

Monitoring and Analysis of Soil Moisture Dynamics and Agricultural Drought in Fars Province Utilizing the TVDI and MODIS Sensor Data (2001–2021)





Zeinab Ashouri Qaleh-e-Rodkhani¹, Gholamali Mozaffari^{2*} , Hamidreza Ghaffarian Malmiri³, Iman Rosta³

1. PhD Student of Climatology, Geography Department, Yazd University, Yazd, Iran

2. Corresponding Author, Professor of Climatology, Geography Department, Yazd University, Yazd, Iran

Email: gmozafari@yazd.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7418-8737>

3. Associate Professor of Remote sensing, Geography Department, Yazd University, Yazd, Iran

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received:  Revised:  Accepted:  Published: </p> <p>Keywords: Moisture indices, Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI), MODIS sensor, Fars province.</p>	<p>Accurate surface soil moisture monitoring is critical for mitigating drought crises and safeguarding food security in Fars province, a premier agricultural hub in Iran. To capture the spatio-temporal dynamics of drought severity, this study leveraged a two-decade archive (2001–2020) of MODIS time-series imagery. Methodologically, the Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) was computed to retrieve soil moisture estimates. Unpacking the complex dynamics driving these variations required evaluating key environmental variables, namely, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Digital Elevation Models (DEM), through rigorous spatial and statistical assessments. The findings reveal a nuanced reality. Beyond broad climatic trends, the synergistic interaction between vegetation shifts and elevation exerts the strongest governing influence over the province's soil moisture distribution. Spatial mapping of the TVDI demonstrated that regions suffering from severe to extreme drought comprise merely 15% to 20% of the total land area, heavily concentrated in the southern tier. In stark contrast, vast expanses across the northern, western, and central territories (approximately 65% to 70%) experience either mild or negligible drought conditions. Ultimately, drought patterns in this region are not solely dictated by climate forcing. The intricate interplay between topography and vegetation serves as a crucial mitigating or amplifying mechanism. Adopting a hybridized TVDI framework that explicitly accounts for elevation-vegetation dynamics offers a robust analytical approach. Such an integrated perspective provides policymakers with the precision required to pinpoint vulnerable hotspots and design targeted water resource management strategies.</p>

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (-), ----.



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 0000000000000000

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Soil moisture is an essential component of the terrestrial water cycle. It serves as a key parameter in meteorology, hydrology, and agriculture (McColl et al., 2017). It controls the continuous energy exchange between the surface and the hydrosphere. In doing so, it fundamentally drives global climate dynamics. Specifically, changes in soil water content dictate the division of sensible and latent heat fluxes. This thermodynamic process significantly impacts broader climate variability (Jia et al., 2018). Physically, soil moisture regulates vital hydrological processes. It determines streamflow generation, groundwater recharge, precipitation feedback, bare-soil evaporation, and canopy transpiration. It acts as a physical bridge connecting surface water systems with subterranean aquifers. This connection stabilizes terrestrial ecosystems and the overall water cycle (Kim et al., 2017). When soil moisture is depleted, it disrupts the delicate land-atmosphere energy balance. This deficit limits the water available for healthy plant growth. Consequently, it accelerates environmental degradation (Yu et al., 2019). Maintaining this energy balance is crucial for long-term ecological preservation. Therefore, accurate soil moisture monitoring is strictly necessary. It is used to track crop phenology, assess habitat viability, and model climate change. Furthermore, evaluating soil moisture is critical for hazard assessment. Even minor deviations can dramatically alter the onset, trajectory, and severity of droughts.

To quantify these variations, the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) has emerged as a reliable tool. It is widely used for tracking drought and mapping soil moisture across different regions. TVDI combines land surface temperature with vegetation metrics. This allows it to pinpoint areas under severe drought stress. As a result, TVDI provides critical diagnostic support for managing water resources. Applying TVDI to agriculture directly improves agrometeorological resilience. It helps optimize crop yields while buffering against severe drought losses. However, the diagnostic accuracy of TVDI has limitations. Its practical effectiveness is highly sensitive to local land cover, complex topography, and the precision of the input data.

While existing literature has extensively explored TVDI, this study introduces a more comprehensive analytical framework. Historically, applied TVDI research has been narrow in scope. Previous studies often focused on single benchmark years, specific growing seasons, or isolated drought events. These early methods lacked long-term, multi-scale evaluations of agricultural drought. Consequently, they failed to capture the complex evolution of regional soil moisture over extended periods.

DATA AND METHODOLOGY

These droughts severely threaten crop yields, water supplies, and regional food security. Such events have intensified in recent years. They rapidly deplete soil moisture reserves and reduce agricultural productivity across the province. Addressing this challenge requires precise environmental monitoring. MODIS satellite imagery offers a robust tool to track soil moisture and model drought patterns. This approach helps optimize water management and strengthen regional mitigation efforts. In this study, we simulated the spatio-temporal dynamics of surface soil moisture in Fars province over two decades (2001–2021). We accomplished this by applying the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) to MODIS data.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis reveals dynamic, long-term shifts in soil moisture over the study period. A distinct spatial gradient also emerged. Northern and western regions retained higher moisture levels. In stark contrast, southern and eastern areas experienced pronounced drying. To understand these variations, we evaluated key environmental factors, particularly the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Our results show that the interaction between NDVI and elevation is the primary driver of soil moisture distribution.

CONCLUSION

Our findings map the spatial footprint of annual drought events. These episodes primarily concentrate in the central, western, and southern regions of the province. However, they show a clear tendency to spread toward the northern and northwestern areas.

Currently, trend detection is limited by the time span of available data. Therefore, extending the observational timeline is a critical priority for future research. The MODIS archive continues to grow. At the same time, researchers are combining multi-sensor satellite data to build longer continuous records. These advancements will drastically expand the scope of long-term remote sensing analysis.

Using these multi-decadal time series will provide a deeper understanding of drought behavior. Identifying these spatiotemporal shifts is not just an academic exercise. It provides actionable, high-precision intelligence for drought forecasting and environmental management.

Improving these early warning systems goes beyond basic weather observation. It forms the cornerstone of robust disaster risk reduction. By optimizing prediction and intervention strategies, decision-makers can better protect food security. Ultimately, this will sustain resilient agriculture and ensure socioeconomic stability in vulnerable regions

REFERENCES

References (in English)

- Jia, B., Liu, J., Xie, Z., & Shi, C. (2018). Interannual variations and trends in remotely sensed and modeled soil moisture in China. *Journal of Hydrometeorology*, 19(5), 831-847. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0003.1>
- Kim, H., Zohaib, M., Cho, E., Kerr, Y. H., & Choi, M. (2017). Development and assessment of the sand dust prediction model by utilizing microwave-based satellite soil moisture and reanalysis datasets in East Asian desert areas. *Advances in Meteorology*, 2017(1), 1917372. <https://doi.org/10.1155/2017/1917372>
- McColl, K. A., Alemohammad, S. H., Akbar, R., Konings, A. G., Yueh, S., & Entekhabi, D. (2017). The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10(2), 100-104. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017NatGe..10..100M/doi:10.1038/ngeo2868
- Yu, H., Zhang, Q., Xu, C. Y., Du, J., Sun, P., & Hu, P. (2019). Modified palmer drought severity index: model improvement and application. *Environment international*, 130, 104951. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104951>

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ... شماره ...

پایش و تحلیل تغییرات رطوبت خاک و خشکسالی کشاورزی در استان فارس با استفاده از شاخص TVDI و داده‌های سنجنده (MODIS) (2021-2001)

زینب عاشوری قلعه رودخانی^۱، غلامعلی مظفری^{۲*} ID، حمیدرضا غفاریان مالمیری^۳، ایمان روستا^۳

۱. دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: gmozafari@vazd.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7418-8737>

۳. دانشیار جغرافیا، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله:</p> <p>مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: --/--</p> <p>تاریخ ویرایش: --/--</p> <p>تاریخ پذیرش: --/--</p> <p>تاریخ انتشار: --/--</p> <p>واژه‌های کلیدی:</p> <p>شاخص‌های رطوبتی، شاخص خشکی پوشش گیاهی-دما (TVDI)، سنجنده MODIS، استان فارس.</p>	<p>پایش دقیق رطوبت سطحی خاک جهت مدیریت بحران خشکسالی و امنیت غذایی در استان فارس، به عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی ایران، امری حیاتی است. این پژوهش با هدف مدل‌سازی و ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی شدت خشکسالی، از داده‌های سری زمانی سنجنده MODIS طی یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) استفاده کرده است. در بخش روش‌شناسی، شاخص خشکی پوشش گیاهی-دما (TVDI) برای برآورد رطوبت خاک محاسبه شد و سپس برای درک دینامیک حاکم بر این تغییرات، اثرات متغیرهای محیطی نظیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و مدل رقومی ارتفاع (DEM) از طریق تحلیل‌های فضایی و آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های تحقیق نشان داد که با گذر از روندهای عمومی خشکسالی، برهمکنش همزمان تغییرات NDVI و ارتفاع بیشترین تأثیر کنترل‌کننده را بر توزیع مکانی رطوبت خاک استان دارد. بررسی توزیع مکانی شاخص TVDI مشخص کرد که مناطق تحت تأثیر خشکسالی شدید و بسیار شدید تنها حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از مساحت استان را شامل می‌شوند که عمدتاً در نیمه جنوبی متمرکز شده‌اند. در مقابل، بخش‌های وسیعی از استان (حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد) شامل نواحی شمالی، غربی و مرکزی، در وضعیت بدون خشکسالی و خشکسالی خفیف قرار دارند. در نتیجه، توزیع و شدت خشکسالی در این منطقه صرفاً تابع اقلیم نیست، بلکه اثرات متقابل توپوگرافی و پوشش گیاهی نقش تشدیدکننده یا تقلیل‌دهنده حیاتی دارند. استفاده از چارچوب ترکیبی TVDI و پایش اثرات ارتفاع-پوشش گیاهی می‌تواند رویکردی کارآمد برای شناسایی دقیق کانون‌های بحرانی و تدوین استراتژی‌های مدیریت منابع آب ارائه دهد.</p>

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، -- (--)، ---

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

رطوبت خاک به عنوان یک متغیر کلیدی در چرخه آب سطحی و تبادلات انرژی، نقشی تعیین‌کننده در فرآیندهای هیدرولوژیکی، پویایی اکوسیستم‌های خشکی و تعاملات جوی ایفا می‌کند (مک کول و همکاران، ۲۰۱۷؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۷). تغییرات این مؤلفه کلیدی، با اثرگذاری مستقیم بر گرمای نهان و محسوس، توازن انرژی میان سطح زمین و جو را تغییر داده و در مقیاس کلان، به عنوان یکی از پیشران‌های اصلی تغییرات اقلیمی و تخریب فزاینده محیط‌زیست شناخته می‌شود (جیا و همکاران، ۲۰۱۸؛ یو و همکاران، ۲۰۱۹). پیامد این عدم توازن و کاهش رطوبت خاک، بروز چالش‌های مخربی نظیر خشکسالی است که در طبقه‌بندی‌های سازمان هواشناسی جهانی (WMO) با ابعاد هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی، امنیت و ثبات جهانی را با تهدید جدی مواجه ساخته است (استفانیدیس و همکاران، ۲۰۲۳؛ وی و همکاران، ۲۰۲۳).

در این میان، استان فارس به عنوان یکی از قطب‌های استراتژیک امنیت غذایی ایران و دارنده رتبه دوم تولیدات زراعی کشور، وابستگی ساختاری و شدیدی به کشت دیم به‌ویژه در زمینه تولید غلات دارد. با این وجود، پیامدهای ناشی از تغییرات ناهنجار اقلیمی از یک سو و افزایش فزاینده تقاضای آب به دلیل توسعه اقتصادی و جمعیتی از سوی دیگر، این منطقه را با بحران‌های متوالی مواجه ساخته است (چترجی و همکاران، ۲۰۲۲). شواهد آماری نشان می‌دهد که مساحت تحت تأثیر، شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی در این استان روندی کاملاً افزایشی به خود گرفته است (شریفی پیچون و همکاران، ۱۴۰۱)؛ به‌نحوی که نوسانات شدید بارشی، وقوع خشکسالی‌های متوالی را در دیم‌زارها به یک الگوی فصلی و غالب تبدیل کرده است (فلامرزی، ۱۴۰۲). پیامدهای ویرانگر این پدیده، نظیر خسارت هفت هزار میلیارد تومانی به بخش کشاورزی در بهار ۱۴۰۰، ضرورت گذار از نگاه‌های سنتی و پایش دقیق این بحران را بیش از پیش نمایان می‌سازد (خبرگزاری مهر، ۱۴۰۰).

