

Spatial-Temporal Correlation Analysis of Vegetation Health Index (VHI) with Climatic Variables (Case Study: Golestan Province)

Homa Chegini¹, Chooghi Bairam Komaki^{1*} , Majid Owneq¹, Hamidreza Asgari¹ and Khalil Ghorbani²

(Received: September 9-2025 ; Revised: October 9-2025 ; Accepted: October 15-2025)

1. Department of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

*Corresponding Author, Email: komaki@gau.ac.ir

Abstract

This study aimed to analyze the spatial-temporal correlation between the Vegetation Health Index (VHI) and climatic variables, including precipitation, potential evapotranspiration (PET), and mean temperature, in Golestan Province during the period 2000–2024. MODIS satellite products were used for vegetation and land surface temperature data, while the TerraClimate dataset provided precipitation and PET variables. After spatial-temporal alignment, the Cross-Correlation Function (CCF) was applied to identify optimal time lags, and the Random Forest model was employed to assess the relative importance of the climatic drivers. Turning to the results, increasing trends in mean temperature and PET were observed, alongside a significant decrease in precipitation, which led to intensified climatic stress and reduced VHI across the province, especially during summer in croplands and rangelands. The relationship between VHI and precipitation was positive (maximum correlation of 0.299 in croplands), negative with PET (−0.287), and non-linear with temperature (0.275). Notably, VHI responded to precipitation with short-term lags (0–1 month), whereas PET and temperature effects emerged with longer lags (2–4 months). The Random Forest analysis highlighted precipitation as the most influential factor on VHI, followed by PET and temperature, achieving strong predictive performance ($R^2 = 0.78$, RMSE = 0.09). Overall, these findings emphasize precipitation as the immediate driver of vegetation health, while PET and temperature act as secondary, cumulative stressors. The results provide valuable insights for developing climate adaptation and sustainable resource management strategies in agriculture and natural ecosystems of Golestan Province.

Keywords: Vegetation Health Index (VHI), Spatial-temporal correlation, Lag time, Random forest, Agricultural drought

How to cite this article: Chegini, H., Bairam Komaki, C., Owneq, M., Asgari, H. and Ghorbani, K. 2026. Spatial-Temporal Correlation Analysis of Vegetation Health Index (VHI) with Climatic Variables (Case Study: Golestan Province). *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 1-22. DOI: [10.47176/jwss.30.1.48872](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.48872)

Copyright © 2026 Chegini et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

تحلیل همبستگی مکانی - زمانی شاخص سلامت گیاهان (VHI) با متغیرهای اقلیمی (مطالعه موردی: استان گلستان)

هما چگینی^۱، چوقی بایرام کمکی^{۱*}، مجید اونق^۱، حمیدرضا عسگری^۱ و خلیل قربانی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۳)

۱. گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: komaki@gau.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف تحلیل همبستگی مکانی - زمانی شاخص سلامت گیاهان (VHI) با متغیرهای اقلیمی شامل بارش، تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) و دمای میانگین در استان گلستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ انجام شد. داده‌های ماهواره‌ای MODIS برای شاخص‌های گیاهی و دما و داده‌های اقلیمی مجموعه TerraClimate برای بارش و PET به کار گرفته شد. پس از هم‌ترازی داده‌ها، از تحلیل همبستگی متقابل (CCF) به منظور شناسایی تأخیرهای بهینه و از مدل جنگل تصادفی (Random Forest) برای ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین دما و PET روندی افزایشی و بارش روندی کاهشی داشته‌اند که موجب فشار اقلیمی و کاهش VHI در بیشتر نواحی استان، به‌ویژه در فصل تابستان و در اراضی زراعی و مرتعی شده است. رابطه VHI با بارش مثبت (بیشترین مقدار همبستگی در اراضی زراعی برابر با ۰.۲۹۹)، با PET منفی (حدود -۰/۲۸۷) و با دما غیرخطی (۰/۲۷۵) بود. اثر بارش بر VHI عمدتاً در بازه زمانی کوتاه‌مدت (۱-۰ ماه) دیده شد؛ درحالی‌که واکنش VHI به PET و دما با تأخیر ۲ تا ۴ ماه نمایان شد. نتایج مدل Random Forest نشان داد بارش مهم‌ترین متغیر مؤثر بر تغییرات VHI است و پس از آن PET و دما بیشترین نقش را دارند ($R^2=0.78$, $RMSE=0.09$). این یافته‌ها بیانگر نقش بارش به‌عنوان عامل اصلی و فوری، و نقش PET و دما به‌عنوان عوامل ثانویه و تجمعی در سلامت پوشش گیاهی استان هستند. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تدوین برنامه‌های مدیریتی و سازگاری با تغییر اقلیم در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شاخص گیاهی، همبستگی مکانی - زمانی، تأخیر زمانی، جنگل تصادفی، خشکسالی کشاورزی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین و زیان‌بارترین مخاطرات اقلیمی است که اثرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، اکوسیستم‌ها و معیشت جوامع انسانی دارد. این پدیده ماهیتی خزنده و تدریجی دارد و پیامدهای آن اغلب دیرنگام آشکار می‌شود؛ از این رو پایش و پیش‌بینی آن برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع حیاتی ضروری است (۱۳ و ۱۹). در دهه‌های اخیر، استفاده از داده‌های سنجش از دور به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش خشکسالی مورد توجه ویژه قرار گرفته است؛ زیرا این داده‌ها علاوه بر پوشش زمانی - مکانی گسترده، قادر به رفع محدودیت‌های ناشی از کمبود داده‌های ایستگاهی هستند (۱ و ۱۲).

در میان شاخص‌های سنجش‌ازدور، شاخص سلامت گیاه (VHI) و مؤلفه‌های آن یعنی شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI)، ابزارهای شناخته‌شده‌ای برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی و شدت خشکسالی به شمار می‌روند. این شاخص‌ها با ترکیب اطلاعات رطوبتی و حرارتی، بازتابی از شرایط تنش‌های اقلیمی بر گیاهان فراهم می‌کنند و همبستگی زیادی با شاخص‌های هواشناسی مانند SPI و SPEI نشان داده‌اند (۱۰ و ۱۴). مطالعات داخلی نیز اثبات کرده‌اند که کاهش مقادیر VHI همزمان با کاهش بارش و افزایش دما می‌تواند نشانه‌ای از بروز خشکسالی‌های کشاورزی باشد (۱۸ و ۲۱).

