 4- Simulated values of days to spike versus their actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱:۲۰ و ۱:۰/۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1: 20 and 1: 0.80 respectively

رگرسیون خطی توابع بین مقادیر روز تا گل‌دهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم در شرایط گنبد نشان داد که مدل ارزیابی خوبی از این پارامتر داشت ($R^2=0.77$). علاوه بر آن جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب با مقادیری معادل ۱۲/۳ و ۹/۲ درصد بیانگر پیش‌بینی عالی این پارامتر توسط مدل بود. ضریب همبستگی بالای بین مقادیر روز تا گل‌دهی مشاهده شده و پیش‌بینی

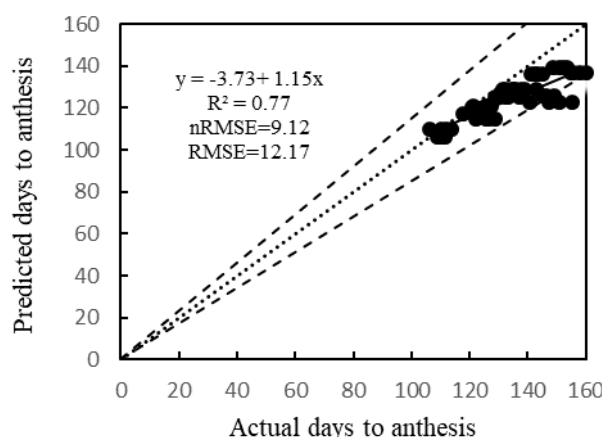
تعداد روز تا گرده‌افشانی

نتایج نشان داد که این مدل، روز تا گل‌دهی را به خوبی پیش‌بینی کرد، حداکثر و حداقل روز تا گل‌دهی مشاهده شده برابر ۱۶۰/۰ و ۱۰۶/۲ با میانگین ۱۳۳/۴ روز بود، حداکثر و حداقل تعداد روز پیش‌بینی شده برای روز تا گل‌دهی به ترتیب معادل ۱۳۹/۰ و ۱۰۶/۰ با میانگین ۱۲۳/۸ روز بود. مقایسه ضریب تبیین حاصل از آنالیز

مدل SSM با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد که برای روز تا گل‌دهی ۵/۸ روز است که حدود ۱۱ درصد میانگین روز تا گل‌دهی بود که نشان‌دهنده قابل قبول بودن مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی بود.

یافته‌های شیوخ‌سوغانلو و همکاران (Shiukhy-Sughanlu et al., 2023) نیز حاکی از توانایی مدل SSM-wheat در شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی گندم رقم مهرگان بود، به‌طوری‌که مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات برای این صفت به‌ترتیب ۴/۴ درصد و ۲/۴ درصد بود.

شده ($r=0.87$) نیز نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی این مرحله فنولوژی موفق بوده است. نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری‌شده روز تا شروع رشد دانه و مقادیر پیش‌بینی‌شده آن نیز نشان داد که تمامی داده‌ها در محدوده ۱۵ درصد خطا ۱:۱ قرار داشتند (شکل ۵). پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی به شمار می‌رود. عملکرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی با زمان‌بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (Rahemi Karizaki et al., 2023). براساس گزارش نتایج نه‌بندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2016) از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گل‌دهی) برای دو رقم سویا سحر و کتول نشان داد که



شکل ۵- مقادیر شبیه‌سازی‌شده روز تا گرده‌افشانی گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 5- Simulated values of days to flowering (a) and days to spike (b) versus their actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به‌ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.

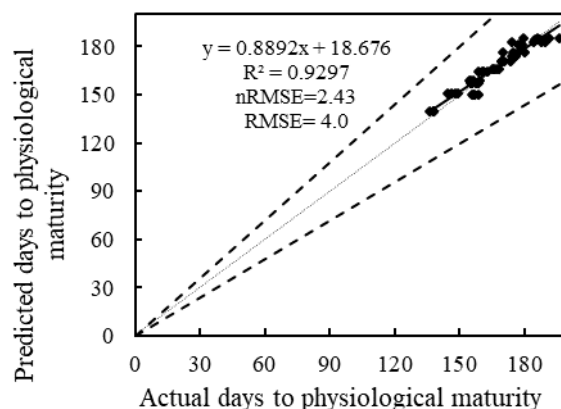
The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1.20 and 1:0.80 respectively

(شکل ۳ b) که بیانگر پیش‌بینی عالی مدل از خصوصیت فنولوژیک روز تا رسیدگی فیزیولوژیک گندم بود.

براساس گزارش نتایج نه‌بندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2016) از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (گل‌دهی) برای دو رقم سویا سحر و کتول نشان داد که مدل SSM با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است، به‌طوری‌که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد که برای روز تا رسیدگی ۸/۷ روز است که حدود ۶۱ درصد روز تا رسیدگی محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی است.

تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌دست‌آمده از مزرعه در یک محدوده‌ای از مقادیر ۱۹۵ و ۱۳۶ و میانگین ۱۶۷ روز به دست آمد. در مقابل نیز اعداد به‌دست‌آمده از مدل نیز تقریباً در دامنه‌ای مشابه با اعداد واقعی به دست آمد، به‌نحوی که حداکثر و حداقل روز تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌دست‌آمده از مدل به‌ترتیب معادل ۱۸۵ و ۱۴۰ و میانگین ۱۶۷/۲ درصد به دست آمد. در خصوص این پارامتر، ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده به‌ترتیب ۰/۹۳، ۴/۹ و ۲/۴ درصد به دست آمد که همگی نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل می‌باشد. مقایسه داده‌های حاصل مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی شده نشان داد که داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار دارند



شکل ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی گندم در مقابل مقادیر واقعی آن
Fig. 6- Simulated values of days to physiological maturity versus their actual values

نقطه چین خط ۱:۱ و خط چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.

The dotted line is 1:1 and the top and bottom lines are 1:1.20 and 1:0.80 respectively

است.

عملکرد بیولوژیک

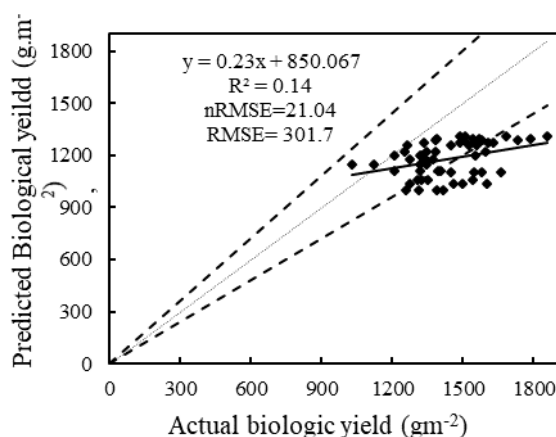
نتایج نشان داد که این مدل، روز تا عملکرد بیولوژیک را تقریباً کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد، به نحوی که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده بین داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده از مدل به ترتیب معادل ۰/۱۴، ۳۰۱/۷ و ۲۱/۰۴ درصد بود. مقایسه داده‌های حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان داد که بخشی از داده‌ها در دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار ندارند که بیانگر دقت پایین مدل می‌باشد. لذا با توجه به نتایج فوق، شبیه‌سازی مدل در مورد عملکرد بیولوژیک گندم در شرایط شهرستان گنبد ضعیف بود و کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند (شکل ۷).

ضعف مشاهده شده در دقت مدل SSM-Wheat در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک گندم در شرایط منطقه گنبد را می‌توان عمدتاً به محدودیت‌های ساختاری این مدل نسبت داد. این مدل با رویکردی نسبتاً ساده شده، بسیاری از برهم‌کنش‌های پیچیده گیاه-خاک-اتمسفر، به‌ویژه تنش‌های ترکیبی (مانند گرمایش و خشکی) و پویایی دقیق مواد آلی خاک را که در مدل‌های جامع‌تری مانند DSSAT-CERES-Wheat وجود دارد، در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، حساسیت بالا به داده‌های اقلیمی ورودی با وضوح مکانی بالا و کالیبراسیون ناکافی پارامترهای ژنوتیپی خاص منطقه از دیگر عوامل مؤثر در بروز خطای سیستماتیک (پیش‌بینی کمتر از واقع) بوده

نتایج بررسی مدل‌سازی مراحل فنولوژیک و پارامترهای عملکردی گیاه باقلا (*Vicia faba* L.) نشان‌دهنده این است که مدل در خصوص عملکرد بیولوژیک قادر نیست تا پیش‌بینی مناسبی را ارائه نماید. پارامترهای آماری شامل ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده نیز بیانگر این مطلب بود (Rahemi Karizaki & Hosseini, 2020).

عملکرد دانه

نتایج نشان داد که این مدل، وزن خشک تجمعی دانه را تقریباً قابل قبول پیش‌بینی کرد، به نحوی که اکثر داده‌ها در محدوده دامنه ۱۵ درصد از خط ۱:۱ قرار داشتند. عملکرد دانه مشاهده شده در دامنه ۳۷۴/۵ تا ۶۲۸/۸ گرم در مترمربع و میانگین ۵۰۸/۸ گرم در مترمربع به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نیز مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین عملکرد دانه را به ترتیب ۳۷۴/۵، ۶۲۸/۰۸ و ۵۳۲/۰ گرم در مترمربع محاسبه نمود. لذا با توجه به نتایج فوق، این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد دانه در شرایط شهرستان گنبد قابل قبول است (شکل ۸).

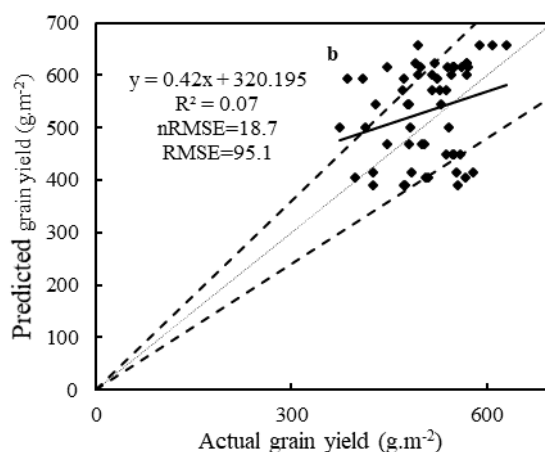


شکل ۷- مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد بیولوژیک گندم در مقابل مقادیر واقعی آن
Fig. 7- Simulated values of aerial body dry weight versus its actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.
The dotted line is 1:1 and the upper and lower lines are 1:1.20 and 1:0.80, respectively.

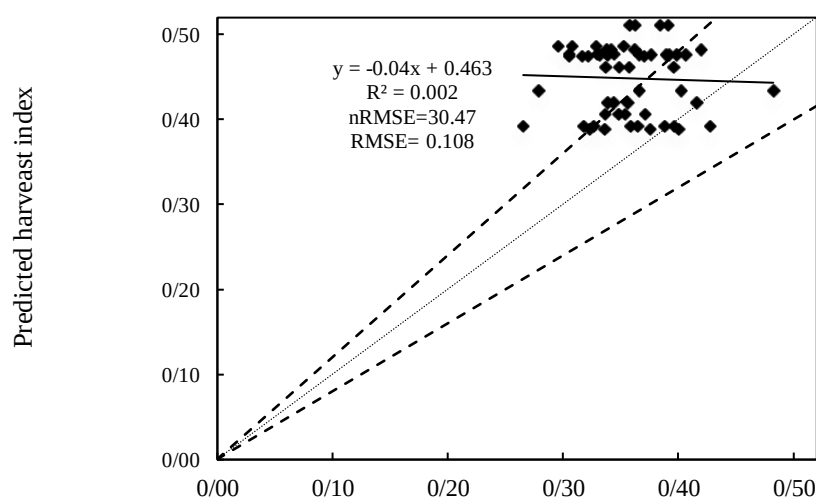
بنابراین، حصول نتیجه مطلوب از به‌کارگیری مدل‌ها مستلزم شناخت مناسب توانایی‌ها و محدودیت‌های آن‌ها است. اما همسو با نتایج این تحقیق، نتایج احمدی علیپور و همکاران (Ahmadi Alipour et al., 2017) در شرایط گرگان نشان داد که مدل SSM-Wheat، مراحل فنولوژیک و عملکرد دانه را با ضریب تبیین بالا و مناسب پیش‌بینی نمود.

برعکس نتایج این تحقیق، نتایج معینی‌راد و همکاران (Moeinirad et al., 2017) بیان‌کننده این است که مدل SSM-Wheat با ضریب تبیین ۰/۷۴ درصد و میانگین مربعات خطای آزمایش ۲۳۰۵/۶۲ درصد به‌خوبی عملکرد بیولوژیک را در گندم پیش‌بینی کرد. استفاده از یک مدل شبیه‌سازی برای رشد و عملکرد، بستگی به پارامترهای ورودی آن مدل در منطقه مورد نظر دارد.



شکل ۸- مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در مقابل مقادیر واقعی آن
Fig. 8- Simulated values of simulated grain yield versus its actual values

نقطه‌چین خط ۱:۱ و خط‌چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۱.۲۰ و ۱:۰.۸۰ هستند.
The dotted line is 1:1 and the upper and lower lines are 1:1.20 and 1:0.80, respectively.



شکل ۹- مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص برداشت گندم در مقابل مقادیر واقعی آن

Fig. 9- Simulated values of harvest index versus its real values

نقطه چین خط ۱:۱ و خط چین بالا و پایین به ترتیب خطوط ۱:۲۰ و ۱:۰۸ هستند.

The dotted line is 1:1 and the upper and lower lines are 1:20 and 1:08 respectively.

نتیجه‌گیری

ارزیابی مدل SSM-Wheat نشان داد که مدل مراحل فنولوژیکی شامل روز تا سبز شدن، روز تا ساقه رفتن، روز تا سنبله‌دهی، روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی بیولوژیک و عملکرد دانه با تاریخ کاشت‌های مختلف و ارقام متفاوت در شرایط آب‌وهوایی گنبد قابل قبول بود. اما در مقابل روز تا پنجه‌دهی، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت توسط مدل ضعیف پیش‌بینی شد. به نظر می‌رسد که لازم است آزمون و دقت مدل با داده‌های حاصل از آزمایش‌های متنوع مجدداً انجام شود و در صورت تأیید نتایج این بررسی در معادلات به کار رود. باین‌حال از این مدل می‌توان در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مزرعه از قبیل انتخاب تاریخ کاشت، رقم مناسب، تجزیه و تحلیل عملکرد محصول و محدودیت‌های آن استفاده نمود. بدیهی است که مدل‌ها، زمانی مؤثر واقع می‌شوند که با تحلیل شرایط فیزیولوژیک و اکولوژیک و با توجه به آزمایش‌ها و مشاهده‌های اندازه‌گیری تجربی از سیستم به‌کار گرفته شوند.

شاخص برداشت

نتایج نشان داد که این مدل، پیش‌بینی مناسبی از شاخص برداشت گندم برای شرایط گنبد را ارائه نداد. به‌نحوی که اکثر داده‌ها در محدوده ۱۵ درصد خط ۱:۱ قرار نگرفتند. پارامترهای آماری بیانگر عدم توجه مناسب مقادیر پیش‌بینی شده شاخص برداشت توسط مدل بود؛ که بیانگر این است که این مدل صفت شاخص برداشت را ضعیف پیش‌بینی نموده است. به‌طوری که ضریب تبیین برابر ۰/۰۰۲ درصد به دست آمد (شکل ۹).

نتایج مطالعه روی مراحل فنولوژی باقلا نشان داد که این مدل، پیش‌بینی مناسبی از شاخص برداشت باقلا برای شرایط گنبد را ارائه نمی‌دهد. با وجود قرار گرفتن بیشتر داده‌ها در محدوده ۱۵ درصد خط، ۱:۱ پارامترهای آماری بیانگر عدم توجه مناسب مقادیر پیش‌بینی شده شاخص برداشت توسط مدل بود. به‌طور مثال، ضریب تبیین برابر ۰/۰۰۶ درصد به دست آمد (Rahemi Karizaki & Hoseini, 2020) که با نتایج این تحقیق همسو بود.

References

- 1- Ahmadi Alipour, H., Soltani, A., Kazemi, H., & Nehbandani, A. (2017). Zoning Golestan province in terms of the ability and the wheat production gap using a simulation model (SSM). *Journal of Crops Improvement*, 20(1), 129-144. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2018.237053.1784>

- 2- Bahramjerdi, F. (2015). Evaluation of SSM-Wheat simulation model under Kerman conditions/ M.Sc. Thesis, Rafsanjan Vali Asr University, Rafsanjan, Iran. 1-100. (In Persian with English abstract).
- 3- Berghuijs, H.N., Silva, J.V., Rijk, H.C.A., van Ittersum, M.K., van Evert, F.K., & Reidsma, P. (2023). Catching-up with genetic progress: Simulation of potential production for modern wheat cultivars in the Netherlands. *Field Crops Research*, 296(15), 108891. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108891>
- 4- Delghandi, M., & Boroomand Nasab, S. (2014). Evaluation of DSSAT 4.5-CSM-CERES-Wheat to simulate growth and development, yield and phenology stages of wheat under water deficit condition (case study: Ahvaz region). *Water and Soil*, 28(1), 82-91. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.20658>
- 5- Hammer, G.L., Sinclair, T.R., Boote, K.J., Wright, G.C., Meinke, H., & Bell, M.J. (1995). A peanut simulation model: I. Model development and testing. *Agronomy Journal*, 87(6), 1085–1093. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700060009x>
- 6- Hu, P., Chapman, S.C., Sukumaran, S., Reynolds, M., & Zheng, B. (2022). Phonological optimization of late reproductive phase for raising wheat yield potential in irrigated mega-environments. *Journal of Experimental Botany*, 73(12), 4236-4249. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac144>
- 7- Iran's Agricultural Ministry. (2022). Iran's Agricultural Ministry. 2022. Annual statistics of agricultural production. Available at: www.maj.ir.
- 8- Kassie, B.T., Asseng, S., Porter, C.H., & Royce, F.S. (2016). Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. *European Journal of Agronomy*, 81, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.012>
- 9- Kheiri, M., & Kambouzia, J. (2022). Evaluation of the efficiency of APSIM -Wheat model for simulation of phenology and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in drylands of west and northwest of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 2(24), 118-135. (In Persian with English abstract).
- 10- Moeinirad, A., Zeinali, E., Soltani, A., Galeshi, S., & Yeganeh Poor, F. (2017). Investigation of SSM-Wheat model to forecast of growth and yield of wheat in response to fertilizer nitrogen in order to decrease pollution environmental and diseases. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 5(2), 459-464.
- 11- Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Rajabi, R. (2016). Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production*, 22(3), 1-26. (In Persian with English abstract).
- 12- Rahemi Karizaki, A., & Hosseini, S.H. (2020). Modeling of phenological stages and yield parameters of faba bean in the east of Golstan province conditions. *Iranin Journal of Pulses Research*, 11(1), 8-48. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v11i1.69427>
- 13- Rahemi Karizaki, A., & Nouralizadeh Otahgsara, M. (2020). Simulation of soybean growth and yield using iLegume_Soybean model in Mazandaran. *Journal of Plant Ecophysiology*, 12(40), 166-177. (In Persian with English abstract).
- 14- Rahemi Karizaki, A., Kouhkan, H., Feyzbakhsh, M.T., & Khaliliaqdam, N. (2023). Simulation of phonological development and growth duration in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using SSM-iSorghum model (case Study: Gorgan county). *Journal of Agroecology*, 14(4), 713-729. (. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/AGRY.2021.67229.0>
- 15- Rahemi Karizaki, A., Sanaie, K., Nakhzari Moghaddam, A., Golamalipour Alamdari, E., Pirdehghan, S., & Habibian, L. (2022). The effect of climate change pheological traits of chick pea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed and irrigated conditions in Gonbad crop production, *Journal of Crop Production*, 15(1), 57-72. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.19074.2423>
- 16- Rahemi-Karizaki, A., Khaliliaghdam, N., & Biabani, A. (2021). Predicting time trend of dry matter accumulation and leaf area index of winter cereals under nitrogen limitation by non-linear models. *Plant Physiology Reports*, 26, 443-456. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00597-x>
- 17- Rani, N., Bamel, J.S., Garg, S., Shukla, A., Pathak, S.K., Singh, R.N., & Bamel, K. (2024). Linear mathematical models for yield estimation of baby corn (*Zea mays* L.). *Plant Science Today*, 11(1), 166-175. <https://doi.org/10.14719/pst.2618>

- 18- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome. A review. *Plants*, 8(34), 1-29. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- 19- Rinaldi, M., Losavio, N., & Flagella, Z. (2003). Evaluation and application of the OILCROP–SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78(1), 17-30. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00030-1)
- 20- Shiukhy-Sughanlu, S., Mousavi-Baygi, M., Torabi, B., & Raeini-Sarjaz, M. (2023). Evaluating the SSM model efficiency in simulating the wheat growth under water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 3(37), 353-366. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237>
- 21- Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T.R. (2013). SSM-wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4), 711–740. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266>
- 22- Spanic, V., Lalic, Z., Berakovic, I., Jukic, G., & Varnica, I. (2024). Morphological characterization of 1322 Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties from EU referent collection. *Agriculture*, 14(4), pp.551. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040551>
- 23- Wahbi, A., & Sinclair, T.R. (2005). Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. *Field Crop Resources*, 91(2-3), 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.020>



Morphophysiological and Growth Responses of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Plant to Combined Use of Biochar and Chemical Fertilizer

Sajjad Toorany¹ , Masoumeh Naeemi¹ *, Abbas Biabani¹  and Ali Nakhzari Moghaddam¹ 

1- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gonbad Kavous, Gonbad Kavous, Iran

(*- Corresponding author's Email: Naeemi_701@yahoo.com)

Received: 12-08-2025
Revised: 01-12-2025
Accepted: 06-12-2025
Available Online: 10-05-2026

How to cite this article:

Toorany, S., Naeemi, M., Biabani, A., & Nakhzari Moghaddam, A. (2026). Morphophysiological and growth responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) plant to combined use of Biochar and chemical fertilizer. *Journal of Agroecology*, 17(4), 575-590. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94894.1249>

Introduction

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is a key oilseed crop, prized for its high-quality oil and protein content, making it vital to both agriculture and the economy. As global population growth drives up demand for vegetable oils, sesame production has become increasingly significant in Iran and worldwide. However, the heavy reliance on chemical fertilizers to enhance yields has caused environmental challenges, including soil degradation, reduced fertility, and water pollution. Biochar, a stable organic material produced by the thermal decomposition of plant biomass, offers a sustainable alternative by improving the soil's physical and chemical properties, enhancing water retention, and reducing nutrient loss. Combining biochar with chemical fertilizers can decrease dependency on chemical inputs while boosting crop performance, supporting sustainable farming practices. This study evaluated the effects of integrated biochar and chemical fertilizer application on sesame's morphophysiological and agronomic traits, aiming to develop a practical strategy for improving its productivity.

Materials and Methods

This study was conducted during the 2020-2021 cropping season as a factorial experiment in a randomized complete block design with three replications in a field located in Aliabad-e Katul, Golestan Province, Iran. The experiment evaluated five biochar levels (0, 2, 4, 8, and 10 by weight, denoted as B₀, B₂, B₄, B₈ and B₁₀) and three chemical fertilizer levels (0, 50%, and 100% of crop requirement, denoted as F₀, F_{50%}, and F_{100%}). Soil samples from a 0-30 cm depth were analyzed for physicochemical properties before land preparation, which involved ploughing, disking, and levelling. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers were applied based on soil test results, with urea, triple superphosphate, and potassium sulfate as sources. The cultivar Oltan was planted manually on June 15, 2020, in 4×5 m plots. Irrigation occurred weekly, and weed, pest, and disease control were maintained. Harvesting took place on October 12, 2020, with traits such as plant height, number of



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94894.1249>

lateral branches, number of capsules per plant, number of seeds per capsule, 1000-seed weight, seed yield, biological yield, harvest index, Oil percentage, Oil yield and chlorophyll content (a, b, and total) measured. Chlorophyll was quantified using spectrophotometry at 663, 646, and 470 nm wavelengths.

Results and Discussion

The results indicated that all examined traits were significantly influenced by the main effects of biochar and chemical fertilizer. The interaction effect was significant only for the number of capsules per plant. The highest plant height (102.57 cm), number of lateral branches (4.03), number of capsules per plant (54.11), thousand seed weight (2.97 g), seed yield (1267.4 kg.ha⁻¹), biological yield (5418.3 kg.ha⁻¹), harvest index (22.03%), Oil yield (625.22 kg.ha⁻¹) and chlorophyll a (1.62 mg.g⁻¹ fresh weight) were obtained from the treatment with B₈ biochar and F_{100%} chemical fertilizer. The highest number of seeds per capsule (70.59) was recorded in the B₁₀ biochar treatment. The highest levels of chlorophyll b and total chlorophyll were observed in the B₄ biochar treatment, with 1.15 and 2.75 mg.g⁻¹ fresh weight, respectively. The control treatment recorded the highest oil percentage of 52.82%. Biochar improved soil water and nutrient retention and enhanced the uptake of nutrients such as nitrogen and magnesium, while chemical fertilizers provided direct access to nutrients and promoted growth. These results are consistent with previous research that emphasizes biochar's role in increasing crop yield and quality. The synergy between biochar's soil-improving effects (such as increased cation exchange capacity) and the nutrient supply from chemical fertilizers significantly enhanced sesame performance. Since the highest seed yield was obtained at the highest fertilizer level used, further research is recommended to determine the optimal fertilizer level.

Conclusion

The use of biochar and chemical fertilizers markedly enhanced sesame's morphophysiological and agronomic responses. Biochar improved soil conditions and minimized nutrient leaching, while chemical fertilizers supplied essential nutrients, resulting in higher seed yields and better growth metrics. This approach demonstrates potential for reducing chemical fertilizer use and advancing sustainable agriculture. Future studies should explore optimal application rates and long-term impacts.

Keywords: Chlorophyll, Harvest index, Number of capsules, Seed yield

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۵۹۰-۵۷۵

واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و رشدی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) به کاربرد تلفیقی بیوجار و کود شیمیایی

سجاد طورانی^۱، معصومه نعیمی^{۱*}، عباس بیابانی^۱ و علی نخزری مقدم^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

چکیده

به منظور ارزیابی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک و زراعی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) به اثر تغذیه‌ای کاربرد تلفیقی بیوجار و کود شیمیایی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه‌ای در شهرستان علی‌آبادکتول در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام شد. عامل‌های آزمایش عبارتند از بیوجار در پنج سطح شامل شاهد، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی؛ کود شیمیایی در سه سطح شامل عدم مصرف، مصرف ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی گیاه در نظر گرفته شدند. صفات مورد بررسی شامل ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل بود. نتایج نشان داد که همه صفات مورد بررسی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی بیوجار و کود شیمیایی قرار گرفتند. اثر متقابل بیوجار و کود شیمیایی بر صفت تعداد کپسول در بوته معنی‌داری شد. بیش‌ترین ارتفاع بوته (۱۰۲/۵۷ سانتی‌متر)، تعداد شاخه‌های جانبی (۴/۰۳ عدد)، تعداد کپسول در بوته (۵۴/۱۱ عدد)، وزن هزار دانه (۲/۹۷ گرم)، عملکرد دانه (۱۲۶۷/۴ کیلوگرم در هکتار)، عملکرد بیولوژیک (۵۴۱۸/۳ کیلوگرم در هکتار)، شاخص برداشت (۲۲/۰۳ درصد)، عملکرد روغن (۶۲۵/۲۲ کیلوگرم در هکتار) و کلروفیل a (۱/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) از تیمار مصرف ۸ درصد وزنی بیوجار و ۱۰۰ درصد کود شیمیایی در کنجد به دست آمد. بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول (۷۰/۵۹) متعلق به تیمار کاربرد ۱۰ درصد وزنی بیوجار بود. همچنین بیش‌ترین مقدار کلروفیل b و کلروفیل کل در تیمار ۴ درصد وزنی بیوجار به‌ترتیب با ۱/۱۵ و ۲/۷۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر مشاهده شد. شاهد نیز بیش‌ترین درصد روغن (۵۲/۸۲ درصد) را به خود اختصاص داد، درحالی‌که تیمار ۸ درصد وزنی بیوجار کم‌ترین میزان (۴۹/۵۱ درصد) صفات مذکور را داشت.

واژه‌های کلیدی: تعداد کپسول، شاخص برداشت، عملکرد دانه، کلروفیل

مقدمه

را تسخیر کنند. در ایران نیز افزایش جمعیت، افزایش مصرف سرانه روغن و تغییر ذائقه مردم، زمینه وابستگی شدید کشور به واردات روغن را فراهم آورده است (Zareei Siabidi & Rezaizad, 2015). کنجد (*Sesamum indicum* L.) یکی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین دانه‌های روغنی است که از لحاظ اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت و توزیع می‌شود. کنجد گیاهی یک ساله و خودگشن از خانواده Pedaliaceae است. طول دوره رشد گیاه کنجد بسته به شرایط آب‌وهوایی ۷۰ تا ۱۵۰ روز است (Amna et al., 2022). دانه کنجد بسته به شرایط و نوع رقم دارای

زراعت دانه‌های روغنی در جهان با توجه به افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و بالا رفتن مصرف سرانه روغن نباتی، توسعه چشم‌گیری داشته است و کشورهای اروپایی، کانادا و استرالیا با پرداخت یارانه‌های هنگفت به کشاورزان می‌کوشند تا بازارهای جهانی

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: Naeemi_701@yahoo.com)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.94894.12>

۴۰ تا ۶۰ درصد روغن و ۱۷ تا ۲۹ درصد پروتئین است که روغن آن به دلیل ترکیب فنلی با خاصیت آنتی‌اکسیدانی به نام سزامول از دوام خوبی برخوردار است (Ahmed et al., 2023). کنگد گیاهی گرمادوست و سازگار با نواحی خشک و نیمه‌خشک است که طی دوره رشد، نیاز به هوای آفتابی و صاف دارد. سطح زیرکشت و میانگین عملکرد جهانی کنگد در سال ۲۰۲۳ به ترتیب حدود ۱۲ تا ۱۳ میلیون هکتار و در حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (FAOSTAT, 2023). در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲، این محصول در ایران در سطحی معادل حدود ۵۰ تا ۶۵ هزار هکتار و با میانگین عملکرد حدود ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کشت شده است (Anonymous, 2023).

در گیاهان کودهای شیمیایی در تمام دوره‌های رشدونمو مورد نیاز می‌باشند. اگرچه مصرف طولانی‌مدت کودهای شیمیایی سبب افزایش فوری عملکرد محصولات می‌شود، اما در بلندمدت باعث بروز مشکلاتی مانند افت کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک، کاهش ماده آلی و تضعیف فعالیت زیستی خاک می‌گردد. استفاده بیش از حد از این کودها موجب انباشت املاح، تخریب ساختمان خاک، کاهش تخلخل، کاهش ظرفیت نگهداشت آب، افزایش خطر آلودگی منابع طبیعی و سلامت انسان می‌شود (Daneshmandi & Seyyedi, 2019). در مقابل، تلفیق کودهای آلی با مدیریت پایدار زراعی می‌تواند این اثرات منفی را کاهش داده و محیط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم کند. یکی از مؤثرترین مواد اصلاح‌کننده، بیوپچار است که از سوزاندن بقایای گیاهی و ضایعات کشاورزی در حضور مقادیر کم اکسیژن و یا عدم حضور آن تولید می‌شود. بیوپچار با تثبیت کربن، افزایش تخلخل خاک، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و کاهش شوری، نقش مهمی در بهبود سلامت و بهره‌وری خاک‌های فقیر دارد (Abd El-Mageed et al., 2021). به کارگیری بیوپچار به‌ویژه در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه بر بهبود خصوصیات فیزیکی خاک باعث افزایش دسترسی گیاهان به عناصر غذایی و ارتقاء عملکرد محصولات کشاورزی شده و می‌تواند اثرات منفی مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی را تا حد زیادی جبران کند (Abbas et al., 2017). نتایج تحقیقات نشان داده است که استفاده از بیوپچار باعث بهبود کیفیت خاک از طریق بهبود خواص فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی آن می‌شود که در نتیجه باعث افزایش تولید محصول می‌گردد. علاوه بر این، بیوپچار می‌تواند اسیدپته، قلیائیت و شوری خاک را کنترل کند.

همچنین بیوپچار به‌وسیله حفظ کربن آلی و رطوبت خاک، در اصلاح خاک‌های ضعیف نقش مهمی ایفا و در نتیجه به بالا رفتن عملکرد محصول کمک می‌کند (Palansooriya et al., 2019). در شرایط تنش خشکی، کاربرد بیوپچار سبب افزایش رشد گیاه، زیست‌توده، رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد و کیفیت می‌شود (Rizwan et al., 2016). نتایج تحقیقات نشان داد که کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوپچار پوسته برنج (*Oryza sativa* L.) به‌طور قابل توجهی عملکرد دانه کنگد را به میزان ۵۵/۵ درصد در مقایسه با شاهد، به دلیل بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک از جمله وزن مخصوص حقیقی و ظاهری، افزایش pH، نیتروژن کل، پتاسیم، منیزیم و ظرفیت تبادل کاتیون افزایش داد (Ndor et al., 2015). در مطالعه‌ای با بررسی کاربرد بیوپچار کود گاوی بر رشد و عملکرد گیاه سویا (*Glycine max* L.) تحت تنش کم‌آبی در یک خاک رسی سیلتی گزارش شد که مصرف بیوپچار به میزان ۱/۲۵ درصد سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه شده و با بهبود وضعیت نگهداری آب خاک، اثرات تنش کم‌آبی بر رشد گیاه را کاهش داد (Gavili et al., 2016).

اگرچه کنگد به‌عنوان گیاهی با نیاز کودی پایین شناخته شده است، اما فراهمی عناصر غذایی بر عملکرد دانه آن اثر مستقیم دارد. در بررسی تأثیر نیتروژن روی کنگد ملاحظه شد که کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن منجر به افزایش عملکرد دانه و روغن شده است (Haghanian et al., 2016). به کار بردن مقادیر متعادلی از بیوپچار به‌همراه کود شیمیایی به‌سبب بهبود عناصر غذایی خاک و کاهش آبشویی، علاوه بر تأثیر بهینه بر عملکرد، میزان آب مصرفی را کاهش می‌دهد، به‌طوری‌که کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوپچار به‌همراه مصرف کود شیمیایی، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک گیاه دارویی سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) را در شرایط آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه نسبت به شاهد افزایش داد (Abbaspour et al., 2017). در بررسی تأثیر بیوپچار، کمپوست و کود شیمیایی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.)، بیش‌ترین تأثیر بیوپچار را در کاربرد آن به‌همراه کود شیمیایی و کمپوست عنوان کردند (Gebremedhin et al., 2015). تیمارهای حاوی ترکیب کود شیمیایی و بیوپچار به‌دلیل جلوگیری از آبشویی عناصر توسط بیوپچار نسبت به تیمارهای کود شیمیایی بدون بیوپچار تأثیر مثبت روی عملکرد گیاه داشتند (Chaudhry et al., 2016). همچنین گزارش شده است که افزودن بیوپچار تولیدی از علف‌هرز

میلی‌متر و حداقل و حداکثر دمای سالانه به ترتیب ۱۲ و ۲۳ درجه سانتی‌گراد و اقلیم کوهپایه‌ای اجرا گردید. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۸۴ متر بوده و در ۵۴ درجه و ۵۳ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه عرض جغرافیایی استان گلستان واقع است. تیمارهای آزمایشی شامل پنج سطح مختلف بیوچار صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی (به ترتیب B₀، B₂، B₄، B₈ و B₁₀) و در سه سطح کود شیمیایی شامل عدم مصرف کود، مصرف ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی گیاه (به ترتیب F₀، F₅₀% و F₁₀₀%) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه تیمار کود شیمیایی در انجام تحقیق مورد توجه می‌باشد، برای ارزیابی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، قبل از انجام عملیات آماده‌سازی زمین، نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک مورد نظر انجام گردید (جدول ۱).

Eupatorium adenophorum L. در ترکیب با NPK با تأثیر بر زیست‌توده ذرت، علاوه بر نگهداری عناصر غذایی سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه ذرت شد (Pandit et al., 2018). در حال حاضر، اطلاعات کمی در مورد تأثیر بیوچار بر گیاه کنگد وجود دارد که بیانگر نیاز به درک این موضوع است که چگونه افزودن بیوچار می‌تواند به‌طور مؤثر در جهت افزایش عملکرد کنگد به‌کار رود. لذا هدف از اجرای این مطالعه، ارزیابی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی و زراعی گیاه کنگد به اثر تغذیه‌ای کاربرد تلفیقی بیوچار و کود شیمیایی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، در مزرعه‌ای در شهرستان علی‌آبادکتول با میانگین درازمدت بارندگی سالانه ۷۳۱

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش
Table 1- Physical and chemical properties of the soil at the experiment site

درصد اشباع (Saturation) (percentage)	هدایت الکتریکی (EC (dS.m ⁻¹))	اسیدیته pH	کربن آلی Organic C (%)	نیتروژن کل Total N (%)	فسفر قابل جذب Absorbable P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Absorbable K (mg.kg ⁻¹)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	ماسه Sand (%)	بافت Texture
57.29	1.37	7.69	1.1	0.11	4.5	125	30	54	16	Si-C-L

متر، فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین تکرارها نیز دو متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت در تاریخ ۲۵ خرداد ماه سال ۱۴۰۰ به‌صورت دستی انجام گردید. فاصله بین گیاهان روی هر ردیف ۱۰ سانتی‌متر و بین هر ردیف ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آبیاری به‌صورت منظم و هر هفت روز یک بار و همچنین مبارزه با علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها در طول انجام آزمایش صورت پذیرفت. برداشت بوته‌ها در تاریخ ۲۰ مهرماه سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. برای کاهش اثر حاشیه‌ای از قسمت میانی هر کرت نمونه‌برداری انجام گردید. سپس صفات ارتفاع بوته، اجزای عملکرد دانه از قبیل تعداد شاخه‌های فرعی در هر بوته، تعداد کپسول در هر بوته، تعداد دانه در هر کپسول، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک گیاه، عملکرد دانه، شاخص برداشت، درصد روغن و عملکرد روغن محاسبه شد. برای محاسبه عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک، نمونه‌ها در آون

به‌منظور آماده‌سازی، ابتدا زمین مورد نظر به کمک گاوآهن شخم زده و سپس کلوخه‌ها با دو مرتبه دیسک عمود بر هم نرم شد و تسطیح به کمک لولر انجام گرفت. با توجه به نتایج آزمون خاک مزرعه مورد مطالعه، برای حصول عملکرد مطلوب کنگد توصیه گردید که مقدار ۶۵ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل در زمان کاشت به‌عنوان منبع فسفر مصرف شود. همچنین جهت تأمین نیاز نیتروژنی گیاه، مقدار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌صورت یک سوم هنگام کاشت و دوسوم در مرحله ۶ تا ۸ برگی استفاده گردید. علاوه بر این به‌منظور بهبود وضعیت پتاسیم خاک، مصرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه به زمین داده شد. در این تحقیق، از رقم اولتان از بخش دانه‌های روغنی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه گردید، همچنین بیوچار مورد نیاز از شرکت صنعت کربن فعال بشل تهیه شد. ابعاد هر کرت ۴×۵

با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا رطوبت به صفر برسد، پس از آن به وسیله ترازوی دقیق وزن شد، سپس به هکتار تعمیم داده شد. میزان درصد روغن با استفاده از دستگاه سوکسوله تعیین گردید. عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) از حاصل ضرب درصد روغن در عملکرد دانه به دست آمد. برای تعیین میزان محتوای کلروفیل پیش از پایان فصل رشد، از برگ‌های گیاه نمونه‌برداری صورت پذیرفت. برای انجام این کار، ۰/۲ گرم از برگ تر با پنج سی‌سی استون ۸۰ درصد به‌خوبی ساییده و مخلوط گردید. محتوای هاون با عبور از صافی مجدداً به‌همراه ۱۰ سی‌سی دیگر استون مخلوط شد و به حجم ۱۵ سی‌سی رسانده شد. سه سی‌سی از محلول در کووت ریخته شد و میزان جذب آن در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۷۰ نانومتر به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر در مقابل بالانک متانول خوانده شد.

معادله (۱)

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A_{663} - 0.86 \times A_{646})V / 100W$$

معادله (۲)

$$\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A_{646} - 3.6 \times A_{663})V / 100W$$

$$\text{Total chlorophyll} = \text{Chla} + \text{Chlb}$$

معادله (۳)

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها در سطح احتمال پنج درصد و براساس آزمون $(LSD)^1$ با استفاده از نرم‌افزار SAS (v. 9.4) انجام گردید.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

تجزیه واریانس داده‌های مربوطه نشان داد که اثر سطوح بیوپار و کود شیمیایی بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، ولی اثر متقابل این دو بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج اندازه‌گیری ارتفاع بوته کنجد در طول فصل رشد نشان داد که با افزودن بیوپار به خاک، ارتفاع گیاه نسبت به شاهد افزایش یافت. بیش‌ترین ارتفاع مربوط به تیمار مصرف ۸ درصد وزنی بیوپار با ۱۰۲/۵۷ سانتی‌متر و کم‌ترین ارتفاع مربوط به تیمار عدم مصرف بیوپار با ۹۱/۳۷ سانتی‌متر بود (جدول ۳). ارتفاع بوته در تمام سطوح بیوپار نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، هرچند تفاوت ارتفاع بوته بین چهار تیمار مصرف ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی بیوپار غیرمعنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی اثر سطوح کود بر ارتفاع بوته بیانگر

تأثیر بیش‌تر این عامل بر این صفت می‌باشد. مصرف ۱۰۰ درصد کود شیمیایی، ارتفاع بوته را ۱۳/۰۸ سانتی‌متر نسبت به تیمار عدم استفاده از کود شیمیایی افزایش داد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر ارتفاع بوته تحت تأثیر کود شیمیایی نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین ارتفاع بوته به‌ترتیب از تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود با ۱۰۵/۸۳ سانتی‌متر و تیمار عدم مصرف کود با ۹۲/۷۵ سانتی‌متر به دست آمد (جدول ۳).

ارتفاع بوته مانند هر کدام از صفات رویشی و زایشی به‌شدت تحت تأثیر عناصر غذایی قرار می‌گیرد. دسترسی گیاهان به مواد معدنی و آب کافی، به‌خصوص عنصر نیتروژن از طریق تأثیر بر تقسیم سلولی و بزرگ شدن آن‌ها در افزایش ارتفاع گیاه مؤثر است. عناصر نیتروژن و فسفر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ارتفاع گیاه دارند. بیوپار از طریق افزایش جذب عناصر غذایی، توانایی سیستم فتوسنتزی و به‌دنبال آن رشد بیش‌تر گیاه را فراهم می‌سازد (Khasheim et al., 2019). در تحقیقی مشاهده شد که پس از ۵۲ روز از کاشت ذرت (*Zea mays* L.)، مقدار ارتفاع بوته به‌طور متوسط در مواردی که بیوپار استفاده شده بود، بیشتر از عدم کاربرد بیوپار بود (Maria et al., 2019).

