



Sensitivity analysis of rainfed wheat yield to climatic indices using the interpretable XGBoost–SHAP model under climate change conditions: Zanjan Province case study

Sajjad Asgary¹ | Zahra Aghashariatmadari^{2✉}

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: sajjadasgary@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: zagha@ut.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Aug. 23, 2025

Revised: Nov. 4, 2025

Accepted: Feb. 7, 2026

Published online: March. 2026

Keywords:

Length of Growing Period;
Effective Rainfall;
Rainfall Distribution Pattern;
Trend Analysis;
Machine Learning

This study aimed to assess the sensitivity of rainfed wheat yield to climatic indices over the period 1990–2023 across three representative stations in Zanjan Province, Iran —Zanjan, Khodabandeh, and Khorramdarreh. The Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm, interpreted via SHapley Additive exPlanations (SHAP) values, was employed to identify the most influential climatic variables and to determine their optimal and yield-limiting thresholds. The methodological framework integrated four key approaches that have been seldom considered simultaneously in previous research: (i) estimating the length of the growing period (LGP) based on updated FAO guidelines, (ii) aligning climatic data with the actual crop growing period, (iii) focusing on the temporal distribution patterns of climatic indices rather than solely on their cumulative or seasonal means, and (iv) performing interactive and interpretable climatic analysis. The results indicated increasing trends in both yield and LGP across all three sites, although the LGP trend in Zanjan was statistically non-significant ($P > 0.1$). SHAP analysis revealed that moisture-related variables were the primary determinants of yield in all sites. Specifically, effective rainfall (ERGP: 1.8–2.9 mm/day) in Khodabandeh, the number of precipitation days (N_{pr}^{GP} : 4–31 days) in Zanjan, and uniform rainfall distribution (URGP: 11.2–31 mm) in Khorramdarreh emerged as the most influential positive drivers. Conversely, yield limitations were associated with shortened growing periods (LGP: 50–68 days) in Khodabandeh, poorly distributed rainfall (UR/ER: 5.4–10 mm) in Khorramdarreh, and a low number of precipitation days in Zanjan.

Cite this article: Asgary, S., Aghashariatmadari, Z., (2026) Sensitivity analysis of rainfed wheat yield to climatic indices using the interpretable XGBoost–SHAP model under climate change conditions: Zanjan Province case study. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1),1-20. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.401180.670000>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.401180.670000>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) in semiarid regions is highly sensitive to climate variability, and extreme temperatures along with changing precipitation patterns threaten its yield. Accurate analysis of the climate–yield relationship, identification of key influencing indices, and determination of optimal and limiting ranges for rainfed wheat yield are essential. Many previous studies relied on annual or fixed-season climate averages, which overlooked actual crop exposure during the true growing period (GP). To address these limitations, this study calculated all climatic indices exclusively for the real GP of rainfed wheat across three major production districts in Zanjan Province, Iran (Zanjan, Khodabandeh, and Khorramdarreh). The objectives were to: (i) identify key climatic factors driving yield variability, (ii) determine their location-specific optimal and limiting ranges, and (iii) provide actionable insights for targeted adaptation strategies.

Materials and Methods

This study aimed to assess the sensitivity of rainfed wheat yield to climatic indices over the period 1990–2023 across three representative stations in Zanjan Province, Iran — Zanjan, Khodabandeh, and Khorramdarreh. The Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm, interpreted via SHapley Additive exPlanations (SHAP) values, was employed to identify the most influential climatic variables and to determine their optimal and yield-limiting thresholds. The relationship between key climatic indices and dryland wheat yield was evaluated using this advanced machine-learning model. The research methodology comprised four main steps: (i) estimation of the length of the growing period (LGP) based on the updated FAO guidelines, (ii) aligning all datasets with the actual plant growing period, (iii) analyzing the temporal distribution of climatic indices, and (iv) performing an interactive and interpretable climatic index analysis. This approach enabled the identification of location-specific key variables, quantification of their optimal ranges, and improved understanding of regional yield variability.

Results and Discussion

In this analysis, the influential variables for each region were identified, and their optimal and limiting ranges—as well as thresholds—were quantified, providing clearer insight into the drivers of yield variability at the regional scale. Across all three study regions, both rainfed wheat yield and the length of the growing period (LGP) showed increasing trends; however, the trend in **Zanjan** was not statistically significant ($p > 0.1$). At the regional scale, correlation analysis between yield and agro-climatic indices during the growing period indicated that moisture-related indices were more strongly associated with yield than thermal indices. This pattern was consistent with the **XGBoost–SHAP** results, which also highlighted the predominance of moisture variables in explaining yield variability. In all stations, the number of precipitation days (N_{pr}^{GP}) exhibited the highest positive correlation with yield. Neither thermal indices nor LGP were significantly correlated with yield in Zanjan or Khodabandeh. By contrast, in Khorramdarreh, mean minimum temperature (T_{\min}^{GP} , $r = 0.52$, $p < 0.01$) and mean growing period temperature ($\bar{T}_{\text{mean}}^{GP}$, $r = 0.37$, $p < 0.1$) were both significantly and positively correlated with yield. The XGBoost–SHAP modeling outcomes broadly agreed with the linear correlation analysis, although differences arose in the ranking of dominant moisture related indices. This integrated approach identified effective rainfall ($ER_{GP} = 1.8\text{--}2.9 \text{ mm day}^{-1}$; mean daily rainfall during the growing period; threshold: 1.8 mm day^{-1}) in **Khodabandeh**, the number of precipitation days ($N_{pr}^{GP} = 32\text{--}42$ days; threshold: 32 days) in Zanjan, and the uneven rainfall index ($UR_{GP} \geq 9.0 \text{ mm}$; threshold: 9.0 mm) in **Khorramdarreh** as the primary determinants of yield. Moreover, $ER_{GP} = 1.8\text{--}2.9 \text{ mm day}^{-1}$ in **Khodabandeh**, optimal rainfall distribution ($UR/ER(GP) = 10.3\text{--}12.4$), and optimal mean temperature ($\bar{T}_{\text{mean}}^{GP} = 9.0\text{--}9.2 \text{ }^\circ\text{C}$) in **Khorramdarreh** emerged as the most influential factors enhancing yield. Conversely, shorter growing periods (LGP = 50–68 days) in **Khodabandeh**, uneven rainfall distribution ($UR_{GP} = 1.1\text{--}8.7 \text{ mm}$) in **Khorramdarreh**, and low $N_{pr}^{GP} = 4\text{--}31$ days in **Zanjan** were the main limiting factors.

Conclusion

This study demonstrated that rainfed wheat yield variability across the three regions is driven by a limited set of agro-climatic indices, each with distinct optimal and limiting ranges. The identified thresholds — such as ER_{GP} , N_{pr}^{GP} , and UR_{GP} —revealed that yield responses are inherently non-linear and threshold-dependent, which is a pattern clearly captured through the machine learning framework enhanced by SHAP interpretation. These findings highlight the necessity of region-specific management strategies that align planting and water resource practices with the identified optimal climatic windows, thereby improving resilience and yield stability under variable climatic conditions.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

S. Asgary: Gathering the experimental data, Data curation, Software; Methodology; Investigation, Conceptualization, Methodology, Writing-Reviewing and Editing, Formal analysis, Analyzing the experimental data, *Z. Aghashariatmadari: Supervision, Investigation, Conceptualization, Methodology, Analyzing the experimental data, Validation, Visualization, Writing-Original draft preparation, Writing-Reviewing and Editing. All authors have read and

agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the author.

Acknowledgements

The research was supported by the University of Tehran. The authors would like to express their special thanks to the vice chancellor for research affairs.

Ethical considerations

The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

All authors declare that they have no conflict of interest.

تحلیل حساسیت عملکرد گندم دیم نسبت به شاخص‌های اقلیمی با استفاده از مدل یادگیری ماشین تفسیرپذیر XGBoost-SHAP تحت شرایط تغییر اقلیم: مطالعه موردی استان زنجان

سجاد عسگری^۱ | زهرا آقاشریعتمداری^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: sajjadasgary@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران. رایانامه: zagha@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف تحلیل حساسیت عملکرد گندم دیم به شاخص‌های اقلیمی، طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۴۰۲ در سه ایستگاه زنجان، خدابنده و خرم‌دره انجام شد. برای این منظور، از مدل یادگیری ماشین Extreme Gradient Boosting (XGBoost) به همراه الگوریتم تفسیرپذیری SHAP استفاده گردید تا مهم‌ترین شاخص‌های اقلیمی تأثیرگذار شناسایی و بازه‌های بهینه و محدودکننده آن‌ها بر عملکرد مشخص شوند. روش‌شناسی پژوهش در چهار بخش تدوین شد: برآورد طول دوره رشد بر اساس دستورالعمل به‌روزشده FAO، انطباق داده‌ها با دوره واقعی رشد گیاه، تحلیل تغییرات توزیع زمانی شاخص‌های اقلیمی و انجام تحلیل تعاملی و تفسیرپذیر شاخص‌های اقلیمی. نتایج نشان داد در هر سه منطقه، عملکرد گندم و طول دوره رشد روند افزایشی داشتند، اما روند طول دوره رشد در زنجان از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P > 0.1$). در هر سه ایستگاه، متغیرهای مرتبط با رطوبت مهم‌ترین شاخص‌های تعیین‌کننده عملکرد بودند، به طوری که در خدابنده بارش موثر (ERGP)، در زنجان تعداد روزهای بارش (N_{pr}^{GP}) و در خرم‌دره شاخص ناهمواری بارش (URGP) است. افزون بر این، بارش موثر ($1.8 \leq ERGP \leq 2.9 \text{ mm/Day}$) در خدابنده، توزیع بهینه بارش ($10.3 \leq Ur/Er (GP) \leq 12.4$) در خرم‌دره و دمای میانگین بهینه ($9.2 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mean}^{GP} \leq 9.2$) موثرترین شاخص‌های افزایش عملکرد در مقابل کوتاهی طول دوره رشد ($50 \leq LGP \leq 68 \text{ Day}$) در خدابنده، توزیع نامناسب بارش ($1.1 \leq URGP \leq 8.7 \text{ mm}$) در خرم‌دره و تعداد روزهای بارش کم ($4 \leq N_{pr}^{GP} \leq 31 \text{ Day}$) در زنجان به‌عنوان مهم‌ترین محدودیت‌ها شناخته شدند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

طول دوره رشد (FAO)،

بارش موثر،

روند،

توزیع بارش،

یادگیری ماشین

استناد: عسگری؛ سجاد، آقاشریعتمداری؛ زهرا، (۱۴۰۵) تحلیل حساسیت عملکرد گندم دیم نسبت به شاخص‌های اقلیمی با استفاده از مدل یادگیری ماشین تفسیرپذیر XGBoost SHAP تحت شرایط تغییر اقلیم: مطالعه موردی استان زنجان، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۱)، ۲۰-۱.



© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.401180.670000>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.401180.670000>

مقدمه

زراعت دیم، به ویژه کشت گندم به عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، نقش بسیار مهمی در تأمین امنیت غذایی جهانی ایفا می‌کند و غذای اصلی نزدیک به ۴۰ درصد جمعیت جهان را فراهم می‌سازد (Xue et al., 2019; Li et al., 2023). در بین محصولات کشت دیم در ایران، گندم مهم‌ترین محصول استراتژیک محسوب می‌شود. بر اساس گزارش‌های آماری سال‌های اخیر، حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد سطح زیر کشت گندم کشور به صورت دیم بوده و این محصول سهم قابل توجهی (۴۰ تا ۴۷ درصد) در تأمین کالری مصرفی روزانه ایرانیان دارد (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲؛ وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱).