استان گلستان به دلیل موقعیت جغرافیایی در جنوب شرقی دریای خزر، تنوع اقلیمی و وابستگی شدید بخش کشاورزی به بارش، از مناطق بسیار حساس کشور در برابر تغییرات اقلیمی و خشکسالی به شمار می‌رود (۹ و ۲۳).

هرچند پژوهش‌های متعددی در زمینه پایش خشکسالی در این استان انجام شده، بیشتر آنها بر شاخص‌های منفرد (مانند SPI یا NDVI) متمرکز بوده‌اند و کمتر به تحلیل همزمان رابطه VHI با چندین متغیر اقلیمی کلیدی و با رویکرد مکانی - زمانی پرداخته‌اند. همچنین، بررسی تأخیر زمانی واکنش پوشش

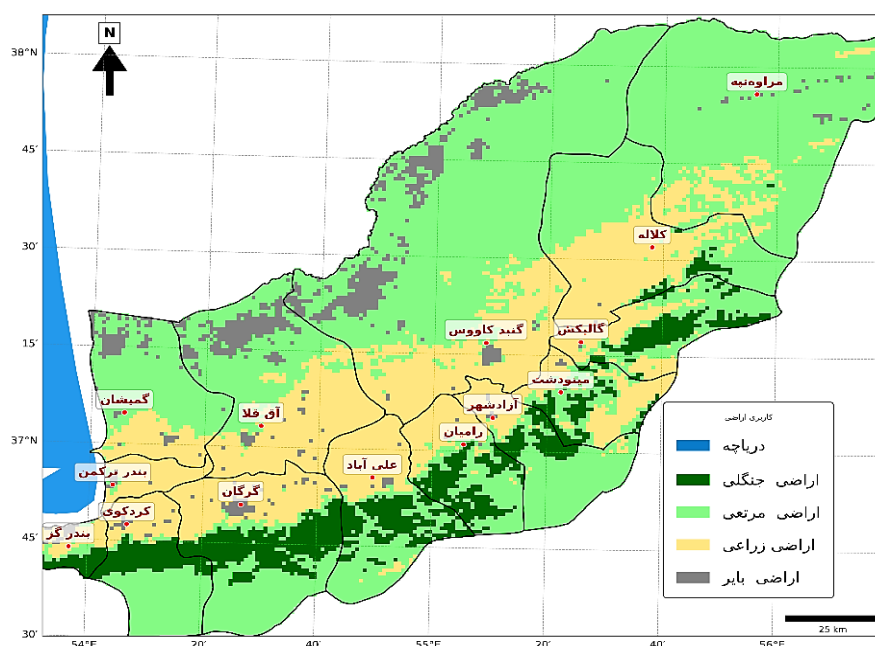
گیاهی به تغییرات اقلیمی و ارزیابی اهمیت نسبی عوامل اقلیمی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در مقیاس منطقه‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر همین اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر تحلیل همبستگی مکانی - زمانی شاخص سلامت گیاهان (VHI) با متغیرهای اقلیمی شامل بارش، تبخیر - تعرق پتانسیل و دمای میانگین در استان گلستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ است. نوآوری این پژوهش در ترکیب تحلیل سری‌های زمانی (CCF) برای شناسایی تأخیرهای بهینه و مدل جنگل تصادفی برای تعیین اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش علاوه بر تبیین نقش بارش به عنوان عامل اصلی و فوری و دما به عنوان عوامل ثانویه و تجمعی در سلامت پوشش گیاهی، مبنای علمی مناسبی برای مدیریت پایدار منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم در بخش کشاورزی استان فراهم آورد.

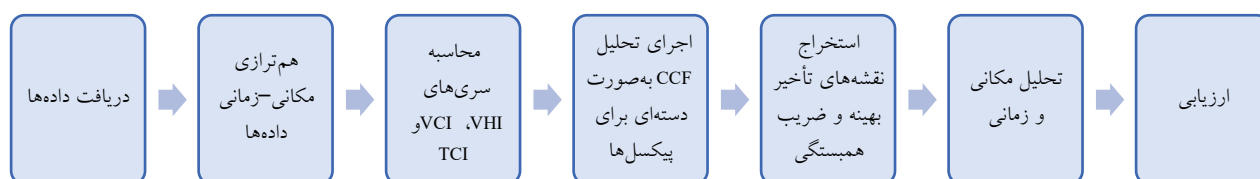
مواد و روش‌ها

در این مطالعه، استان گلستان به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد که با وسعتی حدود ۲۰,۳۸۰ کیلومتر مربع در شمال ایران واقع شده است (شکل ۱). این استان از نظر اقلیمی دارای تنوع قابل توجهی است و از اقلیم معتدل و مرطوب در شمال تا اقلیم نیمه‌خشک و خشک در جنوب گسترده شده است. این تنوع اقلیمی و پوشش گیاهی، استان گلستان را به منطقه‌ای مناسب برای مطالعه روابط پوشش گیاهی - اقلیم تبدیل کرده است (۹).

در این پژوهش، ابتدا تأخیرهای بهینه زمانی بین متغیرهای اقلیمی و شاخص سلامت گیاهی (VHI) با استفاده از تحلیل همبستگی متقابل (CCF) و تبدیل فوریه سریع در مقیاس مکانی شناسایی شدند. سپس، اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی و تأخیرهای متناظر آنها با استفاده از مدل Random Forest و معیارهای ارزیابی R^2 ، RMSE و MAE تحلیل و تأیید شد (شکل ۲).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه: استان گلستان



شکل ۲. نمودار جریانی داده‌های استفاده‌شده و پردازش‌شده در این پژوهش

زیاد آن در پایش متغیرهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و پوشش زمانی طولانی‌مدت برای مطالعات برای پایش خشکسالی مناسب است (۱۶ و ۲۰).

۳- داده‌های پوشش کاربری اراضی: داده‌های پوشش کاربری اراضی از مجموعه MODIS/061/MCD12Q1 (LC_Type1) با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر برای سال ۲۰۲۴ استخراج و به چهار کلاس اصلی اراضی جنگلی، مرتعی، زراعی و بایر بازطبقه‌بندی شدند (۲۵).