تعداد شاخه‌های جانبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از این است که اثر سطوح بیوپار و کود شیمیایی بر تعداد شاخه‌های فرعی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، ولی اثر متقابل آن‌ها بر صفت مذکور تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). افزایش مصرف بیوپار، تعداد شاخه‌های جانبی را افزایش داد. تعداد شاخه‌های جانبی در تیمار حاوی ۸ درصد وزنی بیوپار، در مقایسه با شاهد ۴۷/۰۸ درصد افزایش یافت (جدول ۳). بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی مربوط به تیمار مصرف ۸ درصد وزنی بیوپار (۴/۰۳) و کم‌ترین تعداد شاخه جانبی مربوط به شاهد (۲/۷۴) بود (جدول ۳). به‌کار بردن کود شیمیایی در مقایسه با عدم کاربرد آن، تعداد شاخه‌های جانبی را افزایش داد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر کود شیمیایی بر این صفت نشان داد که بیش‌ترین تعداد شاخه فرعی در تیمار کاربرد ۱۰۰ درصد کود شیمیایی در هکتار با ۴/۲۶ مشاهده شد و کم‌ترین تعداد شاخه فرعی نیز ۲/۶۲ مربوط به تیمار عدم مصرف بود (جدول ۳).

به نظر می‌رسد که هر عاملی مانند وجود رطوبت و مواد غذایی مناسب که فرصت رشد بیش‌تری در اختیار گیاه قرار می‌دهد، موجب شکل‌گیری مکان‌های بالقوه کپسول بیش‌تری روی گیاه از طریق

کودهای زیستی بر تعداد کل کپسول کنجد با افزایش تعداد شاخه فرعی و همچنین بهبود رشد ریشه در آزمایش‌های مختلف معنی‌دار گزارش شده است (Shakeri et al., 2012).

تعداد دانه در کپسول

براساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها، این صفت تحت تأثیر تیمارهای بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). براساس جدول مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۳)، بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول که در تیمار ۱۰ درصد وزنی بیوچار (۷۰/۵۹) و کم‌ترین تعداد دانه در بوته در شاهد (۶۵/۷۷) مشاهده شد. در بین تیمارهای کودی، بیش‌ترین تعداد دانه در بوته مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی (۷۱/۲۸) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار بدون کاربرد کود شیمیایی (۶۵/۲۴) بود. تعداد دانه در بوته، در حقیقت ظرفیت مخزن گیاه را تعیین می‌کند و هرچه تعداد دانه بیش‌تر باشد، گیاه دارای مخزن بزرگ‌تری برای دریافت مواد فتوسنتزی بوده و در نهایت افزایش این صفت منجر به افزایش عملکرد دانه خواهد شد (Rezaei Chianeh et al., 2015). در مطالعه تأثیر کاربرد بیوچار در کلزا (*Brassica napus* L.) تحت شرایط دیم، تعداد دانه در خورجین (۲۲ درصد) و عملکرد دانه کلزا (۴۶/۵۹ درصد) افزایش یافت (Tian et al., 2020).

وزن هزار دانه

نتایج نشان داد که اثرات اصلی بیوچار و کود شیمیایی بر وزن هزار دانه تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان وزن هزار دانه مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار با ۲/۹۷ گرم و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به شاهد با ۲/۳۰ گرم بود (جدول ۵). بیش‌ترین وزن هزار دانه در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصد به‌میزان ۲/۸۰ گرم و کم‌ترین مقدار آن در شاهد به‌مقدار ۲/۵۱ گرم مشاهده شد (جدول ۵). کاربرد بیوچار بر وزن دانه در بوته مؤثر بود. کاربرد بیوچار، ضمن تأمین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، به‌دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، از طریق افزایش عرضه مواد غذایی منجر به بهبود وزن دانه در بوته گردید. در نتایجی مشابه با تحقیق حاضر، محققان گزارش دادند که افزودن بیوچار به خاک موجب افزایش وزن هزار دانه می‌گردد (Mahmoud Soltani & Abbasian, 2021).

افزایش ارتفاع و انشعاب جانبی خواهد شد. این صفت ریخت‌شناختی همانند ارتفاع بوته تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه دارد، زیرا با افزایش تعداد شاخه‌های فرعی و تعداد کپسول، به‌تبع عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد. طی تحقیقی گزارش شد که کاربرد بیوچار باعث افزایش تعداد شاخه فرعی در گیاه مرزه تابستانه (*Satureja hortensis* L.) گردید که با نتایج ما هم‌خوانی دارد (Mehdi Zadeh et al., 2018). استفاده از کودهای شیمیایی باعث افزایش ارتفاع بوته و تعداد شاخه های فرعی در بوته‌های سیاهدانه شد. این افزایش، تأثیر مثبت کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژنی را بر رشد رویشی گیاهان نشان می‌دهد (Akomi et al., 2015).

تعداد کپسول در بوته

با توجه به نتایج جدول ۲، اثرات اصلی و اثر متقابل بیوچار و کود شیمیایی بر صفت تعداد کپسول در بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. بیش‌ترین تعداد کپسول در بوته با ۷۷/۴۴ عدد مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار و تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود شیمیایی به دست آمد. پس از این تیمار، بیش‌ترین تعداد کپسول در بوته با ۵۷/۸۸ عدد متعلق به تیمار کاربرد ۸ درصد وزنی بیوچار و تیمار مصرف کودی ۵۰ درصد بود. کم‌ترین تعداد کپسول در بوته نیز با ۱۶/۳۳ عدد در شاهد حاصل شد (شکل ۱). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد ترکیبی بیوچار و کود شیمیایی بیش‌ترین تأثیر را بر تعداد کپسول در بوته داشت. کاربرد هریک از آن‌ها نیز به‌تنهایی اثر افزایشی معنی‌داری را بر تعداد کپسول در بوته داشت. تعداد کپسول در بوته به‌خصوص در ارقام چند شاخه کنجد، تابعی از تعداد شاخه‌های فرعی است و همبستگی مثبت و معنی‌داری بین این دو صفت وجود داشت. مصرف عناصر غذایی نقش مؤثری بر فعل و انفعالات بیوشیمیایی، فتوسنتز، افزایش تعداد برگ، افزایش طول دوره رویش، تجمع ماده خشک اندام‌های هوایی و همچنین اجزای عملکرد مثل تعداد کپسول در بوته دارد (Sajjadi Nik et al., 2012).

راب و همکاران (Rab et al., 2016) بیان کردند که کاربرد بیوچار باعث افزایش تعداد غلاف در لوبیای بال‌دار (*Vigna radiate*) شد. آن‌ها افزایش تعداد غلاف در بوته را افزایش نسبت C به N و تأثیر آن در رشد زایشی گیاه عنوان کردند. چنانچه در بالا ذکر شد، تعداد کپسول در بوته از اجزای مهم عملکرد دانه در گیاه کنجد محسوب می‌شود. تأثیر کود نیتروژن به‌صورت اوره و همچنین

عملکرد بیولوژیک

معنی داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثر سطوح بیوچار و

مطابق با جدول تجزیه واریانس داده‌ها، عملکرد بیولوژیک به‌طور کود شیمیایی قرار گرفت (جدول ۴).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول کنگد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 2- Analysis of variance (mean of squares) of plant height, number of branches per plant, number of capsules per plant and number of seeds per capsule of sesame under biochar and chemical fertilizer

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه در بوته Number of branches per plant	تعداد کپسول در بوته Number Capsule	تعداد دانه در کپسول Number of seeds in capsule
بلوک Block	2	8.34	0.017	26.47	0.48
بیوچار Biochar	4	186.05 **	2.61 **	909.94 **	27.44 **
کود Fertilizer	2	645.15**	10.77 **	3750.46 **	138.94 **
بیوچار × کود F × B	8	30.66 ns	0.606 ns	71.18 **	5.70 ns
خطا Error	28	32.93	0.347	4.32	7.05
ضریب تغییرات CV (%)	-	5.79	16.55	5.01	3.90

ns, **, * and *: non significant, significant at 1 and 5% level of probability, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی و تعداد دانه در کپسول کنگد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 3- Mean comparison of plant height, number of branches per plant and number of seeds per capsule of sesame under biochar and chemical fertilizer

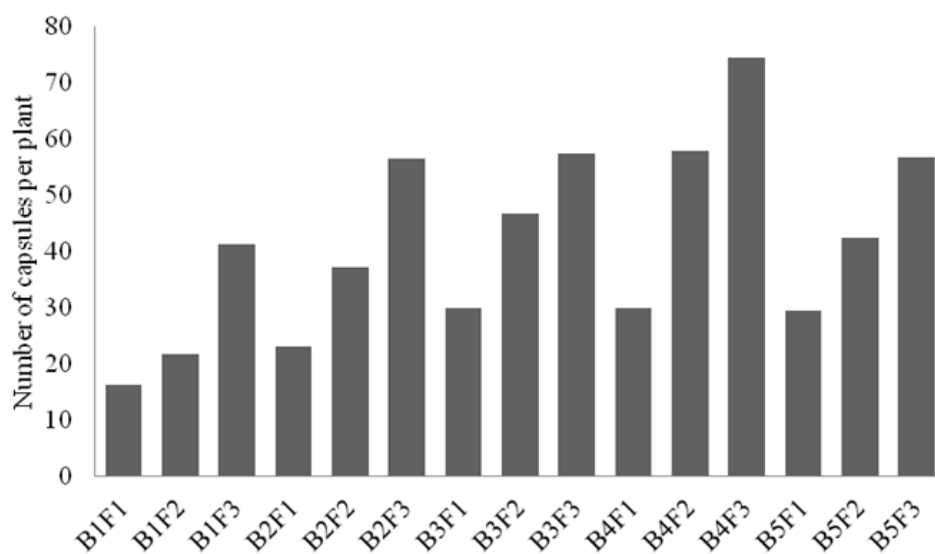
under biochar and chemical fertilizer				
تیمار Treatment	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد شاخه در بوته Number of branches per plant	تعداد دانه در کپسول Number of seeds in capsule	
سطوح بیوچار Biochar levels	B ₀	91.37	2.74	65.77
	B ₂	101.70	3.29	67.40
	B ₄	101	3.85	68.07
	B ₈	102.57	4.03	68.44
	B ₁₀	98.37	3.88	70.59
	LSD 5%	5.54	0.53	2.56
سطوح کودی Fertilizer levels	F ₀	92.75	2.62	65.24
	F _{50%}	98.42	3.80	67.64
	F _{100%}	105.83	4.26	71.28
	LSD 5%	4.29	0.44	1.98

B₀: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B₂: ۲ درصد وزنی بیوچار، B₄: ۴ درصد وزنی بیوچار، B₈: ۸ درصد وزنی بیوچار و B₁₀: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B₀: Control (no biochar application), B₂: 2% (w/w), B₄: 4% (w/w) biochar, B₈: 8% (w/w) biochar, and B₁₀: 10% (ww) biochar

F₀: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، F_{50%}: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و F_{100%}: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

F₀: Control (no chemical fertilizer), F_{50%}: 50% Recommended chemical fertilizer, and F_{100%}: 100% Recommended chemical fertilizer



شکل ۱- اثر متقابل سطوح مختلف بیوچار و کود شیمیایی بر تعداد کپسول در بوته LSD (5%)= 2.007

Fig. 1- Interaction effect of different levels of biochar and chemical fertilizer on the number of capsules per plant

B₀: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B₂: ۲ درصد وزنی بیوچار، B₄: ۴ درصد وزنی بیوچار، B₈: ۸ درصد وزنی بیوچار و B₁₀: ۱۰ درصد وزنی بیوچار
 B₀: Control (no biochar application), B₂: 2% (w/w), B₄: 4% (w/w) biochar, B₈: 8% (w/w) biochar, and B₁₀: 10% (ww) biochar
 F₀: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، F₅₀: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و F₁₀₀: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده
 F₅₀: 50% Recommended chemical fertilizer, and F₁₀₀: 100% Recommended chemical F₀: Control (no chemical fertilizer)

عملکرد دانه

براساس نتایج تجزیه واریانس، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثرات اصلی بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفت، اما اثر متقابل بیوچار و کود بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۴). مقایسه میانگین عملکرد دانه مؤید این است که با مصرف ۸ درصد وزنی بیوچار، عملکرد دانه به ۱۲۶۷/۴ کیلوگرم در هکتار رسید، در حالی که عملکرد دانه در شاهد ۴۵۲/۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین تیمارهای کودی نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه مربوط به تیمار مصرف ۱۰۰ درصد کود شیمیایی در هکتار (به‌میزان ۱۳۳۹/۸ کیلوگرم) و کم‌ترین عملکرد دانه مربوط به تیمار عدم مصرف کود (به‌میزان ۴۳۵/۴ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۵).

کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن با تأثیری که بر رشد و توسعه اندام‌هایی رویشی از طریق سنتز پروتئین‌ها، گسترش سطح برگ‌ها و نیز دوام اندام‌های فتوسنتزکننده دارند، می‌توانند در افزایش عملکرد دانه در گیاهان روغنی نقش مؤثری داشته باشند. نتایج یک پژوهش

مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که عملکرد بیولوژیک با افزایش سطوح بیوچار افزایش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب با میانگین ۲۸۸۴/۵ و ۵۴۱۸/۳ کیلوگرم در هکتار مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار و عدم مصرف بیوچار بود (جدول ۵). کاربرد سطوح ۲، ۴، ۸ و ۱۰ درصد وزنی بیوچار نسبت به شاهد به‌ترتیب ۵۰/۹، ۵۶/۳، ۸۷/۸ و ۴۸/۷ درصد وزن عملکرد بیولوژیک را افزایش داد. بیش‌ترین عملکرد بیولوژیکی در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصد به‌میزان ۵۹۷۶/۳ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین عملکرد بیولوژیک در تیمار عدم کاربرد کود شیمیایی به‌مقدار ۲۹۱۵/۴ کیلوگرم در هکتار حاصل شد (جدول ۵). در پژوهشی مشخص شد که افزودن بیوچار سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی ذرت گردید، به‌طوری‌که کاربرد سطح ۲ و ۴ درصد وزنی بیوچار نسبت به شاهد (عدم کاربرد بیوچار) به‌ترتیب ۱۶ و ۲۸ درصد وزن خشک اندام هوایی ذرت را افزایش داد (Rahimi et al., 2018).

روی گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) نشان داد که کاربرد بیوچار به میزان ۱۰ تن در هکتار منجر به عملکرد دانه (۲۲/۴ درصد) و روغن گیاه گلرنگ (۲۱/۶ درصد) شد (Sajedi & Sajedi, 2020). در پژوهش دیگری، محققان به افزایش عملکرد گندم در تیمارهای حاوی بیوچار اشاره کردند و دلیل این امر را نگهداری بهتر آب و عناصر غذایی توسط بیوچار و تغذیه بهتر گیاه عنوان کردند (Gebremedhin et al., 2015).

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بیانگر آن است که اثر بیوچار بر شاخص برداشت گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین شاخص برداشت مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی مصرف بیوچار (۲۲/۰۳ درصد) و کم‌ترین شاخص برداشت مربوط به شاهد (۱۴/۰۹ درصد) بود (جدول ۵). اثر کود شیمیایی نیز اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر صفت مذکور داشت. بیش‌ترین شاخص برداشت در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصد به‌میزان ۲۲/۰۴ و کم‌ترین شاخص برداشت در شاهد به مقدار ۱۴/۶۶ به دست آمد (جدول ۵).

راب و همکاران (Rab et al., 2016) افزایش شاخص برداشت را با افزایش مقادیر بیوچار گزارش کردند. در این آزمایش، افزایش

عملکرد بیولوژیک با کاربرد کود شیمیایی مشاهده شد که این امر می‌تواند علت پایین بودن شاخص برداشت در تیمارهای مصرف کودی باشد. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک به دست می‌آید. این مؤلفه‌ها، هرکدام تعیین‌کننده دیگری هستند. شاخص برداشت رابطه مستقیمی با عملکرد دانه و رابطه معکوس با عملکرد بیولوژیک دارد. کاهش عملکرد بیولوژیک مربوط به کاهش عملکرد دانه و عملکرد کاه‌وکلش است. همان‌طور که نتایج نشان داد، در تیماری که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه حاصل شد، بیش‌ترین میزان شاخص برداشت نیز به دست آمد (جدول ۵).

نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار و کود از طریق افزایش ارتفاع گیاه، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد کپسول، تعداد بذر در کپسول و تسریع نمو منجر به افزایش عملکرد دانه، کاه‌وکلش کنجد و در نهایت افزایش شاخص برداشت گردید. تیمارهایی که موجب افزایش میزان رشد رویشی مانند ارتفاع بوته شدند، ضمن بهبود اجزای عملکرد دانه، سهم دانه از زیست‌توده (شاخص برداشت) را ارتقاء بخشیدند و عملکرد دانه و شاخص برداشت را افزایش دادند. بررسی‌های انجام‌شده توسط سایر محققان نیز نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار و ورمی‌کمپوست، شاخص برداشت را در گیاهان به‌واسطه افزایش میزان رشد و عملکرد دانه افزایش داد. در بررسی دیگری نیز افزایش شاخص برداشت کلزا با کاربرد بیوچار به دست آمد (Imran & Khan, 2015).

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت کنجد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 4- Analysis of variance (mean of squares) of 1000-seed weight, biological yield, seed yield and harvest index of sesame under biochar and chemical fertilizer

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Block	2	0.0067	576991.38	54459.12	78.05
بیوچار Biochar	4	0.619**	7425439.55**	761837.23**	63.52**
کود Fertilizer	2	0.329**	36211783.92**	3080584.71**	221.75**
بیوچار × کود F × B	8	0.0029 ^{ns}	540536.83 ^{ns}	85889.80 ^{ns}	9.04 ^{ns}
خطا Error	28	0.0032	404687.8	41663.43	14.04
ضریب تغییرات CV (%)	-	2.14	14.82	23.44	19.74

^{ns}, **, * به ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

^{ns}, **, * and *: non significant, significant at 1 and 5% level of probability, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت کنگد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی
Table 5- Mean comparison of 1000-seed weight, biological yield, seed yield and harvest index of sesame under biochar and chemical fertilizer

and chemical fertilizer					
تیمار Treatment		وزن هزار دانه 1000-seed weight (g)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	شاخص برداشت Harvest index (%)
سطوح بیوچار Biochar levels	B ₀	2.30	2884.5	452.96	14.90
	B ₂	2.52	4353.5	814.43	18.18
	B ₄	2.84	4508.5	926.61	19.87
	B ₈	2.97	5418.3	1267.40	22.03
	B ₁₀	2.70	4290.3	891.30	19.88
	LSD 5%	0.055	614.29	197.1	3.61
سطوح کودی Fertilizer levels	F ₀	2.51	2915.4	435.40	14.66
	F _{50%}	2.69	3981.4	836.39	20.22
	F _{100%}	2.80	5976.3	1339.83	22.04
	LSD 5%	0.042	475.82	152.67	2.80

B₀: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B₂: ۲ درصد وزنی بیوچار، B₄: ۴ درصد وزنی بیوچار، B₈: ۸ درصد وزنی بیوچار و B₁₀: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B₀: Control (no biochar application), B₂: 2% (w/w), B₄: 4% (w/w) biochar, B₈: 8% (w/w) biochar, and B₁₀: 10% (ww) biochar

F₀: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، F_{50%}: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و F_{100%}: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

F₀: Control (no chemical fertilizer), F_{50%}: 50% Recommended chemical fertilizer, and F_{100%}: 100% Recommended chemical fertilizer

درصد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی بیوچار و کود شیمیایی بر درصد روغن کنگد معنی‌دار بود، درحالی‌که اثر متقابل بیوچار و کود شیمیایی معنی‌دار نشد (جدول ۶). این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات درصد روغن تحت تأثیر سطوح بیوچار، مستقل از اثر کود شیمیایی بوده است. بررسی میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین درصد روغن در شاهد بیوچار به‌میزان ۵۲/۸۲ درصد به دست آمد و با افزایش سطوح بیوچار، درصد روغن کاهش یافت؛ به‌طوری‌که کم‌ترین درصد روغن در تیمارهای ۴ و ۸ درصد وزنی بیوچار (به‌ترتیب ۴۹/۹۱ و ۴۹/۵۱ درصد) مشاهده شد (جدول ۷). در تیمار ۱۰ درصد وزنی بیوچار مقدار درصد روغن کمی افزایش یافت (۵۰/۹۲ درصد) که نشان‌دهنده الگوی غیرخطی در واکنش گیاه به افزایش بیوچار است. در مورد کود شیمیایی نیز روند مشابهی مشاهده شد. بیش‌ترین درصد روغن در تیمار بدون مصرف کود به‌میزان ۵۱/۳۲ درصد و کم‌ترین مقدار در تیمارهای کودی ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی حاصل گردید. بنابراین افزایش کود باعث کاهش تدریجی درصد روغن شد.

کاهش درصد روغن با افزایش سطوح بیوچار، به‌ویژه در تیمارهای ۴ و ۸ درصد وزنی بیوچار، می‌تواند ناشی از پدیده تثبیت موقت نیتروژن در خاک باشد. مطالعات جهانی در مورد آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، کلزا و کنگد نیز نشان داده‌اند که بیوچار در برخی موارد موجب کاهش درصد روغن می‌شود، زیرا رشد رویشی

را افزایش و تجمع چربی در دانه را کاهش می‌دهد (Yeboah et al., 2016). کاهش درصد روغن در اثر مصرف کود شیمیایی، به‌ویژه کود نیتروژن، کاملاً شناخته‌شده و در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است. نیتروژن بالا باعث افزایش سنتز پروتئین و رشد رویشی می‌شود، درحالی‌که دسترسی کربن برای مسیرهای سنتز لیپید کاهش می‌یابد. این پدیده در کنگد، کلزا، بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.) و آفتابگردان نیز گزارش شده است (Hossain et al., 2020).

عملکرد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر بیوچار و کود شیمیایی بر عملکرد روغن بسیار معنی‌دار بود، اما اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۶). مطابق جدول مقایسه میانگین‌ها، کاربرد بیوچار باعث افزایش چشمگیر عملکرد روغن نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین عملکرد روغن مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی بیوچار به‌میزان ۶۲۵/۲۲ کیلوگرم در هکتار و کم‌ترین مقدار مربوط به شاهد با ۲۳۹/۳۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۷) که نشان‌دهنده افزایش بیش از ۲/۵ برابر عملکرد روغن در اثر بیوچار است. در کود شیمیایی نیز تیمار ۱۰۰ درصد کودی بالاترین عملکرد روغن (۶۷۳/۳۳ کیلوگرم) را نشان داد که نسبت به شاهد (۲۲۲/۴۵ کیلوگرم)، افزایش سه برابری نشان داد (جدول ۷). با وجود معنی‌دار نبودن اثر متقابل، روند اعداد نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر عملکرد روغن در تیمارهای حاوی

سطوح بالای بیوپار همراه با کود شیمیایی مشاهده شد و این بیانگر اثر تجمعی و تقویتی دو نهاده در بهبود تغذیه گیاه و افزایش سنتز و ذخیره روغن است. مطالعات مختلف در آفتابگردان، سویا و کلزا نیز نشان داده‌اند که بیوپار می‌تواند عملکرد روغن را بین ۴۰ تا ۷۰ درصد افزایش دهد (El-Sherif et al., 2021). اگرچه درصد روغن با افزایش کود کاهش یافت، اما عملکرد روغن به دلیل افزایش عملکرد دانه به شدت افزایش پیدا کرد که این موضوع در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Ghosh et al., 2019).

کلروفیل a

نتایج نشان داد که اثر اصلی بیوپار و کود شیمیایی بر کلروفیل تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت، ولی اثر متقابل بین بیوپار و کود شیمیایی معنی‌دار نشد (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان کلروفیل مربوط به تیمار ۸ درصد وزنی مصرف بیوپار (۱/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به شاهد (۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) بود (جدول ۷). هرچه گیاه دارای سطح برگ بیش‌تری باشد، از انرژی خورشیدی بیش‌تری استفاده می‌کند و فتوسنتز بیش‌تری انجام می‌دهد. می‌توان به زبان ساده بیان کرد که افزایش فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاه را بالا می‌برد. وجود شرایط مساعد رشدی برای یک گیاه، دوره رشد گیاه را طولانی‌تر می‌کند و بالعکس.

بیوپار، مقدار کلروفیل a و b را عمدتاً به دلیل بهبود جذب منیزیم و نیتروژن به عنوان درشت مغذی‌های ضروری برای بیوسنتز کلروفیل افزایش می‌دهد (Zargar Shooshtari et al., 2020). با افزایش حاصل‌خیزی خاک، گیاهان قادر به رشد بهتر و در نتیجه افزایش عملکرد هستند. این شرایط ملزم به این است که گیاه بتواند فتوسنتز بالاتری داشته باشد که در نتیجه ورود بیش‌تر نور به تاج‌پوشش و افزایش شاخص سطح برگ، این امکان تا حدی فراهم می‌شود. همچنین در پژوهشی عنوان شد که در شرایط آب کافی و کاربرد بیوپار در خاک، افزایش میزان کلروفیل، فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای در ذرت مشاهده شد (Maria et al., 2019).

کلروفیل b

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، اثرات اصلی بیوپار و کود شیمیایی بر صفت کلروفیل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار

بود، ولی اثر متقابل بین آن‌ها معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین بیوپار نشان داد که بیش‌ترین مقدار کلروفیل b در ترکیب ۴ درصد وزنی بیوپار (۱/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) و کم‌ترین مقدار در شاهد (۰/۸۴ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) مشاهده شد (جدول ۷). مقایسه میانگین تیمار کود شیمیایی حاکی از آن است که بیش‌ترین مقدار کلروفیل b با ۱/۱۱ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر از تیمار مصرف ۱۰۰ درصد و کم‌ترین مقدار کلروفیل با ۰/۸۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر از شاهد به دست آمد (جدول ۷). در مورد محتوای کلروفیل b، کاربرد بیوپار موجب افزایش مقدار این صفت شد. نتایج یک تحقیق روی گیاه خربزه (*Cucumis melo* L.) نشان داد که کاربرد بیوپار خرما باعث افزایش رشد و کلروفیل a و b گردید (Bagheri et al., 2020).

کلروفیل کل

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی بیوپار و کود شیمیایی قرار گرفت (جدول ۶). بررسی جدول ۷ نشان داد که بیش‌ترین کلروفیل کل از تیمار ۴ درصد وزنی بیوپار با ۲/۷۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر و کم‌ترین آن با میزان ۲/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر از شاهد حاصل شد (جدول ۷). بیش‌ترین کلروفیل کل مربوط به تیمار مصرف ۱۰۰ درصد نیاز کودی با ۲/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر و کم‌ترین کلروفیل کل مربوط به شاهد با ۲/۱۸ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بود (جدول ۷). بیوپار با افزایش فراهمی و جذب منیزیم موجب افزایش محتوای کلروفیل در گیاه می‌شود (Abeer et al., 2015). زمانی که شرایط رشدی گیاه بهبود می‌یابد، رشد و عملکرد نهایی گیاه در اثر افزایش شاخص‌های فیزیولوژیک از جمله محتوای کلروفیل گیاه افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای با مقایسه تأثیر کودهای بیولوژیک و بیوپار بر صفات فیزیولوژیک لوبیا چشم‌بلبل (*Vigna unguiculata* L.) نتایج حاکی از آن بود که مصرف بیوپار سبب افزایش ۱۵ درصدی کلروفیل کل نسبت به شاهد گردید (Yaghoby et al., 2014).

جدول ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل کنگد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی

Table 6- Analysis of variance (mean of squares) of oil percentage, oil yield, Chlorophyll a, Chlorophyll b and Total Chlorophyll of sesame under biochar and chemical fertilizer

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll
بلوک Block	2	0.322	15239.10	0.0013	0.0005	0.0035
بیوچار Biochar	4	15.95 **	169931.18 **	0.307 **	0.155 **	0.854 **
کود Fertilizer	2	1.70 **	765483.29 **	0.258 **	0.234 **	0.964 **
بیوچار × کود F × B	8	0.399 ns	18988.43 ns	0.028 ns	0.0008 ns	0.026 ns
خطا Error	28	0.227	1059.75	0.017	0.0005	0.019
ضریب تغییرات CV (%)	-	0.93	23.41	9.01	2.46	5.71

ns، ** و *: به ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد
ns, ** and *: non significant, significant at 1 and 5% level of probability, respectively

جدول ۷- مقایسه میانگین درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل کنگد تحت تأثیر بیوچار و کود شیمیایی
Table 7- Mean comparison of oil percentage, oil yield, chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll of sesame under biochar and chemical fertilizer

تیمار Treatment		درصد روغن Oil percent (%)	عملکرد روغن Oil yield (kg.ha ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Total Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)
سطوح بیوچار Biochar levels	B ₀	52.82	239.39	1.20	0.84	2.04
	B ₂	51.61	420.05	1.34	0.86	2.20
	B ₄	49.91	460.21	1.60	1.15	2.75
	B ₈	49.51	625.22	1.62	1.07	2.69
	B ₁₀	50.92	452.93	1.54	0.97	2.51
	LSD 5%	0.46	99.38	0.12	0.023	0.13
سطوح کودی Fertilizer levels	F ₀	51.32	222.45	1.32	0.86	2.18
	F _{50%}	50.90	422.91	1.49	0.96	2.46
	F _{100%}	50.65	673.336	1.57	1.11	2.68
	LSD 5%	0.356	38.49	0.098	0.018	0.104

B₀: شاهد (عدم مصرف بیوچار)، B₂: ۲ درصد وزنی بیوچار، B₄: ۴ درصد وزنی بیوچار، B₈: ۸ درصد وزنی بیوچار و B₁₀: ۱۰ درصد وزنی بیوچار

B₀: Control (no biochar application), B₂: 2% (w/w), B₄: 4% (w/w) biochar, B₈: 8% (w/w) biochar, and B₁₀: 10% (ww) biochar

F₀: شاهد (عدم مصرف کود شیمیایی)، F_{50%}: ۵۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده و F_{100%}: ۱۰۰ درصد کود شیمیایی توصیه شده

F₀: Control (no chemical fertilizer), F_{50%}: 50% Recommended chemical fertilizer, and F_{100%}: 100% Recommended chemical fertilizer

نتیجه گیری

عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، عملکرد روغن، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل اثر معنی‌دار و مثبتی داشت. کاربرد کود شیمیایی نیز بر کلیه صفات اثر معنی‌داری و مثبتی داشت. اثر متقابل کاربرد بیوچار و کود شیمیایی بر تعداد کپسول در بوته معنی‌دار شد. به کار بردن بیوچار علاوه بر تأثیر بهینه بر عملکرد،

در این آزمایش، تأثیر مثبت معنی‌دار کاربرد بیوچار و کود شیمیایی بر رشد و عملکرد گیاه کنگد مشاهده گردید. نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن است که کاربرد بیوچار بر ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه،

می‌تواند راه‌حلی مفید و اقتصادی در جهت صرفه‌جویی مصرف کود و هزینه‌های ناشی از آن، منجر به کاهش اثرات مخرب زیست محیطی شد. با توجه به اینکه بیش‌ترین عملکرد دانه در بالاترین سطح کود شیمیایی استفاده‌شده به دست آمد و همچنین نتایج آزمایش یک‌ساله قابل اعتماد نیست، لذا پژوهش‌های تکمیلی برای تعیین بهترین سطح کودی توصیه می‌شود.

References

1. Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z., Qayyum, M.F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J., & Ok, Y.S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.028>
2. Abbaspour, F., Asghari, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Abbasdokht, H., Shabahang, J., & Baig Babaei, A. (2017). Effect of biochar application on yield and yield components of black seed (*Nigella sativa* L.) under low irrigation condition. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 33(5), 837-852. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2017.114596.2075>
3. Abd El-Mageed, T.A., Belal, E.E., Rady, M.O.A., Abd El-Mageed, S.A., Mansour, E., Awad, M.F., & Semida, W.M. (2021). Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: Influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. *Agronomy*, 11(7), 2-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071290>
4. Abeer, H., Abd-Allah, E.F., Alqarawi, A.A., & Egamberdieva, D. (2015). Induction of salt stress tolerance in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] by arbuscular mycorrhizal fungi. *Legume-Research-An International Journal*, 38(5), 579-588. <https://doi.org/10.18805/lr.v38i5.5933>
5. Ahmed, J., Qadir, G., Ansar, M., Wattoo, F.M., Javed, T., Ali, B., & Rahimi, M. (2023). Shattering and yield expression of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes influenced by paclobutrazol concentration under rainfed conditions of Pothwar. *BMC Plant Biology*, 23, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04145-7>
6. Akom, M., Boateng, C.H.O., Otoo1, E., & Dawoe, E. (2015). Effect of biochar and inorganic fertilizer in yam (*Dioscorea rotundata* Poir) production in a forest agroecological zone. *Journal of Agricultural Science*, 7(3), 211-222. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n3p211>
7. Amna, B.A., Azeem, M.A., Qayyum, A., Mustafa, G., Ahmad, M.A., & Chaudhary, H.J. (2022). Biofabricated silver nanoparticles: A sustainable approach for augmentation of plant growth and pathogen control. In: Faizan, M. (Ed). *Sustainable Agriculture Reviews* 53. Springer International Publishing, 1, 345-371. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86876-5_14
8. Anonymous. (2023). Statistics of Agricultural Crops, 2023-2024. Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran. (In Persian)
9. Bagheri, S., Hassandokht, M.R., Mirsoleimani, A., & Mousavi, A. (2020). Effects of palm leaf biochar on the availability of soil nutrients, leaf nutrient concentration, and physiological characteristics of melon plants (*Cucumis melo* L.) under drought stress. *Acta Agrobotanica*, 73(1), 1-12. <https://doi.org/10.5586/aa.7311>
10. Chaudhry, U.K., Shahzad, S., Naqqash, M.N., Saboor, A., Yaqoob, S., Abbas, M.S., & Saeed, F. (2016). Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 9(1), 348-358. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631v1>
11. Daneshmandi, M.S., & Seyyedi, S.M. (2019). Nutrient availability and saffron corms growth affected by composted pistachio residues and commercial poultry manure in a calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(12), 1-11. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1626871>
12. El-Sherif, A., Abd El-Aty, A.M., & El-Shafie, A.F. (2021). Response of sunflower yield and oil quality to biochar and compost under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 243, 106483.
13. FAO. (2023). FAOSTAT (Food and Agriculture Organisation Statistical Databases). <https://www.fao.org>.
14. Gavili, E., Mousavi, S.A.A., & Kamgar Haghighi, A.A. (2016). Effect of cattle manure biochar and drought stress on the growth characteristics and water use efficiency of spinach under greenhouse conditions. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 30(2), 243-259. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.106647>

15. Gebremedhin, G.H., Haileselassie, B., Berhe, D., & Belay, T. (2015). Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *Journal of Fertilizers and Pesticides*, 6, 158-162. <https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000158>
16. Ghosh, A., Mandal, M., & Mandal, S. (2019). Impact of nitrogen fertilization on seed yield and oil profile of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 128, 85–92.
17. Haghanian, S., Yadavi, A., Balouch, H., & Moradi, A. (2016). Grain, oil yield and nitrogen use efficiency in different varieties of sesame (*Sesamum indicum* L.) under nitrogen fertilizer and weed competition. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, 26(1), 67-81. (In Persian with English abstract)
18. Hossain, M.B., Hasan, M.R., & Rahman, M.M. (2020). Nitrogen and phosphorus effect on the growth, yield and oil content of sesame. *Journal of Agricultural Science*, 12(5), 100–110.
19. Imran, G., & Khan, A. (2015). Biochar application and shoot cutting duration (days) influenced growth, yield and yield contributing parameters of *Brassica napus* L. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(5), 1-6.
20. Khashei, A., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., & Dastourani, M. (2019). Effect of biochar application and water tension levels on yield and yield components of medicinal plant (*Trachyspermum ammi*). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 319-328. (In Persian with English abstract)
21. Mahmoud Soltani, S., & Abbasian, A. (2021). Simultaneous application effect of rice husk biochar and zinc sulfate fertilizer on yield, yield components of rice (*Oryza sativa* L.) Hashemi cultivar and some soil chemical properties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), 707-719. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.315776.668843>
22. Maria, M.C.T., Liovando, M.C., Hugo, A.H., Raphael, B.A.F., Paulo, R.C., Jose Domingos, P.J., & Jose Maria, R.L. (2019). Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil & Tillage Research*, 192, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.007>
23. Mehdi Zadeh, L., Moghadam, M., & Lakzian, A. (2018). The effect of biochar on growth characteristics and potassium to sodium ratio of summer savoury (*Satureja hortensis* L.) under sodium chloride stress. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 12(2), 595-606. (In Persian with English abstract).
24. Ndor, E., Jayeoba, O., & Asadu, C. (2015). Effect of biochar soil amendment on soil properties and yield of sesame varieties in Lafia, Nigeria. *American Journal of Experimental Agriculture*, 9, 1-8. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2015/19637>
25. Palansooriya, K.N., Ok, Y.S., Awad, Y.M., Lee, S.S., Sung, J.K., Koutsospyros, A., & Moon, D.H. (2019). Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 234, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.085>
26. Pandit, N.R., Mulder, J., Hale, S.E., Martinsen, V., Schmidt, H.P., & Cornelissen, G. (2018). Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. *Science of the Total Environment*, 625, 1380-1389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.022>
27. Rab, A., Rabnawaz Khan, M., Ul Haq, S., Zahid, S., Asim, M., Afridi, M.Z., Arif, M., & Munsif, F. (2016). Impact of biochar on mungbean yield and yield components. *Pure and Applied Biology*, 5(3), 632-640. <http://doi.org/10.19045/bspab.2016.50082>
28. Rahimi, A., Abbaspour, D., Asghari, H.R., & Ghorbani, H. (2018). Surface adsorption kinetics of some pollutant elements by two biochars of rice bran and gentian leaves. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
29. Rezaei Chianeh, A., Tajbakhsh, M., Ghiyasi, M., & Amirmia, R. (2015). Effect of integrated organic and chemical fertilizers on quantitative and qualitative yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under dry farming conditions. *Journal of Research in Crop Plants*, 3(1), 55-69. (In Persian with English abstract)
30. Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M.F., Ibrahim, M., Zia-ur-Rehman, M., Abbas, T., & Ok, Y.S. (2016). Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2230-2248. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5697-7>
31. Sajedi, A., & Sajedi, N.A. (2019). The effect of biochar application, priming and foliar spraying with water and salicylic acid on the yield and physiological traits of safflower under dryland conditions. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 13(1), 155-169. (In Persian with English abstract).
32. Sajjadi Nik, R., Yadavi, A., Baluchi, H.R., & Faraji, E. (2012). Comparison of the effects of chemical (urea), organic (vermicompost) and biological (nitroxine) fertilizers on the quantitative and qualitative yield of sesame.

- (*Sesamum indicum* L.) *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 21(2), 87-101. (In Persian with English abstract).
33. Shakeri, E., Amini Dehaghi, M., Tabatabaei, S.A., & Modares Sanavi, S.A.M. (2012). Effect of chemical fertilizer and biofertilizer on seed yield, its components, oil and protein percent in sesame varieties. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 22(1), 71-85. (In Persian with English abstract).
 34. Tian, X., Li, Z., Wang, L., Wang, Y., & Li, B. (2020). Biochar and slow release urea effects on root morphology, grain yield, nitrogen uptake and utilization in *Brassica napus*. *International Journal of Agriculture and Biology*, 23(3), 653-660. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1335>
 35. Yaghoby, M., Amerian, M., & Asghar, H. (2014). Comparison of the effect of biological and biofertilized fertilizers on some physiological traits in bean growing. The 2nd National Conference of the Desert with the Approach of the Management of Arid and Desert Areas. Semnan University, Semnan, Iran. (in Persian)
 36. Yeboah, E., Asamoah, G., Ofori, P., & Frimpong, K.A. (2016). Effect of biochar type and rate of application on soil fertility and yield of maize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(5), 695-705.
 37. Zareei Siabidi, A., & Rezaizad, A. (2015). Technical instructions, planting and harvesting of canola in Kermanshah. Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_3863. (In Persian)
 38. Zargar Shooshtari, F., Souri, M.K., Hasandokht, M.R., & Jari, S.K. (2020). Glycine mitigates fertilizer requirements of agricultural crops: Case study with cucumber as a high fertilizer demanding crop. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(19), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00185-5>



The Effect of Different Tillage Systems on Forage Quality in a Triticale (×*Triticosecale* Wittmack)–Vetch (*Vicia sativa* L.) Intercropping

Arman Jamali¹, Gholamreza Heidari^{1*}, Yousef Sohrabi¹ and Zahed Sharifi²

1- Department of Production and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

2- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding author's Email: g.heidari@uok.ac.ir)

Received: 22-08-2025
Revised: 30-12-2025
Accepted: 05-01-2026
Available Online: 10-05-2026

How to cite this article:

Jamali, A., Heidari, G., Sohrabi, Y., & Sharifi, Z. (2026). The effect of different tillage systems on forage quality in a triticale (×*Triticosecale* Wittmack)–vetch (*Vicia sativa* L.) intercropping. *Journal of Agroecology*, 17(4), 591-609. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/agry.2026.95047.1250>

Introduction

Global food demand is rising, and by 2050, the world population is expected to reach about 9 billion. To meet this demand under increasing environmental pressures, improving the efficiency of production factors through sustainable agricultural practices is essential. Conventional tillage and sole-cropping systems often suffer from limited ground cover and associated soil degradation. Intercropping systems, especially mixtures of cereals and legumes, can enhance resource-use efficiency, improve soil quality via biological nitrogen fixation, and reduce soil erosion while maintaining or increasing forage yield and quality. This study focuses on the performance of intercropping two forage crops, vetch (*Vicia sativa* L.) and triticale (×*Triticosecale* Wittmack), under different tillage regimes, aiming to identify combinations that optimize forage quality under dryland conditions in Kurdistan, Iran.