برای سنجش و پایش این نوسانات پیچیده، تکنیک‌های سنجش از دور نظیر روش اینرسی حرارتی (TI)، سنجش میکروویو (MRS) و به‌ویژه شاخص خشکی پوشش گیاهی-دما (TVDI) ابزارهایی بسیار کارآمد محسوب می‌شوند (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ ونگ و همکاران، ۲۰۰۴). شاخص TVDI، با تفکیک افقی بالا (نظیر ۱۰۰۰ متر)، به عنوان یک مدل وارون‌سازی رطوبت خاک عمل می‌کند. این شاخص با تلفیق دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های طیفی نظیر شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI)، تبادلات انرژی میان جو، خاک و گیاه را با دقت بالایی منعکس می‌سازد (دوان و همکاران، ۲۰۱۷؛ هولزمن و همکاران، ۲۰۱۴). با این وجود، باید توجه داشت که خشکسالی کشاورزی پدیده‌ای چندوجهی است؛ به طوری که علاوه بر محتوای رطوبت خاک، به‌شدت تحت‌الشعاع شرایط اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی ناشی از فعالیت‌های انسانی و همچنین توپوگرافی و نوع پوشش گیاهی قرار دارد (چنگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ لو و لی، ۲۰۲۳).

روش‌های مختلفی برای پایش و ارزیابی خشکسالی توسعه یافته‌اند که یکی از آن‌ها شاخص خشکی پوشش گیاهی-دما (TVDI) است. این شاخص، با ترکیب اطلاعات دمای سطح زمین و پوشش گیاهی، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی وضعیت رطوبت خاک و شناسایی مناطق تحت تنش خشکسالی فراهم می‌کند. مطالعات متعددی در سراسر جهان به بررسی کاربرد و کارایی TVDI در پایش خشکسالی پرداخته‌اند که در ادامه به بررسی برخی از آن‌ها می‌پردازیم. Chen و همکاران (۲۰۱۱) پتانسیل TVDI حاصل از داده‌های سنجنده MODIS را برای ارزیابی رطوبت خاک در

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

دشت Huang-huai-hai (HHH) چین، بررسی کردند. تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون بین TVDI و اندازه‌گیری‌های میدانی رطوبت خاک در مراحل اصلی رشد گندم زمستانه/ذرت تابستانه نشان داد که رابطه منفی معنی‌داری بین TVDI و اندازه‌گیری‌های میدانی در اعماق مختلف خاک وجود دارد. قوی‌ترین رابطه برای محصولات گندم زمستانه/ذرت تابستانه در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متر ($R^2 = 0.43$) مشاهده شد. الگوهای مکانی و زمانی TVDI نیز مورد بررسی قرار گرفتند. Du و همکاران (۲۰۱۷) دو روش شبیه‌سازی TVDI را برای پایش خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک استان نینگ‌شیا چین با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها روشی اصلاح‌شده برای شبیه‌سازی لبه‌های خشک و مرطوب ارائه دادند و TVDI اصلی را با شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی اصلاح‌شده (TVDIm) مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که هر دو شاخص TVDI و TVDI می‌توانند تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی را پایش کنند و شروع، مدت، وسعت و شدت خشکسالی را نشان دهند. با این حال، مقدار TVDI بیشتر از TVDI بود که می‌تواند منجر به برآورد بیش از حد خشکسالی در سال‌های عادی و کم‌برآورد آن در سال‌های خشک شود.

مطالعه Zheng و همکاران (۲۰۲۴) در منطقه Zhangjiakou-Chengde (ZC) چین، به بررسی تغییرات رطوبت خاک و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل TVDI پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که رطوبت خاک در منطقه ZC در طول دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ نوساناتی را تجربه کرده است و حدود ۸۳،۰۹ درصد از این منطقه افزایش تدریجی رطوبت خاک را نشان می‌دهد. همچنین، تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر رطوبت خاک نشان داد که شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) بارش، نوع کاربری اراضی، شیب، ارتفاع، دما، جهت شیب، میزان شن، سیلت و رس بر تغییرات رطوبت خاک تأثیرگذار هستند. Khosravi و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های MODIS در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲، ارزیابی مکانی-زمانی TVDI را در خاورمیانه انجام دادند. آن‌ها با استفاده از آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن، روند تغییرات TVDI را بررسی کرده و با استفاده از تحلیل هارمونیک، به تجزیه و تحلیل طیفی پرداختند. نتایج نشان داد که در ماه‌های مارس و آوریل افزایش معنی‌داری در TVDI مشاهده شده است، در حالی که در ماه سپتامبر کمترین افزایش معنی‌دار مشاهده شد که نشان دهنده پایداری یا کاهش است. از نظر جغرافیایی، روند صعودی در شمال خاورمیانه، از جمله ترکیه، سوریه، عراق، غرب ایران و شرق اردن غالب بود. روند نزولی معنی‌دار در جنوب خاورمیانه در ماه‌های گرم‌تر مشاهده شد.

Li و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی ویژگی‌های مکانی-زمانی خشکسالی کشاورزی در استان هنان چین با استفاده از TVDI پرداختند. نتایج نشان داد که خشکسالی در مقیاس سالانه در مرکز، شمال غربی و جنوب استان هنان رخ می‌دهد. همچنین، روند خشکسالی در بهار، تابستان و زمستان افزایشی بوده است، اما در پاییز روند معکوس مشاهده شده است. به طور کلی، روند خشکسالی در استان هنان رو به افزایش است و الگوهای فصلی و منطقه‌ای متمایزی را در توزیع مکانی-زمانی خود نشان می‌دهد. Quille-Mamani و همکاران (۲۰۲۴) از TVDI برای بررسی تغییرات مکانی-زمانی وضعیت آب درختان زیتون در جنوب پرو استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 5 و 8، شاخص‌های پوشش گیاهی مختلفی از جمله NDVI، EVI و SAVI را محاسبه کرده و TVDI را برای دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴ به دست آوردند. نتایج نشان داد که NDVI-TVDI و SAVI-TVDI تصویر بهتری از وضعیت تنش آبی درختان زیتون ارائه می‌دهند. Cheng و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و داده‌های بارش و دما، شاخص‌های خشکسالی مختلفی از جمله TVDI، TVDI، NDDI و SPI را برای بررسی

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی در دشت آبرفتی رودخانه Choushui در تایوان محاسبه کردند. نتایج نشان داد که شدت خشکسالی با کاهش بارندگی یا پوشش گیاهی افزایش می‌یابد.

در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلف سنجش از دور پرداخته‌اند. شاملو و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای در استان خراسان شمالی، کارایی دو شاخص خشکی دما-گیاه TVDINDVI و TVDILAI را بر اساس تصاویر سنجنده MODIS ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص TVDILAI در پایش دوره‌های خشکی عملکرد بهتری نسبت به TVDINDVI دارد و همبستگی بالاتری با بارش تجمعی دو ماه قبل از تصویر نشان می‌دهد.

با وجود کارایی شاخص‌های سنجش از دور در پایش خشکسالی، تعمیم‌پذیری زمانی، اقلیمی و ارتفاعی این شاخص‌ها از چالش‌های اصلی در این زمینه است. نیک‌پی و مومنی (۱۳۹۸) با بررسی شاخص‌های VDI، VCI، TCI و TVDI در اقلیم‌ها و پهنه‌بندی‌های ارتفاعی مختلف در ایران و با استفاده از داده‌های بارشی ماهواره TRMM، نشان دادند که هیچ یک از این شاخص‌ها تعمیم‌پذیری کامل ندارند. دهقانی تفتی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای در دشت یزد-اردکان، روند خشکسالی را با استفاده از شاخص‌های TVDI و NDVI و تصاویر سنجنده MODIS بررسی و ارتباط آن‌ها را با عناصر اقلیمی مانند بارش و دما تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص TVDI همبستگی بالاتری با شاخص خشکسالی SPI نسبت به NDVI دارد. علاوه بر پایش خشکسالی، سنجش از دور در برآورد رطوبت خاک نیز کاربرد دارد. عبیاتی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر لندست ۸ و شاخص‌هایی مانند NDVI، SAVI، LST، NDMI، NDTI و SMSWIR، رطوبت سطحی خاک را در اراضی کشاورزی شهرستان شوشتر برآورد کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص LST به دلیل تأثیر قابل توجه دما بر رطوبت سطحی خاک، برآورد بهتری از رطوبت خاک ارائه می‌دهد و با شاخص‌های NDVI، SAVI، NDMI، NDTI و SMSWIR رابطه مستقیم و با LST رابطه معکوس دارد. صفدری مولان و مردانه (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای در حوضه آبریز سیاه‌کوه، روند تغییرات خشکسالی را با استفاده از شاخص TVDI و ارتباط آن با عوامل جوی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نیز نشان‌دهنده همبستگی بالاتر شاخص TVDI با SPI نسبت به NDVI و همبستگی معکوس TVDI با بارش و همبستگی مستقیم آن با دمای سطح زمین بود. در همین راستا، رؤف و اکبری مجد (۱۴۰۴) در مطالعه‌ای در اراضی پایاب سد سرخاب اردبیل، از شاخص SAVI برای پایش خشکسالی کشاورزی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با وجود روند افزایشی بارش در دوره‌های مورد بررسی، افزایش دما اثرات مثبت بارش را خنثی کرده و تغییرات رطوبت خاک و پوشش گیاهی تقریباً ثابت یا کاهش یافته است. همسو با این نتیجه، قربانی و ولی‌زاده (۱۴۰۴) در بررسی شهرستان گرگان دریافتند که شاخص خشکسالی SPEI نسبت به شاخص SPI، شرایط خشک‌تری را به تصویر می‌کشد و همبستگی بالاتری با شاخص‌های ماهواره‌ای دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که تأثیر خشکسالی بر پوشش‌های گیاهی مختلف متفاوت است؛ به طوری که شاخص TCI بیشترین همبستگی را با خشکسالی مراتع دارد، در حالی که پوشش‌های جنگلی به دلیل گرمایش جهانی روند متفاوتی (افزایش دوره سبزینگی) نشان می‌دهند. در مقیاس کلان‌تر، رضایی و همکاران (۱۴۰۴) پویایی پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز کل کشور را در ارتباط با خشکسالی طی یک دوره ۲۳ ساله ارزیابی کردند. بررسی‌های آن‌ها حاکی از روند افزایشی و معنادار خشکسالی (کاهش شاخص SPEI با نرخ ۰,۹- در هر دهه) در اکثر حوضه‌های آبریز، به‌ویژه در جنوب غرب و شمال کشور است؛ در حالی که شاخص گیاهی NDVI بسته به شرایط منطقه‌ای، روندهای مثبت و منفی متفاوتی را در سطح کشور نشان داده است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