هم‌ترازی زمانی - مکانی: برای یکسان‌سازی داده‌ها از لحاظ موقعیت و زمان، همه مجموعه‌ها به شبکه مرجع (تفکیک مکانی ۱ کیلومتر) بازنمونه‌برداری شدند. روش نزدیک‌ترین همسایه برای داده‌های رستری به‌کار رفت. تمام داده‌ها به سیستم مختصات متریک UTM زون ۴۰ شمالی تبدیل و به محدوده

در این پژوهش، داده‌های چندمنبعه به‌منظور تحلیل همبستگی مکانی - زمانی شاخص سلامت گیاهان (VHI) با متغیرهای اقلیمی مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌ها در سه گروه اصلی دسته‌بندی شدند:

۱- داده‌های ماهواره‌ای: MODIS شامل شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در سطح ۶۰۱ MOD13Q1 با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و تناوب زمانی ۱۶ روزه و دمای سطح زمین (LST) در سطح ۶۰۱ MOD11A2 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و تناوب زمانی ۸ روزه که از طریق سرویس Google Earth Engine (GEE) استخراج و به مقیاس زمانی ماهانه تبدیل شدند (۳ و ۴).

۲- داده‌های اقلیمی: از مجموعه‌داده TerraClimate که شامل بارش، تبخیر - تعرق پتانسیل و دمای میانگین با تفکیک مکانی ۴ کیلومتر و تناوب زمانی ماهانه استفاده شد (۱)؛ زیرا دقت

مدل جنگل تصادفی

برای ارزیابی اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی و تأخیرهای متناظر آنها در تبیین تغییرات VHI از مدل جنگل تصادفی استفاده شد (۷ و ۸). دلایل انتخاب RF عبارت بودند از: توانایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرها، مقاومت در برابر بیش‌برازش و قابلیت ارزیابی اهمیت متغیرها. این مدل با ایجاد تعداد زیادی درخت تصمیم و ترکیب نتایج آنها، امکان ارزیابی دقیق اهمیت متغیرهای ورودی (معادله ۴ و ۵) را فراهم می‌کند. اهمیت هر متغیر با استفاده از کاهش خطای میانگین مربعات (MSE) (پس از حذف آن متغیر) ارزیابی شد. مدل با تقسیم داده‌ها به مجموعه آموزش (۸۰٪) و آزمون (۲۰٪) و اسنجی و اعتبارسنجی شد. معیارهای ارزیابی شامل R^2 ، RMSE و MAE بودند.

$$\text{Features} = \{X_{1(t)}, X_{1(t-1)}, \dots, X_{1(t-\tau_{\max})}, X_{2(t)}, \dots, X_{m(t-\tau_{\max})}\} \quad (4)$$

در آن X_i متغیر اقلیمی i ام و m تعداد متغیرهای اقلیمی است.

$$\text{Importance}(f) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{MSE}_{\text{decrease}}^t(f) \quad (5)$$

f ، ویژگی T ، تعداد کل درخت‌ها و $\text{MSE}_{\text{decrease}}$ کاهش خطای میانگین مربعات پس از تقسیم بر ویژگی f است.

آزمون آماری و اعتبارسنجی

آزمون معناداری همبستگی با استفاده از آستانه بحرانی، یک تقریب برای تعیین آستانه معنی‌داری ضریب همبستگی (r) است که در تحلیل‌های آماری مانند تحلیل همبستگی متقابل (CCF) استفاده می‌شود (معادله ۶).

$$r_{\text{critical}} = \frac{1.96}{\sqrt{n-2}} \quad (6)$$

r_{critical} مقدار بحرانی برای ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ (۹۵٪ سطح اطمینان) است: اگر $|CCF(\tau)| > r_{\text{critical}}$ ، همبستگی در تأخیر τ معنی‌دار است. برای ارزیابی عملکرد مدل یادگیری ماشینی نیز از معیارهای اصلی شامل ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است (معادله ۷ و ۸).

مطالعه کلیپ شدند. بازه زمانی مشترک ۲۵ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۴) انتخاب و سپس داده‌ها به مقیاس ماهانه تبدیل شدند. داده‌ها با استفاده از تابع align در کتابخانه xarray هم‌زمان‌سازی و ماه‌های فاقد داده معتبر حذف شدند (۸).

محاسبه شاخص سلامت گیاهی (VHI)

شاخص VCI بر اساس نرمال‌سازی مقادیر NDVI (نسبت به میانگین دوره) و شاخص TCI بر اساس نرمال‌سازی دمای سطح زمین (نسبت به حداکثر دوره) محاسبه شدند (۱۲ و ۲۶). سپس شاخص VHI از ترکیب این دو شاخص با استفاده از معادله ۱ به‌دست آمد:

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \quad (1)$$

که در آن α ضریب وزنی است که معمولاً برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

تحلیل همبستگی متقابل مکانی - زمانی (CCF)

برای بررسی ارتباط شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) با متغیرهای اقلیمی در بازه‌های زمانی مختلف، از تابع همبستگی متقابل (CCF) استفاده شد. این روش امکان تحلیل رابطه میان دو سری زمانی را با در نظر گرفتن تأخیر زمانی فراهم می‌کند. در این مطالعه، برای محاسبه کارآمد تابع همبستگی متقابل CCF از تبدیل فوریه سریع (FFT) استفاده شده است. بر اساس قضیه کانولوشن، CCF را می‌توان به صورت معادله ۲ محاسبه کرد (۱۱ و ۱۵).

$$CCF(\tau) = F^{-1} \{F\{X_t\} \cdot F\{Y_t\}^*\} \quad (2)$$

که در آن، F تبدیل فوریه را نشان می‌دهد. مقدار ۰ نشان‌دهنده مزدوج مختلط است و F^{-1} تبدیل فوریه معکوس را نشان می‌دهد. X_t و Y_t به ترتیب سری زمانی VHI و متغیر اقلیمی در زمان t ، میانگین μ و انحراف معیار سری‌های زمانی، تأخیر زمانی (بازه ۰ تا ۶ ماهه) و n طول سری زمانی است. در ضمن هنگام پردازش داده‌ها، برای مدیریت حافظه، پیکسل‌ها در بلوک‌های ۵۰۰ تایی دسته‌بندی شدند. علاوه بر این، پیکسل‌های دارای داده ناکافی یا انحراف معیار صفر حذف شدند.

دارند (شکل ۴). از نظر زمانی، بیشتر روابط با یک تأخیر سه ماهه بروز پیدا کردند؛ در حالی که در اراضی جنگلی تأخیر طولانی تری (چهار ماه) دیده شد. این الگو بیانگر این است که اکوسیستم‌های طبیعی‌تر (جنگل) دارای پایداری و اینرسی بیشتری در برابر تغییرات اقلیمی هستند؛ در حالی که اکوسیستم‌های زراعی و مرتعی واکنش سریع‌تری به تغییرات بارش و دما نشان می‌دهند. بررسی نقشه‌های همبستگی مکانی (شکل ۵) نشان داد که مناطق جنوبی استان بیش از سایر بخش‌ها نسبت به افزایش دما و PET آسیب‌پذیر بوده‌اند؛ در حالی که اثر مثبت بارش در بخش‌های شمالی و شرقی برجسته‌تر است. در اراضی زراعی، همبستگی مثبت بارش با VHI به‌طور گسترده‌ای در سراسر استان دیده شد؛ در حالی که در اراضی جنگلی این همبستگی بیشتر در مناطق شمالی و کوهستانی بود.

