



Temporal and Spatial Analysis of Long-Term Trends in Hyrcanian Forests and the Role of Climate

Ahmad Abbasnezhad Alchin^{1*} , Ali Asghar Darvish Sefat²

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: Ahmad.aa1993@yahoo.com

2. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: Adarvish@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 18 November 2024

Received in revised form: 3

March 2025

Accepted : 10 May 2025

Published online: 4 August

2025

Keywords:

Hyrcanian forests,
long-term trend,
temperature,
precipitation,
EVI,
Browning and Greening

ABSTRACT

Objectives: Forest ecosystems are one of the main components of the Earth's biosphere with a unique response to climate change. Investigating the long-term trend of changes in this ecosystem and their response to climate change is necessary for sustainable management, increasing understanding of the impact of climate change and the global carbon cycle. The importance of this type of research in the Hyrcanian forests Within the geographical range of 5°35'45" to 15°38'26" North and 45°38'33" to 11°15'56" East, which have been introduced by UNESCO as one of the most unique mountain ecosystems in the world, is twofold due to the faster changes of climatic parameters at high altitudes as well as the existence of a different bioclimate. Therefore, the aim of the current research is to investigate the long-term trend of Hyrcanian forests in time and space and their relationship with changes in climatic parameters.

Methods: For this purpose, the MOD13Q1 and MYD13Q1 products of the MODIS sensor were combined and a time series with an interval of 8 days and a spatial separation of 250 meters was prepared from the EVI vegetation cover index for the period from 2003 to 2020. Also, data from synoptic stations that were less than 10 km from the forest were prepared and a time series of average minimum temperature (T_{min}), average maximum temperature (T_{max}) and total precipitation (P) every 8 days (corresponding to the date of EVI data) For each station, it was built in the mentioned time period. Then the Kendall test and its significance were used to investigate the long-term change trend of Hyrcanian forests and the Pearson coefficient was used to investigate the correlation of climatic parameters with the average EVI in the forest areas that are 5 and 10 km away from the meteorological station.

Results: The results of the long-term trend showed that greening and browning phenomena have occurred in 77 and 23% of the region, respectively, of which 34.54% of the region includes 30.56% of greening trends and 3.98% of browning trends at $\rho < 0.01$. They are meaningful. Also, significant greening trends at the levels of $\rho < 0.01$ to $\rho < 0.05$ and $\rho < 0.05$ to $\rho < 0.10$ respectively in 11.19 and 6.22% of the region and significant browning trends at the levels of $\rho < 0.01$ to $\rho < 0.05$ and $\rho < 0.05$ to $\rho < 0.10$ respectively in 2.20 and It occurred in 1.61% of the region. The Pearson correlation between EVI and climatic parameters showed that EVI has a positive and strong correlation with temperature (more than 0.6) and a weak correlation with precipitation (between 0.11 and -0.181).

Conclusion: Overall, the present study confirms Greening for Hyrcanian forests over an 18-year time span, and identifies temperature as its main climatic factor.

Cite this article: Abbasnezhad Alchin, A., & Darvish Sefat, A.A. (2025). Temporal and Spatial Analysis of Long-Term Trends in Hyrcanian Forests and the Role of Climate. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 5 (16), 114-130. <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.64404.1114>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.64404.1114>

Publisher: University of Tabriz.



Extended Abstract

Introduction

Forests play a crucial role in the biosphere by providing goods and services such as food, medicinal resources, soil stabilization, erosion prevention, recreational opportunities, and aesthetic values. They are integral to the global climate system through energy, carbon, and water exchanges between the biosphere and the atmosphere (Parida et al., 2020; Abbasnezhad et al., 1399). In recent decades, climate change has profoundly affected biodiversity, forest productivity, and carbon stocks, exacerbating global warming, one of the 21st century's most pressing concerns (Forkel et al., 2013; Ghanbari et al., 2022). Understanding long-term forest dynamics and their relationships with climate variables like precipitation, temperature, and evapotranspiration has become a priority.

Remote sensing technology has enabled large-scale and systematic monitoring of forest ecosystem dynamics. Vegetation indices, derived from satellite data, have proven particularly effective for studying long-term trends. Among these, the Enhanced Vegetation Index (EVI) is a valuable proxy for vegetation cover and photosynthetic capacity, offering advantages over NDVI, such as reduced sensitivity to atmospheric effects and a lower likelihood of saturation in dense vegetation (Qiu et al., 2018; Kiapasha et al., 2017). MODIS-derived EVI time series provide consistent data at spatial resolutions of 250 to 1000 meters and temporal intervals of 16 days (Liu et al., 2016). Long-term changes in EVI reveal trends of greening (increasing vegetation) and browning (decreasing vegetation) that reflect both climatic and anthropogenic influences (Yu et al., 2020; Burrell et al., 2017). This study focuses on analyzing the spatial and temporal trends of the Hyrcanian forests using MODIS EVI data. Additionally, it investigates the impacts of climatic parameters, including minimum temperature (T_{min}), maximum temperature (T_{max}), and precipitation (P), on these trends over the period 2003–2021.