محصولات زراعی تحت تأثیر عواملی چون شاخص‌های اقلیمی، روش‌های مدیریت مزرعه و ویژگی‌های ذاتی هر محصول قرار می‌گیرد (Ashfaq et al., 2024; Van Klompenburg et al., 2020). در این راستا تحلیل حساسیت عملکرد گندم دیم تحت شرایط تغییر اقلیم برای پایداری کشاورزی و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی حیاتی است (Ashfaq et al., 2024). با توجه به گزارش جدید هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, AR6, 2021)، الگوهای زمانی و مکانی بارش در سناریوهای اقلیمی آینده با عدم قطعیت زیادی همراه می‌باشد (He et al., 2013). این عدم قطعیت، به ویژه در نحوه توزیع متغیرهای مؤثر بر عملکرد گندم دیم می‌تواند سبب نوسانات جدی در عملکرد و تهدید امنیت غذایی شود. یافته‌های (Hu et al., 2025) در دشت شمالی چین نشان داد که کشاورزی دیم نسبت به تغییرات بارندگی حساسیت بیشتری دارد و افزایش بارش قادر است بخشی از اثرات منفی گرمایش را جبران کرده و عملکرد را بهبود بخشد. به طور مشابه، Liu et al. (2024) گزارش کردند که تغییرات در الگوی بارش سالانه، موجب نوسانات بین‌ساله قابل توجه عملکرد گندم شده و بیشترین اثر منفی را در مراحل بحرانی رشد محصول بر جای می‌گذارد. همچنین، مطالعه‌ای فراگیر در سطح جهانی بر روی عملکرد گندم دیم در بازه زمانی ۱۹۵۱ تا ۱۹۸۶ در ۵۷ کشور نشان داد که تغییرات زمانی بارش مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر نوسان عملکرد است (Mulye and Singh, 1991). در مجموع، شواهد علمی متعدد تأکید می‌کنند که در ارزیابی نقش عوامل رطوبتی بر عملکرد گندم دیم، تمرکز صرف بر مقدار تجمعی بارش کافی نیست؛ بلکه توزیع زمانی بارش در طول دوره رشد می‌تواند در میان شاخص‌های اقلیمی نقشی تعیین‌کننده ایفا کند. از دیگر ملاحظات مهم در تحلیل حساسیت عملکرد، ضروری است که متغیرهای اقلیمی نظیر بارش و دما صرفاً بر اساس طول دوره واقعی رشد گیاه محاسبه شوند؛ زیرا شاخص‌های اقلیمی فراتر از دوره رشد اثر مستقیم بر عملکرد محصول ندارند (Zhang et al., 2025; Elsayed et al., 2025).

در زمینه انتخاب مدل برای تحلیل حساسیت، شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که رویکردهای غیرخطی یادگیری ماشین برتری قابل توجهی نسبت به مدل‌های خطی دارند. الگوریتم‌هایی همچون جنگل تصادفی (RF) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی عملکرد گندم نشان داده‌اند، که این برتری ناشی از توانایی آن‌ها در شناسایی و مدل‌سازی تعاملات پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی، شاخص‌های سنجش‌ازدور و فرآیندهای رشد گیاه است (Li et al., 2024; Li et al., 2025). در این میان، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل XGBoost نسبت به مدل‌های خطی و بسیاری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مرسوم، دقت بالاتری در پیش‌بینی عملکرد گندم داشته و از پایداری بیشتری در شرایط اقلیمی متغیر بهره‌مند است. این مدل با بهره‌گیری از بهینه‌سازی گرادیان، قادر است وابستگی‌های پیچیده و غیرخطی بین شاخص‌های اقلیمی و عملکرد محصول را به طور دقیق شناسایی کرده و خطای پیش‌بینی را به شکل معناداری کاهش دهد. توانایی XGBoost در شناسایی تعاملات چندمتغیره و اهمیت‌دهی بهینه به ویژگی‌ها از مهم‌ترین دلایل برتری آن گزارش شده است (Liu et al., 2024; Moreno Sánchez et al., 2025). طی سال‌های اخیر، توسعه مدل‌های مبتنی بر داده و افزایش دسترسی به اطلاعات اقلیمی بلندمدت، زمینه بررسی دقیق‌تر اثرات زمانی و مکانی متغیرهای اقلیمی بر عملکرد گندم را فراهم کرده است. مطالعاتی در این زمینه که می‌توان موارد ذیل را اشاره کرد.

سبحانی و همکاران (۱۳۹۶) در یک مطالعه دوساله بر اراضی تپه‌ماهوری زاگرس مرکزی، با استفاده از مدل ANN و روش تحلیل حساسیت Hill به شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد گندم دیم پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات بارش در بازه‌های زمانی مشخص در طول فصل رشد نقش تعیین‌کننده‌ای در تبیین تغییرات عملکرد دانه و زیست‌توده هوایی دارد. این تغییرات بارش نه تنها در هفته‌های ابتدایی رشد بلکه در بخش‌های میانی و پایانی دوره رشد نیز بر عملکرد تأثیر معنی‌دار گذاشتند، که اهمیت توزیع زمانی بارش را در کنار مجموع بارش سالانه برای مناطق دیم‌زار نشان می‌دهد.

Yousefi et al. (2024) با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت و با مدل رگرسیون خطی چندگانه، تأثیر عوامل اقلیمی نظیر بارش و دما بر عملکرد گندم و جو در اقلیم‌های مختلف کشور را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که در مناطق خشک به دلیل بارندگی کمتر، عملکرد محصولات دیم کاهش می‌یابد و همچنین دقت مدل‌های پیش‌بینی عملکرد در این مناطق بالاتر است. این مطالعه اهمیت توجه به شرایط اقلیمی در مدیریت کشاورزی و ارتقای پایداری تولید را مورد تأکید قرار داد.

Moreno Sánchez (2025) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی غیرخطی XGBoost، RF و رگرسیون بردار پشتیبان^۱ (SVR) عملکرد دانه گندم را پیش‌بینی کردند. آن‌ها با ترکیب داده‌های سنجش از دور و متغیرهای زراعی از جمله شاخص برداشت و زیست توده به مدلسازی پرداختند؛ نتایج نشان داد که مدل مبتنی بر XGBoost نتایج بهتری دارد. بر اساس این پژوهش، حذف متغیرهای اقلیمی کم‌اهمیت، نقش مهمی در بهبود عملکرد مدل دارد. در مقایسه با مدل‌های خطی و سایر الگوریتم‌های رایج، XGBoost دقت بالاتر، و توانایی برتر در شناسایی تعاملات چندمتغیره را نشان داد.

Xu et al. (2025) تأثیر تغییرپذیری اقلیمی بر عملکرد گندم را با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت مبتنی بر شاخص Sobol و الگوریتم XGBoost ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که گندم به خشکسالی‌های طولانی‌مدت و کم‌شدت حساسیت بالایی دارد؛ به‌گونه‌ای که شاخص بارش بلندمدت به‌تنهایی توانست ۳۶ درصد از پراکندگی عملکرد را توضیح دهد، در حالی که متغیرهای اقلیمی کوتاه‌مدت حدود نیمی از تغییرات باقیمانده را تبیین کردند. رویکرد مبتنی بر XGBoost در این پژوهش دقت پیش‌بینی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی ارائه داد و به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی قدرتمند برای شناسایی شاخص‌های اقلیمی کلیدی در تولید گندم معرفی شد.

Haseeb et al. (2025) با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی خطی (LASSO، Ridge) و غیرخطی (RF، SVR) و ترکیب داده‌های سنجش از دور و اقلیمی، به پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه پرداختند. نتایج نشان داد مدل غیرخطی RF با دقت بالاتر توانست تعاملات پیچیده بین شاخص‌ها را شناسایی کند و شاخص‌های GNDVI و SPEI بیشترین اهمیت را در پیش‌بینی داشتند، در حالی که متغیرهای مرتبط با دما و سرعت باد سهم نسبتاً کمی در تغییرات عملکرد داشتند.

Liu et al. (2025) در یک مطالعه جهانی با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های مدل‌فرایندی و روش رگرسیون آستانه‌ای، اثر افزایش دما را بر عملکرد چندین محصول کشاورزی شامل گندم، برنج، ذرت و سویا بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دما به‌طور کلی عملکرد محصولات را کاهش می‌دهد و این کاهش پس از عبور از آستانه‌های مشخص دما شدت بیشتری می‌یابد. برای گندم، افزایش ۱ درجه سلسیوس دما پیش از آستانه ۲/۳۸ درجه موجب کاهش ۶/۱ درصدی و پس از آن موجب کاهش ۸/۲ درصدی عملکرد شد. این یافته‌ها بیانگر حساسیت بالای عملکرد گندم به گرمایش جهانی، به‌ویژه پس از گذر از آستانه‌های اقلیمی است.

برای بررسی اثر شاخص‌های اقلیمی بر عملکرد گندم، پژوهشگران از دامنه گسترده‌ای از شاخص‌های اقلیمی و رویکردهای تحلیلی بهره گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، رویکردهای یادگیری ماشینی به دلیل توانایی چشمگیر در شناسایی و مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد محصولات زراعی، مورد توجه فزاینده جامعه علمی قرار گرفته‌اند. در این میان، مدل نوین XGBoost به دلیل دقت بالا، پایداری در شرایط اقلیمی متغیر، و قابلیت شناسایی تعاملات چندمتغیره به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها در تحلیل حساسیت و پیش‌بینی عملکرد گندم شناخته شده است.

