

Assessing the relationship between environmental variables, vegetation indices, and soil properties on rainfed wheat yield

Azadeh Soltani¹, Ali Asghar Zolfaghari^{2*}, Seyed Hasan Kaboli³, Giuseppe Longo Minnolo⁴

¹ Ph.D. Candidate of Department of Combatting Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

² Associate Professor, Department of Combatting Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

³ Associate Professor, Department of Arid Lands Management, Faculty of Desert Science, Semnan University, Semnan, Iran

⁴ Research Assistant Professor, Department of Agriculture, Food and Environment (Di3A), University of Catania, Catania, Italy

Extended Abstract

Introduction

Rainfed wheat is one of the most important strategic crops in arid and semi-arid regions, where crop production is highly dependent on rainfall variability and environmental conditions. In these systems, spatial and temporal differences in soil properties, vegetation dynamics, and topographic conditions can significantly affect crop growth and final yield. Soil physical and chemical characteristics influence water retention, nutrient availability, aeration, and root development, while vegetation indices derived from satellite imagery can reflect crop vigor and seasonal growth conditions. Similarly, topographic variables such as elevation, slope, and moisture-related indices affect runoff generation, soil moisture distribution, erosion processes, and local microclimatic conditions. In semi-arid regions of Iran, including Semnan Province, identifying the dominant environmental factors controlling rainfed wheat yield is essential for improving agricultural management and reducing production risks. Previous studies have often investigated soil, vegetation, or topographic factors separately; however, fewer studies have simultaneously evaluated their combined effects and relative importance under field conditions. In addition, the interrelationships among environmental variables may complicate the interpretation of their independent effects on yield. Therefore, the present study was conducted in the Kalpoosh Plain to investigate the relationships among soil properties, NDVI, topographic indices, and rainfed wheat yield using correlation analysis and Boruta feature selection. The study also evaluated multicollinearity among environmental variables to improve the interpretation of variable importance and environmental interactions.

Materials and Methods

This study was conducted in rainfed wheat fields of the Kalpoosh Plain located in northeastern Mayami County, Semnan Province, Iran. Data were collected from 112 wheat fields during the growing season. Wheat yield was measured using 5×5 m plots, and soil samples were collected from the 0–30 cm layer at the center of each plot. Geographic coordinates of sampling points were recorded using GPS. Soil analyses included texture fractions (sand, silt, and clay), bulk density (BD), pH, electrical conductivity (EC), equivalent calcium carbonate (TNV), organic carbon (OC), total nitrogen (N), soluble potassium (K), sodium (Na), calcium plus magnesium (Ca+Mg), and sodium adsorption ratio (SAR). Laboratory analyses were performed using standard procedures. Monthly NDVI values from April to July were extracted from Sentinel-2 imagery with 10 m spatial resolution after atmospheric correction and cloud removal. Topographic variables including elevation, slope, topographic wetness index (TWI), LS-factor, plan curvature, profile curvature, valley depth, and relative slope position (RSP) were derived from the 30 m SRTM digital elevation model. Pearson correlation analysis was used to investigate relationships among environmental variables and wheat yield. Correlation matrices and heatmaps were generated for graphical interpretation. Because strong correlations among predictor variables can influence statistical interpretation, multicollinearity was evaluated using Variance Inflation Factor (VIF) and Tolerance (TOL) indices. Variable importance and sensitivity analysis were performed using the Boruta algorithm based on Random Forest in the R-Studio environment.

Results and Discussion

The results showed that many soil properties were strongly interrelated, whereas their direct relationships with wheat yield were generally weak. Among soil variables, TNV ($r = -0.25$) and soil pH ($r = -0.21$) showed the relatively weak to moderate negative correlations with yield. Soil texture fractions also exhibited very strong interrelationships, particularly between sand and silt ($r = -0.97$), while their correlations with yield were not significant. NDVI values across all months showed positive correlations with yield. The highest correlation was observed in May ($r = 0.53$), followed by June ($r = 0.46$), July ($r = 0.43$), and April ($r = 0.42$), highlighting the importance of vegetation conditions during stem elongation and reproductive growth stages. Strong correlations among monthly NDVI values also indicated strong temporal continuity in crop growth dynamics.

Among topographic variables, elevation showed the strongest (though weak) negative correlation with yield ($r = -0.29$), whereas TWI showed a weak positive correlation ($r = 0.24$). The negative effect of elevation may be associated with lower temperatures and shorter growing periods at higher altitudes. Multicollinearity analysis indicated that most variables did not exhibit serious collinearity; however, sand, clay, soluble sodium, and NDVI (month 2) showed high VIF values, suggesting the presence of multicollinearity among these predictors. Therefore, these variables should be interpreted with caution in model-based inference due to potential redundancy and overlapping information. Boruta analysis identified NDVI, elevation, TNV, pH and Ca+Mg the most influential variables affecting rainfed wheat yield.

Conclusion

This study identifies four key factors affecting rainfed wheat yield: altitude as a microclimatic factor, TNV, pH, and Ca+Mg as the main soil chemical constraints, and NDVI as the optimal remote sensing indicator for the critical growth stage. The insignificant contribution of soil texture and most topographic indicators highlights the nonlinear and interactive nature of these environmental factors, which can complicate linear modeling approaches. Theoretically, these findings emphasize the improvement of the efficiency of the feature selection algorithm (Boruta). In practical terms, targeted monitoring of the four identified variables (altitude, TNV, pH, Ca+Mg and NDVI) can support sustainable management through methods such as soil amendment to reduce lime and salinity, combined with seasonal remote sensing monitoring. In general, in semi-arid regions, rainfed wheat yield depends more on a few dominant environmental factors than on a wide range of variables. Future research should integrate dynamic climate data and use advanced models (e.g., neural networks) for yield prediction. Such approaches will help reduce yield variability, enhance food security, and support climate adaptation strategies in rainfed agriculture.

Keywords: Boruta algorithm, Correlation analysis, Feature selection, Remote sensing, Semi-arid regions, NDVI

Article Type: Research Article

Acknowledgement

Hereby, the authors express their sincere gratitude for the logistic support provided by Semnan University.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Azadeh Soltani: Conceptualization, Writing, Original Draft Preparation, Software, Visualization. **AliAsghar Zolfaghari:** Conceptualization, Software, Visualization, Review. **Seyed Hasan Kaboli:** Conceptualization, Review. **Giuseppe Longo Minnolo:** Conceptualization, Results Validation.

*Corresponding Author, E-mail: azolfaghari@semnan.ac.ir

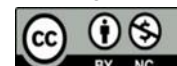
Citation: Soltani, A., Zolfaghari, AS., Kaboli, SH., & Longo Minnolo, G. (2026). Assessing the relationship between environmental variables, vegetation indices, and soil properties on rainfed wheat yield. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 329-350.

doi: 10.22098/mmws.2026.19728.1811

Received: 09 May 2026, Received in revised form: 22 June 2026, Accepted: 16 July 2026, Published online: 27 August 2026. *Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 329-350

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی ارتباط بین متغیرهای محیطی، شاخص های گیاهی و خصوصیات خاک بر عملکرد گندم دیم

آزاده سلطانی^۱، علی اصغر ذوالفقاری^{۲*}، سیدحسن کابلی^۳، جوزف لونگو مینولو^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه بیابان زدایی، دانشکده مطالعات کویر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ دانشیار، گروه بیابان زدایی، دانشکده مطالعات کویر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۳ دانشیار، گروه بیابان زدایی، دانشکده مطالعات کویر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۴ استادیار پژوهشی، دانشکده کشاورزی، غذا و محیط زیست (Di3A)، دانشگاه کاتانیا، ایتالیا

چکیده

عملکرد گندم دیم در مناطق خشک و نیمه خشک به عوامل محیطی نظیر توپوگرافی، پوشش گیاهی و خصوصیات خاک وابسته است. این مطالعه باهدف شناسایی ارتباط و اهمیت این عوامل در دشت کالپوش استان سمنان انجام شده است. داده های عملکرد و نمونه های خاک از ۱۱۲ مزرعه برداشت و عملکرد در پلات های ۵×۵ متر و نمونه های خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی متری همان پلات ها جمع آوری شد. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، چگالی ظاهری، کربن آلی، نیتروژن کل، اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، نسبت جذب سدیم و غلظت عناصر محلول اندازه گیری شد. شاخص NDVI از تصاویر Sentinel-2 با تفکیک ۱۰ متر برای ماه های فروردین تا تیر استخراج شد. شاخص های توپوگرافی شامل شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی، LS-factor، انحنا سطح، عمق دره و موقعیت شیب نسبی نیز از مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر استخراج شد. تحلیل داده ها در محیط R انجام شد. نتایج نشان داد خاک منطقه دارای بافت لوم شنی - رسی با میانگین pH برابر ۷/۶، شوری ۱/۴ dS/m، کربنات کلسیم معادل برابر ۸/۳ درصد، کربن آلی ۱/۱ درصد، سدیم محلول ۵/۹۶ ppm و SAR حدود ۱/۶۶ است. نتایج نشان داد که کربنات کلسیم معادل با $r = -0.25$ و اسیدیته با $r = -0.21$ همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۵ با عملکرد داشته اند. NDVI در تمام ماه ها رابطه مثبت معنادار با عملکرد نشان داد و بیشترین همبستگی در اردیبهشت ($r = 0.53$) مشاهده شد. در بین متغیرهای توپوگرافی ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی و موقعیت نسبی شیب به ترتیب با $r = -0.29$ ، $r = 0.24$ و $r = 0.23$ همبستگی معنادار با عملکرد داشتند. تحلیل هم خطی نشان داد متغیرهای درصد شن و رس، سدیم محلول و NDVI ماه دوم دارای هم خطی بالا هستند و از لیست داده ها حذف شدند. بر اساس الگوریتم Boruta، متغیرهای NDVI به جز اردیبهشت، ارتفاع، مجموع کلسیم - منیزیم، کربنات کلسیم معادل و اسیدیته مهم ترین عوامل مؤثر بر عملکرد گندم دیم بودند. در مجموع، نتایج نشان داد که عملکرد گندم دیم در دشت کالپوش حاصل برهم کنش عوامل محیطی مختلف از جمله ویژگی های شیمیایی خاک (به ویژه آهکی بودن) و شاخص پوشش گیاهی در طول فصل رشد است. نتایج نشان داد که متغیرهای مرتبط با پوشش گیاهی و ویژگی های شیمیایی خاک، به ویژه NDVI و کربنات کلسیم معادل، می توانند نقش مهمتری در تبیین تغییرات عملکرد گندم دیم داشته باشند.

واژه های کلیدی: الگوریتم Boruta، انتخاب ویژگی، تحلیل همبستگی، سنجش از دور، شاخص NDVI، مناطق نیمه خشک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azolfaghari@semnan.ac.ir

استناد: سلطانی، آزاده، ذوالفقاری، علی اصغر، کابلی، سیدحسن، و لونگو مینولو، جوزف (۱۴۰۵). ارزیابی ارتباط بین متغیرهای محیطی، شاخص های گیاهی و خصوصیات خاک بر عملکرد گندم دیم. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۳۲۹-۳۵۰.

doi: 10.22098/mmws.2026.19728.1811

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۳۲۹ تا ۳۵۰

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



۱- مقدمه

گندم دیم به‌عنوان یکی از محصولات راهبردی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش کلیدی در تأمین امنیت غذایی دارد. عملکرد این محصول به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و ویژگی‌های بوم‌اقلیمی قرار دارد (Soheilnejad et al. 2026; Hadi et al., 2021) و نوسانات آن‌ها، به‌ویژه در مراحل حساس گلدهی و پرشدن دانه، تعیین‌کننده سرنوشت تولید است (Amirashayeri et al. 2025). شرایط توپوگرافی، تنوع بارش و وابستگی مستقیم عوامل محیطی (خصوصیات خاک، وضعیت پوشش گیاهی) به نزولات جوی (Chen et al., 2023; Cao et al., 2020) باعث تغییرپذیری مکانی و زمانی این عوامل و اثرگذاری هم‌زمان و پیچیده بر عملکرد گیاه می‌شود (Ajami et al., 2020). از این‌رو، درک دقیق روابط میان متغیرهای محیطی و عملکرد گندم دیم، پیش‌نیاز اساسی برای بهبود مدیریت زراعی، کاهش شکاف عملکرد و توسعه رویکردهای تحلیلی پیشرفته محسوب می‌شود.

در دهه اخیر افزایش تغییر کاربری مراتع به اراضی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و تداوم استفاده از روش‌های سنتی شخم و کشت باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شده و در نتیجه بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Vaezi et al. 2025). از این‌رو، خصوصیات خاک به دلیل نقش اساسی در نگهداری آب، تهویه، تأمین عناصر غذایی و کاهش تنش‌های اسمزی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد گندم دیم به شمار می‌روند (Mousavi et al., 2024; Azari Sanjod and Borumand, 2026). یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شوری خاک است که با کاهش قابلیت نگهداری و انتقال آب و عناصر غذایی، رشد گیاه و کارایی استفاده از آب (WUE^1) و تابش (RUE^2) را محدود می‌کند. در مطالعه‌ای در مناطق نیمه‌خشک استرالیا، Dixit and Chen (2010) نشان دادند که افزایش شوری در لایه‌های زیرین خاک باعث کاهش عملکرد دانه، کاهش مصرف آب، افت کارایی استفاده از تابش و کاهش وزن خشک گیاه در گندم دیم شده و حتی رشد ریشه‌ها را محدود کرده است. در مجموع، شوری از طریق ایجاد تنش در جذب آب و محدود کردن توسعه ریشه، اثر قابل‌توجهی بر کاهش عملکرد دارد. همچنین Rezaei and Hemati (2012) در مزارع اراک گزارش کردند که زمین‌های با شوری کمتر، pH مناسب و وضعیت بهتر مواد غذایی، عملکرد بالاتری دارند و برخی ویژگی‌های خاک مانند میزان رس و پتاسیم

قابل جذب با عملکرد رابطه مثبت نشان داده‌اند. در همین راستا، Zaid et al. (2017) در استان منوفیه مصر نشان دادند که شاخص‌هایی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، درصد رس و سیلت، منافذ درشت خاک (QDP) و ظرفیت نگهداری آب (WHC) از مهم‌ترین عوامل در پیش‌بینی عملکرد گندم هستند. Salmanpour et al. (2026) در مطالعه‌ای بر روی انجیر در جنوب لرستان نشان دادند که عملکرد با درصد شن رابطه منفی و با درصد رس و میزان اشباع خاک رابطه مثبت و معنادار دارد، درحالی‌که ارتباط معناداری با شیب مشاهده نشد. در مجموع، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که عواملی مانند شوری (Gholami et al., 2025)، بافت خاک، حاصل‌خیزی (به‌ویژه فسفر قابل جذب)، شیب زمین و به‌خصوص عوامل رطوبتی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد محصولات کشاورزی دارند.