Materials and Methods

The Hyrcanian forests are located along the southern coast of the Caspian Sea in northern Iran, within the geographical range of $35^{\circ}35'45''$ to $38^{\circ}26'15''$ North and $48^{\circ}38'33''$ to $51^{\circ}15'56''$ East. These deciduous mountain forests are characterized by their rich biodiversity and unique ecological significance. They span a broad elevation gradient from sea level to 2,800 meters and encompass various vegetation communities, including Parrotio-Carpinetum and Fagetum hyrcanum. The forests are influenced by a distinctive climate, with annual precipitation ranging from 1,000 to 1,800 mm and annual temperatures fluctuating between 10°C and 18°C . For this study, Enhanced Vegetation Index (EVI) data from the MODIS sensor were utilized, specifically the MOD13Q1 and MYD13Q1 products. These datasets provide 8-day composite time series at a 250-meter spatial resolution, corrected for atmospheric disturbances and Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) effects. The time series spans the period from 2003 to 2020 and represents a valuable resource for analyzing vegetation dynamics.

Meteorological data were obtained from synoptic stations located within 10 km of the forested areas. For each station, time series of climatic parameters, including average minimum temperature (T_{min}), average maximum temperature (T_{max}), and total precipitation (P), were constructed for the same 8-day intervals as the MODIS EVI data. These time series ensure consistency in temporal resolution, facilitating robust comparisons between climatic variables and vegetation dynamics. The data processing steps involved several key procedures:

Time Series Analysis: Seasonal components in the EVI data were removed using standard detrending formulas to isolate long-term patterns.

Trend Analysis: The Kendall test was employed to evaluate the significance of long-term trends in EVI values across the Hyrcanian forests. This non-parametric statistical method is widely recognized for its robustness in detecting monotonic trends in environmental datasets. Results were mapped at significance levels of 1%, 5%, and 10%.

Correlation Analysis: The Pearson correlation coefficient was calculated to quantify the relationships between climatic variables (T_{min} , T_{max} , and P) and the average EVI values. This analysis was performed for forest areas situated within 5-km and 10-km buffers around the synoptic stations.



Results

The analysis of MODIS EVI time series data revealed notable spatial and temporal trends in the Hyrcanian forests. Approximately 77.02% of the forested region exhibited greening trends, while 22.98% experienced browning. Among the greening trends, 30.56% were statistically significant at the 1% confidence level, with additional greening trends showing significance at 5% (11.19%) and 10% (6.22%) levels. Conversely, browning trends accounted for 3.98%, 2.20%, and 1.61% at 1%, 5%, and 10% confidence levels, respectively. These findings highlight the dominance of greening trends across the Hyrcanian forests, particularly in central and western regions, while browning was more prevalent in the eastern areas. Spatial analysis revealed that greening trends were closely associated with areas of less anthropogenic disturbance, whereas browning trends were linked to regions impacted by land-use changes, pest infestations, and drought (Kiapasha et al., 2017; Prăvălie et al., 2022). Greening was especially prominent in areas with increasing minimum and maximum temperatures (T_{min} and T_{max}), indicating their role in enhancing vegetation growth and photosynthesis. Pearson correlation analysis confirmed strong positive relationships between EVI and T_{min} ($r = 0.645$) and T_{max} ($r = 0.648$) across meteorological stations. Interestingly, precipitation (P) exhibited a weak negative correlation with EVI (-0.07 to -0.18), suggesting that increased precipitation may have a less pronounced impact on vegetation trends compared to temperature. These results align with global findings that temperature plays a dominant role in driving vegetation dynamics (Prăvălie et al., 2022; Li et al., 2021). The analysis underscores the importance of using high-resolution and systematic datasets, such as MODIS EVI, to assess forest ecosystem dynamics under climate change influences.

Conclusion

This study highlights the critical role of climatic factors in shaping the long-term dynamics of the Hyrcanian forests. Greening trends were primarily associated with increasing temperatures, which stimulate vegetation growth and photosynthesis. Conversely, browning trends were linked to disturbances such as drought, pest outbreaks, and human activities like deforestation and land conversion. These findings underscore the importance of temperature as a key driver of forest dynamics in the Hyrcanian region. The results demonstrate the utility of MODIS EVI data and Google Earth Engine (GEE) as powerful tools for monitoring forest dynamics and assessing the impacts of climate change. Such insights are vital for developing effective strategies for the sustainable management of these ecologically significant forests. Future research should focus on integrating high-resolution datasets and exploring other climatic and anthropogenic drivers to enhance our understanding of forest ecosystem responses.