در مجموع، مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که هرچند روش‌های نوین یادگیری ماشینی نظیر XGBoost توانسته‌اند روابط غیرخطی و اثرات متقابل میان شاخص‌های اقلیمی و عملکرد محصولات را با دقت بالاتری آشکار سازند، اما ادغام هم‌زمان چهار رویکرد کلیدی:

(۱) برآورد طول دوره رشد (LGP) بر پایه دستورالعمل‌های به‌روزشده فائو (FAO, 2021; FAO, 2024)

(۲) انطباق زمانی داده‌های اقلیمی با دوره واقعی رشد گیاه

(۳) تحلیل تغییرات توزیع زمانی شاخص‌های اقلیمی در طول فصل رشد

(۴) ارزیابی تعاملی و تفسیرپذیر شاخص‌های اقلیمی به‌کمک الگوریتم XGBoost و روش تبیین‌پذیری SHAP

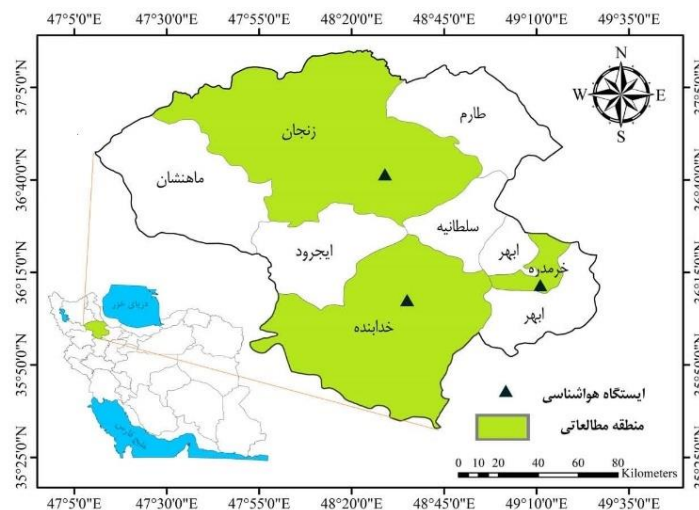
می‌تواند چارچوبی یکپارچه، دقیق و تفسیرپذیر برای شناسایی آستانه‌های بهینه و عوامل محدودکننده عملکرد گیاهان فراهم سازد و در نتیجه، درک بهتری از پویایی‌های اقلیمی مؤثر بر تولید گندم در مقیاس ناحیه‌ای ایجاد کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر سه ایستگاه سینوپتیک زنجان، خدابنده و خرم‌دره در استان زنجان، طی دوره‌ی زمانی ۱۳۶۹ تا ۱۴۰۲، این چهار رویکرد کلیدی

ذکر شده را را به صورت یکپارچه دنبال کرده است. اقلیم استان زنجان تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی و جغرافیایی متنوع قرار دارد؛ از جمله نحوه ورود جبهه‌های بزرگ رطوبتی و حرارتی، ناهمواری‌های گسترده و ارتفاع از سطح دریا از جمله مهم‌ترین عناصر مؤثر بر ویژگی‌های اقلیمی این منطقه به شمار می‌آیند. تیپ غالب اقلیمی استان، نیمه‌خشک فراسرد تا سرد است؛ به گونه‌ای که ارتفاعات برف‌گیر، دره‌های نسبتاً معتدل و تنوع پستی و بلندی‌ها موجب تغییرات محسوس در دما، به‌ویژه در مقادیر کمینه ایستگاه‌های زنجان می‌شوند عادل زاده (۱۳۹۴). از این رو، استان زنجان با توجه به تغییرات زیاد در نوسانات اقلیمی و توپوگرافی و به‌عنوان یکی از پهنه‌های اصلی تولید گندم دیم در شمال غرب ایران، شرایطی مناسب برای تحلیل و ارزیابی واکنش عملکرد این محصول نسبت به تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد نیاز

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش سه شهرستان زنجان، خدابنده و خرم دره در استان زنجان است. با توجه به شکل (۱)، استان زنجان در قسمت مرکزی و شمال غربی کشور محصور به عرض‌های شمالی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه و طول‌های شرقی ۴۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه نصف النهار گرینویچ می‌باشد. استان زنجان دارای دو منطقه کوهستانی و جلگه‌ای (دشت) می‌باشد که در میان این رشته کوه‌ها مناطق حاصلخیزی قرار دارند. اقلیم استان متأثر از دو عامل مهم شامل جبهه‌های رطوبتی / حرارتی و تنوع توپوگرافی می‌باشد (عادل زاده، ۱۳۹۴).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل حساسیت عملکرد گندم دیم از داده‌های عملکرد گندم دیم و متغیرهای اقلیمی استفاده شد. داده‌های مربوط به عملکرد گندم از وزارت جهاد کشاورزی و داده‌های اقلیمی - شامل دماهای بیشینه، کمینه و متوسط و بارش روزانه - در دوره آماری متناظر با داده‌های عملکرد از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در شکل (۱) و خصوصیات جغرافیایی و طول دوره آماری در جدول (۱) ارائه شده است. بر این اساس، شروع دوره آماری برای ایستگاه زنجان از سال ۱۳۶۹، برای ایستگاه خدابنده از سال ۱۳۷۳ و برای ایستگاه خرم‌دره از سال ۱۳۷۶ بوده و پایان دوره آماری برای هر سه ایستگاه مورد مطالعه سال ۱۴۰۲ می‌باشد.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی و اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس دوماترین گسترش یافته (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۱)

نام ایستگاه	طول دوره آماری	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)	ارتفاع (m)	اقلیم (دوماترین گسترش یافته)
خدابنده	۱۳۷۳-۱۴۰۲	۴۸/۶۰	۳۶/۱۴	۱۹۰۲/۰	نیمه مرطوب خیلی سرد
زنجان	۱۳۶۹-۱۴۰۲	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۱۶۵۹/۴	نیمه خشک سرد
خرمدره	۱۳۷۶-۱۴۰۲	۴۹/۲۱	۳۶/۲۰	۱۵۷۵/۰	نیمه خشک خیلی سرد

متغیرهای مورد مطالعه

در این مطالعه به منظور بررسی تحلیل حساسیت عملکرد دیم از ۱۰ متغیر استفاده می‌شود. با توجه به جدول (۲)، چهار متغیر حرارتی، پنج متغیر رطوبتی، و طول دوره رشد مبتنی بر روش FAO مورد بررسی قرار می‌گیرد. متغیرهای حرارتی شامل میانگین‌های دمایی (بیشینه، کمینه و متوسط) و تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس روش هارگریوز سامانی اصلاح شده (Samani, 2000) محاسبه می‌شود. لازم به توضیح است که متغیرها و شاخص‌ها در طول دوره رشد (مطابق دستور العمل FAO) می‌باشد. طریقه محاسبه طول دوره رشد و متغیرهای رطوبتی در ادامه شرح داده می‌شود.

جدول ۲. متغیرها و شاخص‌های اقلیمی رطوبتی و حرارتی مورد مطالعه

متغیرهای حرارتی		متغیرهای رطوبتی	
تعریف	متغیر	تعریف	متغیر
تبخیر تعرق پتانسیل میانگین (میلی متر)	$\overline{ET}_{mean}^{GP}$	شاخص شیب خط یکنواختی (میانگین بارش روزانه در طول دوره رشد)	ER _{GP}
متوسط دماهای میانگین (درجه سلسیوس)	\overline{T}_{mean}^{GP}	شاخص ناهمواری توزیع بارش	UR _{GP}
متوسط دماهای کمینه (درجه سلسیوس)	\overline{T}_{min}^{GP}	نسبت شاخص شیب خط یکنواختی بر ناهمواری توزیع بارش	Ur/Er (GP)
متوسط دماهای بیشینه (درجه سلسیوس)	\overline{T}_{max}^{GP}	تعداد روزهای توام با بارش ≥ 0.01 (روز)	N_{pr}^{GP}
		ضریب تغییرات بارش (میلی متر)	SD _{GP}

طول دوره رشد روش فائو (FAO): طول دوره رشد معادل بازه زمانی است که بارندگی بیش از ۵۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل باشد. با توجه به شکل (۲)، تقاطع اول نشان دهنده آغاز دوره رشد و تقاطع متوالی دوم به عنوان پایان دوره مرطوب محسوب می‌گردد که این بازه زمانی با پیدا کردن نقاط تقاطع نمودار ماهانه بارش و ۵۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل مشخص می‌شود (Fischer et al., 1998). بر اساس روش FAO پایان دوره رشد زمانی است که بعد از پایان دوره بارش، خاک ۱۰۰ میلی متر از رطوبت ذخیره شده را از دست بدهد. سپس با کسر روزهایی که میانگین دمای هوا کمتر از ۵ درجه سلسیوس است (Mhizhaet al., 2012)، طول دوره رشد محاسبه می‌شود.

شاخص شیب خط یکنواختی (ER): با هدف بررسی ارتباط بارش جمعی با عملکرد محصولات زراعی مانند گندم و چغندر قند معرفی شد (Monti and Venturi, 2008). مبنای محاسبه این شاخص، متوسط بارش روزانه طی دوره رشد گیاه است. شیب خط یکنواختی از تقسیم مقدار بارش جمعی بر تعداد روزهای دوره رشد به دست می‌آید که بیانگر میانگین بارش روزانه در آن دوره است.

شاخص ناهمواری توزیع بارش (UR): شاخص ناهمواری توزیع بارش، برآوردی از میزان پراکندگی بارش واقعی پیرامون خط یکنواختی ارائه می‌باشد. محاسبه این شاخص بر اساس جذر نسبت مجموع مربعات فاصله هر یک از نقاط داده‌های بارش جمعی تا نقاط متناظر روی خط یکنواختی انجام می‌شود. در واقع، این شاخص میزان پراکندگی یا نوسان بارش را نسبت به توزیع یکنواخت آن را طی دوره رشد نشان می‌دهد. اگر بارش به صورت کاملاً یکنواخت توزیع شده باشد مقدار آن کم خواهد بود، اگر بارش به صورت مقطعی و با شدت زیاد باشد، مقدار شاخص زیاد می‌شود (Monti & Venturi, 2007).

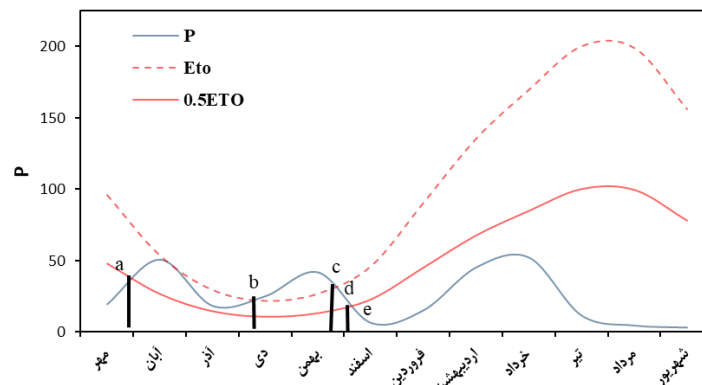
شاخص UR/ER: در نسبت شاخص شیب خط یکنواختی بر ناهمواری توزیع بارش، UR توسط شاخص ER به صورت UR/ER وزن داده می‌شود. در نتیجه شاخص جدیدی از میزان پراکندگی بارش سالانه با محاسبه UR/ER به دست می‌آید. شاخص UR/ER یک کمیت بدون بعد است که نسبت پراکندگی بارش نسبت به یکنواختی به میانگین بارش روزانه را بیان می‌کند (Monti & Venturi, 2007). در ادامه در شکل (۲) نمودار شماتیک نحوه برآورد طول دوره رشد مطابق دستور العمل طبقه بندی اکولوژیکی FAO آورده شده است.

تحلیل روند

در این مطالعه به منظور بررسی روند از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال (MK) (Mann, 1945; kendall, 1975) و تخمینگر شیب سن^۲

1. Mann-Kendall
2. Sen's slope estimator

(SSE) (Theil, 1950; Sen, 1968) پیش سفید بدون روند استفاده می‌شود. دلیل استفاده از رویکرد پیش سفید بدون روند ارائه شده توسط Yue et al. (2002)، حذف خودهمبستگی و حفظ روند واقعی داده می‌باشد. در این روش ابتدا شیب روند (b) مبتنی بر رویکرد تیل-سن برای سری زمانی مورد مطالعه برآورد می‌شود. اگر b به سمت صفر میل نکند، با فرض خطی بودن روند سری زمانی می‌توان روند را از داده‌های اولیه حذف نمود ($X'_t = X_t - bt$). سپس با استفاده از معادله $Y'_t = X'_t - r_1 X'_{t-1}$ ، ضریب خود همبستگی مرتبه اول (r_1) داده‌های بدون روند (X'_t) برای یک سری زمانی پیش سفید بدون روند (Y'_t) حاصل می‌شود. در گام آخر، روند حذف شده از سری زمانی اولیه به داده‌های Y'_t اضافه شده ($Y_t = Y'_t + bt$) و حاصل آن حذف خودهمبستگی و حفظ روند واقعی داده می‌باشد.