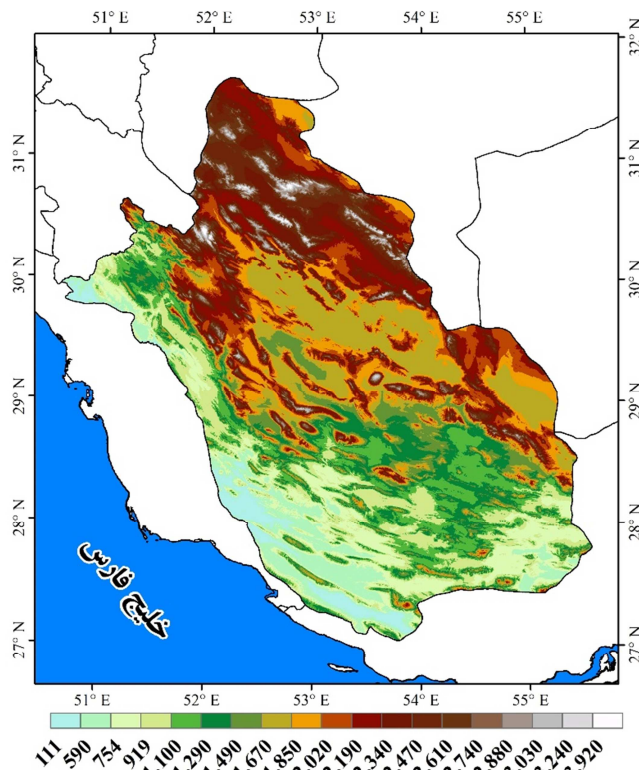
علی‌رغم تأیید کارایی شاخص TVDI مطالعات پیشین، یک شکاف علمی در زمینه پایش خشکسالی وجود دارد که مانع از درک صحیح رفتار سیستم‌های کشاورزی می‌شود. مطالعات کاربردی گذشته عمدتاً بر پایش‌های مقطعی، ارزیابی سال‌های شاخص، فصول رشد خاص و یا رویدادهای منفرد خشکسالی متمرکز بوده‌اند و فاقد تحلیل‌های سری زمانی بلندمدت و چندمقیاسی از ویژگی‌های منطقه‌ای هستند؛ رویکردی که دینامیک روند واقعی تغییرات رطوبت خاک در طول زمان را نشان نمی‌دهد. از آنجا که تداوم تغییرات اقلیمی، دیم‌زارهای استان فارس را در معرض تهدیدات فزاینده‌ای قرار داده است، اتکا به پایش‌های کوتاه‌مدت پاسخگوی نیازهای مدیریتی نبوده و ضرورت انجام یک مطالعه جامع که از رویکرد بررسی مقطعی عبور کند، کاملاً مشهود است. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف پایش و مدل‌سازی سری زمانی بلندمدت (دو دهه‌ای) و تحلیل الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی کشاورزی، به دنبال یافتن پاسخ برای این پرسش کلیدی است که پاسخ تغییرات رطوبت خاک و روند نوسانات خشکسالی کشاورزی در استان فارس طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ چگونه است. برای دستیابی به این اهداف، مطالعه پیش رو با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده MODIS، ضمن بررسی شاخص TVDI با تفکیک ۱۰۰۰ متر، به ارزیابی پاسخ اکوسیستم‌های کشاورزی از طریق تحلیل همزمان تغییرات دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) می‌پردازد تا آسیب‌پذیری دیم‌زارهای استراتژیک استان را در برابر این پدیده مخرب به طور جامع تبیین نماید.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان فارس، پهناورترین استان جنوب ایران با مساحت ۱۲۲،۶۰۸ کیلومتر مربع، تنوع جغرافیایی، اقلیمی و توپوگرافی چشمگیری را در خود جای داده است که بستری غنی برای فعالیت‌های کشاورزی، به‌ویژه کشاورزی دیم، فراهم می‌کند. این استان، واقع در جنوب ایران و بین مدارهای ۲۷ درجه و ۰۲ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۴۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی است. به دلیل وسعت و تنوع توپوگرافی، اقلیم استان فارس متنوع و شامل اقلیم سرد کوهستانی در نواحی مرتفع زاگرس، اقلیم نیمه‌خشک در بخش‌های مرکزی و شرقی، و اقلیم گرم و خشک در نواحی جنوبی مجاور هرمزگان و بوشهر است. توپوگرافی استان شامل دشت‌ها، تپه ماهورها و رشته‌کوه‌های مرتفع زاگرس است که از شمال غرب به جنوب شرق کشیده شده‌اند و بلندترین منطقه استان با ارتفاع ۳۹۲۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۱۱ متر (بر اساس نقشه DEM) اختلاف ارتفاع قابل توجهی را نشان می‌دهد. این تنوع توپوگرافی به همراه خاک‌های حاصلخیز، فارس را به یکی از مناطق مهم کشاورزی کشور تبدیل کرده است که محصولاتی چون گندم، جو، ذرت، برنج، پنبه، انگور، خرما، مرکبات و پسته در آن کشت می‌شود. با توجه به محدودیت منابع آب، کشاورزی دیم، به‌ویژه کشت گندم و جو، نقشی مهم در تولید محصولات کشاورزی استان ایفا می‌کند و استفاده از روش‌های نوین آبیاری، کشت ارقام مقاوم به خشکی و مدیریت صحیح مزارع برای افزایش کارایی و بهره‌وری آن ضروری است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۱: مدل رقومی ارتفاعی استان فارس واقع در جنوب ایران (واحد: متر)

آماده

داده‌های مورد استفاده

داده‌های محصول پوشش جهانی زمین (ESA WorldCover) با تفکیک افقی ۱۰ متر از ماهواره Sentinel و شاخص‌های پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) مورد استفاده در این پژوهش، مبتنی بر محصولات MOD11A1.061 و MOD13A1.061 از سنجنده MODIS در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ می‌باشند. داده‌های NDVI دارای وضوح زمانی ۱۶ روزه و وضوح مکانی ۲۵۰ متر هستند (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ ما و همکاران، ۲۰۲۴). در حالی که داده‌های LST دارای وضوح زمانی ۱ روزه و وضوح مکانی ۱ کیلومتر می‌باشند. به منظور محاسبه شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی (TVDI)، همسان‌سازی تفکیک مکانی میان این دو محصول انجام گرفت و داده‌ها (از طریق تکنیک‌های بازنمونه‌برداری) با یکدیگر تطبیق داده شدند. هر دو محصول داده MODIS و محصول پوشش جهانی زمین از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین (GEE) دریافت شدند.

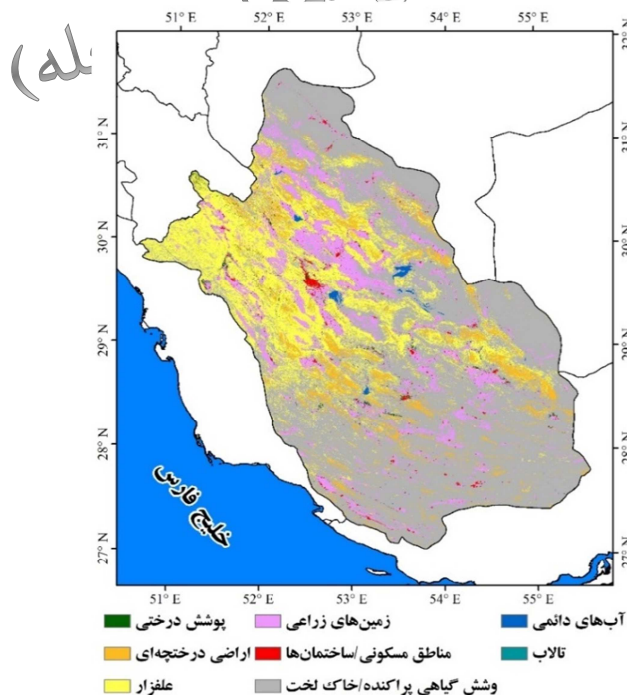
محصول پوشش جهانی زمین (World Cover)

محصول پوشش جهانی زمین با تفکیک مکانی ۱۰ متر برای سال ۲۰۲۱ که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) تحت عنوان World Cover ارائه شده است، نقشه‌ای جهانی از پوشش اراضی را با دقت ۱۰ متر برای سال ۲۰۲۱ بر اساس داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۱ و سنتینل-۲ فراهم می‌کند. این محصول شامل ۱۱ کلاس پوششی است و در چارچوب پروژه پوشش جهانی زمین ESA که بخشی از پنجمین برنامه پوشش مشاهدات زمینی (EOEP-5) آژانس فضایی اروپا است، تولید شده است. این محصول با بهره‌گیری از داده‌های سنجنش از دوری اخذشده توسط ماهواره‌های

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

سنتینل-۱ (Sentinel-1) و سنتینل-۲ (Sentinel-2) ایجاد شده است. داده‌های سنتینل-۱ که در باند راداری (SAR) فعالیت می‌کنند، امکان تصویربرداری در تمامی شرایط آب و هوایی و حتی در شب را فراهم می‌کنند و داده‌های سنتینل-۲ که در طیف نوری فعالیت می‌کنند، اطلاعات طیفی با کیفیت بالا برای طبقه‌بندی پوشش اراضی ارائه می‌دهند. ترکیب این دو نوع داده، دقت و پوشش بالایی را برای نقشه‌برداری پوشش اراضی جهانی فراهم می‌کند. این محصول شامل ۱۱ کلاس اصلی پوشش اراضی است که مهمترین انواع پوشش‌های طبیعی و مصنوعی زمین را شامل می‌شود (زانگا و همکاران، ۲۰۲۲). این طبقه‌بندی، امکان تحلیل‌های دقیق‌تر و جامع‌تری را در مطالعات مختلف مرتبط با منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی، برنامه‌ریزی شهری و روستایی، کشاورزی، مدیریت بحران و سایر زمینه‌های مرتبط فراهم می‌سازد.

نقشه طبقه‌بندی پوشش اراضی استان فارس، تهیه شده با داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۱ و سنتینل-۲ (وضوح ۱۰ متر، سال ۲۰۲۱)، پراکندگی متنوعی از کاربری‌ها را از جمله پوشش گیاهی (جنگل، درختچه‌زار و علفزار)، زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی/ساختمانی، خاک لخت/پوشش گیاهی پراکنده، و منابع آبی (آب‌های دائمی و تالاب‌ها) را نشان می‌دهد (شکل ۲). این نقشه با ترکیب داده‌های راداری و اپتیکی، امکان تحلیل دقیقی از چشم‌انداز کاربری اراضی استان را فراهم می‌کند. بخش قابل توجهی از استان تحت پوشش اراضی درختچه‌ای و علفزار، نشانگر محیطی نیمه‌خشک یا خشک است. مناطق صورتی رنگ، فعالیت کشاورزی قابل توجه را استان نشان می‌دهند که بیشتر این مناطق زمین‌های کشت دیم هستند. تمرکز مناطق مسکونی/ساختمانی، گسترش شهری و توزیع جمعیت ارائه می‌دهد. وجود تالاب‌ها، اهمیت اکولوژیکی این مناطق را برجسته می‌کند. مناطق با پوشش گیاهی پراکنده یا خاک لخت، احتمالاً نشانگر تخریب پوشش گیاهی یا مناظر طبیعی پراکنده هستند (ژو و همکاران، ۲۰۲۴).



شکل ۲: کاربری اراضی استان فارس برای سال ۲۰۲۱ میلادی بر اساس داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۱ و سنتینل-۲ با تفکیک افقی ۱۰متر

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

داده‌های شاخص‌های پوشش گیاهی (MOD13Q1 نسخه ۶/۱) سنجنده MODIS داده‌های شاخص‌های پوشش گیاهی (MOD13Q1 نسخه ۶/۱) سنجنده MODIS ماهواره TERRA با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و دوره زمانی ۱۶ روزه به عنوان یک محصول سطح ۳ تولید می‌شوند. محصول MOD13Q1 دو لایه اصلی پوشش گیاهی را ارائه می‌دهد. اولین لایه، شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که به عنوان شاخص پیوستگی با NDVI مشتق شده از سنجنده AVHRR متعلق به اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA-AVHRR) شناخته می‌شود. لایه دوم پوشش گیاهی، شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته (EVI) است که حساسیت بیشتری در مناطق با زیست‌توده بالا دارد. الگوریتم، بهترین مقدار پیکسل موجود را از بین تمام داده‌های اخذ شده در دوره ۱۶ روزه انتخاب می‌کند. معیارهای مورد استفاده عبارتند از پوشش ابر کم، زاویه دید کم و بالاترین مقدار NDVI/EVI را ارائه می‌دهد. این محصول علاوه بر لایه‌های پوشش گیاهی و دو لایه کیفیت، شامل باندهای بازتابی ۱ (قرمز)، ۲ (مادون قرمز نزدیک)، ۳ (آبی) و ۷ (مادون قرمز میانی) MODIS و همچنین چهار لایه مشاهداتی در فایل HDF است (ما و همکاران، ۲۰۲۴).