نتایج تحلیل تأخیر زمانی (شکل ۶) نشان داد که پاسخ شاخص VHI به بارش سریع (۱-۰ ماه)، اما به تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) با تأخیر طولانی‌تر (۴-۲ ماه) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده وابستگی عمیق‌تر به رطوبت خاک است. اثر دما نیز غیرمستقیم و با تأخیر زمانی دیده شد که در مناطق سردسیر مثبت و در مناطق گرم‌تر منفی بوده که حاکی از نقش دوگانه دما در رشد گیاهان است.

تحلیل الگوهای زمانی پاسخ (شکل ۷) نشان داد که شاخص VHI در استان گلستان به‌طور عمده به بارش واکنش سریع (۱-۰ ماه) دارد، به‌ویژه در مناطق شمالی و غربی. در مقابل، تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) و دما عمدتاً با تأخیر چندماهه اثرگذار بوده و نقش تشدیدکننده در بروز تنش‌های خشکی را ایفا می‌کنند. این یافته‌ها حاکی از آن است که بارش به‌عنوان عامل اصلی و فوری در تقویت پوشش گیاهی عمل می‌کند؛ در حالی که PET و دما بیشتر به‌عنوان عوامل ثانویه و تدریجی در کاهش سلامت پوشش گیاهی و تشدید خشکی عمل می‌کنند. نتایج مدل جنگل تصادفی نشان داد که بارش مهم‌ترین عامل مؤثر بر سلامت پوشش گیاهی در استان گلستان است. پس از بارش، تبخیر - تعرق پتانسیل و دما به‌ترتیب بیشترین

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y}_{-i})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

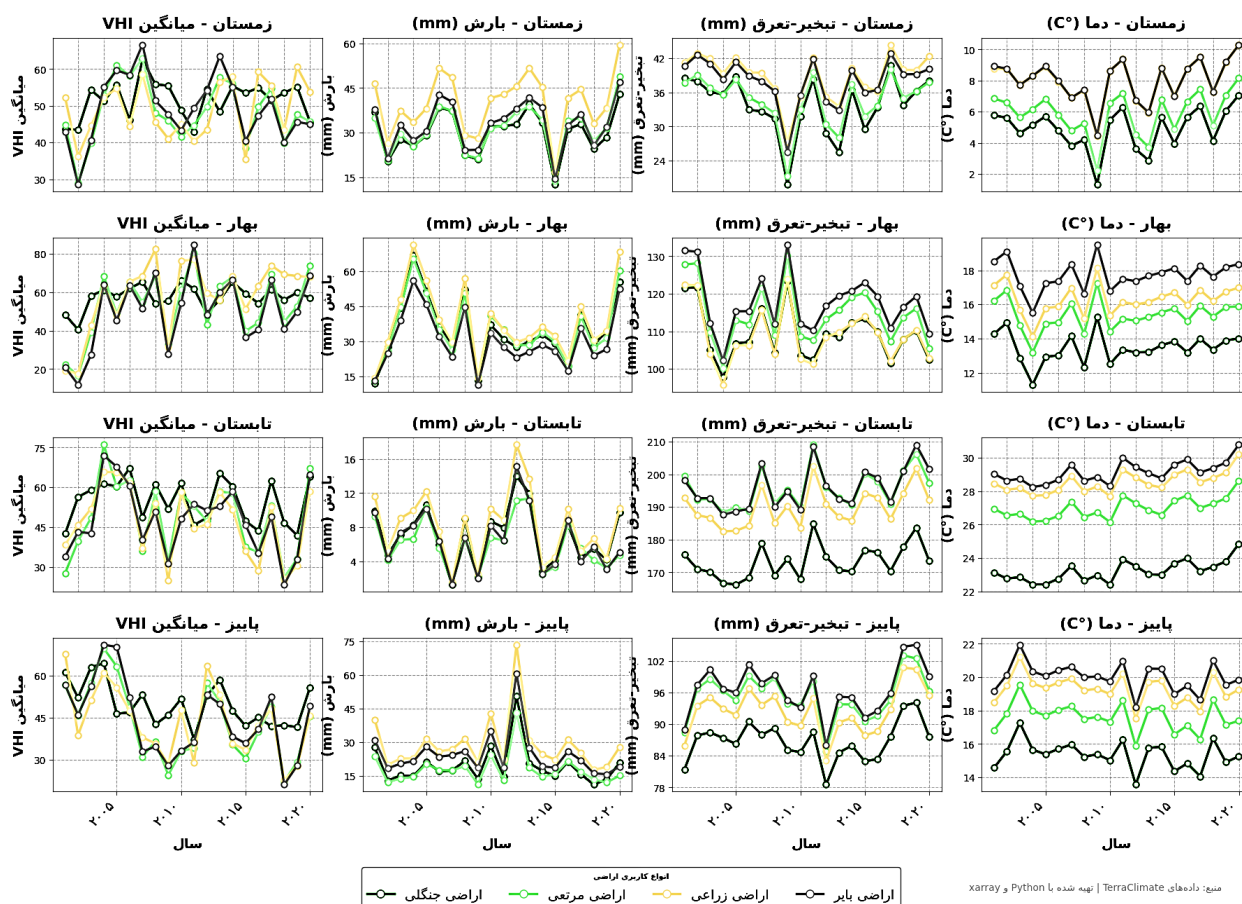
در آنها، متغیر y_i مقدار واقعی، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده، $\bar{y}$ میانگین مقادیر واقعی، Σ علامت جمع و i شماره مشاهده است.