شکل ۲. نمودار شماتیک نحوه برآورد طول دوره رشد مطابق دستور العمل طبقه بندی اکولوژیکی FAO (a: شروع دوره رشد، b: شروع دوره مرطوب، c: پایان دوره مرطوب، d: پایان دوره بارندگی، e: پایان دوره رشد)

تحلیل حساسیت

به منظور تحلیل حساسیت و تفسیر نقش مستقل و ترکیبی متغیرهای مورد مطالعه بر عملکرد گندم دیم از دو رویکرد تحلیلی شامل ماتریس همبستگی و مدل مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده شده است. رویکردهای مورد مطالعه با هدف سنجش اثرات خطی و غیرخطی متغیرها و استخراج سهم واقعی هر عامل مد نظر می‌باشد. در این مطالعه از ماتریس همبستگی مبتنی بر همبستگی پیرسون برای بررسی روابط بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد گندم دیم استفاده می‌شود. تحلیل حساسیت مبتنی بر یادگیری ماشین با استفاده از الگوریتم XGBoost و تحلیل حساسیت مبتنی بر روش SHAP می‌باشد که در ادامه شرح داده می‌شود.

الگوریتم XGBoost

الگوریتم XGBoost یک روش یادگیری ماشین مبتنی بر تقویت گرادیان است که با هدف بهبود عملکرد مدل‌سازی از طریق ترکیب یادگیرنده‌های ضعیف به صورت متوالی بهینه می‌شود (Chen & Guestrin, 2016). بر اساس این رویکرد، هر یادگیرنده جدید به منظور تصحیح خطاهای مدل قبلی آموزش داده می‌شود و پیش‌بینی نهایی از ترکیب پیش‌بینی‌های تمامی یادگیرنده‌ها به دست می‌آید. این فرایند تا زمانی که معیار توقف برآورده شود، ادامه می‌یابد. هدف اصلی XGBoost، کاهش خطای مدل و جلوگیری از تطبیق بیش از حد با استفاده از الگوریتم از تکنیک‌های منظم‌سازی به منظور کاهش وزن‌های غیرضروری و جلوگیری از بزرگ شدن بیش از حد وزن‌ها می‌باشد. علاوه بر این، XGBoost با بهره‌گیری از پردازش موازی، زمان آموزش را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و می‌تواند بر روی داده‌های بزرگ و پیچیده به خوبی عمل کند. معادلات الگوریتم زیر به صورت زیر بیان می‌شود.

$$f_i^{(t)} = \sum_{k=1}^t f_k(x_i) = f_i^{(t-1)} + f_t(x_i) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، $f_t(x_i)$ یادگیرنده مرحله t ، $f_i^{(t)}$ و $f_i^{(t-1)}$ پیش‌بینی‌های مراحل t و $t-1$ و x_i متغیر ورودی می‌باشد.

$$Obj^{(t)} = \sum_{k=1}^n l(\bar{y}_i, y_i) + \sum_{k=1}^t \Omega(f_i) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، l تابع از دست دادن، n تعداد مشاهدات و Ω عبارت منظم‌سازی می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Omega(f_i) = Y^T + 0.5\lambda \|\omega\|^2 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، ω بردار امتیازها در برگ‌ها، λ پارامتر منظم سازی و γ حداقل زیات مورد نیاز برای تقسیم بیشتر گره برگ می‌باشد.

تحلیل SHAP

روش SHAP به عنوان یک چارچوب از نظریه بازی‌ها برای توضیح خروجی مدل‌های یادگیری ماشین درخت-پایه می‌باشد که یک تفسیر از اهمیت ویژگی‌های ورودی مدلسازی را ارائه می‌دهد (Lundberg & Lee, 2017; Lundberg et al., 2020). کاربرد روش SHAP به منظور تفسیرپذیری و تحلیل حساسیت مبتنی بر مقدار شپلی (Shapley, 1953) می‌باشد. درک این مورد که چه عواملی بیشترین اهمیت را در مدلسازی دارد به اندازه دقت مدلسازی مهم باشد و به تفسیر و تحلیل نتایج آن کمک زیادی می‌کند. به منظور تحلیل حساسیت مبتنی بر روش SHAP ابتدا روش برآورد مقدار شپلی به شرح زیر بیان می‌شود.

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} \frac{|S|!(|F| - |S| - 1)!}{|F|!} [f(S \cup \{i\}) - f(S)] \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، i سهم ویژگی ϕ_i ، F مجموع تمام ویژگی‌ها، S زیر مجموعه‌ای از ویژگی‌ها بدون i ، $f(S)$ پیش‌بینی مدل با استفاده از زیر مجموعه S و $|S|$ برابر با تعداد اعضای S و $|F|$ تعداد کل ویژگی‌ها می‌باشد. در رابطه (۴)، میزان تغییر پیش‌بینی هنگام افزودن ویژگی i به زیرمجموعه S ، جز $[f(S \cup \{i\}) - f(S)]$ به عنوان را محاسبه می‌کند. برای تحلیل حساسیت مبتنی مقدار شپلی دو رویکرد مد نظر است. رویکرد نخست، تحلیل حساسیت جهت دار (D_i) به منظور شناسایی جهت گیری تاثیر ویژگی‌ها و رویکرد دوم تحت عنوان تحلیل حساسیت جهانی (G_i) به منظور رتبه بندی و انتخاب کلی ویژگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد که به شرح زیر بیان می‌شود.

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \phi_i^{(k)} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$G_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n |\phi_i^{(k)}| \quad \text{رابطه ۶}$$

یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج ارزیابی مدل

نتایج مدل به طور کلی نشان داد که خطای مدل در مناطق با بارش بیشتر نسبت به مناطق کم بارش تر خطای کمتری دارد. مطابق جدول شماره (۳) برای ایستگاه هواشناسی زنجان ($R^2 = 74$ $CVRMSE = 15.6$)، خرم دره ($R^2 = 76$ $CRMSE = 13.4$) و ایستگاه خدابنده ($R^2 = 78$ $CRMSE = 12$) است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل XGBoost-SHAP در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	طول دوره آماری	RMSE	R ²	CVRMSE
زنجان	۱۳۷۳-۱۴۰۲	۱۵۴/۷	۷۴	۱۵/۶
خرم دره	۱۳۶۹-۱۴۰۲	۱۰۰/۴	۷۶	۱۳/۴
خدابنده	۱۳۷۶-۱۴۰۲	۱۰۲/۷	۷۸	۱۲

با توجه به مقادیر CVRMSE که در حد ۴۰ درصد قابل قبول و بالاتر از ۷۰ درصد به معنی عدم دقت خروجی‌های مدل است (Hengl et al., 2004). نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل در سطح قابل قبولی قرار دارد؛ با این حال، ارزیابی کلی حاکی از آن است که میزان خطای مدل در نواحی پربارش کمتر از مناطق کم‌بارش است. مطابق جدول شماره ۳ برای ایستگاه هواشناسی زنجان ($R^2 = 74$ $CVRMSE = 15.6$)، خرم دره ($R^2 = 76$ $CRMSE = 13.4$) و ایستگاه خدابنده ($R^2 = 78$ $CVRMSE = 12$) است.

تحلیل روند

بررسی روندهای بلندمدت نشان داد که عملکرد گندم در هر سه ایستگاه روند افزایشی داشته و شدت این افزایش به ترتیب در خدابنده بیشترین، پس از آن خرمدره و در نهایت زنجان کمترین بوده است (جدول ۴). طول دوره رشد (LGP) نیز در هر سه ایستگاه روند صعودی را نشان داد که بیشترین شدت آن در خدابنده، سپس زنجان و کمترین در خرمدره مشاهده شد. میانگین دمای سالانه در تمام ایستگاه‌ها روند افزایشی پیوسته داشته و شدت آن در زنجان بیشترین، سپس خرمدره و کمترین در خدابنده بوده است. بارش سالانه

فاقد روند معنی دار در همه ایستگاه‌ها بوده و الگوی آن عمدتاً نوسانی است.

جدول ۴. مقادیر میانگین و روند طول دوره رشد، عملکرد، دما و بارش مناطق مورد مطالعه در طول سال زراعی

ایستگاه	دوره آماری	متغیر	میانگین	روند	
				من- کندال	تخمینگر شیب سن
خدابنده	۱۳۷۳-۱۴۰۲	Yield (Kg/ha)	۹۳۳/۸	**۲/۶۹	۲۲/۷۱
		LGP (day)	۳۹/۹	**۲/۱۷	۱/۵۶
		T (°C)	۱۱/۵	***۳/۳۹	۰/۰۴۷
		P (mm)	۳۹۰/۳	ns۰/۲۲	۰/۷۷
زنجان	۱۳۶۹-۱۴۰۲	Yield (Kg/ha)	۷۴۹/۴	*۱/۹۳	۱۳/۶۳
		LGP (day)	۷۶/۸	*۱/۶۵	۱/۱۳
		T (°C)	۱۱/۶	***۴/۹۱	۰/۰۹۳
		P (mm)	۲۸۶/۶	ns۰/۳۷	-۰/۵۵۶
خرم دره	۱۳۷۶-۱۴۰۲	Yield (Kg/ha)	۸۵۵/۷	**۱/۹۹	۱۹/۵۷
		LGP (day)	۸۴/۸	ns۱/۵	۱/۶۹
		T (°C)	۱۲/۸	***۳/۳۲	۰/۰۵۸
		P (mm)	۳۰۰/۲	-۰/۴۷ ns	۱/۲۲۴