Materials and Methods

The field experiment was conducted during the 2019–2020 growing season at the Kurdistan University experimental farm. The trial employed a split-plot based on a randomized complete block design with three replicates. The main plots consisted of three tillage treatments: conventional tillage (plough-back, disc, and harrow), reduced tillage (chisels), and no-tillage. Subplots represented six sowing patterns: (I_{1v}) pure vetch, (I_{1t}) pure triticale, (I₂) 80% triticale+20% vetch, (I₃) 60% triticale+40% vetch, (I₄) 40% triticale+60% vetch, and (I₅) 20% triticale+80% vetch. Subplot dimensions and spacings were standardized, with three 5 m by 1.5 m main plots per replicate. Quality parameters of the forage were assessed at anthesis by harvesting, excluding edge effects. The laboratory analyses included crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and ash content, following standard procedures. Plant height and dry matter (DM) yield were also recorded. Data were analyzed using SAS 9.1. Means were compared with LSD at 5% probability. Figures were produced in Excel.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/agry.2026.95047.1250>

Results and Discussion

Analysis of variance showed significant interactions between tillage and intercropping on several forage quality traits in both species. Specifically, the interaction affected the acid detergent fiber (ADF) and crude protein (CP) of vetch forage at the 1% level, and also influenced the neutral detergent fiber (NDF) and CP of vetch and triticale in different contexts. Overall, ADF and ash contents, and CP of vetch, were sensitive to tillage $\times$ intercropping, whereas NDF showed pronounced responses to tillage and intercropping independently in many treatment combinations. Crude protein was higher in vetch pure stands and generally increased under no-tillage compared with conventional tillage. In intercropping setups, CP of triticale tended to increase as the proportion of vetch increased, indicating a positive effect of legume association on the protein content of the cereal component, likely due to improved nitrogen availability and better canopy light capture under mixed stands. The content of ADF (and thus digestibility potential) and NDF was notably affected by tillage and intercropping. Pure cropping with conventional tillage tended to exhibit higher NDF and ADF values compared with no-till and mixed stands, suggesting lower forage digestibility in traditional systems. Intercropping, especially with favorable cereal-legume ratios, reduced fiber concentrations in some treatments, aligning with improved forage quality reported in other cereal-legume mixtures. Ash content was mainly driven by intercropping. Among the treatments, pure vetch exhibited the highest ash content, while pure triticale had the lowest, with mixed patterns showing intermediate values. This pattern reflects changes in mineral content and tissue composition influenced by species mix and resource availability. Dry matter did not show significant differences among tillage systems in this study. The land equivalent ratio (LER) analysis demonstrated that intercropping, particularly at ratios of triticale 80% + vetch 20%, improved LER across all tillage treatments, with the highest LER observed under conservation tillage systems.

Conclusion

The study demonstrates that tillage systems and intercropping patterns significantly influence the quality of forage from vetch and triticale under dry Mediterranean conditions. Intercropping, particularly with balanced cereal-legume ratios, improved forage quality by modulating Crude Protein and fiber fractions (Acid Detergent Fiber and Natural Detergent Fiber), and reduced ash content relative to pure stands under some tillage regimes. No-tillage tended to enhance CP for vetch, and under intercropping, CP of the cereal component increased, suggesting improved nitrogen use efficiency and forage nutritive value in conservative farming systems. Intercropping, especially at an 80:20 ratio, improved LER, particularly under conservation tillage systems. Practically, adopting conservation or reduced tillage in combination with carefully designed vetch-triticale mixtures can enhance forage quality and soil health in semi-arid environments.

Keywords: Conservation tillage, Crude protein, Digestibility, Dry matter, Soil management

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۵۹۱-۶۰۹

اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر کیفیت علوفه در کشت مخلوط تریتیکاله (*Triticosecale* ×) و ماشک (*Vicia sativa* L.) Wittmack

آرمان جمالی^۱، غلامرضا حیدری^{۱*}، یوسف سهرابی^۱ و زاهد شریفی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

این آزمایش به منظور ارزیابی اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر برخی ویژگی‌های کیفیت علوفه به صورت کرت‌های خردشده برپایه بلوک‌های کامل تصادفی در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان انجام شد. سیستم‌های خاک‌ورزی به عنوان عامل اصلی در سه سطح خاک‌ورزی رایج (گاواهن برگردان دار + دیسک + ماله)، کم‌خاک‌ورزی (چیزل) و بدون خاک‌ورزی اعمال شد. الگوهای کشت مخلوط به عنوان عامل فرعی در شش سطح شامل کشت خالص ماشک (*Vicia sativa* L.)، کشت خالص تریتیکاله (*Triticosecale* ×) Wittmack، کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله + ۲۰ درصد ماشک، کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله + ۴۰ درصد ماشک، کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله + ۶۰ درصد ماشک و کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله + ۸۰ درصد ماشک بود. نتایج نشان داد که افزایش ماشک در الگوهای کشت باعث افزایش پروتئین خام علوفه شد. بیشترین الیاف نامحلول در شوینده خنثی ماشک در سیستم‌های خاک‌ورزی رایج، کاهش یافته و بدون خاک‌ورزی رایج، کاهش یافته و بدون خاک‌ورزی در کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک بود. کمترین پروتئین خام علوفه ماشک در هر سه سیستم خاک‌ورزی رایج، کاهش یافته و بدون خاک‌ورزی در کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک ثبت شد. بیشترین مقدار الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در گیاه ماشک (۴۷/۱۵ درصد) و تریتیکاله (۴۵/۰۹ درصد) مربوط به تیمار خاک‌ورزی رایج بود. بیشترین خاکستر علوفه (۱۲/۲۳ درصد) در تیمار کشت خالص ماشک و کمترین میزان این صفت نیز در تیمار کشت خالص تریتیکاله (۷/۲۱ درصد) مشاهده شد. ارتفاع بوته ماشک و تریتیکاله تحت تأثیر اثرات ساده خاک‌ورزی و کشت مخلوط معنی دار گردید. بیشترین ارتفاع بوته ماشک (۳۸/۷۶ سانتی‌متر) و تریتیکاله (۷۶ سانتی‌متر) در تیمار خاک‌ورزی رایج و کمترین ارتفاع بوته ماشک (۳۶/۱۸ سانتی‌متر) و تریتیکاله (۷۱/۸۲ سانتی‌متر) در تیمار بدون خاک‌ورزی بود. در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی، کشت مخلوط در نسبت ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک نسبت برابری زمین را بهبود بخشید. براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان اظهار داشت که کاربرد روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی به‌ویژه در شرایط دیم سبب تغییرات مثبت کیفیت علوفه در گیاه ماشک و تریتیکاله شد. بهره‌برداری از سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی و کشت مخلوط در این پژوهش، علاوه بر بهبود کیفیت علوفه سبب افزایش نسبت برابری زمین گردید.

واژه‌های کلیدی: پروتئین خام، خاک‌ورزی حفاظتی، قابلیت هضم، ماده خشک، مدیریت خاک

مقدمه

۹/۸ میلیارد تن برسد، بنابراین جهت تأمین غذای مورد نیاز این جمعیت روبه‌رشد، بهره‌وری عوامل تولید که از ابزارهای پایداری در کشاورزی است، باید افزایش یابد (Salah et al., 2019). این در حالی است که در سال‌های اخیر، چالش‌های مختلف محیطی از جمله کاهش کیفیت آب، خاک و هوا، ناشی از کشاورزی فشرده به‌ویژه در نواحی مدیرانه‌ای افزایش یافته است (Samuel et al., 2020). در سیستم‌های تک‌کشتی به دلیل عدم برخورداری از پوشش گیاهی کافی

پیش‌بینی می‌شود که جمعیت جهان در پایان سال ۲۰۵۰ به حدود

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج،

ایران

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج،

ایران

(Email: g.heidari@uok.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/agry.2026.95047.1250>

در سطح خاک، مشکلات عمده‌ای وجود دارد (Barnes et al., 2019). بنابراین افزایش تولید در واحد زمان و اصلاح سیستم‌های خاک‌ورزی جهت کاهش فرسایش خاک و افزایش حاصلخیزی آن می‌تواند حائز اهمیت باشد.

یکی از مهم‌ترین راهبردها در راستای افزایش تولید در واحد زمان، سیستم‌های کشت مخلوط می‌باشد. کاشت همزمان دو یا چند گیاه زراعی در یک مزرعه در طول یک فصل زراعی، کشت مخلوط نامیده می‌شود (Hodiyani et al., 2016). کشت مخلوط هنگامی سودمند است که منابع محیطی مورد نیاز دو گونه از یکدیگر متفاوت بوده و گونه‌ها در کنار یکدیگر قادر به استفاده بهینه از عوامل محیطی باشند (Mabudi & Zehtab Salmasi, 2017). هدف از آزمایش‌های کشت مخلوط، به‌ویژه کشت مخلوط گیاهان علوفه‌ای، افزایش عملکرد در واحد سطح و کیفیت محصول می‌باشد و در اغلب موارد از گیاهان خانواده بقولات و غلات استفاده می‌شوند. غلات از نظر ماده خشک در سطح بالایی قرار دارند، ولی از حیث پروتئین فقیر می‌باشند و در نقطه مقابل، بقولات از نظر میزان پروتئین در سطح بالایی قرار دارند. از این‌رو، کشت مخلوط غلات و بقولات منجر به تولید علوفه‌ای با کیفیت بالا خواهد شد (Shahbazi et al., 2022).

نتایج مطالعات نشان داده است که برتری بوم‌شناختی کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی، نتیجه استفاده کارآمدتر از منابع محیطی، به‌خصوص استفاده از نور خورشید است که این انرژی در طول فرآیند ذخیره شده و تبدیل به زیست‌توده گیاهی می‌شود (Wang et al., 2024). بهره‌برداری از منابع، نیازمند تیپ ایده‌آل گیاه زراعی و انتخاب تراکم مناسب کاشت است که در کمترین زمان، تمام آشیان اکولوژیک را اشغال نمایند. در نتیجه، استفاده مؤثر از نور، آب و مواد غذایی نسبت به کشت جداگانه داشته باشد (Lal et al., 2019). از سوی دیگر، امروزه کشت مخلوط گیاهان علوفه‌ای بسیار متداول بوده و کاربرد آن موجب افزایش کمی و کیفی علوفه، کاهش خسارت احتمالی ناشی از آفات و بیماری‌ها و استفاده حداکثر از منابع آب و خاک شده است (Lithourgidis et al., 2011).

خاک‌ورزی بر بخش مهمی از خصوصیات خاک از قبیل دما، ذخیره و پراکنش رطوبت در خاک و نیز تراکم خاک اثر می‌گذارد (Lv et al., 2023). در همین راستا، انتخاب و اجرای صحیح یک سیستم خاک‌ورزی می‌تواند بستر بذری مناسب را جهت رشد گیاه و در نهایت به دست آوردن عملکرد مطلوب فراهم می‌کند (Ahmadi et al., 2024).

سیستم‌های خاک‌ورزی مرسوم از طریق شکستن لایه‌های نفوذناپذیر خاک، پاک کردن سطح خاک از بقایای گیاهی و قطع چرخه زندگی علف‌های هرز، حشرات و بیماری‌ها بستر مناسبی برای رشد گیاه آماده می‌کند. اما این سیستم‌ها نه تنها به انرژی زیادی نیاز دارند، بلکه در درازمدت خصوصیات فیزیکی خاک را تخریب و آن را دچار فرسایش می‌کنند (Li et al., 2023). در این راستا، جایگزینی نظام‌های رایج با نظام‌های کشاورزی حفاظتی به‌عنوان یک راهکار مهم در جهت نیل به پایداری مطرح گردیده و پذیرش جهانی را به دنبال داشته است (Akinola et al., 2023). نتایج پژوهشی نشان داد که سیستم‌های کم و بدون خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم نه تنها باعث کاهش هزینه‌های زراعی می‌شود، بلکه سله بستن لایه سطحی خاک، وزن مخصوص ظاهری و فشردگی خاک را کاهش می‌دهد و موجب افزایش ذخیره رطوبت در خاک، بیشتر در نتیجه نفوذ بهتر آب، کاهش تبخیر و رواناب و افزایش دسترسی عناصر غذایی در خاک می‌شوند (Lv et al., 2023). نفوذپذیری آب در خاک در سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی به‌علت افزایش مواد آلی و فعالیت کرم‌های خاکی نسبت به سیستم خاک‌ورزی متداول افزایش می‌یابد (Akinola et al., 2023).

ماشک (*Vicia sativa* L.) برای حفاظت و اصلاح ساختمان خاک، به‌عنوان کود سبز، علوفه خشک، سیلو و علوفه سبز کشت می‌شوند. علوفه ماشک برای دام‌ها مناسب بوده و میزان پروتئین آن در زمان مناسب برداشت در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد است (Chen et al., 2020). گیاه تربیتیکاله (*Triticosecale* Wittmack L.) حاصل ترکیب دو جنس چاودار (*Secale cereal* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) است. تربیتیکاله، خصوصیات عملکردی گندم را برای تولید مواد غذایی و سازگاری چاودار به محیط نامطلوب دارد و به‌دلیل بالا بودن لیزین، ارزش پروتئینی بالاتری نسبت به گندم دارد (Audenaert et al., 2014).

افزایش عملکرد علوفه در گیاهان کشت‌شده به روش‌های کم-خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی مشاهده شده است (Wasaya et al., 2017). نتایج پژوهشی نشان داد که گیاه ماشک کشت‌شده در تیمارهای کشت مستقیم (بدون خاک‌ورزی) و کم‌خاک‌ورزی در شرایط دیم عملکرد و ارتفاع بیشتری در مقایسه با تیمار خاک‌ورزی مرسوم داشتند. براساس این پژوهش، خاک‌ورزی کاهش در شرایط دیم با توجه به تغییرات بیولوژیکی و ساختاری که در خاک به وجود

می‌آورد سبب تغییرات مثبت مورفوفیزیولوژیکی و کیفیت علوفه در گیاه ماشک می‌شود (Elyasi et al., 2024). نتایج پژوهش دیگری با هدف بررسی سطوح مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) و سورگوم (*Sorghum bicolor* L. Moench) در کشت مخلوط نشان داد که سیستم بدون خاک‌ورزی موجب افزایش عملکرد ذرت در الگوهای مختلف کشت مخلوط گردید (Farrahi et al., 2023).

کشت مخلوط غلات و لگوم‌ها، یکی از راهکارهای مفید جهت افزایش کیفیت علوفه و افزایش عملکرد می‌باشد، چراکه غلات دارای قابلیت تولید زیست‌توده زیاد و انرژی قابل توجه برای دام است، اما به لحاظ پروتئین فقیر می‌باشد. از سوی دیگر، لگوم‌ها دارای خوش خوراکی بالاتر، پروتئین بیشتر و قابلیت هضم مطلوب هستند، اما عملکرد آن‌ها در واحد سطح پایین می‌باشد (Lithourgidis, 2011).

نتایج پژوهشی نشان داد که کشت مخلوط غلات و نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) باعث افزایش پروتئین خام علوفه در همه تیمارهای کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص شد (Kocer & Albaryrac, 2022).

سبز (*Vigna radiata* L.) بر عملکرد و کیفیت علوفه نشان داد که کشت مخلوط نسبت به کشت خالص دارای کیفیت علوفه بالاتری بود (Dahmardeh et al., 2013). نتایج حاصل از بررسی عملکرد و کیفیت علوفه در نسبت‌های مختلف کشت مخلوط نشان داد که بالاترین میزان عملکرد کل علوفه خشک از تیمار کشت مخلوط ۵۰:۵۰ لوبیا تپاری (*Phaseolus acutifolius* L.) – ارزن

این آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۸-۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان اجرا گردید. مزرعه با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۸ دقیقه شمالی در ۳۵ کیلومتری شرق شهرستان سنندج واقع است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۶۶ متر می‌باشد. میانگین بارندگی سالیانه این منطقه ۳۵۰ میلی‌متر می‌باشد و براساس روش آمبرژه آب‌وهوای منطقه، مدیترانه‌ای و از نوع خشک است. میانگین بارش و دمای ماهانه سال آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین دما و مجموع بارش ماهیانه در سال زراعی ۱۳۹۸-۹۹

Table 1- Average monthly temperature and total precipitation in crop year 2019-2020

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
	October	November	December	January	February	Mars	April	May	June	July
بارندگی Precipitation (mm)	1.7	125.7	31.2	30	39.8	20.1	93.6	22.2	0.1	0.5
میانگین حداقل دما Average minimum temperature (°C)	11.4	4.0	-3.7	-3.5	-3.7	2.7	3.6	9.64	13.3	18.2
میانگین حداکثر دما Average maximum temperature (°C)	23.9	12.1	4.2	3.9	4.9	12.7	13.4	21.5	26.3	33.5

خاک‌ورزی (چیزل) و بدون خاک‌ورزی اعمال شد و الگوهای مختلف کاشت به‌عنوان عامل فرعی در شش سطح شامل کشت خالص ماشک (I_{1v})، کشت خالص تریتیکاله (I_{1t})، کشت مخلوط جایگزینی

آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. خاک‌ورزی به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح خاک‌ورزی رایج (گاواهن برگردان دار + دیسک + ماله)، کم

۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک (I_2)، کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک (I_3)، کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک (I_4) و کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک (I_5) بود. در خاک‌ورزی رایج زمین محل آزمایش در ۲۵ مهر ماه به‌وسیله گاوآهن برگردان‌دار تا عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک‌ورزی زده شد. سپس کلوخه ها با استفاده از دیسک خرد شدند و در انتها برای تسطح زمین از ماله استفاده شد. کم‌خاک‌ورزی کاهشی نیز در همین زمان با استفاده از چپزل تا عمق ۲۰ سانتی‌متری انجام شد. کشت در تمام تیمارها به‌صورت دستی انجام گرفت. میزان تراکم گیاه تریتیکاله ۳۵۰ بوته در مترمربع و گیاه ماشک ۲۵۰ بوته در مترمربع به‌عنوان تراکم مطلوب برای کشت خالص دو گیاه در نظر گرفته شد. کرت‌های فرعی دارای ابعادی به‌طول ۵ متر و عرض ۱/۵ متر بود. ابعاد کرت‌های اصلی ۸×

۱۹ متر در نظر گرفته شد. هر کرت شامل شش ردیف کاشت با فاصله بین ردیف ۳۰ سانتی‌متر در کشت خالص و مخلوط بود. فاصله بین کرت‌های فرعی نیز نیم متر و فاصله بین کرت‌های اصلی و تکرارها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. در زمان کاشت کودهای مورد نیاز شامل نیتروژن از منبع اوره، فسفر از منبع سوپرفسفات‌تریپل و پتاسیم از منبع پتاسیم سولفات بر اساس نتایج تجزیه خاک و توصیه کودی گیاه ماشک و تریتیکاله به خاک اضافه گردید. پژوهش حاضر به‌صورت دیم اجرا شد.

قبل از اجرای آزمایش و در زمان گاوآه بودن خاک به‌روش تصادفی، نه نمونه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری و به‌فاصله ۲۵ متر از هم و به‌صورت زیگزاگ تهیه شد و بعد از مخلوط‌کردن نمونه‌ها، یک نمونه مرکب تهیه گردید. نتایج ویژگی‌های خاک، قبل از شروع آزمایش در **جدول ۲** ارائه شده است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری
Table 2- The physicochemical properties of the soil at a depth of 0-30 cm

مشخصات Properties	واحد unit	مقدار Value
هدایت الکتریکی EC	$dS.m^{-1}$	0.49
ماسه Sand	%	14.2
شن Silt	%	38.4
رس Clay	%	47.4
ماده آلی Organic mater	%	0.87
آهن قابل دسترس Available Fe	$mg.kg^{-1}$	2.20
نیتروژن N	%	0.08
فسفر قابل دسترس Available P	$mg.kg^{-1}$	12.4
پتاسیم قابل دسترس Available K	$mg.kg^{-1}$	320

(Van et al., 1991) و درصد پروتئین خام علوفه^۲ (CP) با استفاده از دستگاه کج‌دال (Nelson & Sommers, 1996) و همچنین الیاف نامحلول در شوینده خنثی^۳ (NDF) (Van et al., 1991) و الیاف

به‌منظور اندازه‌گیری کیفیت علوفه در مرحله گل‌دهی، با حذف اثر حاشیه، ناحیه‌ای به مساحت ۰/۵ مترمربع از هر کرت برداشت و برای تعیین کیفیت علوفه به آزمایشگاه منتقل و صفات خاکستر علوفه^۱

2- Crude Protein
3- Neutral Detergent Fiber

1- Ash

ارتفاع بوته ماشک و تریتیکاله تحت تأثیر اثرات خاک‌ورزی و کشت مخلوط معنی‌دار شدند. خاک‌ورزی رایج موجب افزایش ارتفاع بوته ماشک نسبت به تیمار خاک‌ورزی کاهش‌یافته (۳/۳۸ درصد) و تیمار بدون خاک‌ورزی (۷/۱۳ درصد) شد. همچنین ارتفاع بوته تریتیکاله در تیمار خاک‌ورزی رایج به‌میزان ۰/۷ و ۵/۸۲ درصد بیشتر از تیمارهای خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی بود. بررسی مقایسه میانگین کشت مخلوط بر ارتفاع بوته نشان داد که کمترین ارتفاع مربوط به تیمار کشت خالص ماشک بود و بیشترین ارتفاع بوته در تیمار کشت خالص تریتیکاله مشاهده شد (جدول ۵).

به نظر می‌رسد که در شرایط خاک‌ورزی رایج، به‌دلیل خاک‌ورزی بیشتر، توسعه ریشه بهتر صورت گرفته است و با توجه به عدم محدودیت در مصرف آب و عناصر غذایی دیگر، ارتفاع بوته نسبت به سایر سیستم‌ها بالاتر بوده است (Ren et al., 2018). در پژوهشی که اثر انواع مختلف خاک‌ورزی بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی ماشک گل سفید مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج نشان داد که کمترین ارتفاع در کشت مرسوم به دست آمد. این پژوهشگران عنوان کردند که گیاهان کاشته‌شده به‌روشنی کم‌خاک‌ورزی ارتفاع بیشتری داشتند و دلیل این امر توزیع نامتناسب بارندگی در سال اجرای آزمایش عنوان گردید که کمبود آب موجب کاهش کلروفیل و کارایی فتوسیستم دو در تیمارهای کشت رایج شده است (Elyasi et al., 2024). نتایج پژوهشی که الگوهای مختلف کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای در سطوح مختلف خاک‌ورزی را مورد بررسی قرار داده بود نشان داد که بالاترین ارتفاع بوته مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود. همچنین بالاترین ارتفاع بوته در کشت خالص سورگوم و کمترین ارتفاع بوته در تیمار کشت خالص ذرت مشاهده شد (Farrahi et al., 2023). نتایج پژوهشی که با هدف ارزیابی تولید در کشت مخلوط چای ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.) و لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) در سری جایگزینی انجام گردید، نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته لوبیا چشم‌بلبلی در تیمار کشت خالص و کمترین ارتفاع مربوط به تیمار کشت مخلوط ۲۵ درصد لوبیا چشم‌بلبلی + ۷۵ درصد چای ترش بود و ارتفاع بوته در کشت خالص لوبیا چشم‌بلبلی نسبت به نظام‌های جایگزینی بیشتر بود (Heydari et al., 2019).

نامحلول در شوینده اسیدی^۱ (ADF) (AOAC, 2005) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته‌های ماشک و تریتیکاله از هر کرت ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب، اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها گزارش گردید. برای اندازه‌گیری ماده خشک علوفه، در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک با حذف اثر حاشیه، ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب و پس از خشک کردن در آون با دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت توزین گردید.

از آنجایی‌که اندازه‌گیری‌ها روی هر یک از گیاهان تریتیکاله و ماشک به‌صورت جداگانه صورت گرفته، تعداد سطوح عامل دوم پنج شده، چراکه سطح کشت خالص تریتیکاله برای صفات ماشک و بالعکس کشت خالص ماشک برای صفات تریتیکاله حذف شدند. قبل از تجزیه داده‌ها، آزمون نرمال بودن آن‌ها به‌وسیله نرم افزارهای آماری انجام شد. پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (9.4) و مقایسه میانگین تیمارها توسط آزمون LSD 5% انجام گردید. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2020 صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که الیاف نامحلول در شوینده اسیدی ماشک و ارتفاع بوته ماشک تحت تأثیر اثر ساده خاک‌ورزی و کشت مخلوط معنی‌دار شدند، اما تحت تأثیر اثر متقابل خاک‌ورزی × کشت مخلوط معنی‌دار نبودند. خاکستر علوفه ماشک تنها تحت تأثیر اثر ساده کشت مخلوط معنی‌دار بود. الیاف نامحلول در شوینده خنثی و پروتئین خام علوفه ماشک تحت تأثیر اثرات ساده و اثر متقابل خاک‌ورزی و کشت مخلوط معنی‌دار بودند (جدول ۳). خاکستر، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و پروتئین خام علوفه و ارتفاع بوته تریتیکاله تحت تأثیر اثر ساده خاک‌ورزی و کشت مخلوط معنی‌دار گردید. الیاف نامحلول در شوینده خنثی تریتیکاله تحت تأثیر اثر متقابل خاک‌ورزی و کشت مخلوط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴).

ارتفاع بوته

نتایج مقایسه میانگین داده‌های آزمایش (جدول ۵) نشان داد که

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر کیفیت علوفه ماشک

Table 3- Variance analysis (mean squares) of the effect of tillage and intercropping on the quality of vetch forage

ارتفاع بوته Plant height	ماده خشک کل Total dry matter (TDM)	خاکستر Ash	پروتئین خام Crude protein (CP)	الیاف نامحلول در شوینده خنثی Neutral detergent fiber (NDF)	الیاف نامحلول در شوینده اسیدی Acid detergent fiber (ADF)	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V.
10.13	1401.48	0.29	5.06	5.41	87.71	2	بلوک Block
25.08*	108.71 ^{ns}	0.62 ^{ns}	89.97**	70.32**	382.75**	2	خاک‌ورزی Tillage (T)
1.04	764.04	1.52	5.11	5.31	11.86	4	خطا (۱) Error (1)
33.29**	1154.49 ^{ns}	18.13**	520.18**	540.45**	428.15**	4	کشت مخلوط Intercropping (I)
6.94 ^{ns}	988.56 ^{ns}	0.79 ^{ns}	21.06**	18.61**	79.23 ^{ns}	8	T×I
6.83	3383.62	1.12	4.04	3.91	45.85	24	خطا (۲) Error (2)
6.99	9.61	10.67	4.19	4.27	16.37	-	ضریب تغییرات CV (%)

^{ns}: غیرمعنی‌دار، * و **: به ترتیب معنی‌دار سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.^{ns}: non-significant, * and **: significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر کیفیت علوفه تریتیکاله

Table 4- Variance analysis (mean squares) of the effect of tillage and intercropping on the quality of triticale forage

ارتفاع بوته Plant height	ماده خشک کل Total dry matter (TDM)	خاکستر Ash	پروتئین خام Crude protein (CP)	الیاف نامحلول در شوینده خنثی Neutral detergent fiber (NDF)	الیاف نامحلول در شوینده اسیدی Acid detergent fiber (ADF)	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V.
9.41	17760.54	0.35	18.73	6.04	87.86	2	بلوک Block
76.82**	34.38 ^{ns}	0.48 ^{ns}	5.61 ^{ns}	41.98**	328.41**	2	خاک‌ورزی Tillage (T)
30.22	12424.34	1.55	6.04	5.21	11.81	4	خطا (۱) Error (1)
21.81**	8257.98 ^{ns}	18.97**	127.77**	564.91**	427.16**	4	کشت مخلوط Intercropping (I)
19.54 ^{ns}	8428.54 ^{ns}	0.64 ^{ns}	4.11 ^{ns}	17.37**	79.51 ^{ns}	8	T×I
13.27	8214.62	1.14	9.05	3.81	45.85	24	خطا (۲) Error (2)
4.89	25.19	12.56	27.52	4.35	17.04	-	ضریب تغییرات CV (%)

^{ns}: غیرمعنی‌دار، * و **: به ترتیب معنی‌دار سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.^{ns}: non-significant, *: significant at $p \leq 0.05$, **: significant at $p \leq 0.01$, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر ارتفاع بوته و الیاف نامحلول در شوینده اسیدی علوفه ماشک و تریتیکاله

Table 5- Mean comparison of the effect of different levels of tillage and intercropping on the plant height and acid detergent fiber (ADF) of vetch and triticale forage

تیمارها Treatments	سطوح Levels	الیاف نامحلول در شوینده اسیدی ADF (%)		ارتفاع بوته Plant height (cm)	
		ماشک Vetch	تریتیکاله Triticale	ماشک Vetch	تریتیکاله Triticale
خاک‌ورزی Tillage	خاک‌ورزی رایج Conventional tillage	47.15	45.09	38.76	76
	کم‌خاک‌ورزی Reduced tillage	37.93	37.61	37.25	75.43
	بدون خاک‌ورزی No tillage	38.59	36.95	36.18	71.82
	LSD 5%	5.10	5.11	1.97	2.74
کشت مخلوط Intercropping	I1	30.82	47.22	35.66	72.89
	I2	45.89	39.82	36.41	73.96
	I3	41.44	44.27	36.04	73.11
	I4	39.74	38.12	39.99	76.08
	I5	48.83	29.21	38.88	76.04
	LSD 5%	5.88	6.18	2.54	3.54

I1: کشت خالص، I2: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I3: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک،

ماشک، I4: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I5: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.

I1: Pure cropping, I2: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I3: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I4: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I5: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.

الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF)

بیشترین مقدار الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در گیاه ماشک و تریتیکاله مربوط به تیمار خاک‌ورزی رایج بود. مقادیر این صفت در تیمار خاک‌ورزی کاهش‌یافته و تیمار بدون خاک‌ورزی در سطح مشابه آماری قرار داشتند (جدول ۵). بررسی نتایج مقایسه میانگین اثر کشت مخلوط بر درصد الیاف نامحلول در شوینده اسیدی حاکی از این بود که کمترین مقدار این صفت در تیمار کشت خالص ماشک و بیشترین آن در تیمار کشت خالص تریتیکاله به دست آمد. کشت مخلوط موجب افزایش درصد الیاف نامحلول در شوینده اسیدی گردید (جدول ۵). به‌طور کلی، دو بخش ساختمانی و دیواره سلولی گیاهان از سلولز، همی‌سلولز و لیگنین تشکیل شده است که محتوای سلولی شامل هیدرات‌های کربن با زنجیره ساختمانی کوتاه و ترکیبات پروتئین و اسیدهای آلی را در بر می‌گیرد (Arzani et al., 2013). کیفیت علوفه با لیگنینی شدن و افزایش دیواره سلولی بدون همی‌سلولز (الیاف نامحلول در شوینده اسیدی) کاهش می‌یابد. با افزایش الیاف نامحلول در شوینده اسیدی از قابلیت هضم علوفه توسط دام کاسته می‌شود

(Çerit & Güllap, 2021). علاوه بر این، با کاهش الیاف نامحلول در

شوینده اسیدی شاخص ارزش غذایی نسبی افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث بهبود کیفیت مواد غذایی می‌شود (Javanmard et al., 2019). در خاک‌ورزی مرسوم به دلیل سست شدن خاک سطحی، بهبود تهویه خاک، آزاد شدن عناصر از ماده آلی خاک طی فرآیند معدنی شدن و فقدان لایه سخت در خاک زیرسطحی، ارتقای زهکشی و رشد ریشه، رشد گیاه افزایش یافته و افزایش ماده خشک سبب می‌شود که گیاه فرصت بیشتری جهت انباشت الیاف سلولزی و نامحلول داشته باشد (Idowu et al., 2019). نتایج پژوهش الیاسی و همکاران (Elyasi et al., 2024) نشان داد که خاک‌ورزی رایج باعث افزایش معنی‌دار درصد الیاف نامحلول در شوینده اسیدی علوفه ماشک سفید گردید. این پژوهشگران عنوان کردند که وجود بقایای گیاهی در خاک‌ورزی حفاظتی موجب کند شدن روند معدنی شدن نیتروژن آلی می‌شود که متعاقب آن، نیاز گیاه به این عنصر در طول دوره رشد تأمین نمی‌شود. از سوی دیگر، نیتروژن قابل استفاده گیاه با سرعت توسط ریزجانداران از دسترس خارج می‌شود، در نتیجه گیاه

فرصت کافی جهت انباشت الیاف سلولزی و نامحلول ندارد. افزایش درصد الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در کشت مخلوط گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) و گاودانه (*Vicia ervilia* L.) در مقایسه با کشت خالص نیز گزارش شده است (Najafabadi et al., 2017). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که اثر الگوهای کشت بر درصد الیاف نامحلول در شوینده اسیدی معنی‌دار بود، به‌نحوی که بیشترین میزان الیاف نامحلول در شوینده اسیدی در تیمار کشت خالص تربیتیکاله و کمترین مقدار آن در تیمار کشت خالص ماشک مراغه‌ای حاصل شد (Shahbazi et al., 2022).

الیاف نامحلول در شوینده خنثی

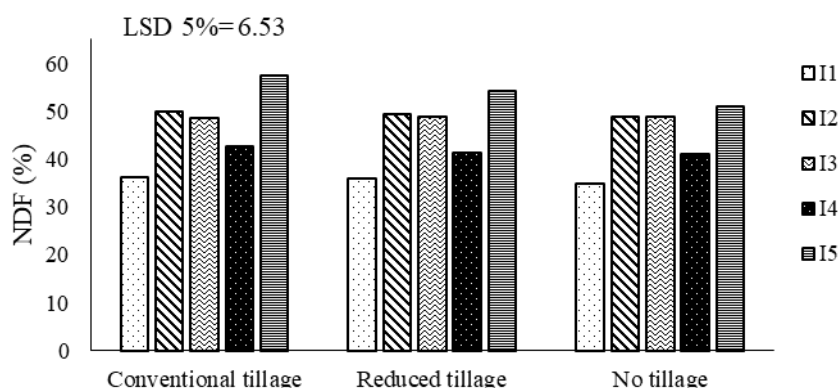
نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش حاکی از این بود که مقادیر الیاف نامحلول در شوینده خنثی علوفه ماشک (جدول ۳) و تربیتیکاله (جدول ۴) تحت تأثیر اثر متقابل خاک‌ورزی × کشت مخلوط در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. الیاف نامحلول در شوینده خنثی علوفه ماشک در سیستم خاک‌ورزی رایج، کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی در تیمار کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تربیتیکاله با ۸۰ درصد ماشک بیشتر بود. بیشترین الیاف نامحلول در شوینده خنثی گیاه تربیتیکاله در کشت خالص مشاهده شد و کمترین درصد الیاف نامحلول در شوینده خنثی در تیمارهای کشت خالص ماشک بود که اختلاف معنی‌داری با کشت خالص ماشک در سیستم خاک‌ورزی کاهش‌یافته نداشت. درصد الیاف نامحلول در شوینده خنثی در تربیتیکاله در سیستم‌های خاک‌ورزی رایج، کاهشی و بدون خاک‌ورزی در تیمار کشت خالص تربیتیکاله بیشتر از سایر نسبت‌های کشت مخلوط بود (شکل‌های ۱ و ۲).

الیاف نامحلول در شوینده خنثی به‌عنوان یکی از عوامل ارزیابی کیفیت علوفه در راستای پیش‌بینی مصرف اختیاری جیره غذایی مورد استفاده قرار گرفته است و این عامل تحت تأثیر شرایط محیطی و بوم‌شناختی مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، الیاف نامحلول در شوینده‌های خنثی به‌عنوان شاخصی برای بیان میزان دیواره سلولی گیاه و نیز عامل مهمی برای تعیین میزان تعلیف دام شناسایی شده است (Arzani et al., 2013). نتایج پژوهشی نشان داد که در تیمار خاک‌ورزی کاهشی و خاک‌ورزی رایج، درصد الیاف نامحلول در شوینده خنثی علوفه به‌طور معنی‌داری بیشتر از سیستم بدون خاک‌ورزی بود (Elyasi et al., 2024). در خاک‌ورزی حفاظتی که در

مراحل آغازین حالت گذار قرار دارد، تراکم خاکدانه‌ها در حالت نامطلوب قرار دارد، و نسبت به خاک‌ورزی رایج ریشه‌های گیاه به‌خوبی توسعه نمی‌یابد و به همین دلیل جذب آب و عناصر غذایی با مشکل مواجه می‌شود و در نتیجه، رشد محدود ریشه منجر به کاهش رشد اندام هوایی گیاه می‌شود و بنابراین مواد فتوسنتزی تبدیل به ترکیبات ساختاری می‌شود و در نهایت، مقدار الیاف نامحلول در شوینده اسیدی کاهش می‌یابد (Li et al., 2023). در نتایج بررسی کیفیت علوفه در کشت مخلوط نخود (*Cicer arietinum* L.) با یولاف (*Avena sativa* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) مشخص شد که کشت خالص نخود دارای پایین‌ترین میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی بود و بالاترین میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی در تیمار کشت خالص جو و یولاف مشاهده شد (Kocer & Albayrac, 2012). نتایج پژوهش‌های دیگر نیز نشان داد که با افزودن نسبت لگوم‌ها، میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی کاهش می‌یابد (Javanmard et al., 2019). در مطالعه‌ای مشخص شد که کشت مخلوط تربیتیکاله با ماشک منجر به کاهش الیاف نامحلول در شوینده اسیدی و خنثی گردید، اما پروتئین خام و ماده خشک علوفه را افزایش داد و در نهایت باعث بهبود کیفیت علوفه گردید (Shahbazi et al., 2022). احتمال می‌رود که در پژوهش حاضر، کاهش میزان ADF و الیاف نامحلول در شوینده خنثی علوفه در شرایط مخلوط با ماشک از بالا بودن سطح برگ و تعداد برگ این گیاهان در شرایط سایه ناشی شده باشد، زیرا گیاهان در محیط‌های برخوردار از سایه جهت افزایش جذب نور، مواد فتوسنتزی بیشتری را به رشد برگ و تعداد برگ اختصاص می‌دهند و بر اثر افزایش نسبت برگ به ساقه، میزان ADF و الیاف نامحلول در شوینده خنثی کاهش می‌یابد (Shahbazi et al., 2022).

پروتئین خام علوفه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها حاکی از این بود که پروتئین خام علوفه ماشک در تیمار کشت خالص ماشک بیشتر از کشت مخلوط بود. همچنین کاهش و عدم انجام خاک‌ورزی موجب افزایش پروتئین خام علوفه گردید (شکل ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر کشت مخلوط بر پروتئین خام علوفه تربیتیکاله نیز نشان داد که افزودن ماشک در تیمارهای کشت مخلوط باعث افزایش پروتئین خام تربیتیکاله گردید (شکل ۴).

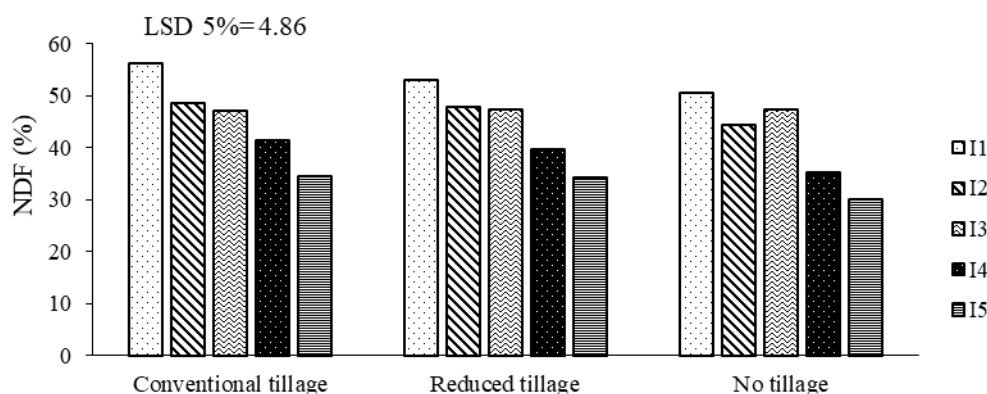


شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر الباف نامحلول در شوینده خشی (NDF) ماشک

Fig. 1- Mean comparison for the interaction of tillage and intercropping on neutral detergent fiber (NDF) of vetch

I1: کشت خالص، I2: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I3: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک، I4: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I5: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.

I1: Pure cropping, I2: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I3: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I4: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I5: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر الباف نامحلول در شوینده خشی (NDF) تریتیکاله

Fig. 2- Mean comparison for the interaction of tillage and intercropping on neutral detergent fiber (NDF) of triticale

I1: کشت خالص، I2: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I3: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک، I4: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I5: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.

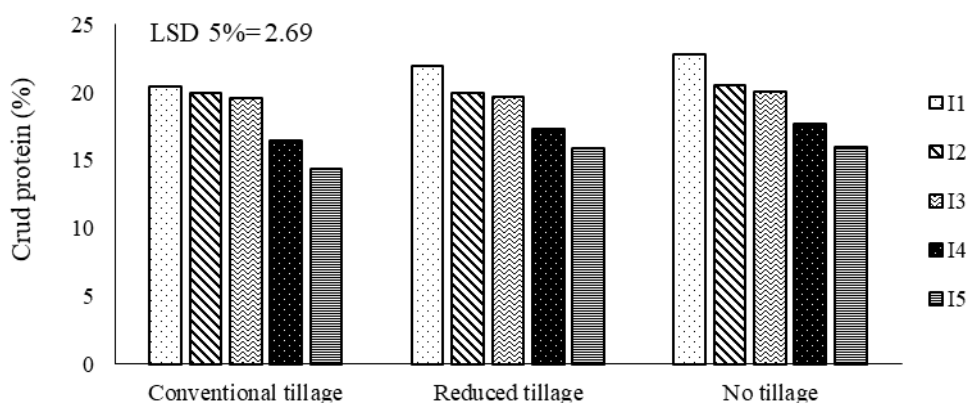
I1: Pure cropping, I2: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I3: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I4: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I5: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.

(Lanyasunya et al., 2007). نتایج تحقیقات نشان داده است که در صورتی که گیاه در طول دوره رشد خود به مقدار کافی نیتروژن در اختیار داشته باشد، پروتئین علوفه افزایش می‌یابد. زمانی که این مقدار نیتروژن کمتر از مقدار مورد نیاز گیاه باشد، تنها عملکرد افزایش یافته بدون اینکه تغییر محسوسی در میزان پروتئین به وجود آید (Greene et al., 1987). در تیمار خاک‌ورزی مرسوم با توجه به آبشویی نیترات و کاهش قابلیت دسترسی ریشه به نیتروژن کاهش یافته و در نتیجه

پروتئین، نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی ایفا می‌کند، به طوری که فعالیت مناسب باکتری‌های مسئول هضم علوفه در دستگاه گوارشی دام‌ها به محتوی پروتئینی علوفه بستگی دارد. به صورت کلی، بقولات از نظر میزان پروتئین و گندمیان از نظر میزان کربوهیدرات‌ها غنی می‌باشد. پایین بودن میزان پروتئین علوفه غلات و نیاز دام به غذای مکمل و با ارزش، اهمیت کشت مخلوط غلات و بقولات را در تأمین پروتئین و علوفه کافی و با کیفیت بالا نشان می‌دهد

علوفه‌ای یک‌ساله و جو انجام شد، نتایج نشان داد که نسبت ۳:۱ نخود علوفه‌ای به جو، بیشترین مقدار پروتئین خام را داشت (Lamei, 2013). در پژوهش دیگری گزارش شد که کمترین درصد پروتئین در تیمار خالص ذرت و بیشترین آن در تیمار خالص لوبیا چشم‌بلبلی بود (Sharif Nejad et al., 2018). سیستم کشت مخلوط می‌تواند تثبیت نیتروژن توسط لگوم‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. تفاوت در عمق توسعه ریشه، میزان توسعه جانبی و تراکم ریشه عواملی هستند که میزان رقابت اجزای کشت مخلوط را برای جذب عناصر تحت تأثیر قرار می‌دهند. غلات عموماً ارتفاع بیشتری در مقایسه با لگوم‌ها دارند و نسبت به آن‌ها رشد سریع‌تر و تراکم ریشه بیشتری دارند که باعث می‌شود در مقایسه با لگوم‌ها، قدرت رقابت بیشتری برای جذب عناصر غذایی نظیر نیتروژن داشته باشند (Lamei, 2013). از آنجایی که تراکم کشت تریتیکاله در الگوهای مختلف کشت مخلوط کمتر از کشت خالص آن است، به نظر می‌رسد که در کشت مخلوط برای بوته‌های تریتیکاله نیتروژن بیشتری فراهم بوده که این امر موجب افزایش محتوای نیتروژن در بافت‌های تریتیکاله و در نتیجه افزایش پروتئین خام علوفه شده است.