بررسی پویایی پوشش گیاهی توسط سنجش‌ازدور در مقیاس‌های بزرگ در سال‌های اخیر گسترش زیادی داشته است. سنجش‌ازدور توانایی ارائه تصاویر باکیفیت بالا و پیوسته از تغییرات پوشش گیاهی دارد (Hu and Xia, 2019). شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی ($NDVI^3$) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های استخراج‌شده از داده‌های سنجش‌ازدور است که کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی دارد (Hu et al., 2018; Tao et al., 2019; and Xia, 2019). این شاخص بر اساس بازتابندگی باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک محاسبه شده و به‌عنوان نمایه‌ای از سبزی‌نگی، میزان پوشش گیاهی و فعالیت فتوسنتزی نسبی گیاه شناخته می‌شود؛ از این‌رو می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت رشد و سلامت گیاه فراهم کند. مقدار $NDVI$ معمولاً تحت تأثیر غلظت کلروفیل قرار دارد (Spadoni et al., 2020). این شاخص به‌عنوان نماگرهای غیرمستقیم وضعیت فیزیولوژیک، تراکم تاج‌پوشش و سلامت گیاه، امکان ارزیابی پویای شرایط رشد را فراهم می‌سازد (Qaderi et al., 2018). Thapa et al., (2019) مطالعه‌ای به‌منظور توصیف واکنش گیاه به تنش آبی در ۲۰ ژنوتیپ گندم تحت شرایط دیم و آبیاری شده، بر اساس مقادیر $NDVI$ در طول فصل رشد انجام دادند. نتایج نشان داد که به‌جز در شرایط خشکسالی شدید (سال ۲۰۱۸، دیم)، مقدار $NDVI$ از اوایل بهار تا میانه فصل (مرحله گل‌دهی) افزایش یافت و از میانه فصل تا رسیدگی فیزیولوژیک کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده پیرشدگی تدریجی برگ‌ها است و بین $NDVI$ و عملکرد دانه، به‌ویژه برای مقادیر $NDVI$ پس از مرحله ساقه رفتن همبستگی مثبت و معنادار ($P \leq 0.05$)

³ Normalized Difference Vegetation Index

¹ Water Use Efficiency

² Radiation Use Efficiency

بر دقت پیش‌بینی عملکرد دارد. (Maestrini and Basso, 2018) ، مطالعه‌ای باهدف شناسایی چگونگی تأثیر ویژگی‌های توپوگرافیک و بارش بر پایداری عملکرد^۲ در طول زمان در غرب امریکا انجام دادند. نتایج نشان داد که میانگین شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI) به طور معناداری ($p < 0.05$) با سطوح مختلف پایداری عملکرد در نواحی گوناگون یک مزرعه مرتبط است. به طور مشخص، نواحی با کمترین میزان TWI که معمولاً خشک‌تر بوده و رطوبت کمتری در دسترس گیاه قرار می‌دهند، با سطوح پایین و پایدار عملکرد همراه بودند. در سوی دیگر، نواحی با بیشترین میزان TWI که از نظر رطوبتی غنی‌تر هستند، عملکرد بالا و پایداری را نشان دادند.

در سامانه‌های دیم، عملکرد گندم حاصل برهم‌کنش پیچیده ویژگی‌های خاک، عوامل توپوگرافی و وضعیت پوشش گیاهی است. خصوصیات خاک از جمله بافت، شوری، ماده آلی و ظرفیت نگهداری آب، با کنترل ذخیره و قابلیت دسترسی رطوبت و عناصر غذایی، رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Mousavi et al., 2017; Zaid et al., 2024). همچنین، عوامل توپوگرافی نظیر شیب، ارتفاع و شاخص‌های رطوبتی از طریق تأثیر بر رواناب، فرسایش و توزیع مکانی رطوبت خاک، ناهمگنی قابل‌توجهی در شرایط رشد گیاه ایجاد می‌کنند (Ajami et al., 2020; Maestrini and Basso, 2018). این تغییرات محیطی در شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI بازتاب یافته و این شاخص می‌تواند به‌عنوان نمایی از وضعیت فیزیولوژیک گیاه، سبزیگی پوشش گیاهی و ویژگی‌های زیستی مرتبط با محتوای کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی در نظر گرفته شود (Hu and Xia, 2022; Sharifi et al., 2019)؛ بنابراین، تغییرپذیری عملکرد گندم دیم نتیجه اثرات متقابل و هم‌زمان خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی است و تحلیل یکپارچه این عوامل برای مدل‌سازی دقیق عملکرد ضروری به نظر می‌رسد.

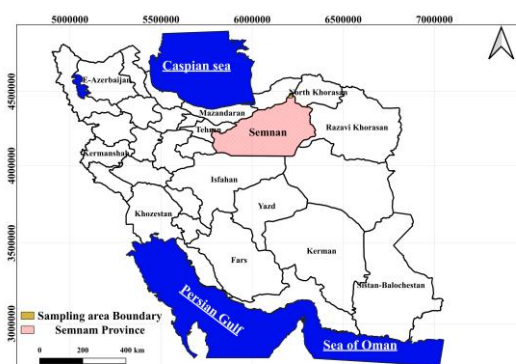
باوجود مطالعات متعدد درباره اثر ویژگی‌های خاک، شاخص‌های پوشش گیاهی و عوامل توپوگرافی بر عملکرد محصولات زراعی، اغلب این عوامل به‌صورت مستقل یا در ترکیب‌های محدود بررسی شده‌اند. از این‌رو، هنوز درک دقیقی از سهم نسبی هر یک از متغیرهای محیطی در کنترل تغییرپذیری عملکرد گندم دیم، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وجود ندارد. پژوهش حاضر با رویکردی یکپارچه، متغیرهای خاک، توپوگرافی و NDVI را به طور هم‌زمان بررسی کرده و با هدف شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد گندم دیم، سهم نسبی هر یک از این گروه‌های متغیر را در تغییرپذیری

مشاهده شد. (Tuğaç et al., 2022) گزارش کردند که NDVI در مراحل گلدهی و پر شدن دانه توانست بین ۳۸ تا ۶۳ درصد تغییرات عملکرد گندم را تبیین کند. (Panek and Gozdowski, 2020) نیز در مناطق مختلف اروپای مرکزی ضرایب همبستگی بین ۰/۰۵ تا ۰/۸۵ را بین NDVI و عملکرد غلات گزارش کردند. (Tamás et al., 2023) نیز در ذرت همبستگی‌های بالایی (۰/۸۰ تا ۰/۹۲) بین NDVI و عملکرد مشاهده نمودند. این نتایج نشان می‌دهد که NDVI اگرچه شاخص مستقیمی برای اندازه‌گیری عملکرد نیست، اما به‌عنوان نماینده‌ای از وضعیت رشد، سبزیگی و بنیه گیاه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد فراهم کند.

(Vannoppen and Gobin, 2022) نشان دادند که NDVI شاخصی ارزشمند برای پایش وضعیت پوشش گیاهی است، ولیکن بربرخی موارد استفاده از آن به‌تنهایی برای تبیین تغییرات عملکرد محصولات محدودیت‌هایی دارد که ترکیب آن با متغیرهای اقلیمی و رطوبتی خاک می‌تواند دقت پیش‌بینی عملکرد را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که عملکرد محصولات علاوه بر وضعیت پوشش گیاهی، به شرایط آب‌وهوایی و رطوبتی خاک نیز وابسته است. مطالعات نشان داده‌اند که NDVI می‌تواند به‌عنوان واسطه پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی نیز عمل کند (Raeesi, Sharifi et al., 2022). (et al., 2023) پژوهشی باهدف ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی در پاسخ به مقادیر سالانه بارش و دما در استان سمنان انجام دادند و نتایج نشان داد که در ۷۵ درصد از سطح استان سمنان رابطه بین شاخص پوشش گیاهی و متغیرهای اقلیمی در ماه‌های شهریور و دی با ضریب تبیین ۵۶٪ و ۶۲٪ حداکثر بوده که نشان‌دهنده ارتباط مثبت این دو پارامتر با شاخص پوشش گیاهی است. ارتباط متغیرهای توپوگرافی نیز با تأثیر بر توزیع رطوبت خاک، فرسایش، شکل‌گیری ریز اقلیم‌ها و جریان آب سطحی، تغییرپذیری عملکرد را در سطح چشم‌انداز تشدید یا تعدیل می‌کنند (Ajami et al., 2020; Azari Sanjod and Borumand, 2026). در یک بررسی (Bourennane et al., 2004) با تحلیل کریجینگ فاکتوریل (FKA^۱) در دو نوع خاک در فرانسه، روابط فضایی بین خصوصیات خاک و عملکرد گندم را در مقیاس‌های زمانی کوتاه و بلندمدت روشن کردند و تأکید نمودند که نقشه‌های عملکرد می‌توانند راهنمایی برای نمونه‌برداری بهینه خاک باشند. (Li et al., 2024) نیز با ادغام مدل APSIM و یادگیری ماشین در دیم‌زارهای چین، نشان دادند که جریان پویای آب و نیتروژن بین خاک و گیاه، بیشترین تأثیر را

^۲ Yield Stability^۱ Factorial Kriging Analysis

میلی متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۱/۸۶ درجه سانتی گراد است. اقلیم منطقه نیمه خشک است و تولید گندم عمدتاً به بارش های طبیعی وابسته است. این منطقه دارای تغییرپذیری مکانی و زمانی قابل توجه در عوامل اقلیمی و همچنین ناهمگونی برجسته ای در توپوگرافی و الگوی بارش است. چنین تنوعی شرایط مناسبی را برای بررسی اثر هم زمان متغیرهای محیطی بر عملکرد گندم فراهم می کند. ویژگی های متنوع توپوگرافی و پراکنش بارش، امکان تحلیل دقیق روابط بین شرایط محیطی و عملکرد محصول را در این منطقه فراهم می آورد.



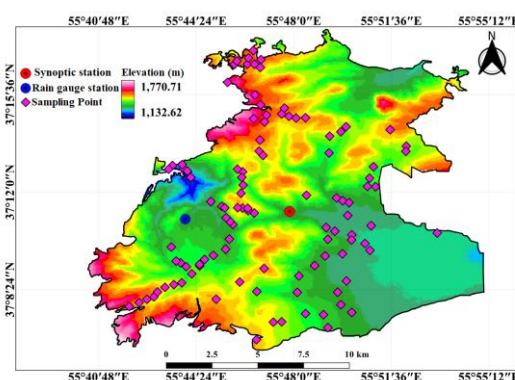
(الف)

عملکرد ارزیابی می کند. انتظار می رود متغیرهای مرتبط با وضعیت رطوبتی خاک و پوشش گیاهی نقش غالب تری در این تغییرات داشته باشند.

۲- روش شناسی تحقیق

۲-۱- منطقه ای مورد مطالعه

این مطالعه در دیمزارهای گندم دشت کالپوش با مساحت ۳۴،۷۴۴ هکتار، واقع در شمال شرقی شهرستان میامی، استان سمنان، انجام شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط منطقه حدود ۱۴۲۴ متر از سطح دریا است و بارندگی سالانه در منطقه در سال های مختلف بسیار متفاوت است؛ اما میانگین بلندمدت بارندگی سالانه منطقه بر اساس داده های ایستگاه های هواشناسی مستقر داخل منطقه ۳۲۰

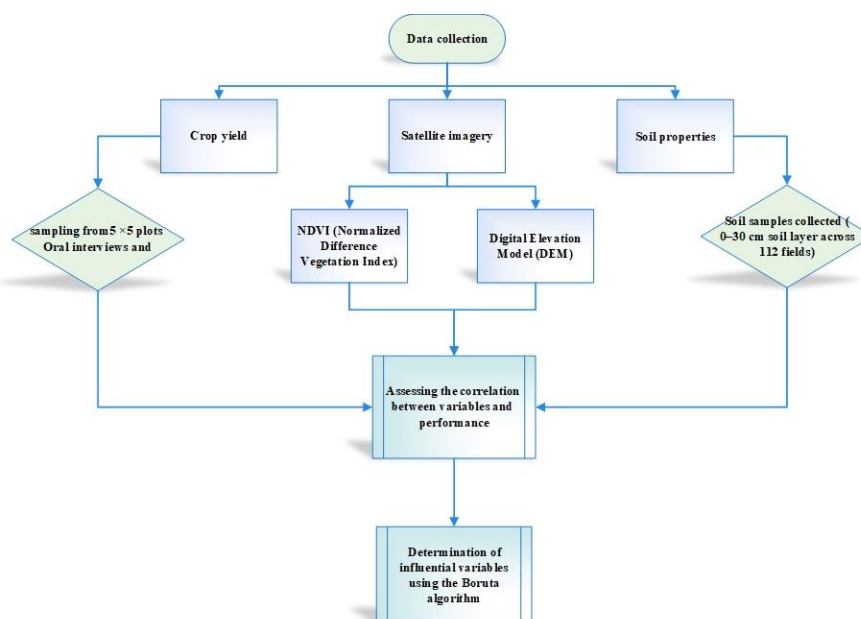


(ب)

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان سمنان (الف) و موقعیت نقاط نمونه برداری و ایستگاه های هواشناسی در منطقه

مورد مطالعه (ب)