داده‌های دمای سطح زمین (MOD11A1 نسخه ۶/۱) سنجنده MODIS محصول MOD11A1 نسخه ۶/۱، دمای سطح زمین (LST) را به صورت روزانه و پیکسلی با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در شبکه‌ای به ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ کیلومتر ارائه می‌دهد. مقدار دمای هر پیکسل از محصول MOD11_L2 استخراج می‌شود. در عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۳۰ درجه، برخی پیکسل‌ها ممکن است مشاهدات متعددی داشته باشند که معیارهای آسمان صاف را برآورده می‌کنند. در این صورت، مقدار پیکسل میانگین تمام مشاهدات واجد شرایط خواهد بود. همراه با دمای سطح روز و شب، ارزیابی‌های کنترل کیفیت مربوطه، زمان‌های مشاهده، زوایای دید سمت‌الرأسی و پوشش آسمان صاف به همراه قابلیت‌های انتشار باندهای ۳۱ و ۳۲ از انواع پوشش زمین ارائه می‌شوند. در این نسخه، LST‌هایی با پوشش ابری از محصولات LST سطح ۲ و سطح ۳ حذف شده‌اند (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

روش تحقیق

شاخص خشکسالی پوشش گیاهی - دما (TVDI)

شاخص TVDI به عنوان روشی برای تخمین رطوبت خاک ارائه شده است. مقادیر آن بین صفر تا یک متغیر است (سندھولت و همکاران، ۲۰۰۲). هنگامی که پوشش گیاهی از خاک لخت تا پوشش جزئی و تا پوشش کامل تغییر می‌کند، یک شکل مثلثی یا دوزنقه‌ای بین شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST) می‌تواند ایجاد شود که فضای ویژگی VI-Ts را تشکیل می‌دهد (شکل ۳). بر اساس تحقیقات پیشین (Chen و همکاران، ۲۰۱۱)، رطوبت خاک می‌تواند براساس مقدار TVDI به پنج کلاس تقسیم شود: بسیار مرطوب (۰ تا ۰,۲)، مرطوب (۰,۲ تا ۰,۴)، نرمال (۰,۴ تا ۰,۶)، خشک (۰,۶ تا ۰,۸) و بسیار خشک (۰,۸ تا ۱). TVDI را می‌توان با استفاده از معادله (۱) برآورد کرد.

$$TVDI = (Ts - T_{smin}) / (T_{smax} - T_{smin}) \quad (1)$$

که در آن T_s دمای سطح زمین ($^{\circ}C$) در یک عنصر تصویر مشخص در منطقه مورد مطالعه است. T_{smax} حداکثر مقدار دمای سطح ($^{\circ}C$) مربوط به یک شاخص پوشش گیاهی خاص است. همچنین به عنوان لبه خشک فضای

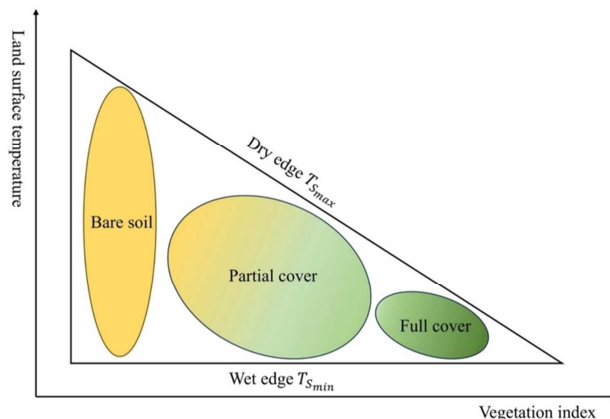
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

ویژگی VI-Ts شناخته می‌شود. T_{smin} حداقل دمای سطح (C°) است که به عنوان لبه مرطوب فضای ویژگی VI-Ts نشان داده می‌شود. لبه‌های خشک و مرطوب فضای ویژگی VI-Ts به صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند:

$$T_{smax} = a1 \times VI + b1 \quad (2)$$

$$T_{smin} = a2 \times VI + b2 \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، a1، a2 و b1 به ترتیب ضرایب معادلات برازش برای لبه‌های خشک و مرطوب هستند (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴).



شکل ۳: مدل مفهومی شاخص خشکسالی پوشش گیاهی-دما (TVDI) (منبع: ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴)؛ محور عمومی در این شکل دمای سطح زمین و محور افقی شاخص پوشش گیاهی است. مثلث داخل شکل محور افقی لبه مرطوب و محور مورب لبه خشک است. داخل شکل نیز از چپ به راست به ترتیب خاک لخت، پوشش جزئی و پوشش کامل است.

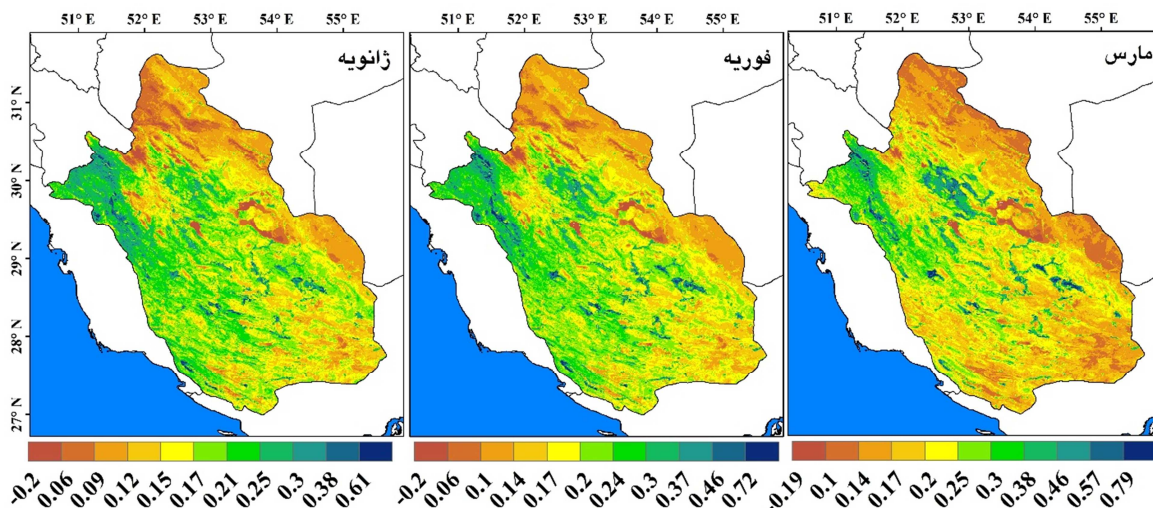
یافته‌های تحقیق

تغییرات زمانی-مکانی شاخص پوشش گیاهی فصلی در استان فارس

شکل (۴) تغییرات مکانی و زمانی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) را در استان فارس طی ماه‌های زمستانی (ژانویه، فوریه و مارس) بر اساس داده‌های دو دهه (۲۰۰۱-۲۰۲۰) نشان می‌دهد. NDVI، شاخصی پرکاربرد برای سنجش سلامت و سرسبزی پوشش گیاهی است که از داده‌های سنجش از دور محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده تفاوت بین بازتاب نور نزدیک مادون قرمز و قرمز است. یک پیشرفت زمانی مشخص در NDVI در طول سه ماه مشاهده می‌شود؛ در هر دو ماه ژانویه و فوریه، حداقل مقدار NDVI برابر با -۰٫۲ است که نشان‌دهنده پوشش گیاهی کم یا تحت تنش در این ماه‌ها است، این احتمالاً به دلیل دمای پایین‌تر و احتمالاً بارندگی کمتر در زمستان این منطقه است. با این حال، افزایش چشمگیری در NDVI در ماه مارس مشاهده می‌شود که به حداکثر مقدار ۰٫۷۹ می‌رسد و نشان‌دهنده بازیابی سریع پوشش گیاهی و رشد سریع آن است که احتمالاً به دلیل افزایش دما و افزایش بارندگی در فصل گذار از زمستان به بهار رخ می‌دهد. توزیع مکانی NDVI، ناهمگونی قابل توجهی را در سراسر استان فارس نشان می‌دهد؛ بالاترین مقادیر NDVI در قسمت شمال غربی استان، منطبق با رشته کوه‌های زاگرس، متمرکز شده است، این منطقه کوهستانی احتمالاً از بارندگی بیشتر و شرایط آب و هوایی مطلوب‌تری نسبت به سایر مناطق بهره‌مند است. برعکس، کمترین مقادیر NDVI در قسمت‌های شرقی و شمال شرقی استان، در مرز با استان‌های کرمان، یزد و اصفهان مشاهده می‌شود که به دلیل شرایط خشک و نیمه خشک خود شناخته شده‌اند و احتمالاً رشد پوشش گیاهی را محدود می‌کنند. الگوهای مشاهده شده NDVI به شدت با جغرافیا و آب و هوای استان مرتبط است؛ رشته

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

کوه‌های زاگرس با ارتفاع بالاتر و بارندگی بیشتر، از رشد پوشش گیاهی قوی‌تری پشتیبانی می‌کند، همانطور که در مقادیر بالاتر NDVI منعکس شده است. در مقابل، مناطق شرقی و شمال شرقی، که با ارتفاعات پایین‌تر و شرایط خشک‌تر مشخص می‌شوند، مقادیر کمتری را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده پوشش گیاهی پراکنده است. افزایش قابل توجه NDVI در ماه مارس در کل استان نشان‌دهنده واکنش قوی پوشش گیاهی به تغییرات فصلی دما و بارندگی است. الگوهای مشاهده شده NDVI پیامدهای مهمی برای درک پویایی اکوسیستم و مدیریت زمین در استان فارس دارد؛ تغییرات مکانی و زمانی مشخص، تأثیر آب و هوا و توپوگرافی را بر رشد پوشش گیاهی نشان می‌دهد.

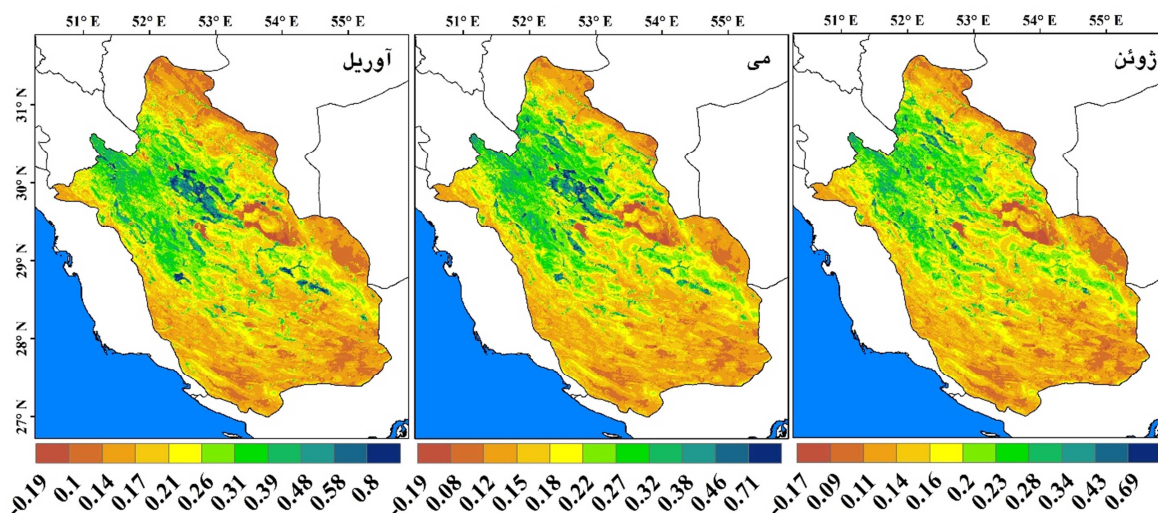


شکل ۴: تغییرات شاخص پوشش گیاهی اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) در استان فارس برای فصل زمستان بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

شکل (۵) تغییرات مکانی و زمانی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) را در استان فارس طی ماه‌های بهاری (آوریل، مه و ژوئن) نشان می‌دهد. صحت‌سنجی نقشه‌های تولیدی از طریق مقایسه با محصولات استاندارد جهانی NDVI مانند MOD13Q1 و همچنین داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی منطقه انجام گرفت که نتایج، همبستگی معناداری را تایید می‌کنند (به دلیل حجم بالای جداول و نمودارها نتایج در مقاله ارائه نشد). یک الگوی زمانی مشخص در مقادیر NDVI در طول فصل بهار مشاهده می‌شود؛ در حالی که آوریل بالاترین مقدار حداکثر NDVI یعنی ۰٫۸ را دارد که نشان‌دهنده اوج رشد و قدرت پوشش گیاهی است که احتمالاً به دلیل شرایط مساعد بهاری است، این ماه همچنین کمترین مقدار حداقل -۰٫۱۹ را نیز تجربه می‌کند که نشان‌دهنده ناهمگونی مکانی قابل توجه در سلامت پوشش گیاهی در استان فارس در طی این ماه است. با افزایش طول فصل بهار، حداکثر NDVI در ماه مه به ۰٫۷۱ و در ماه ژوئن به ۰٫۶۹ کاهش می‌یابد که احتمالاً نشان‌دهنده شروع شرایط خشک‌تر و گرم‌تر با گذار فصل به سمت تابستان است. جالب توجه است که حداقل مقادیر NDVI نیز کمی بهبود می‌یابد و از -۰٫۱۹ در آوریل به -۰٫۱۷ در ماه‌های مه و ژوئن افزایش می‌یابد که ممکن است نشان‌دهنده کاهش تدریجی وسعت مناطقی با پوشش گیاهی بسیار کم یا تحت تنش باشد زیرا شرایط در طول بهار نسبتاً مطلوب باقی می‌ماند. توزیع مکانی NDVI تغییرات قابل توجهی را در سراسر استان فارس نشان می‌دهد؛ مطابق با الگوهای NDVI زمستانی، مناطق شمال غربی، منطبق با کوه‌های زاگرس، به طور کلی مقادیر بالاتری را در مقایسه با مناطق شرقی و شمال شرقی نشان می‌دهند که