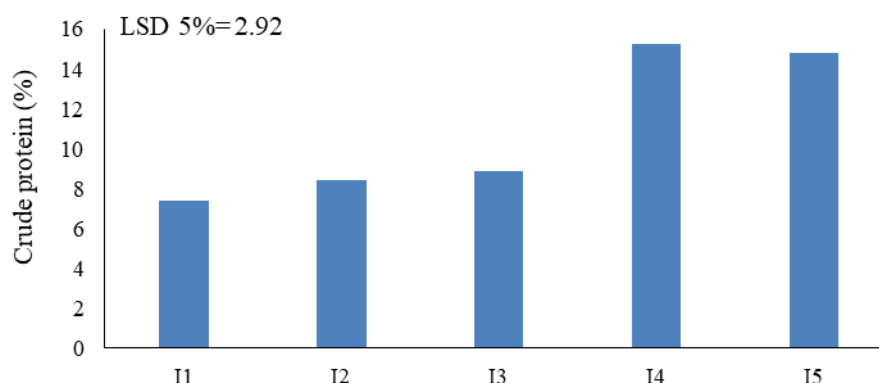
مقدار پروتئین خام علوفه نیز کاهش یافته است. از سوی دیگر، در سیستم‌های خاک‌ورزی کاهشی و بدون خاک‌ورزی با بقایای گیاهی برخورد از نسبت کربن به نیتروژن بالا، ممکن است تجزیه بقایا توسط ریزجانداران به‌کندی انجام شود و نیتروژن خاک در مراحل اولیه رشد تا حدودی از دسترس گیاه خارج گردد، ولی در پایان فرآیند تجزیه، نیتروژن کافی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد (Idowu et al., 2019). به نظر می‌رسد که قدرت تثبیت‌کنندگی نیتروژن در گیاه ماشک سبب شده است که میزان پروتئین خام علوفه در سیستم‌های خاک‌ورزی متفاوت روند مشابهی را طی کند. در تیمارهای بدون خاک‌ورزی، رطوبت خاک و غلظت عناصر غذایی می‌یابد و در نتیجه کلروفیل تولیدشده در اندام هوایی افزایش می‌یابد و متعاقب آن فتوسنتز بهبود یافته و گیاهان، پروتئین بیشتری تولید می‌کنند (Baum et al., 2015). افزایش پروتئین خام علوفه در تیمار بدون خاک‌ورزی در گیاه ماشک سفید نیز گزارش شده است (Elyasi et al., 2024). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که افزودن لگوم به کشت مخلوط باعث افزایش پروتئین خام گردید (Nakhzari, 2017). در پژوهش دیگری که کشت بقولات



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر پروتئین خام (CP) ماشک

Fig. 3- Mean comparison for the interaction of tillage and intercropping on crude protein (CP) of vetch

I1: کشت خالص، I2: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I3: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک، I4: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I5: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.
I1: Pure cropping, I2: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I3: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I4: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I5: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر کشت مخلوط بر پروتئین خام (CP) علوفه تریتیکاله

Fig. 4- Mean comparison for the effect of intercropping on crude protein (CP) of triticale forage

I₁: کشت خالص، I₂: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I₃: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک، I₄: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I₅: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.

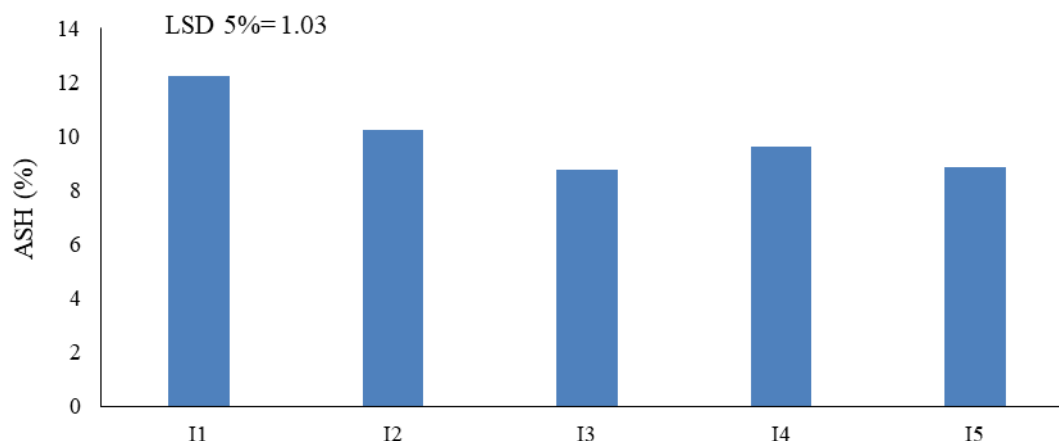
I₁: Pure cropping, I₂: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I₃: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I₄: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I₅: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.

خاکستر علوفه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین خاکستر علوفه در تیمار کشت خالص ماشک مشاهده شد که نسبت به تیمارهای کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک (I₂)، کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک (I₃)، کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک (I₄) و کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک (I₅) به ترتیب ۱۹/۴، ۳۹، ۶ و ۳۸ درصد افزایش داشت (شکل ۵). کمترین خاکستر علوفه مربوط به تیمار کشت خالص تریتیکاله بود. افزایش نسبت ماشک به تریتیکاله موجب افزایش خاکستر علوفه تریتیکاله گردید (شکل ۶).

محتوای خاکستر علوفه از مواد کانی تشکیل شده است. مواد کانی، نقش مهمی در ساخت ویتامین‌ها، فعالیت آنزیم‌ها، تولید هورمون‌ها، ساخت بافت و بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک وابسته به رشد دارند (Greene et al., 1987). افزایش خاکستر می‌تواند به دلیل بهبود جذب عناصر غذایی در کشتهای مخلوط نسبت به کشت خالص تریتیکاله باشد. درصد خاکستر علوفه دلالت بر حضور مواد معدنی در بافت‌های گیاهی دارد، بنابراین هرچه مقدار آن بیشتر باشد، مواد معدنی بیشتری در اختیار دام قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود

که با افزایش حجم بافت‌های گیاهی، درصد خاکستر نیز افزایش یابد (Dareini et al., 2018)، بنابراین گیاه تریتیکاله به دلیل نیاز بالاتر، بخش بیشتری از منابع را به خود اختصاص داده است. خاکستر، انواع مواد معدنی و املاح مورد نیاز دام از جمله عناصر کم‌مصرف و پرمصرف را تأمین می‌کند. این مواد جهت فعالیت‌های متابولیکی و سلامت دام لازم است (Shahbazi et al., 2022). نتایج پژوهشی نشان داد که بالاترین میزان خاکستر در تیمار کشت خالص سسبانا (*Sesbania sesban* L. Merr.) و کمترین مقدار آن در کشت مخلوط ذرت مشاهده شد (Dareini et al., 2018)، این پژوهشگران بیان کردند که محتوای خاکستر علوفه با افزایش نسبت سببانا در کشت مخلوط افزایش یافت. در نتایج پژوهش دیگری گزارش شد که بیشترین خاکستر علوفه در تیمار کشت خالص نخودفرنگی و کمترین درصد خاکستر در تیمار کشت خالص جو به دست آمد (Nakhzari Moghaddam, 2017). در پژوهش دیگری، بیشترین میزان خاکستر علوفه در تیمار کشت خالص لوبیا چشم بلبلی و کمترین آن در تیمار کشت خالص ذرت مشاهده شد و با افزایش درصد لوبیا چشم بلبلی در نسبت‌های کاشت میزان خاکستر علوفه افزایش یافت (Sharifi Nejad et al., 2018).

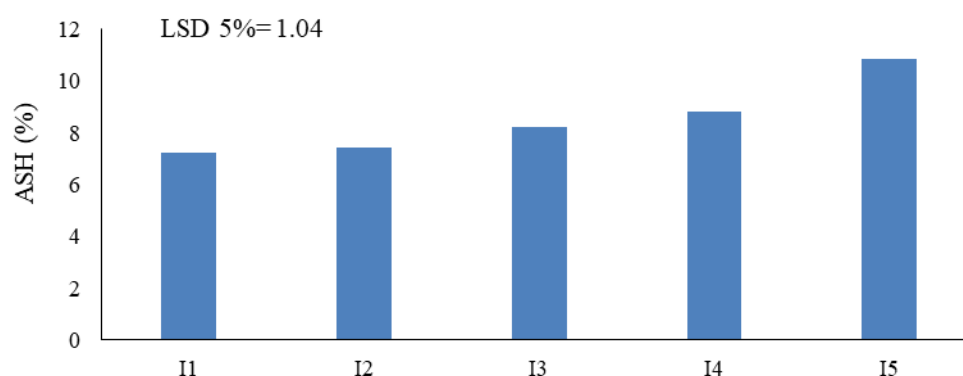


شکل ۵- مقایسه میانگین اثر کشت مخلوط بر خاکستر (ASH) علوفه ماشک

Fig. 5- Mean comparison for the effect of intercropping on vetch forage ash

I₁: کشت خالص، I₂: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I₃: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک، I₄: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I₅: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.

I₁: Pure cropping, I₂: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I₃: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I₄: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I₅: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر کشت مخلوط بر خاکستر (ASH) علوفه تریتیکاله

Fig. 6- Mean comparison for the effect of intercropping on triticale forage ash

I₁: کشت خالص، I₂: کشت مخلوط جایگزینی ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک، I₃: کشت مخلوط جایگزینی ۶۰ درصد تریتیکاله با ۴۰ درصد ماشک، I₄: کشت مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد تریتیکاله با ۶۰ درصد ماشک و I₅: کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک.

I₁: Pure cropping, I₂: mixed cropping of 80% triticale with 20% vetch, I₃: mixed cropping of 60% triticale with 40% vetch, I₄: mixed cropping of 40% triticale with 60% vetch, and I₅: mixed cropping of 20% triticale with 80% vetch.

ماده خشک علوفه

ماده خشک علوفه تحت تأثیر هیچ‌کدام از تیمارهای آزمایشی قرار نگرفت (جداول ۳ و ۴). نتایج پژوهشی که در آن تأثیر الگوهای کشت مخلوط بر علوفه گاودانه و گلرنگ مورد بررسی قرار گرفت، نشان داد که ماده خشک علوفه گلرنگ تحت تأثیر الگوهای کشت قرار نگرفت، اما ماده خشک علوفه گاودانه در کشت خالص بیشتر از تیمارهای کشت مخلوط بود (Najafabadi et al., 2017). همچنین نتایج

پژوهش دیگری نشان داد که ماده خشک علوفه در کشت مخلوط ماشک علوفه‌ای - جو خرم در سال اول آزمایش تحت تأثیر الگوهای کشت مخلوط معنی‌دار نگردید (Heydarpour et al., 2018). نتایج پژوهشی که در آن عملکرد علوفه ماشک تحت سیستم کشت حفاظتی و مرسوم مورد بررسی قرار گرفت، نشان داد که اختلاف معنی‌داری در ماده خشک علوفه تحت تیمار کشت حفاظتی و کشت مرسوم مشاهده نشد. این پژوهشگران، دلیل عدم تفاوت معنی‌دار را به

بارندگی کافی در سال اجرای پژوهش نسبت دادند که در کشت مرسوم نیز گیاه در طول دوره رشد به مقدار کافی آب در اختیار داشته است (Heydarpour et al., 2018). در پژوهش دیگری که اثر روش‌های خاک‌ورزی بر عملکرد و کیفیت علوفه سورگوم علوفه‌ای انجام شد، نتایج نشان داد که ماده خشک علوفه سورگوم تحت تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی معنی‌دار نشد، این پژوهشگران بیان کردند که اگرچه بین روش‌های خاک‌ورزی از لحاظ عملکرد علوفه خشک و بیشتر صفات کیفی علوفه اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، اما افزایش مواد آلی خاک، صرفه‌جویی در زمان، کاهش آسیب به ساختمان خاک و در نهایت کاهش هزینه‌های تولید در جهت افزایش سود خالص برای زارعین در سیستم‌های بدون خاک‌ورزی و خاک‌ورزی کاهش‌یافته غیرقابل انکار است (Zeinvand et al., 2023). از سوی دیگر، نتایج برخی پژوهش‌ها، اثر مثبت سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی را بر افزایش ماده خشک علوفه نشان داده‌اند (Ghasemi et al., 2018) ولی به نظر می‌رسد که در پژوهش حاضر با توجه به اجرای یک‌ساله سیستم‌های خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی، تراکم بالای خاک ناشی از عدم انجام خاک‌ورزی باعث ایجاد محدودیت در رشد ریشه شده و در نتیجه جذب عناصر غذایی از خاک کاهش یافته و متعاقب آن ماده خشک علوفه در تیمارهای مذکور افزایش نیافته است (Hu et al., 2020).

نسبت برابری زمین

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر کشت مخلوط و خاک‌ورزی بر نسبت برابری زمین نشان داد که نسبت برابری زمین تحت تأثیر الگوهای کشت مخلوط در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، اما تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی و اثر متقابل خاک‌ورزی و کشت مخلوط معنی‌دار قرار نگرفت (جدول ۶). بیشترین نسبت برابری زمین کل (۱/۲۶) در تیمار کشت مخلوط جایگزینی با نسبت ۸۰ درصد تریتیکاله با ۲۰ درصد ماشک مشاهده شد (جدول ۷). اختلاف در ساختار ریخت‌شناختی گیاهان گندمیان و لگوم‌ها ناشی از داشتن ارتفاع بوته متفاوت و بهره‌برداری مکملی از منابع، می‌تواند منجر به افزایش نسبت برابری زمین بیشتر از یک شود (Xiao et al., 2018). علاوه بر این، یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهند که برتری بوم‌شناختی کشت مخلوط، نتیجه بهره‌وری بهتر از منابع رشد است. اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط ممکن است که در نحوه استفاده از منابع غذایی تفاوت داشته باشند و در صورت کاشت همزمان، بهره‌وری بهتری نسبت به کشت جداگانه خواهند داشت. به‌طور کلی، مزیت بیولوژیکی کشت مخلوط در مقایسه با کشت خالص زمانی است که رقابت بین گونه‌ها برای منابع غذایی نسبت به رقابت درون گونه‌ای کمتر باشد.

جدول ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر خاک‌ورزی و کشت مخلوط بر نسبت برابری زمین

Table 6- Variance analysis (mean squares) of the effect of tillage and intercropping on land equivalent ratio

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	نسبت برابری زمین جزئی تریتیکاله Partial land equivalent ratio of triticale	نسبت برابری زمین جزئی ماشک Partial land equivalent ratio of vetch	نسبت برابری کل Total land equivalent ratio
بلوک Block	2	0.01	0.01	0.01
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	0.002 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.001 ^{ns}
خطا (۱) Error (1)	4	0.002	0.001	0.005
کشت مخلوط Intercropping (I)	3	0.32 ^{**}	0.16 ^{**}	0.29 ^{**}
T×I	6	0.0005 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.001 ^{ns}
خطا (۲) Error (2)	18	0.002	0.002	0.005
ضریب تغییرات CV (%)	—	7.38	9.21	6.01

^{ns}: غیر معنی‌دار، * و **: به ترتیب معنی‌دار سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

^{ns}: non-significant, * and **: significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین شاخص نسبت برابری زمین تیمارهای کشت مخلوط در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی
 Table 7- Mean comparison for land equivalent ratio index in intercropping treatments under different tillage systems

نسبت برابری کل Total land equivalent ratio	نسبت برابری زمین جزئی ماشک Partial land equivalent ratio of vetch	نسبت برابری زمین جزئی تریتیکاله Partial land equivalent ratio of triticale	سطوح کشت مخلوط Intercropping levels
1.25	0.38	0.86	تریتیکاله ۸۰٪ + ماشک ۲۰٪ Triticale 80% + vetch 20%
1.19	0.43	0.76	تریتیکاله ۶۰٪ + ماشک ۴۰٪ Triticale 60% + vetch 40%
1.15	0.54	0.61	تریتیکاله ۴۰٪ + ماشک ۶۰٪ Triticale 40% + vetch 60%
1.12	0.69	0.42	تریتیکاله ۲۰٪ + ماشک ۸۰٪ Triticale 20% + vetch 80%
0.070	0.046	0.051	LSD 5%

در صورتی که رقابت بین گونه‌ها کم باشد، کشت مخلوط نسبت به کشت خالص ارجحیت دارد (Metwally et al., 2015). علاوه بر این، افزایش نسبت برابری زمین را می‌توان به تفاوت‌های ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی بین گونه‌ها، نقش گیاه لگوم در تثبیت نیتروژن در خاک، و بهبود شرایط محیطی برای اجزای دیگر مخلوط نسبت داد. همچنین این عوامل منجر به بهره‌برداری بهتر از منابع محیطی، افزایش کارایی مصرف نور و کاهش رقابت بین گونه‌ها و سبب کاهش رشد علف‌های هرز می‌گردد (Fateh et al., 2018). سایر تحقیقات نیز گزارش کرده‌اند که کشت مخلوط نسبت به کشت خالص منجر به افزایش نسبت برابری زمین می‌شود (Ashoori et al., 2021; Farahdahr, 2020).

نتیجه‌گیری

بررسی اثر سیستم‌های خاک‌ورزی و الگوهای کشت مخلوط بر کیفیت علوفه ماشک و تریتیکاله نشان داد که نسبت‌های کشت مخلوط موجب بهبود کیفیت علوفه گردید. علاوه بر این، در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی، کیفیت علوفه بالاتر بود. بیشترین الیاف نامحلول در شوینده خنثی ماشک در سیستم خاک‌ورزی رایج در تیمار کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک مشاهده

شد. همچنین در تیمارهای خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی نیز درصد الیاف نامحلول در شوینده خنثی در تیمار کشت مخلوط جایگزینی ۲۰ درصد تریتیکاله با ۸۰ درصد ماشک بیشتر بود. در سیستم خاک‌ورزی رایج، بیشترین درصد الیاف نامحلول در شوینده خنثی در تیمار کشت خالص تریتیکاله مشاهده شد. در سیستم‌های بدون خاک‌ورزی و خاک‌ورزی کاهشی، پروتئین خام علوفه در تیمار کشت خالص ماشک بیشتر از تیمارهای کشت مخلوط بود. کمترین خاکستر علوفه در تیمار کشت خالص تریتیکاله مشاهده شد. کمترین ارتفاع مربوط به تیمار کشت خالص ماشک و بیشترین ارتفاع بوته مربوط به تیمار کشت خالص تریتیکاله بود. به‌طور کلی، بهره‌برداری از سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی و کشت مخلوط، علاوه بر بهبود کیفیت علوفه و افزایش نسبت برابری زمین، نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و پایداری نظام‌های زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان اظهار داشت که کاربرد روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و بدون خاک‌ورزی به‌ویژه در شرایط دیم سبب تغییرات مثبت کیفیت علوفه در گیاه ماشک و تریتیکاله می‌شود. علاوه بر این، افزایش تنوع زیستی از طریق انجام کشت مخلوط می‌تواند موجب پایداری بیشتر بوم‌نظام کشاورزی گردد.

References

- Ahmadi, H., Mirseyed Hosseini, H., Moshiri, F., Alikhani, H.A., & Etesami, H. (2024). Impact of varied tillage practices and phosphorus fertilization regimes on wheat yield and grain quality parameters in a five-year corn-wheat rotation system. *Scientific Reports*, 14(1), 14717. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65784-w>
- Akinola, F.F., Fasinmirin, J.T., Olanrewaju, O.O., Ewulo, B.S., & Olorunfemi, I.E. (2023). Changes in soil physical and mechanical properties under different tillage and cropping systems in alfisol soil of southwestern Nigeria. *Farming Systems*, 1(3), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100050>
- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International. 18th Edition, AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Arzani, H., Motamedi (Torkan), J., Yari, R., Ghasemi Aryan, Y., & Khatir Nameni, J. (2013). Forage quality of important range species in Pashaylogh-e-Maravetapeh rangeland ecosystem in Golestan province. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 1(1), 87-103. (In Persian with English abstract).
- Ashoori, N., Abdi, M., Golzardi, F., Ajali, J., & Ilkaee, M.N. (2021). Forage potential of sorghum-clover intercropping systems in semi-arid conditions. *Bragantia*, 80, e1421. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200423>
- Audenaert, K., Troch, V., Landschoot, S., & Haesaert, G. (2014). Biotic stresses in the anthropogenic hybrid triticale (*Triticosecale Wittmack*): Current knowledge and breeding challenges. *European Journal of Plant Pathology*, 140, 615-630. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0498-2>
- Badakhshan, S., Amiri-Nejad, M., Tohidi-Nejad, E., & Parsa Motlagh, B. (2021). Evaluation of yield and quality forage in intercropping Tepary bean (*Phaseolus acutifolus* L. Gray) and millet cultivars. *Journal of Agroecology*, 13(2), 291-305. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v13i2.83847>
- Barnes, E., Amit, J.J., Stevan, Z.K., Peter, H.S., & John, L.L. (2019). Soybean and common ragweed growth in monoculture and mixture. *Weed Technology*, 33(3), 481-489. DOI: <https://doi.org/10.1017/wet.2018.119>
- Baum, C., El-Tohamy, W., & Gruda, N. (2015). Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using mycorrhizal fungi. A review. *Scientia Horticulturae*, 187, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.002>
- Çerit, N., & Güllap, M.K. (2021). The effects of nitrogen and vermicomposts applied in different dosages and combinations on the triticale silage (*X Triticosecale* Wittm.) quality. *Turkish Journal of Range and Forage Science*, 2(1), 8-15. <https://doi.org/10.51801/turkjrf.894198>
- Chen, H., Daic, Z., Allison, M., Zheng, J., Xuc, J., & Schadt, W. (2020). Global meta-analyses show that conservation tillage practices promote soil fungal and bacterial biomass. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 293(1), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106841>
- Dahmardeh, M., Ghanbari, A., Syasar, B., & Ramroudi, M. (2013). Effect of intercropping maize (*Zea mays* L.) with cowpea (*Vigna unguiculata* L.) on green forage yield and quality evaluation. *Asian Journal of Plant Science*, 8(3), 235-239. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.3923/ajps.2009.235.239>
- Dareini, E., Jowkar, M., & Semiromi, T. (2018). Effect of maize (*Zea mays*) and sesbania (*Sesbania sesban* L. Merr.) intercropping on forage yield and quality. *Journal of Agroecology*, 8(2), 68-81. (In Persian with English abstract).
- Elyasi, S.S., Pirzad, A., Jalilian, J., Roohi, E., & Siosemardeh, A. (2024). Effects of tillage types on morpho-physiological characteristics and forage quality of vetch (*Vicia pannonica*) in rainfed condition. *Journal of Agroecology*, 16(1), 19-45. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/agry.2022.76580.1109>
- Farrahi, A., Hoseini, M., Ahmadi, M., & Ghasemi Mobtaker, H. (2023). Investigating the different patterns of forage maize and sorghum intercropping at different tillage levels. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 75-88. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.359147.655003>
- Fateh, E., Tarighi, S., & Aynehband, A. (2018). The effect of different barley (*Hordeum vulgare*) and fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) intercropping planting ratio under nitrogen fertilizer on dry matter quality and quantity. *Crop Production*, 11(1), 23-35. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2018.12601.1982>
- Ghasemi, A., Ghanbari, A., Fakheri, B.A., & Fanaie, H.R. (2018). Effect of different tillage management on maize forage and grain quality and quantity under the influence of different sources of organic and chemical fertilizers. *Journal of Agroecology*, 10(2), 490-503. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jag.v10i2.59988>

18. Green, L.W., Pinchak, W.E. & Heitschmidt, P.K. (1987). Seasonal dynamics of minerals in forages at the Texas Experimental Ranch. *Journal of Range Management*, 40(6), 502-506. <https://doi.org/10.2307/3898868>
19. Heydari, H., Dahmardeh, M., & Khammari, E. (2019). Evaluation of production in intercropped roselle with cowpea as replacement series. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 5(3), 157-167. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.230539.654299>
20. Heydarpour, N., Namdari, A., & Baghbani-Arani, A. (2018). Evaluation of quantitative yield and some physical properties of soil in three years mixed barley (Khorram)-vetch forage (*Vicia sativa*) cropping system under rain-fed conditions. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(4), 1-14. (In Persian with English abstract).
21. Hodiyan, A., Dahmardeh, M., & Khammari, I. (2016). Evaluation of tillage systems on agronomical aspects in roselle-green gram intercropping using the replacement method. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 47(2), 265-276. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2016.58860>
22. Hu, W., Beare, M., Tregurtha, C., Gillespie, R., Lehto, K., Tregurtha, R., Gosden, P., Glasson, S., Dellow, S., & George, M. (2020). Effects of tillage, compaction and nitrogen inputs on crop production and nitrogen losses following simulated forage crop grazing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 289, 106733. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106733>
23. Idowu, O.J., Sultana, S., Darapuneni, M., Beck, L., & Steiner, R. (2019). Short-term conservation tillage effects on corn silage yield and soil quality in an irrigated, arid agroecosystem. *Agronomy*, 9(8), 455-470. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080455>
24. Javanmard, A., Nikdel, H., & Amini Machiani, M. (2019). Evaluation of forage quantity and quality domestic population of hairy vetch (*Vicia villosa* L.), vetch (*Vicia sativa* L.) and Caspian vetch (*Vicia hyrcanica*) under rain-fed condition. *Journal of Science and Sustainable Production*, 29(1), 15-31. (In Persian with English abstract).
25. Kocer, A., & Albayrak, S. (2012). Determination of forage yield and quality of pea (*Pisum sativum* L.) mixtures with oat and barley. *Turkish Journal of Field Crops*, 17(1), 96-99.
26. Lal, B., Rana, K.S., Rana, D.S., Shivay, Y.S., Sharma, Y.S., Meena, B.P. & Gautam, P. (2019). Biomass, yield, quality and moisture use of *Brassica carinata* as influenced by intercropping with chickpea under semiarid tropics. *Journal of Saudi Agriculture Science*, 18(1), 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.001>
27. Lamei, H.J. (2013). Assessment of dry forage and crude protein yields, competition and advantage indices in mixed cropping of annual forage legume crops with barley in rainfed conditions of Zanjan province in Iran. *Seed and Plant Production*, 29(2), 169-183. (In Persian with English abstract).
28. Lanyasunya, T.P., Wang, H.R., Kariuki, S.T., Kuria, D.M., Chek, A.L., & Mukisira, E.A. (2007). Effect of maturity on the mineral content of hairy vetch (*Vicia villosa*). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 7(1), 53-58.
29. Li, Z., Liu, H., Yang, H., & Wang, T. (2023). Effects of deep vertical rotary tillage management methods on soil quality in saline cotton fields in southern Xinjiang. *Agriculture*, 13(10), 1864. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101864>
30. Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., Damalas, C.A., & Vlachostergios, D.O. (2011). Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science*, 5(4), 396-410.
31. Lv, L., Gao, Z., Liao, K., Zhu, Q., & Zhu, J. (2023). Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth. *Soil Tillage Research*, 225, 105527. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105527>
32. Mabudi Bilesuar, H., & Zehtab Salmasi, S. (2017). Evaluation of yield and advantages of corn (*Zea mays* L.) and sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) intercropping. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 27(1), 1-11. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1001.1.24764310.1396.27.1.1.1>
33. Metwally, A.A., Safina, S.A., & Noaman, A.H. (2015). Yield and land equivalent ratio of intercropping maize with Egyptian cotton. *Journal of Agri-Food and Applied Sciences*, 3(4), 85-93.
34. Najafabadi, A., Jalilian, J., & Zardoshti, M. (2017). The effect of intercropping patterns on quantitative and qualitative characteristics of safflower and bitter vetch in high-input and low-input farming systems. *Journal of Crop Improvement*, 19(2), 445-460. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2017.60427>
35. Nakhzari Moghaddam, A. (2017). The evaluation of quantitative and qualitative traits of barley (*Hordeum vulgare*) and pea (*Pisum sativum*) and land equivalent ratio under different planting patterns and nitrogen levels.

- Journal of Crop Production*, 10(1), 39-54. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2017.7775.1576>
36. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. & Sumner, M.E. (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3, SSSA Book Series*, Madison. p. 961-1010.
37. Ren, B., Li, X., Dong, S., Liu, P., Zhao, B., & Zhang, J. (2018). Soil physical properties and maize root growth under different tillage systems in the North China Plain. *The Crop Journal*, 6(6), 669-676. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.05.009>
38. Salah, B.Y., Salma, S.K., Sourour, A., Bilal, S., Jamila, I., & Hichen, B.S. (2019). Effect of different levels of nitrogen fertilization on forage yields and quality of hairy vetch-triticale mixtures. *The Open Agriculture Journal*, 13(9), 90-100. <http://doi.org/10.2174/1874331501913010090>
39. Samuel, F.L., José, C., Daniel, P.B., Carlos, C.M., Jose, A. & Jorge, Á.F. (2020). Tillage and irrigation system effects on soil carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions in a maize monoculture under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 196(1), 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104488>
40. Shahbazi, S., Jalilian, J., Alizadeh, K., & Javanmard, A. (2022). Evaluation of chemical and organic-bio-fertilizer treatments on yield and forage quality of triticale and Maragheh Smooth vetch under sole and intercropping systems in rain-fed condition. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 10(2), 199-226. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/idaj.2022.356297.352>
41. Sharif Nejad, M., Ghanbari, A., & Sirousmehr, A.R. (2018). Evaluation of the ecophysiological aspects and forage quality indices in the intercropping of maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Journal of Agroecology*, 10(1), 267-280. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v10i1.60479>
42. Van Soest, P.J., Robertson, J.B., & Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3596. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
43. Wang, Y., Han, X., Zhao, X., Zhang, Y., Qi, B., & Li, L. (2024). Grain yield and interspecific competition in an oat-common vetch intercropping system at varying sowing density. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1344110. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344110>
44. Wasaya, A., Tahir, M., Ali, H., Hussain, M., Yasir, T.A., Sher, A., & Ijaz, M. (2017). Influence of varying tillage systems and nitrogen application on crop allometry, chlorophyll contents, biomass production and net returns of maize (*Zea mays* L.). *Soil and Tillage Research*, 170, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.02.006>
45. Xiao, J.X., Yin, X.H., Ren, J.B., Zhang, M., Tang, L., & Zheng, Y. (2018). Complementation drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping. *Field Crops Research*, 221, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.009>
46. Zeinvand Lorestani, E., Jahansou, M., Oveisi, M., & Ahmadi, A. (2023). The effects of tillage systems, water stress and nitrogen fertilizer on yield and quality of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(4), 203-218. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2022.330330.654852>



Evaluation of Diversity, Self-sufficiency and Economic Productivity Indicators in Agricultural Systems of Two Villages in Meshginshahr County

Aydin Tobeh¹, Morteza Barmaki^{1*}, Roghayeh Jahdi² and Nasrin Sadat Seyedmohammadi¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(*- Corresponding author's Email: barmakimorteza@gmail.com, m_barmaki@um.ac.ir)

Received: 18-10-2025
Revised: 01-01-2026
Accepted: 05-01-2026
Available Online: 10-05-2026

How to cite this article:

Tobeh, A., Barmaki, M., Jahdi, R., & Seyedmohammadi, N.S. (2026). Evaluation of diversity, self-sufficiency and economic productivity indicators in agricultural systems of two villages in Meshginshahr county. *Journal of Agroecology*, 17(4), 611-627. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/agry.2026.95686.1256>

Introduction

The escalating demand for food, driven by global population growth, poses a significant threat to environmental sustainability. Conventional monoculture agricultural systems, while often profitable in the short term, are increasingly recognized as major contributors to soil degradation, biodiversity loss, and heightened vulnerability to climate change and economic fluctuations. In response, integrated agricultural systems, such as agroforestry, which synergistically combine crops, livestock, poultry, and trees, have emerged as a promising pathway toward sustainable intensification. These systems are theorized to enhance ecological resilience through increased biodiversity, improve soil health, and offer greater economic stability by diversifying income sources and reducing dependency on external inputs. This study was therefore designed to conduct a comprehensive evaluation of sustainability and economic productivity indicators, comparing mono-dimensional and integrated agricultural systems in two distinct villages within Meshginshahr County, Iran, with a specific focus on ecological health, economic viability, and the critical metric of local food security.

Materials and Methods

This survey-analytical research was conducted in 2023 in two purposively selected villages—Arjaq and Jabdaraq—located in Meshginshahr County, Ardabil Province, Iran. Data collection integrated field observations, in-person interviews with local farmers, and official agricultural census data. To quantitatively assess sustainability, a novel Composite Agricultural Diversity Index (ADI) was constructed, comprising five weighted components: Biodiversity (Shannon-Wiener Index), Functional Diversity, Spatial Diversity, Temporal Diversity, and Resilience (assessed through farmer surveys on system recovery from disturbances). Economic analysis was performed by calculating total costs, income, profit, and profit percentage for each documented



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

<https://doi.org/10.22067/agry.2026.95686.1256>

agricultural system. Food self-sufficiency was evaluated by comparing the annual production of key food groups within each village against established per capita consumption requirements. Additionally, new indices for land-based and population-based self-sufficiency were developed and calculated to provide a holistic view of local food security.

Results and Discussion

The findings revealed a pronounced superiority of integrated agricultural systems across all evaluated metrics. Ecologically, the most complex system (Arable + Gardening + Livestock + Poultry) achieved the highest Composite Agricultural Diversity Index in both Arjaq (4.718) and Jabdaraq (4.181), far exceeding scores for single-activity systems like sole gardening (1.170) or livestock (0.865). This high ADI indicates greater biodiversity, functional redundancy, and spatial complexity, which directly enhance ecosystem resilience against environmental stresses such as pests and drought. Soil quality analysis corroborated these findings, showing superior organic matter content and nutrient levels (e.g., nitrogen, phosphorus) in systems incorporating trees and diverse plant cover compared to monoculture arable lands. Economically, the integrated systems demonstrated robust performance. While individual components like poultry sometimes achieved high profit margins, the combined systems (e.g., Arable+Gardening+Livestock) generated significantly higher absolute profits (e.g., 270.97 million Rials in Arjaq) due to synergies. These synergies included using livestock manure as organic fertilizer, thereby reducing costs for chemical inputs, and utilizing crop residues as animal feed. This resource recycling not only lowered operational expenses but also distributed economic risk across multiple revenue streams, insulating farmers from market or crop-specific failures. The most striking outcome was the disparity in food self-sufficiency. Jabdaraq, with its highly diversified production, achieved complete self-sufficiency, producing surpluses in crucial categories like poultry meat (175% of need), cereals (187%), and garden products (a remarkable 1714%). In stark contrast, Arjaq, despite its focus on lucrative grape production and greater access to irrigation, exhibited significant deficits in animal protein, meeting only 38% of its poultry requirements, 44% of its egg requirements, and 0% of its fish requirements. Its massive surplus in garden products (1589%) was insufficient to compensate for these core nutritional shortfalls, highlighting the risks of over-specialization. Consequently, the composite self-sufficiency index for Jabdaraq (5.08) was more than double that of Arjaq (2.3), underscoring that diversification, rather than mere land or water availability, is the cornerstone of sustainable food security.

Conclusion

In general, multi-dimensional, integrated agricultural systems deliver enhanced ecological sustainability through greater biodiversity and soil health, improved economic profitability and risk mitigation through synergistic resource use, and, most importantly, ensure genuine local food self-sufficiency. The presence of diverse agricultural systems in an area leads to increased economic sustainability and food security, and to some extent compensates for limited access to water. It also reduces the need for external inputs and chemical inputs, resulting in greater economic and environmental productivity.

Keywords: Agricultural economics, Integrated agricultural systems, Shannon index, Sustainability

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۶۱۱-۶۲۷

ارزیابی شاخص‌های تنوع، خودکفایی و بهره‌وری اقتصادی نظام‌های کشاورزی در دو روستای شهرستان مشگین‌شهر

آیدین توبه^۱، مرتضی برمکی^{۲*}، رقیه جهدی^۲ و نسرین سادات سیدمحمدی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ با هدف ارزیابی شاخص‌های خودکفایی، تنوع و بهره‌وری اقتصادی نظام‌های کشاورزی تک‌بعدی و تلفیقی در دو روستای ارجق و جیدرق شهرستان مشگین‌شهر به‌صورت پیمایشی-تحلیلی انجام گرفت. داده‌ها از طریق مشاهدات میدانی، مصاحبه با کشاورزان و استفاده از آمار رسمی گردآوری شد. شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی مشتمل بر مؤلفه‌های تنوع زیستی، عملکردی، مکانی، زمانی و تاب‌آوری، همراه با شاخص‌های اقتصادی (هزینه، درآمد و سود) و شاخص‌های نوین خودکفایی غذایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم‌های تلفیقی (مانند ترکیب زراعت، باغ، دام و طیور) با کسب بالاترین نمره شاخص ترکیبی تنوع (۴/۷۱۸ در ارجق و ۴/۱۸۱ در جیدرق)، از نظر پایداری اکولوژیک و تاب‌آوری بر سیستم‌های تک‌کشتی برتری داشتند. از جنبه اقتصادی، سیستم‌های چندبعدی با ایجاد هم‌افزایی بین اجزاء موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش سود کل شدند. بررسی خودکفایی غذایی آشکار ساخت که روستای جیدرق با تنوع تولید بالا با وجود دسترسی به منابع آبی کمتر، در تأمین گروه‌های غذایی اصلی خودکفا و حتی دارای مازاد تولید است، درحالی‌که روستای ارجق با تمرکز بر کشت تک‌محصولی، دارای شاخص خودکفایی پایین‌تر و ریسک‌پذیری بالاتری است. به‌طور کلی، یافته‌ها مؤید این است که وجود سیستم‌های متنوع کشاورزی در یک منطقه موجب افزایش پایداری اقتصادی و امنیت غذایی می‌شود و تا حدی محدودیت دسترسی به آب را جبران می‌کند. در ضمن موجب وابستگی کمتر به محصولی خاص می‌شود که موجب کاهش ریسک و افزایش بهره‌وری اقتصادی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: اقتصاد کشاورزی، پایداری، شاخص شانون، نظام‌های تلفیقی کشاورزی

مقدمه

جمعیت، فشار بر بوم‌نظام‌های طبیعی از جمله جنگل‌ها، مراتع و زیست‌بوم‌های گیاهی و جانوری به مراتب افزایش یافته است. توسعه جوامع انسانی و نیاز فزاینده به منابع غذایی، مستلزم اختصاص زمین‌های بیشتر است. با این حال، تأمین نیازهای بشری نباید به قیمت نادیده گرفتن حفاظت از محیط زیست تمام شود. لذا ضروری است که راهکارهایی اتخاذ گردد که همزمان با حفظ تنوع زیستی و تعادل اکولوژیک، به نیازهای اساسی انسان‌ها نیز پاسخ داده شود. یکی از روش‌های پیشنهادی برای نیل به این هدف، سیستم‌های تلفیقی کشاورزی از جمله جنگل‌زراعی است (Mbaw et al., 2014). منظور از سیستم‌های تلفیقی کشاورزی، تلفیق فعالیت‌های مختلف کشاورزی

حفاظت از محیط زیست و منابع طبیعی از ابعاد گوناگون مورد تأکید قرار گرفته است. پاسداری از این ذخایر ارزشمند، پیش‌نیاز بقای حیات بر روی کره خاکی محسوب می‌شود. از طرفی، با رشد روزافزون

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: barmakimorteza@gmail.com)

<https://doi.org/10.22067/agry.2026.95686.1256>

از جمله زراعت، دامپروری، باغبانی، شیلات، زنبورداری و ... است. این روش‌ها با استفاده از درختان و درختچه‌ها در کنار محصولات زراعی و دامی، به بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش تنوع زیستی و کاهش فرسایش خاک کمک می‌کنند (Goudarzian et al., 2013). کاربرد روش‌های ترکیبی در کشاورزی، علاوه بر افزایش عملکرد و تولید محصولات زراعی موجب تخفیف پیامدهای نامطلوب تغییرات اقلیمی و ارتقای سطح معیشت جوامع روستایی نیز می‌شود (Mahallati et al., 2022). هدف نهایی در تلفیق، رسیدن به پایداری هم در مورد تولیدات منابع غذایی و هم پایداری جوامع گیاهی و جانوری است. کشاورزی تلفیقی دارای اشکال مختلفی می‌باشد. برای مثال می‌توان باغ - زراعت، باغ - دام، باغ - زنبورداری، زراعت - دام - طیور و ... را نام برد (Karimi et al., 2019). در دوران گذشته، نظام‌های تک‌کشتی به‌عنوان راهکاری کلیدی برای مقابله با چالش‌های امنیت غذایی در جوامع مختلف معرفی می‌شدند. باین‌حال، در سال‌های اخیر، تمرکز به‌سمت الگوهای کشاورزی پایدارتر معطوف شده است که نه تنها بازدهی تولید را تضمین می‌کنند، بلکه کیفیت خاک و پایداری بوم‌شناختی را در بلندمدت حفظ می‌نمایند (Rastgoo et al., 2014). روش‌های تلفیقی، منافع اقتصادی و اجتماعی زیادی از قبیل افزایش تولید در واحد سطح، افزایش درآمد، تولید چوب و سوخت، علوفه دام و غیره را برای ساکنان و کاربران اراضی تأمین می‌کند و نیز منافع و اثرات زیست‌محیطی مهمی از قبیل ذخیره‌سازی و بهبود کیفیت آب، کاهش قابل ملاحظه احتمال تخریب و فرسایش خاک و بهبود چشم‌انداز اراضی کشاورزی دارد (Torralba et al., 2016). در سیستم‌های تلفیقی کشاورزی بر روی افزایش تنوع گونه‌ای تمرکز شده است که افزایش تنوع یکی از عوامل پایداری جوامع است. با افزایش تنوع و پایداری، جوامع می‌توانند مقاومت بیشتری در مقابل اتفاقات پیش‌بینی‌نشده محیطی از خود نشان دهند (Biggs et al., 2021). در دهه‌های اخیر، دو سیستم عمده کشاورزی، یعنی کشت تک‌محصولی (تک‌کشتی) و کشت تلفیقی (مانند جنگل‌زراعی، کشاورزی مرکب و سیستم‌های چندکارکردی)، به‌عنوان الگوهای متضاد در مدیریت اراضی کشاورزی مطرح شده‌اند. سیستم تک‌کشتی با تمرکز بر تولید انبوه یک محصول خاص، اگرچه در کوتاه‌مدت بازده اقتصادی بالایی دارد، اما چالش‌های جدی مانند فرسایش خاک، کاهش تنوع زیستی، وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی را به همراه دارد (Tsiafouli

et al., 2015; Beckmann et al., 2019). در مقابل، سیستم‌های تلفیقی با ترویج تنوع زراعی، استفاده بهینه از منابع و تلفیق درختان، محصولات زراعی و دام‌داری، نه تنها به پایداری بوم‌شناختی کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند خودکفایی روستاها را از طریق تأمین چندمنظوره نیازهای غذایی، اقتصادی و انرژی بهبود بخشند (Pancholi et al., 2023). مطالعات اخیر نشان می‌دهند که سیستم‌های کشاورزی چندبعدی با ادغام روش‌های مختلف تولید، به افزایش بهره‌وری و کاهش ریسک‌های اقتصادی کمک می‌کنند. براساس پژوهش پریتنی (Pretty, 2008)، کشاورزی تلفیقی (مانند کشت توأم محصولات و دامپروری) منجر به بهبود امنیت غذایی و درآمدزایی پایدار برای روستاییان می‌شود. همچنین کشاورزی اکولوژیک با کاهش مصرف کودهای شیمیایی، هزینه‌های تولید را کاهش داده و سودآوری را افزایش می‌دهد (Altieri & Nicholls, 2018). اگر وفارستری می‌تواند به حفظ ارزش‌های محلی و اجتماعی کمک کند. در واقع، سیستم تک‌کشتی، دست کشاورز را برای تنوع استفاده از روش‌های مختلف می‌بندد و ممکن است که کشاورز سال‌ها مجبور به کاشت یک یا دو نوع محصول باشد. اما در سیستم جنگل‌زراعی، کشاورز می‌تواند در روش‌های مختلف تلفیقی، روش‌ها و منابع بومی و محلی خود را نیز بگنجانند و از آن‌ها نیز بهره‌گیرد. این روش‌های بومی محلی می‌توانند آبی‌پروری، دامداری، زنبورداری، گیاهان دارویی و ... باشند (Mukhlis et al., 2022). با وجود شناخته‌شده بودن مزایای کشاورزی تلفیقی، شواهد میدانی کمی از پیامدهای عملی آن در سطح روستاهای ایران، به‌ویژه در منطقه شمال غرب کشور موجود است. شهرستان مشگین‌شهر به‌دلیل تنوع اقلیمی و الگوهای کشاورزی متفاوت، بستری مناسب برای بررسی مقایسه‌ای این نظام‌ها فراهم می‌کند. گزارش‌های محلی حاکی از کاهش تدریجی تنوع تولید در برخی روستاها و افزایش آسیب‌پذیری معیشتی در برابر شوک‌هایی مانند خشکسالی‌های اخیر است. انتخاب دو روستای ارجق (با تمرکز شدید بر کشت تک‌محصولی انگور (Vitis vinifera) و جیدرق (با سابقه تولید متنوع و تلفیقی) این امکان را فراهم می‌سازد تا پیامدهای ملموس هر دو راهبرد بر شاخص‌های پایداری، اقتصاد و امنیت غذایی، با روشی علمی و مبتنی بر داده‌های محلی سنجیده شود.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی سیستم‌های کشاورزی موجود در منطقه مشگین و روش‌های تلفیقی موجود و بررسی و مقایسه

روش‌های تک‌بعدی و چندبعدی از نظر شاخص‌های پایداری، اقتصادی و بوم‌شناختی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ به صورت پیمایشی-تحلیلی انجام گرفت. منطقه مورد مطالعه، شهرستان مشگین‌شهر در استان اردبیل بود. شهر مشگین در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه و عرض جغرافیایی برابر با ۳۸ درجه و ۲۴ دقیقه قرار دارد. این شهرستان در دامنه ارتفاعی از ۷۴ متر تا بیشتر از ۳۶۰۰ متر از سطح دریا است (شکل ۱). اقلیم آن نیمه‌مرطوب سرد همراه با زمستان‌های مرطوب و سرد و تابستان‌های خشک و گرم است (Madadi & Maleki, 2018). میانگین دمای حداقل و حداکثر این منطقه به ترتیب ۴/۶- و ۳۰ درجه سانتی‌گراد در ماه‌های بهمن و مرداد است. میانگین بارش سالانه به میزان ۴۰۰ میلی‌متر و بیشتر در فصول پائیز و زمستان توزیع شده است (Sharifi et al., 2018).