Figure 1. Location of the Study area in Iran and Semnan Province (a) and location of Sampling point and meteorological station in study area (b)



شکل ۲- نمودار جریان تعیین متغیرهای مهم تأثیرگذار بر عملکرد گیاه

Figure 2. Flowchart of determination of importance variable in plant yield

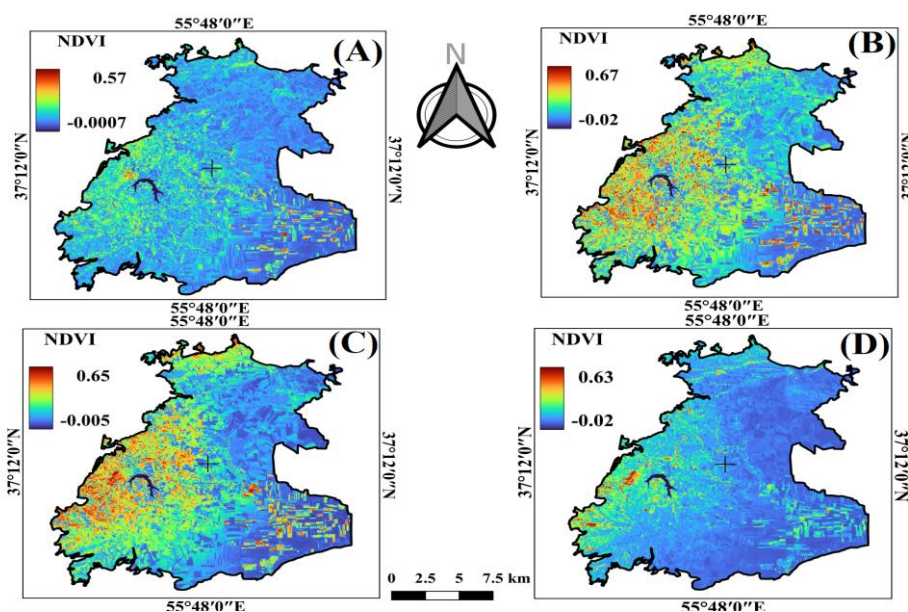
$$N = C * 0.086 \quad (1)$$

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

به منظور استخراج اطلاعات پوشش گیاهی، از شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شد. این شاخص بر اساس بازتاب طیفی باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک محاسبه شده و به طور گسترده برای پایش وضعیت پوشش گیاهی و رشد گیاهان در مطالعات کشاورزی به کار می‌رود. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که NDVI در مراحل حساس رشد، به ویژه گلدهی و پرشدن دانه، ارتباط معناداری با زی‌توده و عملکرد دانه دارد؛ زیرا در این مراحل، وضعیت سبزیگی و فعالیت فتوسنتزی گیاه نقش تعیین‌کننده‌ای در تشکیل و پرشدن دانه ایفا می‌کند (Zilouei et al. 2014). در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 مربوط به ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر سال ۲۰۲۳ که منطبق بر مراحل اصلی رشد گندم در منطقه مورد مطالعه هستند، تهیه شدند. تصاویر مورد استفاده دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر بوده و پیش از محاسبه شاخص NDVI، تحت فرآیندهای پیش‌پردازش شامل تصحیح اتمسفری و حذف پیکسل‌های ابری قرار گرفتند. سپس مقادیر NDVI برای هر ماه محاسبه و به عنوان یکی از متغیرهای ورودی در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳).

۲-۲- داده‌ها

عملکرد گندم از طریق اندازه‌گیری مستقیم میدانی در ۱۱۲ مزرعه تعیین شد. یدین صورت که در مرکز هر مزرعه، یک پلات ۵×۵ مترمربعی انتخاب و محصول آن به طور کامل برداشت و پس از توزین، عملکرد بر حسب واحد سطح محاسبه شد. اطلاعات حاصل از پرسش شفاهی کشاورزان نیز صرفاً باهدف مقایسه و اطمینان از واقع‌بینانه بودن مقادیر اندازه‌گیری شده مورد استفاده قرار گرفت و در تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی، تنها داده‌های حاصل از برداشت میدانی استفاده شد. نمونه‌های خاک از مرکز پلات‌های نمونه‌برداری عملکرد در هر مزرعه، از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد و سپس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن) با استفاده از روش هیدرومتری، چگالی ظاهری خاک (BD) با روش کلوخه، مقادیر پتاسیم و سدیم محلول با فلیم‌فوتومتري، کلسیم و منیزیم محلول با روش تیتراسیون، کربنات کلسیم معادل (TNV) با استفاده از روش کلسیتر، میزان کربن آلی (OC) با استفاده از روش والکی بلک و نیتروژن کل خاک از طریق رابطه ۱ محاسبه شد. pH خاک توسط pH متر در گل اشباع و هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از EC متر در عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. نسبت جذب سدیم (SAR) نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها با تکرار حداقل سه بار انجام شده و مقادیر میانگین برای تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت تا دقت و صحت داده‌ها تضمین شود.

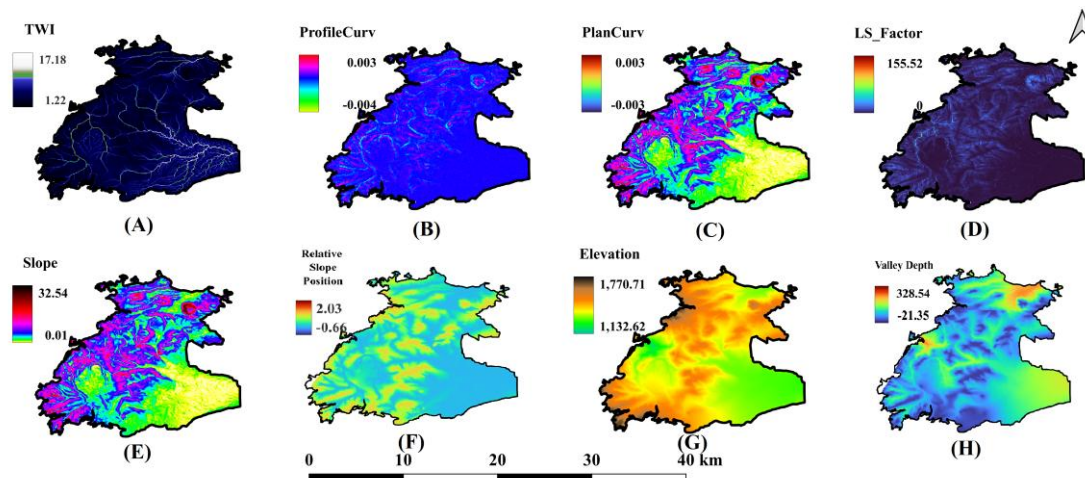


شکل ۳- تغییرات شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه (فروردین تا تیر)

Figure 3. Variation of NDVI index in study area (March-June)

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بیانگر پتانسیل تجمع رطوبت در سطح زمین و فاکتور LS نشان‌دهنده شدت بالقوه فرسایش است (Moore et al., 1993). مقادیر بالاتر TWI احتمال اشباع رطوبتی خاک را افزایش می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل محدودیت شدید آب، اهمیت زیادی برای تولید گندم دیم دارد. همچنین موقعیت نسبی شیب و عمق دره، بیانگر جایگاه هر نقطه در امتداد دامنه به ترتیب نماینده شدت بالقوه فرسایش و توزیع رطوبت، رسوبات و مواد آلی هستند (Mousavi et al., 2024). در مجموع، این شاخص‌ها به دلیل ارتباط مستقیم با فرآیندهای هیدروژئیک، فرسایشی و توزیع رطوبت خاک، از متغیرهای کلیدی در تحلیل تغییرپذیری عملکرد گندم دیم محسوب می‌شوند (Huang et al., 2008; Kravchenko and Bullock, 2000). تحلیل‌های فضایی نشان داده است که ویژگی‌های توپوگرافی به‌تنهایی بیش از ۴۱٪ از اهمیت نسبی در پیش‌بینی عملکرد واقعی گندم را در شرایط نیمه‌خشک به خود اختصاص می‌دهند و علاوه بر افزایش دقت مدل‌سازی، می‌توانند مبنای علمی مناسبی برای کشاورزی دقیق^۹ در مناطق خشک فراهم آورند (Mousavi et al., 2024). شکل ۴ تغییرات شاخص‌های توپوگرافی استفاده شده در مطالعه را حاضر را نشان می‌دهد.

داده‌های توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، که از خطوط میزان استخراج شده بود، تهیه شدند. متغیرهای مورد استفاده شامل ارتفاع^۱، شیب^۲، خمیدگی طولی^۳، خمیدگی عرضی^۴، شاخص رطوبت توپوگرافی^۵، فاکتور طول و شیب دامنه^۶، موقعیت نسبی شیب^۷ و عمق دره^۸ بودند. انتخاب این شاخص‌ها بر اساس نتایج مطالعات متعدد انجام شد که بیانگر نقش مهم توپوگرافی در کنترل توزیع رطوبت خاک، الگوی جریان رواناب، شدت فرسایش، شرایط ریز اقلیمی (دما و رطوبت نسبی) و در نهایت حاصل‌خیزی خاک بودند و بیان داشته‌اند که مؤلفه‌های توپوگرافی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد گندم دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارند (Huang et al., 2008; Kravchenko and Bullock, 2000; Mousavi et al., 2024; Florinsky, 2016). ارتفاع از طریق تأثیر بر دما، بارش و طول فصل رشد، نقش مهمی در تغییر رژیم حرارتی و رطوبتی خاک ایفا می‌کند (Zhang et al., 2025). شیب نیز با کنترل رواناب سطحی و شدت فرسایش، بر پایداری رطوبت و حاصل‌خیزی خاک اثرگذار است (Khan and Naeem, 2007). خمیدگی طولی نحوه حرکت آب در امتداد دامنه و خمیدگی عرضی الگوی توزیع جانبی جریان آب را توصیف می‌کنند (Mousavi et al., 2024).



شکل ۴- تغییرات شاخص‌های مستخرج از DEM (A: شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، B: خمیدگی نیمرخ، C: خمیدگی سطح، D: فاکتور طول و شیب دامنه (LS-Factor)، E: شیب، F: موقعیت نسبی شیب، G: ارتفاع و H: عمق دره)

Figure 4. Variation in indices extracted from DEM (A: TWI, B: Profile Curvature, C: Plan Curvature, D: LS-Factor, E: Slope, F: Relative Slope Position, G: Elevation and H: Valley Depth)

⁶ Slope Length and Steepness factor

⁷ Relative slope position

⁸ Valley Depth

⁹ Precision Agriculture

¹ Elevation

² Slope

³ Profile Curvature

⁴ Plan Curvature

⁵ Topographic Wetness index

۱-۳-۲- بررسی هم خطی پارامترها

هم خطی چندگانه^۳ به حالتی اطلاق می‌شود که میان دو یا چند متغیر مستقل، وابستگی خطی قوی وجود داشته باشد (Daoud, 2017; Al-Juaidi, 2023). این وضعیت می‌تواند موجب بی‌ثباتی در برآورد ضرایب رگرسیونی و کاهش قابلیت تفسیر و اعتمادپذیری نتایج مدل گردد. در این مطالعه، به منظور شناسایی و ارزیابی میزان هم خطی بین متغیرهای مستقل شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شاخص‌های NDVI و متغیرهای توپوگرافی، از شاخص‌های عامل تورم واریانس^۴ و تلورانس^۵ استفاده شد (Wang et al., 2020; Towfiquel, 2021; Islam et al., 2021; Habibi et al., 2023). به طور معمول، مقادیر VIF بزرگ‌تر از ۱۰ و مقادیر TOL کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده وجود هم خطی شدید میان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند (Sheikh et al., 2025). محاسبه این شاخص‌ها بر اساس رابطه ۳ انجام شد (Band et al., 2020; Pourghasemi et al., 2021).

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} = \frac{1}{TOL} \quad (3)$$

۳- نتایج

۱-۳-۳- توزیع خصوصیات خاک

برای بررسی نحوه توزیع و تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، از نمودار جعبه‌ای استفاده شد (شکل ۵). برای هر متغیر، پنج آماره کلیدی شامل حداقل (Min)، چارک اول (Q1)، میانه (Median)، چارک سوم (Q3) و حداکثر (Max) استخراج شد. دامنه بین‌چارکی (IQR) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده و به عنوان معیار اصلی پراکندگی داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. دامنه کل (Range) با استفاده از رابطه ۵ برای نشان دادن دامنه کل تغییرات گزارش شده است. براین اساس، متغیرهایی که IQR کوچک‌تری نسبت به دامنه کل دارند، پراکندگی محدود و یکنواختی بیشتری در بین نمونه‌ها نشان می‌دهند و بالعکس.