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

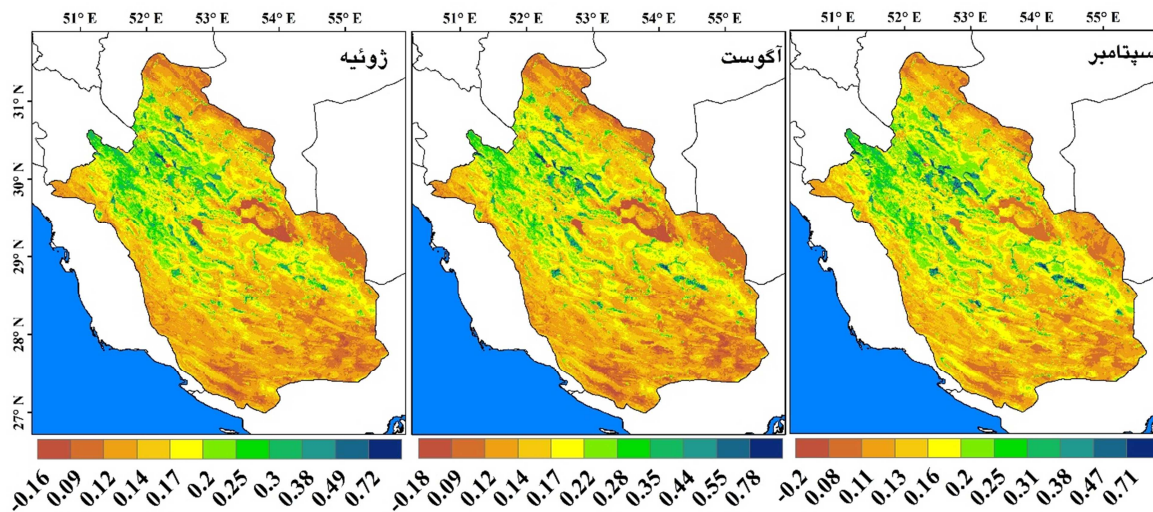
احتمالاً نشان‌دهنده تأثیر توپوگرافی و بارش کوهستانی بر رشد پوشش گیاهی است، به طوری که مناطق کوهستانی بارندگی بیشتری دریافت می‌کنند و از شرایط آب و هوایی مطلوب‌تری بهره‌مند می‌شوند. مقادیر پایین‌تر NDVI در مناطق شرقی و شمال شرقی نشان می‌دهد که این مناطق شرایط خشک‌تری را تجربه می‌کنند و از پوشش گیاهی کمتری پشتیبانی می‌کنند. الگوهای مشاهده شده NDVI در استان فارس در طول بهار اطلاعات ارزشمندی را در مورد پویایی رشد پوشش گیاهی و تأثیر عوامل محیطی ارائه می‌دهد. روند کاهشی در حداکثر NDVI از آوریل تا ژوئن، تأثیر تغییر شرایط آب و هوایی، احتمالاً مربوط به کاهش بارندگی و افزایش دما با پیشرفت فصل را برجسته می‌کند. بهبود جزئی در حداقل مقادیر NDVI در طول بهار ممکن است نشان‌دهنده مقاومت پوشش گیاهی در مناطق خاص یا واکنش تأخیری به بهبود شرایط باشد.



شکل ۵: تغییرات شاخص پوشش گیاهی اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) در استان فارس برای فصل بهار بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

تحلیل شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در استان فارس طی تابستان (ژوئیه، آگوست و سپتامبر) نشان‌دهنده کاهش تدریجی NDVI از اوج بهار به سمت تابستان به دلیل افزایش دما و کاهش بارش است (شکل ۶). در ژوئیه، حداقل NDVI حدود -0.16 و حداکثر 0.72 است که در آگوست، حداکثر به 0.78 افزایش و حداقل در حدود -0.18 باقی می‌ماند، که می‌تواند به دلیل بارش‌های پراکنده یا رطوبت ذخیره شده در خاک باشد. در سپتامبر، هم حداکثر (0.71) و هم حداقل NDVI (-0.2) کاهش می‌یابد که نشانگر تأثیر خشکی و گرمای اواخر تابستان است. مانند بهار، مناطق شمال غربی (کوه‌های زاگرس) مقادیر NDVI بالاتری نسبت به شرق و شمال شرق دارند که تأثیر توپوگرافی و بارش را بر توزیع پوشش گیاهی نشان می‌دهد. مقایسه با بهار، کاهش کلی NDVI در تابستان را نشان می‌دهد؛ حداکثر NDVI از 0.8 در آوریل به 0.78 در آگوست و حداقل NDVI از -0.19 در آوریل به -0.2 در سپتامبر کاهش می‌یابد که تأثیر شرایط نامساعد تابستان، به ویژه در مناطق خشک‌تر، را بر پوشش گیاهی برجسته می‌کند.

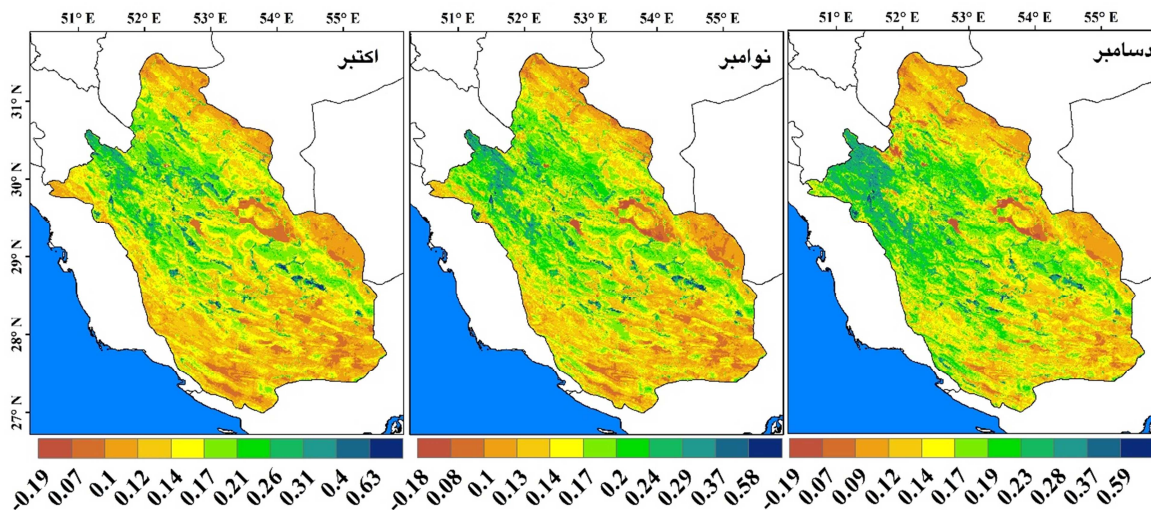
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۶: تغییرات شاخص پوشش گیاهی اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) در استان فارس برای فصل تابستان بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

تحلیل شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در استان فارس طی پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) نشان‌دهنده روند کاهشی NDVI از ابتدای پاییز تا انتهای آن است که احتمالاً به دلیل کاهش دما و کاهش بارندگی در این فصل می‌باشد (شکل ۷). در اکتبر، حداقل NDVI حدود ۰,۱۹- و حداکثر آن ۰,۶۳ است. در نوامبر، هم حداکثر NDVI (به ۰,۵۸) و هم حداقل آن (به ۰,۱۸-) اندکی بهبود می‌یابد که می‌تواند به دلیل بارش‌های پاییزی باشد. با این حال، در دسامبر، حداکثر NDVI به ۰,۵۹ می‌رسد که اندکی افزایش یافته اما همچنان کمتر از اکتبر است و حداقل آن در ۰,۱۹- باقی می‌ماند. مانند فصول قبل، مناطق شمال غربی (کوه‌های زاگرس) مقادیر NDVI بالاتری را نسبت به شرق و شمال شرق نشان می‌دهند که تأثیر توپوگرافی و بارش را بر توزیع پوشش گیاهی نشان می‌دهد. مقایسه با فصول قبل، کاهش NDVI در پاییز نسبت به تابستان و بهار را نشان می‌دهد؛ حداکثر NDVI از ۰,۷۸ در آگوست (تابستان) و ۰,۸ در آوریل (بهار) به ۰,۶۳ در اکتبر (پاییز) کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده تأثیر سرما و کاهش بارندگی پاییز بر پوشش گیاهی است. این اطلاعات برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی در استان فارس مفید است.

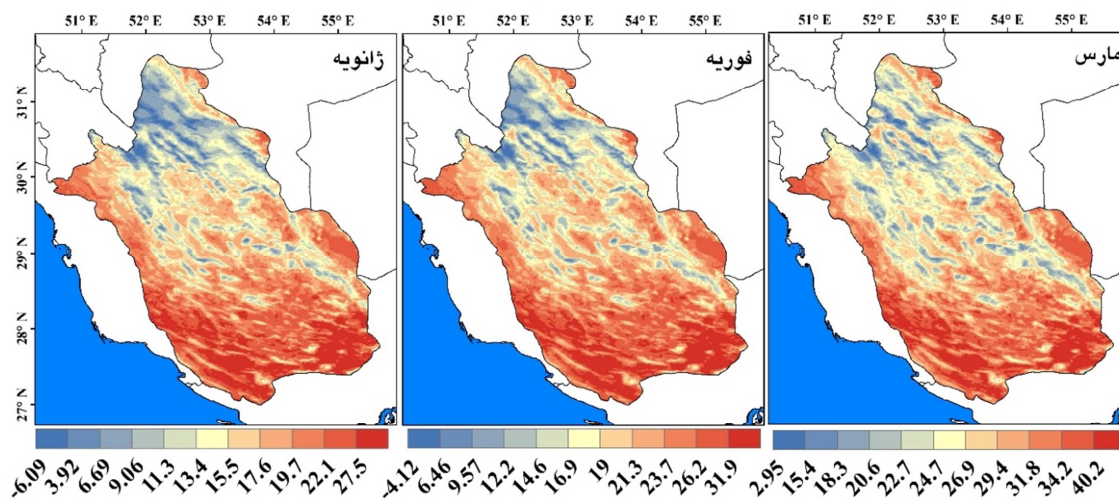
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۷: تغییرات شاخص پوشش گیاهی اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) در استان فارس برای فصل پاییز بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

تغییرات زمانی-مکانی شاخص دمای فصلی سطح زمین در استان فارس

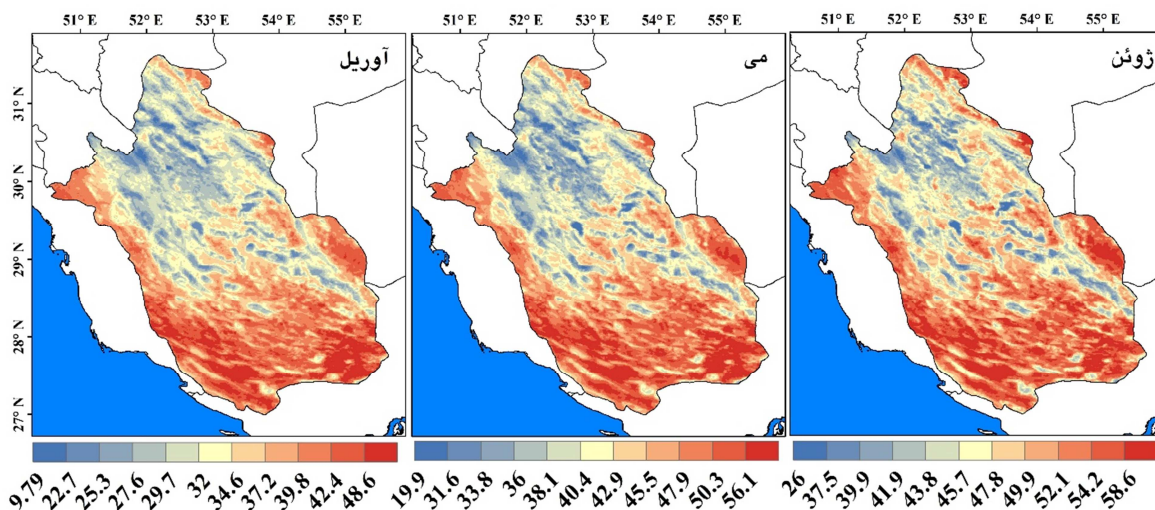
تحلیل دمای سطح زمین (LST) در استان فارس طی زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) نشان‌دهنده افزایش تدریجی LST از ژانویه تا مارس است (شکل ۸). در ژانویه، حداقل LST به $-6,09$ درجه سلسیوس در مناطق شمال غربی و حداکثر به $27,5$ درجه سلسیوس در جنوب می‌رسد. در فوریه، حداقل LST کمی افزایش می‌یابد (به حدود $-4,12$ درجه سلسیوس) و حداکثر به $31,9$ درجه سلسیوس می‌رسد. در مارس، حداقل LST به $2,95$ درجه سلسیوس و حداکثر به $40,2$ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. بیشینه LST در مناطق جنوبی و کمینه آن در مناطق شمالی (کوهستانی) استان مشاهده می‌شود که با الگوی توپوگرافی منطقه مطابقت دارد. این افزایش دما در طول زمستان با کاهش تدریجی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در همین دوره که در شکل‌های قبلی مشاهده شد، مطابقت دارد. زیرا پوشش گیاهی متراکم‌تر می‌تواند به کاهش دمای سطح زمین از طریق سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق کمک کند.