در این پژوهش، دو روستا از منطقه مشگین مورد بررسی قرار گرفتند. دلیل انتخاب این روستاها، وجود سیستم‌های متفاوت و متنوع بود که مسیر پژوهش را هموار می‌کرد. در واقع، انتخاب روستاها تصادفی نبود و جهت مقایسه بهتر شرایط و سیستم‌ها، این روستاها انتخاب شدند. روستاهای مورد بررسی، روستاهای ارجق و جبدرق بودند. جبدرق، روستایی است که در استان اردبیل، شهرستان مشگین‌شهر، بخش مرکزی، دهستان دشت قرار دارد. این منطقه دارای باغ‌های انگور و سیب معروفی است. ارتفاع این منطقه حدود ۹۰۰ متر از سطح دریا است. همچنین طول جغرافیایی این منطقه برابر با ۴۷ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی آن برابر با ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه می‌باشد. روستای ارجق ۵۱۲ نفر جمعیت دارد. ارجق، روستایی است که در بخش مشکین شرقی شهرستان مشگین‌شهر استان اردبیل قرار دارد. ارجق در ایران به باغ‌های انگور خود شهرت دارد. این روستا و روستاهای اطراف آن دارای باغات بی‌بدیل انگور، زردآلو (*Prunus armeniaca*)، گردو (*Juglans regia*)، سیب (*Malus domestica*) و گلابی (*Pyrus communis*) می‌باشند. همه ساله انگورهای بسیار زیادی از باغ‌های ارجق برداشت شده و در سطح شهرستان، استان و حتی کشور مورد مصرف قرار می‌گیرد. ارجق به دلیل قرار گرفتن در راه مواصلاتی بین استانی و شهرستانی، در مسیر توسعه قرار داشته و همواره رونق تجاری خوبی داشته است. ارتفاع این

منطقه حدود ۱۱۵۰ متر از سطح دریا است. همچنین طول جغرافیایی این منطقه برابر با ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه و عرض جغرافیایی آن برابر با ۳۸ درجه و ۳۱ دقیقه می‌باشد.

برای توصیف سیستم‌های کشاورزی و بررسی ویژگی‌های اقتصادی، از روشی که محصول تلفیق مشاهدات میدانی، مصاحبه و ثبت اطلاعات است، استفاده شد. همچنین از ابزارهای پرسش‌نامه و مصاحبه رودررو با کشاورزان محلی استفاده شد. به علاوه، داده‌های معتبر و رسمی موجود در اداره جهاد کشاورزی و سازمان برنامه و بودجه و همچنین از آمارهای سرشماری کشاورزی هر منطقه استفاده و اطلاعات تجمع شدند (Statistical Centre of Iran, 2024). در نهایت، کلیه اطلاعات گردآوری شده یکپارچه‌سازی و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. در هر منطقه، حداقل با ۱۵ کشاورز در طول سال مصاحبه حضوری انجام شد. همچنین برای روان بودن و انسجام مطالب، اطلاعات به دست آمده از منابع مختلف تطبیق داده شده و از نظر متخصصان و اساتید برای تحلیل اطلاعات استفاده گردید. برای تحلیل خاک از روش نمونه‌برداری مرکب استفاده شد. یعنی از نظام‌های موجود در هر منطقه، چهار نمونه از چهار گوشه سیستم و یک نمونه خاک از مرکز سیستم برداشته شد و در نهایت نمونه مورد آزمایش، ترکیبی از این پنج نمونه برداشت شده از قسمت‌های مختلف سیستم بود (FAO & UNEP, 2023). برای بررسی تنوع در سیستم‌های مختلف کشاورزی از شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی استفاده شد (FAO, 2019). این شاخص برای سنجش تنوع زیستی در سیستم‌های کشاورزی طراحی شده و شامل چندین مؤلفه است که تنوع در سطوح ژنتیکی، گونه‌ای و بوم‌نظامی را اندازه‌گیری می‌کند و به عنوان ابزاری برای ارزیابی پایداری بوم‌شناختی و مقاومت سیستم‌های کشاورزی استفاده می‌شود. این شاخص دارای اجزای مختلفی است که در ادامه تشریح خواهد شد.

تنوع زیستی (شاخص شانون - وینر): این روش یکی از

رایج‌ترین روش‌ها برای سنجش تنوع گونه‌ای در یک بوم‌نظام یا سیستم کشاورزی است. این شاخص با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Keylock, 2005).

$$H' = - \sum_{i=1}^s (p_i \ln p_i) \quad (1) \text{ معادله}$$

که در آن، p_i : نسبت فراوانی هر گونه و s : تعداد کل گونه‌ها است. در محاسبه مقدار نهایی تنوع در معادله ۲ این شاخص با وزن ۳۰ درصد در میانگین نهایی اعمال می‌شود.

(Cabell & Oelofse, 2012).

در نهایت، شاخص ترکیبی تنوع با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد.

معادله (۲) = شاخص ترکیبی تنوع

$$(0.1 \times \text{تاب‌آوری}) + (0.15 \times \text{تنوع زمانی}) + (0.2 \times \text{تنوع مکانیکی}) + (0.2 \times \text{تنوع زیستی})$$

صفت دیگری که بررسی شد، میزان تأمین نیازهای اساسی انسان با تولیدات خود منطقه بود. با در نظر گرفتن اینکه هر انسان (از سن صرف‌نظر می‌شود) در طول سال به ۱۴ کیلوگرم گوشت قرمز، ۱۸ کیلوگرم گوشت مرغ، ۸ کیلوگرم تخم‌مرغ، ۷ کیلوگرم ماهی، ۱۰۰ کیلوگرم محصولات باغی، ۱۰۰ کیلوگرم غلات و ۶۰ کیلوگرم شیر نیاز دارد (WHO & FAO, 2023 Willett et al., 2019). در این قسمت، تحلیل می‌شود که آیا این میزان از تولید برای برطرف کردن نیازهای اساسی مردم آن منطقه کافی است یا خیر؟

برای بررسی خودکفایی هر منطقه، سه شاخص بررسی شد. شاخص‌های مورد بررسی عبارت بودند از شاخص خودکفایی برحسب زمین، شاخص خودکفایی برحسب جمعیت و شاخص ترکیبی خودکفایی که در واقع ترکیبی از دو شاخص قبلی بود. هدف از محاسبه و ارائه شاخص‌های ترکیبی خودکفایی، فراتر رفتن از بررسی صرف درصد تأمین گروه‌های غذایی (جدول ۶) و یکپارچه‌سازی معیارهای کارایی منابع و فشار جمعیتی در ارزیابی امنیت غذایی پایدار بود. شاخص رایج خودکفایی (تأمین درصدی نیاز) نمی‌تواند کارایی استفاده از زمین یا تأثیر تراکم جمعیت را به‌طور همزمان بسنجد. بنابراین، در این مطالعه برای اولین بار شاخص‌های خودکفایی بر مبنای زمین و جمعیت معرفی و شاخص ترکیبی نهایی از حاصل ضرب این دو محاسبه گردید. این شاخص‌ها از طریق معادله‌های ۳ تا ۵ محاسبه می‌شوند.

معادله (۳)

مساحت کل زمین‌های کشاورزی منطقه / میانگین درصدهای

تأمین مواد غذایی = شاخص خودکفایی برحسب مساحت زمین

معادله (۴) = شاخص خودکفایی برحسب جمعیت

$$(100 / \text{جمعیت منطقه}) \times \text{میانگین درصدهای تأمین مواد غذایی}$$

معادله (۵) = شاخص ترکیبی خودکفایی

$$(100 / \text{جمعیت منطقه}) \times (\text{مساحت کل زمین‌های کشاورزی منطقه} / \text{میانگین درصدهای تأمین مواد غذایی})$$

منطقه / میانگین درصدهای تأمین مواد غذایی)

شاخص تنوع عملکردی: این شاخص از حاصل ضرب تعداد

محصولات و تعداد انواع کاربرد هر یک از آن‌ها به دست می‌آید. به‌عنوان مثال، اگر یک سیستم دارای دام و مرغ بود، این شاخص از طریق ضرب ۲ (تعداد گونه) در ۵ (میانگین تعداد کاربردهای هر گونه) به‌عنوان مثال گوشت، شیر، تخم، پشم، کود و ... در واقع هر کدام از گونه‌ها ۵ کاربرد در سیستم می‌تواند داشته باشند. در محاسبه مقدار نهایی تنوع، این شاخص با وزن ۲۰ درصد در میانگین نهایی اعمال می‌شود (Koohafkan et al., 2012).

شاخص تنوع مکانی: این شاخص، نوع اختلاط و برهم‌کنش

مکانی اجزای مختلف سیستم را نشان می‌دهد. هر چقدر این شاخص عدد بیشتری را نشان دهد به‌معنی برهم‌کنش بیشتر اجزای سیستم بر روی یکدیگر و تلاقی مکانی آن‌ها است. در محاسبه مقدار نهایی تنوع، این شاخص با وزن ۲۰ درصد در میانگین نهایی اعمال می‌شود. برای اندازه‌گیری شاخص تنوع مکانیکی در سیستم‌های کشاورزی، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، ناحیه تحت اشغال هر بخش از سیستم (باغ، زراعت و ...) و هم‌پوشانی آن‌ها از طریق نرم‌افزار GIS محاسبه شده و شاخص تنوع مکانیکی مشخص می‌گردد (Aavik & Augenstein, 2022).

شاخص تنوع زمانی: این شاخص، تنوع در توزیع فعالیت‌های

کشاورزی در طول زمان را بیان می‌کند و به این سؤال جواب می‌دهد که آیا چرخه‌های رشد و برداشت متنوع هستند یا خیر؟ در محاسبه مقدار نهایی تنوع، این شاخص با وزن ۱۵ درصد در میانگین نهایی اعمال می‌شود. برای اندازه‌گیری این شاخص در رابطه شانون-وینر، به‌جای تعداد گونه، از متغیر زمان استفاده می‌شود. به این صورت که هر کدام از بخش‌های سیستم، چه مدتی از طول سال فعال هستند. بخش‌هایی که در تمامی طول سال فعال هستند، بدون تنوع زمانی در نظر گرفته شده و عدد صفر به آن‌ها اختصاص پیدا می‌کند (Gaudin et al., 2015).

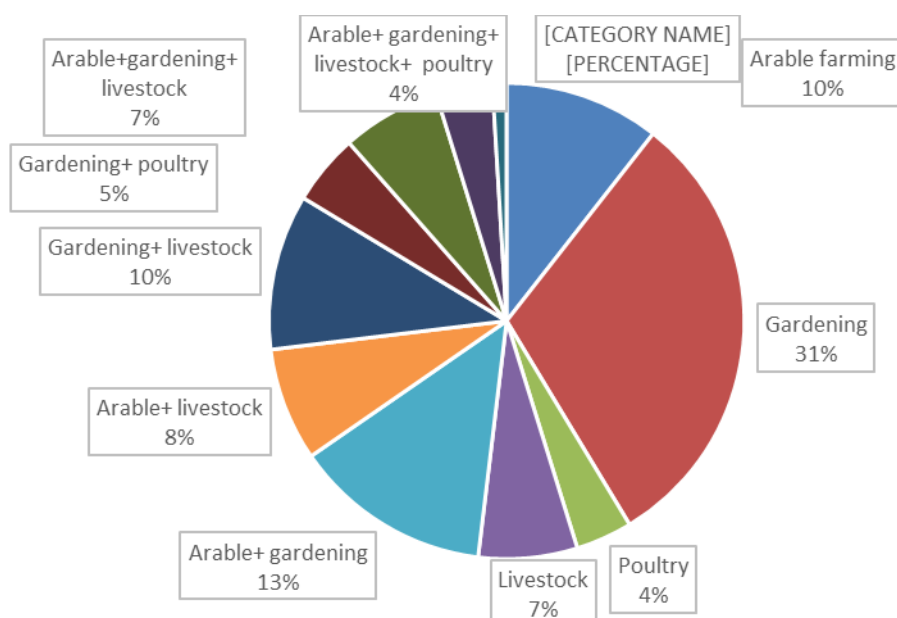
شاخص تاب‌آوری: این شاخص، به توانایی سیستم در

مقاومت در برابر اختلالات (آفات، خشکسالی و ...) و پایداری سیستم اشاره دارد. هرچه این شاخص عدد بیشتری را نشان دهد، سیستم در برابر اختلالات مقاوم‌تر است. این شاخص از طریق مصاحبه با کشاورزان و سنجش پایداری هر یک از سیستم‌ها کشاورزی در برابر مشکلات محیطی و اقتصادی محاسبه شد. محاسبه مقدار نهایی تنوع این شاخص با وزن ۱۰ درصد در میانگین نهایی اعمال می‌شود

درآمد) از طریق مقایسه با اسناد موجود (مانند فاکتورهای خرید و فروش) و نیز تکرار پرسش از راپیان مختلف (در صورت امکان) بازبینی و تأیید شد تا خطاهای گزارش‌دهی به حداقل برسد.

نتایج و بحث

روستای ارجق دارای ۶۰۴ هکتار زمین کشاورزی است که سیستم‌های مختلف کشاورزی در آن اجرا شده است. در شکل ۱، سیستم‌های مختلف موجود در این منطقه بررسی شده است.

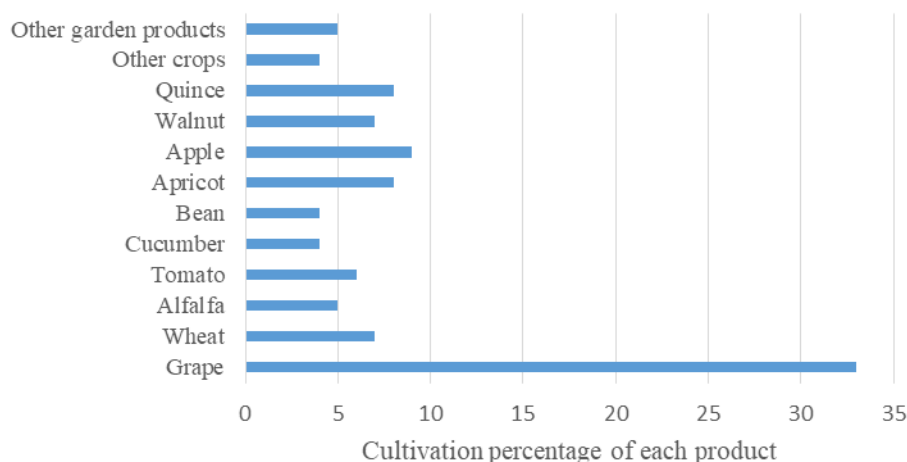


شکل ۱- سیستم‌های کشاورزی موجود در روستای ارجق
Fig. 1- Agricultural systems in Arjaq village

روستا کمک کند. اما نکته جالب توجه این است که سهم غلات از سطوح زیرکشت کم است. گندم فقط هفت درصد و محصولی مانند جو نیز بسیار ناچیز کشت می‌شود. اساسی‌ترین و مهم‌ترین محصول تولیدی ارجق، انگور است. در جدول ۱، سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در منطقه از نظر شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در واقع، یک نمونه از هر سیستم کشاورزی از نظر شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

برای حصول اطمینان از روایی و اعتبار داده‌ها، از روش سه‌سو سازی منابع داده استفاده شد. بدین صورت که اطلاعات هر مزرعه یا سیستم از طریق ترکیب مشاهدات میدانی مستقیم، مصاحبه با کشاورزان و استناد به اسناد و آمار رسمی (اداره جهاد کشاورزی) جمع‌آوری و تطبیق داده شد تا از دقت و انطباق آن‌ها اطمینان حاصل شود. همچنین برای تضمین پایایی و قابلیت اعتماد داده‌ها، روش استاندارد و یکسانی برای تمامی اندازه‌گیری‌ها و مصاحبه‌ها تعریف و رعایت شد. به‌عنوان مثال، نمونه‌برداری خاک براساس رش مشخصی انجام گرفت و سؤالات مصاحبه برای تمامی کشاورزان به یک شکل مطرح گردید. علاوه بر این، بخشی از داده‌های کلیدی (مانند هزینه و

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تمرکز کشاورزی در روستای ارجق بر روی کشت انگور است. اما نکته جالب توجه این است که سهم غلات از سطوح زیرکشت کم است. گندم (*Triticum aestivum*) فقط هفت درصد و محصولی مانند جو (*Hordeum vulgare*) نیز بسیار ناچیز کشت می‌شود. بیشتر تمرکز کشاورزی در روستای ارجق بر روی باغداری است. از دلایل آن می‌توان به وجود آب کافی برای آبیاری در منطقه اشاره کرد. اکثر (۸۰ درصد) زمین‌های کشاورزی ارجق به‌صورت آبی هستند و این یک مزیت بسیار مهم و تعیین‌کننده در امور کشاورزی است. محصولات تولیدی این روستا دارای تنوع نسبتاً بالایی است که می‌تواند به امنیت غذایی



شکل ۲- ترکیب انواع کشت انجام‌شده در روستای ارجق بر روی واحد سطح
Fig. 2- composition of different cultivation types per unit area in Arjaq village

جدول ۱، شاخص‌های تنوع سیستم‌های مختلف کشاورزی روستای ارجق را بررسی می‌کند که شامل زراعت، باغ، طیور، دام و ترکیب‌های مختلف آن‌ها است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی مانند "زراعت + باغ + دام + طیور" بالاترین شاخص ترکیبی تنوع (۴/۷۱۸) را دارند که نشان‌دهنده مزیت سیستم‌های تلفیقی و متنوع در افزایش تاب‌آوری و بهره‌وری است. این یافته با مطالعاتی مانند ایسبل و همکاران (Isbell et al., 2017) هم‌خوانی دارد که تأکید می‌کنند، تنوع زیستی و عملکردی در سیستم‌های کشاورزی پایدار منجر به کاهش ریسک و افزایش پایداری می‌شود. همچنین سیستم‌های تک‌محصولی مانند "باغ" یا "دام" شاخص‌های پایین‌تری دارند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر آن‌ها در برابر تغییرات محیطی است. به‌طور کلی، این جدول اهمیت تنوع در سیستم‌های کشاورزی را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که ترکیب چندین فعالیت کشاورزی می‌تواند به بهبود پایداری و عملکرد منجر شود (Nassiri Mahallati et al., 2017).

در جدول ۲، شاخص‌های اقتصادی سیستم‌های مختلف موجود در روستای ارجق از جمله هزینه، سود و درآمد بررسی شده است. این جدول نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی مانند "زراعت + باغ + دام" به‌طور معمول از نظر شاخص سود کل و درصد سود (حاشیه سود) عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های تک‌بعدی (مانند "زراعت" یا "دام" به‌تنهایی) دارند. بالاترین درصد سود مربوط به سیستم طیور است، اما این میزان هزینه و درآمد مربوط به بخش پرورش جزئی و خانگی طیور است و منبع درآمد قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. چندبعدی کردن سیستم‌های کشاورزی و تکیه بر چندین منبع موجب هم‌افزایی بخش‌های مختلف سیستم می‌شود (Pourghasemian & Moradi, 2016). ضایعات بخش دام و طیور می‌تواند به‌عنوان کودی ارزان و طبیعی برای بخش زراعت و باغ استفاده شود که هزینه خرید کودهای شیمیایی را به‌شدت کاهش می‌دهد. محصولات فرعی بخش زراعت (مانند کاه و کلش) و باغ می‌تواند به‌عنوان خوراک دام استفاده شود که هزینه خرید خوراک را کاهش می‌دهد. همچنین سیستم‌های چندبعدی باعث کاهش ریسک برای کشاورز می‌شود (Fatima et al., 2023). در سیستم‌های تک‌بعدی (مثلاً فقط دام)، اگر قیمت نهاده‌ها (مانند خوراک دام) افزایش یابد یا بیماری شیوع پیدا کند، کل درآمد خانوار به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

روستای جیدرق دارای ۱۷۳۶ هکتار زمین کشاورزی است که سیستم‌های مختلف کشاورزی در آن اجرا شده است. در شکل ۳، سیستم‌های مختلف موجود در این منطقه بررسی شده است.

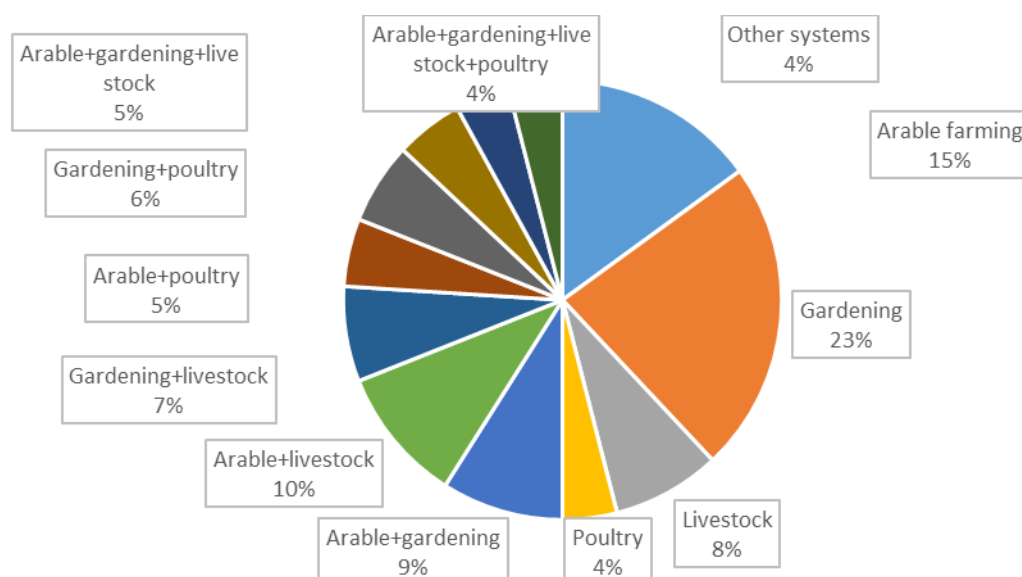
در جدول ۲، شاخص‌های اقتصادی سیستم‌های مختلف موجود در روستای ارجق از جمله هزینه، سود و درآمد بررسی شده است. این جدول نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی مانند "زراعت + باغ + دام" به‌طور معمول از نظر شاخص سود کل و درصد سود (حاشیه سود) عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های تک‌بعدی (مانند "زراعت" یا "دام" به‌تنهایی) دارند. بالاترین درصد سود مربوط به سیستم طیور است، اما این میزان هزینه و درآمد مربوط به بخش پرورش جزئی و خانگی طیور است و منبع درآمد قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. چندبعدی کردن سیستم‌های کشاورزی و تکیه بر چندین منبع موجب هم‌افزایی بخش‌های مختلف سیستم می‌شود (Pourghasemian & Moradi, 2016). ضایعات بخش دام و طیور می‌تواند به‌عنوان کودی ارزان و طبیعی برای بخش زراعت و باغ استفاده شود که هزینه خرید کودهای شیمیایی را به‌شدت کاهش می‌دهد. محصولات فرعی بخش زراعت (مانند کاه و کلش) و باغ می‌تواند به‌عنوان خوراک دام استفاده شود که هزینه خرید خوراک را کاهش می‌دهد. همچنین سیستم‌های چندبعدی باعث کاهش ریسک برای کشاورز می‌شود (Fatima et al., 2023). در سیستم‌های تک‌بعدی (مثلاً فقط دام)، اگر قیمت نهاده‌ها (مانند خوراک دام) افزایش یابد یا بیماری شیوع پیدا کند، کل درآمد خانوار به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

جدول ۱- بررسی شاخص‌های تنوع سیستم‌های کشاورزی مختلف موجود در روستای ارجق
Table 1- Investigation of diversity indicators in different agricultural systems in Arjaq village

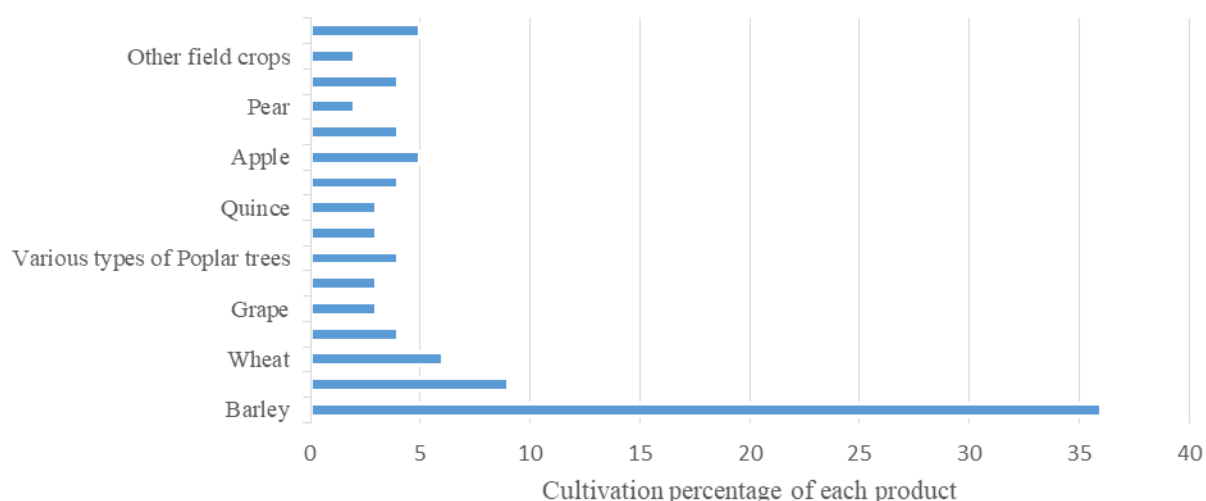
نوع سیستم Type of system	تنوع زیستی (شانون-وینر) Biodiversity (Shannon- Wiener)	تاب‌آوری Resilience	تنوع زمانی Temporal diversity	تنوع مکانی Spatial diversity	تنوع عملکردی Functional diversity	شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی Composite agricultural diversity index
زراعت Arable farming	0.5	0.5	0.7	0.39	4	1.247
باغ Gardening	0	0.55	0.64	0	2	1.170
طیور Poultry	0.67	0.5	0	0.84	6	1.619
دام Livestock	0	0.65	0	0	4	0.865
زراعت + باغ Arable + gardening	0.91	0.65	0.81	0.61	6	1.781
زراعت + دام Arable + livestock	0.69	0.6	0.7	0.65	6	1.702
باغ + دام Gardening + livestock	1.27	0.7	0.72	0.45	10	3.459
باغ + طیور Gardening + poultry	0.81	0.6	0.7	0.7	9	2.348
زراعت + باغ + دام Arable + gardening + livestock	1.32	0.85	0.8	0.8	14	3.561
زراعت + باغ + دام + طیور Arable + gardening + poultry + livestock	1.15	0.9	0.85	0.78	20	4.718

جدول ۲- بررسی شاخص‌های اقتصادی سیستم‌های مختلف موجود در روستای ارجق
Table 2- Investigation of Economic Indicators of Different Agricultural Systems in the Arjaq

نوع سیستم Type of system	درآمد Income	هزینه Cost	سود Profit	درصد سود Profit percentage
زراعت Arable farming	29.35	12	17.35	59.11
باغ Gardening	200	68	132	66
طیور Poultry	29	8	21	72.41
دام Livestock	80	41	39	48.75
زراعت + باغ Arable + gardening	240.5	79	161.5	67.1
زراعت + دام Arable + livestock	119.62	55	64.62	54.02
باغ + دام Gardening + livestock	295.8	104	189.8	64.16
باغ + طیور Gardening + poultry	218	63	155	71.1
زراعت + باغ + دام Arable + gardening + livestock	395.3	124.33	270.97	68.54
زراعت + باغ + دام + طیور Arable + gardening + poultry + livestock	367	117	250	68.11



شکل ۳- سیستم‌های کشاورزی موجود در روستای جبدرق
Fig. 3- Agricultural systems in Jabdaraq village



شکل ۴- ترکیب انواع کشت انجام‌شده در روستای جبدرق بر روی واحد سطح
Fig. 4- Composition of different cultivation types per unit area in Jabdaraq village

گسترده آن‌ها به تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش آن کمک می‌کند. حدود نیمی از زمین‌های کشاورزی جبدرق آبی و نیمی از آن‌ها دیم هستند.

در جدول ۳، سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در روستای جبدرق از نظر شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق جدول ۳، با تلفیق بیشتر سیستم‌های کشاورزی مختلف، شاخص تنوع سیستم‌ها افزایش پیدا کرده و باعث پایداری بیشتر سیستم می‌شود. سیستم "زراعت+باغ+طیور+دام" با بیشترین

با توجه به شکل ۴، در روستای جبدرق از نظر محصولات باغی تنوع زیاد و قابل توجهی وجود دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این روستا محصولات باغی زیادی از جمله سیب، گردو، هلو، به و ... تولید می‌شود. بیشترین سطح زیرکشت در این روستا مربوط به جو است. در مجموع ترکیب نسبتاً مناسبی در محصولات این روستا دیده می‌شود. همچنین در این روستا، زنبورداری به شکل کاملاً مناسبی با باغداری تلفیق شده است. همچنین توجه خاصی به درختان غیرمثمر در این روستا انجام شده است. درختان تبریزی و ریشه‌های قوی و

تاب‌آوری بالاتری نسبت به سیستم‌های تک‌بعدی هستند (Franzluubbers & Hendrickson, 2024). ترکیب چندین فعالیت، ریسک کلی سیستم را کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، اگر محصول زراعی به‌دلیل خشکسالی آسیب ببیند، درآمد حاصل از دام یا محصولات باغی می‌تواند آن را جبران کند. در این سیستم‌ها، ضایعات یک بخش به منبعی برای بخش دیگر تبدیل می‌شود. برای مثال، استفاده از بقایای محصولات زراعی به‌عنوان خوراک دام و استفاده از فضولات دام به‌عنوان کود حیوانی باعث افزایش بهبود عملکرد و سازوکار سیستم‌های تلفیقی کشاورزی می‌شود.

تنوع عملکردی و تاب‌آوری و شاخص تنوع شانون که متأثر از حداکثر تلفیق سیستم‌های کشاورزی بوده منجر به ایجاد بیشترین شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی شده است. براساس مطالعات میدانی و تحلیل شاخص‌های تنوع در سیستم‌های کشاورزی، سیستم‌های تلفیقی (مانند ترکیب زراعت، باغداری، دامداری و طیور) از نظر تاب‌آوری، تنوع زیستی و پایداری بر سیستم‌های تک‌بعدی برتری دارند. تنوع یکی از اصول پایداری است و هرچه تنوع افزایش یابد، امکان دستیابی به پایداری افزایش خواهد یافت (Kremen & Merenlender, 2018). سیستم‌های تلفیقی کشاورزی دارای

جدول ۳- بررسی شاخص‌های تنوع سیستم‌های کشاورزی مختلف موجود در روستای جبدرق

Table 3- Investigation of economic indicators of different agricultural systems in the Jabdaraq village

نوع سیستم Type of system	تنوع زیستی (شانون-وینر) Biodiversity (Shannon-Wiener)	تاب‌آوری Resilience	تنوع زمانی Temporal diversity	تنوع مکانی Spatial diversity	تنوع عملکردی Functional diversity	شاخص ترکیبی تنوع کشاورزی Composite agricultural diversity index
زراعت Arable farming	0	0.5	0.7	0	2	0.555
باغ Gardening	0.84	0.65	0.7	0.81	6	1.784
دام Livestock	0.67	0.65	0	0.6	8	1.986
طیور Poultry	0	0.55	0	0	3	0.655
زراعت + باغ Arable + gardening	0.91	0.65	0.8	0.63	8	2.184
زراعت + دام Arable + livestock	0.6	0.65	0.7	0.65	10	2.48
باغ + دام Gardening + livestock	0.88	0.7	0.7	0.55	10	2.549
زراعت + طیور Arable + poultry	0.7	0.6	0.7	0.75	10	2.525
باغ + طیور Gardening + poultry	0.61	0.77	0.74	0.7	7	1.911
زراعت + باغ + دام Arable + gardening + livestock	1.01	0.85	0.8	0.7	14	3.448
زراعت + باغ + طیور + دام Arable + gardening + livestock + poultry	1.31	0.93	0.9	0.8	17	4.181

پایداری درآمد کشاورز کمک کند. سیستم‌های ترکیبی باعث شده است که سیستم‌های پرهزینه مانند دامداری و زراعت، صرفه اقتصادی

در جدول ۴، مشاهده می‌شود که با تلفیق بیشتر سیستم‌های کشاورزی مختلف، درآمد حاصله افزایش پیدا می‌کند و می‌تواند به

به‌عنوان نهاده برای بخش دیگر استفاده می‌شود؛ برای مثال، بقایای گیاهی زراعت و باغداری به‌عنوان خوراک دام به کار می‌رود، درحالی‌که کود دامی حاصل از دامداری نیز به‌عنوان منبع غنی مواد آلی، حاصلخیزی خاک را در بخش زراعت و باغداری افزایش می‌دهد.

بیشتری داشته باشند. در واقع، سیستمی مانند دامداری در داخل سیستم‌های ترکیبی، به‌صرفه‌تر از سیستم تک‌بعدی عمل می‌کند. سیستم دام در ترکیب با سایر فعالیت‌های کشاورزی مانند زراعت و باغداری عملکرد بهتری دارد، زیرا هم‌افزایی بین اجزای سیستم ایجاد می‌کند. در این ترکیب‌ها، ضایعات و محصولات جانبی یک بخش

جدول ۴- بررسی شاخص‌های اقتصادی سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در روستای جیدرق

Table 4- Investigation of economic indicators of different agricultural systems in the Jabdaraq village

نوع سیستم Type of system	درآمد Income	هزینه Cost	سود Profit	درصد سود Profit percentage
زراعت Arable farming	61	24	37	60.65
باغ Gardening	165	37	128	77.57
دام Livestock	314	162	152	48.4
طیور Poultry	44	17	27	61.36
زراعت + باغ Arable + gardening	278	83	195	70.14
زراعت + دام Arable + livestock	166	76	90	54.21
باغ + دام Gardening + livestock	263	77	186	70.72
زراعت + طیور Arable + poultry	108	41	67	62.03
باغ + طیور Gardening + poultry	247	59	188	76.11
زراعت + باغ + دام Arable + gardening + livestock	311	108	203	65.2
زراعت + باغ + طیور + دام Arable + gardening + livestock + poultry	400	137	263	65.75

جدول ۵- بررسی خاک در سیستم‌های کشاورزی روستاهای مورد بررسی

Table 5- Soil analysis in agricultural systems of the studied villages

روستای مورد بررسی Studied village	نوع سیستم System type	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن N (%)	وزن ظاهری خاک Soil bulk density (g.cm ⁻³)	عمق خاک Soil depth (cm)	مواد آلی خاک Soil organic matter (%)
ارجق Arjaq	زراعت Arable farming	143	18	0.14	1.2	0-30	1.4
	باغ Gardening	175	27	0.17	0.9	0-50	1.7
جیدرق Jabdaraq	زراعت Arable farming	150	20	0.11	1.3	0-30	1.4
	باغ Gardening	175	27	0.16	0.95	0-50	1.87

این چرخه پایدار نه تنها هزینه‌های نهاده را کاهش می‌دهد، بلکه درآمدهای چندگانه ایجاد کرده و ریسک اقتصادی را نیز کم می‌کند. همچنین سیستم‌های ترکیبی با بهره‌گیری بهینه از منابع موجود (مانند زمین، آب و نیروی کار)، بهره‌وری کلی را افزایش داده و در نتیجه سودآوری بیشتری نسبت به سیستم‌های تک‌محصولی دارند.

پوشش دائمی درختان در باغات از فرسایش خاک جلوگیری کرده و باعث افزایش ماده آلی خاک از طریق ریزش برگ‌ها و بقایای گیاهی می‌شود (Mirzaei, 2020). همچنین سیستم ریشه‌ای عمیق درختان، ساختار خاک را بهبود بخشیده و نفوذپذیری آب و هوا را افزایش می‌دهد (Berman et al., 2022). در مقابل، سیستم‌های زراعی تک‌کشتی با شخم مکرر و استفاده از نهاده‌های شیمیایی، ماده آلی خاک را کاهش داده و ساختار آن را تخریب می‌کنند. در سیستم‌های زراعی، گیاهان معمولاً یک‌ساله و با ریشه‌های سطحی هستند. در این سیستم‌ها به علت محدودیت توسعه ریشه معمولاً تخلخل خاک کم و وزن ظاهری آن بیشتر است (Nair et al., 2021). در سیستم‌های دارای درخت، به علت آنکه درختان دارای ریشه‌های عمیق هستند، عمق خاک زراعی افزایش یافته و به دلیل جذب و حفظ عناصر غذایی از لایه‌های زیرین خاک توسط ریشه‌های درختان، تجمع عناصر غذایی در خاک افزایش پیدا می‌کند (Karimian et al., 2021). همچنین مشاهده شد، مناطقی که در آن‌ها در طول زمان سیستم‌های کشاورزی متنوع و همچنین گیاهان متنوعی به کار گرفته شده‌اند دارای کیفیت خاک بهتری هستند (Beillouin et al., 2021). در جدول ۶ میزان قدرت روستاها در تأمین مواد غذایی اهالی بررسی شده است. با در نظر گرفتن جمعیت روستاها و با در نظر گرفتن اینکه هر انسان (از سن صرف نظر می‌شود) در طول سال به ۱۲ کیلوگرم گوشت قرمز، ۱۴ کیلوگرم گوشت طیور، ۷ کیلوگرم تخم‌مرغ، ۷ کیلوگرم ماهی، ۱۰۰ کیلوگرم محصولات باغی و سبزیجات، ۱۵۰ کیلوگرم غلات و ۶۰ کیلوگرم شیر (یا محصولات لبنی) نیاز دارد.

براساس جدول ۶ می‌توان دریافت که وضعیت تأمین مواد غذایی در دو روستای ارجق و جبدرق کاملاً متفاوت است. روستای جبدرق در تمامی گروه‌های غذایی اصلی به‌طور کامل خودکفا بوده و حتی در اغلب موارد (مانند گوشت طیور با ۱۷۵ درصد، غلات با ۱۸۷ درصد و محصولات باغی با ۱۷۱۴ درصد) مازاد تولید قابل توجهی دارد که

نشان‌دهنده یک نظام تولید غذایی متنوع و پایدار است. در مقابل، روستای ارجق با کمبود در تأمین پروتئین حیوانی مواجه است، به‌طوری‌که در بخش شیلات کاملاً بدون تولید هستند. تنها ۳۸ درصد از گوشت طیور و ۴۴ درصد از تخم‌مرغ مورد نیاز خود را تولید می‌کند. تنها نقطه قوت این روستا، تولید انبوه محصولات باغی و سبزیجات (۱۵۸۹ درصد) است که مازاد آن را برای جبران کمبودهای دیگر (مانند غلات با ۶۵ درصد) به فروش می‌رساند. علی‌رغم اینکه زمین‌های کشاورزی روستای ارجق دارای منابع آبی بیشتر و دسترسی به آب بیشتری نسبت به زمین‌های کشاورزی روستای جبدرق هستند، اما تنوع تولیدات روستای جبدرق بسیار بیشتر است و روستای ارجق بیشتر به سیستم تک‌کشتی انگور تمرکز دارد. تنوع تولید باعث می‌شود که شکست در یک بخش (مثلاً آفت زدن باغات) با بخش‌های دیگر (مانند دامداری یا کشت غلات) جبران شود. این اقتصاد، کمتر در معرض نوسانات قیمت یک محصول خاص قرار می‌گیرد. روستای جبدرق توانسته است که با بهره‌گیری از سیستم‌های اگروفرستری مختلف در کنار تولیدات باغی خود به سایر جنبه‌های کشاورزی هم توجه کند.

