

Research Paper

Spatiotemporal analysis of drought in Iran's Hyrcanian Forests using remote sensing-based vegetation and thermal indices

Hadi Beygi Heidarlou^{*1} and Melina Gholamzadeh Bazarbash²

1,*- (Corresponding author) Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (h.beygi@urmia.ac.ir)

2- B.Sc. in Natural Resources Engineering-Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (melina.bazarbash@gmail.com)

Received: 16 September 2025

Revised: 23 October 2025

Accepted: 26 October 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Drought is one of the most significant global climatic hazards, exerting wide-ranging impacts on the water cycle, agriculture, and ecosystems. The Hyrcanian forests of northern Iran, characterized by high biodiversity and critical roles in carbon storage and water regulation, are particularly vulnerable to drought and climate change. Due to the complexity and high costs of field monitoring, the use of remote sensing data and vegetation and thermal indices provides an effective means to assess drought. This study employs MODIS and Landsat data, integrating multiple vegetation and thermal indices, to analyze the spatiotemporal trends of drought in the Hyrcanian forests during 2000 and 2024, aiming to identify drought-sensitive areas and changes in ecosystem stability.

Material and Methods: Satellite data from Landsat and MODIS, including NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), VCI (Vegetation Condition Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index), and Land Surface Temperature (LST), were utilized to assess vegetation health, surface moisture, and the severity of water stress. Data were preprocessed in Google Earth Engine, and 1,678 randomly sampled points with a minimum distance of one kilometer were selected for index extraction. Relationships between LST and vegetation indices were analyzed using Pearson correlation and collinearity analyses to accurately evaluate the impact of environmental stressors on vegetation.

Results: Analysis of vegetation and drought indices in the Hyrcanian forests between 2000 and 2024 indicated a marked decline in vegetation density and health. Annual mean NDVI decreased from 0.642 to 0.498, VCI from 68.42 to 54.37, SAVI from 0.527 to 0.412, and NDWI from 0.214 to -0.067. Concurrently, TVDI increased from 0.412 to 0.536, and maximum LST rose from 47.60°C to 53.08°C, indicating intensified drought and heat stress. Due to strong collinearity among NDVI, SAVI, and NDWI, NDVI and SAVI were removed from the model while NDWI was retained due to its relevance for moisture assessment. Correlation analysis showed that LST had a very strong positive correlation with TVDI in 2000 ($r = 0.948$), which decreased to a weak correlation in 2024 ($r = 0.248$). Additionally, LST exhibited significant negative correlations with NDWI ($r = -0.076$ and $r = -0.127$) and EVI ($r = -0.002$ and $r = -0.244$), reflecting the substantial impact of drought and heat stress on vegetation health and moisture in the Hyrcanian forests.

Conclusion: This study highlights the importance of vegetation and thermal indices for assessing environmental stress and drought in the Hyrcanian forests. Rising LST and intensifying drought stress have significantly affected vegetation health and functionality, emphasizing the need for continuous and comprehensive monitoring. The use of a multi-index approach, incorporating NDWI and TVDI as moisture- and drought-sensitive indicators, allows for more precise drought detection and management in humid forest ecosystems. Special attention to more vulnerable areas, such as the eastern (particularly Golestan Province) and southern sections of the Hyrcanian forests, is essential for conservation and management planning. These approaches can play a key role in developing effective policies to address climate challenges and sustainably protect sensitive forests.

Keywords: Ecological stress, Land Surface Temperature (LST), Vegetation indices, Water and heat stress.

How to Cite This Article: Beygi Heidarlou, H., & Gholamzadeh Bazarbash, M. (2026). Spatiotemporal analysis of drought in Iran's Hyrcanian Forests using remote sensing-based vegetation and thermal indices. *Forest Research and Development*, 11(4), 557-581. DOI: [10.30466/jfrd.2025.56546.1780](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56546.1780)



Copyright ©2024 Beygi Heidarlou & Gholamzadeh Bazarbash Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

تحلیل مکانی-زمانی خشکسالی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از شاخص‌های گیاهی-حرارتی سنجش از دور

هادی بیگی حیدرلو*^۱ و ملینا غلامزاده بازارباش^۲

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (h.beygi@urmia.ac.ir)

۲- کارشناسی مهندسی منابع طبیعی-جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (melina.bazarbash@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: خشکسالی یکی از مخاطرات اقلیمی مهم جهانی است که تأثیرات گسترده‌ای بر چرخه آب، کشاورزی و بوم‌سازگان‌ها دارد. جنگل‌های هیرکانی شمال ایران، با تنوع زیستی زیاد و نقش مهم در ذخیره کربن و تنظیم چرخه آب، در برابر خشکسالی و تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر هستند. به دلیل پیچیدگی و هزینه‌های زیاد نظارت بر این جنگل‌ها، استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی و حرارتی ابزاری مؤثر برای ارزیابی خشکسالی فراهم آورده است. این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های MODIS و Landsat و ترکیب چند شاخص پوشش گیاهی و حرارتی، به تحلیل روند مکانی-زمانی خشکسالی در جنگل‌های هیرکانی طی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ پرداخته است تا مناطق حساس به خشکسالی و تغییرات پایداری این بوم‌سازگان را شناسایی کند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای Landsat و MODIS شامل شاخص‌های NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)، VCI (Vegetation Condition Index)، EVI (Enhanced Vegetation Index)، SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)، NDWI (Normalized Difference Water Index)، TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) و دمای سطح زمین (Land Surface Temperature - LST) برای سنجش سلامت پوشش گیاهی، رطوبت سطحی و شدت تنش‌های آبی مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌ها در محیط Google Earth Engine پیش‌پردازش شدند و ۱۶۷۸ نقطه نمونه‌برداری تصادفی با کمینه فاصله یک کیلومتر انتخاب و شاخص‌ها برای هر نقطه استخراج شدند. روابط بین دمای سطح زمین و شاخص‌های پوشش گیاهی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل‌های هم‌خطی بررسی شد تا تأثیر تنش‌های محیطی بر پوشش گیاهی به‌طور دقیق ارزیابی شود.

یافته‌ها: تحلیل شاخص‌های پوشش گیاهی و خشکسالی در جنگل‌های هیرکانی بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ نشان‌دهنده کاهش قابل توجه تراکم و سلامت پوشش گیاهی است؛ میانگین سالانه NDVI از ۰/۶۴۲ به ۰/۴۹۸، VCI از ۶۸/۴۲ به ۵۴/۳۷، SAVI از ۰/۵۲۷ به ۰/۴۱۲ و NDWI از ۰/۲۱۴ به ۰/۰۶۷- کاهش یافتند. همزمان، شاخص TVDI از ۰/۴۱۲ به ۰/۵۳۶ و میانگین بیشینه دمای سطح زمین از ۴۷/۶۰ به ۵۳/۰۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که نشان‌دهنده تشدید تنش‌های خشکی و گرمایی است. به دلیل هم‌خطی شدید میان NDVI، SAVI و NDWI، دو شاخص NDVI و SAVI از مدل حذف شدند و NDWI به دلیل اهمیتش در بررسی رطوبت سطح حفظ شد. تحلیل همبستگی‌ها نشان داد که دمای سطح زمین با شاخص TVDI در سال ۱۳۷۹ همبستگی مثبت و بسیار قوی ($r = ۰/۹۴۸$) دارد، در حالی که در سال ۱۴۰۳ این همبستگی کاهش یافته و در سطحی ضعیف ($r = ۰/۲۴۸$) مشاهده شد. همچنین دمای سطح زمین با شاخص‌های NDWI ($r = -۰/۰۷۶$) در سال ۱۳۷۹ و ($r = -۰/۱۲۷$) در سال ۱۴۰۳ و EVI ($r = -۰/۰۰۲$) در سال ۱۳۷۹ و ($r = -۰/۲۴۴$) در سال ۱۴۰۳ همبستگی منفی و معنی‌داری نشان داد، که این روابط نمایانگر تأثیر قابل توجه تنش‌های خشکی و حرارتی بر کاهش سلامت و رطوبت پوشش گیاهی جنگل‌های هیرکانی است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش اهمیت استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و حرارتی را در ارزیابی تنش‌های محیطی و خشکسالی در جنگل‌های هیرکانی نشان داد. افزایش دمای سطح زمین و تشدید تنش‌های خشکی، اثرات منفی زیادی بر سلامت و کارایی زیستی پوشش گیاهی داشته‌اند که ضرورت پایش مستمر و جامع این شاخص‌ها را برجسته می‌کند. به‌کارگیری رویکرد چندشاخصی شامل NDWI و TVDI، به‌عنوان شاخص‌های حساس به رطوبت و تنش خشکی، امکان تشخیص دقیق‌تر و مدیریت بهینه‌تر خشکسالی در بوم‌سازگان‌های جنگلی مرطوب هیرکانی را فراهم آورد. همچنین، توجه ویژه به نواحی حساس‌تر مانند بخش‌های شرقی (به‌طور خاص استان گلستان) و جنوبی جنگل‌های هیرکانی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریتی ضروری است. این رویکردها می‌توانند نقش کلیدی در تدوین سیاست‌های مؤثر برای مقابله با چالش‌های اقلیمی و حفاظت پایدار جنگل‌های حساس ایفا کنند.

واژه‌های کلیدی: تنش‌های بوم‌شناسی، دمای سطح زمین، شاخص‌های پوشش گیاهی، تنش آبی و گرمایی.

خاک و تنوع فیزیولوژیکی گونه‌های گیاهی، دشوار و پرهزینه است. در این زمینه، استفاده از داده‌های سنجش از دور به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی روندهای مکانی و زمانی خشکسالی، مورد توجه قرار گرفته است (Shahzad et al., 2023). شاخص‌های گیاهی مانند شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (Vegetation Condition Index - VCI) قادرند تغییرات فعالیت فتوسنتزی را در پاسخ به کمبود آب نشان دهند؛ درحالی‌که شاخص‌های حرارتی مانند دمای سطح زمین (Land Surface Temperature - LST) و شاخص خشکی پوشش گیاهی-دما (Temperature Vegetation Dryness Index - TVDI Alazba et al., 2025) تنش آبی را آشکار می‌سازند.

LST به‌عنوان شاخص کلیدی در پایش خشکسالی شناخته می‌شود، زیرا کاهش رطوبت خاک و تنش آبی سبب افزایش دمای سطح زمین می‌شود (Gelata et al., 2023). افزایش LST بازتاب‌دهنده تنش حرارتی است که در ترکیب با شاخص‌های پوشش گیاهی، دقت تشخیص شدت و گستره خشکسالی را افزایش می‌دهد (Rafiei Sardooi et al., 2021). هرچند عواملی مانند پوشش زمین و شرایط جوی می‌توانند بر دقت اندازه‌گیری LST تأثیرگذار باشند، استفاده همزمان از این شاخص در کنار شاخص‌های گیاهی، ابزاری قوی برای تحلیل دقیق‌تر خشکسالی فراهم می‌کند.