شکل ۸: تغییرات شاخص دمای سطح زمین (LST) در استان فارس برای فصل زمستان بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تحلیل دمای سطح زمین (LST) در استان فارس طی بهار (آوریل، می و ژوئن) نشان می‌دهد که LST از آوریل تا ژوئن افزایش می‌یابد. در آوریل، حداقل LST حدود ۹,۷۹ درجه سلسیوس در شمال غرب و حداکثر ۴۸,۶ درجه سلسیوس در جنوب است (شکل ۹). در می، حداقل LST به حدود ۱۹,۹ درجه سلسیوس و حداکثر به ۵۶,۱ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. در ژوئن، حداقل LST به ۲۶ درجه سلسیوس و حداکثر به ۵۸,۶ درجه سلسیوس می‌رسد. مانند زمستان، بیشینه دما در مناطق جنوبی و کمینه آن در شمال غرب (کوهستانی) استان مشاهده می‌شود. این افزایش دما در بهار با افزایش NDVI که در تصاویر NDVI بهار مشاهده شد، تا حدودی همخوانی دارد، زیرا پوشش گیاهی در بهار به اوج خود می‌رسد و با افزایش دما، فعالیت فتوسنتزی و تبخیر-تعرق نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش LST شود. در مقایسه با زمستان، هم مقادیر حداقل و حداکثر LST و هم میانگین LST در بهار به طور قابل توجهی بالاتر است. به عنوان مثال، حداقل LST در ژانویه -۶,۰۹ درجه سلسیوس بود، در حالی که در آوریل ۹,۷۹ درجه سلسیوس است. همچنین، حداکثر LST از ۲۷,۵ درجه سلسیوس در ژانویه به ۴۸,۶ درجه سلسیوس در آوریل افزایش می‌یابد. از نظر الگوی فضایی، توزیع LST در بهار مشابه زمستان است، با مناطق جنوبی دارای LST بالاتر و مناطق شمالی LST پایین‌تر، اما اختلاف دما بین این مناطق در بهار بیشتر از زمستان است.

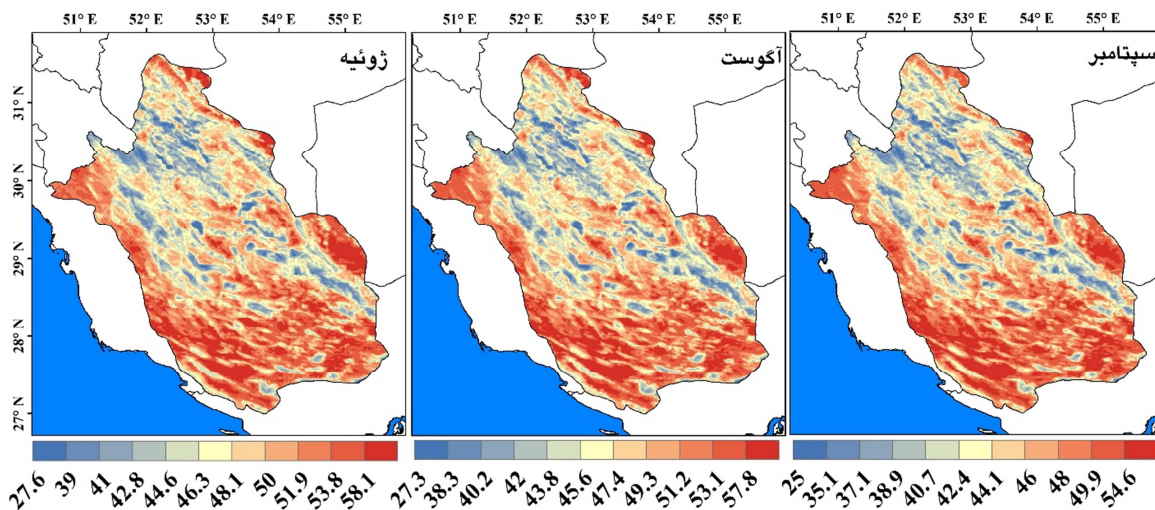


شکل ۹: تغییرات شاخص دمای سطح زمین (LST) در استان فارس برای فصل بهار بر اساس داده‌های سنجنده ماهواره MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

تحلیل دمای سطح زمین (LST) در استان فارس طی تابستان (ژوئیه، آگوست و سپتامبر) نشان می‌دهد که LST از ژوئیه تا سپتامبر اندکی کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). در ژوئیه، حداقل LST حدود ۲۷,۶ درجه سلسیوس و حداکثر آن ۵۸,۱ درجه سلسیوس است. در تحلیل LST فصل بهار، حداکثر LST در ماه می به ۵۶/۱ درجه سلسیوس می‌رسد. ثبت چنین مقادیر بالایی در این ماه، مستقیماً با پیکسل‌های مربوط به اراضی لم‌یزرع، مناطق بیابانی و خاک‌های لخت در ارتباط است. در این مناطق، به دلیل ظرفیت گرمایی پایین بافت خاک و فقدان رطوبت کافی برای ایجاد سرمایش تبخیری، سطح زمین تحت تابش مستقیم خورشید به سرعت گرم می‌شود و دمای سطح زمین (LST) اختلاف فاحشی با دمای هوا پیدا می‌کند. این روند در ماه‌های تابستان نیز ادامه دارد؛ به طوری که در آگوست، حداقل LST به ۲۷/۳ درجه سلسیوس و حداکثر آن به ۵۷/۸ درجه سلسیوس کمی کاهش می‌یابد. در نهایت، در سپتامبر حداقل LST به ۲۵ درجه سلسیوس و حداکثر آن به ۵۴/۶ درجه سلسیوس می‌رسد.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

همانند فصول قبل، بیشینه دما در مناطق جنوبی و کمینه آن در شمال غرب (کوهستانی) استان مشاهده می‌شود. این کاهش نسبی LST در اواخر تابستان می‌تواند با کاهش NDVI در همین دوره که در تصاویر NDVI تابستان مشاهده شد، مرتبط باشد، زیرا پوشش گیاهی در تابستان به دلیل گرما و کمبود بارش، دچار تنش می‌شود و کاهش پوشش گیاهی می‌تواند منجر به افزایش LST شود، اما این کاهش NDVI در اواخر تابستان ممکن است به اندازه‌ای نباشد که منجر به افزایش LST شود، به خصوص با کاهش زاویه تابش خورشید در سپتامبر. در مقایسه با بهار، هم مقادیر حداقل و حداکثر LST در تابستان بالاتر است. به عنوان مثال، حداکثر LST در ژوئن ۵۸٫۶ درجه سلسیوس بود در حالی که در جولای ۵۸٫۱ درجه سلسیوس است. همچنین، حداقل LST از ۲۶ درجه سلسیوس در ژوئن به ۲۷٫۶ درجه سلسیوس در ژوئیه افزایش می‌یابد. در مقایسه با زمستان، اختلاف بسیار زیادی در مقادیر LST وجود دارد و تابستان به مراتب گرمتر از زمستان است. از نظر الگوی فضایی، توزیع LST در تابستان مشابه بهار و زمستان است، با مناطق جنوبی دارای LST بالاتر و مناطق شمالی LST پایین‌تر، اما اختلاف دما بین این مناطق در تابستان بیشترین مقدار را در بین فصول مختلف سال دارد.

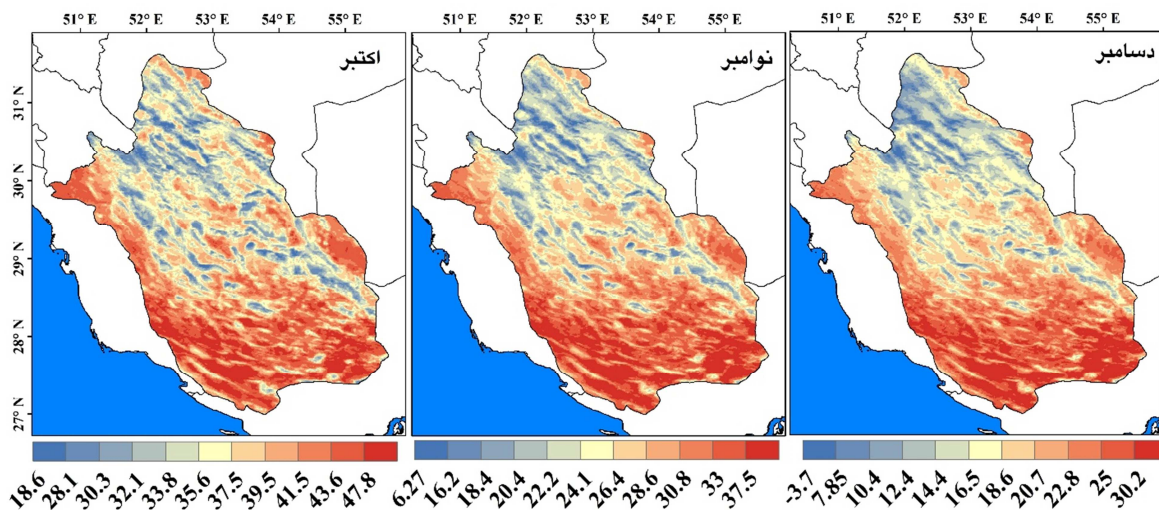


شکل ۱۰: تغییرات شاخص دمای سطح زمین (LST) در استان فارس برای فصل تابستان بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

تحلیل دمای سطح زمین (LST) در استان فارس طی پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) نشان می‌دهد که LST از اکتبر تا دسامبر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در اکتبر، حداقل LST حدود ۱۸٫۶ درجه سلسیوس و حداکثر آن ۴۷٫۸ درجه سلسیوس است (شکل ۱۱). در نوامبر، حداقل LST به ۶٫۲۷ درجه سلسیوس و حداکثر آن به ۳۷٫۵ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. در دسامبر، حداقل LST به ۳٫۷- درجه سلسیوس و حداکثر آن به ۳۰٫۲ درجه سلسیوس می‌رسد. همانند فصول قبل، بیشینه دما در مناطق جنوبی و کمینه آن در شمال غرب (کوهستانی) استان مشاهده می‌شود. این کاهش LST در پاییز می‌تواند با کاهش NDVI که در تصاویر NDVI پاییز مشاهده شد، مرتبط باشد، زیرا پوشش گیاهی در پاییز به دلیل کاهش دما و ساعات آفتابی، به تدریج فعالیت خود را کاهش می‌دهد و کاهش پوشش گیاهی، منجر به کاهش تبخیر و تعرق می‌شود و در نتیجه LST کاهش می‌یابد. در مقایسه با تابستان، هم مقادیر حداقل و حداکثر LST در پاییز به طور قابل توجهی کمتر است. به عنوان مثال، حداکثر LST از ۵۴٫۶ درجه سلسیوس در سپتامبر به ۴۷٫۸ درجه سلسیوس در اکتبر کاهش می‌یابد. همچنین، حداقل LST از ۲۵ درجه

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

سلسیوس در سپتامبر به ۱۸٫۶ درجه سلسیوس در اکتبر کاهش می‌یابد. در مقایسه با بهار، LST پاییز در ماه اکتبر مشابه ژوئن است، اما در ماه‌های بعدی پاییز، LST به طور قابل توجهی کمتر از بهار می‌شود. در نهایت، در مقایسه با زمستان، LST پاییز در ماه‌های اکتبر و نوامبر بیشتر از زمستان است اما در ماه دسامبر به مقادیر مشابه زمستان می‌رسد. از نظر الگوی فضایی، توزیع LST در پاییز مشابه فصول دیگر است، با مناطق جنوبی دارای LST بالاتر و مناطق شمالی LST پایین‌تر. این اطلاعات می‌تواند برای مدیریت منابع آب، کشاورزی، برنامه‌ریزی شهری و بررسی تأثیر تغییرات دما بر اکوسیستم‌های استان فارس مفید باشد.