در جدول ۷، شاخص‌های خودکفایی روستاها بررسی شد. بررسی شاخص‌های خودکفایی در دو روستای ارجق و جبدرق بیانگر تفاوت‌های قابل توجهی در الگوی استفاده از منابع و سطح پایداری کشاورزی در دو روستا است. در روستای ارجق با جمعیت نسبتاً کم (۵۱۲ نفر) و زمین‌های کشاورزی وسیع‌تر (۶۰۴ هکتار)، شاخص خودکفایی برحسب زمین (۰/۴۵) نشان‌دهنده ظرفیت مناسب زمین است، اما شاخص ترکیبی (۲/۳) گویای آن است که بهره‌وری و مدیریت منابع کشاورزی به سطح مطلوب نرسیده است. در مقابل، روستای جبدرق با جمعیت بالاتر (۲۴۴۱ نفر) و مساحت ۱۷۳۶ هکتار زمین کشاورزی، اگرچه فشار جمعیتی بیشتری را تجربه می‌کند، اما توانسته با شاخص ترکیبی ۵/۰۸، شرایط مناسب‌تری در زمینه تأمین نیازهای غذایی و استفاده بهینه از زمین و منابع داشته باشد. این موضوع نشان می‌دهد که جبدرق با بهره‌گیری از شیوه‌های متنوع کشت و روش‌های نوین اگروفرستری، مدیریت کارآمدتر آب و خاک، توانسته سطح خودکفایی خود را ارتقا دهد. در عین حال، ارجق به‌رغم برخورداری از ظرفیت زمین و آب بیشتر، به دلیل محدودیت تنوع در بهره‌برداری و نبود مدیریت بهینه، به سطحی پایین‌تر از خودکفایی رسیده است.

جدول ۶- بررسی قدرت تأمین مواد غذایی برای اهالی روستاهای مورد بررسی

Table 6- Investigation of food provision capacity for the residents of the studied villages

نوع ماده غذایی Food stuff	درصد تأمین ماده غذایی برای اهالی جبدرق Percentage of food provision for the residents of Jabdaraq (%)	درصد تأمین ماده غذایی برای اهالی ارجق Percentage of food provision for the residents of Arjaq (%)
گوشت قرمز Red meat	136	90
گوشت طیور Poultry meat	175	38
ماهی Fish	105	0
شیر Milk	111	80
تخم‌مرغ Eggs	104	44
غلات Cereals	187	65
محصولات باغی و سبزیجات Garden products and vegetables	1714	1589

جدول ۷- بررسی شاخص‌های خودکفایی در روستاهای مورد بررسی

Table 7- Investigation of self-sufficiency indicators in the studied Villages

روستای مورد مطالعه Studied village	جمعیت روستا Village population	مساحت زمین‌های کشاورزی Area of agricultural land (hectare)	میانگین درصد تأمین مواد غذایی Average percentage of food needs met	شاخص خودکفایی برحسب زمین Land-Based self-sufficiency index	شاخص خودکفایی برحسب جمعیت Population-based self-sufficiency index	شاخص ترکیبی خودکفایی Composite self-sufficiency index
ارجق Arjaq	512	604	272.2	0.45	1393.6	2.3
جبدرق Jabdaraq	2441	1736	361.7	0.208	8829	5.08

نتیجه‌گیری

براساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که نظام‌های کشاورزی تلفیقی و چندبعدی (مانند ترکیب زراعت، باغداری، دامداری و طیور) در مقایسه با سیستم‌های تک‌کشتی، از نظر شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی، تاب‌آوری اقتصادی و بهره‌وری، عملکرد برتری قابل توجهی دارند. بررسی خودکفایی غذایی آشکار ساخت که روستای جبدرق با تنوع تولید بالا با وجود دسترسی به منابع آبی کم‌تر، در تأمین گروه‌های غذایی اصلی خودکفا و حتی دارای مازاد تولید است، درحالی‌که روستای ارجق با تمرکز بر کشت تک‌محصولی، دارای شاخص خودکفایی پایین‌تر و ریسک‌پذیری بالاتری است. به‌طورکلی، یافته‌ها مؤید این است که وجود سیستم‌های متنوع کشاورزی در یک منطقه موجب افزایش پایداری

از منظر توسعه پایدار، توازن میان جمعیت و ظرفیت زمین کشاورزی، نقشی کلیدی در تقویت امنیت غذایی دارد و پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ارتقای بهره‌وری از طریق بهره‌گیری مناسب از آب و زمین، اصلاح الگوهای کشت و مدیریت منابع طبیعی می‌تواند شاخص خودکفایی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. براساس مطالعات پیشین، افزایش بهره‌وری پایدار در کشاورزی می‌تواند تا ۳۰ درصد به ارتقای خودکفایی مناطق روستایی کمک کند (Pretty & Bharucha, 2014). تناسب ظرفیت زمین با جمعیت، عامل بنیادین در پایداری روستاها محسوب می‌شود (Tilman et al., 2011). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جبدرق در وضعیت بهتری قرار دارد، اما برای هر دو روستا، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، آموزش کشاورزان و بهینه‌سازی مدیریت منابع، مسیر اصلی برای دستیابی به پایداری کشاورزی به شمار می‌آید.

توسعه روستایی شهرستان مورد استفاده قرار گیرد و روستاهایی با شاخص پایین (مانند ارجق) در اولویت دریافت مداخلات تنوع‌بخشی قرار گیرند. ضروری است که برنامه‌های آموزشی-ترویجی متمرکز بر اقتصاد چرخه‌ای در مزرعه (مانند مدیریت کود دامی و استفاده از ضایعات به عنوان خوراک دام) و کشت محصولات پروتئینی مکمل (مانند حبوبات یا علوفه) برای باغداران تک‌محصولی جهت نیل به بهره‌وری اقتصادی و مقاومت در برابر ریسک بیشتر طراحی و اجرا شود.

اقتصادی و امنیت غذایی می‌شود و تا حدی محدودیت دسترسی به آب را جبران می‌کند. در ضمن موجب نیاز کمتر به نهاده‌های خارجی و شیمیایی می‌شود که موجب بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی بیشتری خواهد شد. بنابراین، ترویج و توسعه راهبردهای کشاورزی تلفیقی که هم‌افزایی بین اجزای مختلف سیستم را افزایش می‌دهد، نه تنها پایداری اکولوژیک و اقتصادی را تضمین می‌کند، بلکه نقش کلیدی در تحقق امنیت غذایی و ارتقای معیشت پایدار جوامع روستایی ایفا می‌نماید. شاخص ترکیبی خودکفایی معرفی شده در این مطالعه می‌تواند به عنوان ابزاری برای رتبه‌بندی و هدف‌گذاری در برنامه‌های

References

1. Aavik, T., & Augenstein, I. (2022). The role of landscape diversity in ecosystem services and sustainable agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 55, 101175.
2. Altieri, M., & Nicholls, C. (2018). Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482277937>
3. Beckmann, M., Gerstner, K., Akin-Fajiye, M., Ceaușu, S., Kambach, S., Kinlock, N.L., & Seppelt, R. (2019). Conventional land-use intensification reduces species richness and increases production: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(6), 1941-1956. <https://doi.org/10.1111/gcb.14606>
4. Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697-4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
5. Berman, M.C., O'Farrell, I., Huber, P., Marino, D., & Zagarese, H. (2022). A large-scale geographical coverage survey reveals a pervasive impact of agricultural practices on plankton primary producers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 325, 107740. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107740>
6. Biggs, R., Clements, H., de Vos, A., Folke, C., Manyani, A., Maciejewski, K., & Schlüter, M. (2021). What are Social-Ecological Systems and Social-Ecological Systems Research? In *The Routledge Handbook of Research Methods for Social-Ecological Systems*. p. 3-26. <https://doi.org/10.4324/9781003021339-2>
7. Cabell, J.F., & Oelofse, M. (2012). An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society*, 17(1). <http://dx.doi.org/10.5751/ES-04666-170118>
8. FAO & UNEP. (2023). Guidelines for soil monitoring. Food and Agriculture Organization.
9. FAO. (2019). Biodiversity Metrics for Agroecology. Food and Agriculture Organization.
10. Fatima, A., Singh, V.K., Babu, S., Singh, R.K., Upadhyay, P.K., Rathore, S.S., & Parween, H. (2023). Food production potential and environmental sustainability of different integrated farming system models in northwest India. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 959464. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.959464>
11. Franzluebbers, A.J., & Hendrickson, J.R. (2024). Should we consider integrated crop-livestock systems for ecosystem services, carbon sequestration, and agricultural resilience to climate change? *Agronomy Journal*, 116(2), 415-432. <https://doi.org/10.1002/agj2.21520>
12. Gaudin, A. C., Janovicek, K., Deen, B., & Hooker, D. C. (2015). Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 210, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.034>
13. Goudarzian, P., Erfanifard, U., & Sadeghi, H. (2013). Detection and classification of available agroforestry systems in Fars province (Case study: Kazerun city). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(1), 55-70. (In Persian with English abstract).
14. Isbell, F., Adler, P.R., Eisenhauer, N., Fornara, D., Kimmel, K., Kremen, C., & Scherer-Lorenzen, M. (2017). Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *Journal of Ecology*, 105(4), 871-879. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12789>

15. Karimi, H., Karami, G., & Mousavi, S.M.J. (2019). Examining the characteristics and contexts of agroforestry system development. *Human & Environment*, 17(2), 79-90. (In Persian with English abstract).
16. Karimian, M., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2021). The effects of management practices on soil biological properties of Esfahan agroecosystems. *Journal of Agroecology*, 13(3), 379-390. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.38380>
17. Keylock, C. (2005). Simpson diversity and the Shannon–Wiener index as special cases of a generalized entropy. *Oikos*, 109(1), 203-207. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13735.x>
18. Koochekan, P., Altieri, M.A., & Gimenez, E.H. (2012). Green agriculture: Foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 10(1), 61-75. <https://doi.org/10.1080/14735903.2011.610206>
19. Kremen, C., & Merenlender, A.M. (2018). Landscapes that work for biodiversity and people. *Science*, 362(6412), eaau6020. <https://doi.org/10.1126/science.aau6020>
20. Madadi, E., & Maleki, M. (2018). Socio-economic impact assessment of the implemented natural resource projects from the stakeholders' perspectives (Case study: Watershed Andabil- Khalkhal city). *Journal of Range and Watershed Management*, 12(3), 267-280. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.244745.1251>
21. Mahallati, M.N., Koocheki, A., Behbahani, A.G.G., & Shabahang, J. (2022). Assessing agrobiodiversity in home garden ecosystems of some regions in Khorasan Razavi province. *Journal of Agroecology*, 14(1), 1-18. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.51345>
22. Mbow, C., Van Noordwijk, M., Luedeling, E., Neufeldt, H., Minang, P.A., & Kowero, G. (2014). Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.014>
23. Mirzaei, H. (2020). Soil organic carbon stocks and nitrogen content comparison in different slope positions in native grasslands and adjacent cultivated soils (Case study: Kermanshah Mountain Rangelands, Iran). *Iranian Journal of Applied Ecology*, 9(3), 49-61. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/ijae.9.3.8891>
24. Mukhlis, I., Rizaludin, M.S., & Hidayah, I. (2022). Understanding socio-economic and environmental impacts of agroforestry on rural communities. *Forests*, 13(4), 556. <https://doi.org/10.3390/f13040556>
25. Nair, P.R., Kumar, B.M., & Nair, V.D. (2021). Soil Organic Matter (SOM) and Nutrient Cycling. An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments. p. 383-411.
26. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Tavakoli Kakhki, H.R. & Soltani, M. (2017). Agrobiodiversity indices for three cucurbit species in Khorasan- Razavi province. *Journal of Agroecology*, 9(1), 1-14. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v9i1.22431>
27. Pancholi, R., Yadav, R., Gupta, H., Vasure, N., Choudhary, S., Singh, M.N., & Rastogi, M. (2023). The role of agroforestry systems in enhancing climate resilience and sustainability: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4342-4353. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i113615>
28. Pourghasemian, N., & Moradi, R. (2016). Assessing biodiversity of agronomical and horticultural productions of Isfahan province. *Journal of Agroecology*, 8(2), 212-226. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v8i2.37582>
29. Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>
30. Pretty, J., & Bharucha, Z.P. (2014). Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany*, 114(8), 1571-1596. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu205>
31. Rastgoo, S., Ayneband, A., & Fateh, E. (2014). Evaluation the competitiveness of sesame and mung bean crops in both monocropping and intercropping systems. *Journal of Agroecology*, 7(3), 356-367. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v7i3.31213>
32. Sharifi, J., Fayyaz, M., Roustamikia, Y., Azimi, F., & Ashouri, P. (2018). Plant types of natural resources areas in Ardabil province. *Iranian Nature*, 4(1), 21-26. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/im.2018.119306>
33. Statistical Centre of Iran. (2024). Agricultural Census 2024–2025: Preliminary Results for Ardabil Province. Tehran, Iran.
34. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of

- agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
35. Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P.J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
36. Tsiafouli, M.A., Thébault, E., Sgardelis, S.P., De Ruiter, P.C., Van Der Putten, W.H., Birkhofer, K., & Hedlund, K. (2015). Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21(2), 973-985. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>
37. Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L.J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., & Murray, C.J.L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
38. World Health Organization & FAO. (2023). Global Dietary Guidelines for Healthy Nutrition. WHO Press.



The Effects of Inoculation Levels with Biofertilizer, Chemical Fertilizer, and Cytokinin Foliar Application on Yield and Yield Components of Pishgam Wheat (*Triticum aestivum* L.)

Esmail Nabizadeh^{1*} and Khadijeh Ahmadi²

1- Department of Agrotechnology Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Mah.C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran

2- Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University, Tehran, Iran

(*- Corresponding author's Email: e.nabizadeh@iau.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 30-10-2025

Revised: 05-01-2026

Accepted: 14-01-2026

Available Online: 10-05-2026

Nabizadeh, E., & Ahmadi, K. (2026). The effects of inoculation levels with biofertilizer, chemical fertilizer, and cytokinin foliar application on yield and yield components of Pishgam wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agroecology*, 17(4), 629-643. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96255.1258>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a strategic global crop, vital for food security, providing approximately 20-25% of the world's caloric intake and a significant share of dietary protein. With the global population projected to reach 9.6 billion by 2050, the implementation of sustainable agricultural practices has become imperative to meet escalating food demands without exacerbating environmental degradation. Traditional farming, heavily reliant on chemical fertilizers and pesticides, has led to soil and water pollution, threatening ecosystem health and human safety. In this context, soil microorganisms, particularly arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), play a pivotal role in sustainable production by enhancing nutrient cycling and improving the bioavailability of essential elements such as nitrogen and phosphorus. Nitrogen is a major yield-limiting factor in wheat production, with peak demand during tillering, heading, and grain filling stages. However, conventional nitrogen sources like urea are prone to leaching in light soils, contaminating groundwater. Bio-fertilizers and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) offer a sustainable and eco-friendly alternative to chemical fertilizers, improving both targeted plant nutrition and soil physicochemical properties. Furthermore, plant hormones, such as cytokinins, act as chemical messengers and are crucial in mediating plant responses to environmental stresses. Cytokinins regulate key processes, including cell division, chlorophyll synthesis, delay of senescence, and ultimately, yield enhancement. The Pishgam wheat cultivar, developed for cultivation under normal and limited irrigation in Iran's cold climates, has shown promising performance. However, limited information exists on its response to co-application of mycorrhizal fungi and cytokinin hormones. Therefore, this study was conducted to investigate the effects of different inoculation levels of mycorrhizal fungi, urea fertilizer, and cytokinin foliar application on the yield and yield components of irrigated Pishgam wheat.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96255.1258>

Materials and Methods

The experiment was carried out during the 2022-2023 cropping season at the research farm of Islamic Azad University, Mahabad Branch, West Azerbaijan, Iran. The study was arranged as a factorial experiment based on a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The experimental factors included: first, mycorrhizal organic fertilizer (containing mycorrhizal fungi) at three levels (2, 4, and 6 kg per 100 kg of seed); second, urea fertilizer from a urea source at three levels (0, 50, and 100 kg per hectare); and third, cytokinin foliar application (6-benzylaminopurine) at three stages (no application, application at flowering stage—Zadoks code 55, and application at the beginning of grain filling stage). The Pishgam cultivar seeds were disinfected with 70% ethanol and sodium hypochlorite, then inoculated according to the treatment groups. Soil analysis indicated a loamy clay texture, a neutral to weak alkaline pH, negligible urea, and sufficient levels of phosphorus and potassium. Seeds were planted at a depth of 4 cm with a density of 180 kg.ha⁻¹. Urea fertilizer was applied in two splits: one-third at planting and the remaining two-thirds at the beginning of stem elongation and before flowering. A 3 mM cytokinin solution was prepared and applied at a rate of 1.5 liters per plot using a hand sprayer, with Tween 20 added as a surfactant. Standard weed, pest, and disease management practices were uniformly applied. At physiological maturity, plants from a one-square-meter area per plot were harvested. Measured traits included plant height, flag leaf length, spike length, number of fertile spikes per square meter, number of grains per spike, thousand-kernel weight, biological yield, grain yield, and harvest index. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software (version 9.4), and mean comparisons were performed using Duncan's Multiple Range Test at a 5% probability level.

Results and Discussion

The analysis of variance revealed that the interaction effects between the factors were highly significant. The interaction between mycorrhizal fungi and urea fertilizer significantly influenced flag leaf length, spike length, number of spikes per square meter, and biological yield. Similarly, the interaction between mycorrhizal fungi and cytokinin application had a significant effect on plant height, flag leaf length, grain yield, and harvest index. Furthermore, the interaction between urea fertilizer and cytokinin application timing significantly affected spike length, number of spikes per square meter, thousand-kernel weight, grain yield, and harvest index. The highest grain yield (approximately 12 tons.ha⁻¹) was achieved with the combined application of 4 kg.ha⁻¹ mycorrhiza, 50 kg.ha⁻¹ urea, and cytokinin spraying at the flowering stage. This combination outperformed the control and other treatments, highlighting a strong synergistic effect. The results demonstrated that mycorrhizal inoculation, particularly at 4 kg.ha⁻¹, significantly enhanced nutrient uptake, especially phosphorus, leading to improved photosynthetic capacity and longer flag leaf duration. Cytokinin application, especially at the flowering and grain filling stages, effectively delayed senescence, increased the number of fertile tillers, and improved grain filling efficiency. The combination of these treatments allowed for a substantial reduction in urea fertilizer input by 50% (from 100 to 50 kg.ha⁻¹) without any compromise in yield, underscoring the role of bio-fertilizers and growth regulators in enhancing nutrient use efficiency. The improvement in yield components, including spike length, number of spikes per unit area, and thousand-kernel weight, was directly linked to better resource allocation and reduced oxidative stress under the integrated management approach.

Conclusion

The findings of this research conclusively show that the integrated application of mycorrhizal fungi (at an optimal rate of 4 kg.ha⁻¹), reduced urea fertilizer (50 kg.ha⁻¹), and cytokinin foliar spraying at critical reproductive stages (flowering and early grain filling) can significantly enhance the yield and yield components of Pishgam wheat. This management strategy works through multiple mechanisms: improved nutrient and water uptake via expanded root systems mediated by mycorrhizae, enhanced photosynthetic activity and delayed leaf senescence induced by cytokinins, and more efficient allocation of photo-assimilates to the grains. The study successfully demonstrates that it is possible to replace a significant portion of chemical urea fertilizer with organic amendments and growth regulators, thereby promoting a more sustainable and environmentally friendly wheat production system without sacrificing productivity. For achieving high and stable yields in wheat cultivation under similar agro-climatic conditions, it is highly recommended to adopt this integrated approach using 4 kg.ha⁻¹ mycorrhizal seed inoculation, 50 kg/ha urea application, and cytokinin foliar spray at the flowering stage.

Acknowledgement

The authors of this article feel it necessary to sincerely express their gratitude for the cooperation and support

of the officials of the Faculty of Agriculture and the laboratory experts at Islamic Azad University, Mahabad Branch, who extended their utmost assistance during various stages of this research.

Keywords: Urea, Harvest index, Flag leaf length, Mycorrhiza, Thousand-grain weight.

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۶۲۹-۶۴۹

تأثیر سطوح تلقیح با کود زیستی، شیمیایی و محلول پاشی با سایتوکینین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم پیشگام

اسمعیل نبی زاده^{۱*} و خدیجه احمدی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

چکیده

برای بررسی تأثیر سطوح مختلف کود زیستی مایکوریزا، کود اوره و تنظیم کننده رشد سایتوکینین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم پیشگام، آزمایشی طی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل اول کود زیستی مایکوریزا (۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در ۱۰۰ کیلوگرم بذر)، عامل دوم کود اوره صفر (شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و عامل سوم محلول پاشی با سایتوکینین (بدون محلول پاشی و محلول پاشی در مراحل گل دهی و پر شدن دانه) بود. نتایج نشان داد که اثر متقابل قارچ مایکوریزا و مصرف کود اوره سبب افزایش معنی دار طول برگ پرچم، طول سنبله، تعداد سنبله در مترمربع و عملکرد بیولوژیک شد، به طوری که تیمارهای برتر در مقایسه با شاهد، این صفات را به ترتیب تا حدود ۱۹، ۲۱، ۴۰ و ۱۴ درصد افزایش دادند. اثر متقابل قارچ مایکوریزا و محلول پاشی با سایتوکینین نیز موجب بهبود ارتفاع بوته، طول برگ پرچم، عملکرد دانه و شاخص برداشت گردید، به نحوی که بیشترین عملکرد دانه در این برهم کنش، افزایشی در حدود ۳۳ درصد نسبت به شاهد نشان داد. همچنین برهم کنش کود اوره و زمان محلول پاشی با سایتوکینین باعث افزایش طول سنبله، تعداد سنبله در مترمربع، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت شد. وزن هزار دانه و عملکرد دانه به ترتیب حدود ۱۰ و بیش از ۲۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. کاربرد توأم قارچ مایکوریزا و محلول پاشی با سایتوکینین نتوانست با حفظ عملکرد دانه و اجزای آن، مصرف کود اوره را تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۵۰ درصد) در زراعت گندم رقم پیشگام کاهش دهد.

واژه های کلیدی: اوره، شاخص برداشت، طول برگ پرچم، مایکوریزا، وزن هزار دانه

مقدمه

کالری مورد نیاز بدن انسان را تأمین می کند (FAO, 2020). در استان آذربایجان غربی، سطح زیرکشت گندم آبی بیش از ۹۰ هزار هکتار با میانگین عملکرد ۳/۸ تن در هکتار ثبت شده است (Anonymous, 2019). اجرای کشاورزی پایدار برای پاسخگویی به نیازهای غذایی جمعیت روبه رشد جهان که پیش بینی می شود تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۷ میلیارد نفر برسد، اهمیت فراوانی دارد؛ زیرا کشاورزی سنتی توان پاسخگویی پایدار به این نیاز را ندارد (Alori et al., 2017; Akhtar, 2019). استفاده گسترده از کودهای شیمیایی و آفت کش ها ضمن افزایش بازدهی منجر به آلودگی محیط زیست و تهدید سلامت انسان می شود (Alori et al., 2017; Akhtar, 2019).

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم ترین گیاهان زراعی و غذایی جهان است که به هر دو روش آبی و دیم کشت می شود. این محصول راهبردی حدود ۲۰-۶ درصد پروتئین و ۲۵ درصد

۱- گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندا، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

۲- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: e.nabizadeh@iau.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96255.1258>

(2019). در این میان، ریزجانداران خاک با ایفای نقش کلیدی در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی عناصر و افزایش قابلیت دسترسی نیتروژن و فسفر، نقش مهمی در تولید پایدار ایفا می‌کنند (Alori et al., 2017). نیتروژن به‌عنوان یکی از محدودکننده‌ترین عناصر غذایی در تولید اقتصادی گندم شناخته می‌شود و بیشترین نیاز به آن در مراحل پنجه‌زنی، ظهور سنبله و تشکیل دانه است (Farooq et al., 2019). نیتروژن، متداول‌ترین کود نیتروژنی است؛ اما به دلیل حلالیت بالا در خاک‌های سبک به راحتی شسته شده و موجب آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از کودهای زیستی یا باکتری‌های محرک رشد گیاه، جایگزینی پایدار و ایمن برای کودهای شیمیایی محسوب می‌شود. این کودها علاوه بر تغذیه هدفمند گیاه، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک را بهبود می‌دهند (Vejan et al., 2016). همچنین گزارش‌ها نشان داده‌اند که تلقیح بذر با قارچ‌های همزیست مانند مایکوریزا می‌تواند تحمل به تنش شوری و خشکی و جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم را بهبود بخشد (Fahramand et al., 2014).

تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی نیز به‌عنوان پیام‌رسان‌های شیمیایی، نقش مهمی در تحمل گیاه به تنش‌های محیطی دارند. از میان آن‌ها، سایتوکینین‌ها در فرآیندهای مهمی مانند تقسیم سلولی، افزایش شاخه‌های جانبی، سنتز کلروفیل، تأخیر در پیری و بهبود عملکرد نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Ha et al., 2012). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که محلول پاشی با سایتوکینین در مرحله پنجه‌زنی می‌تواند تعداد دانه در سنبله، سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و میزان پروتئین دانه گندم را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Alzaayid & Aloush, 2021). همچنین کاربرد سایتوکینین در مزارع برنج (*Oryza sativa*) منجر به بیش از ۲۰ درصد افزایش عملکرد دانه شده است (Yeh et al., 2015). رقم پیشگام از تلاقی ارقام Zhong 87-90 و برکت به دست آمده و متوسط عملکرد آن در شرایط نرمال ۷/۵۲ تن در هکتار و در شرایط تنش ۵/۱۴ تن در هکتار گزارش شده است (Mahfouzi et al., 2009).

قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار ممکن است راندمان جذب نیتروژن گیاه را بهبود بخشد که می‌تواند با تنظیم روابط منبع-مخزن توسط سایتوکینین تعامل داشته باشد تا تخصیص کربوهیدرات به دانه‌های در حال رشد را بهینه کند. در نتیجه، فرض بر این است که وجود نیتروژن کافی، همراه با جذب مواد مغذی القاشده توسط

قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و تقسیم‌بندی مواد فتوسنتزی تنظیم‌شده توسط سایتوکینین، باعث افزایش هم‌افزایی عملکرد گندم و شاخص برداشت می‌شود و از اثرات مشاهده‌شده هنگام اعمال هر عامل به‌صورت جداگانه فراتر می‌رود. اگرچه مطالعات قبلی برهم‌کنش‌های قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار × نیتروژن یا قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار × سایتوکینین را بررسی کرده‌اند (Cosme & Wurst, 2013)، اما تأثیر ترکیبی هر سه عامل بر عملکرد گندم در شرایط آبیاری تا حد زیادی ناشناخته مانده است. با وجود گزارش‌های متعدد درباره نقش مثبت قارچ‌های مایکوریزا در بهبود جذب عناصر غذایی و اثرات تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مانند سایتوکینین بر فرآیندهای فیزیولوژیک و عملکرد گندم، اغلب مطالعات، این عوامل را به‌صورت جداگانه یا در شرایط تنش بررسی کرده‌اند و اطلاعات کافی درباره اثرات تعاملی مایکوریزا، کود اوره و محلول پاشی با سایتوکینین بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های تخصیص ماده در شرایط آبیاری کامل و در ارقام رایج گندم ایران از جمله رقم پیشگام، محدود است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات سطوح مختلف قارچ مایکوریزا، کود اوره و محلول پاشی با سایتوکینین بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص برداشت گندم رقم پیشگام در شرایط آبیاری کامل اجرا شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات آزمایش

این آزمایش در اواخر شهریورماه ۱۴۰۱، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد در ۱۵ کیلومتری مهاباد (آذربایجان غربی) اجرا گردید. این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد، عامل اول شامل سه سطح کود زیستی مایکوروبوت که حاوی قارچ مایکوریزا است (۲ و ۴ و ۶ کیلوگرم در ۱۰۰ کیلوگرم بذر)؛ و عامل دوم سه سطح کود شامل (صفر (به‌عنوان شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) و عامل سوم محلول پاشی سایتوکینین شامل بدون محلول پاشی و محلول پاشی در مرحله گل‌دهی زمانی که ۵۰ درصد گل‌ها از غلاف بیرون آمده بود. محلول پاشی در مرحله شروع پر شدن دانه بود. رقم گندم مورد آزمایش پیشگام بود که از مؤسسه دیلم کشور در مراغه دریافت شد. کود زیستی مایکوروبوت زراعی از شرکت زیست‌فناور پیش‌تاز واریان تهیه شد.

آماده‌سازی خاک و کاشت بذرها

نتایج آزمایش خاک مزرعه در **جدول ۱** ارائه شده است. قبل از کاشت، بذور ضدعفونی شده و براساس نوع تیمار، بر اساس دستورالعمل کود زیستی مایکوروت (حاوی قارچ‌های مایکوریزای آرباسکولار و به‌صورت پودری تجاری‌شده)، بذره‌های گندم برای بذرمال در سایه روی نایلون تمیز پخش شدند. سپس با مقدار کمی آب مرطوب شده و کود مایکوریز به آن‌ها افزوده شد و به‌طور کامل مخلوط گردید، به‌گونه‌ای که تمامی بذرها با لایه‌ای یکنواخت از مایه تلقیح پوشانده شوند. طبق دستورالعمل، صرفاً مرطوب شدن بذرها کفایت داشت و از خیس یا چسبندگی آن‌ها جلوگیری شد. پس از هواخشک شدن بذرها در سایه، عملیات کشت انجام گرفت. این کود زیستی حاوی میسلیوم‌های قارچ مایکوریزا بود. عمق کشت بذر چهار سانتی‌متر و میزان بذر مصرفی براساس تراکم ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار مطابق منطقه در نظر گرفته شد که براساس وزن هزار دانه و سطح واحدهای آزمایشی محاسبه و توزین شد. هر تیمار در پنج ردیف با فاصله ۱۵ سانتی‌متر و با طول هر ردیف پنج متر کشت شد. فاصله بین کرت‌های آزمایشی نیز دو متر در نظر گرفته شد. پس از کاشت، بلافاصله آبیاری به‌روش آبیاری بارانی صورت گرفت و پس از سبز شدن یکنواخت مزرعه، در هر سطح نیتروژن، یک‌سوم کود شیمیایی از نوع اوره در زمان تهیه زمین و دو سوم دیگر به‌صورت سرک و به‌طور مساوی در ابتدای مرحله ساقه رفتن و قبل از گل‌دهی به خاک داده شد.

ابتدا محلول سه میلی‌مولار سایتوکینین از منبع ماده ۶- بنزیل آمینوپورین تهیه و به‌روش محلول‌پاشی و با استفاده از سم‌پاش دستی به‌مقدار ۱/۵ لیتر محلول برای هر کرت آزمایشی در مرحله گل‌دهی زمانی که ۵۰ درصد گل‌ها از غلاف بیرون آمدند (کد ۵۰ زادوکس) اعمال شد. غلظت سه میلی‌مولار براساس آزمون‌های مقدماتی و بدون بروز علائم سمیت انتخاب گردید (Nabizadeh, 2023). جهت سهولت جذب محلول سایتوکینین، به همراه آن از یک مایع مویان به نام توئین^۱ به‌مقدار ۰/۱ درصد استفاده شد. در فاصله زمانی بین کاشت تا برداشت، مراقبت‌های لازم برای تمام کرت‌های آزمایشی شامل مبارزه با علف‌های هرز برای همه تیمارها یکسان به‌صورت دستی و شیمیایی با علف‌کش گرانستار ۱۵ گرم در هکتار (مرحله پنجه زنی تا ساقه رفتن) انجام شد. مجموع بارندگی در سال زراعی اجرای آزمایش

۳۵۲/۳ میلی‌متر بود و بیشترین مقدار بارش در فروردین انجام گرفت (**جدول ۲**). در طی دوران رشد گیاه، آبیاری براساس اقلیم و بافت خاک طبق نیاز گیاه در مراحل رشد انجام گرفت.

صفات نمونه بردای شده

در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، گیاهان مربوط به هر کرت برداشت شد (سطح برداشت یک مترمربع از خطوط وسط کرت بود). در آزمایشگاه با توزین گیاهان برداشت‌شده، ماده خشک کل به دست آمد. برای تعیین عملکرد دانه، سنبله‌ها جداسازی و کوبیده شده و وزن دانه‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان عملکرد دانه (با رطوبت ۱۴ درصد) در نظر گرفته شد. عملکرد، تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، زیست‌توده، عملکرد بیولوژیک و نیز شاخص برداشت بر مبنای سطح برداشتی و اجزای عملکرد بر مبنای متوسط سنبله ۱۰ بوته مورد محاسبه قرار گرفتند.

تجزیه‌های آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها، آزمون نرمال بودن مقادیر انجام و سپس تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت. مقایسه میانگین صفات با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

طول برگ پرچم

برگ پرچم به‌عنوان آخرین برگ فعال در گیاهان غلات، نقش کلیدی در تأمین فتوآسیمیلات مورد نیاز دانه‌ها از طریق فتوسنتز ایفا می‌کند. طول و سلامت این برگ به‌طور مستقیم بر عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تلقیح بذر با قارچ‌های مایکوریزای اندوفیتی و سطوح کود اوره در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل تلقیح با مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین در سطح پنج درصد بر طول برگ پرچم معنی‌دار بود (**جدول ۳**). براساس مقایسه میانگین‌ها، تیمار ترکیبی تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار بیشترین طول برگ پرچم را (۱۲/۱ سانتی‌متر) داشت (**جدول ۴**). این بهبود احتمالاً ناشی از هم‌افزایی بین جذب بهتر عناصر غذایی

مایکوریزا با محلول‌پاشی در مرحله پر شدن دانه (۱۸/۷ سانتی‌متر) مشاهده شد (جدول ۵). این یافته‌ها نشان می‌دهد که زمان مصرف سایتوکینین عاملی تعیین‌کننده در حفظ سبزینه‌ای و گسترش برگ پرچم است. تلقیح با قارچ‌های مایکوریزایی در شرایط مختلف، از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، رشد رویشی و طول عمر برگ پرچم را تقویت می‌کند (Han et al., 2025).

به‌ویژه فسفر و اوره توسط شبکه قارچی و تأمین کافی نیتروژن برای توسعه ساختارهای فتوسنتزی است (Zhou et al., 2024). در برهم‌کنش مایکوریزا و سایتوکینین، بیشترین طول برگ پرچم به‌ترتیب مربوط به تیمارهای ۴ و ۶ کیلوگرم مایکوریزا در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله شروع دانه بستن (۲۱/۷ و ۲۱/۳ سانتی‌متر) بود. در مقابل، کمترین طول برگ در تیمار ۲ کیلوگرم مایکوریزا بدون محلول‌پاشی (۱۸/۸ سانتی‌متر) و ۶ کیلوگرم

جدول ۱- نتایج آزمون خاک

Table 1- Soil test result

بافت Texture	عمق depth (cm)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	پتاسیم قابل جذب K (mg.k g ⁻¹)	فسفر قابل جذب P (mg.k g ⁻¹)	نیتروژن کل N (%)	کربن آلی Organic C (%)	کلسیم کربنات Calcium carbonate (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	درصد اشباع Saturation percentage (%)
لومی Loam	0-30	24	42	34	255	8.05	0.13	0.08	8	8	2.14	38

جدول ۲- آمار هواشناسی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مهاباد

Table 2- Agro-meteorological Statistics for agricultural year 2022-2023 (Mahabad)

ماه Month	دما Temperature (°C)			بارندگی Precipitation (mm)	رطوبت نسبی Relative humidity (%)		
	میانگین Average	حداکثر Max	حداقل Min		میانگین Average	حداکثر Max	حداقل Min
		ثر				ثر	
مهر September	17.2	32.6	1.8	15.7	55.5	93	19
آبان November	13.6	27.8	-0.6	2.8	54	95	13
آذر December	3.5	16.4	-9.4	44.4	57.5	100	15
دی December	-1.1	10.8	-13	56.4	58.5	97	20
بهمن February	-1.1	10.5	-13	64.9	58	99	17
اسفند March	5.7	19	-7.6	32.4	52.5	90	15
فروردین April	8.7	19.4	-2	106.1	57.5	97	18
اردیبهشت May	19	33.6	4.4	28.6	57	95	19
خرداد June	17	31.8	2.2	0	53.5	94	13
تیر July	25.5	39	12	1	43.5	81	6

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی گندم تحت تأثیر مایکوریزا، اوره و سایتوکینین

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) for studied traits of wheat under the effects of mycorrhiza, urea, and cytokinin

شاخص برداشت	عملکرد بیولوژیک	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	تعداد دانه در سنبله	تعداد سنبله	طول سنبله	طول برگ پرچم	درجه آزادی	منابع تغییر
Harvest index	Biological yield	Grain yield	Thousand-grain weight	Number of grains per spike	Number of spikes	Spike length	Flag leaf length	df	S.O.V
0.0002 ^{ns}	22462 ^{ns}	4669 ^{ns}	15.71 ^{ns}	154.29 ^{ns}	4016.62 ^{ns}	2.96 ^{ns}	0.72 ^{ns}	2	تکرار Repetition
0.097**	280958**	374169**	37.38**	58.27*	28569.5**	1.02**	12.86**	2	مایکوریزا Mycorrhiza (M)
0.007 ^{ns}	505844**	265614**	6.27 ^{ns}	71.62*	5411.7 ^{ns}	2.94**	33.18**	2	اوره Urea (U)
0.013**	840806**	31690*	1.56 ^{ns}	218.52**	8230.42 ^{ns}	0.50 ^{ns}	12.08**	2	سایتوکینین Cytokinin (C)
0.007 ^{ns}	75939**	14688 ^{ns}	4.93 ^{ns}	9.91 ^{ns}	21179.2**	0.47*	27.88**	4	M × U
0.18**	58615 ^{ns}	36963**	3.51 ^{ns}	5.99 ^{ns}	4616.6 ^{ns}	0.75**	8.75*	4	M × C
0.16**	46963 ^{ns}	33117**	12.34**	19.99 ^{ns}	15199.8*	0.59*	2.38 ^{ns}	4	U × C
0.005 ^{ns}	80834 ^{ns}	6578 ^{ns}	4.40 ^{ns}	10.19 ^{ns}	6408.3 ^{ns}	0.16 ^{ns}	4.09 ^{ns}	8	M × C × U
0.003	32043	9321	3.2	20.20	6290.3	0.20	2.84	52	خطا Error
12.16	7.66	9.16	13.63	8.46	14.89	5.64	8.50	-	ضریب تغییرات CV (%)

*: معنی‌دار در سطح یک درصد، **: معنی‌دار در سطح پنج درصد و ^{ns}: غیرمعنی‌دار.**: Significant at the 1% level; *: Significant at the 5% level; ^{ns}: not significant.

طول سنبله

طول سنبله به‌عنوان یکی از صفات ساختاری مهم در گندم، ارتباط مستقیمی با تعداد سنبلچه‌ها و در نتیجه پتانسیل تشکیل دانه دارد. نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از این آزمایش نشان داد که اثر ساده مایکوریزا، اوره و اثر متقابل مایکوریزا در سایتوکینین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. اثر متقابل مایکوریزا × اوره و اوره × سایتوکینین در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که تیمار تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار همراه با ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به‌ترتیب با میانگین ۸/۶ و ۸/۶ سانتی‌متر بیشترین طول سنبله را داشتند. در مقابل، تیمارهای تلقیح با ۴ و ۶ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون مصرف کود اوره (شاهد) کمترین طول سنبله را نشان دادند (جدول ۴). این یافته‌ها بیانگر نقش مکمل قارچ مایکوریزا و اوره در توسعه ساختارهای زایشی گیاه است. در برهم‌کنش قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین، بیشترین طول سنبله (۸/۷ سانتی‌متر) در تیمار تلقیح با ۴ کیلوگرم

قارچ مایکوریزا همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله پر شدن دانه مشاهده شد. کمترین طول سنبله نیز در تیمار تلقیح با ۲ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین ثبت گردید (جدول ۵). برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین نشان داد که تیمار ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله پر شدن دانه بیشترین طول سنبله (۸/۷ سانتی‌متر) را ایجاد کرد (جدول ۶). این نتایج می‌تواند ناشی از اثر سایتوکینین در تحریک تقسیم سلولی و رشد ساقه زایشی باشد. مطالعات اخیر نیز گزارش کرده‌اند که کاربرد توأم کودهای بیولوژیک و سایتوکینین در مراحل حساس زایشی گندم، از طریق بهبود وضعیت غذایی و تنظیم فیزیولوژی رشد، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Koprma et al., 2021). همچنین تلقیح بذر با قارچ‌های مایکوریزایی در ترکیب با نیتروژن بهینه، با بهبود توازن تنظیم‌کننده رشد و کاهش تنش اکسیداتیو، رشد ساقه زایشی را تقویت می‌کند (Tang et al., 2022).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر ترکیبات تیماری سطوح قارچ میکوریز و کود اوره بر صفات مورد بررسی گندم

Table 4- Mean comparison of mycorrhizal fungus and urea fertilizer treatment combinations for the studied traits of wheat

عملکرد بیولوژیک Biological yield (g.m ⁻²)	تعداد سنبله Number of spikes (spikes.m ⁻²)	طول سنبله Spike length (cm)	طول برگ پرچم Flag leaf length (cm)	کود اوره Urea (kg.ha ⁻¹)	قارچ میکوریزا Mycorrhiza fungi (kg.100 (kg ⁻¹ of seeds)
2092.1e	464.44 ^c	7.77 ^{cd}	18.66 ^{c*}	0	
2197.1 ^{de}	504.78 ^{bc}	8.05 ^{bcd}	19.05 ^{bc}	50	2
2464.6 ^{ab}	544.56 ^{ab}	7.19 ^{cd}	19.78 ^{bc}	100	
2220 ^{de}	557.11 ^{ab}	7.66 ^d	18.50 ^c	0	
2302.3 ^{bcd}	566.89 ^a	8.61 ^a	19.07 ^{bc}	50	4
2398.9 ^{abc}	550.67 ^{ab}	8.62 ^a	22.06 ^a	100	
2260.3 ^{cde}	462.22 ^c	7.74 ^d	20.28 ^b	0	
2562.1 ^a	543.56 ^{ab}	8.20 ^{abc}	19.58 ^{bc}	50	6
2524.9 ^a	568.22 ^{ab}	8.38 ^{ab}	19.48 ^{bc}	100	

* حروف مختلف در هر ستون نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

* Means within each column followed by different letters are significantly different at the 5% probability level ($p < 0.05$).