References

- Abbasnezhad Alchin A, Darvish Sefat A A, Bazrafshan J. 2020. Preparation and estimating of evapotranspiration maps based on Landsat 8 satellite data and SEBAL model in Hyrcanian forests (Case study: Pol-Sefid and Kiasar forests). *Forest and Wood Products*, 73(3): 259-270. <https://doi.org/10.22059/jfw.2020.284419.1007>. (In Persian).
- Burrell, A. L., Evans, J. P., & Liu, Y. (2017). Detecting dryland degradation using time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND). *Remote Sensing of Environment*, 197, 43-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.018>.
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S., & Reichstein, M. (2013). Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5(9), 2113-2144. doi: <https://doi.org/10.3390/rs5052113>.
- Ghanbari Motlagh, M., Abbasnezhad Alchin, A., & Daghestani, M. (2022). Detection of high fire risk areas in Zagros Oak forests using geospatial methods with GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 835. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10192-5>
- Kiapasha K, Darvishsefat AA, Zargham N, Attarod P, Nadi M, Schaepman M. (2017). Greening trend in the Hyrcanian forests using NOAA NDVI time series during 1981-2012. *Forest and Wood Products*, 70(3): 409-420. <https://doi.org/10.22059/jfw.2017.206833.748> (In Persian).



- Li, Y., Chen, Y., Sun, F., & Li, Z. (2021). Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan Mountain, Central Asia. *Ecological Indicators*, 129, 107912. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107912>.
- Liu, Y., Wu, C., Peng, D., Xu, S., Gonsamo, A., Jassal, R. S., ... & Chen, J. M. (2016). Improved modeling of land surface phenology using MODIS land surface reflectance and temperature at evergreen needleleaf forests of central North America. *Remote Sensing of Environment*, 176, 152-162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.001>.
- Parida, B. R., Pandey, A. C., & Patel, N. R. (2020). Greening and browning trends of vegetation in India and their responses to climatic and non-climatic drivers. *Climate*, 8(8), 92. doi: <https://doi.org/10.3390/cli8080092>.
- Prăvălie, R., Sîrodoev, I., Nita, I. A., Patriche, C., Dumitraşcu, M., Roşca, B., ... & Birsan, M. V. (2022). NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*, 136, 108629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108629>
- Qiu, J., Yang, J., Wang, Y., & Su, H. (2018). A comparison of NDVI and EVI in the DisTrad model for thermal sub-pixel mapping in densely vegetated areas: A case study in Southern China. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8): 2105-2118. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1443229>
- Yu, L., Yan, Z., & Zhang, S. (2020). Forest Phenology Shifts in Response to Climate Change over China–Mongolia–Russia International Economic Corridor. *Forests*, 11(7), 757. doi: <https://doi.org/10.3390/f11070757>

بررسی زمانی و مکانی روند تغییرات بلندمدت جنگل‌های هیرکانی و نقش اقلیم بر آن‌ها

احمد عباس‌نژاد الجین^{۱*}؛ علی اصغر درویش‌صفت^۲

۱. دکتری جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Ahmad.aa1993@yahoo.com

۲. استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Adarvish@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

طرح مسئله: اکوسیستم‌های جنگلی به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی بیوسفر زمین، واکنش‌های منحصر به فردی به تغییرات آب‌وهوایی نشان می‌دهند. درک تغییرات بلندمدت این اکوسیستم‌ها و ارتباط آن‌ها با تغییرات اقلیمی برای مدیریت پایدار و فهم بهتر تأثیرات آب‌وهوایی و چرخه جهانی کربن ضروری است. جنگل‌های هیرکانی، به‌عنوان یکی از زیست‌بوم‌های منحصر به فرد جهان که توسط یونسکو به رسمیت شناخته شده‌اند، به دلیل تغییرات سریع اقلیمی در ارتفاعات و تنوع زیست‌اقلیمی، اهمیت ویژه‌ای دارند. هدف این پژوهش، تحلیل زمانی و مکانی روند بلندمدت جنگل‌های هیرکانی و بررسی ارتباط آن‌ها با تغییرات پارامترهای اقلیمی است.

هدف: هدف پژوهش حاضر بررسی زمانی و مکانی روند بلندمدت جنگل‌های هیرکانی و ارتباط آن‌ها با تغییرات پارامترهای اقلیمی است.