با این وجود، در جنگل‌های مرطوب و متراکم، عواملی همچون اشباع NDVI، سایه‌اندازی و اثرات جوی ممکن است دقت تحلیل‌ها را کاهش دهند (Tian et al., 2025). از این رو، ترکیب شاخص‌های گیاهی و حرارتی، با بهره‌گیری از مزایای هرکدام، می‌تواند

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در سطح جهانی است که تأثیرات گسترده‌ای بر چرخه آب، کشاورزی، منابع طبیعی و ساختار بوم‌سازگان‌ها دارد (Yang et al., 2021). این پدیده که ناشی از کاهش غیرعادی و بلندمدت بارش همراه با تغییرات دما است، می‌تواند به شکل‌های مختلفی مانند خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی بروز کند (Xu et al., 2023). در بوم‌سازگان‌های جنگلی، خشکسالی علاوه بر کاهش رشد و فعالیت فتوسنتزی گیاهان، موجب زوال درختان، کاهش ذخیره کربن، تغییر در ساختار گونه‌ای و در شرایط شدید، سبب مرگ‌ومیر گسترده می‌شود (Liu et al., 2023). در این بوم‌سازگان‌های حساس، استمرار یا شدت زیاد خشکسالی می‌تواند از آستانه‌های تاب‌آوری زیستی فراتر رفته و آشفتگی‌های جدی در ساختار و عملکرد پایدار بوم‌سازگان ایجاد کند (Hoover et al., 2021).

در سال‌های اخیر، شواهد متعددی مبنی بر افزایش فراوانی و شدت خشکسالی در شمال ایران منتشر شده است (Nasiri et al., 2023a; Hadinezhad et al., 2025). این روند به‌ویژه در جنگل‌های هیرکانی که به‌عنوان میراث جهانی یونسکو ثبت شده‌اند، نگرانی‌های جدی ایجاد کرده است. جنگل‌های هیرکانی با دارا بودن تنوع زیستی فراوان، نقش کلیدی در ذخیره‌سازی کربن، تنظیم چرخه آب و تأمین خدمات بوم‌شناختی منطقه دارند (Hamidi et al., 2023). تغییر الگوهای بارش و افزایش دما می‌تواند تعادل بوم‌شناسی این بوم‌سازگان‌های مرطوب و متراکم را تهدید کرده و پایداری آنها را در برابر تغییرات اقلیمی کاهش دهد.

پایش خشکسالی در این جنگل‌ها با روش‌های میدانی مرسوم، به‌دلیل تراکم زیاد تاج‌پوش، رطوبت

است، (Das et al., 2023) با بهره‌گیری از داده‌های Landsat در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، تأثیر خشکسالی بر تنوع زیستی، زیستگاه گونه‌های وحشی و عملکرد بوم‌سازگان را بررسی کردند. یافته‌های این پژوهش کاهش شاخص‌های گیاهی همراه با افزایش LST را نشان داد که رابطه منفی میان NDVI و LST، تأییدی بر تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی است.

مرور پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌های خشکسالی در ایران به مناطق خشک و نیمه‌خشک یا اراضی کشاورزی متمرکز بوده‌اند (Farrokhzadeh et al., 2018; Savari et al., 2024). در حالی که پژوهش‌های محدود انجام شده در جنگل‌های هیرکانی، بیشتر به دوره‌های زمانی کوتاه یا استفاده از یک شاخص منفرد محدود بوده‌اند. در نتیجه، شناخت پویایی بلندمدت تنش‌های اقلیمی و ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر شواهد علمی در این بوم‌سازگان‌ها هنوز با محدودیت مواجه است. به‌عنوان نمونه، (Farrokhzadeh et al., 2018) رابطه همبستگی میان شاخص‌های پوشش گیاهی (EVI Enhanced Vegetation Index) و NDVI با شاخص خشکسالی هواشناسی (Standardized Precipitation Index) SPI را در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های MODIS تحلیل کردند و نشان دادند که همبستگی معناداری بین SPI و شاخص‌های پوشش گیاهی وجود دارد.

بر این اساس، این پژوهش با هدف پرکردن این خلأ، به تحلیل روندهای مکانی-زمانی خشکسالی محیط‌زیستی در جنگل‌های هیرکانی طی دوره ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ می‌پردازد. نوآوری اصلی این بررسی در ترکیب همزمان شاخص‌های گیاهی (VCI، EVI، NDVI)، (SAVI و NDWI) و حرارتی (LST و TVDI) با استفاده از داده‌های Landsat و MODIS است که دیدی

تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از پویایی خشکسالی ارائه دهد.

ارزیابی خشکسالی معمولاً بر اساس مقدار کمبود آب، بازه‌های زمانی مختلف و تقسیم‌بندی مناطق با ویژگی‌های مشابه اقلیمی یا طبیعی انجام می‌شود (Hu et al., 2019). خشکسالی به‌عنوان پدیده‌ای تدریجی و پنهان شناخته می‌شود که اثرات آن در طولانی‌مدت مشخص می‌شود و کنترل آن دشوار است (Haile et al., 2020). همچنین، کمبود داده‌های جغرافیایی دقیق و اطلاعات قابل اعتماد از چالش‌های اصلی در ارزیابی خشکسالی مبتنی بر داده‌های اقلیمی است (Mullapudi et al., 2023). با این وجود، شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف می‌توانند در بازه‌های زمانی و مناطق مشخص، کارآمدی مناسبی در پایش خشکسالی داشته باشند (Hoque et al., 2020; Wei et al., 2022).

برای نمونه، (Orimoloye et al., 2019) نشان داده‌اند که تحلیل پوشش گیاهی سبز با استفاده از شاخص‌های متعددی مانند شاخص تفاضل نرمال‌شده آب (Normalized Difference Water Index - NDWI)، شاخص کل پوشش گیاهی تعدیل‌شده بر اساس خاک (Soil-Adjusted Total Vegetation Index - SATVI)، شاخص خشکی نرمال‌شده خشکسالی (Normalized Difference Drought Index - NDDI)، LST، NDVI، VCI و TVDI می‌تواند ابزار موثری برای سنجش خشکسالی باشد. افزون بر این، داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای امکان درک دقیق‌تر کاهش سطح منابع طبیعی (Kogan, 2016)، پایش سلامت بوم‌سازگان‌ها (Beygi et al., 2024) و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تأثیرگذار بر خاک، منابع آب و تنوع زیستی را فراهم می‌کنند (Nila et al., 2019). همچنین، در شمال‌غرب بنگلادش که منطقه‌ای خشک و مستعد خشکسالی

و گلستان در شمال ایران است (شکل ۱). این ناحیه با وسعتی حدود ۵۸۷۰۰ کیلومتر مربع، بخش عمده‌ای از جنگل‌های هیرکانی را در بر می‌گیرد. محدوده جغرافیایی این منطقه از عرض جغرافیایی $35^{\circ}76'$ تا $45^{\circ}38'$ شمالی و از طول جغرافیایی $56^{\circ}48'$ تا $56^{\circ}30'$ شرقی امتداد دارد و از سطح دریای خزر تا ارتفاعات البرز، از جمله قله ۵۶۰۹ متری دماوند، گسترده شده است. طبق سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، جمعیت این ناحیه بیش از $6/7$ میلیون نفر گزارش شده است. از نظر اقلیمی، جنگل‌های هیرکانی تحت تأثیر تلاقی عوامل مختلفی همچون مجاورت با دریای خزر، ساختار کوهستانی البرز و نفوذ جریانات مرطوب شمالی قرار دارند. این منطقه اقلیم معتدل مرطوب خزری دارد و میانگین بارش سالانه از بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر در غرب به حدود ۶۰۰ میلی‌متر در بخش شرقی گلستان کاهش می‌یابد، درحالی‌که دمای متوسط در این جهت از حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد به حدود $17/5$ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (Sękiewicz et al., 2024). با این حال، طی دو دهه گذشته، نشانه‌های فزاینده‌ای از تغییرات اقلیمی مانند افزایش دمای میانگین سالانه، تغییر الگوی بارش و افزایش فراوانی خشکسالی‌های فصلی در این منطقه گزارش شده‌اند. به‌طور ویژه، پژوهش Nejatyanpour et al. (2025) نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳، روند افزایشی در دما و کاهش در مقدار بارش ثبت شد.

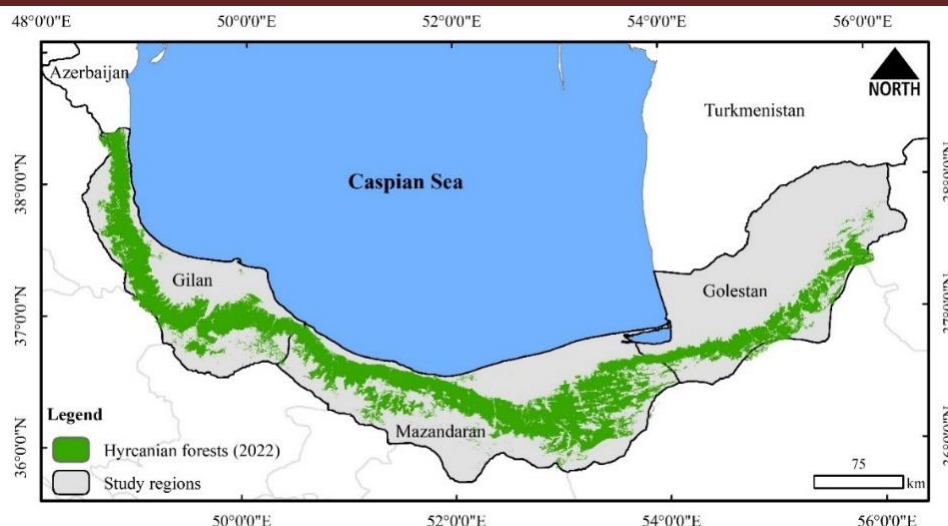
جامع‌تر از شدت و گستره خشکسالی در جنگل‌های مرطوب ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش، علاوه بر کمک به درک بهتر روندهای مکانی و زمانی خشکسالی، می‌تواند مبنایی علمی برای طراحی راهبردهای مدیریت منابع طبیعی در جنگل‌های هیرکانی فراهم آورد. شناخت مناطق حساس به خشکسالی و تغییرات پایداری بوم‌سازگان، به مدیران و سیاستگذاران این امکان را می‌دهد تا اقدامات پیشگیرانه و سازگار با اقلیم را برنامه‌ریزی و اجرا کنند و تاب‌آوری بوم-سازگان‌ها را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهند. بدین ترتیب، این پژوهش نقش مهمی در ارتقای حفاظت و مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی ایفا خواهد کرد. به‌طور ویژه، این پژوهش به سوالات زیر پاسخ می‌دهد:

- ۱- الگوهای مکانی و زمانی تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی و حرارتی مبتنی بر سنجش از دور در جنگل‌های هیرکانی طی دوره ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ چگونه بوده است؟
- ۲- آیا ترکیب شاخص‌های گیاهی و حرارتی می‌تواند تصویری دقیق‌تر از شدت و گستره خشکسالی در جنگل‌های مرطوب ارائه دهد؟
- ۳- کدام مناطق جنگل‌های هیرکانی بیشترین حساسیت به خشکسالی را داشته‌اند؟

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی در نوار جنوبی و جنوب‌غربی دریای خزر قرار دارد و شامل سه استان گیلان، مازندران



شکل ۱- موقعیت مکانی و وضعیت پراکنش جنگل‌های هیرکانی (۱۴۰۱)

Figure 1. Geographic location and distribution status of the Hyrcanian forests (2022)

استانداردسازی و آماده‌سازی داده‌ها

ابتدا مجموعه داده‌های Landsat Collection 2 Level-2 از GEE Data Catalog فراخوانی شد. این داده‌ها شامل تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری بوده و بازتاب سطحی (Surface Reflectance) در باندهای مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز کوتاه و همچنین دمای سطح زمین در باندهای حرارتی را با تفکیک مکانی ۳۰ متر (برای باندهای بازتابی) و ۱۰۰ متر (برای باندهای حرارتی) ارائه می‌دهند.