تعداد سنبله در مترمربع

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح قارچ میکوریزا و اثر متقابل قارچ میکوریزا × کود اوره در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل کود اوره × محلول‌پاشی با سایتوکینین در سطح پنج درصد بر تعداد سنبله بارور در مترمربع معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های ترکیبات تیماری قارچ میکوریزا و کود اوره نشان داد که تیمارهای تلقیح بذر با ۲ و ۶ کیلوگرم قارچ میکوریزا در هکتار، با افزایش سطح کود اوره از صفر (شاهد) به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، بیشترین افزایش را در تعداد سنبله بارور داشتند. بیشترین تعداد سنبله در این ترکیبات با کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد، درحالی‌که کمترین تعداد سنبله در ترکیب همان سطوح قارچ با عدم مصرف اوره (شاهد) ثبت گردید (جدول ۴). این روند نشان می‌دهد که قارچ میکوریزا و اوره به‌صورت مکمل یکدیگر عمل کرده و از طریق بهبود وضعیت تغذیه‌ای و گسترش سیستم ریشه‌ای، پنجه‌زایی و در نتیجه تشکیل سنبله بارور را تقویت می‌کنند. همچنین در برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین، بیشترین تعداد سنبله بارور در تیمار محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل شروع گل‌دهی و پر شدن دانه به‌دنبال کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد که به‌ترتیب با میانگین‌های ۵۴۲/۳۳، ۵۷۹/۸۹ و ۵۶۹/۱۱ سنبله در مترمربع همراه بود (جدول ۶). این افزایش می‌تواند ناشی از تأثیر سایتوکینین بر تحریک تقسیم سلولی در مراکز پنجه‌زایی و کاهش سقط پنجه‌های جوان در مراحل حساس زایشی باشد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد توأم قارچ‌های میکوریزایی و نیتروژن بهینه، با افزایش جذب فسفر و بهبود عملکرد

فتوسنتزی در مرحله رویشی، پنجه‌زایی مؤثر را تقویت کرده و در نهایت منجر به افزایش تعداد سنبله بارور می‌شود (Beslemes et al., 2023). همچنین محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل قبل از گل‌دهی، با تعدیل مسیرهای تنظیمی رشد و جلوگیری از پیری زودرس، به حفظ بنیه گیاه و افزایش تولید پنجه‌های بارور کمک می‌کند (McIntyre et al., 2021).

تعداد دانه در سنبله

تعداد دانه در سنبله به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های عملکرد دانه، تحت تأثیر عوامل متعدد فیزیولوژیکی، تغذیه‌ای و محیطی قرار دارد. طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تعداد دانه در سنبله تحت تأثیر تیمارهای قارچ میکوریزا، کود اوره و محلول‌پاشی سایتوکینین در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد که تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ میکوریزا در هکتار منجر به افزایش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله نسبت به سایر تیمارها شد. این افزایش می‌تواند ناشی از بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش تأمین انرژی برای فرایندهای باروری و تقسیم سلولی در دوره گل‌دهی باشد. همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی با سایتوکینین در مقایسه با شاهد (عدم محلول‌پاشی)، اثر مثبت و معنی‌داری بر افزایش تعداد دانه در سنبله داشت (جدول ۴). این یافته‌ها با اثرات شناخته‌شده‌ی سایتوکینین در کند کردن پیری، کاهش سقط گلچه‌ها و افزایش باروری، مطابقت دارد. سازوکارهای زیستی افزایش تعداد دانه می‌تواند شامل تقویت فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم نیتروژن (مانند نیتروژناز) در ریشه‌های تلقیح‌شده، افزایش دسترسی به

نیتروژن و در نتیجه بهبود باروری گلچه‌ها باشد (Fox et al., 2016). همچنین مطالعات نشان داده‌اند که تلقیح بذر با قارچ‌های میکوریزایی در شرایط تنش‌های غیرزنده (مانند کم‌آبی) نیز قادر به حفظ تعداد دانه در سنبله از طریق کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود تعادل هورمونی است (Nie et al., 2024). تأثیر مثبت کاربرد خارجی سایتوکینین در مراحل شروع پر شدن دانه و ۱۴ روز پس از گل‌دهی، احتمالاً ناشی از تحریک تقسیم سلولی در مریستم‌های زایشی، افزایش تمایز سنبله‌چه و کاهش سقط گلچه‌های جوان است (Yang et al., 2016).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی عملکرد دانه،

و سایتوکینین) ثبت گردید (جدول ۶).

بازتابی از ظرفیت مخزنی دانه و کارایی انتقال فتوآسیمیلات در طول فرآیند پر شدن دانه است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ میکوریزا و اثر متقابل کود اوره $\times$ محلول‌پاشی با سایتوکینین بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بهبود وزن دانه در این تیمار می‌تواند ناشی از تقویت شبکه میکوریزایی، افزایش جذب فسفر و نیتروژن و در نتیجه بهبود کارایی پر شدن دانه باشد (Ullah et al., 2025). همچنین در برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین، بیشترین وزن هزار دانه (۵۱/۲۲ گرم) در تیمار ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار آن (۴۶/۸۶ گرم) در شاهد (عدم مصرف اوره

جدول ۵- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری سطوح قارچ میکوروت و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر صفات گندم

Table 5- Comparison of average treatment combinations of mycorrhizal fungi and cytokinin foliar sprays on wheat traits

شاخص برداشت Harvest index (%)	عملکرد دانه Grain yield (g.m ⁻²)	طول سنبله Spike length (cm)	طول برگ پرچم Flag leaf length (mm)	سایتوکینین Cytokinin	قارچ میکوریزا Mycorrhiza fungi (kg.100 kg ⁻¹ of seeds)
43.66cd	936.7e	7.68d	18.77c*	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	2
40.15d	941.2de	7.82cd	19.53bc	گل‌دهی Flowering	
46.20c	1028.7cd	8.23abc	19.20bc	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	
59.37a	1140.3ab	7.97bcd	20.68ab	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	4
51.80b	1227.8a	8.66a	21.68a	گل‌دهی Flowering	
46.26c	1196.3a	8.27ab	19.64bc	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	
51.53cd	919.7e	8.21bc	19.33bc	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	6
42.76cd	1088bc	8.16bc	21.33a	گل‌دهی Flowering	
39.16d	1005.2cde	7.95bcd	18.70c	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	

* حروف مختلف در هر ستون نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

* Means within each column followed by different letters are significantly different at the 5% probability level ($p < 0.05$).

جدول ۶- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری سطوح کود اوره و محلول پاشی با سایتوکینین بر صفات گندم

Table 6- Comparison of average treatment combinations of urea fertilizer levels and cytokinin foliar spray on wheat traits

اوره Urea (kg.ha ⁻¹)	سایتوکینین Cytokinin	طول سنبله Spike length (cm)	تعداد سنبله Number of spikes	عملکرد دانه Grain yield (g.m ⁻²)	وزن هزار دانه Thousand-grain weight (g)	شاخص برداشت Harvest index (%)
0	بدون محلول پاشی No foliar spray	7.71 ^{de*}	500.44 ^b	870.3 ^e	47.77 ^c	47.14 ^{abc}
	گل دهی Flowering	7.57 ^e	5452.33 ^{ab}	935.7 ^{de}	49.66 ^{ab}	39.34 ^d
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	7.89 ^{cde}	521.11 ^{ab}	1014.8 ^{cd}	49.66 ^{ab}	44.93 ^c
50	بدون محلول پاشی No foliar spray	8.04 ^{bcd}	489.89 ^b	1003.3 ^{cd}	51.22 ^a	45.70 ^{bc}
	گل دهی Flowering	8.40 ^{ab}	579.89 ^a	1205 ^a	49.77 ^{ab}	50.68 ^{ab}
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	8.40 ^{ab}	533.44 ^{ab}	1083.6 ^{bc}	49 ^{bc}	44.76 ^c
100	بدون محلول پاشی No foliar spray	8.08 ^{bcd}	496.33 ^b	1075.9 ^{bc}	50.33 ^{ab}	51.72 ^a
	گل دهی Flowering	8.67 ^a	569.33 ^{ab}	1179 ^a	49.11 ^{bc}	44.69 ^c
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	8.16 ^{bc}	517.89 ^{ab}	1116.3 ^{ab}	49.22 ^{bc}	41.93 ^{cd}

* حروف مختلف در هر ستون نشانه اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد است.

* Means within each column followed by different letters are significantly different at the 5% probability level (P < 0.05).

بهبود بخشیده و منجر به افزایش وزن هزار دانه می شود (Ullah et al., 2025).

عملکرد بیولوژیک

عملکرد بیولوژیک که شامل مجموع ماده خشک تولیدشده در اندام های هوایی گیاه در واحد سطح است، شاخصی از کارایی کلی فتوسنتز و رشد زیست توده در طول فصل رشد محسوب می شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا، کود اوره و محلول پاشی با سایتوکینین و همچنین اثر متقابل قارچ مایکوریزا × کود اوره در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین ها نشان داد که محلول پاشی با سایتوکینین در مراحل گل دهی و پر شدن دانه به ترتیب با میانگین ۲۴۴۴/۹۹ و ۲۴۳۰/۳ گرم در مترمربع، عملکرد بیولوژیک را نسبت به شاهد (بدون محلول پاشی) به ترتیب ۱۴/۶۷ و ۱۳/۹۹ درصد افزایش داد. این افزایش می تواند ناشی از تأخیر در پیری برگ، حفظ فعالیت فتوسنتزی و افزایش تقسیم سلولی در بافت های رویشی باشد (جدول ۴).

جالب توجه این است که محلول پاشی با سایتوکینین در مرحله پر شدن دانه در تمام سطوح اوره (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) منجر به افزایش وزن هزار دانه شد که به ترتیب به مقادیر ۴۶/۸۶، ۴۹/۳۷ و ۴۷/۷۲ گرم رسید. این روند نشان می دهد که سایتوکینین حتی در شرایط کمبود اوره نیز قادر به بهبود پر شدن دانه است.

سازوکار افزایش وزن دانه توسط سایتوکینین عمدتاً از طریق تحریک تقسیم سلولی در آندوسپرم و افزایش تعداد سلول های ذخیره ای دانه است. مطالعات مولکولی نشان داده اند که سایتوکینین ها با فعال سازی ژن های مرتبط با چرخه سلولی در مرحله اولیه پر شدن دانه، حجم سلولی و در نهایت وزن دانه را افزایش می دهند (Alzaayid & Aloush, 2021). همچنین کاربرد اوره بهینه (به ویژه در سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار) با افزایش سطح برگ، طولانی تر کردن دوره فتوسنتز و بهبود انتقال مجدد مواد آسمیلات، به افزایش تجمع ماده خشک در دانه کمک می کند (Li et al., 2025). این یافته ها با مطالعات اخیر نیز هم خوانی دارد که نشان می دهند کاربرد توأم کودهای بیولوژیک و تنظیم کننده های رشد مانند سایتوکینین، با تعدیل مسیرهای متابولیک و تنظیم کننده رشد، ظرفیت مخزنی دانه را

این نتایج بیانگر هم‌افزایی بین قارچ مایکوریزا و اوره در افزایش رشد زیست‌توده است. قارچ‌های مایکوریزای اندوفیتی از طریق دو سازوکار اصلی بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند: اولاً، ریشه‌های داخل‌ریشه‌ای آن‌ها با تعدیل توازن تنظیم‌کننده رشد (کاهش سطح اسیدآبسیزیک و افزایش سایتوکینین) باعث بهبود جذب آب و مواد معدنی و افزایش گسترش سیستم ریشه می‌شوند. ثانیاً، ریشه‌های خارج‌ریشه‌ای با ترشح اسیدهای آلی (مانند اسیدمالیک)، فسفر غیرقابل دسترس را فعال کرده و جذب آن را افزایش می‌دهند که در نهایت منجر به تجمع بیشتر ماده خشک می‌شود (Wahab et al., 2023). همچنین مایکوریزا با تحریک تولید ایندول ۳-استیک اسید و سایر فیتوهورمون‌ها در ریزوسفر، رشد رویشی و شاخساره را تقویت می‌کند (Ibiang et al., 2017). از سوی دیگر، افزایش کود نیتروژن تا سطح بهینه، با افزایش سطح برگ، طول ساقه و تعداد پنجه‌های بارور باقی‌مانده تا رسیدگی، به‌طور معنی‌داری عملکرد بیولوژیک را افزایش می‌دهد (Hafiza et al., 2025). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که تلفیق تلقیح بذر با ریزجانداران مفید و کاربرد خارجی سایتوکینین، از طریق هم‌افزایی در مسیرهای تنظیم رشد، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه را در گندم بهبود می‌بخشد (Li et al., 2025).

عملکرد دانه

عملکرد دانه به‌عنوان مهم‌ترین شاخص اقتصادی در گندم، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیولوژیکی، تغذیه‌ای و تنظیم‌کننده‌های رشد قرار دارد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا و کود اوره در سطح احتمال یک درصد، اثر اصلی محلول‌پاشی با سایتوکینین در سطح پنج درصد و اثر متقابل قارچ مایکوریزا × سایتوکینین و کود اوره × سایتوکینین در سطح یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). این یافته‌ها بیانگر نقش تعاملی عوامل زیستی، تغذیه‌ای و تنظیم‌کنندگان رشد در بهینه‌سازی تولید دانه است. مقایسه میانگین‌های ترکیبات تیماری قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین نشان داد که تیمار تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل حساس زایشی، بیشترین عملکرد دانه را با میانگین ۱۱۴۰/۳، ۱۲۲۷/۸ و ۱۱۹۶/۳ گرم در مترمربع تولید کرد. در مقابل، کمترین عملکرد دانه در تیمارهای تلقیح با ۴ و ۶ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین (شاهد) با میانگین ۹۳۶/۷

و ۹۱۹/۷ گرم در مترمربع مشاهده شد (جدول ۵). این تفاوت برجسته، اهمیت زمان‌بندی و ترکیب کاربرد سایتوکینین را در بهبود انتقال فتوآسیمیلات به دانه برجسته می‌کند. همچنین در برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین، بیشترین عملکرد دانه به‌ترتیب در تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله گل‌دهی با میانگین ۱۲۰۵/۸ و ۱۱۷۹/۳ گرم در مترمربع به دست آمد (جدول ۶). این نتایج نشان می‌دهد که سطوح متوسط اوره (۵۰ کیلوگرم در هکتار) در ترکیب با سایتوکینین، از نظر بهره‌وری تولید، کارآمدتر از سطوح بالاتر اوره است.

قارچ‌های مایکوریزای اندوفیتی با گسترش شبکه ریشه‌های خارج‌ریشه‌ای، حجم قابل توجهی از خاک را تحت پوشش قرار داده و دسترسی گیاه به عناصر غذایی و آب را افزایش می‌دهند. این سازوکار در شرایط کمبود حاصلخیزی خاک یا تنش‌های غیرزنده (مانند خشکی)، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد دانه دارد (Nie et al., 2024). همچنین کاربرد توأم کود شیمیایی و ریزجانداران مفید (مانند مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد) با بهبود کارایی مصرف نیتروژن و فسفر منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک و اقتصادی در محصولات زراعی از جمله گندم و ذرت (Zea mays) می‌شود (Sobhani et al., 2022). نیتروژن به‌عنوان یک عنصر کلیدی، علاوه‌بر نقش مستقیم در سنتز پروتئین و کلروفیل، با تعدیل متابولیسم آنتی‌اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو، به حفظ سلامت فتوسنتزی گیاه کمک می‌کند (Ahanger et al., 2021). کاربرد خارجی مهارکننده‌های اکسیداز/دهیدروژناز سایتوکینین در گندم زمستانه و جو بهاره (*Hordeum vulgare*)، عملکرد دانه را به‌میزان ۴-۶ درصد و ۷-۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Nisler et al., 2021). علاوه‌بر این، محرک‌های زیستی حاوی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، عملکرد دانه جو بهاره را در شرایط مزرعه واقعی به‌طور متوسط (از ۲ درصد تا ۲/۶ درصد نسبت به شاهد) افزایش دادند (Szczepanek et al., 2018).

شاخص برداشت

شاخص برداشت، نسبت عملکرد دانه به کل زیست‌توده هوایی تولیدشده است و شاخصی از کارایی تخصیص مواد فتوسنتزی به بخش اقتصادی گیاه (دانه) محسوب می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین و

افزایش عملکرد حدود ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به شاهد، درآمد ناخالص کشاورز حدود شش میلیون تومان در هکتار افزایش یافت. این در حالی است که هزینه تلقیح مایکوریزا به طور متوسط کمتر از ۱/۵ میلیون تومان در هکتار برآورد می شود و عدم نیاز به محلول پاشی با سایتوکینین موجب کاهش هزینه های مصرفی برای تهیه تنظیم کنندگان رشد، سم پاشی و عملیات زراعی می گردد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تلقیح بذر با قارچ مایکوریزا (به ویژه در سطح ۴ کیلوگرم در هکتار)، کاربرد بهینه کود اوره (۵۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و محلول پاشی با سایتوکینین در مراحل حساس زایشی (گل دهی و شروع پر شدن دانه) به صورت تکی و به ویژه در ترکیب، اثر مثبت و معنی داری بر بهبود صفات زراعی، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت گندم داشتند. این تیمارها از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش فتوسنتز، تأخیر در پیری، تقویت تقسیم سلولی و بهینه سازی تخصیص مواد فتوسنتزی منجر به افزایش عملکرد دانه شدند. برای دستیابی به عملکرد بالا و پایدار در گندم، توصیه می شود از ترکیب تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار، مصرف ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار و محلول پاشی با سایتوکینین در مرحله گل دهی به عنوان یک برنامه تلفیقی مدیریت زراعی بهره گیری شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از همکاری و حمایت های مسئولین دانشکده کشاورزی و کارشناسان آزمایشگاه های دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد که در مراحل مختلف اجرای این پژوهش نهایت همکاری را مبذول داشتند، صمیمانه قدردانی نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تعارض منافی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

اثر متقابل قارچ مایکوریزا × سایتوکینین و کود اوره × سایتوکینین در سطح احتمال یک درصد بر شاخص برداشت معنی دار بود (جدول ۳). این نتایج نشان می دهد که تخصیص مجدد مواد فتوسنتزی تحت تأثیر قوی تنظیم کننده های رشد و وضعیت تغذیه ای قرار دارد. مقایسه میانگین های ترکیبات تیماری قارچ مایکوریزا و محلول پاشی با سایتوکینین نشان داد که تیمار تلقیح با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون محلول پاشی با سایتوکینین، بیشترین شاخص برداشت را با میانگین ۵۹/۳۷ درصد داشت. در مقابل، تیمار تلقیح با ۲ کیلوگرم قارچ همراه با محلول پاشی در مرحله پر شدن دانه، کمترین شاخص برداشت (۴۰/۱۵٪) را نشان داد (جدول ۵). این یافته جالب توجه است و نشان می دهد که در برخی از ترکیبات، محلول پاشی با سایتوکینین ممکن است با تحریک رشد رویشی اضافی (ساقه و برگ)، تخصیص مواد به دانه را مختل کند. همچنین در برهم کنش کود اوره و سایتوکینین، بیشترین شاخص برداشت (۵۱/۷۲ درصد) در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم اوره بدون محلول پاشی با سایتوکینین مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار (۳۹/۳۴ درصد) در شاهد اوره (صفر کیلوگرم) همراه با محلول پاشی در مرحله پر شدن دانه ثبت گردید (جدول ۶). این نتایج بیانگر آن است که کاربرد سایتوکینین بدون تأمین کافی اوره ممکن است منجر به عدم تعادل در تخصیص منابع و کاهش شاخص برداشت شود. به نظر می رسد که در ترکیبات تیماری تلقیح با مایکوریزا و اوره مناسب، نیاز به محلول پاشی با سایتوکینین برای بهبود شاخص برداشت کاهش یابد، زیرا این ترکیبات به طور طبیعی ظرفیت انتقال مواد به دانه را افزایش می دهند. با این حال، سایتوکینین به عنوان یک تنظیم کننده کلیدی، با افزایش قدرت مخزن، سرعت انتقال قند و بیان ژن های انتقال دهنده، می تواند در شرایط خاص (مانند تنش یا کمبود تغذیه) به بهبود تخصیص مواد کمک کند (McIntyre et al., 2021). افزایش شاخص برداشت در تیمارهای برتر بیانگر کارآیی بالاتر در تبدیل زیست توده به محصول اقتصادی و در نتیجه افزایش سودآوری برای کشاورز است. در این پژوهش، تیمار تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار بدون محلول پاشی با سایتوکینین، ضمن دستیابی به بیشترین شاخص برداشت (۵۹/۳۷ درصد)، عملکرد دانه بالاتری را با حداقل نهاده های پرهزینه نشان داد. با فرض قیمت متوسط گندم ۲۰،۰۰۰ تومان به ازای هر کیلوگرم و

References

1. Ahanger, M.A., Akram, N.A., Ashraf, M., Alyemeni, M.N., Wijaya, L., & Ahmad, P. (2021). Role of nitrogen in plant growth and physiological responses. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 286-288.
2. Akhtar, M.S. (2019). Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Causes and Solution. Volume 1. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8801-9>
3. Alori, E.T., Dare, M.O., & Babalola, O.O. (2017). Microbial inoculants for soil quality and plant fitness. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Review*. pp. 181-308. Springer.
4. Alzaayid, D.T.J., & Aloush, R.H. (2021). Effect of cytokinin levels on some varieties of wheat on yield, growth and yield components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 910(1), 012090. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012090>
5. Anonymous. (2019). *Agricultural Statistics Yearbook: Field Crops* (Vol. 1). Tehran: Ministry of Agriculture Jihad, Iran.
6. Beslemes, D., Tigka, E., Roussis, I., Kakabouki, I., Mavroeidis, A., & Vlachostergios, D. (2023). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on nitrogen and phosphorus uptake efficiency and crop productivity of two-rowed barley under different crop production systems. *Plants*, 12(9), 1908. <https://doi.org/10.3390/plants12091908>
7. Cosme, M., & Wurst, S. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi, rhizobacteria, soil phosphorus and plant cytokinin deficiency change the root morphology, yield and quality of tobacco. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 436443. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.024>
8. Fahramand, M., Adibian, M., Sobhkhizi, M., Noori, M., Moradi, A., & Rigi, K. (2014). Effect of arbuscular mycorrhiza fungi in agronomy. *Journal of Novel Applied Sciences*, 3(4), 400-404. (In Persian with English abstract).
9. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K.H.M. (2019). Drought stress in plants: An overview. In: *Plant Responses to Drought Stress*. pp. 1-33. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). FAOSTAT: Production: Crops. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
11. Fox, A.R., Soto, G., Valverde, C., Russo, D., Lagares, A., J.R., Zorreguieta, Á., Alleva, K., Pascuan, C., Frare, R., Mercado-Blanco, J., Dixon, R., & Ayub, N.D. (2016). Major cereal crops benefit from biological nitrogen fixation when inoculated with the nitrogen-fixing bacterium *Pseudomonas protegens* Pf-5 X940. *Environmental Microbiology*, 18(10), 3522-3534. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13376>
12. Ha, S., Vankova, R., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., & Tran, L.S.P. (2012). Cytokinins: Metabolism and function in plant adaptation to environmental stresses. *Trends in Plant Science*, 17(3), 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.01.005>
13. Hafiza, B.S., Ishaque, W., Akhtar, M., Shani, M.Y., Azmat, M., Bauerle, W.L., Rahimi, M., & Ashraf, M.Y. (2025). Optimizing nitrogen management for sustainable wheat production in semi-arid subtropical environments: Impact on growth, physio-biochemical, and yield attributes. *Nitrogen*, 6(2), 36. <https://doi.org/10.3390/nitrogen6020036>
14. Han, A.Q., Chen, S.B., Zhang, D.D., Liu, J., Zhang, M.C., Wang, B., Xiao, Y., Liu, H.T., Guo, T.C., Kang, G.Z., & Li, G.Z. (2025). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nutrient uptake in wheat under low potassium stress. *Plants*, 14(9), 1288. <https://doi.org/10.3390/plants14091288>
15. Ibiang, Y.B., Mitsumoto, H., & Sakamoto, K. (2017). Bradyrhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi modulate manganese, iron, phosphorus, and polyphenols in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under excess zinc. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.011>
16. Koprna, R., Humplík, J.F., Špišček, Z., Bryksová, M., Zatloukal, M., Mik, V., Novák, O., Nisler, J., & Doležal, K. (2021). Improvement of tillering and grain yield by application of cytokinin derivatives in wheat and barley. *Agronomy*, 11(1), 67. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010067>
17. Li, C., Shi, Y., Yu, Z., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2025). Optimizing nitrogen application strategies can improve grain yield by increasing dry matter translocation, promoting grain filling, and improving harvest indices. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1565446. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565446>
18. Mahfouzi, S.A., Akbari, M., Chichi, A., Sanjari, M.S., Abedi Oskooi, G., Aminzadeh, A., & Rezaei, M. (2009). Pishgam, new wheat cultivar of bread for cultivation in end season normal and low irrigation in cold climate.

Journal of Breeding Seedlings and Seed, 25(3), 513-516. (In Persian with English abstract).

19. McIntyre, K.E., Bush, D.R., & Argueso, C.T. (2021). Cytokinin regulation of source-sink relationships in plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, 12, 677585. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.677585>
20. Nabizadeh, E. (2023). Effect of nitrogen fertilizer, inoculation with mycorrhizal fungus and foliar spraying of cytokinin on yield and yield components of wheat Sardari cultivar under rainfed conditions. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 10(3), 65-79. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22124/jms.2023.7675>
21. Nie, W., He, Q., Guo, H., Zhang, W., Ma, L., Li, J., & Wen, D. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi: Boosting crop resilience to environmental stresses. *Microorganisms*, 12(12), 2448. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12122448>
22. Nisler, J., Kopečný, D., Pěkná, Z., Končítíková, R., Koprna, R., Murvanidze, N., Werbrouck, S.P.O., Havlíček, L., De Diego, N., Kopečná, M., Wimmer, Z., Briozzo, P., Moréra, S., Zalabák, D., Spíchal, L., & Strnad, M. (2021). Diphenylurea-derived cytokinin oxidase/dehydrogenase inhibitors for biotechnology and agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 72(2), 355-370. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa437>
23. Sobhani, S.M.A., Alavifazel, M., Ardakani, M.R., Modhej, A., & Lak, S. (2022). Influence of mycorrhizal fungi and biochar on nitrogen use efficiency correlated with yield and yield components of wheat. *Plant Science Today*, 9(3), 509-517. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.14719/pst.1486>
24. Szczepanek, M., Jaśkiewicz, B., & Kotwica, K. (2018). Response of barley to seaweed biostimulant application. *Research for Rural Development*, 2, 49-54. <https://doi.org/10.22616/rdd.24.2018.050>
25. Tang, H., Hassan, M.U., Feng, L., Nawaz, M., Shah, A.N., Qari, S.H., Liu, Y., & Miao, J. (2022). The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 919166. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>
26. Ullah, S., Shakir, L., Sohail, M., & Subhan, G. (2025). Integrated use of biofertilizers and zinc sulphate for enhanced growth and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Spectrum of Emerging Sciences*, 3(8), 219-232. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1677956>
27. Vejan, P., Abdullah, R., Khandiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules*, 21(5), 573. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>
28. Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., & Reddy, S.P.P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*, 12(17), 3102. <https://doi.org/10.3390/plants12173102>
29. Yang, D., Li, Y., Shi, Y., Cui, Z., Luo, Y., Zheng, M., Chen, J., Li, Y., Yin, Y., & Wang, Z. (2016). Exogenous cytokinins increase grain yield of winter wheat cultivars by improving stay-green characteristics under heat stress. *Plos One*, 11(5), e0155437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155437>
30. Yeh, S.Y., Chen, H.W., Ng, C.Y., Lin, C.Y., Tseng, T.H., Li, W.H., & Ku, M.S.B. (2015). Down-regulation of cytokinin oxidase 2 expression increases tiller number and improves rice yield. *Rice*, 8(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12284-015-0043-8>
31. Zhou, Q., Xue, J., Guo, L., Li, L., Zhang, Z., Huang, M., Cai, J., Wang, X., Zhong, Y., Dai, T., & Jiang, D. (2024). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on uptake, partitioning, and use efficiency of nitrogen in wheat. *Field Crops Research*, 306, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109244>



Temperature Zoning: a Guide to Crop Management in Isfahan Province

Amir Hooshang Jalali¹ ^{*} and Alireza Nikouei¹

1- Horticulture Crops Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

2- Economic, Social and Extension Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

(*- Corresponding author's Email: ah.jalali@areeo.ac.ir)

Received: 02-12-2025
Revised: 13-02-2026
Accepted: 21-02-2026
Available Online: 10-05-2026

How to cite this article:

Jalali, A. H., & Nikouei, A. (2026). Temperature zoning: a guide to crop management in Isfahan province. *Journal of Agroecology*, 17(4), 645-658. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96805.1261>

Introduction

The temperature varies across species, but there is a linear relationship between growing degree days and plant growth rate. Growing degree-days (GDD) are used to classify plants by flowering date, estimate harvest maturity, and predict the time between two growth stages. In a study in Ardabil, the findings indicated that the temperature of the region is correlated with the temperature of corn growth, and based on the zoning, about 16% of the total area of the province was identified as very suitable, 22% as suitable, 27% as moderate, and about 35% as unsuitable for corn cultivation. The aim of this study is to zone GDD and identify ranges of cumulative growth degree days that can be used to more accurately determine the amount of crop cultivation and their production management across different counties of Isfahan province.

Materials and Methods

In this study, 30-year daily temperature statistics (minimum, maximum, and average) from 33 meteorological stations were used to calculate GDD and growing season length (1984 to 2021). To calculate thermal units, the first growing season length for temperature thresholds of 5°C and 10°C was extracted using the Jillosy coding method (March 3rd with code 1 and March 2nd with code 365), and then the growing season thermal units were calculated by subtracting the average daily temperature from the base temperature. Finally, zoning maps were drawn for each indicator in ArcGIS. Despite differences in definitions of the growing season, temperature and humidity play a special role in all of them. According to the definition of the World Meteorological Organization's Commission on Climatology/Climate Variability, the length of the growing season is the time interval between the first period after July 10th in which the average daily temperature is above 5°C for at least 6 consecutive days (as the starting point) and the first 6-day period with an average daily temperature below 5°C (as the ending point).



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96805.1261>

Results and Discussion

The cities of Isfahan province were divided into 4 groups based on a base temperature of 5°C, which corresponded to a range of 2500 to 5000 degree-days of temperature growth. This number changed from 1500 to 4500 degrees Celsius for a base temperature of 10°C. Based on a base temperature of 5°C, the shortest growing season length of 114-200 days was observed in the western and southern regions of the province, and the longest growing season length of 365-331 days was observed in the northern and eastern regions of Isfahan province. For a base temperature of 10°C, a similar geographical trend was observed, with the difference that the range of the shortest and longest growing season lengths was (72-140) and (306-261) days, respectively. The correlation coefficient between GDD at base temperatures of 5 and 10°C and longitude was significant at the 95% level. The relationship between the temperature units received during the growing season and longitude at the base temperatures of 5 and 10 °C increased from west in east of Isfahan province.

Conclusion

The results showed that in Isfahan province, the length of the growing season and the absorbed GDD increase as one moves from west to east. Moving from north to south of the province was an inverse relationship. Based on the base temperature of 5°C, the shortest growing season length is 114-200 days in the western and southern regions of the province, and the longest growing season length is 331-365 days in the northern and eastern regions of Isfahan province. For the base temperature of 10°C, a similar geographical trend is observed, with the difference that the range of the shortest and longest growing season lengths is (72-140) and (306-261) days, respectively. Considering the base temperatures of 5°C and 10°C, the cities of Isfahan province are classified in the range of 1500-5000 GDD. With the help of this classification, it is possible to predict the time of occurrence of weeds and pests in different regions. Certainly, by combining temperature zoning with other elements required by each plant (soil, topography and precipitation), more comprehensive information will be obtained.

Keywords: Base temperature, Growing season, Growth Degree Days, Phenology

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۶۴۵-۶۵۸

پهنه‌بندی دمایی: راهنمای مدیریت گیاهان زراعی در استان اصفهان

امیر هوشنگ جلالی^{۱*} و علیرضا نیکوئی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

چکیده

دما، عامل مهمی در فنولوژی رشدونمو گیاهان و در نتیجه عملکرد آن‌ها است. در این مطالعه از آمار دمایی روزانه ۳۰ ساله (حداقل، حداکثر و متوسط) ۳۳ ایستگاه هواشناسی برای محاسبه درجه-روز-رشد (GDD) و طول فصل رشد (طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۰) استفاده شد. شهرهای استان اصفهان براساس دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد در چهار گروه قرار گرفتند که طیفی از ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ درجه روز رشد دما دریافت می‌نمایند. این عدد برای دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دامنه‌ای از ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌یابد. براساس دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد، کوتاه‌ترین طول دوره رشد معادل ۲۰۰-۱۱۴ روز در مناطق غرب و جنوب استان و بلندترین طول دوره رشد معادل ۳۶۵-۳۳۱ روز در مناطق شمال و شرق استان اصفهان دیده می‌شوند. برای دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد، روند جغرافیایی مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که دامنه کوتاه‌ترین و بلندترین طول دوره فصل رشد به ترتیب برابر ۱۴۰-۷۲ و ۳۰۶-۲۶۱ روز می‌باشد. ضریب همبستگی بین GDD در دماهای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد و طول جغرافیایی در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار بود. رابطه بین واحدهای دمایی دریافتی در طول فصل رشد و طول جغرافیایی در دمای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد از غرب به شرق استان اصفهان افزایشی بود. با توجه به نتایج این مطالعه، با طبقه‌بندی GDD در مناطق مختلف استان اصفهان، می‌توان مدیریت تاریخ کاشت محصولات زراعی را بهبود بخشید و پیش‌بینی مناسبی برای امکان ورود ارقام جدید در تناوب‌های زراعی داشت.

واژه‌های کلیدی: درجه-روز-رشد، دمای پایه، فصل رشد، فنولوژی

مقدمه

رشدونمو گیاهان به دما بستگی دارد که این عامل تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی است. مقدار انرژی گرمایی که یک موجود زنده در طول یک دوره زمانی دریافت می‌کند، اغلب به صورت «درجه-روز-رشد» بیان می‌شود. عدم دریافت دمای کافی در طی رشد باعث کاهش عملکرد محصولاتی مثل برنج (*Oryza sativa* L.)، سویا (*Glycine max* L.) و آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)

می‌گردد (Parthasarathi et al., 2013). این مفهوم معمولاً در کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی برای پیش‌بینی رویدادها و برنامه‌ریزی فعالیت‌های مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Dhillon et al., 2020). هر محصولی برای شروع جوانه‌زنی و رشد خود به دمای حداقلی نیاز دارد که در کمتر از آن، رشد متوقف می‌شود. این دما برای هرگونه متفاوت است، اما یک رابطه خطی بین درجه-روز-رشد و سرعت رشد گیاه وجود دارد (Zhang et al., 2018). درجه-روز-رشد برای طبقه‌بندی گیاهان از نظر تاریخ گل‌دهی آن‌ها، برای تعیین رسیدگی جهت برداشت و پیش‌بینی مدت‌زمان بین دو مرحله رشد استفاده می‌شود (Eduardo Daniel et al., 2020).

در مطالعات قبلی سعی شده است که دستورالعمل‌هایی برای مدیریت بهینه رشد با توجه به دمای پایه مراحل مختلف رشد گیاه

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
۲- بخش تحقیقات اقتصادی، اجتماعی و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: a.h.jalali@areeo.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96805.1261>

ارائه شود. مطالعات انجام‌شده بیانگر آن است که زمان‌های بهینه برای تعیین میزان کمبود نیتروژن در گندم زمستانه را می‌توان با در نظر گرفتن درجه روز رشد پیش‌بینی کرد (Dhillon et al., 2020). علاوه بر این، گروه‌بندی ۴۶ رقم ذرت (*Zea mays* L.) در سه گروه نیاز زیاد، نیاز متوسط و نیاز کم با در نظر گرفتن درجه روز رشد میسر شده است (Dan et al., 2020). درجه روز رشد برای ارزیابی مناسب بودن یک منطقه برای تولید یک محصول خاص نیز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، در مطالعه یک دوره آماری ۲۳ ساله در ایران درجه روز-رشد برای فصل رشد گیاه در دمای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از شاخص گرما محاسبه و نتایج نشان داد که براساس دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد، روند افزایشی درجه روز رشد از جنوب به شمال و از غرب به شرق کشور و براساس دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد، درجه روز رشد جنوب به شمال کاهش و از غرب به شرق افزایش داشت (Fatemi & Dehghan, 2019). به‌طور مشابه، درجه روز رشد برای ۴۰ ایستگاه هواشناسی توزیع‌شده در سراسر یونان محاسبه شد و نتایج نشان داد که با وجود شبکه اقلیمی پراکنده، امکان ایجاد نقشه‌هایی با وضوح بالا با نتایج آماری معنی‌دار برای برنامه‌ریزی کشاورزی وجود دارد (Matzarakis et al., 2007).

در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی مناسب محصولات کشاورزی برای توسعه کشاورزی هوشمند و سازگاری سامانه‌های کشاورزی در عصر تغییرات جهانی ضروری است (Hachisuca et al., 2023). یافته‌های مطالعه‌ای در اردبیل حاکی از آن بود که دمای منطقه با دمای رشد ذرت همبستگی داشت و براساس پهنه‌بندی انجام‌شده، از کل مساحت استان، حدود ۱۶ درصد بسیار مناسب، ۲۲ درصد مناسب، ۲۷ درصد متوسط و حدود ۳۵ درصد برای کاشت ذرت نامناسب تشخیص داده شد (Ghanbari et al., 2021). از جمله استفاده‌های دیگر در پهنه‌بندی عوامل اقلیمی، تعیین میزان سازگاری کشاورزی با تغییرات اقلیمی است. با توجه به اثرات تغییر اقلیم، تنظیم مجدد فصل رشد بهینه می‌تواند به‌طور قابل توجهی کاهش تلفات عملکرد را در شرایط آب‌وهوایی آینده به همراه داشته باشد که پهنه‌بندی عوامل اقلیمی، زمینه را برای این بازتعریف فراهم می‌کند (Cui & Xie, 2022). با تغییر شرایط اقلیمی، شاخص‌های اقلیم کشاورزی که در این زمینه‌ها مسئول هستند نیز دچار تغییر می‌شوند. اولین یخبندان پاییزی، آخرین یخبندان بهاری و طول فصل رشد از جمله این شاخص‌ها هستند. محاسبه درجه روز رشد دریافتی در مناطق مختلف

با توجه به دمای پایه مورد نیاز تعیین‌کننده نحوه مدیریت این شاخص‌ها در شرایط پیش رو است (Kukul & Irmak, 2018). این نکته به‌ویژه برای محصولات بهاره و تابستانه که دوره رشد محدودی دارند و با تنش‌های گرمایی نیز مواجه هستند بیشتر حائز اهمیت است. برخلاف بسیاری از کشورها، استان‌های ایران دارای گستره جغرافیایی وسیعی هستند، به‌گونه‌ای که می‌توان با محاسبه و پهنه‌بندی درجه روز رشد و طول دوره رشد، امکان مدیریت بهتر کشت محصولات را فراهم نمود. استان اصفهان با وسعت ۱۰۵۹۳۷ کیلومترمربع و با تنوع اقلیمی گسترده، یکی از استان‌های کشاورزی ایران است. پهنه‌بندی دما با استفاده از آمارهای دمایی درازمدت می‌تواند برای مدیریت اراضی کشاورزی این استان استفاده شود. هدف از این مطالعه، پهنه‌بندی درجه روز رشد و شناسایی محدوده‌هایی از درجه روز رشد تجمعی است که با استفاده از آن می‌تواند با دقت بیشتری تناوب کشت محصولات و مدیریت تولید آن‌ها را در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان تعیین نمود. علاوه بر این با انجام این پژوهش، امکان ورود موفق گیاهان جدید به چرخه تناوب زراعی مناطق مختلف استان فراهم می‌شود. به عبارت ساده، وقتی محدوده دمایی دریافتی برای نقاط مختلف جغرافیایی مشخص شود، می‌توان به این سؤالات پاسخ داد که ورود محصولات با طول دوره رشد متفاوت در چه مناطقی از استان اصفهان میسر است؟ با توجه به محدوده دمایی مشخص‌شده برای هر ناحیه می‌توان تعیین کرد که کشت ارقام مختلف با چه احتمالی با تنش‌های محیطی مثل سرمای آخر فصل رشد مواجه می‌گردند؟ با توجه به فنولوژی رشد آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز که هرکدام نیاز دمایی متفاوتی در طول رشد دارند، احتمال طغیان هرکدام برای نواحی مختلف استان چقدر است؟ با توجه به تغییر شرایط اقلیمی و با توجه به محدوده‌های دمایی مشخص‌شده برای هر منطقه، احتمال اثرات منفی اقلیمی ناشی از تغییرات دما برای هر ناحیه از استان چه میزان خواهد بود؟

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از آمار دمای روزانه ۳۰ ساله (حداقل، حداکثر و متوسط) ۳۳ ایستگاه هواشناسی برای محاسبه درجه روز رشد و طول فصل رشد (۱۳۶۳ تا ۱۴۰۰) استفاده شد. موقعیت مربوط به ۲۴ شهرستان استان اصفهان در شکل ۱ و نام و مختصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای محاسبه درجه روز-رشد، اولین طول

یک دوره شش روزه با حداقل دمای کمتر از پنج و کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

درجه روز رشد با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Dan et al., 2020).

$$GDD = \sum n [(T_{Max} + T_{Min})/2] - T_{base} \quad (۱) \text{ معادله}$$

که در آن، T_{Max} و T_{Min} : به ترتیب دمای بیشینه و دمای کمینه و T_{base} : دمای پایه است. دماهای ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به عنوان بیشینه آستانه تحمل برای محاسبه درجه-روز-رشد برای دماهای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد لحاظ گردید.

نتایج و بحث

دامنه دوره رشد براساس دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد از ۲۴۹/۵۱ تا ۳۵۹/۳۷ روز به ترتیب در دو شهرستان (بوئین و میاندشت) و (خور و بیابانک) متغیر بود (جدول ۲). بر این اساس، کمترین (۲۹۲۵/۲۴) و بیشترین (۶۰۴۸/۵۸) مقدار درجه روز رشد به ترتیب مربوط به این دو شهرستان بوده است. تفاوت مضاعف در جذب واحد دما، ظاهر کشاورزی این دو شهر را کاملاً متفاوت کرده و نشان از تنوع آب‌وهوایی گسترده در یک استان دارد.

فصل رشد برای آستانه‌های دمایی ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از روش کدگذاری Jillosy (سوم اسفند با کد ۱ و دوم اسفند با کد ۳۶۵) استخراج شد (Frich et al., 2002). اعداد کدگذاری شده به نرم‌افزار GIS Ver.10.8 منتقل و پس از تهیه نقشه رقومی در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی برای هر شاخص در ArcGIS Pro 3.6 ترسیم شد.