نتایج

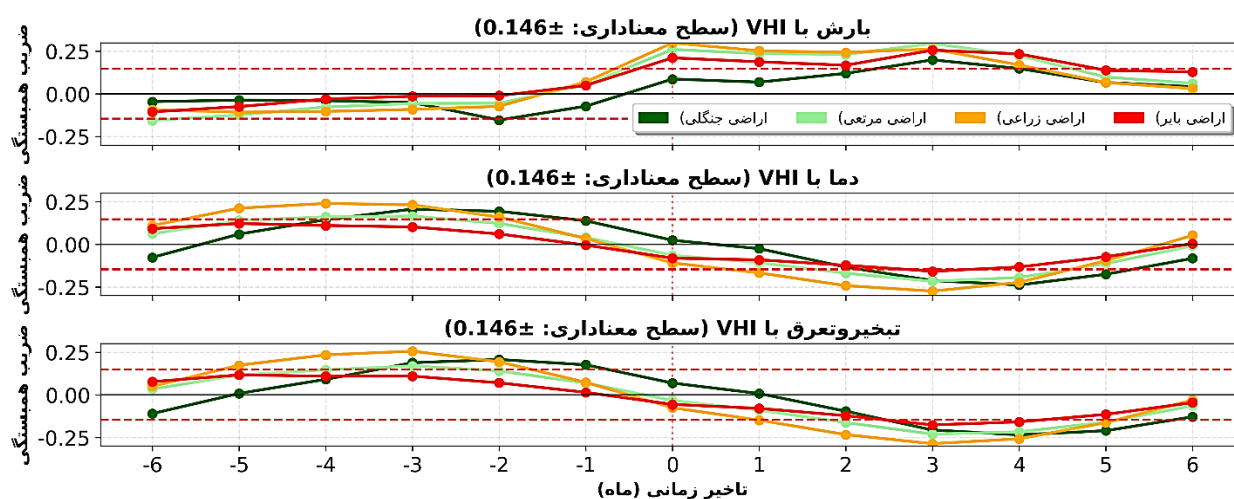
نتایج تحلیل سری‌های زمانی نشان داد که میانگین دما (Tmean) در تمامی فصول و برای تمامی کاربری‌های اراضی (جنگل، مرتع، زراعت و بایر) روندی افزایشی داشته است (شکل ۳). این روند در فصل‌های گرم‌تر (تابستان و پاییز) شدت بیشتری یافته و بیانگر تأثیر مستقیم گرمایش اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای است. به موازات آن، تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) نیز در تمامی فصول به‌ویژه در تابستان به‌طور معناداری افزایش یافته است. در مقابل، بارش (PR) روند کاهشی معناداری در طول دوره مطالعه نشان داده است (۷ و ۸). در مورد شاخص VHI، نتایج نشان داد که این شاخص در بیشتر مناطق استان به‌ویژه در فصل تابستان روند کاهشی معناداری داشته است که نشان‌دهنده افت سلامت پوشش گیاهی در اثر تغییرات اقلیمی است. این روند کاهشی در اراضی زراعی و مرتعی بیشتر از اراضی جنگلی و بایر بوده است.

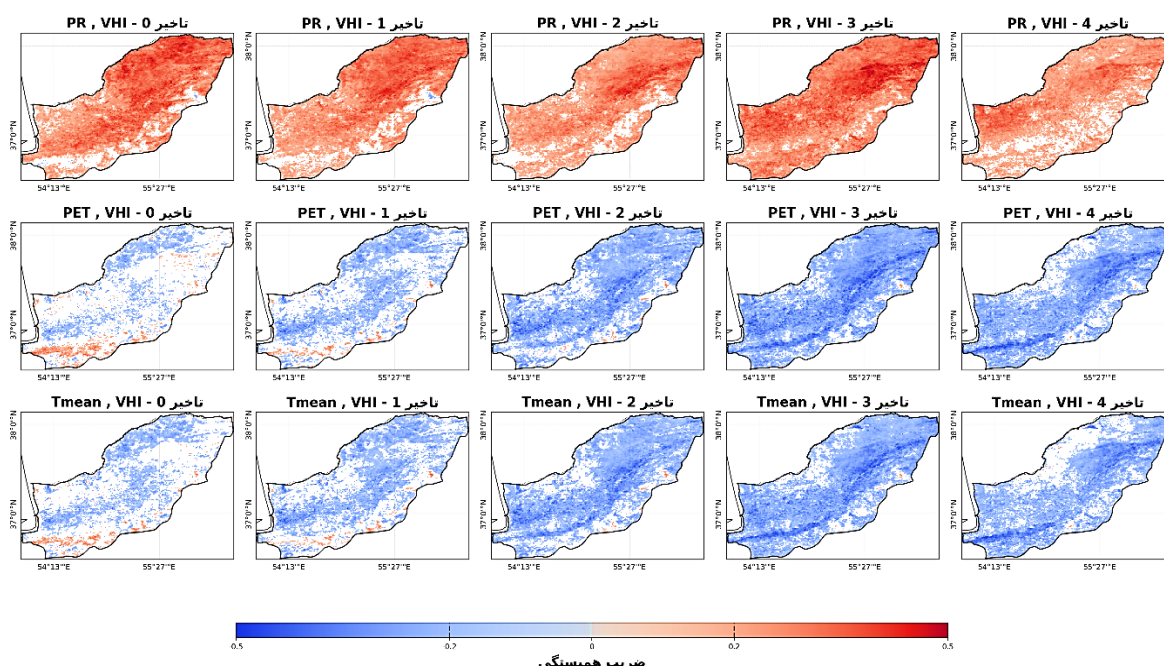
تحلیل همبستگی متقابل (CCF) بین شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) و متغیرهای اقلیمی در استان گلستان نشان داد که الگوهای پاسخ در انواع پوشش‌های زمین با انتظارات زیست‌فیزیکی سازگار هستند. رابطه VHI با بارش مثبت، با تبخیر و تعرق منفی و با دما به‌صورت غیرخطی ظاهر شد. بیشترین مقادیر همبستگی در اراضی زراعی دیده شد (۰/۲۹۹ با بارش، ۰/۲۸۷ با تبخیر و تعرق و ۰/۲۷۵ با دما) که نشان‌دهنده حساسیت زیاد اکوسیستم‌های کشاورزی به تغییرات اقلیمی است.