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (4)$$

$$Range = max - Min \quad (5)$$

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۵ و محاسبات انجام شده، رس دارای میانه ۲۸٪، IQR=۵/۵ و دامنه کل ۲۲ واحد بود که نشان‌دهنده پراکندگی نسبتاً محدود آن است. سیلت با میانه ۳۸٪،

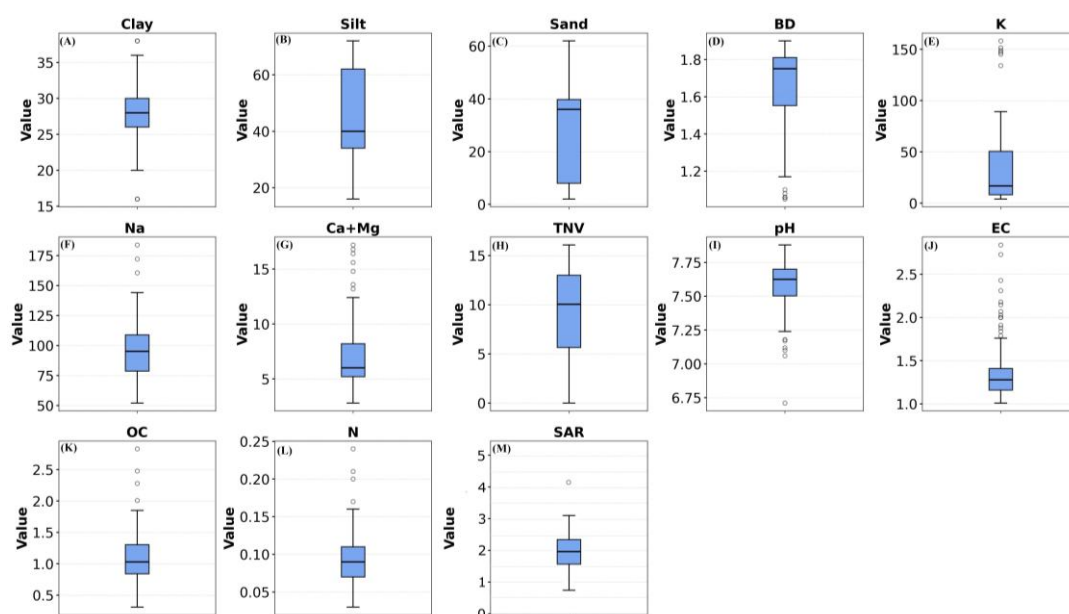
۲-۳- بررسی ارتباط متغیرهای محیطی (خصوصیات خاک، شاخص NDVI و شاخص‌های توپوگرافی) با یکدیگر و با عملکرد گیاه

برای بررسی روابط بین متغیرهای محیطی با یکدیگر و با عملکرد گندم، ابتدا ماتریس همبستگی پیرسون بین تمام متغیرهای مستقل (توپوگرافی، پوشش گیاهی و خصوصیات خاک) و همچنین بین این متغیرها با متغیر وابسته (عملکرد گندم) محاسبه شد. این تحلیل، شدت و جهت روابط خطی بین متغیرها را مشخص کرده و متغیرهای بالقوه مؤثر را شناسایی نمود. سپس، به منظور انتخاب دقیق و مطمئن متغیرهایی که بیشترین تأثیر را بر عملکرد گندم دارند، از الگوریتم بروتا^۱ استفاده شد. الگوریتم بروتا یک روش قدرتمند انتخاب ویژگی مبتنی بر مدل جنگل تصادفی است (Zolfaghari et al., 2023; Sheikh et al., 2025). به صورت خودکار و بدون نیاز به تنظیم دستی، متغیرهای معنادار را از میان مجموعه متغیرها جدا می‌کند. این الگوریتم توسط محققین مختلف برای تعیین مهمترین متغیرها در برآورد متغیرهای هدف مورد استفاده قرار گرفته است (Sheikh et al., 2025). این الگوریتم برای هر متغیر اصلی، چندین نسخه ویژگی سایه^۲ که رونوشت‌های تصادفی با توزیع کاملاً مشابه از متغیر مورد بررسی هستند، ایجاد می‌نماید و اهمیت هر متغیر را با حداکثر اهمیت ویژگی سایه مقایسه می‌کند (Kursa and Rudnicki, 2010). در این الگوریتم ارتباط بین متغیرهای سایه (شکل تصادفی شده متغیرهای مستقل) و متغیرهای مستقل (متغیرهای X از قبیل خصوصیات توپوگرافی، پوشش و خاک) با متغیر هدف (مقادیر Y عملکرد محصول) مورد بررسی قرار می‌گیرند. متغیرهایی که اهمیت آن‌ها به طور مداوم و معنادار بالاتر از ویژگی سایه باشد، به عنوان «پذیرفته شده» تأیید می‌شوند؛ متغیرهایی با اهمیت کمتر رد می‌شوند و مواردی که تفاوت معناداری با ویژگی سایه نداشته باشند، به عنوان «نامشخص» طبقه‌بندی می‌شوند (Szul et al., 2021). این فرآیند به صورت تکراری و تا دستیابی به مجموعه‌ای پایدار و قابل اعتماد از متغیرهای کلیدی ادامه می‌یابد (Vinayaga Moorthy and Balasubramanian, 2022; Zolfaghari et al., 2025; Sheikh et al., 2025). این عملیات در بستر نرم افزار R-studio-4.4.1 و با استفاده از بسته Brouta انجام شد.

^۴Variance Inflation Factor^۵ Tolerance^۱Boruta^۲Shadow features^۳ Multicollinearity

خاک منطقه است. اسیدیته خاک نیز در منطقه مورد مطالعه تغییرات محدودی داشته و دارای میانه $۷/۶$ ، $IQR=۰/۲۶$ و دامنه $۰/۲۵$ تا $۱/۱۷$ است. هدایت الکتریکی با میانه $۱/۲۷$ dS/m، $IQR=۰/۲۵$ و دامنه $۱/۸۳$ نیز در بیشتر نمونه‌ها پایین بوده است. این درحالی‌که که تعدادی مزرعه با شوری نسبتاً بالاتر (حداکثر $dS/m ۲/۸۴$) مشاهده شد. کربن آلی با میانه $۱/۰۲$ و $IQR=۰/۴۴$ و دامنه $۲/۱۷$ و نیتروژن کل با میانه $۰/۰۹$ ، $IQR=۰/۰۵$ و دامنه $۰/۱۸$ هر دو پایین بودند که نشان‌دهنده فقر مواد آلی در خاک منطقه است. مقادیر نسبت جذب سدیم (SAR) در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۳ بوده و در محدوده کم‌خطر قرار دارند. دامنه تغییرات $۳/۲۷$ دامنه بین‌چارکی $۰/۶$ نشان‌دهنده پراکندگی کم و یکنواختی نسبی داده‌ها است؛ بنابراین، از نظر خطر سدیمی شدن، وضعیت خاک در کل مناسب و پایدار ارزیابی می‌شود.

$IQR=۲۹$ و دامنه کل ۴۹ واحد، پراکندگی بسیار بالایی داشت، به‌طوری‌که نیمی از نمونه‌ها بین مقادیر ۳۳ تا ۶۲% سیلت قرار گرفتند. شن نیز با میانه ۳۹% ، $IQR=۳۴$ و دامنه کل ۵۱ واحد، تنوع بالایی را نشان داده است. چگالی ظاهری با میانه $۱/۷$ g/cm^3 و $IQR=۰/۲۵$ و دامنه کل $۰/۸۵$ یکنواختی نسبتاً خوبی در کل منطقه داشته است. مقادیر پتاسیم محلول با میانه $۱۶/۴۳$ ppm و $IQR=۴۲/۲۳$ و دامنه کل $۱۴۷/۶۵$ در اغلب نمونه‌ها بسیار پایین بود. سدیم محلول نیز با میانه $۹۵/۱۹$ ppm، $IQR=۳۲/۱۸$ و دامنه $۱۳۱/۸۱$ حضور قابل‌توجهی در خاک منطقه دارد. مقادیر کلسیم+منیزیم با میانه ۶ meq/L، $IQR=۲/۸$ و دامنه $۱۴/۴$ پراکندگی متوسطی در منطقه نشان داده است. کربنات کلسیم معادل (TNV) دارای میانه $۹/۷\%$ ، $IQR=۸/۱۷$ و دامنه $۱۶/۰۹$ است که حاکی از تنوع در مواد مادری در



شکل ۵- نمودار تغییرات و دامنه پراکنش خصوصیات خاک شامل (clay: رس، silt: سیلت، sand: شن، BD: وزن مخصوص ظاهری g/cm^3)، K: پتاسیم محلول، Na: سدیم محلول، Ca+Mg: کلسیم+منیزیم، TNV: کربنات کلسیم معادل، pH: اسیدیته، EC: هدایت الکتریکی، OC: کربن آلی، N: نیتروژن و SAR: نسبت جذب سدیم)

Figure 5. Diagram of variations and distribution of soil properties including (clay, silt, sand, BD: bulk density (g/cm^3), K: soluble potassium, Na: soluble sodium, Ca+Mg: Calcium+Magnesium, TNV: calcium carbonate equivalent, pH: acidity, EC: electrical conductivity, OC: organic carbon, N: nitrogen, and SAR: Sodium Adsorption Ratio)

از خصوصیات خاک به‌صورت مستقل عمل نکرده و دارای وابستگی متقابل هستند. شناسایی این روابط می‌تواند در تشخیص متغیرهای هم‌خط، تفسیر صحیح اثرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل خاکی بر عملکرد، و جلوگیری از برداشت نادرست از نقش هر متغیر مؤثر باشد. در میان اجزای بافت خاک، سیلت و شن دارای همبستگی منفی بالایی با یکدیگر بودند ($r=-۰/۹۷^*$) که بیانگر رابطه جایگزینی مستقیم این دو جزء در ترکیب بافتی خاک است و نیاز به بررسی رابطه هم خطی را

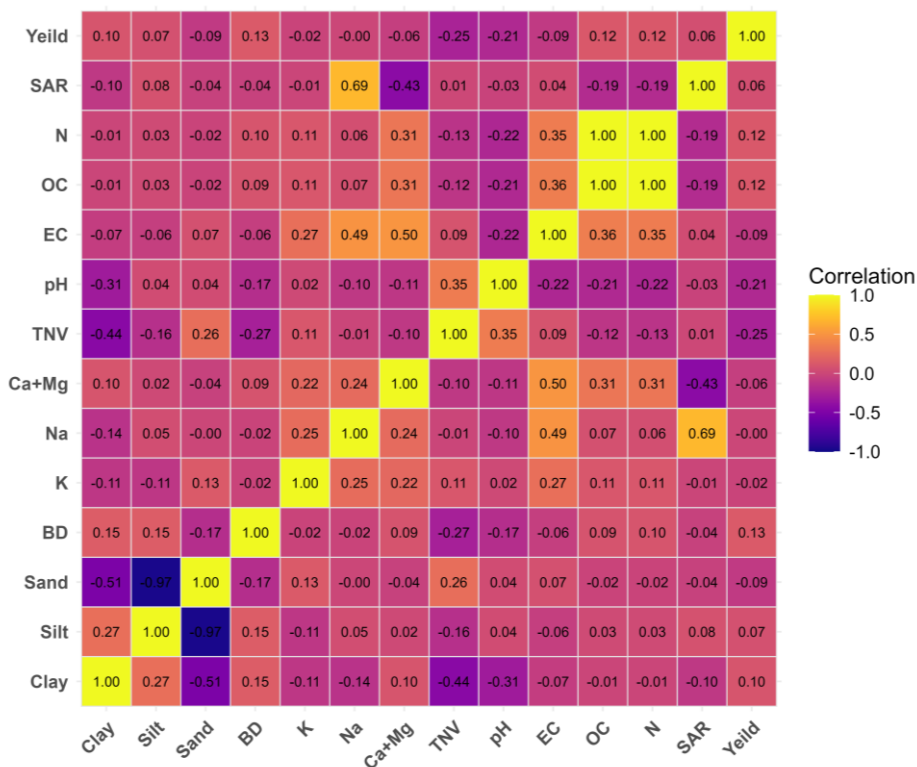
۴-۲- بررسی همبستگی خصوصیات خاک با عملکرد گیاه

بررسی ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که شدت و جهت روابط بین متغیرهای مورد مطالعه بسیار متفاوت است و می‌توان آن‌ها را به دودسته اصلی شامل روابط بین خصوصیات خاک با یکدیگر و روابط بین خصوصیات خاک با عملکرد گندم دیم (شکل ۶-۶) تقسیم کرد. بررسی روابط درونی بین ویژگی‌های خاک، علاوه بر شناخت فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر خاک‌های منطقه، از نظر تفسیر رفتار عملکرد نیز اهمیت دارد؛ زیرا بسیاری

خاک است. کربن آلی (OC) با کلسیم+منیزیم همبستگی مثبت معنادار داشت ($r=0/35^*$) و با هدایت الکتریکی نیز همبستگی مثبت نشان داد ($r=0/42^*$). همچنین کربن آلی با pH همبستگی منفی معنادار داشت ($r=-0/23^*$). در خصوص آهک و واکنش خاک، کربنات کلسیم معادل (TNV) با رس همبستگی منفی نسبتاً قابل توجهی نشان داد ($r=-0/42^*$) و با اسیدیته همبستگی مثبت معنادار داشت ($r=0/33^*$) که بیانگر افزایش واکنش قلیایی با افزایش آهک است. مجموع این نتایج نشان می‌دهد که بسیاری از ویژگی‌های خاک، به‌ویژه اجزای بافتی، شاخص‌های مرتبط با شوری و سدیمی بودن، و همچنین روابط بین آهک، واکنش خاک و سایر خصوصیات شیمیایی، دارای ارتباطات ساختاری و شیمیایی مشخص و غالباً قوی با یکدیگر هستند. در مقابل، بررسی ضرایب همبستگی معنادار بین عملکرد گندم دیم و ویژگی‌های خاک نشان داد که فقط دو رابطه معنادار (کربنات کلسیم معادل ($r=-0/28$) و pH ($r=-0/2$)) در سطح پنج درصد وجود دارد. سایر ضرایب همبستگی عملکرد با متغیرهای خاک در سطح پنج درصد معنادار نبودند؛ بنابراین، تنها دو پارامتر TNV و pH به طور معنادار با عملکرد ارتباط خطی معنادار نشان دادند.

ایجاد می‌کند. همچنین بین رس و شن همبستگی منفی نسبتاً بالایی مشاهده شد ($r=-0/55^{**}$)، درحالی‌که رابطه بین رس و سیلت مثبت و در سطح پایین‌تری قرار داشت ($r=0/34^*$). این الگو نشان می‌دهد که تغییر در هر جزء بافتی با تغییر معکوس یا مستقیم در اجزای دیگر همراه است که ماهیت فیزیکی و وابستگی ساختاری بافت خاک را منعکس می‌کند.