شکل ۱۱: تغییرات شاخص دمای سطح زمین (LST) در استان فارس برای فصل پاییز بر اساس داده‌های سنجنده ماهواره TERRA (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

الگوی مکانی شاخص خشکسالی پوشش گیاهی-دما (TVDI)

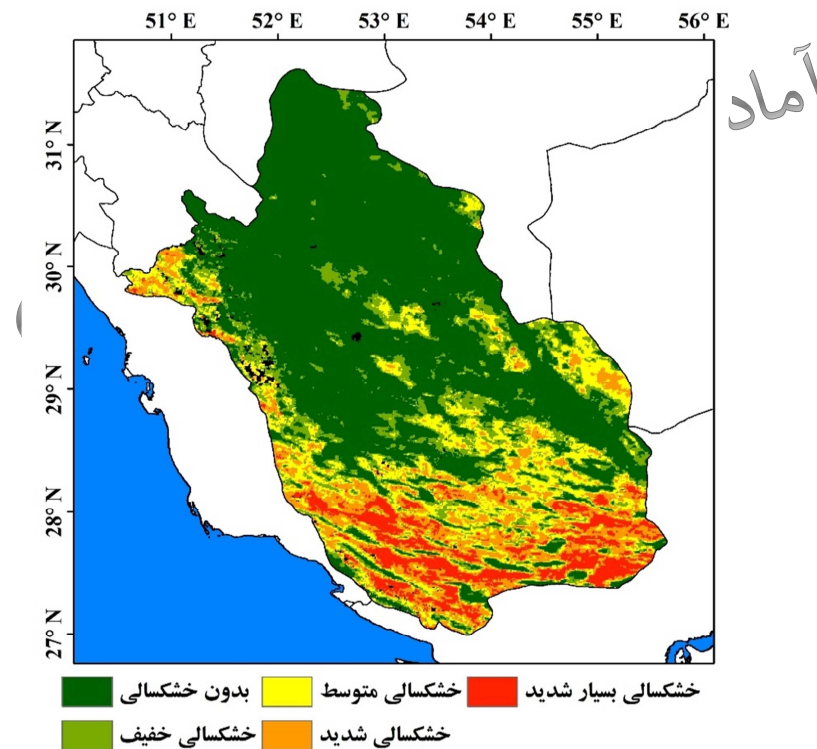
الگوی مکانی شاخص خشکسالی پوشش گیاهی-دما (TVDI) تفاوت‌های قابل توجهی را در سراسر استان فارس (شکل ۱۲) نشان می‌دهد. بر اساس نقشه، مقادیر بالای TVDI (که بیانگر میزان خشکی بیشتر است) عمدتاً در مناطق جنوبی و شرقی استان متمرکز شده است؛ بنابراین، میزان این شاخص از جنوب به شمال و از شرق به غرب روند کاهشی دارد. این توزیع مکانی با الگوی بارش و تغییرات ارتفاع در استان مطابقت خوبی دارد و نشان‌دهنده تأثیر مستقیم این عوامل بر رطوبت خاک است. به عبارت دیگر، مقادیر پایین‌تر TVDI در مناطق شمالی و غربی فارس، نشان‌دهنده رطوبت بیشتر خاک در این بخش‌ها است.

به منظور تبیین دقیق‌تر توزیع مکانی شاخص TVDI، ارزیابی عوامل محیطی مؤثر بر وضعیت رطوبتی خاک حاکی از آن است که مؤلفه‌هایی نظیر بارش، ارتفاع و دما نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات این شاخص ایفا می‌کنند. بررسی میزان اثرگذاری این متغیرها نشان می‌دهد که به‌عنوان کلیدی‌ترین عامل کنترل‌کننده شرایط خشکی در سطح استان عمل می‌کند و پس از آن، عواملی چون بارش و دما بیشترین تأثیر را بر الگوی مکانی TVDI دارند. این یافته‌ها تأیید می‌کند که ناهمگنی مشاهده‌شده در توزیع رطوبت سطحی استان فارس، وابستگی تنگاتنگی با گرادیان‌های اقلیمی و ویژگی‌های توپوگرافیک منطقه دارد.

در مقابل، شاخص TVDI در منطقه جنوبی فارس نشان‌دهنده رطوبت کمتر خاک می‌باشد. این تفاوت می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی از جمله توپوگرافی، نوع خاک، و پوشش گیاهی باشد. بر اساس طبقه‌بندی TVDI، ۱۱ درصد از

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مناطق خشکسالی شدید و ۶/۴۶ درصد دارای خشکسالی بسیار شدید هستند که عمدتاً در منطقه جنوبی فارس متمرکز شده‌اند. در مقابل، ۵۵ درصد از مناطق فاقد خشکسالی هستند ($TVDI \leq 0.6 > 0$) که عمدتاً در شمال و شتاب غربی فارس (مربوط به پوشش جنگلی) وجود دارند. این نشان می‌دهد که پوشش گیاهی نقش مهمی در حفظ رطوبت خاک ایفا می‌کند. ارائه نقشه TVDI (شکل) برای تجسم بهتر توزیع مکانی این شاخص ضروری است. با توجه به اینکه متغیرهای کلیدی مانند دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های پوشش گیاهی به طور معمول در ایستگاه‌های هواشناسی و زمینی اندازه‌گیری نمی‌شوند، در این پژوهش از محصولات آماده و استاندارد ماهواره‌ای استفاده گردید. لازم به ذکر است که این محصولات در سطح جهانی کالیبره و درستی‌سنجی شده‌اند. از آنجایی که الگوریتم‌های تولید این محصولات بر پایه داده‌های دقیق اندازه‌گیری زمینی در شبکه‌های جهانی توسعه یافته‌اند، نقشه‌های مستخرج از آن‌ها از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار هستند. با اتکا به دقت بالای این نقشه‌ها، بررسی عوامل موثر بر توزیع مکانی TVDI نشان می‌دهد که متغیرهایی همانند توپوگرافی، نوع خاک، پوشش گیاهی و الگوهای بارش به تفسیر بهتر نتایج کمک می‌کنند. این نتایج به طور کلی نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان فارس باید مورد توجه ویژه قرار گیرد.



شکل ۱۲: شاخص خشکسالی پوشش گیاهی-دما (TVDI) در استان فارس طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA

نتیجه‌گیری

این مطالعه، الگوهای زمانی و مکانی رطوبت خاک در استان فارس را از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ بر اساس مدل TVDI با استفاده از مجموعه داده‌های MODIS شبیه‌سازی و تحلیل کرد. نتایج اصلی این مطالعه به شرح زیر خلاصه می‌شود:

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تغییرات فصلی NDVI نشان‌دهنده یک چرخه سالانه مشخص است، با بیشترین مقدار در بهار (۰,۸ در آوریل) و کمترین مقدار در زمستان (۰,۲-). این الگو به وضوح تأثیر شرایط اقلیمی بر پویایی پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. دمای سطح زمین (LST) الگوی فصلی متمایزی را نشان می‌دهد، با دامنه تغییرات از ۶,۰۹- درجه سلسیوس در زمستان تا ۵۸,۶ درجه سلسیوس در تابستان. این تغییرات دمایی با توپوگرافی منطقه و پوشش گیاهی ارتباط معناداری دارد.

بررسی توزیع مکانی شاخص TVDI نشان می‌دهد که مناطق تحت تأثیر خشکسالی شدید و بسیار شدید حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از مساحت استان را شامل می‌شوند که عمدتاً در نیمه جنوبی متمرکز شده‌اند. در مقابل، بخش‌های وسیعی از استان (حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد) که شامل نواحی شمالی، غربی و مرکزی است، در وضعیت بدون خشکسالی و خشکسالی خفیف قرار دارند.

یک گرادیان شمال-جنوب مشخص در هر سه شاخص مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده تأثیر قوی توپوگرافی و الگوهای بارش بر اکوسیستم منطقه است.

میانگین TVDI در استان فارس از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۹۸ با مقدار متوسط ۰/۵۵ متغیر بود. رطوبت خاک و وضعیت خشکسالی کشاورزی طی دوره مطالعه صرفاً تغییرات و نوساناتی را نشان داد. از نظر توزیع مکانی، یک الگوی افزایشی تدریجی در میزان رطوبت خاک از جنوب به شمال استان مشاهده شد؛ به طوری که رطوبت خاک در بیشتر مناطق جنوبی استان کمتر از مناطق شمالی بود.

تغییرات مکانی رطوبت خاک در استان فارس تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله عوامل اقلیمی و غیر اقلیمی قرار دارد. این عوامل قدرت توضیحی بالایی بر دینامیک رطوبت خاک داشتند. بطور کلی تحلیل‌ها و نقشه‌های ارائه شده نشان داده است که افزایش پوشش گیاهی باعث بهبود بیشتر ظرفیت نگهداری آب می‌شود. تغییرات NDVI و پهنه‌های به دست آمده از شاخص TVDI نشان می‌دهد که پوشش گیاهی عامل غالب برای روند رطوبت خاک در استان فارس بوده است. علاوه بر این، تعاملات بین عوامل مختلف همانند ارتفاع و بارش و دورو نزدیکی به منابع رطوبتی می‌تواند دینامیک رطوبت خاک را تقویت کند. در بین این موارد، تعامل بین شاخص NDVI و ارتفاع بیشترین نقش را بر تغییرات رطوبت خاک داشت. دلیل این امر این است که ارتفاع می‌تواند بر توزیع پوشش گیاهی تأثیر بگذارد و متعاقباً بر دینامیک رطوبت خاک اثرگذار باشد. این یافته با نتایج تحقیق صفدری و همکاران (۱۴۰۲) از این حیث همخوانی دارد که آن‌ها نیز وجود ارتباط معنادار بین وضعیت پوشش گیاهی (NDVI) با عوامل محیطی و جوی (مانند دما) و تأثیر مستقیم این تعاملات بر شاخص‌های رطوبت خاک و خشکسالی (TDVI) را تایید کرده‌اند. نتایج این تحقیق در راستای تحقیق صفدری و مردانه (۱۴۰۲) تأکید می‌کند که پوشش گیاهی نقش بسیار مهمی در دینامیک رطوبت خاک دارد و با استفاده از شاخص‌هایی مانند NDVI و TVDI می‌توان به درک بهتری از این پدیده دست یافت.

در این مطالعه مشخص شد که خشکسالی کشاورزی در استان فارس به طور کلی روند افزایشی دارد و خشکسالی در جنوب استان فارس شدیدتر و در شرق و مرکز استان خفیف‌تر است که با نتایج تحلیل خشکسالی در فارس توسط رهنما و همکاران (۱۴۰۲) بر اساس SPEI مطابقت دارد.