برای حذف اثرات ناشی از پوشش ابر، سایه ابر، برف و آب، از باند کیفی QA_PIXEL استفاده شد. این باند حاوی برچسب‌های کیفی برای هر پیکسل است و با استفاده از آن، پیکسل‌های نامعتبر به صورت خودکار ماسک شدند (Roy et al., 2014; Gorelick et al., 2017). سپس با بهره‌گیری از توابع داخلی GEE، تصاویر ماسک‌شده تهیه و تنها پیکسل‌های معتبر برای تحلیل انتخاب شدند.

طرح کلی پژوهش

در این پژوهش، برای استخراج و تحلیل شاخص‌های طیفی مرتبط با پوشش گیاهی، تنش‌های آبی و شرایط خشکسالی، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های Landsat-7 ETM+ (مربوط به سال ۱۳۷۹) و Landsat-8 OLI/TIRS (مربوط به سال ۱۴۰۳) بهره‌گیری شد. زیرا داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب برای این دوره به صورت مستمر و یکپارچه در دسترس بودند. برای تهیه لایه دمای سطح زمین (LST) نیز در سال ۱۳۷۹ از داده‌های MODIS و در سال ۱۴۰۳ از داده‌های Landsat-9 استفاده شد (جدول ۱). تمام مراحل پیش‌پردازش، محاسبه شاخص‌ها و تحلیل‌های مکانی-زمانی در محیط Google Earth Engine (GEE) انجام شد. این پلتفرم محاسبات ابری با فراهم کردن دسترسی به آرشیو وسیع داده‌های ماهواره‌ای و ابزارهای پردازشی قدرتمند، امکان تحلیل داده‌های سنجنش از دور در مقیاس‌های وسیع و با کارایی زیاد را فراهم می‌سازد (Velastegui-Montoya et al., 2023).

جدول ۱- مشخصات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Specifications of satellite data used in the study

سال‌های مورد بررسی Study years	دوره فصلی (ماه‌ها) Seasonal period (months)	تفکیک مکانی Spatial resolution	تعداد باندها Number of bands	سنجنده Sensor
۱۳۷۹ 2000	آوریل تا اکتبر April to October	۳۰ متر (باندهای طیفی)، ۱۵ متر (باند پانکروماتیک)، ۶۰ متر (باند حرارتی) 30 m (spectral bands), 15 m (panchromatic band), 60 m (thermal band)	8	Landsat-7 ETM+
		۲۵۰ متر (باندهای ۱-۲)، ۵۰۰ متر (باندهای ۳-۷)، ۱۰۰۰ متر (باند ۸-۳۶) 250 m (bands 1-2), 500 m (bands 3-7), 1000 m (bands 8-36)	36	MODIS (Terra)
۱۴۰۳ 2024	آوریل تا اکتبر April to October	۳۰ متر (باندهای طیفی)، ۱۵ متر (باند پانکروماتیک)، ۱۰۰ متر (باند حرارتی) 30 m (spectral bands), 15 m (panchromatic band), 100 m (thermal bands)	11	Landsat-8 OLI/TIRS
		۳۰ متر (باندهای طیفی)، ۱۵ متر (باند پانکروماتیک)، ۱۰۰ متر (باند حرارتی) 30 m (spectral bands), 15 m (panchromatic band), 100 m (thermal bands)	11	Landsat-9 OLI/TIRS

در گام بعد، تصاویر ماسک‌شده در بازه‌های زمانی سالانه با استفاده از روش میانگین‌گیری زمانی (temporal compositing) ترکیب شدند. این تصاویر ترکیبی، تغییرات سالانه پوشش گیاهی و دمای سطح زمین را با دقت زیاد نمایش می‌دهند (Masek et al., 2006; Zhu & Woodcock, 2014). محدوده جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل به‌کاررفته در پژوهش Nasiri et al. (2023b) و با بهره‌گیری از لایه‌های برداری مرز منطقه، بر روی داده‌های رستری برش داده شد تا تمرکز صرفاً بر نواحی جنگلی هیرکانی حفظ شود.

شاخص‌های پایش پوشش گیاهی برای تحلیل دقیق وضعیت بوم‌شناسی و پوشش گیاهی جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۳، مجموعه‌ای از شاخص‌های طیفی منتخب، بر اساس مرور منابع علمی معتبر (Wei et al., 2021; Liu et al., 2020b; Ma et al., 2023)، پیشینه بررسی‌های مشابه در مناطق جنگلی با شرایط اقلیمی مشابه و داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ انتخاب شد. این شاخص‌ها که هر یک جنبه‌ای خاص از پوشش گیاهی، تنش آبی، رطوبت سطحی و شدت خشکسالی را نشان می‌دهند، در بازه زمانی آوریل (فروردین) تا اکتبر (آبان)، یعنی فصل رویش و دوره‌ای که درختان برگ‌دار و فعال هستند، استخراج شدند. این شاخص‌ها عبارتند از:

- شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص NDVI یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش از دور برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی است و به‌ویژه در پایش خشکسالی کاربرد دارد. کاهش NDVI معمولاً نشان‌دهنده تنش آبی و کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاهان است (Liu et al., 2020a). NDVI بر اساس تفاوت بازتاب نور در باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (RED) محاسبه می‌شود (رابطه ۱):

شاخص‌های پایش پوشش گیاهی

برای تحلیل دقیق وضعیت بوم‌شناسی و پوشش گیاهی جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۳، مجموعه‌ای از شاخص‌های طیفی منتخب، بر اساس مرور منابع علمی معتبر (Wei et al., 2021; Liu et al., 2020b; Ma et al., 2023)، پیشینه بررسی‌های مشابه در مناطق جنگلی با شرایط اقلیمی مشابه و داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ انتخاب شد. این شاخص‌ها که هر یک جنبه‌ای خاص از پوشش گیاهی، تنش آبی، رطوبت سطحی و شدت خشکسالی را نشان می‌دهند، در بازه زمانی آوریل (فروردین) تا اکتبر (آبان)، یعنی فصل رویش و دوره‌ای که درختان برگ‌دار و فعال هستند، استخراج شدند. این شاخص‌ها عبارتند از:

$$\text{رابطه (۱)} \quad NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

مقادیر آن بین -۱ تا +۱ است؛ مقادیر نزدیک به +۱

بیانگر پوشش گیاهی سالم و متراکم، مقادیر نزدیک صفر مربوط به خاک یا پوشش کم و مقادیر منفی نمایانگر آب یا سطوح فاقد پوشش گیاهی است.

- شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

VCI برای تشخیص تنش‌های خشکی و ارزیابی سلامت پوشش گیاهی در دوره‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود (Kloos et al., 2021). این شاخص، مقدار NDVI فعلی را نسبت به حداقل و حداکثر NDVI در سری زمانی گذشته نرمال‌سازی می‌کند تا اثر تغییرات فصلی کاهش یابد (رابطه ۲):

رابطه (۲)

$$VCI = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times 100$$

مقادیر VCI بین صفر (بیشترین تنش) تا ۱۰۰

(شرایط مطلوب) قرار دارد.

- شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده (EVI)

EVI با هدف بهبود حساسیت در مناطق با پوشش گیاهی متراکم و اصلاح اثرات اتمسفری و پس‌زمینه خاک توسعه یافته است (Huete et al., 2002). رابطه آن به صورت زیر است (رابطه ۳):

رابطه (۳)

$$EVI = G \times (NIR - Red) / (NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L)$$

که در آن $G=2/5$ ، $C1=6$ ، $C2=7/5$ و $L=1$ هستند

و NIR، RED و BLUE به ترتیب بازتاب باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی هستند.

مقادیر شاخص EVI معمولاً در بازه -۱ تا +۱ قرار

دارند. مقادیر نزدیک به +۱ نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم و متراکم هستند، در حالی که مقادیر نزدیک به صفر بیانگر پوشش گیاهی کم، تنک یا سطوحی فاقد پوشش گیاهی مشخص یا قابل تشخیص مانند خاک، سنگ یا مناطق مسکونی هستند. مقادیر منفی این شاخص بیشتر

مربوط به سطوح فاقد پوشش گیاهی مانند آب یا ابر هستند.

- شاخص تعدیل شده پوشش گیاهی خاک (SAVI)

SAVI با هدف کاهش اثر بازتاب خاک در نواحی با تراکم گیاهی کم توسعه داده شده است (Huete, 1988). رابطه آن به شکل زیر است (رابطه ۴):

رابطه (۴)

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L)$$

مقادیر شاخص SAVI معمولاً در بازه -۱ تا +۱

قرار دارند. مقادیر نزدیک به +۱ نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم و سالم هستند، در حالی که مقادیر نزدیک به صفر بیانگر پوشش گیاهی کم تراکم یا سطوحی با بازتاب غالب خاک هستند. این شاخص با به‌کارگیری ضریب تصحیح خاک (L)، تأثیر بازتاب نور از سطح خاک را کاهش داده و سبب افزایش دقت در ارزیابی پوشش گیاهی می‌شود. مقدار معمول برای L برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Huete, 1988).

- شاخص تفاضل نرمال شده آب (NDWI)

NDWI برای اندازه‌گیری رطوبت برگ و خاک استفاده می‌شود (Gao, 1996). این شاخص دارای دو نسخه رایج است؛ در این پژوهش از نسخه‌ای استفاده شده که بر پایه باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) عمل می‌کند (رابطه ۵):

رابطه (۵)

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

مقادیر بیشتر نشان‌دهنده رطوبت بیشتر (مانند

پوشش گیاهی سرسبز یا خاک مرطوب) و مقادیر کمتر نمایانگر سطوح خشک، پوشش گیاهی تنک یا نواحی فاقد رطوبت کافی هستند.

- شاخص خشکی پوشش گیاهی-دما (TVDI)

TVDI شاخصی است که با استفاده از دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی (معمولاً NDVI) برای

رادیانس سطح بالای جو (Top-Of-Atmosphere Radiance) با رابطه زیر تبدیل شدند (Li et al., 2013):

$$L_{\lambda} = (DN \times Scale Factor) + Offset \quad (7)$$

که در آن مقادیر ضرایب Scale Factor و Offset از متادیتای هر تصویر دریافت شد. سپس رادیانس به دمای روشنایی (Brightness Temperature) در واحد کلوین به کمک رابطه زیر تبدیل شد (Chander et al., 2009):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{K_{\lambda}} + 1\right)} \quad (8)$$

که در اینجا K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون مخصوص باند حرارتی هستند.

برای برآورد ضریب نشر سطح (Emissivity)، شاخص NDVI برای هر پیکسل محاسبه شد و با توجه به مقدار NDVI، ضریب نشر به صورت پیوسته بین مقادیر حدود ۰/۹۲ برای نواحی بدون پوشش و ۰/۹۸ برای مناطق با پوشش گیاهی متراکم تعیین شد (Selka et al., 2024). سپس دمای روشنایی کلوین با توجه به ضریب نشر اصلاح و دمای سطح زمین نهایی استخراج شد. در پایان، مقادیر LST که به کلوین بودند به درجه سلسیوس تبدیل و برای هر پیکسل ذخیره شدند. این رویکرد امکان تهیه نقشه‌های با دقت زیاد و تفکیک مکانی بهتر برای سال ۱۴۰۳ را فراهم آورد. علاوه بر این، به‌کارگیری لایه QC برای داده‌های MODIS در سال ۱۳۷۹ و برآورد ضریب نشر با استفاده از NDVI، موجب ارتقای دقت نتایج در هر دو سال شد.