در مقابل، اراضی بایر کمترین مقادیر همبستگی را نشان دادند و بنابراین کمترین حساسیت را نسبت به نوسانات اقلیمی

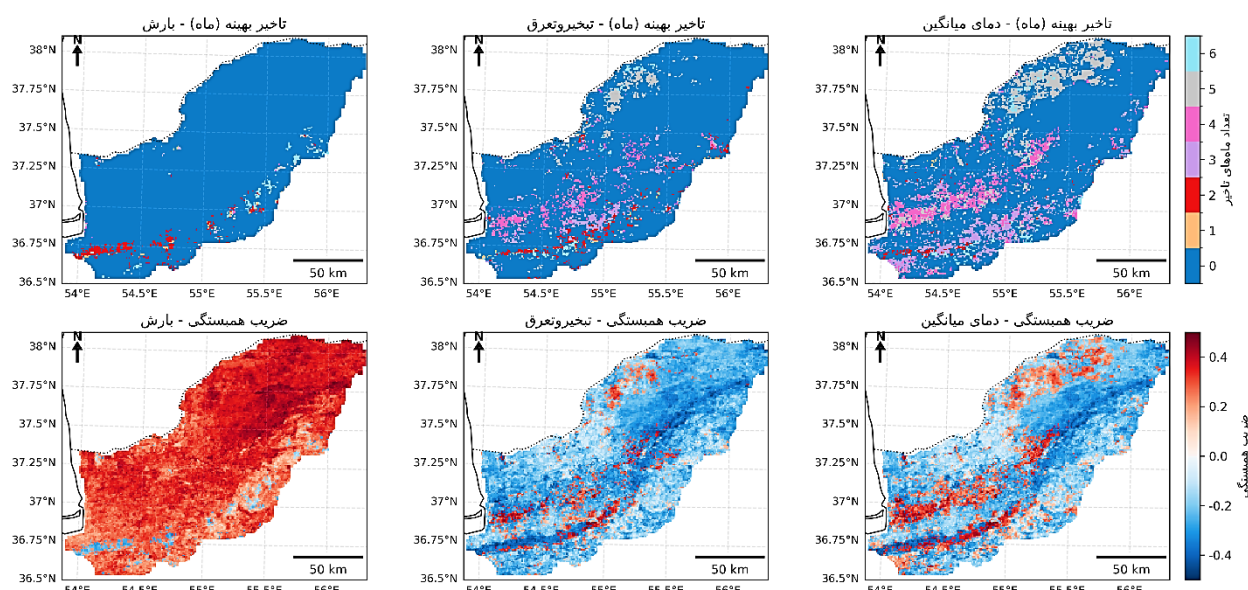


شکل ۳. مقایسه فصلی متغیرهای محیطی (شاخص گیاهی، بارش، تبخیر و تعرق و دما) بر اساس انواع کاربری اراضی





شکل ۵. الگوهای رابطه مکانی - زمانی همبستگی متقابل بین متغیرهای محیطی PET، PR، Tmean و شاخص VHI



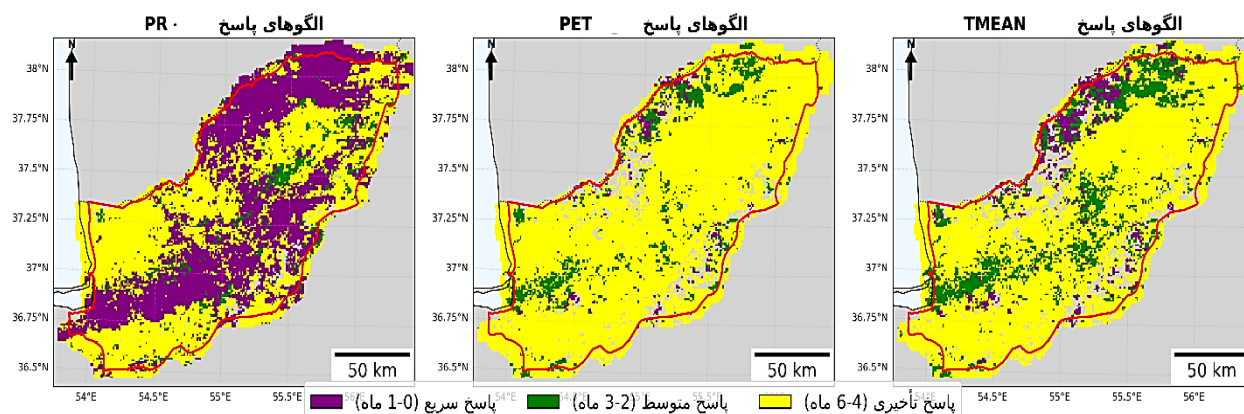
شکل ۶. توزیع مکانی تأخیر بهینه متغیرهای اقلیمی و همبستگی آن با VHI (زیاد به قرمز و کم به رنگ آبی)

تأخیر ۰-۱ ماه و اثر تبخیر - تعرق با تأخیر ۲-۴ ماه بیشترین تأثیر را دارند (شکل ۸).

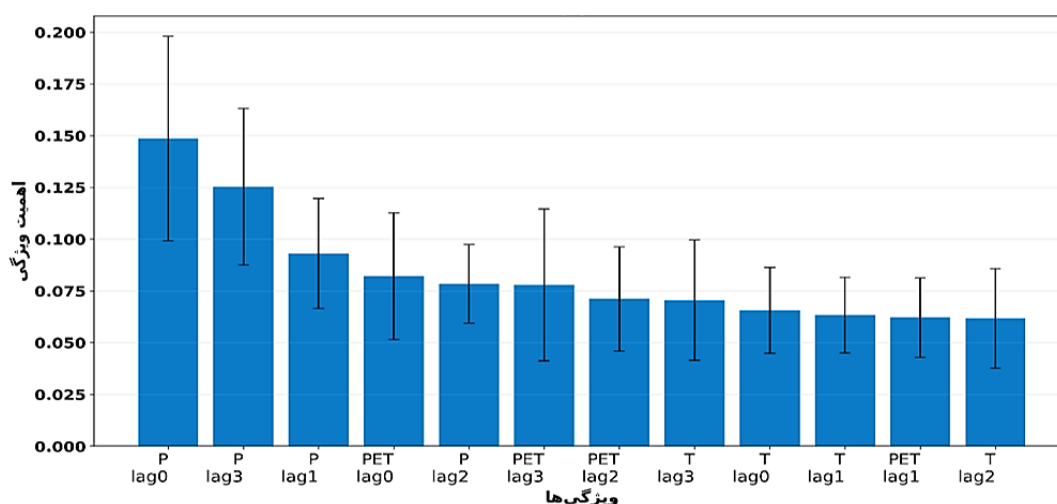
بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که روند افزایشی دما و پتانسیل

تأثیر را دارند. این مدل با ضریب تعیین (R^2) ۰/۷۸ و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ۰/۰۹ توانست تغییرات VHI را به خوبی پیش‌بینی کند. تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که تأخیرهای زمانی مختلف برای هر متغیر اقلیمی در تبیین تغییرات VHI مهم هستند؛ به‌طوری که اثر بارش عمدتاً با