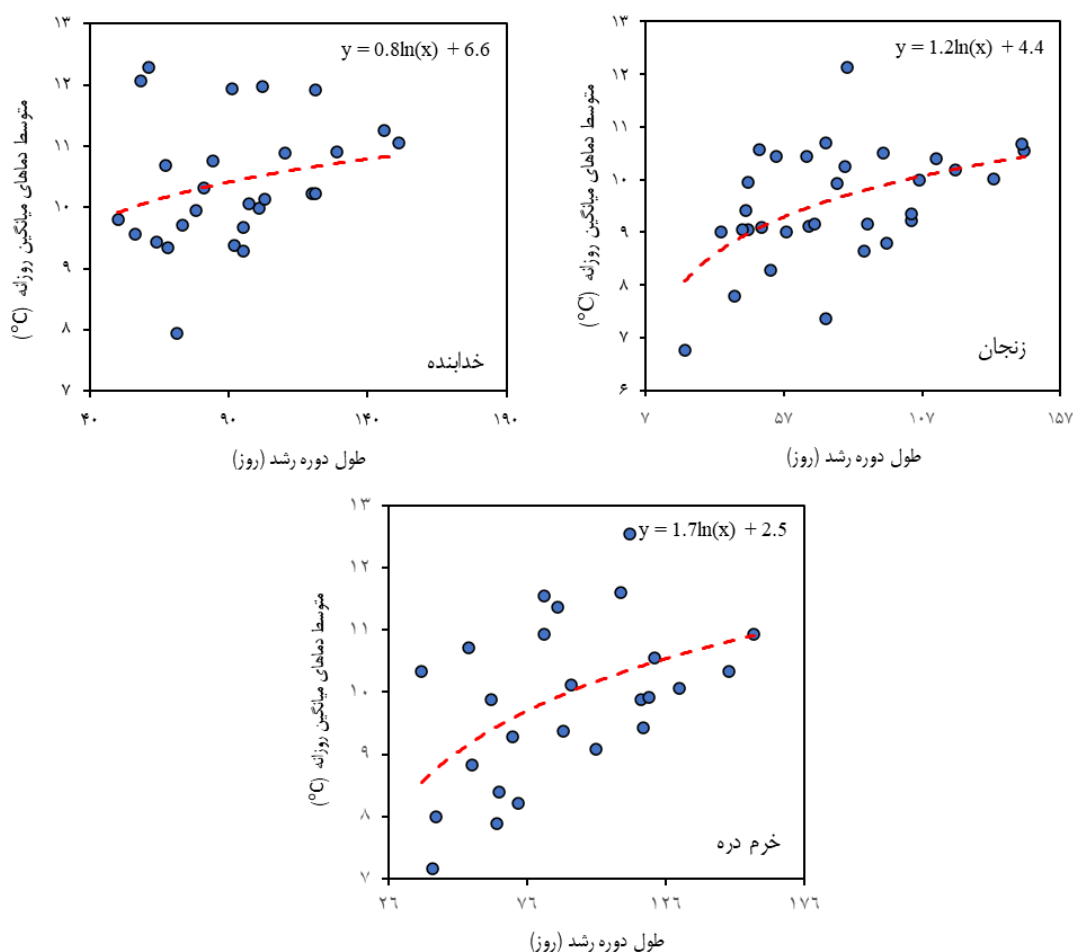
ns : Pvalue > 0.1 , * : Pvalue ≤ 0.1 , ** : Pvalue ≤ 0.05 , *** : Pvalue ≤ 0.01

رابطه بین تغییرات دما و طول دوره رشد (LGP) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

براساس روش فائو (Fischer et al., 1998)، طول دوره رشد (LGP) بازه زمانی‌ای است که در آن بارندگی بیش از ۵۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل (ET₀) بوده و تا زمانی تداوم می‌یابد که خاک حدود ۱۰۰ میلی‌متر از ذخیره رطوبتی خود را از دست دهد. در این روش، روزهایی که میانگین دمای آن‌ها کمتر از ۵ درجه سلسیوس است در محاسبه طول دوره رشد لحاظ نمی‌شوند (Mhizha et al., 2012). افزایش دما، بر اساس این تعریف، دو اثر هم‌زمان و متضاد بر طول دوره رشد دارد:

۱. اثر مستقیم: افزایش دمای هوا با افزایش ET₀ همراه است و از طریق تسریع در تبخیر و کاهش سریع‌تر ذخیره رطوبتی خاک، می‌تواند موجب کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد گردد.
۲. اثر غیرمستقیم: در مناطق سرد و نیمه‌سرد، افزایش میانگین دما سبب کاهش روزهای با میانگین کمتر از ۵ درجه سلسیوس می‌شود و بدین ترتیب، فصل رشد زودتر آغاز و دیرتر پایان می‌یابد. این فرایند باعث افزایش LGP می‌گردد، حتی اگر ET₀ نیز افزایش یافته باشد.

در نتیجه، در نواحی با زمستان‌های سرد نظیر اقلیم استان زنجان، افزایش تدریجی دما منجر به حذف محدودیت‌های حرارتی اولیه و گسترش بازه دمایی مناسب برای رشد گیاه می‌شود. در آغاز دوره آماری مورد مطالعه (دهه ۱۹۶۰)، زمانی که دمای هوا پایین‌تر و اقلیم سردتر بود، اثر گرم‌شدن و حذف روزهای سرد به صورت محسوس‌تری موجب افزایش طول دوره رشد می‌گردد. اما در دهه‌های اخیر، با تداوم روند افزایشی دما با توجه به پدیده تغییر اقلیم، نرخ افزایش LGP کاهش یافته است؛ به بیان دیگر، شیب رابطه بین میانگین دما و طول دوره رشد از حالت صعودی اولیه به یک الگوی غیرخطی و نزدیک به تابع نمایی میل کرده است در نمودار شکل (۳) این موضوع به وضوح در هر سه ایستگاه مورد مطالعه دیده می‌شود. این رفتار نمایی نمودارها نشان می‌دهد که افزایش دما الزاماً به افزایش پیوسته طول دوره رشد منجر نمی‌شود. در مقادیر بالاتر دما، اثر محدودکننده تبخیر و تعرق تدریجاً بر اثر گسترش بازه حرارتی مناسب غلبه می‌کند و در نتیجه، افزایش بیشتر دما می‌تواند منجر به کاهش یا پایداری نسبی LGP شود. از این رو، همبستگی مثبت مشاهده‌شده میان روند دما و طول دوره رشد در برخی ایستگاه‌ها حاصل برتری موقت حذف محدودیت‌های حرارتی نسبت به کنترل رطوبتی است؛ اما با ادامه گرم‌شدن و افزایش فشار تبخیر، انتظار می‌رود که این اثر مثبت تضعیف شود.



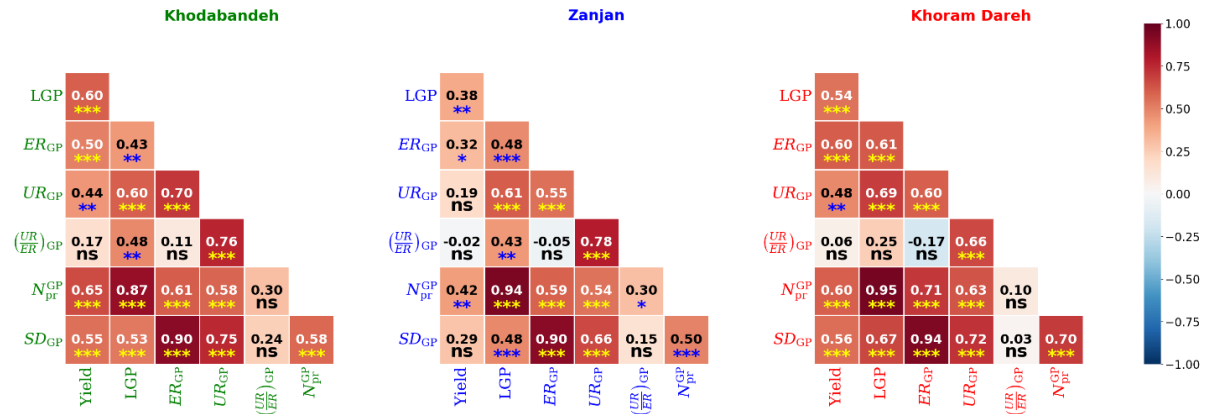
شکل ۳. رابطه بین تغییرات دما و طول دوره رشد (LGP) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

لازم به توضیح است در شکل (۳) محور عمودی متوسط دماهای میانگین روزانه در طول دوره رشد (\bar{T}_{mean}^{GP}) در هر سال زراعی است و هر نقطه نمایگر یک سال زراعی است.

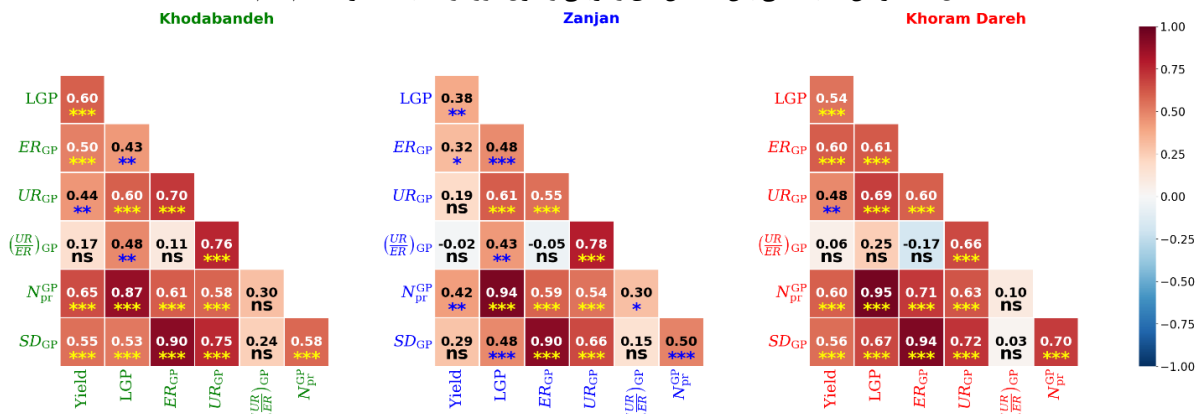
تحلیل همبستگی

در این پژوهش، روابط خطی بین شاخص‌های اقلیمی مورد مطالعه و عملکرد گندم دیم ارزیابی شد. برای این منظور، دو ماتریس همبستگی پیرسون تهیه شد: نخست، ماتریس همبستگی بین شاخص‌های رطوبتی و طول دوره رشد با عملکرد گندم دیم (شکل ۴) و دوم، ماتریس همبستگی بین شاخص‌های حرارتی و طول دوره رشد با عملکرد گندم دیم (شکل ۵). تمام مقادیر شاخص‌های اقلیمی بر اساس داده‌های دوره رشد محاسبه شده‌اند.

نتایج نشان داد که در هر سه ایستگاه، ضرایب همبستگی خطی شاخص‌های رطوبتی با عملکرد گندم دیم به‌طور کلی بالاتر از شاخص‌های حرارتی است. با این حال، دمای میانگین کمینه در دوره رشد (\bar{T}_{min}^{GP}) بیشترین همبستگی را با عملکرد داشت؛ به‌ویژه در ایستگاه خرم دره که این رابطه معنی‌دار بود. همچنین، در مقایسه ایستگاه‌ها، ارتباط بارش با عملکرد در زنجان ضعیف‌تر از خدابنده و خرمدره مشاهده شد. این یافته‌ها اهمیت ویژه شاخص‌های رطوبتی و دمای میانگین کمینه (\bar{T}_{min}^{GP}) را در مدل‌سازی و مدیریت عملکرد گندم دیم، به‌خصوص تحت شرایط تغییرات اقلیمی، برجسته می‌کند.