تحلیل داده‌ها

برای بررسی رابطه میان LST و شاخص‌های پوشش گیاهی در جنگل‌های هیرکانی، از تحلیل‌های آماری چندمتغیره بهره‌گیری شد. هدف از این تحلیل‌ها، ارزیابی پاسخ پوشش گیاهی به تنش‌های حرارتی و تغییرات دمایی در دو مقطع زمانی مشخص، شامل

شناسایی مقدار تنش آبی و خشکی سطح زمین به‌کار می‌رود (McFeeters, 1996). در این روش ابتدا حداقل (LST_{min}) و حداکثر (LST_{max}) دما برای هر مقدار NDVI تعیین می‌شود تا محدوده دمایی مربوط به شرایط رطوبتی مختلف مشخص شود. سپس TVDI با نرمال‌سازی دمای سطح زمین بین این دو حد بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۶):

$$TVDI = (LST - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min})$$

مقادیر بیشتر این شاخص نشان‌دهنده تنش آبی شدیدتر و خشکی بیشتر است.

محاسبه دمای سطح زمین (LST)

برای تهیه نقشه دمای سطح زمین (LST) در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳، از دو مجموعه داده ماهواره‌ای متفاوت استفاده شد. داده‌های سال ۱۳۷۹ از محصول MODIS نسخه MOD11A2.006 متعلق به ماهواره Terra، که به صورت ترکیب‌های زمانی هشت‌روزه با تفکیک مکانی یک کیلومتر ارائه می‌شود، استخراج شد. برای سال ۱۴۰۳ به دلیل محدودیت در دسترسی به داده‌های به روز MODIS در پلتفرم GEE، تصاویر ماهواره‌ای Landsat 9 سطح دو با تفکیک مکانی ۳۰ متر به کار گرفته شدند. تمامی پردازش‌ها و تحلیل‌ها به صورت برنامه‌نویسی در پلتفرم GEE انجام شدند.

در هر دو مجموعه داده، بازه زمانی ماه‌های آوریل تا اکتبر انتخاب شد که فصل فعالیت گیاهی و گرم‌ترین دوره سال در منطقه هیرکانی است. در پردازش داده‌های MODIS، با استفاده از لایه کنترل کیفیت (QC) تنها پیکسل‌هایی که فاقد پوشش ابری یا دارای کیفیت مناسب بودند، برای محاسبه میانگین دمای سطح زمین انتخاب شدند (Wan et al., 2015).

برای استخراج LST از تصاویر Landsat 9، ابتدا مقادیر رقومی باند حرارتی سطح (ST_B10) به

وجود همبستگی معنادار هستند (Benesty et al., 2009).

برای اطمینان از عدم بروز هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) میان شاخص‌های پوشش گیاهی، تحلیل‌های تکمیلی شامل ضریب همبستگی اسپیرمن (Spearman's ρ)، شاخص تحمل (Tolerance) و ضریب تورم واریانس (VIF) انجام شد. مقادیر شاخص تحمل کمتر از ۰/۲۵ و VIF بیش از ۴ به‌عنوان شواهدی از وجود هم‌خطی قوی در نظر گرفته شدند (Chanchí Golondrino et al., 2023). این مرحله برای افزایش دقت در تفسیر نتایج و جلوگیری از خطاهای تحلیلی ضروری بود.

برای بررسی روندهای زمانی و ارزیابی اثر تنش-های محیطی، تحلیل‌های فوق به‌صورت جداگانه برای دو مقطع زمانی ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ انجام شد. کلیه تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزار XLSTAT نسخه ۲۰۱۹ انجام شد.

نتایج

آمار توصیفی تغییرات ماهانه شاخص‌ها

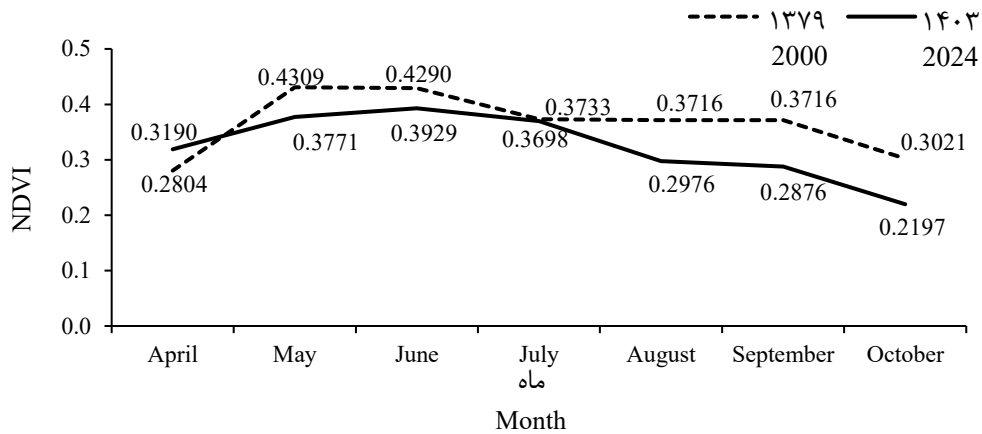
تحلیل شاخص‌های پوشش گیاهی و خشکسالی در ماه‌های فصل رشد طی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در وضعیت بوم-سازگان جنگل‌های هیرکانی است.

مقادیر میانگین NDVI در سال ۱۳۷۹ از ۰/۲۸۰۴ در آوریل تا ۰/۴۲۹۰ در ژوئن متغیر بود و در آگوست به ۰/۳۷۱۶ رسید، درحالی‌که در سال ۱۴۰۳، بیشترین مقدار در ژوئن (۰/۳۹۲۹) مشاهده شد، اما روند کلی در بیشتر ماه‌ها کاهش یافته است؛ به‌طور مثال، مقدار NDVI در سپتامبر از ۰/۳۷۱۶ به ۰/۲۸۷۶ کاهش داشته است (شکل ۲).

سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ بود. شاخص‌های پوشش گیاهی شامل NDVI، VCI، EVI، SAVI، NDWI و TVDI به‌عنوان نمایه‌هایی از وضعیت سلامت، تراکم، رطوبت و تنش بوم‌شناسی پوشش گیاهی در نظر گرفته شدند (Alahacoon & Edirisinghe, 2022; Patil et al., 2024; Yan et al., 2025). در مقابل، شاخص LST به‌عنوان یک شاخص کلیدی و مستقل برای شناسایی خشکسالی در نظر گرفته شد که تأثیر مستقیم بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان و وضعیت اقلیمی منطقه دارد (Kulkarni et al., 2020).

برای اطمینان از یکنواختی مکانی و کاهش اثر خودهمبستگی مکانی، با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ArcGIS10.8 تعداد ۱۶۷۸ نقطه نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی در محدوده جنگل‌های هیرکانی تولید شد. در ابتدا ۲۰۰۰ نقطه در نظر گرفته شد، اما با توجه به اعمال محدودیت کمینه فاصله یک کیلومتر برای جلوگیری از هم‌پوشانی مکانی، بخشی از نقاط حذف شد و در نهایت ۱۶۷۸ نقطه باقی ماند. سپس مقادیر شاخص‌های مورد نظر و LST برای هر نقطه و هر دوره زمانی استخراج شدند.

برای ارزیابی شدت و جهت ارتباط خطی میان متغیرها، از ضریب همبستگی پیرسون (Pearson's r) استفاده شد. در این تحلیل، LST به‌عنوان متغیر مستقل و شاخص‌های پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند، با این فرض که تغییرات دما می‌تواند تأثیر مستقیمی بر وضعیت پوشش گیاهی و مقدار رطوبت آن داشته باشد. مقادیر ضریب پیرسون در بازه ۱- تا ۱+ قرار دارند؛ مقادیر مثبت زیاد نشان‌دهنده رابطه مستقیم قوی، مقادیر منفی زیاد بیانگر رابطه معکوس قوی و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده عدم

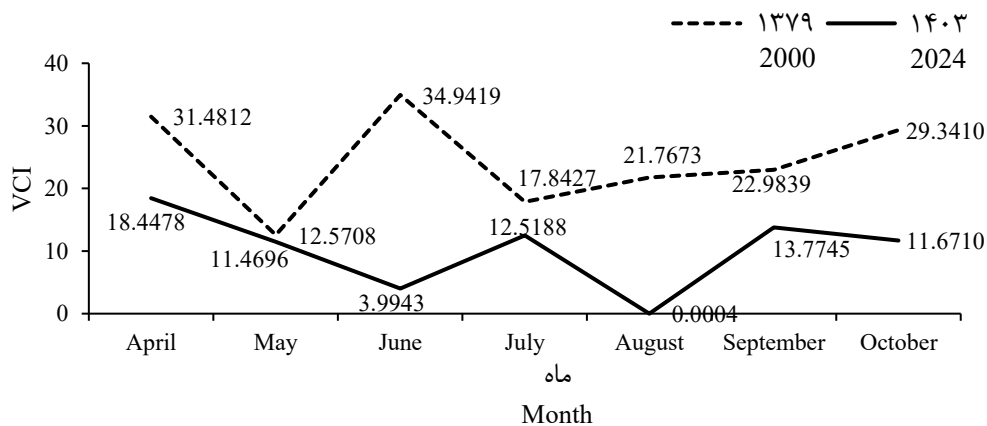


شکل ۲- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه NDVI در ماه‌های فصل رشد بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 2. Comparison of monthly mean NDVI changes during the growing season between 2000 and 2024

۰/۰۰۱ کاهش شدیدی داشته است (شکل ۳). این افت شدید نمایانگر افزایش شدت خشکسالی و کاهش شرایط مطلوب آب و هوایی در سال ۱۴۰۳ است که با روند نزولی NDVI همخوانی دارد.

شاخص VCI که نشانگر وضعیت خشکسالی است، در سال ۱۳۷۹ مقادیر بیشتری را نسبت به سال ۱۴۰۳ نشان می‌دهد. به‌طور خاص، مقدار VCI در ژوئن از ۳۴/۹۴ به ۳/۹۹ و در آگوست از ۲۱/۷۶ به کمتر از

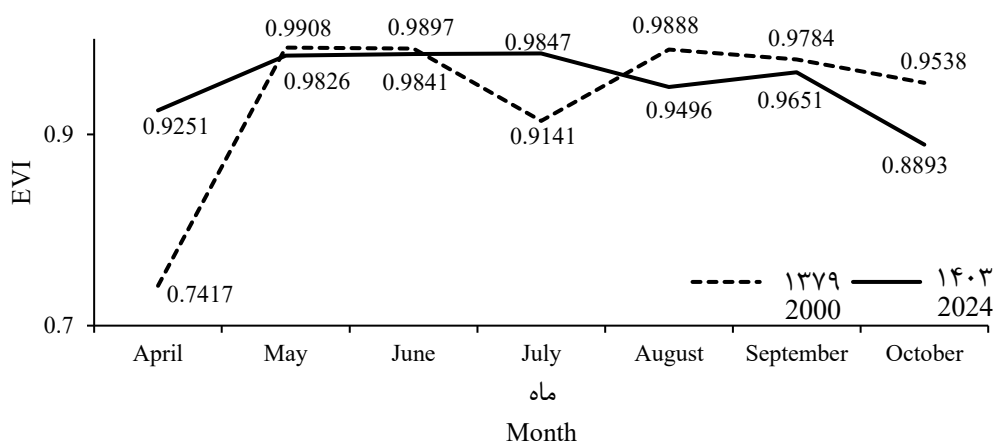


شکل ۳- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه VCI در ماه‌های فصل رشد بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 3. Comparison of monthly mean VCI changes during the growing season between 2000 and 2024

۰/۹۲ و در جولای از ۰/۹۱ به ۰/۹۸ افزایش یافته است (شکل ۴). این تفاوت ممکن است نشان‌دهنده تغییر در ترکیب گونه‌ها یا بازسازی نسبی پوشش گیاهی باشد که در مقابل کاهش کلی پوشش مقاومت نشان داده است.