شکل ۷. الگوهای زمانی پاسخ گیاه به متغیرهای اقلیمی



شکل ۸. اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی (بارش P، تبخیر و تفرق PET و دما T) با زمان‌های تاخیر (تا سه ماهه) در پیش‌بینی شاخص سلامت گیاهی

گیاهی دارد. همبستگی منفی بین تبخیر - تعرق و VHI تأیید می‌کند که افزایش تبخیر - تعرق محیطی، فشار بیشتری بر پوشش گیاهی وارد کرده و موجب کاهش سلامت آن می‌شود. تفاوت در حساسیت پوشش‌های مختلف به تغییرات اقلیمی که در این مطالعه دیده شد، با مطالعات پیشین در ایران همخوانی دارد (۲۱ و ۲۴). برای نمونه، در شمال ایران نیز VHI وضعیت‌های خشکسالی بحرانی و بسیار شدید را در سال‌های اخیر منعکس می‌کند (۲۴). در پژوهش‌های قبلی نیز کاهش شدید VHI در مناطق خشک ایران گزارش شده است که نشان‌دهنده پیشرفت به سمت شرایط خشک‌تر است (۶).

تبخیر و تعرق (PET) در کنار کاهش بارش، منجر به فشار اقلیمی و خشکی‌زایی فزاینده در استان گلستان شده است. این یافته‌ها با مطالعات انجام‌شده در استان گلستان که حاکی از آن است که بخش بیشتر این منطقه در معرض خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید قرار گرفته، همخوانی دارد (۱۸، ۲۱، ۲۳ و ۲۴).

رابطه مثبت VHI با بارش که در این مطالعه دیده شد، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین در ایران و سایر مناطق نیمه‌خشک جهان همخوانی دارد (۱۰ و ۲۶). بارش به‌عنوان عامل اصلی تأمین رطوبت خاک، تأثیر مستقیمی بر رشد و سلامت پوشش

معنادار VHI—به‌ویژه در فصل تابستان و در اراضی زراعی— شده است. همچنین، واکنش VHI به بارش عمدتاً با تأخیر کوتاه‌مدت (۱-۰ ماه)، درحالی‌که پاسخ به PET با تأخیر بلندتر (۴-۲ ماه) رخ داد که نشان‌دهنده وابستگی عمیق به رطوبت ذخیره‌شده در خاک است. مدل جنگل تصادفی نیز بارش را به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر سلامت پوشش گیاهی شناسایی کرد؛ اما نقش تعدیل‌کننده و تشدیدکننده PET و دما را نیز تأیید نمود.

با وجود این یافته‌های ارزشمند، این مطالعه با چندین محدودیت روش‌شناختی و داده‌محور همراه است:

- (۱) عدم استفاده از داده‌های زمینی (مانند مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی، عملکرد محصول یا شاخص‌های میدانی سلامت گیاه) برای اعتبارسنجی نتایج؛
 - (۲) استاتیک بودن لایه کاربری اراضی (فقط بر اساس سال ۲۰۲۴)؛ درحالی‌که تغییرات کاربری طی دو دهه گذشته می‌تواند بر الگوهای پاسخ VHI تأثیرگذار باشد؛
 - (۳) عدم تحلیل عدم قطعیت داده‌های ماهواره‌ای (مانند خطای RMSE داده‌های TerraClimate) و مدل Random Forest؛
 - (۴) عدم مقایسه عملکرد مدل جنگل تصادفی با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین (مانند XGBoost یا SVM)؛
 - (۵) تمرکز صرف بر شاخص VHI بدون مقایسه با سایر شاخص‌های رطوبتی یا پوشش گیاهی مانند NDWI یا EVI.
- بر این اساس، پیشنهادهاى زیر برای پژوهش‌های آینده مطرح می‌شود:

- تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با مشاهدات میدانی (عملکرد گندم، ذرت و سایر محصولات کلیدی استان) برای اعتبارسنجی کمی نتایج؛
- استفاده از سری زمانی کاربری اراضی (مانند MCD12Q1 طی ۲۰۰۱-۲۰۲۴) برای تحلیل تأثیر تغییرات کاربری بر پاسخ پوشش گیاهی؛
- گسترش تحلیل به شاخص‌های چندبعدی مانند NDWI (برای رطوبت خاک)، EVI (برای پوشش گیاهی متراکم) و

تفاوت در تأخیرهای پاسخ پوشش‌های مختلف به تغییرات اقلیمی یافته مهم دیگر این مطالعه است. اکوسیستم‌های طبیعی‌تر (جنگل) با تأخیر طولانی‌تر (چهار ماه) به تغییرات اقلیمی پاسخ می‌دهند که نشان‌دهنده پایداری و اینرسی بیشتر این اکوسیستم‌هاست. در مقابل، اکوسیستم‌های زراعی و مرتعی با تأخیر کمتر (۳-۰ ماه) به تغییرات بارش و دما واکنش نشان می‌دهند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این اکوسیستم‌ها به تغییرات اقلیمی است. نتایج این پژوهش علاوه بر تأیید اهمیت بارش به‌عنوان عامل کلیدی پایداری پوشش گیاهی، بر لزوم توجه به اثرهای تجمعی دما و تبخیر - تعرق تأکید دارد (۵، ۷ و ۹).

در شرایطی که بارش کاهش یافته و دما افزایش یافته است، تأثیر تبخیر - تعرق بر سلامت پوشش گیاهی تشدید می‌شود. نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند منجر به ارزیابی‌های نادرست از وضعیت پوشش گیاهی و خشکسالی شود.

مدل‌های یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی) بارش را به‌عنوان عامل اصلی و PET را به‌عنوان عامل ثانویه تأثیرگذار بر خشکسالی کشاورزی در گلستان شناسایی کرده‌اند؛ درحالی‌که دما نقش غیرمستقیم دارد (۱۷ و ۲۳).