شکل ۴. ماتریس همبستگی بین شاخص‌های رطوبتی و طول دوره رشد با عملکرد گندم دیم

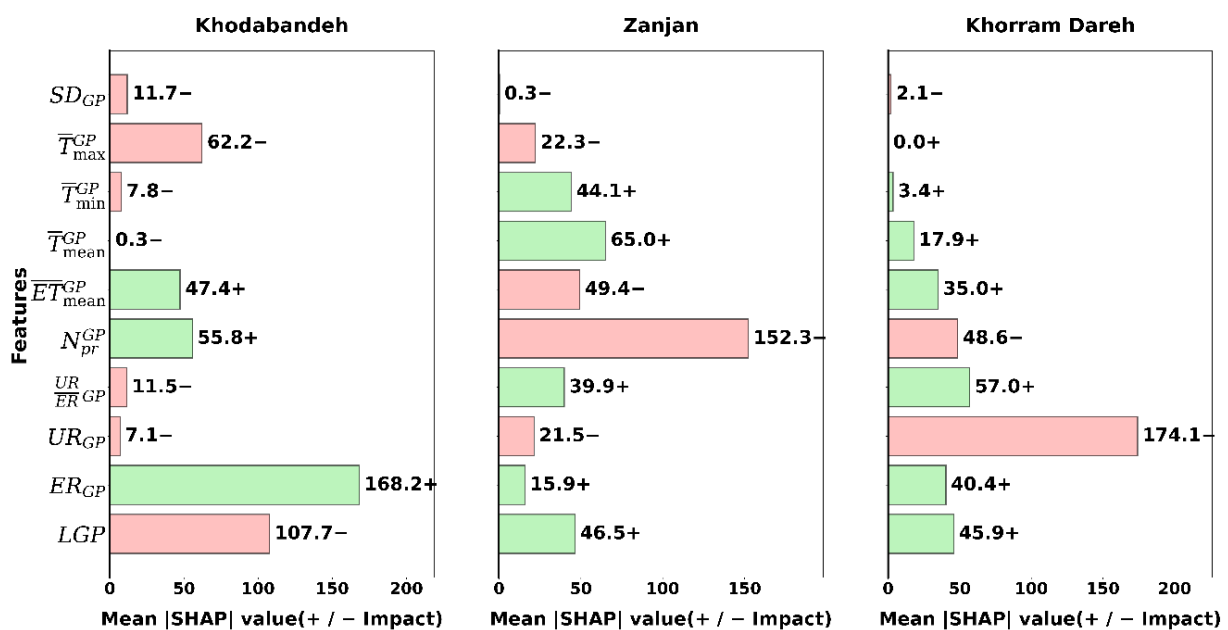


شکل ۵. ماتریس همبستگی بین شاخص‌های حرارتی و طول دوره رشد با عملکرد گندم دیم

تحلیل حساسیت

به منظور تحلیل اثرات تعاملی و افزایش تفسیرپذیری شاخص‌های اقلیمی در تعیین عملکرد گندم دیم، از مقادیر قدرمطلق اهمیت ویژگی‌ها در مدل XGBoost بر پایه الگوریتم SHAP استفاده شد. نتایج این تحلیل در شکل شماره (۶) ارائه شده است.

XGBoost SHAP Feature Impact on Wheat Yield



شکل ۶. نمودار میانگین مقادیر مطلق SHAP (اثر افزایشی و کاهش‌دهی) شاخص‌های اقلیمی بر عملکرد گندم دیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس مدل XGBoost

شکل (۶) اهمیت نسبی هر شاخص را در تبیین عملکرد گندم دیم نشان داده و امکان مقایسه و رتبه‌بندی میزان اثرگذاری

شاخص‌ها را درون هر ایستگاه فراهم می‌کند. علائم مثبت و منفی در نمودار فاقد مفهوم ریاضی بوده و صرفاً نشان‌دهنده نوع اثر افزایشی (+) یا کاهش (-) بر عملکرد گندم دیم هستند. مقادیر ارائه‌شده بر اساس میانگین قدرمطلق SHAP در کل دوره مطالعه محاسبه شده‌اند؛ به بیان دیگر، هر عدد نشان‌دهنده میانگین نقش یک شاخص اقلیمی در یک ایستگاه مشخص طی بازه زمانی بررسی است. به‌عنوان مثال، شاخص یکنواختی بارش در خدابنده بالاترین مقدار با علامت مثبت (+) را دارد، این عدد در مقایسه با دیگر شاخص‌های اقلیمی به این معناست که در طول دوره آماری بررسی شده، این شاخص نه‌تنها مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده عملکرد گندم دیم، بلکه اصلی‌ترین عامل افزایش عملکرد بوده است. با این حال، بالاترین اهمیت یک شاخص لزوماً به معنای اثر افزایشی یا کاهش آن در تمام محدوده مقادیر نیست؛ در ادامه، محدوده‌های مثبت و منفی اثر هر شاخص به تفصیل تحلیل می‌شوند. همچنین، در جدول شماره (۵)، برای هر ایستگاه، دو شاخص دارای اثر مثبت و دو شاخص دارای اثر منفی که به‌طور میانگین در طول دوره مطالعه بیشترین نقش را داشته‌اند، ارائه شده است.

جدول ۵. متغیرهای اقلیمی مؤثر بر عملکرد گندم دیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس مقادیر میانگین قدرمطلق SHAP از مدل XGBoost

شهرستان	متغیر اول		متغیر دوم	
	نقش مثبت	نقش منفی	نقش مثبت	نقش منفی
خدابنده	$ER_{GP} : 168.2$	$LGP : 107.7$	$55.8N_{pr}^{GP}$	$62.2\bar{ET}_{mean}^{GP}$
زنجان	$\bar{T}_{mean}^{GP} : 65$	$152.3N_{pr}^{GP}$	$LGP : 46.5$	$49.4\bar{ET}_{mean}^{GP}$
خرم‌دره	$Ur/Er (GP) : 57$	$UR_{GP} : 174.1$	$LGP : 45.9$	$48.6N_{pr}^{GP}$

نتایج نشان می‌دهد که در هر سه ایستگاه عامل رطوبت مهم‌ترین شاخص تعیین‌کننده در عملکرد گندم دیم است به طوری که در خدابنده بارش مؤثر (ER_{GP})، در زنجان تعداد روزهای بارش (N_{pr}^{GP}) و در خرم‌دره توزیع زمانی بارش (UR_{GP}) است. با این وجود مهم‌ترین عامل که می‌تواند باعث افزایش عملکرد گندم دیم شود در ایستگاه‌ها متفاوت است به طوری که در زنجان مهم‌ترین عامل فزاینده عملکرد دمای میانگین در طول دوره رشد ($\bar{T}_{mean}^{GP} : 65$) است که نشان می‌دهد به طور کلی در زنجان نسبت به سایر ایستگاه‌ها عامل دما نقش تعیین‌کننده‌تری دارد. در ادامه، اگرچه استفاده از میانگین مقادیر SHAP در مدل می‌تواند صرفاً یک دید کلی از نقش متغیرها ارائه دهد، اما برای ارائه توصیه‌های تخصصی و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی راهبردی، ضروری است که محدوده‌های کاهش و افزایشی و همچنین سطوح آستانه متغیرهای مؤثر و مهم که پیش‌تر شناسایی شده‌اند (جدول ۱) مورد توجه قرار گیرند. بر این اساس، محدوده‌های مذکور برای شاخص‌ها بر اساس نتایج تحلیل و مطابق با شکل ۷ (الف، ب و ج) مشخص و ارائه شده‌اند.

به‌منظور تعیین بازه‌های بهینه و محدودکننده عملکرد، از مقادیر سالانه SHAP استفاده شد. بازه‌های بهینه و محدودکننده عملکرد گندم دیم برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۶) به همراه توصیه‌های راهبردی ارائه شده است. لازم به توضیح است این توصیه‌ها بر اساس بازه‌هایی تدوین شده‌اند که به‌عنوان بازه‌های محدودکننده عملکرد گندم دیم در هر منطقه شناسایی شده‌اند. با توجه به تعیین حدود و آستانه‌های شاخص‌های مؤثر، تحلیل بر مبنای شاخص محدودکننده عملکرد گندم دیم برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه مطابق نتایج جدول ۴ انجام می‌گیرد. در این میان، شاخصی که بیشترین نقش منفی در عملکرد داشته است برای هر ایستگاه شناسایی شده و مبنای تبیین تغییرات عملکرد در ادامه قرار می‌گیرد. این تحلیل به تفکیک هر ایستگاه و بر اساس مقادیر محاسبه‌شده شاخص‌ها انجام می‌شود.

بررسی نتایج ایستگاه خرم‌دره نشان داد که شاخص ناهم‌واری توزیع بارش در دوره رشد (UR_{GP}) در حوالی آستانه کلیدی ۹.۰ میلی‌متر تغییر رفتار آشکاری دارد. در مقادیر $1.1 \leq UR_{GP} < 8.7$ میلی‌متر، اثر منفی بر عملکرد مشاهده می‌شود که معمولاً ناشی از بارش‌های یکنواخت اما ناکافی و عدم تأمین نیاز آبی گیاه در مراحل حساس رشد است. با ورود به بازه $8.7 \leq UR_{GP} < 11.2$ میلی‌متر، که به‌عنوان منطقه گذار شناخته می‌شود، اثر مدل از منفی به سمت مثبت متمایل می‌گردد و نشان‌دهنده بهبود نسبی شرایط رطوبتی است. نهایتاً، در مقادیر $11.2 \leq UR_{GP} \leq 31.0$ میلی‌متر، اثر مثبت برآوردشده توسط مدل بر عملکرد ثبت می‌شود که منعکس‌کننده وقوع بارش‌های نوسان‌دار اما به‌موقع و مؤثر بوده و امکان تأمین آب کافی در زمان‌های حساس رشد و ارتقای عملکرد را فراهم می‌کند.

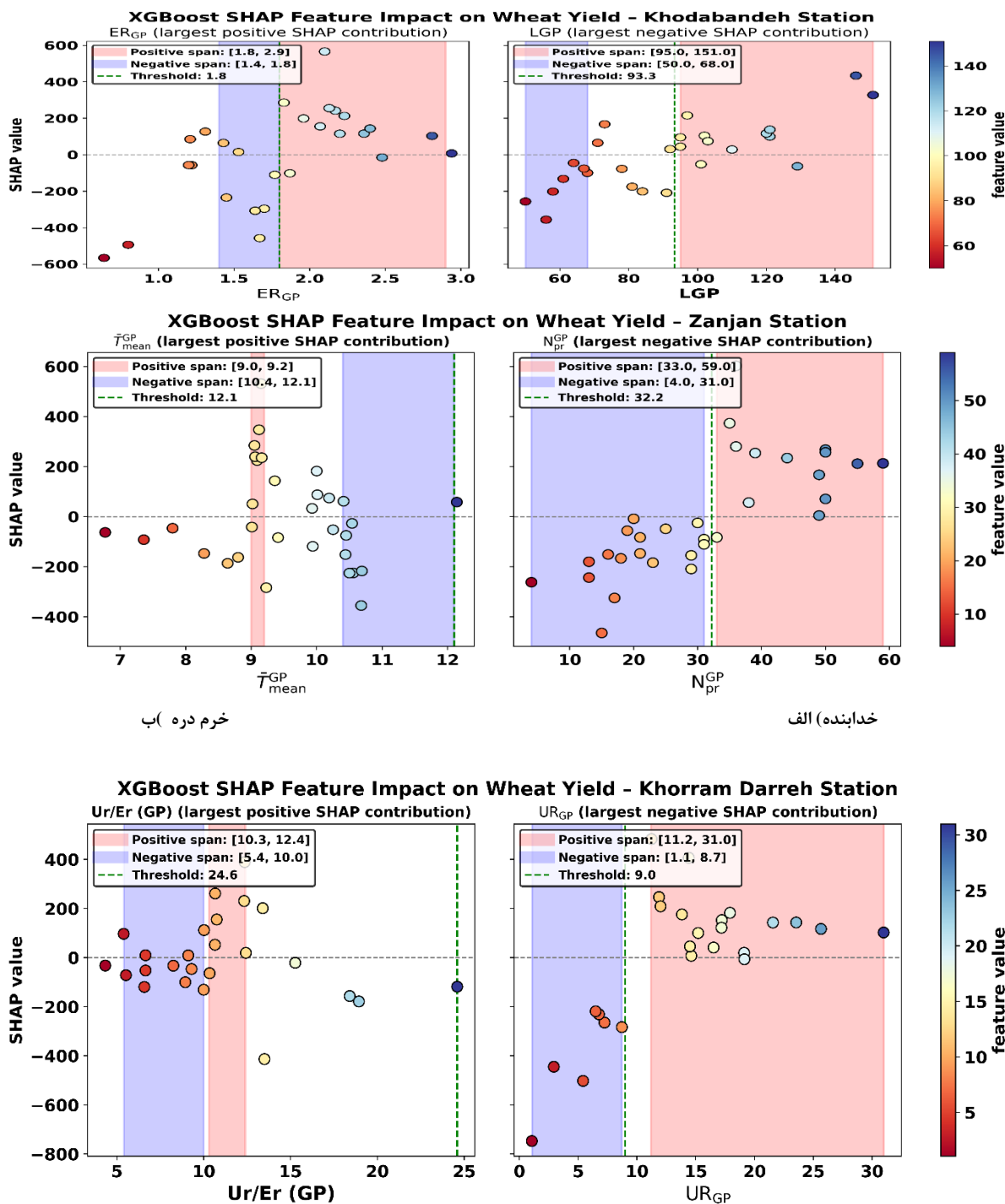
بررسی نتایج مدل برای ایستگاه خدابنده نشان داد که طول دوره رشد (LGP) در حوالی آستانه ۹۳ روز با تغییر رفتار قابل‌توجهی همراه است. در بازه $50 \leq LGP < 68$ روز، اثر منفی بر عملکرد مشاهده می‌گردد که معمولاً ناشی از کوتاه بودن مدت رشد، محدودیت در تجمع زیست‌توده و ناتمام ماندن مراحل فنولوژیک گیاه است. با ورود به محدوده گذار $68 \leq LGP < 93.3$ روز، روند اثر مدل از منفی به