شاخص EVI که حساسیت بیشتری به شرایط پوشش گیاهی دارد، برخلاف NDVI و VCI، در سال ۱۴۰۳ مقادیر مشابه یا حتی کمی بیشتر نسبت به سال ۱۳۷۹ نشان می‌دهد؛ به‌عنوان مثال در آوریل از ۰/۷۴ به

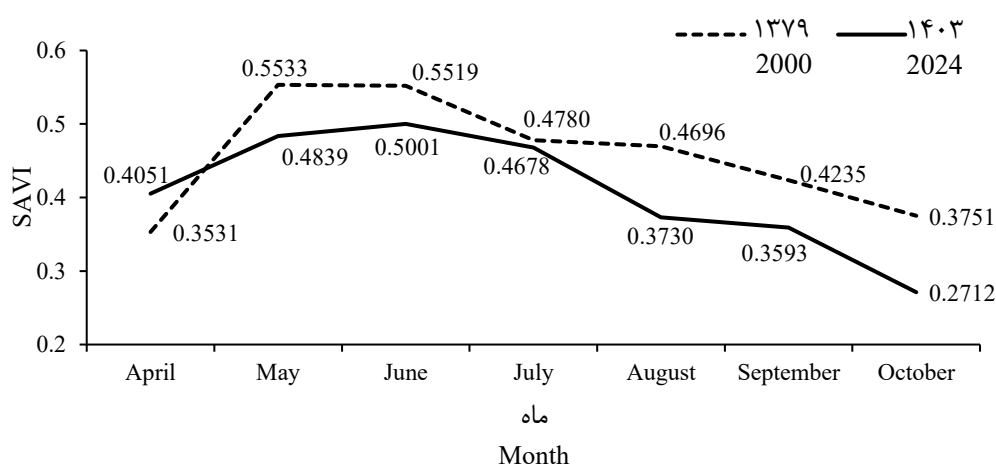


شکل ۴- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه EVI در ماه‌های فصل رشد بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 4. Comparison of monthly mean EVI changes during the growing season between 2000 and 2024

است (شکل ۵). این روند کاهش SAVI همسو با کاهش NDVI و VCI است و نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی در منطقه است.

مقادیر SAVI که برای تعدیل اثرات خاک کاربرد دارد، به‌طورکلی کاهش یافته است. برای نمونه در سپتامبر از ۰/۴۲۳۵ در سال ۱۳۷۹ به ۰/۳۵۹۳ در سال ۱۴۰۳ و در اکتبر از ۰/۳۷۵۱ به ۰/۲۷۱۲ کاهش یافته

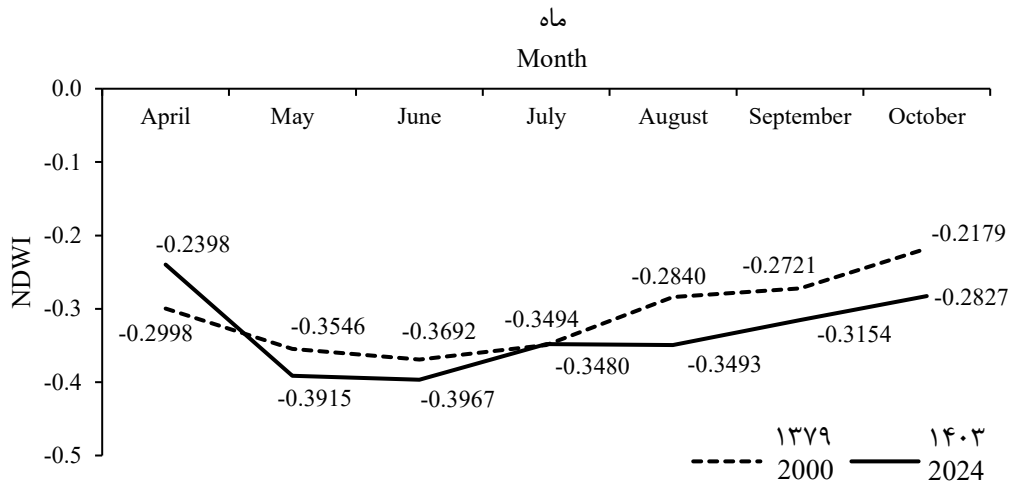


شکل ۵- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه SAVI در ماه‌های فصل رشد بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 5. Comparison of monthly mean SAVI changes during the growing season between 2000 and 2024

نیز تأییدکننده روند خشکسالی و کاهش منابع آبی در دوره مورد بررسی است.

مقادیر NDWI در سال ۱۴۰۳ نیز کاهش چشمگیری نسبت به سال ۱۳۷۹ نشان می‌دهد (شکل ۶) که بیانگر کاهش رطوبت سطحی است. این موضوع

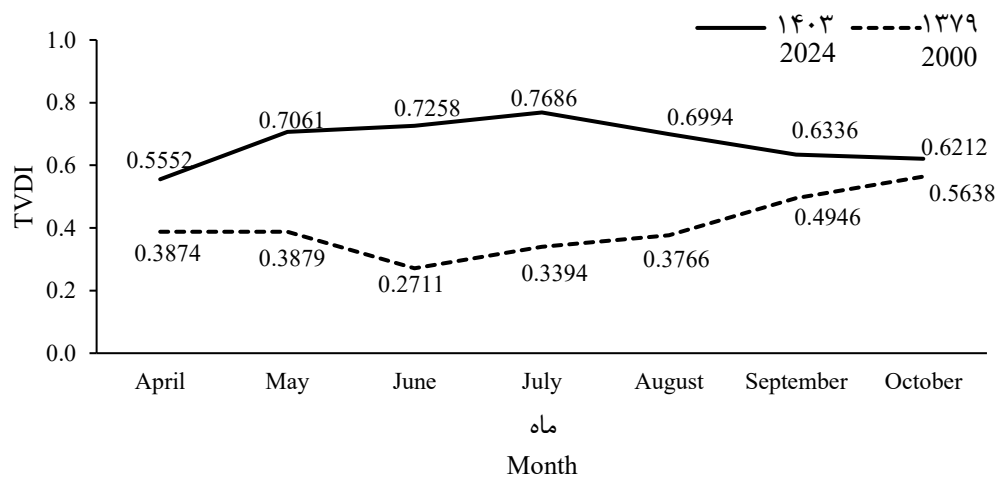


شکل ۶- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه NDWI در ماه‌های فصل رشد بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 6. Comparison of monthly mean NDWI changes during the growing season between 2000 and 2024

معمولاً نشان‌دهنده افزایش تنش آبی و گرمایی بر پوشش گیاهی است که به کاهش کارایی فتوسنتز و سلامت گیاهان منجر می‌شود.

شاخص TVDI که معرف تنش‌های گرمایی و خشکی است، در سال ۱۴۰۳ افزایش نسبی در مقادیر خود نسبت به ۱۳۷۹ نشان می‌دهد (برای مثال در ژوئن از ۰/۷۲۵۸ به ۰/۲۷۱۱) (شکل ۷). این افزایش TVDI



شکل ۷- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه TVDI در ماه‌های فصل رشد بین سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 7. Comparison of monthly mean TVDI changes during the growing season between 2000 and 2024

هیرکانی در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. تحلیل مقادیر میانگین بیشینه سالانه و میانگین کمینه سالانه این شاخص‌ها بیانگر تغییرات قابل توجه در وضعیت پوشش

الگوهای زمانی و مکانی سالانه شاخص‌های گیاهی الگوی پراکنش و تغییرات شاخص‌های NDVI، VCI، EVI، SAVI، NDWI، TVDI و LST در جنگل‌های

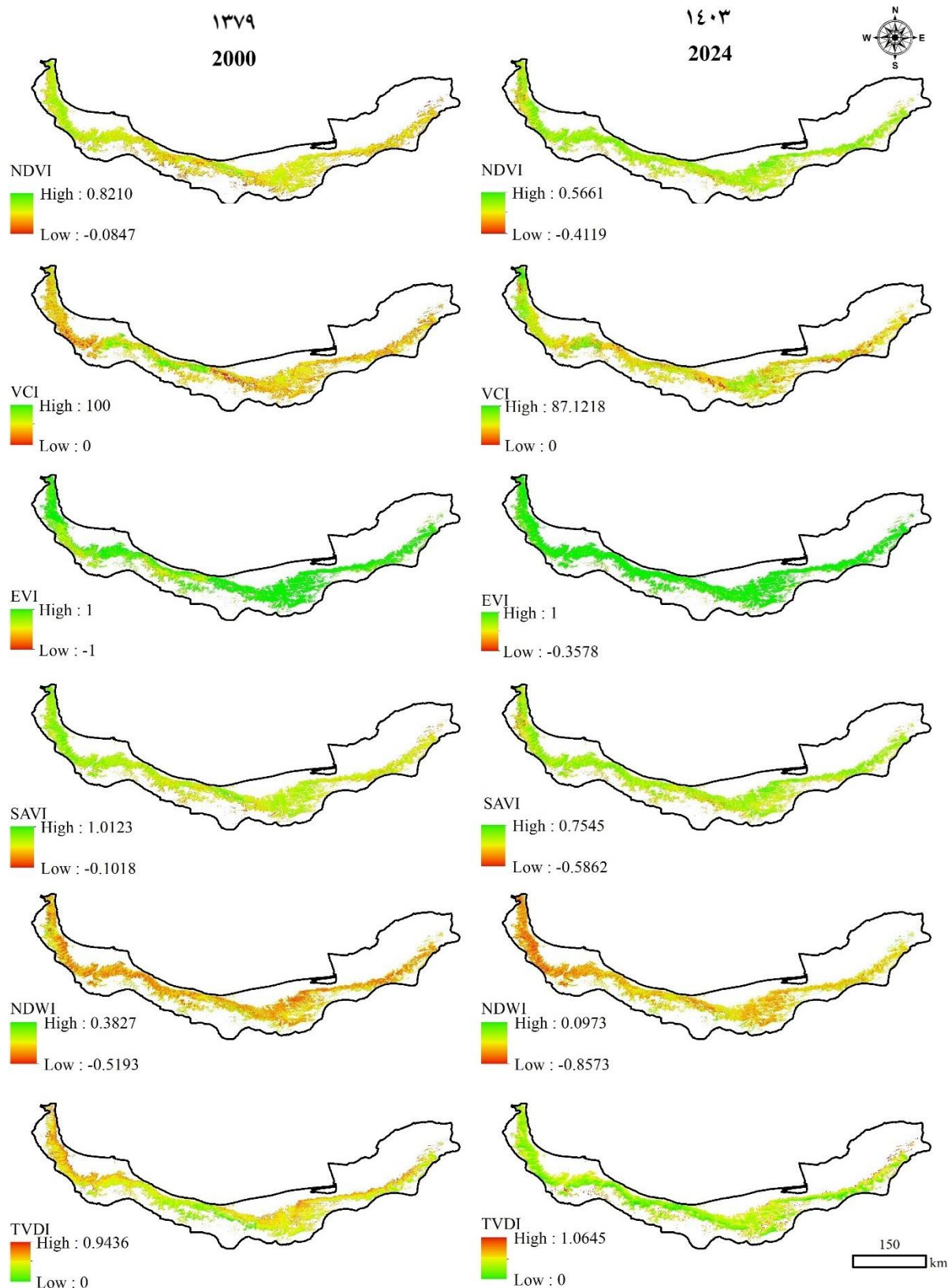
گیاهی، رطوبت و شرایط اقلیمی منطقه در بازه زمانی مورد بررسی در این پژوهش است.