چگالی ظاهری (BD) تنها با پارامتر کربنات کلسیم معادل همبستگی معنادار ($r=-0/27^*$) نشان داد. در میان ویژگی‌های شیمیایی خاک، سدیم محلول (Na) با نسبت جذب سدیم (SAR) همبستگی مثبت نسبتاً بالایی داشت ($r=0/66^*$) که از نظر مفهومی نیز قابل انتظار است، زیرا نسبت جذب سدیم مستقیماً تحت تأثیر غلظت سدیم قرار می‌گیرد. سدیم همچنین با هدایت الکتریکی (EC) همبستگی مثبت قابل توجهی نشان داد ($r=0/56^*$) که بیانگر نقش این عنصر در افزایش شوری خاک است. بین مجموع کلسیم و منیزیم (Mg+Ca) با EC نیز همبستگی مثبت نسبتاً قوی مشاهده شد ($r=0/54^*$). پتاسیم (K) با سدیم ($r=0/28^*$)، کلسیم+منیزیم ($r=0/23^*$) و هدایت الکتریکی ($r=0/30^*$) همبستگی مثبت معنادار نشان داد. نسبت جذب سدیم با کلسیم+منیزیم همبستگی منفی متوسطی داشت ($r=-0/4^*$) که نشان‌دهنده تعامل این کاتیون‌ها در تعادل یونی



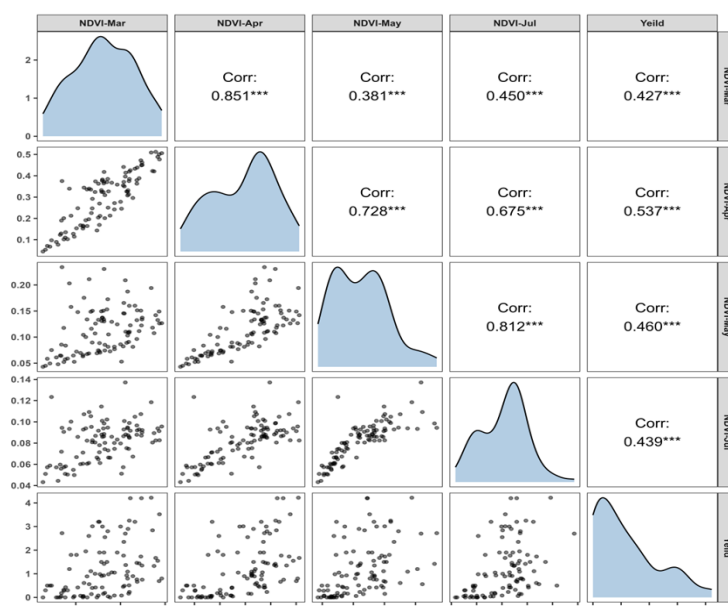
شکل ۶- نقشه شدت همبستگی بین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گیاه

Figure 6. Heatmap showing correlation Between soil properties and plant yield

۳-۴- همبستگی شاخص NDVI با عملکرد گیاه

نتایج همبستگی شاخص NDVI در فصل رشد با یکدیگر و با عملکرد (شکل ۷-۷) نشان داد که مقادیر NDVI در طول فصل رشد روند نسبتاً منظم و پیوسته‌ای دارند و تغییرات آن در ماه‌های متوالی به‌خوبی با یکدیگر همسو است. در تحلیل همبستگی بین شاخص NDVI در چهار ماه فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر با یکدیگر و با عملکرد گندم، تمامی ضرایب همبستگی مثبت و در سطح ۱ درصد معنادار شدند. بالاترین همبستگی درونی مربوط به رابطه بین NDVI اردیبهشت و خرداد است ($r=0.81^{***}$) که بیانگر تغییرات تقریباً موازی در مرحله اوج رشد رویشی و سنبله‌دهی است. همچنین همبستگی فروردین با اردیبهشت ($r=0.728^{***}$)، فروردین با خرداد ($r=0.675^{***}$) و فروردین با تیر ($r=0.537^{***}$) قوی و معنادار ارزیابی می‌شود که نشان‌دهنده تداوم اثر شرایط اولیه بهار تا انتهای فصل رشد است. در مقابل، همبستگی NDVI هر ماه با عملکرد گندم الگوی متفاوتی دارد، بیشترین ضریب همبستگی با عملکرد مربوط به NDVI اردیبهشت با مقدار $r=0.53^{***}$ است که همبستگی مثبت را نشان می‌دهد که اهمیت وضعیت پوشش سبز در اوایل

فصل رشد را در تعیین عملکرد نهایی گندم تأیید می‌کند. این مرحله رشدی به دلیل نقش تعیین‌کننده در توسعه سطح برگ، تشکیل پنجه‌های بارور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه، تأثیر مستقیمی بر تعداد سنبله و اجزای عملکرد دارد. همچنین شرایط اقلیمی به‌ویژه میزان و توزیع بارندگی و وقوع تنش‌های حرارتی و رطوبتی در این دوره می‌تواند تغییرات قابل‌توجهی در مقدار NDVI و در نهایت عملکرد گندم ایجاد کند؛ بنابراین، تغییرات زمانی NDVI صرفاً بیانگر وضعیت پوشش گیاهی نبوده، بلکه بازتابی از پاسخ گیاه به شرایط محیطی و تنش‌های اقلیمی طی مراحل مختلف فنولوژیک نیز محسوب می‌شود. در ادامه، NDVI خرداد ($r=0.46^{***}$) و NDVI تیر ($r=0.43^{***}$) و فروردین ($r=0.427^{***}$) نیز همبستگی مثبت با عملکرد داشتند، درحالی‌که کمترین مقدار همبستگی متعلق به NDVI خرداد با فروردین با ضریب 0.38^{***} است؛ این کاهش احتمالاً ناشی از تأثیر سایه‌اندازی تاج‌پوشش یا تنش‌های بهاره است (Naser et al., 2020). همه نتایج در سطح معناداری ۰/۰۰۱ درصد بررسی شده است.



***: p-value < 0.001 → ۹۹.۹٪ همبستگی بسیار قوی و معنادار در سطح

شکل ۷- نمودارهای همبستگی بین شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و عملکرد گیاه در سطح $p\text{-value} < 0.001$

Figure 7. Correlation Graphs between NDVI and Plant yield ($p\text{-value} < 0.001$)

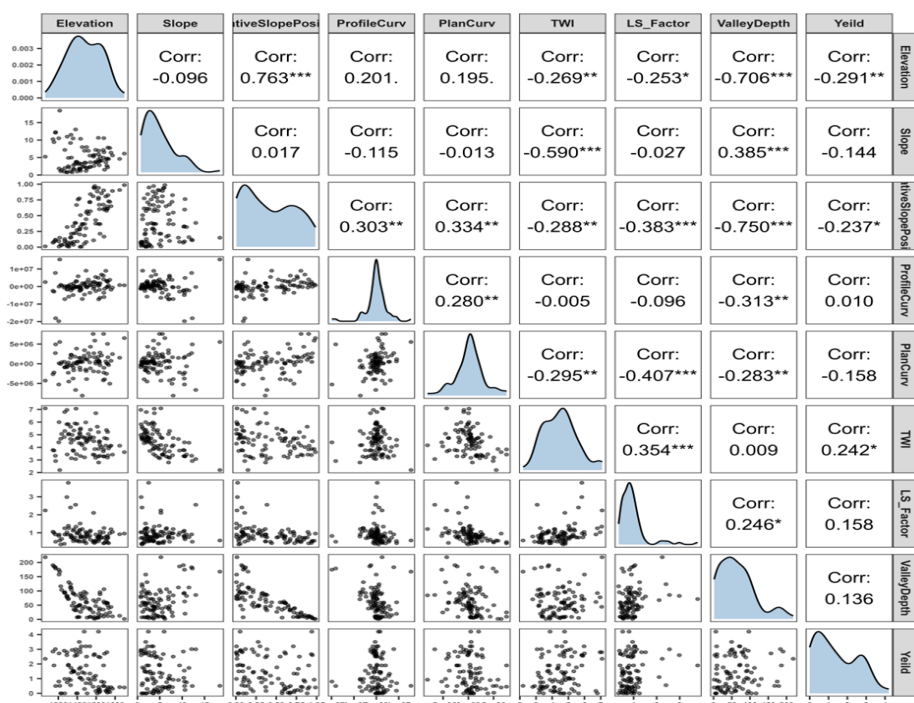
۳-۵- همبستگی شاخص‌های مستخرج از DEM با عملکرد گیاه

بررسی ماتریس همبستگی نشان داد که شاخص‌های توپوگرافی استخراج‌شده از DEM، الگوهای ارتباطی متفاوتی با یکدیگر و

با عملکرد گندم دارند (شکل ۸-۸). در میان روابط درونی، همبستگی بین شاخص LS و TWI با ضریب 0.35^{***} مشاهده شد. این موضوع قابل‌انتظار است، زیرا هر دو شاخص به‌نوعی با فرآیندهای هیدرولوژیکی و نحوه تجمع و حرکت آب در سطح

مثبت بین عملکرد و TWI با ($r=0/24$) و بیشترین همبستگی منفی با ارتفاع با $r=-0/29^{***}$ و سپس با موقعیت نسبی شیب با $r=0/23^{**}$ بوده است. همبستگی عملکرد با شیب ($-0/14$) بوده است؛ به این معنا که در این منطقه، شیب‌های ملایم‌تر احتمالاً شرایط بهتری برای تولید فراهم کرده‌اند. عمق دره نیز با ارتفاع و موقعیت نسبی شیب به ترتیب همبستگی منفی نسبتاً قوی ($-0/70^{***}$ و $-0/75^{***}$) نشان داد که بیانگر وابستگی ژئومورفولوژیک این شاخص‌ها در توصیف موقعیت نقاط در امتداد دامنه است. از دیدگاه هیدرولوژیکی، نواحی دارای عمق دره بیشتر معمولاً پتانسیل بالاتری برای تجمع رطوبت و رسوبات آبرفتی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش عملکرد در ارتفاعات بالاتر و نواحی با پتانسیل رطوبتی بیشتر ممکن است ناشی از ترکیبی از عوامل اقلیمی و ژئومورفولوژیک باشد. در ارتفاعات بالاتر، کاهش دما و کوتاه‌تر بودن فصل رشد می‌تواند رشد گیاه را محدود کند. همچنین نواحی دارای عمق دره بیشتر و مقادیر بالاتر TWI معمولاً بیانگر تفاوت در الگوی توزیع و ذخیره رطوبت ناشی از بارش در طول فصل رشد هستند که می‌تواند بر عملکرد گندم دیم تأثیر گذار باشد.

زمین مرتبط هستند. ارتفاع و موقعیت نسبی شیب (RSP) نیز همبستگی مثبت بالایی داشته‌اند ($0/76^{***}$)، درحالی‌که عمق دره با این دو شاخص همبستگی منفی نسبتاً قوی داشته است (به ترتیب $-0/70^{***}$ و $-0/75^{***}$). این همبستگی‌ها بیانگر وابستگی ژئومورفولوژیک شاخص‌های استخراج‌شده از DEM هستند. از آنجا که چنین شاخص‌هایی در مطالعات پیشین با الگوهای توزیع رطوبت، فرسایش و انتقال رسوبات مرتبط گزارش شده‌اند (Mousavi et al., 2024; Florinsky, 2016)، انتظار می‌رود تغییرات توپوگرافی منطقه نیز بر این فرآیندها اثر گذار باشد؛ هرچند این روابط در پژوهش حاضر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشد. شاخص رطوبت توپوگرافی با شیب و موقعیت نسبی شیب، همبستگی منفی معادل $-0/59^{***}$ و $-0/28^{**}$ داشتند. این نتیجه نشان می‌دهد که در شیب‌های تندتر یا در بخش‌های بالاتر دامنه، امکان تجمع رطوبت کمتر است. همچنین شاخص LS با انحنای پلان همبستگی منفی متوسطی ($-0/4^{***}$) نشان داد که می‌تولند بازتابی از نقش شیب‌های طولی در شکل‌گیری الگوی جریان‌های سطحی باشد. نتایج کلی نشان می‌دهد هیچ‌یک از شاخص‌های توپوگرافی به‌تنهایی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات عملکرد نداشته‌اند. بیشترین همبستگی



***: p-value < 0.001 → ۹۹.۹٪ همبستگی بسیار قوی و معنادار در سطح

**: p-value < 0.01 → ۹۹٪ همبستگی قوی و معنادار در سطح

*: p-value < 0.05 → ۹۵٪ همبستگی معنادار در سطح

همبستگی از نظر آماری معنادار نیست → p-value ≥ 0.05 بدون ستاره:

شکل ۸- نمودار شدت همبستگی بین شاخص‌های مستخرج از DEM با یکدیگر و با عملکرد گیاه

Figure 8. Heatmap showing correlation Between topographic indices and plant yield

۶-۳- بررسی هم خطی بین متغیرهای مستقل (VIF)

نتایج بررسی هم خطی چندگانه با استفاده از شاخص های VIF و TOL برای سه گروه متغیرهای مورد مطالعه شامل شاخص NDVI، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و شاخص های توپوگرافی در جدول ۱ ارائه شده است. به طور کلی، مقادیر VIF بزرگتر از ۱۰ و مقادیر TOL بزرگتر از ۰/۱ نشان دهنده وجود هم خطی شدید بین پارامترها است. در بین خصوصیات خاک شن و رس و سدیم محلول به دلیل هم خطی شدید از گروه پارامترها حذف شدند. براین اساس در گروه خصوصیات خاک، تمامی متغیرها دارای مقادیر VIF پایین تر از ۵ بودند. بیشترین مقدار مربوط به EC (۲/۱۹) و سپس SAR (۱/۶۲) بود که نشان دهنده نبود مشکل جدی هم خطی میان ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک است. در گروه شاخص NDVI، بیشترین مقدار

VIF مربوط به NDVI ماه اردیبهشت (۱۱/۶۹) بود که اندکی بالاتر از حد آستانه ۱۰ قرار دارد و نشان دهنده هم خطی نسبتاً بالا با سایر متغیرهای زمانی NDVI است. سایر ماه ها شامل فروردین (۶/۵۹)، خرداد (۵/۸۰) و تیر (۳/۱۶) در محدوده قابل قبول قرار داشتند. در گروه شاخص های توپوگرافی نیز مقادیر VIF در محدوده قابل قبول قرار داشتند. بیشترین مقدار مربوط به شاخص موقعیت نسبی شیب (۴/۷۱) و سپس ارتفاع (۳/۱۳) بود، در حالی که سایر متغیرها مانند Plan Curvature و Profile Curvature دارای مقادیر پایین تری بودند. به طور کلی، نتایج نشان داد که اگرچه در میان شاخص های زمانی NDVI هم پوشانی اطلاعاتی نسبی وجود دارد، اما در مجموع ساختار داده ها از نظر هم خطی در سطح قابل قبول قرار داشته و امکان استفاده از این متغیرها در تحلیل های بعدی فراهم است.