مثبت تغییر می‌کند و نشان‌دهنده بهبود شرایط رشد و افزایش امکان تکمیل مراحل توسعه گیاه است. در بازه $95 \leq LGP \leq 151$ روز، اثر برآوردشده مثبت بوده و بیانگر طولانی‌تر شدن دوره رشد، فرصت بیشتر برای جذب و ذخیره محصولات فتوسنتزی و ارتقای عملکرد نهایی است. شواهد مدل تا ۱۵۱ روز مثبت است، اما فراتر از این مقدار تحلیل در محدوده برون‌یابی قرار می‌گیرد؛ در این شرایط باید به داده‌های پایش میدانی یا شبیه‌سازی‌های تکمیلی تکیه گردد.

در ایستگاه زنجان شاخص یکنواختی بارش در دوره رشد (URGP) در حوالی آستانه کلیدی ۹.۰ میلی متر با تغییر رفتار آشکاری همراه است. در مقادیر $8.7 < URGP \leq 11.1$ میلی‌متر، اثر منفی بر عملکرد برآوردشده مشاهده می‌شود که معمولاً ناشی از بارش‌های یکنواخت اما ناکافی و عدم تأمین نیاز آبی گیاه در مراحل حساس رشد است. با ورود به بازه $8.7 \leq URGP < 11.2$ میلی‌متر، که به‌عنوان منطقه گذار شناخته می‌شود، اثر مدل از منفی به سمت مثبت متمایل می‌گردد و نشان‌دهنده بهبود نسبی شرایط رطوبتی است. نهایتاً، در مقادیر $11.2 \leq URGP \leq 31.0$ میلی‌متر، اثر مثبت برآوردشده توسط مدل بر عملکرد ثبت می‌شود که منعکس‌کننده وقوع بارش‌های نوسان‌دار اما به‌موقع و مؤثر بوده و امکان تأمین آب کافی در زمان‌های حساس رشد و ارتقای عملکرد را فراهم می‌کند.

جدول ۶. بازه‌های بهینه و محدودکننده عملکرد شاخص‌های اقلیمی مؤثر منتخب

ایستگاه	متغیر (حد آستانه)	افزایش عملکرد	کاهش عملکرد	راهبرد مدیریتی برای افزایش عملکرد
خدابنده	ER _{GP} (1.8 mm)	1.8 ≤ ER _{GP} ≤ 2.9 mm/day	1.4 ≤ ER _{GP} ≤ 1.8 mm/day	آبیاری تکمیلی هدفمند در مراحل بحرانی و افزایش ماده آلی خاک
		افزایش عملکرد	آب ناکافی، استرس آبی، کاهش عملکرد	تنظیم تاریخ کاشت و انتخاب رقم دیررس متناسب با بارش‌های منطقه
زنجان	LGP (93.3 Day)	33 ≤ N _{pr} ^{GP} ≤ 59	50 ≤ LGP ≤ 68	استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم و مالچ برای پایداری رطوبت و استقرار بهتر گیاهچه
		رشد کامل، افزایش بیوماس، عملکرد بالا	رشد ناکافی، افت بیوماس عملکرد پایین	کشت ارقام مقاوم به خشکی، افزایش بقایای گیاهی و استفاده از مالچ برای حفظ رطوبت خاک
		رشد مطلوب، افزایش فتوسنتز و تجمع بیشتر بیوماس	افت بیوماس	کشت ارقام مقاوم به خشکی، افزایش بقایای گیاهی و استفاده از مالچ برای حفظ رطوبت خاک
خرم دره	UR _{GP} (9)	11.2 ≤ UR _{GP} ≤ 31	1.1 ≤ UR _{GP} ≤ 8.7	کشت ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی و افزایش مالچ سطحی برای حفظ رطوبت خاک
		پراکندگی مناسب بارش طی دوره رشد، حفظ بهینه رطوبت خاک	پراکندگی نامناسب بارش طی دوره رشد و افزایش تنش خشکی در بعضی از دوره‌های رشد	کشت ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی، افزایش بقایای گیاهی و استفاده از مالچ برای حفظ رطوبت خاک
دره	Ur/Er (GP) (24.6)	10.3 ≤ Ur/Er ≤ 12.4	5.4 ≤ Ur/Er ≤ 10	کشت ارقام مقاوم به خشکی، افزایش بقایای گیاهی و استفاده از مالچ برای حفظ رطوبت خاک
		توزیع بهینه بارش در مراحل حساس رشد، افزایش فتوسنتز و تجمع بیشتر بیوماس	عدم توزیع بهینه بارش، محدودیت تأمین رطوبت در مراحل حساس رشد، کاهش فتوسنتز و افت بیوماس	کشت ارقام مقاوم به خشکی، افزایش بقایای گیاهی و استفاده از مالچ برای حفظ رطوبت خاک



شکل ۷. نمودار مقادیر مقادیر سالانه SHAP و بازه‌های بهینه و محدودکننده شاخص‌های اقلیمی منتخب: الف) خدابنده، ب) خرم دره و ج) زنجان

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای برآورد طول دوره رشد، برخلاف رویکردهای صرفاً حرارتی مانند GDD، از مؤلفه‌های دما و رطوبت به صورت هم‌زمان استفاده شد. در این روش تبخیر و تعرق پتانسیل به همراه ذخیره رطوبتی خاک نیز در محاسبات لحاظ گردید تا نتایج با شرایط واقعی مزرعه تطابق بیشتری داشته باشد. پس از تعیین طول واقعی دوره رشد گیاه، تمام شاخص‌های اقلیمی بر اساس همین بازه زمانی محاسبه شدند. برای تحلیل توزیع زمانی شاخص‌های اقلیمی مؤثر بر عملکرد، پنج شاخص رطوبتی به‌عنوان نماینده‌های پراکنش بارش در طول دوره رشد و چهار شاخص حرارتی مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، برای ارزیابی تعاملی و تفسیرپذیری شاخص‌ها، مدل پیشرفته یادگیری ماشین XGBoost به همراه روش تفسیر مقادیر SHAP به کار گرفته شد. نتایج خروجی‌های مدل به شرح ذیل بیان می‌گردد:

میانگین طول دوره رشد، بر اساس دستورالعمل‌های به‌روز سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2021; FAO, 2024)، به ترتیب برای ایستگاه‌های خدابنده، خرمدره و زنجان برابر با ۹۴، ۸۵ و ۷۷ روز برآورد شد. این مقادیر به‌طور کلی با نتایج مطالعه انصاری و همکاران (۱۴۰۲)، که طول دوره رشد گندم دیم را با رویکرد FAO در مقیاس ملی محاسبه کرده بودند، همخوانی دارد؛ هرچند در ایستگاه خدابنده بین دو مطالعه اندکی اختلاف مشاهده می‌شود. در پژوهش آنان، طول دوره رشد برای ناحیه نیمه‌خشک در محدوده ۶۰ تا ۱۲۰ روز و برای ناحیه نیمه‌خشک مرطوب در محدوده ۱۲۰ تا ۱۸۰ روز گزارش شده است، که با مقادیر به‌دست‌آمده در این مطالعه برای اقلیم نیمه‌خشک خرمدره و زنجان مطابقت کامل دارد. شایان ذکر است که در ایستگاه زنجان، هر دو مطالعه طول دوره رشد یکسان و برابر با ۷۷ روز را گزارش کرده‌اند.

نتایج کلی نشان داد که در هر سه ایستگاه، عامل رطوبت مهم‌ترین شاخص تعیین‌کننده در عملکرد گندم دیم است. به طور مشخص، در ایستگاه خدابنده بارش مؤثر (ER_{GP})، در ایستگاه زنجان تعداد روزهای بارش (N_{pr}^{GP}) و در ایستگاه خرمدره توزیع زمانی بارش (UR_{GP}) بیشترین اهمیت را دارند. این یافته‌ها با نتایج (Chakraborty et al. (2023) با یک مطالعه مشابه برای مناطق نیمه‌خشک گزارش شده است، مطابقت کامل دارد.

در بررسی ضرایب همبستگی بین عملکرد و گندم دیم در هر سه ایستگاه عامل توزیع بارش تعداد روزهای بارش در همه ایستگاه‌ها بالاترین همبستگی دارد. نتایج نشان داد هیچ یک از متغیرهای حرارتی (طول دوره رشد) در زنجان و خدابنده همبستگی معنی‌داری نداشتند، اما در خرمدره متوسط دماهای کمینه و متوسط دماهای میانگین در طول دوره رشد ($\bar{T}_{min}^{GP} r = 52 \quad p < 0.01$, $\bar{T}_{mean}^{GP} r =$) همبستگی معنی‌داری دیده شد. ($37 \quad p < 0.1$)

در مقایسه بین اهمیت بارش تجمعی و توزیع بارش در طول دوره رشد بر عملکرد گندم دیم، نتایج نشان داد که برای ایستگاه‌های خرمدره و زنجان، توزیع بارش و برای ایستگاه زنجان، میانگین بارش در طول دوره رشد از اهمیت بیشتری برخوردار است. یافته‌های مربوط به ایستگاه‌های خرمدره و زنجان با نتایج مطالعات داخلی محنت‌کش و همکاران (۱۳۹۶) و هادی و همکاران (۱۴۰۰) و همچنین با نتایج مطالعات خارجی (Liu et al. (2025), Hu et al. (2025) و Xu et al. (2025) هم‌خوانی کامل دارد.