میانگین سالانه NDVI از ۰/۶۴۲ در سال ۱۳۸۰ به ۰/۴۹۸ در سال ۱۴۰۳ کاهش یافته است. میانگین بیشینه سالانه این شاخص از ۰/۸۲۱ به ۰/۵۶۶ و میانگین کمینه سالانه آن از ۰/۰۸۵- به ۰/۴۱۲- رسیده که نشان‌دهنده افت تراکم و سلامت پوشش گیاهی در بسیاری از نقاط جنگل‌های هیرکانی است. میانگین سالانه VCI از ۶۸/۴۲ به ۵۴/۳۷ کاهش یافته و همزمان میانگین بیشینه سالانه آن از ۱۰۰ به ۸۷/۱۲ رسیده است، در حالی که میانگین کمینه سالانه همچنان برابر صفر باقی مانده است؛ تغییری که بیانگر افزایش فشار خشکسالی و کاهش شرایط مطلوب رطوبتی برای رشد گیاهان است. میانگین سالانه EVI از ۰/۳۸۲ به ۰/۲۹۵ کاهش یافته است؛ در این شاخص، میانگین بیشینه سالانه در هر دو سال برابر یک بوده اما میانگین کمینه سالانه از ۰/۳۵۸- به ۱- کاهش یافته که بیانگر گسترش مناطق با کیفیت پوشش گیاهی بسیار کم یا شرایط تنش شدید است.

میانگین سالانه SAVI از ۰/۵۲۷ به ۰/۴۱۲ کاهش یافته است. میانگین بیشینه سالانه این شاخص از یک به

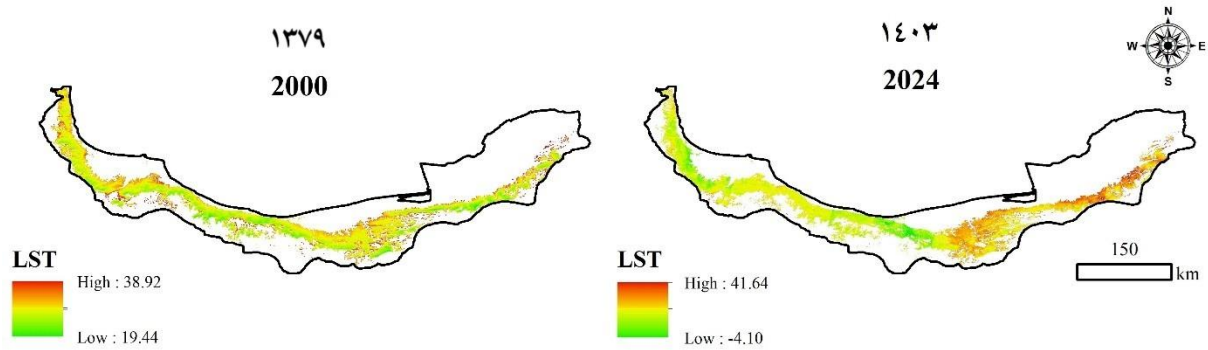
۰/۷۵۵ و میانگین کمینه سالانه از ۰/۱۰۲- به ۰/۵۸۶- رسیده است که همسو با کاهش NDVI، نشان‌دهنده افت تراکم پوشش گیاهی به ویژه در مناطق کم‌پوشش است. میانگین سالانه NDWI نیز از ۰/۲۱۴ به ۰/۰۶۷- تغییر یافته است؛ میانگین بیشینه سالانه آن از ۰/۳۸۳ به ۰/۰۹۷ و میانگین کمینه سالانه از ۰/۵۱۹- به ۰/۸۵۷- رسیده که نشان‌دهنده کاهش آشکار رطوبت سطحی و منابع آبی است.

در شاخص TVDI، میانگین سالانه از ۰/۴۱۲ به ۰/۵۳۶ افزایش یافته که نشان‌دهنده تشدید تنش خشکی و گرمایی در پوشش گیاهی است. میانگین بیشینه سالانه آن از ۰/۹۴۴ در سال ۱۳۸۰ به ۱/۰۶۵ در سال ۱۴۰۳ افزایش یافته و میانگین کمینه سالانه در هر دو سال صفر بوده که به مناطق فاقد تنش شدید اشاره دارد. میانگین بیشینه سالانه LST از ۳۸/۹۲ درجه سانتی‌گراد به ۴۱/۶۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته که روند کلی افزایش دما و شرایط خشکی به وضوح مشهود است. از نظر مکانی، بخش‌های شرقی و جنوبی در سال ۱۴۰۳ بیشترین مقادیر LST را داشته‌اند.



شکل ۸- الگوی مکانی شاخص‌های پوشش گیاهی در جنگل‌های هیرکانی در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 8. Spatial patterns of vegetation indices in the Hyrcanian forests in 2000 and 2024



شکل ۹- الگوی مکانی شاخص دمای سطح زمین در جنگل‌های هیرکانی در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Figure 9. Spatial patterns of LST in the Hyrcanian forests in 2000 and 2024

دو شاخص با توجه به اهداف پژوهش که تمرکز بر بررسی خشکسالی و ارتباط شاخص‌های منتخب با LST دارد، از تحلیل‌های بعدی حذف شدند. با وجود هم‌خطی به نسبت زیاد NDWI، این شاخص به دلیل اهمیت آن در سنجش رطوبت پوشش گیاهی و نقش کلیدی‌اش در تحلیل خشکسالی، در مدل نهایی حفظ شد. دیگر شاخص‌ها شامل VCI، TVDI و EVI دارای مقادیر VIF کمتر از دو و فاقد مشکل هم‌خطی بوده و در مدل نهایی استفاده شدند.

تحلیل هم‌خطی شاخص‌های پوشش گیاهی

نتایج ارزیابی هم‌خطی میان شاخص‌های پوشش گیاهی سال ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ نشان داد که شاخص‌های NDVI، SAVI و NDWI دارای مقادیر VIF بسیار زیاد و Tolerance بسیار کم هستند که بیانگر هم‌خطی شدید بین این شاخص‌ها است (جدول ۲). این امر نشان می‌دهد که این سه شاخص بخش زیادی از تغییرات یکدیگر را توضیح می‌دهند و اطلاعات آنها تا حد زیادی همپوشانی دارد. از میان این سه شاخص، همبستگی NDVI و SAVI تقریباً کامل بوده و به همین دلیل، این

جدول ۲- بررسی هم‌خطی شاخص‌های پوشش گیاهی سال ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Table 2. Multicollinearity assessment of vegetation indices in 2000 and 2024

معیارهای هم‌خطی چندگانه			سال	متغیرها
Multicollinearity metrics				
VIF	Tolerance	R ²		
438.941	0.002	0.998	2000	NDVI
525.252	0.002	0.998	2024	
34.277	0.029	0.971	2000	NDWI
44.754	0.022	0.978	2024	
1.039	0.963	0.037	2000	VCI
1.117	0.895	0.105	2024	
434.577	0.002	0.998	2000	SAVI
501.938	0.002	0.998	2024	
1.062	0.941	0.059	2000	TVDI
1.342	0.745	0.255	2024	
1.972	0.507	0.493	2000	EVI
1.477	0.677	0.323	2024	

شاخص EVI نیز همبستگی بسیار ضعیف و غیرمعناداری با LST دارد ($r = 0/002$, $p = 0/932$). در سال ۱۴۰۳، شاخص NDWI همبستگی منفی و معناداری با LST داشته است ($r = -0/127$, $p < 0/0001$). که نسبت به سال ۱۳۷۹ قوی‌تر شده است. شاخص VCI در این سال همچنان همبستگی ضعیف و غیرمعناداری با LST نشان می‌دهد ($r = 0/010$, $p = 0/673$). شاخص TVDI در سال ۱۴۰۳ همبستگی مثبت و معناداری با LST دارد ($r = 0/248$, $p < 0/0001$) و شاخص EVI نیز همبستگی منفی و معناداری با LST نشان شده است ($r = -0/244$, $p < 0/0001$).

تحلیل همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی و LST بر اساس نتایج حاصل از تحلیل همبستگی پیرسون بین شاخص‌های پوشش گیاهی و LST در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ (جدول ۳)، مشاهده شد که در سال ۱۳۷۹، شاخص NDWI همبستگی منفی و معناداری با دمای سطح زمین ($r = -0/076$, $p = 0/002$) نشان می‌دهد که با افزایش LST، مقدار NDWI کاهش یافته است. شاخص VCI در این سال همبستگی ضعیف و غیرمعناداری با LST داشته است ($r = 0/153$, $p = 0/035$). برای شاخص TVDI مقدار همبستگی بسیار زیاد گزارش شده که با توجه به مقدار p کمتر از $0/0001$ ، نشان‌دهنده همبستگی قوی و معنادار است.

جدول ۳- نتایج همبستگی پیرسون بین شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST) در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳

Table 3. Pearson correlation (r) results between vegetation indices and Land Surface Temperature (LST) for the years 2000 and 2024

متغیر	سال	NDWI		VCI		TVDI		EVI	
		p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r
LST	۱۳۷۹	0.002	-0.076	0.153	0.035	< 0.0001	0.948	0.932	0.002
	2000								
	۱۴۰۳	< 0.0001	-0.127	0.673	0.010	< 0.0001	0.248	< 0.0001	-0.244
	2024								

تغییرات کاربری اراضی و دوره‌های مکرر خشکسالی است.

در همین بازه زمانی، میانگین LST از ۲۴/۸ به ۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت، رشدی برابر با ۲/۵ درجه که از تشدید شرایط گرمایی منطقه حکایت دارد. افزایش LST نه تنها به‌عنوان شاخصی مستقیم از وضعیت حرارتی سطح زمین محسوب می‌شود، بلکه به‌عنوان شاخصی غیرمستقیم از خشکسالی نیز کاربرد دارد (Gelata et al., 2023)؛ زیرا افزایش دما بیشتر با کاهش رطوبت خاک و کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی همزمان است (Yao et al., 2023).