جدول ۱- نتایج همبستگی چندخطی بین عوامل مؤثر بر عملکرد گندم دیم

Table 1. The results of the multi-collinearity association between Rainfed Wheat yield influencing factors

Variable	VIF	Tolerance
Silt	1.08	0.92
BD	1.09	0.91
K	1.12	0.88
Ca_Mg	2.27	0.44
TNV	1.27	0.78
pH	1.29	0.77
EC	2.19	0.45
OC	1.31	0.76
SAR	1.62	0.61
Elevation	3.13	0.31
Slope	2.25	0.44
Relative Slope Position	4.71	0.21
Profile-Curv	1.19	0.84
Plan-Curv	1.36	0.73
TWI	2.02	0.49
LS_Factor	1.46	0.68
Valley Depth	3.97	0.25
'NDVI-Mar'	6.59	0.15
'NDVI-Apr'	11.69	0.08
'NDVI-May'	5.80	0.17
'NDVI-Jul'	3.16	0.31

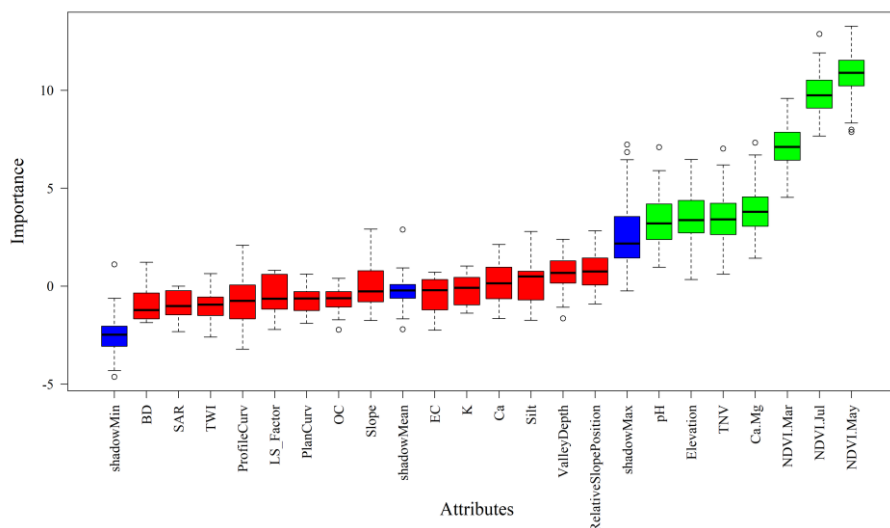
۷-۳- انتخاب مهم ترین متغیرها

تلاش شد از میان مجموعه ی متغیرهای محیطی، متغیرهایی که ارتباط قوی تری با عملکرد گندم دیم دارند شناسایی شوند. از آنجایی که متغیرهای شن، رس، سدیم محلول و شاخص

NDVI مربوط به اردیبهشت ماه دارای هم خطی بالا بودند، پیش از اجرای مدل از تحلیل حذف شدند و در الگوریتم بروتا وارد نشدند. نتایج مدل (شکل ۹) نشان داد که شاخص پوشش گیاهی در ماه های فروردین، خرداد و تیر، به همراه پارامترهای کربنات

نسبت به برخی ویژگی‌های منفرد خاک یا شاخص‌های موضعی توپوگرافی نشان می‌دهند. باین‌حال، رد شدن برخی متغیرها در الگوریتم بروتا لزوماً به معنای بی‌اثر بودن آن‌ها در فرآیند تولید نیست، بلکه بیانگر آن است که در چارچوب داده‌های این مطالعه و در مقایسه با متغیرهای قوی‌تر، سهم توضیحی کمتری داشته‌اند. به‌طور کلی، نتایج بروتا نشان می‌دهد که تغییرات عملکرد احتمالاً حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل توپوگرافی، شرایط شیمیایی خاک و وضعیت رشد گیاه در طول فصل رشد است و نمی‌توان آن را صرفاً به یک عامل منفرد نسبت داد. در نتیجه، تمرکز بر این متغیرها در تحلیل‌های بعدی و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی می‌تواند در بهبود ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد مفید باشد، هرچند تفسیر نتایج باید با توجه به محدودیت‌های داده‌ها و شرایط منطقه انجام گیرد.

کلسیم معادل، مجموع کلسیم و منیزیم، ارتفاع و اسیدیته، در مقایسه با سایر متغیرها اهمیت بیشتری در تبیین تغییرات عملکرد داشته و توسط الگوریتم به‌عنوان متغیرهای تأییدشده شناسایی شدند. در مقابل، سایر متغیرهای واردشده به مدل از نظر الگوریتم اهمیت کافی برای قرارگیری در گروه متغیرهای تأییدشده را کسب نکرده و در گروه متغیرهای ردشده طبقه‌بندی شدند. این وضعیت می‌تواند ناشی از دامنه تغییرات محدود این متغیرها در منطقه مورد مطالعه، یا بروز اثرات آن‌ها به‌صورت غیرمستقیم و در تعامل با سایر عوامل محیطی باشد. همچنین احتمال دارد بخشی از اطلاعات این متغیرها با متغیرهای مهم‌تر، نظیر ارتفاع، شرایط آهکی خاک و وضعیت پوشش گیاهی، همپوشانی داشته باشد و در نتیجه سهم توضیحی مستقل آن‌ها کاهش یافته باشد. از سوی دیگر، در شرایط کشت دیم معمولاً متغیرهای مرتبط با وضعیت رطوبتی و رشد گیاه نقش برجسته‌تری



شکل ۹- تعیین متغیرهای محیطی مؤثر بر عملکرد گندم دیم بر اساس الگوریتم بروتا

Figure 9. Determination of auxiliary variables on rainfed wheat yield Based on Boruta algorithm

ماه‌های فروردین خرداد و تیر، ارتفاع، کربنات کلسیم معادل، اسیدیته خاک و مجموع کلسیم و منیزیم به‌عنوان متغیرهای تأییدشده توسط الگوریتم Boruta شناسایی شدند. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که در منطقه مورد مطالعه، عملکرد گندم دیم تابع مجموعه محدودی از عوامل کلان‌مقیاس محیطی است و بسیاری از ویژگی‌های محلی خاک و توپوگرافی نقش مستقیم و مستقل قابل‌توجهی ندارند. یکی از یافته‌های مهم این مطالعه، نبود همبستگی معنادار بین عملکرد گندم دیم و اکثر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌جز TNV، pH و Ca+Mg بود. این

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تغییرپذیری عملکرد گندم دیم در دشت کالپوش حاصل برهم‌کنش پیچیده و غیرخطی عوامل خاکی، توپوگرافی و پوشش گیاهی است و هیچ متغیر منفردی قادر به تبیین کامل الگوی تغییرات عملکرد نمی‌باشد. این موضوع با ماهیت سیستم‌های دیم در مناطق نیمه‌خشک که تحت کنترل هم‌زمان محدودیت‌های آب، خاک و اقلیم هستند، همخوانی دارد. یافته‌ها نشان داد که از میان خصوصیات خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی، تنها پنج عامل شامل NDVI

نتیجه با برخی مطالعات پیشین از جمله Rezaei and Hemati (2012) و Zaid et al. (2017) که نقش پرننگ بافت خاک، پتاسیم قابل جذب، CEC و ظرفیت نگهداری آب را در کنترل عملکرد گزارش کرده‌اند، تفاوت دارد. این اختلاف را می‌توان به محدود بودن دامنه تغییرات خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه نسبت داد؛ به گونه‌ای که اغلب متغیرها در محدوده غیر تنش‌زا قرار داشته و از آستانه‌های اثرگذاری عبور نکرده‌اند. به عنوان نمونه، شوری خاک در بیشتر اراضی کمتر از 2 dS/m و در بازه 0.81 تا 1.83 dS/m قرار داشت که پایین‌تر از آستانه تحمل گندم دیم (حدود 2.08 dS/m) گزارش شده توسط Vaezi et al. (2025) است. هرچند در برخی مزارع مقادیر بالاتر (تا حدود 2.84 dS/m) مشاهده شد، اما این مقادیر نیز به سطحی نرسیدند که اثر محدودکننده قوی و یکنواخت بر عملکرد ایجاد کنند. این نتایج با یافته‌های Dixit and Chen, (2010) نیز همسو است که نشان دادند کاهش قابل توجه عملکرد تنها در شرایط افزایش شدیدتر شوری رخ می‌دهد، درحالی‌که در محدوده‌های پایین‌تر، اثر آن محدود باقی می‌ماند. در این مطالعه، رابطه معناداری بین درصد رس و عملکرد گندم دیم مشاهده نشد، درحالی‌که در بسیاری از پژوهش‌ها، رس به دلیل افزایش ظرفیت نگهداری آب به عنوان عامل مثبت در عملکرد معرفی شده است (Gollenbeek and Hilhorst, 2022). یکی از دلایل احتمالی عدم مشاهده این رابطه در منطقه مورد مطالعه، وجود لایه‌های نسبتاً متراکم در برخی مزارع است که طی بازدیدهای میدانی مشاهده شد. این وضعیت ممکن است در اثر عملیات مکرر خاک‌ورزی و تشکیل کفه شخم ایجاد شده باشد و با محدود کردن توسعه ریشه، بخشی از اثر مثبت افزایش رس بر نگهداری آب را کاهش دهد. در شرایط خاک متراکم، به‌ویژه در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری که ناحیه اصلی توسعه ریشه گندم محسوب می‌شود، رشد و نفوذ ریشه محدود شده و در نتیجه تولدایی گیاه برای استفاده از آب ذخیره‌شده در خاک کاهش می‌یابد (Mondal and Chakraborty, 2023; Mooney et al., 2023)؛ بنابراین، اگرچه افزایش رس می‌تواند به طور بالقوه ظرفیت نگهداری آب را افزایش دهد، اما در شرایط محدودیت فیزیکی خاک، این مزیت خنثی شده و اثر مثبت آن بر عملکرد ظاهر نمی‌شود. این یافته نشان می‌دهد که اثر بافت خاک بر عملکرد تنها در صورتی قابل تفسیر صحیح است که هم‌زمان با وضعیت ساختار و کیفیت فیزیکی خاک (به‌ویژه تراکم) مورد ارزیابی قرار گیرد. بر اساس نتایج الگوریتم Boruta، سه متغیر

TNV، pH و Ca+Mg به عنوان عوامل مؤثر شناسایی شدند. TNV و pH همبستگی منفی ضعیف اما معناداری با عملکرد نشان دادند که اگرچه از نظر آماری قوی نیست، اما از نظر فیزیولوژیکی قابل توجه است. در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش کربنات کلسیم معادل با افزایش pH همراه بوده و این شرایط موجب کاهش حلالیت عناصر ریزمغذی نظیر آهن، روی، منگنز و مس می‌شود (Wahba et al., 2019) که می‌تواند به‌ویژه در مراحل حساس رشد مانند پنجه‌زنی و پر شدن دانه، عملکرد را محدود کند (Grzebisz et al., 2023). باوجود محدود بودن دامنه تغییرات TNV و pH در منطقه معناداری این روابط نشان می‌دهد که حتی تغییرات جزئی در آهکی و قلیایی بودن خاک می‌تواند اثر قابل توجهی بر عملکرد گندم دیم در شرایط منطقه داشته باشد. در مقابل، Ca+Mg نیز به عنوان متغیر مهم شناسایی شد که نقش آن عمدتاً غیرمستقیم است. این کاتیون‌ها در خاک‌های آهکی در حفظ ساختمان خاک، تعدیل اثرات منفی سدیم و تأمین تعادل عناصر غذایی نقش دارند (Boyer, 1978). همبستگی مثبت Ca+Mg با EC و کربن آلی و همبستگی منفی آن با SAR نشان می‌دهد که این متغیر می‌تواند شاخصی از وضعیت نسبی حاصل‌خیزی خاک باشد. با این حال، عدم وجود رابطه مستقیم و معنادار با عملکرد بیانگر آن است که اثر Ca+Mg احتمالاً به‌صورت غیرمستقیم و از طریق تعامل با سایر ویژگی‌های خاک اعمال می‌شود. NDVI در ماه‌های فروردین، خرداد و تیر (به جز اردیبهشت به دلیل هم‌خطی بالا) به عنوان متغیرهای تأییدشده توسط الگوریتم Boruta شناسایی شدند. این یافته دو پیام مهم دارد؛ اول پایش مستمر و سری زمانی پوشش سبز در طول فصل رشد برای درک تغییرات عملکرد ضروری است و تکیه بر یک یا دو مقطع زمانی مشخص ممکن است اطلاعات ناقصی ارائه دهد. دوم، هرچند بالاترین همبستگی ساده با عملکرد متعلق به NDVI اردیبهشت بود، اما الگوریتم Boruta با در نظر گرفتن اثر متقابل همه متغیرها، اهمیت هر سه ماه را تأیید کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که شرایط رشد در مراحل مختلف فنولوژیک (از پنجه‌زنی در فروردین تا پر شدن دانه در تیر) به‌صورت زنجیره‌وار بر عملکرد نهایی تأثیر می‌گذارند و یک پوشش سبز خوب در فروردین، پیش‌بینی‌کننده وضعیت مطلوب در ماه‌های بعدی است (Graf et al., 2023). بیشترین همبستگی عملکرد با NDVI اردیبهشت (منطبق با مراحل ساقه رفتن تا اوایل گلدهی) با مطالعات پیشین نظیر