با وجود تعاریف مختلف از دوره رشد، دما و رطوبت در تمامی این تعاریف نقش ویژه‌ای دارند. طبق تعریف کمیسیون اقلیم‌شناسی/تغییرپذیری آب‌وهوای سازمان جهانی هواشناسی، طول دوره رشد، فاصله زمانی بین اولین دوره پس از ۱۰ تیرماه است که در آن حداقل برای شش روز متوالی میانگین دمای روزانه بالای پنج درجه سانتی‌گراد باشد (به عنوان نقطه شروع) و اولین دوره شش روزه با میانگین دمای روزانه کمتر از پنج درجه سانتی‌گراد (به عنوان نقطه خاتمه) است (Fatemi & Dehghan, 2019). در مطالعه حاضر، شروع فصل رشد برای گونه‌های سازگار با دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد (گیاهان سرمادوست) و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (گیاهان گرمادوست)، به ترتیب یک دوره شش روزه با حداقل دمای روزانه برابر یا بیشتر از پنج و برابر و بیشتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. پایان فصل رشد برای گیاهان سرمادوست و گرمادوست به ترتیب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان‌های مختلف استان اصفهان
Fig. 1- Geographical location of different cities in Isfahan province

جدول ۱- ایستگاه‌های شبکه هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه
Table1- Stations of the meteorological network used in this study

ایستگاه Station	عرض جغرافیایی Latitude (°N)	طول جغرافیایی Longitude (°E)	ارتفاع Elevation (m)	ایستگاه Station	عرض جغرافیایی Latitude (°N)	طول جغرافیایی Longitude (°E)	ارتفاع Elevation (m)
خور و بیابانک Khur and Biabanak	845.00	55.08	33.76	قم Ghom	879.10	50.88	34.63
نائین Naeen	1549.00	53.09	32.86	اصفهان Esfahan	1550.40	51.65	32.61
اردستان Ardestan	1252.40	52.38	33.39	کیوتر آباد Kabootar Abad	1545.00	51.51	32.31
کاشان Kashan	982.30	51.45	33.96	شهرضا Shahreza	1845.20	51.81	31.98
نطنز Natanz	1684.90	51.89	33.52	سمیرم Semirrom	2274.00	51.57	31.33
داران Daran	2290.00	50.37	32.96	قمصر Gamsar	899.90	52.36	35.24
نجف آباد Najaf Abad	1649.00	51.38	32.60	شاهین شهر و میمه Shahin Shahr and Meymeh	1980.00	51.14	33.41
گلپایگان Golpayegan	1870.00	50.28	33.48	ورزنه Varzaneh	1250.00	51.62	32.40
خوانسار Khansar	2300.00	50.32	33.23	یاسوج Yasooj	1816.30	51.55	30.69
دهاقان Dehaghan	1960.00	50.97	33.08	یزد Yazd	1230.20	54.28	31.90
ربات Robat	1188.00	55.55	33.01	آبادیه Abadeh	2030.00	52.61	31.19
فریدون شهر Fereyduh Shahr	2490.00	50.03	32.93	اراک Arak	2054.00	50.95	32.83
چادگان Chadegan	2150.00	50.65	33.62	الیگودرز Aligoodarz	2022.10	49.70	33.40
سمنان Semnan	1127.00	53.42	35.58	ایزه Ezeh	1702.80	49.78	34.07
شرق اصفهان Esfahan-East	1543.00	51.87	32.66	بروجن Borujen	2260.00	51.29	31.97
شهرکرد Shahrekord	2048.90	50.83	32.29	چوپانان Chupanan	912.00	54.38	33.62
مبارکه Mobarakeh	1690.00	51.45	32.35	-	-	-	-

شهرستان‌ها، طول دوره رشد و واحد دمای جذب‌شده بین این دو شهر قرار دارد. حضور محصولات زراعی در یک منطقه و عملکرد مورد انتظار به‌میزان جذب دما در آن منطقه بستگی دارد (Dan et al., 2020). با توجه به مقادیر درجه روز رشد، امکان مدیریت زمان برداشت (Eduardo Daniel et al., 2020) استفاده از کودهای شیمیایی (De Notaris et al., 2018)، مهار علف‌های هرز (Otto et al., 2007) و مهار آفات گیاهی (Crimmins et al., 2020) وجود

در شهرستان بوئین و میاندشت، انواع محصولات سردسیری مانند اسپرس (*Onobrychis sativa* L.)، نخود (*Cicer arietinum* L.)، عدس (*Lens esculinaris* L.) و درختانی مانند سیب (*Malus domestica* L.) کشت می‌شود، درحالی‌که در شهرستان خور و بیابانک، محصولات گرمادوست مانند گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) و درختانی مانند خرما (*Phoenix dactylifera* L.) قابل مشاهده است. در سایر

دارد.

گیاهانی مانند گوجه‌فرنگی (*Solanum Lycopersicum* L.)، فلفل (*Capsicum annuum* L.)، لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.)، پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) و خربزه (*Cucumis melo* L.) گیاهانی گرمادوست هستند (دمای پایه ≤ 10 درجه سانتی‌گراد). طول دوره رشد و میانگین درجه روز رشد مورد نیاز در شهرهای مختلف استان اصفهان با دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد در **جدول ۲** ارائه شده است. براساس دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد، کمترین و بیشترین طول دوره رشد به‌ترتیب در فریدون‌شهر (۱۸۲/۶۱ روز) و خور و بیابانک (۲۸۹/۵۷ روز) مشاهده شده است. درجه روز رشد در این دو شهر به‌ترتیب ۱۶۱۲/۱۹ و ۴۴۱۷/۱۱ بود. اگر بخواهیم مثالی کاربردی در استفاده از این اعداد ارائه دهیم، می‌توان گفت که با توجه به میانگین درجه روز رشد به‌دست‌آمده، کشت دیررس ارقام ذرت در چادگان، بوئین و میان دشت، فریدن، فریدون‌شهر و سمیرم امکان‌پذیر نیست و در سایر موارد؛ به عبارت دیگر، این گیاه نمی‌تواند چرخه زندگی خود را در این شهرها کامل کند. نتیجه یک پژوهش با استفاده از داده‌های روزانه دمای هوا برای دمای پایه ۵، ۰ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای دوره ۱۹۵۱-۲۰۱۰ در شهرستان نشان داد که فراوانی و شدت یخبندان بهاره، به‌ویژه در طول گل‌دهی یا حتی در طول رسیدن گیاهان، همچنان تهدیدی برای برداشت محصولات در هر دو بخش شرقی و غربی کشور است (Wypych et al., 2017). خلاصه داده‌های درجه روز رشد براساس دماهای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد در **جدول ۳** ارائه شده است. براساس دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد، شهرهای استان اصفهان در چهار گروه ($GDD = 2500$) تا $GDD > 5000$) قرار دارند و براساس دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد در سه گروه ($GDD = 4500-1500$) قرار می‌گیرند. این گروه‌بندی به کاربران کمک می‌کند تا با توجه به موقعیت، تصمیمات مدیریتی مناسب بگیرند. براساس این گروه‌بندی در شهرستان‌هایی مثل بوئین و میان دشت، فریدن، سمیرم، خوانسار، تیران و کرون، چادگان، سمیرم و فریدون‌شهر گیاهانی که دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد دارند، فقط زمانی می‌توانند کشت شوند که نیاز دوره رشدی آن‌ها بیش از ۳۵۰۰ درجه روز رشد نباشد. برای گیاهان با دمای پایه پنج

درجه سانتی‌گراد و نیاز دمایی ۳۵۰۰-۲۵۰۰ درجه روز رشد، شهرستان‌هایی مثل دهقان، شاهین‌شهر و میمه، شهرضا، نجف‌آباد، گلپایگان، برخوار، خمینی‌شهر، لنجان، مبارکه، نطنز و کاشان مناسب هستند. شهرستان‌های دهقان، شاهین‌شهر و میمه، شهرضا، نجف‌آباد، گلپایگان، برخوار، خمینی‌شهر لنجان، مبارکه، نطنز و کاشان می‌توانند پذیرای گیاهانی با دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد در محدوده ۴۵۰۰-۳۵۰۰ درجه روز رشد باشند. گیاهان با نیاز دمایی بیش از ۵۰۰۰ درجه روز رشد و دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد فقط در دو شهرستان خور و بیابانک و آران و بیدگل قابلیت کشت دارند. گیاهانی که دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد و در چرخه زندگی خود نیاز دمایی بیش از ۴۵۰۰ درجه روز رشد دارند، در هیچ یک از شهرستان‌های استان اصفهان قابلیت کشت ندارند. اعداد **جدول ۳** برای بررسی دوره بحرانی مهار علف‌های هرز، آفات و کشت گیاهان دارویی قابل استفاده است. با استفاده از همین روش و استفاده از داده‌های درجه روز رشد، مناطق مختلف لهستان به سه بخش گروه‌بندی شد و راهنمای مدیریت سرماهای بهاره باغ‌های بادام ارائه گردید (Wypych et al., 2017). در مطالعه دیگری در ایالات‌متحده، با توجه به مراحل مختلف فنولوژی آفات غالب، جدول راهنمای درجه روز رشد ارائه شد. اعتبارسنجی اولیه براساس مشاهدات برای مراحل تخم و پوره برخی از آفات نشان داد که جداول و نقشه‌های راهنمای درجه روز رشد ۹۳ درصد یا بیشتر دقت داشتند. از زمان انتشار این نقشه‌ها توسط متخصصان مراقبت از درختان و جنگلبانان در سراسر ایالات‌متحده پذیرفته شده‌اند (Crimmins et al., 2020). در **شکل ۲**، پهنه‌بندی درجه روز رشد برای طول فصل رشد در دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد (a) و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (b) در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

روند تغییرات درجه روز رشد بیانگر آن است که بیشترین واحد دما در شمال و شمال شرق و کمترین آن مربوط به غرب و جنوب استان بود. تهیه نقشه‌های درجه روز رشد می‌تواند به کشاورزان در تصمیم‌گیری بلندمدت در مورد انتخاب ارقام محصول مطلوب کمک کند.

جدول ۲- ویژگی‌های طول فصل رشد و درجه روز رشد در دمای پنج و ۱۰ درجه سانتی‌گراد طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۰
 Table 2- Characteristics of the growing season length and growth degree day at 5 °C and 10 °C during the period 2022 to 2015

ایستگاه Station	5 °C			10 °C		
	درجه روز رشد (میانگین) Growth degree days (Means)	طول دوره رشد (روز) Growing season length (day)	ضریب تغییرات (درصد) Coefficients of variance (Percent)	درجه روز رشد (میانگین) Growth degree days (Means)	طول دوره رشد (روز) Growing season length (day)	ضریب تغییرات (درصد) Coefficients of variance (Percent)
آران و بیدگل Aran and Bidgol	6030.44	359.04	11.14	4401.53	289.13	10.94
اردستان Ardestan	5231.70	334.65	10.10	3730.44	269.00	11.14
اصفهان Esfahan	4516.56	308.95	8.44	3132.21	252.78	9.74
برخور Borkhar	4371.38	301.13	9.17	3008.00	247.95	10.57
بوئین و میان دشت Buein and Mian Dasht	2925.24	249.51	6.89	1811.32	193.84	7.70
تیران و کرون Tiran and Karvan	3454.78	268.68	9.86	2241.90	216.76	10.09
خمینی شهر Khomeini Shahr	4460.18	301.15	10.16	3082.16	246.62	11.32
خوانسار Khansar	3178.06	258.30	8.17	2015.61	205.08	9.37
خور و بیابانک Khur and Biabank	6048.58	359.37	12.19	4417.11	289.57	11.00
دهاقان Dehaghan	3529.21	272.07	8.54	2303.52	220.23	9.23
سمیرم Semirom	2917.22	248.92	6.90	1810.22	194.06	7.58
شاهین شهر و میمه Shahin shahr va Meimeh	3786.27	280.47	11.00	2518.04	228.03	10.24
شهرضا Shahreza	3608.13	274.24	8.87	2374.48	220.33	9.97
فریدن Fereidan	3020.33	254.03	6.89	1887.19	199.86	7.29
فریدون شهر Feridun Shahr	2657.35	236.84	7.84	1612.19	182.61	8.14
فلاورجان Falavarjan	4525.20	304.23	10.10	3137.01	244.65	9.19
کاشان Kashan	4381.62	304.18	12.09	3022.45	242.95	11.56
لنجان Lenjan	4005.60	290.23	10.94	2701.09	237.02	11.21
مبارکه Mobarake	4141.90	294.66	9.84	2815.53	238.65	10.34
نائین Naein	5703.00	349.33	13.44	4126.81	281.11	11.78
نجف آباد Najafabad	3801.30	281.24	7.54	2528.09	229.12	8.16
نطنز Natanz	4352.06	303.36	11.29	2999.28	243.42	12.19
چادگان Chadegan	3192.99	259.02	7.74	2027.96	206.38	8.64
کلیایگان Golpayegan	3778.77	281.48	9.09	2510.48	228.97	10.12

پهنه‌بندی درجه روز رشد برای یک منطقه کمک می‌کند تا فنولوژی رشد ارقام مختلف هر گیاه با منطقه مورد نظر تطابق داده شود. به عنوان مثال، در یک پژوهش براساس پهنه‌بندی درجه روز رشد، ۱۱ رقم انگور به دسته‌های زودرس، میان‌رس و دیررس طبقه‌بندی شدند. رسیدن میوه برای گروه‌های زودرس ۹-۷ روز، برای گروه‌های میان‌رس ۸-۴ روز و برای گروه‌های دیررس ۳-۱ روز متفاوت بود. در این پژوهش برای ارقام زودرس، میان‌رس و دیررس، دامنه تجمعی درجه روز رشد به ترتیب برابر ۱۵۳۰-۱۳۰۳، ۱۷۱۲-۱۶۱۷ و ۱۹۵۹-۱۹۱۲ درجه روز رشد بود (Gupta et al., 2020).

پهنه‌بندی طول فصل رشد در دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد (a) و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (b) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد، کوتاه‌ترین طول دوره رشد معادل ۲۰۰-۱۱۴ روز در مناطق غرب و جنوب استان و بلندترین طول دوره رشد معادل ۳۶۵-۳۳۱ روز در مناطق شمال و شرق استان اصفهان دیده می‌شوند. برای دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد، روند جغرافیایی مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که دامنه کوتاه‌ترین و بلندترین طول دوره فصل رشد به ترتیب برابر ۱۴۰-۷۲ و ۳۰۶-۲۶۱ روز می‌باشد. طول فصل رشد از شمال و شمال شرق به جنوب استان برای هر دو دمای پایه کاهش می‌یابد. شهرستان‌های آران و بیدگل، کاشان، اردستان، نایین، خور و بیابانک در شمال و شمال شرق بیشترین دوره رشد را دارند، اما مناطق خشک و کم بارش استان اصفهان را شامل می‌شوند. شهرهای نواحی غربی (بوئین و میان دشت، چادگان، فریدون‌شهر و فریدن) در مجاورت رشته‌کوه‌های زاگرس با ارتفاع زیاد و دمای پایین واقع شده‌اند و طبیعتاً در این وضعیت، طول دوره رشد در آن‌ها کوتاه می‌شود. اساساً طول دوره رشد (فصل رشد) می‌تواند جنبه‌های مختلفی داشته باشد که هر کدام معنای متمایزی دارند، مثلاً در یک تعریف، فصل رشد عبارت است از دوره زمانی که طی آن، یک گیاه یا بخشی از آن در واقع رشد می‌کند و بافت جدید تولید می‌کند، در تعریف دیگر، فصل رشد دوره‌ای است که توسط نشانگرهای رشدی یعنی نشانگرهای فنولوژیکی تعریف می‌شود و یا دوره‌ای که طی آن گیاهان می‌توانند به‌طور بالقوه براساس معیارهای هواشناسی رشد کنند. تعریف اخیر نسبت به سایر تعاریف دقیق‌تر بوده و مبنای پهنه‌بندی دمای قرار می‌گیرد (Körner et al., 2023). از آنجایی که عناصر آب‌وهوایی به‌طور

گسترده‌ای در فضا متفاوت هستند، پهنه‌بندی یکی از ابزارهای مفید برای شناسایی قابلیت‌های زمین جهت تخصیص به بهترین و سودآورترین انواع بهره‌وری است. این نوع پهنه‌بندی می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های کلان در یک کشور یا یک استان کمک کند. به عنوان مثال، پهنه‌بندی اراضی کشاورزی ایران براساس دما، بارش، توپوگرافی و خاک نشان داد که مناطق بهینه برای کشت نخود دیم و نخود آبی به ترتیب تنها ۴/۱۵ و ۸/۴۴ درصد از اراضی بودند (Nabati et al., 2020).

هیچ ضریب همبستگی معنی‌داری بین درجه روز رشد و عرض جغرافیایی در دماهای ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده نشد و تأثیری بر درجه روز رشد نداشت (شکل ۴ a, b). ضریب همبستگی بین درجه روز رشد در دماهای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد و طول جغرافیایی در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار بود (شکل ۴ c, d). رابطه بین درجه روز رشد در طول فصل رشد و طول جغرافیایی در ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درجه سانتی‌گراد از غرب به شرق افزایشی بود. به‌طور مشابه، برای ایران، رابطه بین درجه روز رشد جذب‌شده و عرض جغرافیایی برای دمای پایه پنج درجه سانتی‌گراد معنی‌دار نبود، اما این رابطه برای طول جغرافیایی از غرب به شرق برای هر دو دمای پایه ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درجه سانتی‌گراد معنی‌دار و افزایشی بود (Fatemi & Dehghan, 2019).

نتیجه‌گیری

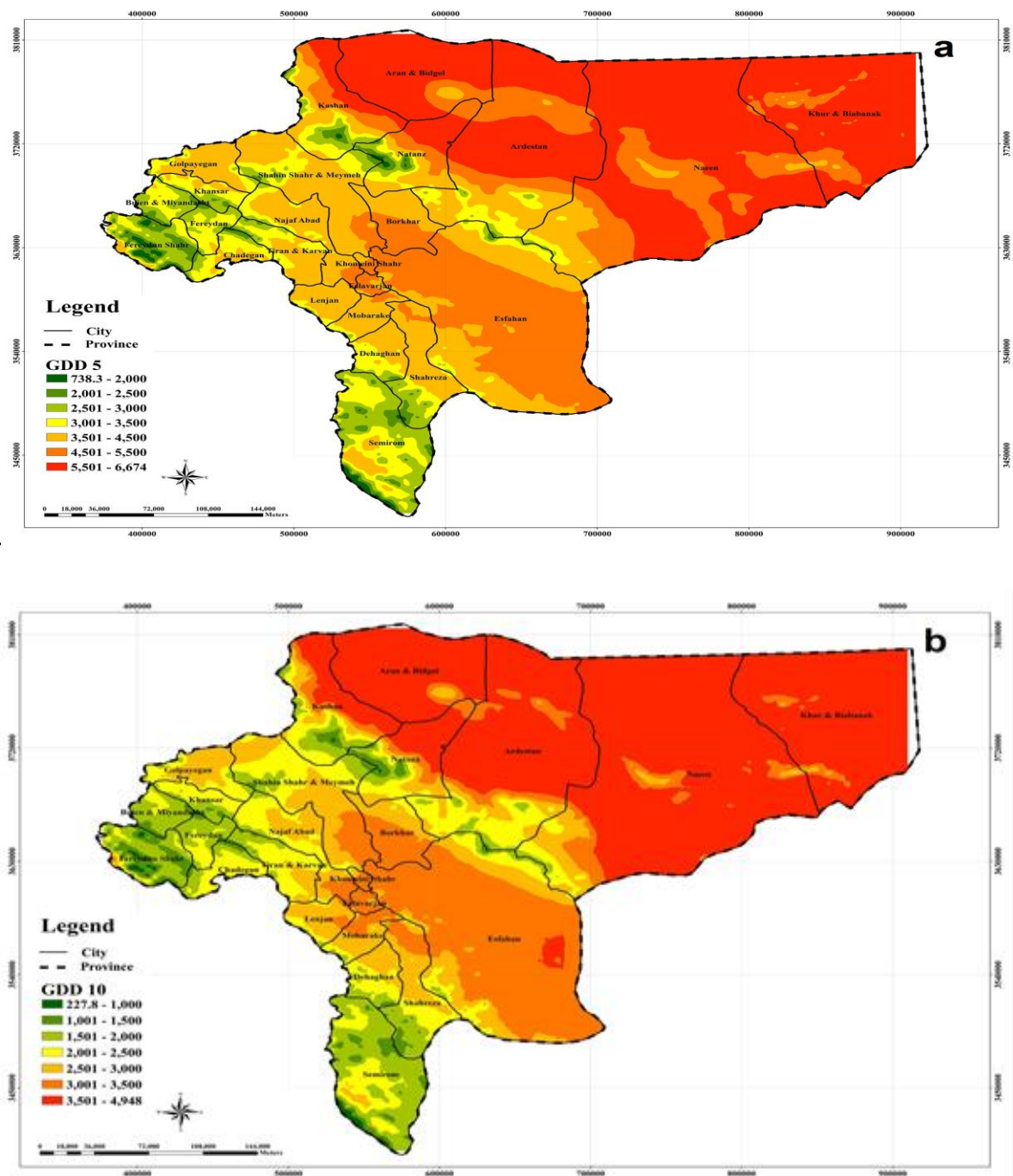
نتایج نشان داد که در استان اصفهان با حرکت از غرب به شرق، طول دوره رشد و درجه روز رشد جذب‌شده افزایش می‌یابد. حرکت از شمال به جنوب استان یک رابطه معکوس بود. براساس دمای پایه ۵ پنج سانتی‌گراد، کوتاه‌ترین طول دوره رشد معادل ۲۰۰-۱۱۴ روز در مناطق غرب و جنوب استان و بلندترین طول دوره رشد معادل ۳۶۵-۳۳۱ روز در مناطق شمال و شرق استان اصفهان دیده می‌شوند. برای دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد روند جغرافیایی مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که دامنه کوتاه‌ترین و بلندترین طول دوره فصل رشد به ترتیب برابر ۷۲-۱۴۰ و ۳۰۶-۲۶۱ روز می‌باشد. با توجه به دمای پایه ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درجه سانتی‌گراد، شهرهای استان اصفهان در محدوده ۱۵۰۰ تا بیش از ۵۰۰۰ درجه روز رشد طبقه‌بندی می‌شوند. این طبقه‌بندی به ما کمک می‌کند تا ارقام مناسب هر

منطقه را با دقت کافی شناسایی کنیم. علاوه‌بر این با توجه به اطلاعات اولیه واحد دمایی مورد نیاز برای رشد علف‌های هرز و آفات و به کمک این طبقه‌بندی می‌توان زمان بروز علف‌های هرز و آفات را در مناطق مختلف پیش‌بینی کرد. مطمئناً با تلفیق پهنه‌بندی دمایی با سایر عناصر مورد نیاز هر گیاه (خاک، توپوگرافی و بارش)، اطلاعات جامع‌تری به دست خواهد آمد.

جدول ۳- طبقه‌بندی درجه روز رشد و طول فصل رشد در دماهای پایه ۵ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای شهرستان‌های استان اصفهان

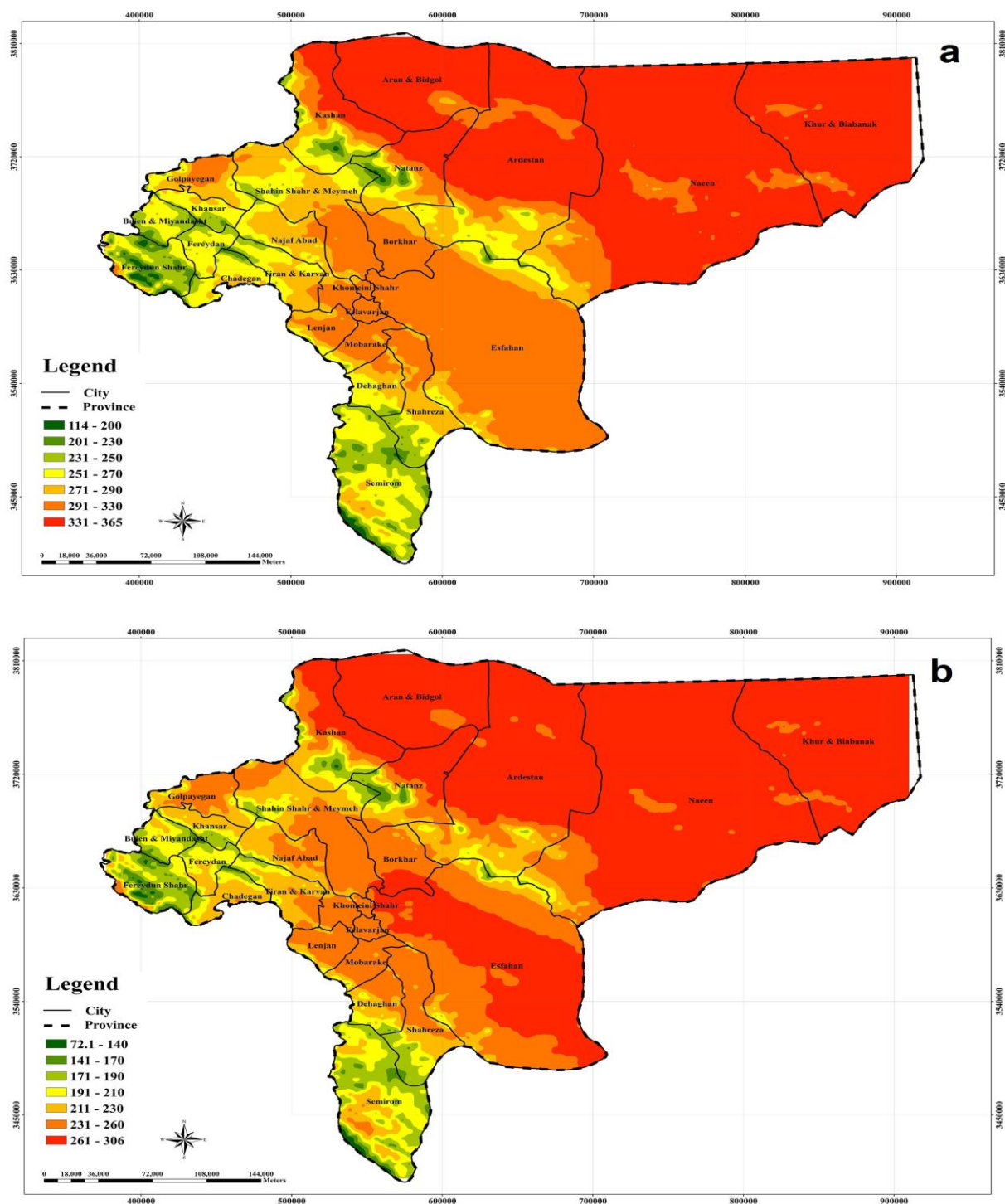
Table 3- Classification of GDD of the growing season length at base temperatures of 5 and 10 °C for the cities of Isfahan province

درجه روز رشد GDD	دمای پایه Base temperature (°C)	
	5	10
1500- 2500	-----	بویین و میان دشت، تیران و کرون، خوانسار، دهاقان، سمیرم، شهرضا، فریدن، فریدون شهر، چادگان Buein and Mian Dasht, Tiran and Karvan, Khansar, Dehaghan, Semirom, Shahreza, Fereidan, Feridun Shahr, Chadegan
2500- 3500	بویین و میان دشت، تیران و کرون، سمیرم، فریدن، فریدون شهر، چادگان، خوانسار Buein and Mian Dasht, Tiran and Karvan, Semirom, Fereidan, Feridun Shahr, Chadegan, Khansar	اصفهان، برخوار، خمینی شهر، شاهین شهر و میمه، فلاورجان، کاشان، لنجان، مبارکه، نجف آباد، نطنز، گلپایگان Esfahan, Borkhar, Khomeini Shahr, Shahin shahr and Meimeh, Falavarjan, Kashan, Lenjan, Mobarake, Najafabad, Natanz, Golpayegan
3500- 4500	دهاقان، شاهین شهر و میمه، شهرضا، نجف آباد، گلپایگان، برخوار، خمینی شهر، لنجان، مبارکه، نطنز، کاشان Dehaghan, Shahin shahr and Meimeh, Shahreza, Najafabad, Golpayegan, Borkhar, Khomeini Shahr, Lenjan, Mobarake, Natanz, Kashan	آران و بیدگل، اردستان، خور و بیابانک، ناین Aran and Bidgol, Ardestan, Khur and Biabank, Naein
4500- 5500	اردستان و اصفهان Ardestan, Esfahan	-----
>5000	آران و بیدگل، خور و بیابانک، ناین Aran and Bidgol, Khur and Biabank, Naein	-----



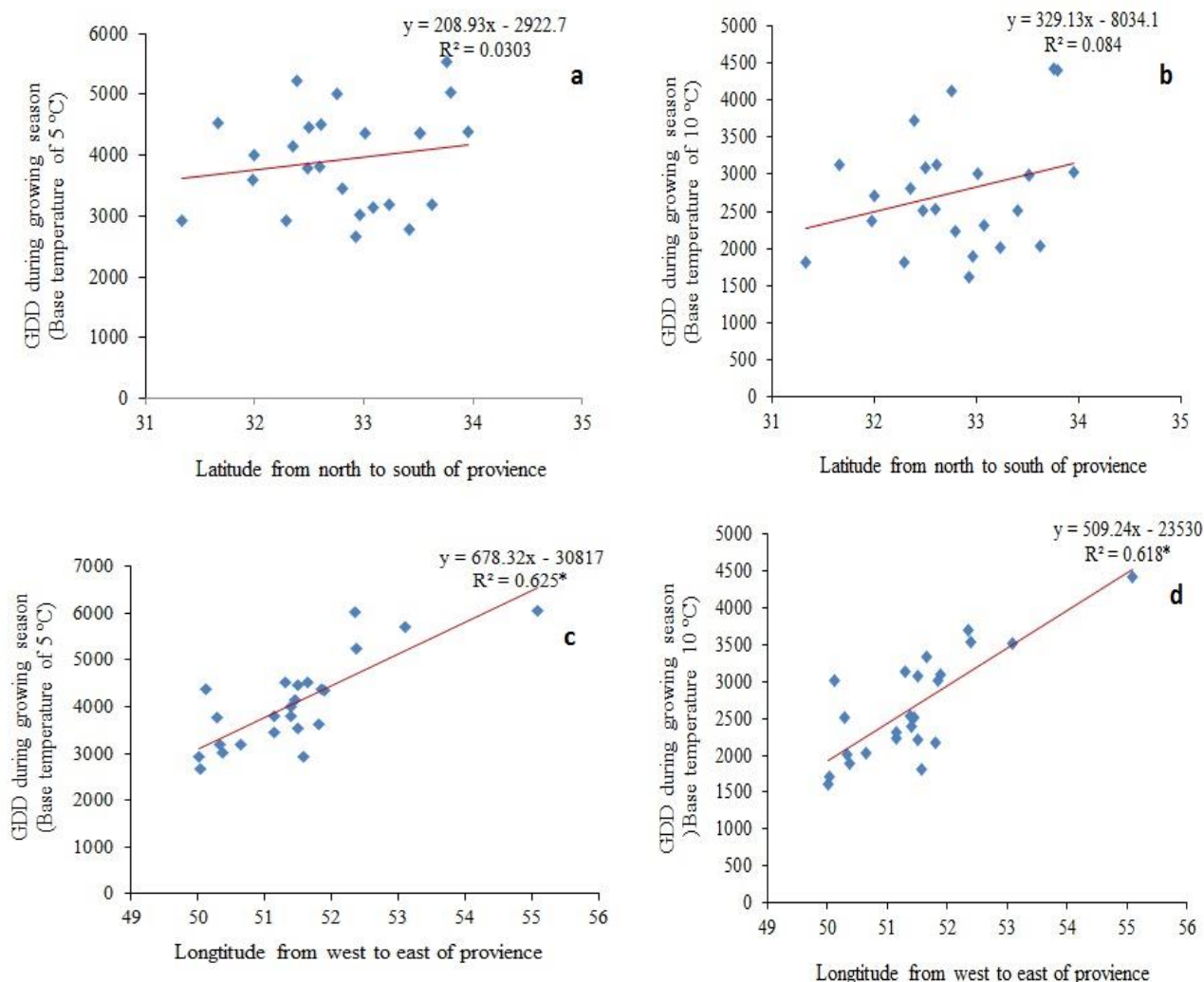
شکل ۲- پهنه‌بندی ایستگاه‌های منتخب در استان اصفهان براساس درجه روز رشد، دمای پایه ۵ درجه سانتی‌گراد (a) و دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد (b)

Fig. 2- Zoning map of selected stations in Isfahan province based on a growth degree day, base temperature of 5 °C (a), and base temperature of 10 °C (b)



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی ایستگاه‌های منتخب در استان اصفهان براساس فصل رشد، دمای پایه ۵ درجه سانتی‌گراد (a) و دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد (b)

Fig. 3- Zoning map of selected stations in Isfahan province based on a growing season, base temperature of 5 °C (a), and base temperature of 10 °C (b)



شکل ۴- رابطه بین درجه روز رشد و عرض جغرافیایی در (a) ۵ درجه سانتی‌گراد و (b) ۱۰ درجه سانتی‌گراد و بین درجه روز رشد و طول جغرافیایی در ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درجه سانتی‌گراد.

Fig. 4- Relationship between GDD and latitude at (a) 5 °C and (b) 10 °C, and between GDD and longitude at (c) 5 °C and (d) 10 °C

* همبستگی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است.

* Correlation is significant at the 5 percent probability level.

اعتبار لازم جهت این پژوهش سپاسگزاری نمایند

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان برای همکاری و تأمین

References

1. Crimmins, T. M., Gerst, K. L., Huerta, D. G., Marsh, R. L., Posthumus, E. E., Rosemartin, A. H., Switzer, J., Weltzin, J. F., Coop, L., Dietschler, N., & Herms, D. A. (2020). Short-term forecasts of insect phenology inform pest management. *Annals of the Entomological Society of America*, 113, 139-148. <https://doi.org/10.1093/aesa/saz026>
2. Cui, X., & Xie, W. (2022). Adapting agriculture to climate change through growing season adjustments: Evidence

- from corn in China. *American Journal of Agricultural Economics*, 104(1), 249-272. <https://doi.org/10.1111/ajae.12227>
3. Dan, W. A. N. G., Li, G. R., Zhou, B. Y., Ming, Z. H. A. N., Cao, C. G., Meng, Q. F., Fei, X. I. A., Wei, M. A., & Ming, Z. H. A. O. (2020). Innovation of the double-maize cropping system based on cultivar growing degree days for adapting to changing weather conditions in the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 19, 2997-3012. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63213-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63213-0)
 4. De Notaris, C., Rasmussen, J., Sørensen, P., & Olesen, J. E. (2018). Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 255, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.009>
 5. Dhillon, J. S., Figueiredo, B. M., Eickhoff, E. M., & Raun, W. R. (2020). Applied use of growing degree days to refine optimum times for nitrogen stress sensing in winter wheat. *Agronomy Journal*, 112, 537-549. <https://doi.org/10.1002/agj2.20007>
 6. Eduardo Daniel, B. A., Huyghe, C., & Javier Francisco, E. Q. (2020). Flowering dynamics in alfalfa (*Medicago sativa* L.) based on heat units. *AGRO Productividad*, 13(12). <https://doi.org/10.65342/s005632-45-06765>
 7. Fatemi, M., & Dehghan, H. (2019). Growing degree days zonation of plants in Iran according to thermal characteristics. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 877-886. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02868-y>
 8. Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193-212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
 9. Ghanbari, R., Sobhani, B., Aghaee, M., Oshnooei Nooshabadi, A., & Safarianzengir, V. (2021). Monitoring and evaluation of effective climate parameters on the cultivation and zoning of corn agricultural crop in Iran (case study: Ardabil province). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 387. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06807-y>
 10. Gupta, N., Pal, R. K., Kour, A., & Mishra, S. K. (2020). Thermal unit requirement of grape (*Vitis vinifera* L.) varieties under south western Punjab conditions. *Journal of Agrometeorology*, 22, 469-476. <https://doi.org/10.54386/jam.v22i4.456>
 11. Hachisuca, A. M. M., Abdala, M. C., & de Souza, H. (2023). Growing degree-hours and degree-days in two management zones for each phenological stage of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biometeorology*, 67, 1169-1183. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02486-4>
 12. Körner, C., Möhl, P., & Hiltbrunner, E. (2023). Four ways to define the growing season. *Ecology Letters*, 26(8), 1277-1292. <https://doi.org/10.1111/ele.14260>
 13. Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018) US agro-climate in 20th century: Growing degree days, first and last frost, growing season length, and impacts on crop yields. *Scientific Reports*, 8(1), 6977. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25212-2>
 14. Matzarakis, A., Ivanova, D., Balafoutis, C., & Makrogiannis, T. (2007). Climatology of growing degree days in Greece. *Climate Research*, 34, 233-240. <https://doi.org/10.3354/cr00690>
 15. Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M. (2020). GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 117, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>
 16. Otto, S., Masin, R., Chiste, G., & Zanin, G. (2007). Modelling the correlation between plant phenology and weed emergence for improving weed control. *Weed Research*, 47, 488-498. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00594.x>
 17. Parthasarathi, T., Velu, G., & Jeyakumar, P. (2013). Impact of crop heat units on growth and developmental physiology of future crop production: A review. *Research & Reviews: A Journal of Crop Science and Technology*, 2(1), 1-11.
 18. Wypych, A., Sulikowska, A., Ustrnul, Z., & Czekierda, D. (2017). Variability of growing degree days in Poland in response to ongoing climate changes in Europe. *International Journal of Biometeorology*, 61, 49-59. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1190-3>
 19. Zhang, H., Liu, S., Regnier, P., & Yuan, W. (2018). New insights on plant phenological response to temperature revealed from long-term widespread observations in China. *Global Change Biology*, 24, 2066-2078. <https://doi.org/10.1111/gcb.14002>

Contents

Calibration, Optimization, and Evaluation of the Integrated NSGA-II and XGBoost Algorithm for Predicting Corn (<i>Zea mays</i> L.) Yield Performance under the Influence of Biofertilizers: A Novel Approach in Low-Input Agriculture	537
Mohsen Jahan and Mehdi Nassiri-Mahallati	
Evaluation of the SSM_Wheat Model for Estimating the Phenological Stages of Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) under Different Planting Date and Cultivar Conditions	561
Ali Rahemi Karizeki, Faramarz Sayyedi, Habibollah Soughi, Arazqlych Moarfy, Mojtaba Salehi Shaikhi ¹ and Saeed Bagherikia	
Morphophysiological and Growth Responses of Sesame (<i>Sesamum indicum</i> L.) Plant to Combined Use of Biochar and Chemical Fertilizer	575
Sajjad Toorany, Masoumeh Naeemi, Abbas Biabani and Ali Nakhzari Moghaddam	
The Effect of Different Tillage Systems on Forage Quality in a Triticale (<i>×Triticosecale Wittmack</i>)–Vetch (<i>Vicia sativa</i> L.) Intercropping	591
Arman Jamali, Gholamreza Heidari, Yousef Sohrabi and Zahed Sharifi	
Evaluation of Diversity, Self-sufficiency and Economic Productivity Indicators in Agricultural Systems of Two Villages in Meshginshahr County	611
Aydin Tobeh, Morteza Barmaki, Roghayeh Jahdi and Nasrin Sadat Seyedmohammadi	
The Effects of Inoculation Levels with Biofertilizer, Chemical Fertilizer, and Cytokinin Foliar Application on Yield and Yield Components of Pishgam Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	629
Esmail Nabizadeh and Khadijeh Ahmadi	
Temperature Zoning, a Guide to Crop Management in Isfahan Province	645
Amir Hooshang Jalali and Alireza Nikoofe	

Journal of Agroecology (Quarterly)

Vol. 17

No. 4

2026

Published by: Ferdowsi University of Mashhad

Editor in charge: Prof. Behnam Kamkar

Editor in chief: Prof. Parviz Rezvani Moghaddam

Internal manager: Dr. Surur Khorramdel

Editorial Board:

Dr. Amir Bezaad Bazrgar, Post Doctorate Fellow, University of Guelph, Canada

Prof. Morteza Barmaki, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili

Prof. Mohammad Pessarakli, Research Professor, School of Plant Sciences, the University of Arizona

Prof. Hemmatolla Pirdashti, Genetic & Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan

Dr. Amir Hajjarpoor, Research scientist, Julius Kühn-Institut, Germany

Dr. Surur Khorramdel, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Adel Dabagh Mohammadi Nasab, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

Prof. Mehdi Rastgoo, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Parviz Rezvani Moghaddam, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Ahmad Zare Feizabadi, Agricultural Research Institute of Khorasan Razavi

Prof. Saeed Zehtab Salmasi, New Mexico State University, USA

Dr. Hamid Shahandeh Research Soil Scientist, Soil and Crop Sciences Department, Texas A & M University

Dr. Omid Abdi, Department of Forest Sciences, University of Helsinki Finland

Prof. Farshid Ghaderifar, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources

Prof. Mansour Ghorbanpour, Faculty of Agriculture, University of Arak

Prof. Behnam Kamkar, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Prof. Mohammad Reza Moradi Telavat, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Khuzestan

Dr. Ahmad Mosaddegh Manschadi, Associate Professor, Institute of Agronomy, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Prof. Mehdi Nassiri Mahallati, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad Press

Address: Journal of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad,

P.O. Box: 91775-1163, Mashhad, Iran

Tel: +98-51- 38804654

Fax: +98-51-38787430

Email: agroecology@um.ac.ir

Web site: <http://agry.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 17 No. 4

Winter 2026

Journal of Agroecology (Quarterly)

ISSN: 2008-7713

Contents

- Calibration, Optimization, and Evaluation of the Integrated NSGA-II and XGBoost Algorithm for Predicting Corn (*Zea mays* L.) Yield Performance under the Influence of Biofertilizers: A Novel Approach in Low-Input Agriculture** 537
Mohsen Jahan and Mehdi Nassiri-Mahallati
- Evaluation of the SSM_Wheat Model for Estimating the Phenological Stages of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Planting Date and Cultivar Conditions** 561
Ali Rahemi Karizeki, Faramarz Sayyedi, Habibollah Soughi, Arazqlych Moarfy, Mojtaba Salehi Shaikhi I and Saeed Bagherikia
- Morphophysiological and Growth Responses of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Plant to Combined Use of Biochar and Chemical Fertilizer** 575
Sajjad Toorany, Masoumeh Naeemi, Abbas Biabani and Ali Nakhzari Moghaddam
- The Effect of Different Tillage Systems on Forage Quality in a Triticale (*×Triticosecale Wittmack*) –Vetch (*Vicia sativa* L.) Intercropping** 591
Arman Jamali, Gholamreza Heidari, Yousef Sohrabi and Zahed Sharifi
- Evaluation of Diversity, Self-sufficiency and Economic Productivity Indicators in Agricultural Systems of Two Villages in Meshginshahr County** 611
Aydin Tobeh, Morteza Barmaki, Roghayeh Jahdi and Nasrin Sadat Seyedmohammadi
- The Effects of Inoculation Levels with Biofertilizer, Chemical Fertilizer, and Cytokinin Foliar Application on Yield and Yield Components of Pishgam Wheat (*Triticum aestivum* L.)** 629
Esmail Nabizadeh and Khadijeh Ahmadi
- Temperature Zoning, a Guide to Crop Management in Isfahan Province** 645
Amir Hooshang Jalali and Alireza Nikooue