به‌طور کلی، این مطالعه نشان داد ادامه روندهای اقلیمی منابع آب، تنوع زیستی و کشاورزی این منطقه را تهدید می‌کند و اجرای راهکارهایی مانند مدیریت پایدار آب، کشت گیاهان مقاوم و پایش سنجش از دور برای کاهش پیامدهای آن ضروری است (۲، ۲۲ و ۲۴).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای MODIS و مجموعه‌داده TerraClimate، رابطه مکانی - زمانی بین شاخص سلامت گیاهی (VHI) و سه متغیر اقلیمی کلیدی (بارش، دمای میانگین و تبخیر - تعرق پتانسیل) را در استان گلستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ تحلیل کرد. یافته‌های اصلی نشان داد که روند افزایشی دما و PET همراه با کاهش بارش، منجر به کاهش

در مجموع، این پژوهش گامی مؤثر به منظور درک پویایی‌های خشکسالی کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک ایران برداشته است؛ اما برای تبدیل یافته‌ها به ابزارهای مدیریتی کارآمد، نیازمند تلفیق چندمنبعه داده‌ها، تحلیل‌های انتقادی عمیق‌تر و همکاری بین‌رشته‌ای بین متخصصان سنجش از دور، هواشناسی، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی است.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش مساعدت کردند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

SMI (شاخص رطوبت خاک) به‌منظور مقایسه عملکرد شاخص‌ها در پایش خشکسالی؛

• اجرای تحلیل عدم قطعیت برای داده‌ها و مدل‌ها و گزارش بازه‌های اطمینان نتایج؛

• توسعه سامانه هشدار زودهنگام خشکسالی مبتنی بر VHI و تأخیرهای بهینه شناسایی‌شده، به‌ویژه برای مناطق پرخطر جنوب استان؛

• انجام مطالعات مشابه در سایر استان‌های با تنوع اقلیمی (مانند خوزستان، آذربایجان یا سیستان) برای تعمیم‌پذیری یافته‌ها.

References

منابع مورد استفاده

1. Abatzoglou, J.T., S.Z. Dobrowski, S.A. Parks and K.C. Hegewisch. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* 5(1): 170191.
2. Blauhut, V., M. Stoelzle, L. Ahopelto, M.I. Brunner, C. Teutschbein, D.E. Wendt and et al. 2022. Lessons from the 2018–2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(6):2201–1227.
3. Earth Science Data Systems N. MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061 | NASA Earthdata [Internet]. Earth Science Data Systems, NASA; 2025 [cited 2025 Sept 3]. Available from: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod13q1-061>
4. Earth Science Data Systems N. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061 | NASA Earthdata [Internet]. Earth Science Data Systems, NASA; 2025 [cited 2025 Sept 3]. Available from: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod11a2-061>
5. Farrokhzadeh, B., S. Mansouri and A. Sepehri. 2018. Determining the correlation between NDVI and EVI vegetation indices and SPI drought index (Case Study: Golestan rangelands). *Journal of Agricultural Meteorology* 5(2): 56–65.
6. Ghobadi, M. and Z. Bادهیان. 2025. Assessment of agricultural drought severity using multi-temporal remote sensing data in Lorestan region. *Scientific Reports* 15(1):18528.
7. Hamzeh, S., Z. Farahani, S. Mahdavi, O. Chatroboun and M. Gholamnia. 2017. Spatio-temporal monitoring of agricultural drought using remotely sensed data (Case study of Markazi province of Iran). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 4(3): 53–70.
8. Hoyer, A.S., A.J.J Hamman. xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python. *Journal of Open Research Software* 5(1):10-10. <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/articles%3A21998>
9. Jahdi, R., M. Hanifepour and R. Jahdi. 2024. Analyzing the Effects of Meteorological Drought on Vegetation Dynamics in the Golestan Province. *Geography and Environmental Sustainability* 14(3):39–51.
10. Jiang, R., J. Liang, Y. Zhao, H. Wang, J. Xie, X. Lu and et al. 2021. Assessment of vegetation growth and drought conditions using satellite-based vegetation health indices in Jing-Jin-Ji region of China. *Scientific Reports* 11(1): 13775.
11. Kaso, A. 2018. Computation of the normalized cross-correlation by fast Fourier transform. *PloS One* 13(9): e0203434.
12. Kogan, F.N. 1995. Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 76(5): 655–668.
13. Kogan, F.N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances In Space Research* 15(11):91–100.

14. Li, J., Y. Li, L. Yin and Q. Zhao. 2024. A novel composite drought index combining precipitation, temperature and evapotranspiration used for drought monitoring in the Huang-Huai-Hai Plain. *Agricultural Water Management* 291:108626.
15. Lyon, D. 2024. The Discrete Fourier Transform, part 6: Cross-correlation. *J Object Technol* 9(2):17–22.
16. Mohammadi M, Forozanfard M. Evaluating ERA5 Reanalysis for Climate Trend Analysis in Sistan and Baluchestan, Iran. *Climate Change Research* 5(19): 37–54.
17. Nandgude, N., T.P. Singh, S. Nandgude and M. Tiwari. 2023. Drought Prediction: A Comprehensive Review of Different Drought Prediction Models and Adopted Technologies. *Sustainability* 15(15): 11684.
18. Pouyan, S., M. Bordbar, V. Ravichandran, J.P. Tiefenbacher, M. Kherad and H.R. Pourghasemi. 2023. Spatiotemporal monitoring of droughts in Iran using remote-sensing indices. *Natural Hazards* 117(1):1–24.
19. Quiring, S.M. and S. Ganesh. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(3): 330–339.
20. Rayegani, B., S. Barati, M. Farzaneh, F. Hosseini Tayefeh and A. Torabinia. 2025. Assessment of the Magnitude and Extent of Climate Change in Different Regions of Iran. *Environment and Interdisciplinary Development* 10(87): 78–96.
21. Sarabi, S., A. Heshmatpour, C. Bayram Komaki and A. Tahmasebi. 2015. The assessment of relationship between MODIS vegetation indices and drought on northern rangelands of Golestan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research* 22(2): 392–405.
22. Shabani, M. 2022. Evaluation of indices based on remote sensing in drought monitoring of Neyriz city. *Journal of RS and GIS for Natural Resources* 13(4): 21–24.
23. Shamsipour, A. and V. Rodgar Safari. 2020. Investigating the Consequences of Climate Change with a Focus on Spatial analysis of drought severity in Golestan Province using Statistical and Remote sensing indices. *Climate Change Research* 1(3): 65–76.
24. Siasar, H., O. Mohammadrezapour, M. Khodamorad Pour. 2024. Drought Monitoring using MODIS Sensor Data and Comparison with SPI Meteorological Index in Short-term Periods (Case study: Golestan province). *Geography and Development* 22(74): 166–86.
25. Simoes, R. 2023. MODIS MCD12Q1 Land Cover and Land Use Time Series Global Mosaics 2001-2022 (500 m). <https://zenodo.org/records/8338928>
26. Zarei, R., M. Sarajian, S. Bazgeer. 2013. Monitoring Meteorological Drought in Iran Using Remote Sensing and Drought Indices. *Desert* 18(1): 89–97.