(Thapa et al. (2019) و Naser et al. (2020) همخوانی دارد. در این مرحله، توسعه سطح برگ، تشکیل پنجه‌های بارور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی تعیین‌کننده تعداد سنبله و پتانسیل عملکرد خواهد بود. ازسوی دیگر، همبستگی مثبت اما اندکی ضعیف‌تر NDVI تیر نشان می‌دهد که حفظ سبزی‌نگی در مرحله پر شدن دانه نیز برای تأمین مواد فتوسنتزی ضروری است، اما به دلیل اثر سایه‌اندازی تاج‌پوشش و اشباع نسبی NDVI در تراکم‌های بالا، شدت این رابطه کاهش می‌یابد. مقادیر ضریب همبستگی NDVI با عملکرد تنها ۱۸ تا ۲۸ درصد از تغییرات عملکرد را تبیین می‌کنند. این بدان معناست که بخش عمده‌ای از واریانس عملکرد توسط عواملی غیر از NDVI (از جمله شرایط اقلیمی، مدیریت مزرعه و خصوصیات خاک) کنترل می‌شود؛ بنابراین، اگرچه NDVI یک شاخص مفید و در دسترس است، اما به‌هیچ‌وجه نمی‌تواند به‌تنهایی جایگزین اندازه‌گیری‌های میدانی یا مدل‌سازی جامع شود. این یافته با مطالعه Vannoppen and Gobin (2022) که NDVI به‌تنهایی نتوانست تغییرات عملکرد چغندر قند و سیب‌زمینی را به‌طور کامل توضیح دهد، همسو است. یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه، شناسایی ارتفاع به‌عنوان مؤثرترین متغیر توپوگرافی و رد شدن شاخص‌های محلی مانند TWI، شیب و انحنای توسط الگوریتم Boruta بود. این نتیجه با مطالعه Maestrini and Basso (2018) که TWI را به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده اصلی پایداری عملکرد در غرب آمریکا معرفی کردند، تفاوت دارد. برای تفسیر این تفاوت باید به تفاوت مقیاس مکانی و شرایط اقلیمی توجه کرد. در منطقه کالپوش با دامنه ارتفاعی قلیل توجه ارتفاع به‌عنوان یک عامل اقلیمی کلان عمل می‌کند. با افزایش ارتفاع، میانگین دما کاهش می‌یابد، فصل رشد کوتاه‌تر می‌شود، خطر یخبندان دیررس بهار افزایش می‌یابد و فشار جزئی اکسیژن کاهش می‌یابد. همه این عوامل می‌توانند رشد و نمو گندم را محدود کرده و عملکرد را کاهش دهند. همبستگی منفی بین ارتفاع و عملکرد حاکی از آن است که حدود ۸ درصد از تغییرات عملکرد را می‌توان به اثرات ارتفاع نسبت داد. هرچند این مقدار کم است، اما در مقایسه با سایر متغیرهای توپوگرافی، برجسته‌تر عمل می‌کند. در مقابل، شاخص‌هایی مانند TWI که توزیع محلی رطوبت را نشان می‌دهند، در مقیاس چند متر تا چند صد متر عمل می‌کنند. در شرایطی که میانگین بارندگی در سال معادل ۳۲۰ میلی‌متر با نوسانات زیاد است، اثرات محلی تجمع رطوبت ممکن است نتواند بر محدودیت کلی آب غلبه کند.

همبستگی مثبت ضعیف TWI با عملکرد نشان‌دهنده آن است که در نقاط مرطوب‌تر (دره‌ها و پای شیب‌ها) عملکرد اندکی بهتر است، اما این الگو به دلیل وجود اثرات متضاد مانند فرسایش در برخی نقاط، قوی و یکنواخت نیست. همبستگی منفی بسیار ضعیف شیب با عملکرد نیز مؤید این است که شیب‌های ملایم‌تر شرایط بهتری دارند، اما این رابطه از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار نیست؛ بنابراین، تفسیر صحیح آن است که در منطقه کالپوش، عوامل اقلیمی وابسته به ارتفاع بر اثرات هیدرولوژیکی محلی غلبه دارند. این یافته به‌هیچ‌وجه به معنای بی‌اهمیتی TWI یا شیب در سایر مناطق یا مقیاس‌های دیگر نیست؛ بلکه بیانگر آن است که اولویت و نقش نسبی متغیرهای توپوگرافی به‌شدت به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک هر منطقه وابسته بوده و قابل تعمیم کلی نیست. بخش قابل توجهی از ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده در این مطالعه در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ قرار داشتند که اگرچه به دلیل حجم نمونه (n=112) از نظر آماری معنادار هستند، اما از نظر قدرت تبیین و کاربرد عملی ضعیف ارزیابی می‌شوند. برای مثال، همبستگی منفی عملکرد با TNV نشان می‌دهد که تنها حدود ۸ درصد از تغییرات عملکرد توسط این متغیر توضیح داده می‌شود. در مقابل، NDVI اردیبهشت با بیشترین همبستگی مشاهده‌شده حدود ۲۸ درصد از واریانس عملکرد را تبیین کرد. این نتایج نشان می‌دهد که هیچ متغیر منفردی توانایی پیش‌بینی قابل اتکای عملکرد را ندارد و استفاده از مدل‌های چندمتغیره برای در نظر گرفتن اثرات تعاملی عوامل مختلف ضروری است. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد گندم دیم در دشت کالپوش (با میانگین بارندگی حدود ۳۲۰ میلی‌متر) تحت تأثیر مجموعه‌ای محدود اما درهم‌تنیده از عوامل محیطی قرار دارد و نمی‌توان آن را به یک ویژگی منفرد خاک یا توپوگرافی نسبت داد. از نظر پوشش گیاهی، NDVI اردیبهشت بیشترین همبستگی با عملکرد را نشان داد، درحالی‌که استفاده از سری زمانی NDVI از فروردین تا تیر نشان داد که پویایی رشد گیاه در مراحل مختلف فنولوژیک نقش مهمی در تعیین عملکرد نهایی دارد. با این حال، NDVI به‌تنهایی تنها ۱۸ تا ۲۸ درصد از تغییرات عملکرد را تبیین کرد که بیانگر نقش عوامل مکمل مانند شرایط اقلیمی و ویژگی‌های خاکی است. برای این اساس، استفاده از شاخص‌های تجمعی یا سری‌های زمانی پیوسته NDVI می‌تواند در مطالعات آینده به درک دقیق‌تر ارتباط رشد گیاه و عملکرد کمک کند. در میان عوامل توپوگرافی، ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین متغیر اثرگذار

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی‌های آماری پیشرفته نظیر Random Forest، GAM، XGBoost، PLSR و SEM به همراه تحلیل تبیینی SHAP استفاده شود. این روش‌ها می‌توانند در شناسایی روابط غیرخطی، بررسی برهم‌کنش متغیرها و تعیین اهمیت نسبی عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد نقش مؤثری ایفا کنند. همچنین به کارگیری شاخص‌های مکمل مانند EVI و SAVI در کنار NDVI می‌تواند ارزیابی پوشش گیاهی و تبیین تغییرات عملکرد را دقیق‌تر نماید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

آزاده سلطانی: ایده‌پردازی، نگارش، تهیه پیش‌نویس اولیه، نرم افزار، ویرایش و بازنگری مقاله؛ **علی اصغر ذوالفقاری:** ایده-پردازی، نرم‌افزار، نظارت، ویرایش و بازنگری مقاله؛ **سید حسن کابلی:** ایده‌پردازی، ویرایش و بازنگری مقاله؛ **جوزف لونگو مینولو:** ایده‌پردازی، بررسی نتایج.

منابع

امیرعشری، امین، رضوردی‌نژاد، وحید، بهمنش، جواد، اسدزاده، فرخ و رحیمی، مینا (۱۴۰۴). مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد گندم دیم براساس متغیرهای هواشناسی با استفاده از روش‌های ترکیبی هوش مصنوعی. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹(۲)، ۲۴۳-۲۶۱. https://idj.iaid.ir/article_217932.html
آذری سنجید، رقیه و صالحی، پرومند (۱۴۰۴). مقایسه روش‌های AHP و TOPSIS در پهنه‌بندی اراضی مستعد کشت گندم دیم در حوضه بالخلوچای اردبیل. پژوهش‌های توسعه پایدار روستایی، دوره ۶ شماره ۴ (پیاپی ۲۲)، زمستان ۱۴۰۴. https://www.srds.ir/article_226570.html?lang=fa
رئییسی، مریم، ذوالفقاری، علی اصغر، رحیمی، محمد و کابلی، سید حسن (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی در پاسخ به مقادیر سالانه بارش و دما در استان سمنان. پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۴۰۲؛ ۱۳ (۴): ۸۲-۵۶. doi: 10.61186/jeer.13.4.56
زیلوئی، نسرین، احمدی، علی، باقری ده آبادی، محسن و محمد مراد طارم، هاله (۱۳۹۳). اهمیت مراحل گلدهی و پر شدن دانه در افزایش عملکرد

شناسایی شد، درحالی‌که شاخص‌های محلی مانند TWI و شیب روابط ضعیف و غیرمعنادار نشان دادند. این نتیجه بیانگر آن است که در مقیاس منطقه‌ای مورد مطالعه، اثرات اقلیمی وابسته به ارتفاع (به‌ویژه دما، طول فصل رشد و ریسک یخبندان) بر فرآیندهای هیدرولوژیکی موضعی غالب هستند. از نظر ویژگی‌های خاک، TNV، pH و Ca+Mg مهم‌ترین متغیرهای شناسایی شده بودند TNV و pH اثر منفی ضعیف اما معناداری بر عملکرد نشان دادند، درحالی‌که اثر مستقیم Ca+Mg بر عملکرد معنادار نبود و احتمالاً نقش غیرمستقیم از طریق تعامل با سایر ویژگی‌های خاک دارد. در مقابل، بافت خاک، چگالی ظاهری، کربن آلی و هدایت الکتریکی اثر مستقیم و مستقل قابل‌توجهی نشان ندادند که عمدتاً به محدود بودن دامنه تغییرات این متغیرها و قرارگرفتن آن‌ها در محدوده غیر تنش‌زا نسبت داده می‌شود.

به‌طور کلی، ضرایب همبستگی مشاهده‌شده عمدتاً در محدوده ضعیف تا متوسط قرار داشتند (حداکثر $r=0.53$) که نشان‌دهنده ماهیت چندعاملی و غیرخطی سیستم است؛ بنابراین، پیش‌بینی دقیق عملکرد نیازمند رویکردهای چندمتغیره و مدل‌های ترکیبی است که بتوانند تعامل بین عوامل مختلف را در نظر بگیرند. از منظر کاربردی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بهبود تولید گندم دیم در منطقه کالپوش باید بر سه محور اصلی متمرکز شود: (الف) اصلاح شرایط خاک‌های آهکی و قلیایی از طریق کاهش محدودیت‌های TNV و pH با استفاده از مواد آلی و اصلاح‌کننده‌های خاک، (ب) پایش سری زمانی NDVI به‌ویژه در مرحله اردیبهشت برای شناسایی زودهنگام پتانسیل عملکرد، و (ج) لحاظ کردن اثر ارتفاع در انتخاب رقم و تنظیم تاریخ کاشت، به‌ویژه استفاده از ارقام زودرس در ارتفاعات بالاتر. در این راستا، نقش کلیدی عوامل اقلیمی در سامانه‌های کشت دیم مورد تأکید قرار می‌گیرد، درحالی‌که یکی از محدودیت‌های مهم این مطالعه عدم استفاده مستقیم از داده‌های بارش، دما و شاخص‌های خشکسالی است که می‌تواند بخشی از تغییرپذیری توضیح داده نشده عملکرد را تبیین کند؛ بنابراین، برای شفاف‌سازی این محدودیت، در نسخه اصلاح‌شده تأکید شد که تلفیق داده‌های اقلیمی با متغیرهای خاک، توپوگرافی و شاخص‌های سنجش‌ازدور می‌تواند درک جامع‌تری از عوامل مؤثر بر عملکرد فراهم کند و دقت مدل‌های پیش‌بینی را بهبود بخشد. با این حال، به‌منظور توسعه رویکردهای تحلیلی پیشرفته‌تر،

بنه‌های دختری زعفران با استفاده از مدل گیاهی و اندازه‌گیری میدانی. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(1)، ۳۳۴-۳۱۷. doi:10.22098/mmws.2023.14109.1390

قادری، ناصح، علیجانی، بهلول، حجازی‌زاده، زهرا، و سلیقه، محمد (۱۳۹۸). مدل فضایی تولید گندم دیم استان کردستان با ریزپهنه‌بندی اقلیم کشاورزی. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال هجدهم، شماره ۸۴، بهار ۱۳۹۸، صص. ۲۷-۱۷۹. doi:10.29252/jgs.18.48.179-27

واعظی، علی رضا، بابایی، فاطمه و صفی‌لو، حدیثه (۱۴۰۴). تعیین آستانه تحمل به شوری گندم رقم سرداری در دیمزارهای با اقلیم نیمه‌خشک در استان زنجان. دانش خاک و گیاه، 35(4)، 23-39. doi: 10.22034/sps.2025.69805.1022