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی در جنگل‌های هیرکانی طی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳ تغییرات زیادی داشته است. میانگین سالانه NDVI از ۰/۴۱ در سال ۱۳۷۹ به ۰/۳۶ در سال ۱۴۰۳ کاهش یافت که بیانگر کاهش تراکم و سلامت پوشش گیاهی است. این روند با کاهش مشابهی در شاخص‌های EVI و SAVI همراه بود که به ترتیب ۷/۸ درصد و ۶/۴ درصد کاهش نشان دادند و نمایانگر افت کلروفیل فعال و تراکم سبزینه در منطقه هستند. چنین تغییراتی احتمالاً ناشی از ترکیب فشارهای اقلیمی،

غیرمعداری با LST داشت، که می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های بوم‌شناسی و عوامل متعدد مؤثر بر خشکسالی باشد. در مقابل، شاخص TVDI که معرف تنش‌های گرمایی و خشکی است، همبستگی بسیار قوی و مثبت با LST داشت ($r = 0/948$, $p < 0/0001$)، که نشان‌دهنده تشدید فشارهای خشکی با افزایش دمای سطح زمین است. شاخص EVI در سال ۱۳۸۰ همبستگی بسیار ضعیف و غیرمعداری با LST داشت، که احتمالاً به تغییرات ترکیب گونه‌ای یا عوامل محلی پوشش گیاهی مرتبط است.

در سال ۱۴۰۳، این روابط تقویت شدند؛ به گونه‌ای که همبستگی منفی NDWI با LST قوی‌تر شد ($r = -0/127$, $p < 0/0001$) که بیانگر کاهش بیشتر رطوبت سطحی با افزایش دمای زمین است. شاخص VCI همچنان همبستگی ضعیف و غیرمعداری داشت، اما شاخص TVDI به صورت معنادار و مثبت با LST همبسته بود ($r = 0/248$, $p < 0/0001$)، تأکیدی بر افزایش تنش‌های گرمایی و خشکی در پوشش گیاهی جنگل. همچنین، شاخص EVI در سال ۱۴۰۳ همبستگی منفی و معناداری با LST نشان داد ($r = -0/244$, $p < 0/0001$)، که می‌تواند بازتاب‌دهنده حساسیت بیشتر پوشش گیاهی به افزایش دما و تنش‌های محیطی در این دوره باشد.

این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران و جهان همسو است؛ برای مثال، Rafiei Sardooi et al. (2021) ارتباط معناداری میان افزایش دمای سطح زمین و کاهش شاخص‌های سبزی‌نگی در مناطق خشک ایران گزارش کردند. Eskandari Dameneh et al. (2021) نیز با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و اقلیمی نشان دادند که بیش از دو سوم از مناطق ایران در معرض بیابان‌زایی شدید قرار دارند و افزایش دمای سطح زمین ارتباط

کاهش چشمگیر شاخص‌های NDVI، VCI، SAVI و NDWI نمایانگر افت تراکم پوشش گیاهی جنگل‌های هیرکانی است که احتمالاً ناشی از تشدید خشکسالی، کاهش بارش و تغییرات اقلیمی است. افزایش شاخص TVDI و دمای سطح زمین نیز نشان‌دهنده افزایش تنش‌های گرمایی و خشکی است که می‌تواند موجب کاهش کارایی فتوسنتز و سلامت گیاهان شود. از سوی دیگر، شاخص EVI با وجود کاهش یا ثبات نسبی، ممکن است بازتابی از تغییرات ترکیب گونه‌ای یا بازسازی نسبی پوشش گیاهی در برخی نقاط باشد که مقاومت نسبی پوشش را در برابر فشارهای محیطی نشان می‌دهد (Yang et al., 2025).

از نظر بوم‌شناسی نیز افزایش دمای سطح زمین می‌تواند تبخیر و تعرق را افزایش داده و به کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاهان منجر شود. کاهش شاخص‌های NDVI و EVI در این پژوهش با افت عملکرد بوم‌سازگان و احتمال کاهش زیست‌توده گیاهی هم‌خوانی دارد، که مشابه نتایج Avazpour et al. (2021) در مناطق کوهستانی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است، جایی که خشکسالی و گرمایش سطحی به کاهش تنوع گیاهی منجر شد.

تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی و خشکسالی ارتباط معناداری با LST دارند که این ارتباط در طول بازه زمانی مورد بررسی تغییراتی نداشته است. در سال ۱۳۷۹، شاخص NDWI که نمایانگر رطوبت سطحی است، همبستگی منفی و معناداری با LST داشت ($r = -0/076$, $p = 0/002$)، به طوری که با افزایش دمای سطح زمین، رطوبت سطحی کاهش یافت. این رابطه منفی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم افزایش دما بر کاهش منابع آبی سطحی در بوم‌سازگان جنگل‌های هیرکانی است. شاخص VCI در همان سال همبستگی ضعیف و

مستقیمی با کاهش پوشش گیاهی و تخریب خاک دارد. همچنین، (Pumo et al. (2010 در بررسی خود در مناطق مدیترانه‌ای نقش گرمایش سطح زمین را در تشدید تنش‌های آبی گیاهان تأیید کردند. علاوه بر این، این نتایج همسو با یافته‌های (Liu et al. (2020a در شرق چین است که رابطه منفی بین LST و NDWI را در مناطق مرطوب جنگلی گزارش کرده است.

بررسی تغییرات همبستگی‌ها در طول زمان نشان می‌دهد که تأثیرات گرمایش سطح زمین بر کاهش رطوبت و افزایش تنش‌های خشکی پوشش گیاهی در جنگل‌های هیرکانی تشدید شد. این یافته‌ها اهمیت پایش دقیق شاخص‌های دمایی و پوشش گیاهی را در مدیریت پایدار بوم‌سازگان‌های حساس به تغییرات اقلیمی برجسته می‌کند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌هایی مانند TVDI و NDWI می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های حساس و مکمل در ارزیابی تنش‌های اقلیمی و خشکسالی به‌کار روند.

یکی دیگر از نکات قابل توجه، همزمانی کاهش شاخص‌های سبزی‌نگی با افزایش LST است که نشان می‌دهد حتی بدون استفاده مستقیم از شاخص‌های خشکسالی مانند SPEI یا SPI نیز می‌توان از LST به‌عنوان شاخص مکمل برای پایش خشکسالی بهره برد. با این حال، پژوهش‌هایی مانند (Anderson et al. (2013 توصیه کرده‌اند که ترکیب LST با شاخص‌های بارش‌محور (مانند SPI، SPEI و PDSI) دقت تحلیل‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

با وجود اعتبار نتایج، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز دارد؛ مانند استفاده از داده‌ها تنها در دو مقطع زمانی (سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۴۰۳) که انتخاب آنها بر اساس دسترس‌پذیری داده‌های ماهواره‌ای با وضوح مکانی و زمانی مناسب و نیز نیاز به دوره زمانی بلندمدت برای

تحلیل خشکسالی بوده است. این محدودیت ممکن است نوسانات کوتاه‌مدت و بین‌سالی را نادیده بگیرد و موجب کاهش دقت در شناسایی الگوهای واقعی تغییرات شود. بنابراین توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی از داده‌های سری زمانی بلندمدت با وضوح زمانی مناسب استفاده شود. همچنین به‌کارگیری چندین شاخص خشکسالی (مانند SPEI و SPI) همراه با شاخص‌های دمای سطح زمین، امکان تفکیک بهتر اثرات تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی را فراهم می‌آورد و تصویر جامع‌تری از پویایی بوم‌سازگان هیرکانی ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI، EVI و SAVI روند کلی کاهش داشته‌اند که نمایانگر کاهش تراکم و سلامت پوشش گیاهی در این بوم‌سازگان حساس است. در مقابل، شاخص‌های حرارتی مانند LST و TVDI افزایش معناداری را نشان دادند که نشانه‌ای از تشدید شرایط گرمایی و خشکی در منطقه است. این یافته‌ها بیانگر تغییرات مهم اقلیمی و فشارهای محیطی بر جنگل‌های هیرکانی طی دو دهه اخیر است.

با ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی و حرارتی، تصویر دقیق‌تری از شدت و گستره خشکسالی در جنگل‌های مرطوب ارائه شد. شاخص‌هایی مانند NDVI و TVDI، به‌عنوان شاخص‌های حساس به رطوبت و تنش خشکی، به‌خوبی توانستند نواحی تحت تأثیر خشکسالی را مشخص کنند و در تحلیل همبستگی‌ها نیز نقش کلیدی داشتند. این رویکرد چندشاخصی امکان تشخیص بهتر اثرات همزمان تغییرات اقلیمی و تنش‌های زیست‌محیطی را فراهم

ضرورت توجه ویژه به آنها در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریت منابع طبیعی است. در نهایت، یافته‌های این پژوهش اهمیت پایش دقیق و مستمر شاخص‌های پوشش گیاهی و حرارتی را در بوم‌سازگان‌های حساس به تغییرات اقلیمی تأکید می‌کند و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از داده‌های سری زمانی بلندمدت و ترکیب چندین شاخص خشکسالی استفاده شود تا تحلیل‌ها دقیق‌تر و جامع‌تر انجام شود. همچنین، به‌کارگیری چنین رویکردهایی می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در تدوین سیاست‌های مدیریتی و حفاظتی کارآمدتر برای مقابله با پیامدهای خشکسالی و تغییرات اقلیمی کمک کند.

می‌کند که می‌تواند در پایش و مدیریت بوم‌سازگان‌های جنگلی مرطوب مفید باشد.

از نظر مکانی، بخش‌های شرقی و جنوبی جنگل‌های هیرکانی بیشترین حساسیت و آسیب‌پذیری را نسبت به خشکسالی نشان دادند. این مناطق به‌ویژه در بازه زمانی مورد بررسی با کاهش چشمگیر شاخص‌های سبزیگی و افزایش شاخص‌های تنش گرمایی مواجه شدند که می‌تواند به دلیل پراکنش نامتوازن بارش، تراکم کمتر پوشش گیاهی و دماهای بالاتر و تبخیر بیشتر در این نواحی باشد. این شرایط سبب افزایش تنش‌های آبی و آسیب‌پذیری بوم‌سازگان‌های جنگلی نسبت به خشکسالی می‌شود و نشان‌دهنده

References

- Alahacoon, N.; Edirisinghe, M., A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* **2022**, *13* (1), 762–799.
- Alazba, A. A.; Mossad, A.; Geli, H. M.; El-Shafei, A.; Elkatoury, A.; Ezzeldin, M.; ...; Radwan, F., Mapping Land Surface Drought in Water-Scarce Arid Environments Using Satellite-Based TVDI Analysis. *Land* **2025**, *14* (6), 1302.
- Anderson, M. C.; Hain, C.; Otkin, J.; Zhan, X.; Mo, K.; Svoboda, M.; ...; Pimstein, A., An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS-2 simulations with US Drought Monitor classifications. *Journal of Hydrometeorology* **2013**, *14* (4), 1035–1056.
- Avazpour, N.; Faramarzi, M.; Omidipour, R.; Mehdizadeh, H., Monitoring the drought effects on vegetation changes using satellite imagery (Case study: Ilam catchment). *Geography and Environmental Sustainability* **2021**, *11* (4), 125–143. (In Persian)
- Benesty, J.; Chen, J.; Huang, Y.; Cohen, I., Pearson correlation coefficient. In *Noise Reduction in Speech Processing*; Springer: Berlin, Heidelberg, **2009**; pp 1–4.
- Beygi Heidarlou, H.; Oprea-Sorescu, O.; Marcu, M. V.; Borz, S. A., Mapping small-scale willow crops and their health status using Sentinel-2 images in complex agricultural areas. *Remote Sensing* **2024**, *16* (3), 595.
- Chanchí Golondrino, G. E.; Ospina Alarcón, M. A.; Saba, M., Vegetation Identification in Hyperspectral Images Using Distance/Correlation Metrics. *Atmosphere* **2023**, *14* (7), 1148.
- Chander, G.; Markham, B. L.; Helder, D. L., Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* **2009**, *113* (5), 893–903.
- Das, A.C.; Shahriar, S.A.; Chowdhury, M.A.; Hossain, M.L.; Mahmud, S.; Tusar, M.K.; Ahmed, R.; Salam, M.A., Assessment of remote sensing-based indices for drought monitoring in the north-western region of Bangladesh. *Heliyon* **2023**, *9* (2): e14758.
- Eskandari Dameneh, H.; Gholami, H.; Telfer, M. W.; Comino, J. R.; Collins, A. L.; Jansen, J. D., Desertification of Iran in the early twenty-first century: assessment using climate and vegetation indices. *Scientific Reports* **2021**, *11* (1), 20548.
- Farrokhzadeh, B.; Mansouri, S.; Sepehri, A., Determining the correlation between NDVI and EVI vegetation indices and SPI drought index (Case Study: Golestan rangelands). *Journal of Agricultural Meteorology* **2018**, *5* (2), 56–65. (In Persian)
- Gao, B. C., NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation

- liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* **1996**, 58 (3), 257–266.
- Gelata, F. T.; Jiqin, H.; Chaka Gameda, S.; Wubishet Asefa, B., Application of GIS using NDVI and LST estimation to measure climate variability-induced drought risk assessment in Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change* **2023**, 14 (7), 2479–2489.
- Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* **2017**, 202, 18–27.
- Hadinezhad, P.; Asadi, H.; Hojati, S. M.; Tafazoli, M.; Yousefpour, R., Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development* **2025**, 10 (4), 431–451. (In Persian)
- Haile, G. G.; Tang, Q.; Li, W.; Liu, X.; Zhang, X., Drought: Progress in broadening its understanding. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **2020**, 7 (2), e1407.
- Hamidi, S. K.; de Luis, M.; Bourque, C. P. A.; Bayat, M.; Serrano-Notivol, R., Projected biodiversity in the Hyrcanian Mountain Forest of Iran: An investigation based on two climate scenarios. *Biodiversity and Conservation* **2023**, 32 (12), 3791–3808.
- Hoover, D. L.; Pfennigwerth, A. A.; Duniway, M. C., Drought resistance and resilience: The role of soil moisture-plant interactions and legacies in a dryland ecosystem. *Journal of Ecology* **2021**, 109 (9), 3280–3294.
- Hoque, M. A. A.; Pradhan, B.; Ahmed, N., Assessing drought vulnerability using geospatial techniques in northwestern part of Bangladesh. *Science of the Total Environment* **2020**, 705, 135957.
- Hu, Z.; Chen, X.; Chen, D.; Li, J.; Wang, S.; Zhou, Q.; ...; Guo, M., “Dry gets drier, wet gets wetter”: A case study over the arid regions of central Asia. *International Journal of Climatology* **2019**, 39 (2), 1072–1091.
- Huete, A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **1988**, 25 (3), 295–309.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* **2002**, 83 (1–2), 195–213.
- Kloos, S.; Yuan, Y.; Castelli, M.; Menzel, A., Agricultural drought detection with MODIS based vegetation health indices in southeast Germany. *Remote Sensing* **2021**, 13 (19), 3907.
- Kogan, F., Global drought detection and impact assessment from space. In *Droughts*; Routledge: **2016**; pp 196–209.
- Kulkarni, S. S.; Wardlow, B. D.; Bayissa, Y. A.; Tadesse, T.; Svoboda, M. D.; Gedam, S. S., Developing a remote sensing-based combined drought indicator approach for agricultural drought monitoring over Marathwada, India. *Remote Sensing* **2020**, 12 (13), 2091.
- Li, Z. L.; Tang, B. H.; Wu, H.; Ren, H.; Yan, G.; Wan, Z.; ...; Sobrino, J. A., Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment* **2013**, 131, 14–37.
- Liu, Q.; Peng, C.; Schneider, R.; Cyr, D.; McDowell, N. G.; Kneeshaw, D., Drought-induced increase in tree mortality and corresponding decrease in the carbon sink capacity of Canada’s boreal forests from 1970 to 2020. *Global Change Biology* **2023**, 29 (8), 2274–2285.
- Liu, Q.; Zhang, F.; Chen, J.; Li, Y., Water stress altered photosynthesis-vegetation index relationships for winter wheat. *Agronomy Journal* **2020a**, 112 (4), 2944–2955.
- Liu, Q.; Zhang, S.; Zhang, H.; Bai, Y.; Zhang, J., Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. *Science of the Total Environment* **2020b**, 711, 134585.
- Ma, H.; Cui, T.; Cao, L., Monitoring of drought stress in Chinese forests based on satellite solar-induced chlorophyll fluorescence and multi-source remote sensing indices. *Remote Sensing* **2023**, 15 (4), 879.
- Masek, J. G.; Vermote, E. F.; Saleous, N. E.; Wolfe, R.; Hall, F. G.; Huemmrich, K. F.; Gao, F.; Kutler, J.; Lim, T. K. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2006**, 3(1), 68–72.
- McFeeters, S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* **1996**, 17 (7), 1425–1432.
- Mullapudi, A.; Vibhute, A. D.; Mali, S.; Patil, C. H., A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: Methods, issues, challenges and

- opportunities. *Applied Geomatics* **2023**, *15* (1), 1–13.
- Nasiri, V.; Beloiu, M.; Darvishsefat, A. A.; Griess, V. C.; Maftei, C.; Waser, L. T., Mapping tree species composition in a Caspian temperate mixed forest based on spectral-temporal metrics and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2023a**, *116*, 103154.
- Nasiri, V.; Heidarlou, H. B.; Alchin, A. A.; Moradi, F.; Rahmanian, S.; Afshari, S.; ...; Griess, V. C., How do conservation policies, climate and socioeconomic changes impact Hyrcanian forests of northern Iran? *Ecological Informatics* **2023b**, *78*, 102351.
- Nejatiyanpour, E.; Ghorbanzadeh, O.; Strobl, J.; Yousefpour, R.; Kakhki, M. D.; Amirnejad, H.; ...; Sabouni, M. S., Assessing Hyrcanian forest fire vulnerability: socioeconomic and environmental perspectives. *Journal of Forestry Research* **2025**, *36* (1), 35.
- Nila, M. U. S.; Beierkuhnlein, C.; Jaeschke, A.; Hoffmann, S.; Hossain, M. L., Predicting the effectiveness of protected areas of Natura 2000 under climate change. *Ecological Processes* **2019**, *8* (1), 13.
- Orimoloye, I. R.; Ololade, O. O.; Mazinyo, S. P.; Kalumba, A. M.; Ekundayo, O. Y.; Busayo, E. T.; ...; Nel, W., Spatial assessment of drought severity in Cape Town area, South Africa. *Heliyon* **2019**, *5* (7).
- Patil, P. P.; Jagtap, M. P.; Khatri, N.; Madan, H.; Vadduri, A. A.; Patodia, T., Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* **2024**, *9*, 100573.
- Pumo, D.; Viola, F.; Noto, L. V., Climate changes' effects on vegetation water stress in Mediterranean areas. *Ecohydrology: Ecosystems, Land and Water Process Interactions, Ecohydrogeomorphology* **2010**, *3* (2), 166–176.
- Rafiei Sardooi, E.; Azareh, A.; Eskandari Damaneh, H.; Skandari Damaneh, H., Drought monitoring using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products in semi-arid areas of Iran. *Journal of Rangeland Science* **2021**, *11* (4), 402–418. (In Persian)
- Roy, D. P.; Wulder, M. A.; Loveland, T. R.; Cep, W.; Allen, R. G.; Anderson, M. C.; Helder, D.; Johnson, D. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* **2014**, *145*, 154–172.
- Savari, M.; Khaleghi, B.; Sheheyta, A., Iranian farmers' response to the drought crisis: How can the consequences of drought be reduced?. *International Journal of Disaster Risk Reduction* **2024**, *114*, 104910.
- Sękiewicz, K.; Salvà-Catarineu, M.; Walas, Ł.; Romo, A.; Gholizadeh, H.; Naqinezhad, A.; ...; Boratyński, A., Consequence of habitat specificity: a rising risk of habitat loss for endemic and sub-endemic woody species under climate change in the Hyrcanian ecoregion. *Regional Environmental Change* **2024**, *24* (2), 68.
- Selka, I.; Mokhtari, A. M.; Tabet Aoul, K. A.; Bengusmia, D.; Kacemi, M.; Djebbar, K. E. B., Assessing the impact of land use and land cover changes on surface temperature dynamics using Google Earth Engine: a case study of Tlemcen municipality, northwestern Algeria (1989–2019). *ISPRS International Journal of Geo-Information* **2024**, *13* (7), 237.
- Shahzad, A. L. I.; Basit, A.; Umair, M.; Makanda, T. A.; Khan, F. U.; Siqi, S. H. I.; Jian, N. I., Spatio-temporal variations in trends of vegetation and drought changes in relation to climate variability from 1982 to 2019 based on remote sensing data from East Asia. *Journal of Integrative Agriculture* **2023**, *22* (10), 3193–3208.
- Tian, Z.; Fan, J.; Yu, T.; de Leon, N.; Kaeppler, S. M.; Zhang, Z., Mitigating NDVI saturation in imagery of dense and healthy vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2025**, *227*, 234–250.
- Velastegui-Montoya, A.; Montalván-Burbano, N.; Carrión-Mero, P.; Rivera-Torres, H.; Sadeck, L.; Adami, M., Google Earth Engine: a global analysis and future trends. *Remote Sensing* **2023**, *15* (14), 3675.
- Wan, Z.; Hook, S.; Hulley, G., MYD11A1 MODIS/aqua land surface temperature/emissivity daily L3 global 1 km SIN grid V006. *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (DAAC) data set* **2015**, MYD11A1-006.
- Wei, W.; Zhang, J.; Zhou, L.; Xie, B.; Zhou, J.; Li, C., Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data. *Environmental Science and Pollution Research* **2021**, *28* (16), 20408–20425.

- Wei, X.; Huang, S.; Huang, Q.; Liu, D.; Leng, G.; Yang, H.; ...; Peng, J., Analysis of vegetation vulnerability dynamics and driving forces to multiple drought stresses in a changing environment. *Remote Sensing* **2022**, *14* (17), 4231.
- Xu, Z.; Wu, Z.; Shao, Q.; He, H.; Guo, X., From meteorological to agricultural drought: Propagation time and probabilistic linkages. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **2023**, *46*, 101329.
- Yan, K.; Gao, S.; Yan, G.; Ma, X.; Chen, X.; Zhu, P.; Li, J.; Gao, S.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Myneni, R. B.; Wang, Q., A global systematic review of the remote sensing vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2025**, *139*, 104560.
- Yang, D.; Yang, Y.; Xia, J., Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability* **2021**, *2* (2), 115–122.
- Yang, X.; Zhou, H.; Liu, F., Utilizing a vegetation restoration potential model to derive a reference for assessing ecological restoration of the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering* **2025**, *212*, 107514.
- Yao, Y.; Liu, Y.; Zhou, S.; Song, J.; Fu, B., Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought. *Global Change Biology* **2023**, *29* (13), 3562–3574.
- Zhu, Z.; Woodcock, C. E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment* **2014**, *144*, 152–171.