با توجه به رابطه نزدیک بین ویژگی‌های روند و مقیاس‌های زمانی تحقیق، در آینده با افزایش طول دوره داده‌های MODIS یا با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای چندگانه برای گسترش سری‌های زمانی، قادر به انجام تحلیل خشکسالی

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

سنجش از دور طولانی‌تر خواهیم بود. این امر کمک می‌کند تا به طور عمیق‌تر، تغییرات خشکسالی را آشکار کرده و راهنمایی دقیق‌تری برای هشدار و پیشگیری از خشکسالی ارائه داد. با وجود نتایج به‌دست‌آمده، مطالعه حاضر با محدودیت‌هایی همراه است که توجه به آن‌ها برای پژوهش‌های آتی ضروری است؛ از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به عدم دسترسی به داده‌های میدانی رطوبت خاک برای اعتبارسنجی دقیق‌تر، پایین‌تر بودن وضوح مکانی داده‌های دمای سطح زمین (LST) نسبت به شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و همچنین عدم تفکیک اراضی کشاورزی دیم و آبی اشاره کرد. با رفع این محدودیت‌ها و توسعه مدل‌ها در مطالعات آینده، می‌توان هشدار و پیشگیری زودهنگام از خشکسالی را بیش از پیش بهبود بخشید، پیشگیری و کاهش بلایا را ارتقا داد، تولید مواد غذایی و توسعه پایدار کشاورزی را تضمین نمود و در نهایت از ثبات اجتماعی و توسعه اقتصادی حمایت کرد.

منابع

- خبرگزاری مهر (۱۴۰۰). خسارت بیش از ۷ هزار میلیارد تومانی کشاورزی فارس از خشکسالی، دسترسی به خبر ۱۴۰۳، شماره خبر ۵۴۲۴۸۸۵، آدرس سایت <https://www.mehrnews.com>
- دهقانی تفتی، احمد؛ علی، زارع، محمد؛ حسینی، سید زین العابدین؛ عربی علی آباد، فهیمه. (۱۳۹۸). تعیین ارتباط روند تغییرات خشکسالی با عناصر اقلیمی در دشت یزد-اردکان. مدیریت بیابان، ۷(۱۳)، ۱-۱۴.
- <https://doi.org/10.22034/jdmal.2019.36528>
- رضایی، جبار؛ جلالی، مسعود؛ علی‌کره، حمید؛ محمودی، پیمان. (۱۴۰۴). واکاوی پویایی پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز کشور ایران در ارتباط با شرایط خشکسالی. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶(۲۳)، ۲۱-۴۰.
- رهنما، سمیرا؛ شهیدی، علی؛ یعقوب زاده، مصطفی؛ مهران، علی‌اکبر. (۱۴۰۲). بررسی روند خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPEI اصلاح شده و MSPI در مقیاس‌های زمانی مختلف (مطالعه موردی: استان فارس). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴(۱۳)، ۸۹-۱۰۴.
- <https://doi.org/10.30488/cr.2023.393409.1125>
- رفوف، مجید؛ اکبری مجد، امین. (۱۴۰۴). پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص SAVI در مناطقی با داده‌های محدود هواشناسی (مطالعه موردی: اراضی پایاب سد سرخاب اردبیل). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶(۲۲)، ۶۳-۸۰.
- شاملو، نازیلا؛ فریدحسینی، علیرضا؛ علیزاده، امین؛ امیدوار، جواد. (۱۳۹۷). بررسی خشکسالی با استفاده از دو شاخص خشکی دما-گیاه TVDILAI و TVDINDVI مبتنی بر تصاویر سنجنده MODIS در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۳)، ۵۲۵-۵۳۵.
- شریفی پیچون، محمد؛ بهزادی، زهرا؛ محمدی، فروغ. (۱۴۰۱). ارزیابی زمانی - مکانی روند خشکسالی و اثرات آن بر تغییرات پوشش گیاهی در استان فارس. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۳(۵۰)، ۴۰-۵۷.
- <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.375644.1000>
- صفدری مولان، امین؛ مردانه، عادل. (۱۴۰۲). بررسی روند تغییرات خشکسالی با شاخص خشکی دمایی - پوشش گیاهی (TVDI) و ارتباط آن با عوامل جوی (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیاه‌کوه). آب و توسعه پایدار، ۱۰(۳)، ۹۹-۱۰۸.
- <https://doi.org/10.22067/jwsd.V10I3.2305-1243>
- عبیات، محمد؛ عبیات، مصطفی؛ عبیات، مرتضی. (۱۴۰۱). برآورد رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: شهرستان شوشتر). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۵)، ۹۵۷-۹۷۰.
- <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341981.669251>
- فلامرزی، یاشار. (۱۴۰۲). تحلیل روند نقطه‌ای و منطقه‌ای بارش در استان فارس در دوره ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۲(۵۳)، ۵۷-۸۰.
- قربانی، خلیل؛ ولی زاده، اسماعیل. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور در پایش خشکسالی در پوشش‌های گیاهی مختلف در شهرستان گرگان. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶(۲۴)، ۲۵-۴۰.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- نیک پی، حسین؛ مؤمنی، مهدی. (۱۳۹۸). تأثیر پهنه بندی اقلیمی و ارتفاعی بر همبستگی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور با داده بارشی و معرفی شاخص‌های محلی. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۱(۲)، ۴۷-۶۲.
<https://doi.org/10.52547/gisj.11.2.47>
- Abiyat, M., Abiyat, M. and Abiyat, M. (2022). Estimation of Soil Surface Moisture in Agricultural Lands Using Satellite Images and Remote Sensing Indicators (Case Study: Shushtar County). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(5), 957-970. doi: 10.22059/ijswr.2022.341981.669251 [In Persian]
- Chatterjee, S., Desai, A. R., Zhu, J., Townsend, P. A., & Huang, J. (2022). Soil moisture is an essential component for delineating and forecasting agricultural drought rather than meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112833. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112833>
- Chen, J., Wang, C., Jiang, H., Mao, L., & Yu, Z. (2011). Estimating soil moisture using Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain. *International Journal of Remote Sensing*, 32(4), 1165-1177. <https://doi.org/10.1080/01431160903527421>
- Cheng, X., Xu, Y., Chen, J., & Liu, Q. (2023). The impact of climatic conditions, human activities, and catchment characteristics on the propagation from meteorological to agricultural and hydrological droughts in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(24), e2023JD039735. <https://doi.org/10.1029/2023JD039735>
- Cheng, Y. S., Lu, J. R., & Yeh, H. F. (2024). Multi-Index Drought Analysis in Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Environments*, 11(11), 233. <https://doi.org/10.3390/environments11110233>
- Dehghani Tafti, Zare, M., Hosseini, S. Z., and Arabi Aliabad, F. (2019). Investigating the Trend of Drought Changes and Its Relation with Climatic Elements. *Desert Management*, 7(13), 1-14. doi: 10.22034/jdmal.2019.36528 [In Persian]
- Du, L., Song, N., Liu, K., Hou, J., Hu, Y., Zhu, Y., ... & Guo, Y. (2017). Comparison of two simulation methods of the temperature vegetation dryness index (TVDI) for drought monitoring in semi-arid regions of China. *Remote Sensing*, 9(2), 177. <https://doi.org/10.3390/rs9020177>
- Duan, S. B., Li, Z. L., & Leng, P. (2017). A framework for the retrieval of all-weather land surface temperature at a high spatial resolution from polar-orbiting thermal infrared and passive microwave data. *Remote Sensing of Environment*, 195, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.008>
- falamarzi, Y. (2023). Analysis of point and regional trend of precipitation in Fars province in the period from 1990 to 2021. *Journal of Climate Research*, 1402(53), 57-80. [In Persian]
- Holzman, M. E., Rivas, R., & Piccolo, M. C. (2014). Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 181-192. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.12.006>
- Jia, B., Liu, J., Xie, Z., & Shi, C. (2018). Interannual variations and trends in remotely sensed and modeled soil moisture in China. *Journal of Hydrometeorology*, 19(5), 831-847. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0003.1>
- Khosravi, Y., Homayouni, S., & Ouada, T. B. (2024). Spatio-temporal evaluation of MODIS temperature vegetation dryness index in the Middle East. *Ecological Informatics*, 84, 102894. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102894>
- Kim, H., Zohaib, M., Cho, E., Kerr, Y. H., & Choi, M. (2017). Development and assessment of the sand dust prediction model by utilizing microwave-based satellite soil moisture and reanalysis datasets in East Asian desert areas. *Advances in Meteorology*, 2017(1), 1917372. <https://doi.org/10.1155/2017/1917372>
- Li, Y., Wang, X., Wang, F., Feng, K., Li, H., Han, Y., & Chen, S. (2024). Temporal and Spatial Characteristics of Agricultural Drought Based on the TVDI in Henan Province, China. *Water*, 16(7), 1010. <https://doi.org/10.3390/w16071010>
- Luo, D., & Li, L. (2023). Spatiotemporal evolution analysis and prediction of drought in Henan Province based on standardized precipitation evapotranspiration index. *Water Supply*, 23(1), 410-427. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.443>
- Ma, Y., He, T., McVicar, T. R., Liang, S., Liu, T., Peng, W., Song, D.-X., & Tian, F. (2024). Quantifying how topography impacts vegetation indices at various spatial and temporal scales. *Remote Sensing of Environment*, 312, Article 114311. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114311>
- McColl, K. A., Alemohammad, S. H., Akbar, R., Konings, A. G., Yueh, S., & Entekhabi, D. (2017). The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10(2), 100-104. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017NatGe..10.100M/doi:10.1038/ngeo2868
- Nikpey, H. and Momeni, M. (2019). Effect of climatic zoning and altitude zoning on the correlation of remote sensing drought indices with Precipitation data, and introducing local indicators. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 11(2), 47-62. doi: 10.52547/gisj.11.2.47 [In Persian]
- Quille-Mamani, J. A., Huayna, G., Pino-Vargas, E., Chucuya-Mamani, S., Vera-Barrios, B., Ramos-Fernandez, L., ... & Cabrera-Olivera, F. (2024). Spatio-Temporal Evolution of Olive Tree Water Status Using Land Surface Temperature and Vegetation Indices Derived from Landsat 5 and 8 Satellite Imagery in Southern Peru. *Agriculture*, 14(5), 662. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050662>
- Rahnama, S., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., and Mehran, A. (2023). Investigating the drought trend using the modified SPEI and MSPI indices in different time scales (case study: Fars province). *Climate Change Research*, 4(13), 89-104. doi: 10.30488/ccr.2023.393409.1125 [In Persian]
- Safdari Molan, A. and Mardaneh, A. (2023). Investigating the Trend of Drought Changes with Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) and Its Relationship with Atmospheric Factors (Case Study: Siah Kooch Watershed). *Journal of Water and Sustainable Development*, 10(3), 99-108. doi: 10.22067/jwsd.V10I3.2305-1243 [In Persian]

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
- Shamloo, N., Faridhosseini, A. R., Alizadeh, A., and Omidvar, J. (2018). Drought monitoring using Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) from MODIS satellite images on a regional scale. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(3), 525-535. [In Persian]
- Sharifi Paichoon, M., Behzadi, Z., and Mohamadi, F. (2023). Temporal-spatial evaluation of the drought process and its effects on vegetation changes in Fars province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 13(50), 57-40. doi: 10.22034/jargs.2023.375644.1000 [In Persian]
- Stefanidis, S., Rossiou, D., & Proutsos, N. (2023). Drought severity and trends in a Mediterranean oak forest. *Hydrology*, 10(8), 167. <https://doi.org/10.3390/hydrology10080167>
- Wang, C., Qi, S., Niu, Z., & Wang, J. (2004). Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5), 671-679. <https://doi.org/10.5589/m04-029>
- Wang, W., Liang, S., & Meyers, T. (2008). Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 623-635. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.024>
- Wei, W., Liu, T., Zhou, L., Wang, J., Yan, P., Xie, B., & Zhou, J. (2023). Drought-related spatiotemporal cumulative and time-lag effects on terrestrial vegetation across China. *Remote Sensing*, 15(18), 4362. <https://doi.org/10.3390/rs15184362>
- Xu, P., Tsendbazar, N.-E., Herold, M., de Bruin, S., Koopmans, M., Birch, T., Carter, S., Fritz, S., Lesiv, M., Mazur, E., Pickens, A., Potapov, P., Stolle, F., Tyukavina, A., Van De Kerchove, R., & Zanaga, D. (2024). Comparative validation of recent 10 m-resolution global land cover maps. *Remote Sensing of Environment*, 311, Article 114316. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114316>
- Yu, H., Zhang, Q., Xu, C. Y., Du, J., Sun, P., & Hu, P. (2019). Modified palmer drought severity index: model improvement and application. *Environment international*, 130, 104951. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104951>
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., ... & Arino, O. (2022). ESA WorldCover 10 m 2021 v200. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>
- Zheng, J., Jin, X., Li, Q., Lang, J., & Yin, X. (2024). Soil moisture variation and affecting factors analysis in the Zhangjiakou-Chengde district based on modified temperature vegetation dryness index. *Ecological Indicators*, 168, 112775. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112775>

آماده انتشار بدون شماره مجله