References

- Ajami, M., Heidari, A., Khormali, F., Zeraatpisheh, M., Gorji, M., and Ayoubi, S. (2020). Spatial variability of rainfed wheat production under the influence of topography and soil properties in loess-derived soils, northern Iran. *International Journal of Plant Production*, 14(4), 597-608. doi: 10.1007/s42106-020-00106-4
- Al-Juaidi, A. E. M. (2023). The interaction of topographic slope with various geo-environmental flood-causing factors on flood prediction and susceptibility mapping. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 59327-59348. doi: 10.1007/s11356-023-26616-y
- Amirashayeri, A., Rezaverdinejad, V., Behmanesh, J., Asadzadeh, F., and Rahimi, M. (2025). Modeling and forecasting rainfed wheat yield based on meteorological variables using combined artificial intelligence methods. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 19(2), 243-261. https://idj.iaid.ir/article_217932.html [In Persian]
- Azari Sanjabod, R., and Salahi, B. (2025). Comparison of AHP and TOPSIS methods in zoning suitable lands for rainfed wheat cultivation in the Balkhloo Chay watershed, Ardabil. *Quarterly Journal of Urban and Regional Sustainable Development Studies*, 6(4), 202-221. https://www.srds.ir/article_226570.html?lang=fa [In Persian]
- Band, S. S., Janizadeh, S., Pal, S. C., et al. (2020). Flash flood susceptibility modeling using new approaches of hybrid and ensemble tree-based
- گندم. سیزدهمین همایش علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران و سومین همایش علوم و تکنولوژی بذر ایران. <https://civilica.com/doc/312525/>
- سلمان پور، آناهید، زین الدینی میمند، علی، اسکندری، مهناز و نویدی، میرناصر (۱۴۰۴). بررسی ارتباط بین ویژگی های خاک و زمین با عملکرد برخی باغ های انجیر سیاه آبی، جنوب استان لرستان، حفاظت منابع آب و خاک، 15(3)، 81-90. magiran.com/p2968036
- سهیل‌نژاد، عبدالمجید و رحیمی مقدم، سجاد (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و مدیریت آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام کلزا در استان خوزستان. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱(۶)، ۲۷۰-۲۷۸. doi:10.22098/mmws.2025.18649.1708۲۸۶
- غلامی شرفخانه، مهدی، نقی ضیایی، علی، ناقدی‌فر، سیدمحمدرضا، و اکبری، امیر (۱۴۰۴). بررسی تأثیر شوری خاک و کم‌آبی بر عملکرد machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12, 3568. doi: 10.3390/rs12213568.
- Bourennane, H., Nicoulaud, B., Couturier, A., and King, D. (2004). Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agriculture*, 5(5), 521-536. doi: 10.1023/B: PRAG.0000040804.89167.9a.
- Boyer, J. (1978). *Le calcium et le magnesium dans les sols des regions tropicales humides et sub-humides*. Banque de données documentaires REGARDS. horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Idt/09093.pdf.
- Cao, J., Zhang, Z., Tao, F., Zhang, L., Luo, Y., Han, J., and Li, Z. (2020). Identifying the contributions of multi-source data for winter wheat yield prediction in China. *Remote Sensing*, 12(5), 750. doi: 10.3390/rs12050750.
- Chen, P., Li, Y., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., and Cao, Q. (2023). Improving yield prediction based on spatio-temporal deep learning approaches for winter wheat: A case study in Jiangsu Province, China. *Computers and Electronics in Agriculture*. doi: 10.1016/j.compag.2023.108201
- Daoud, J. I. (2017). Multicollinearity and regression analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 949, 012009. doi: 10.1088/1742-6596/949/1/012009
- Dixit, P. N., and Chen, D. (2010). Impact of spatially variable soil salinity on crop physiological properties, soil water content and yield of wheat in a semi-arid environment. *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 1(3), 93-100. <https://search.informit.com.au/document.aspx?db=633484738450304>

- Florinsky, I. V. (2016). Influence of topography on soil properties (pp. 265–270). 6.00009-2. doi: 10.1016/B978-0-12-804632
- Gholami Sharafkhane, M., Ziaei, A. N., Naghedifar, S. M. and Akbari, A. (2025). Investigation of the effect of soil salinity and water quality on saffron daughter corms using crop modeling and measured data. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(1), 317-334. doi: 10.22098/mmws.2023.14109.1390 [In Persian]
- Gollenbeek, L., and Hilhorst, G. J. (2022). Effecten van verrijking zandbodem met klei op mais- en grasteelt op melkvee­proefbedrijf ‘De Marke.’ doi: 10.18174/569406.
- Graf, L. V., Merz, Q. N., Walter, A., and Aasen, H. (2023). Insights from field phenotyping improve satellite remote sensing based in-season estimation of winter wheat growth and phenology. *Remote Sensing of Environment*. doi: 10.1016/j.rse.2023.113860.
- Grzebisz, W., Szczepaniak, W., Potarzycki, J., and Biber, M. (2023). Prediction of Grain Yield and Gluten Content in Winter Bread Wheat Based on Nutrient Content in Plant Parts during the Critical Cereal Window. *Agronomy*, 13(10), 2649. doi: 10.3390/agronomy13102649.
- Habibi, A., Delavar, M. R., Sadeghian, M. S., et al. (2023). A hybrid of ensemble machine learning models with RFE and Boruta wrapper-based algorithms for flash flood susceptibility assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103401. doi: 10.1016/j.jag.2023.103401
- Hadi, M., Jalili, S., Mouneskhah, V., and 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. doi: 10.22059/ijswr.2021.309650.668731
- Hasheminasab, K. S., Shahbazi, K., Marzi, M., Zare, A., Yeganeh, M., Bazargan, K., and Kharazmi, R. (2023). A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100913. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100913
- Hu, M., and Xia, B. (2019). A significant increase in the normalized difference vegetation index during the rapid economic development in the Pearl River Delta of China. *Land Degradation and Development*, 30(4), 359–370. doi: 10.1002/ldr.3221 Digital Object Identifier
- Huang, X., Wang, L., Yang, L., and Kravchenko, A. N. (2008). Management effects on relationships of crop yields with topography represented by wetness index and precipitation. *Agronomy Journal*, 100(5), 1465–1471. doi: 10.2134/agronj2007.0325
- Islam, A. R. M. T., Bappi, M. M. R., Alqadhi, S., et al. (2023). Improvement of flood susceptibility mapping by introducing hybrid ensemble learning algorithms and high-resolution satellite imageries. *Natural Hazards*, 119, 1–37. doi: 10.1007/s11069-023-06106-7
- Khan, F., and Naeem, M. (2007). Effect of slope steepness and wheat crop on soil, runoff and nutrient losses in eroded land. doi: 10.1080/09064710.2018.1488988
- Kravchenko, A. N., and Bullock, D. G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1), 75–83. doi: 10.2134/agronj2000.92175x
- Kursa, M. B., and Rudnicki, W. R. (2010). Feature selection with the Boruta package. *Journal of Statistical Software*, 36, 1–13. doi: 10.18637/jss.v036.i11
- Li, Z., Nie, Z., and Li, G. (2024). Integrating crop modeling and machine learning for the improved prediction of dryland wheat yield. *Agronomy*, 14(4), 777. doi: 10.3390/agronomy14040777
- Maestrini, B., and Basso, B. (2018). Drivers of within-field spatial and temporal variability of crop yield across the US Midwest. *Scientific Reports*, 8, 14147. doi: 10.1038/s41598-018-32779-3
- Mondal, S., and Chakraborty, D. (2023). Root growth and physiological responses in wheat to topsoil and subsoil compaction with or without artificial vertical macropores. *Heliyon*, 9. doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e18834.
- Mooney, S. J., Yu, C., Mawodza, T., Atkinson, B. S., Atkinson, J. A., Sturrock, C. J., Whalley, W. R., Hawkesford, M. J., Cooper, H. V., Zhang, X., and Zhou, H. (2023). *Effects of Soil Compaction on Early Wheat Seedling Root Growth Under Variable Soil Moisture Conditions*. doi: 10.2139/ssrn.4594863.
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A., and Peterson, G. A. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of*

- America Journal*, 57(2), 443–452. doi: 10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x.
- Mousavi, S. R., Mahjenabadi, V. A. J., Khoshru, B., and Rezaei, M. (2024). Spatial prediction of winter wheat yield gap: agro-climatic model and machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2023.1309171.
- Naser, M. A., Khosla, R., Longchamps, L., & Dahal, S. (2020). Using NDVI to differentiate wheat genotypes productivity under dryland and irrigated conditions. *Remote Sensing*, 12(5), 824. doi: 10.3390/rs12050824.
- Panek, E., & Gozdowski, D. (2020). Analysis of relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100286. doi: 10.1016/j.rsase.2019.100286
- Pourghasemi, H. R., Amiri, M., Edalat, M., et al. (2021). Assessment of urban infrastructures exposed to flood using susceptibility map and Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 1923–1937. doi: 10.1109/JSTARS.2020.3045278
- Qaderi N, Alijani B, hejazizadeh Z, saligheh M. (2018). Spatial modeling of rainfed wheat yield using agroclimaticmicrozonation in Kurdistan. *jgs*. 18(48), 1-19. doi:10.29252/jgs.18.48.1 [In Persian]
- Raeesi, M., Zolfaghari, A., Rahimi, M., and Kaboli, S. H. (2023). Estimation of vegetation changes concerning annual rainfall and temperature in Semnan Province. *Environmental Engineering Research*, 13(4), 56–82. doi: 10.61186/jeer.13.4.56 [In Persian]
- Rezaei, M., and Hemati, Z. (2012). Reaction of wheat yield to soil physical and chemical characteristics in Arak fields. *World Applied Sciences Journal*, 20(8), 1183–1187. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.20.08.1818.
- Salmanpour, A., Zeinadini Meymand, A., Eskandari, M., and Navidi, M. (2026). Investigating soil and land characteristics influence on some irrigated black fig orchard yield, South of Lorestan Province. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 15(3), 81–90. [In Persian]
- Sharifi, A., Mahdipour, H., Moradi, E., & Tariq, A. (2022). Agricultural Field Extraction with Deep Learning Algorithm and Satellite Imagery. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(2), 417–423. doi: 10.1007/s12524-021-01475-7
- Sheikh, Z., Zolfaghari, A. A., Raeesi, M., et al. (2025). Enhancing flash flood susceptibility modeling in arid regions: integrating digital soil mapping and machine learning algorithms. *Environmental Earth Sciences*, 84, 170. doi: 10.1007/s12665-025-12140-4
- Soheilnejad, A., & Rahimi-Moghaddam, S. (2026). Assessing the effect of climate change and irrigation management on yield and water use efficiency of canola cultivars in Khuzestan province. *Water and Soil Management and Modeling*, 6 (1), 270- 286. doi: 10.22098/mmws.2025.18649.1708. [In Persian]
- Spadoni, G. L., Cavalli, A., Congedo, L., and Munafò, M. (2020). Analysis of normalized difference vegetation index multi-temporal series for forest cartography. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100419. doi: 10.1016/j.rsase.2020.100419
- Szul, T., Tabor, S., and Pancarz, K. (2021). Application of the BORUTA algorithm to input data selection for a model based on rough set theory. *Energies*, 14, 2779. doi:10.3390/en14102779
- Tamás A, Kovács E, Horváth É, Juhász C, Radócz L, Rátonyi T, Ragán P. Assessment of NDVI Dynamics of Maize (*Zea mays* L.) and Its Relation to Grain Yield in a Polyfactorial Experiment Based on Remote Sensing. *Agriculture*. 2023; 13(3):689. doi:10.3390/agriculture13030689
- Tao, J., Xu, T., Dong, J., et al. (2018). Elevation-dependent effects of climate change on vegetation greenness in the high mountains of southwest China during 1982–2013. *International Journal of Climatology*, 38(4), 2029–2038. doi: 10.1002/joc.5314Digital Object Identifier.
- Thapa, S., Rudd, J. C., Xue, Q., et al. (2019). Use of NDVI for characterizing winter wheat response to water stress in a semi-arid environment. *Taylor and Francis*, 33(5), 633–648. doi: 10.1080/15427528.2019.1648348
- Towfiqul Islam, A. R. M., Talukdar, S., Mahato, S., et al. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 12, 101075. doi:10.1016/j.gsf.2020.09.006
- Tuğaç, M., Yıldız, H., & Kökten, K. (2022). Wheat yield prediction with machine learning based

- on MODIS and Landsat NDVI data at field scale. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(4), 172–184. doi:10.30897/ijegeo.1128985.
- Vaezi, A. R., Babaei, F. and Safiloo, H. (2025). Determining the Salinity Tolerance Threshold of Sardari Wheat in Rainfed Lands of Semi-Arid Region in Zanjan Province. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(4), 23-39. doi: 10.22034/sps.2025.69805.1022
- Vannoppen, A., and Gobin, A. (2022). Estimating yield from NDVI, weather data, and soil water depletion for sugar beet and potato in Northern Belgium. *Water* (Switzerland), 14(8), 1188. doi: 10.3390/w14081188
- Vinayaga Moorthy, R., and Balasubramanian, R. (2022). An efficient genetic Boruta (GenBoruta) algorithm-based feature selection on brain tumor dataset. *International Journal of Mechanical Engineering*, 7(6). https://www.academia.edu/download/101001046/An_Efficient_Genetic_Boruta_GenBoruta_.pdf
- Wahba, M. M., Labib, F., and Zaghloul, A. (2019). *Management of Calcareous Soils in Arid Region*. 2(5), 248–258. <https://ijepem.com/volume-2/issue-5/article-2/>.
- Wang, G., Chen, X., and Chen, W. (2020). Spatial prediction of landslide susceptibility based on GIS and discriminant functions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, 144. doi: 10.3390/ijgi9030144
- Zaid, M. S., Rizk, A. H., Mashhour, A. M. A. E., and Ahmed, W. M. (2017). Interrelationships between soil quality parameters and wheat productivity for some soils of Monufya Governorate. *Journal of Biomaterials*, 1(1), 1–9. doi: 10.11648/j.jb.20170101.11
- Zhang, Y., Cao, G., Zhao, M., and Zhang, Q. (2025). Topographic effects on vegetation phenology in response to climate change on the southern slope of Qilian Mountains, Northwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 36(7), 2131–2138. doi: 10.13287/j.1001-9332.202507.022
- Zilouei, N., Ahmadi, A., Bagheri Dehabadi, M., & Mohammadmorad Taram, H. (2014). Importance of flowering and grain filling stages in increasing wheat yield. In Proceedings of the 13th Iranian Congress of Agronomy and Plant Breeding Sciences and the 3rd Iranian Seed Science and Technology Conference. Iran. <https://civilica.com/doc/312525/> [In Persian]
- Zolfaghari, A. A., Raeesi, M., Sheikh, Z., Soltani, A., Poodineh, S., and Amiri, M. (2025). Enhancing fire susceptibility mapping in Semnan Province: integrating machine learning and geospatial analysis. *Ecopersia*, 13(1), 13–36. doi:10.22034/ECOPERSIA.13.1.13