بررسی ضرایب همبستگی بین عملکرد گندم دیم و شاخص‌های رطوبتی در سه ایستگاه نشان داد که تعداد روزهای بارش (N_{pr}^{GP}) در همه ایستگاه‌ها بالاترین همبستگی را با عملکرد دارد. در ایستگاه خدابنده، این شاخص بیشترین ضریب همبستگی را با عملکرد نشان داد، هرچند در مدل، بارش مؤثر (ER_{GP}) به‌عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده انتخاب شد. در ایستگاه خرمدره، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به تعداد روزهای بارش و بارش مؤثر بود، اما مدل، شاخص توزیع زمانی بارش (UR_{GP}) را به‌عنوان عامل کلیدی شناسایی کرد. در ایستگاه زنجان، برای هر دو روش، عنوان مهم‌ترین متغیر به‌دست آمد. هرچند اختلافات جزئی بین نتایج همبستگی و مدل در ایستگاه‌های خرمدره و خدابنده وجود دارد، ولی در هر دو ایستگاه، انتخاب نهایی شاخص‌ها در میان عوامل رطوبتی بوده است. نتایج این تحقیق پتانسیل تبدیل شدن به ابزارهای کاربردی برای کشاورزان و مدیران را دارد. پیشنهاد می‌شود یافته‌ها در جهت طراحی سامانه‌های آبیاری هوشمند و واکنش‌گرا بر اساس آستانه‌های بارش عمل می‌کنند، یا ارائه توصیه‌های کاشت متناسب با الگوهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده به کار گرفته شوند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

سجاد عسگری: جمع‌آوری داده‌های تجربی، گردآوری داده‌ها، نرم‌افزار؛ روش‌شناسی؛ تحقیق، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نگارش-بررسی و ویرایش، تحلیل صوری، تحلیل داده‌های تجربی، زهرا آقاشریعتمداری: نظارت، تحقیق، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، تحلیل داده‌های تجربی، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش-تهیه پیش‌نویس اصلی، نگارش-بررسی و ویرایش. همه نویسندگان نسخه منتشر شده مقاله را خوانده و با آن موافقت کرده‌اند. همه نویسندگان به طور مساوی در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس‌های اصلی و بعدی مشارکت داشته‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت دانشگاه تهران انجام شده است. نویسندگان مراتب تشکر ویژه خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه ابراز می‌دارند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- انصاری، سیوش؛ جوان‌بازرگانی، سامان؛ هاشمی شاهدانی، سیدمهدی و آزادگان، بهزاد. (۱۴۰۲). برآورد طول دوره رشد گندم در پایه روش ناحیه‌بندی اکولوژیکی FAO برای اقلیم ایران. *اکوهیدرولوژی*، ۱۰(۲)، ۲۳۱-۲۴۳.
- خلیلی، علی؛ بذرافشان، جواد و چراغعلی‌زاده، مجید. (۱۴۰۱). بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش‌یافته و کاربست روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. *نشریه علمی هواشناسی کشاورزی*، ۱۰(۱)، ۳-۱۶.
- عادل‌زاده، عبدالحسین. (۱۳۹۴). پیش‌یابی دمای شمال غرب ایران و ارتباط آن با ارتفاع ژئوپتانسیل. *دوفصل‌نامه آب و هواشناسی کاربردی*، ۲(۲)، ۱۷-۳۲.
- محنت‌کش، عبدالمحمد؛ ایوبی، شمس‌الله و دهقانی، امیرمحمد. (۱۳۹۶). تعیین عوامل مؤثر در تولید گندم در کمک آنالیز حساسیت در زاگرس مرکزی. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۵(۲)، ۲۶۶-۲۵۷.
- مرکز آمار ایران. (۱۴۰۲). *سالنامه آماری کشور ۱۴۰۲*. تهران: مرکز آمار ایران. بازیابی از <http://www.amar.org.ir>
- وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۱). *آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱*. تهران: معاونت برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی. بازیابی از <http://www.maj.ir>
- هادی، معین؛ جلیلی، سعید؛ مونس‌خواه، وحید و مجنونی هریس، ابوالفضل. (۱۴۰۰). برآورد توابع عملکرد گندم در استفاده از پارامترهای اقلیمی و کاربرد روش‌های رگرسیونی چندمتغیره. *مجله علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۵(۲)، ۴۹۷-۵۰۶.

REFERENCE

- Ashfaq, M., Khan, I., Alzahrani, A., Tariq, M. U., Khan, H., & Ghani, A. (2024). Accurate wheat yield prediction using machine learning and climate-NDVI data fusion. *IEEE Access*, 12, 40947-40961. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3456789>
- Adelzadeh, A. H. (2015). Diagnostic of the temperature in northwest Iran and its relationship with geopotential height. *Journal of Applied Climatology*, 2(2), 17-32. (in Persian).
- Ansari, S., Javadi, S., Shahdany, S. M. H., & Azadegan, B. (2023). Estimation of the length of growing period of dry wheat based on the FAO ecological zoning method for the climate of Iran. *Journal of Ecohydrology*, 10(2), 231-243. <https://doi.org/10.22059/jje.2023.360033.1733>. (in Persian).
- Chakraborty, D., Başağaoğlu, H., Alian, S., Mirchi, A., Moriasi, D. N., Starks, P. J., & Verser, J. A. (2023). Multiscale extrapolative learning algorithm for predictive soil moisture modeling & applications. *Expert Systems with Applications*, 213(Part B), 119056. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119056>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp.785-794). ACM. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Elsayed, T., Ouda, S., Khalil, F., & Elmetwalli, A. (2025). Optimizing wheat yield and water productivity under water scarcity in Egypt. *Agricultural Water Management*, 286, 108231. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108231>
- FAO. (2021). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v4)*. https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/17175/1/GAEZ4_model_documentation+app_20210415_withFAOstyles_covers.pdf

- Hadi, M., Jalili, S., Mouneskhah, V., & Majnooni Heris, A. (2021). Estimation of rainfed wheat yield functions using climatic parameters and multivariate regression methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 497–506. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.309650.668731>. (in Persian).
- Haseeb, M., Ayub, M., Ashraf, M. S., Ahmed, W., Khan, M. A., & Ali, M. (2025). Winter wheat yield prediction using linear (Ridge, LASSO) and nonlinear (SVR, RF) machine learning models with remote sensing and climatic data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.108883>
- He, Y., Wei, Y., DePauw, R., Qian, B., Lemke, R., Singh, A., & Wang, H. (2013). Spring wheat yield in the semiarid Canadian prairies: Effects of precipitation timing and soil texture over recent 30 years. *Field Crops Research*, 149, 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.015>
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., & Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120(1–2), 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018>
- Hu, J., Li, Y., & Shi, P. (2025). Impact of future climate trend and fluctuation on winter wheat yield in the North China Plain and adaptation strategies. *Scientific Reports*, 15, Article 06370. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06370-6>
- IPCC. (2021). Summary for policymakers: Climate change, the physical science basis (Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge University Press.
- Khalili, A., Bazrafshan, J., & Cheraghalizadeh, M. (2022). A comparative study on climate maps of Iran in extended De Martonne classification and application of the method for world climate zoning. *Agricultural Meteorology*, 10(1), 3–16. <https://doi.org/10.22125/agmj.2022.156309>. (in Persian).
- Li, Q. C., Xu, S. W., Zhuang, J. Y., Liu, J. J., Yi, Z. H., & Zhang, Z. X. (2023). Ensemble learning prediction of soybean yields in China based on meteorological data. *Journal of Integrative Agriculture*, 22, 1909–1927. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(23\)63477-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(23)63477-2)
- Li, Y., Hu, J., Shi, P., et al. (2024). Knowledge guided machine learning for improving crop yield projections of waterlogging effects under climate change. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 22, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.03.007>
- Li, Y., Hu, J., Shi, P., et al. (2025). Using machine learning techniques to evaluate the impact of future climate change on wheat yields in Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*, 300, 108960. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.108960>
- Liu, B., et al. (2024). Modeling impacts of climate-induced yield variability and adaptation on wheat and maize in Northwestern China. *Scientific Reports*, 14(1), Article 09820. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-09820-3>
- Liu, X., Wang, P., Chen, J., Zhang, Y., Li, M., Huang, C., ... & Zhou, T. (2025). Climate change impacts on crop yields across temperature rise regimes and climatic zones. *Scientific Reports*, 15, 7405. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07405-8>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2017)*, 30, 4765–4774. <https://papers.nips.cc/paper/7062-a-unified-approach-to-interpreting-model-predictions>
- Lundberg, S. M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J. M., Nair, B., Katz, R., Himmelfarb, J., Bansal, N., & Lee, S. I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence*, 2(1), 56–67. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mehnatkesh, A., Ayoubi, S., & Dehghani, A. A. (2017). Determination of the most important factors on rainfed wheat yield by using sensitivity analysis in Central Zagros. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2), 257–266. <https://doi.org/10.22067/gsc.v15i2.37244>. (in Persian).
- Monti, A., & Venturi, G. (2007). A simple method to improve the estimation of the relationship between rainfall and crop yield. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(3), 255–260. <https://doi.org/10.1051/agro:2007011>
- Moreno Sánchez, J. C., Acosta Mesa, H. G., Trueba Espinosa, A., Ruiz Castilla, S., & García Lamont, F. (2025). Improving wheat yield prediction through variable selection using support vector regression, random forest, and extreme gradient boosting. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100791. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100791>
- Samani, Z. A. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265–267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. In H. W. Kuhn & A. W. Tucker (Eds.), *Contributions to the theory of games II* (pp. 307–317). Princeton University Press.
- Singh, N., & Mulye, S. S. (1991). On the relations of the rainfall variability and distribution with the mean rainfall over India. *Theoretical and Applied Climatology*, 44(3), 209–221. <https://doi.org/10.1007/BF00865531>
- Van Klompenburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709.

- <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>
- Xu, X., Li, Y., Zhang, H., & Wang, J. (2025). Variance-based sensitivity analysis of climate variability impacts on wheat yield using machine learning. *Agricultural Water Management*, 294, 109409. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109409>
- Xu, Y., Albalawneh, A., Al-Zoubi, M., & Baroud, H. (2025). Variance-based sensitivity analysis of climate variability impact on crop yield using machine learning: A case study in Jordan. *Agricultural Water Management*, 313, 109409. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109409>
- Xue, L., Khan, S., Sun, M., Anwar, S., Ren, A., Gao, Z., Lin, W., Xue, J., Yang, Z., & Deng, Y. (2019). Effects of tillage practices on water consumption and grain yield of dryland winter wheat under different precipitation distribution in the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 191, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.004>
- Yousefi, N., Dadfar, M., Sharafi, S., Ebrahimi, M., & Bazrafshan, O. (2024). Sustainability insights: Enhancing rainfed wheat and barley yield prediction in arid regions. *Field Crops Research*, 312, 109529. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109529>
- Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1–4), 254–271. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)
- Zhang, X., Li, Y., Hu, L., & Wang, R. (2025). Impact of future climate trend and fluctuation on winter wheat yield. *Scientific Reports*, 15, Article 06370. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06370-6>