کلیدواژه‌ها:

جنگل‌های هیرکانی،

روند بلندمدت، دما،

بارش، EVI

Greening و Browning

روش تحقیق: پژوهش حاضر در کل جنگل‌های هیرکانی در محدوده جغرافیایی ۴۵° ۳۵' ۵" تا ۴۵° ۳۸' ۱۵" شمالی و ۴۵° ۳۸' ۴۵" تا ۳۳° ۳۸' ۱۵" شرقی که تراکم تاج پوشش بالای ۱۰ درصد دارد انجام شده. به این منظور محصولات MOD13Q1 و MYD13Q1 سنجنده MODIS با هم ترکیب و سری زمانی با فاصله ۸ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر از شاخص پوشش گیاهی EVI برای دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ تهیه شد. همچنین داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک که در فاصله‌ای کمتر از ۱۰ کیلومتری از جنگل قرار داشتند تهیه و سری زمانی از میانگین دمای حداقل، میانگین دمای حداکثر و مجموع بارش در هر ۸ روز (متناسب با تاریخ داده‌های EVI) برای هر یک از ایستگاه‌ها در بازه زمانی یاد شده ساخته شد. سپس از آزمون کندال و معنی‌داری آن برای بررسی روند تغییرات بلندمدت جنگل‌ها هیرکانی و از ضریب پیرسون برای بررسی همبستگی پارامترهای اقلیمی با میانگین EVI در محدوده‌های جنگلی که در فاصله ۵ و ۱۰ کیلومتری ایستگاه هواشناسی، استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج روند بلندمدت نشان داد، پدیده‌های Greening و Browning به ترتیب در ۷۷ و ۲۳ درصد منطقه رخ داده‌اند که از این مقدار ۳۴/۵۴ درصد از منطقه شامل ۳۰/۵۶ درصد از روندهای Greening و ۳/۹۸ درصد از روندهای Browning در سطوح ۱٪ معنی‌دار هستند. همچنین روندهای Greening معنی‌دار در سطوح ۱ تا ۵٪ و ۵ تا ۱۰٪ به ترتیب در ۱۱/۱۹ و ۶/۲۲ درصد از منطقه و روندهای Browning معنی‌دار در سطوح ۱ تا ۵٪ و ۵ تا ۱۰٪ به ترتیب در ۲/۲۰ و ۱/۶۱ درصد از منطقه رخ داده است. همبستگی پیرسون بین EVI و پارامترهای اقلیمی نشان داد که EVI همبستگی مثبت و قوی با دما (بیش از ۰/۶) و همبستگی ضعیف با بارش (بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۸۱) دارد.

نتیجه‌گیری: در کل، مطالعه حاضر Greening را برای جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی ۱۸ ساله، تایید و دما را به عنوان عامل اصلی اقلیمی آن معرفی می‌کند.

استناد: عباس‌نژاد الجین، احمد؛ و درویش‌صفت، علی‌اصغر (۱۴۰۳). بررسی زمانی و مکانی روند تغییرات بلندمدت جنگل‌های هیرکانی و نقش اقلیم بر آن‌ها. کاربرد

سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۵ (۱۶)، ۱۱۴-۱۳۰

http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.64404.1114



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه تبریز

مقدمه

اکوسیستم جنگل‌ها، در کنار ارائه کالاها و خدماتی مانند مواد غذایی، منابع دارویی، ارزش‌های زیباشناسی، فرصت‌های تفریحی، تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش (مباتا و زولو، ۲۰۱۸؛ پریدا و همکاران، ۲۰۲۰)، یک جزء اصلی بیوسفر است که از طریق تبادل انرژی، کربن و آب بین زیست کره و جو نقش فعالی در سیستم اقلیمی دارد (عباس‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۹؛ پان و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱). در دهه‌های اخیر اطمینان حاصل شده که تغییر اقلیم تأثیر عمیقی بر تنوع زیستی، بهره‌وری، ذخایر کربن جنگل‌ها و در نهایت گرم شدن کره زمین که در قرن بیست و یکم به یکی از مهمترین نگرانی جوامع انسان تبدیل شده، دارد (بیگزبی، ۲۰۰۹؛ فورکل و همکاران، ۲۰۱۳؛ قنبری و همکاران، ۲۰۲۲). از این رو، حفاظت از کالاها و خدمات اکوسیستم‌های جنگلی یک وظیفه چالش برانگیز برای جوامع جنگل‌بانی و سیاست‌گذاران آن به دلیل افزایش آشفتگی‌های ناشی از گرمایش جهانی تبدیل شد است (عباس‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین، درک صحیح از روند بلندمدت تغییرات جنگل‌ها و ارتباط آن‌ها با متغیرهای اقلیمی مانند بارش، دما و تبخیر و تعرق در اولویت قرار گرفته است.

امروزه امکان پایش پویایی اکوسیستم‌های جنگلی توسط داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای فراهم شده است. اهمیت این داده‌ها در مطالعه روندهای بلندمدت پوشش‌های جنگلی رو به افزایش است (آلکاراز-سگورا و همکاران، ۲۰۱۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۸). زیرا اطلاعات به‌روز را در مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ ارائه می‌دهند، که می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های میدانی باشد. مشاهدات سیستماتیک ماهواره‌ای امکان بررسی روند پوشش‌ها جنگلی از دهه‌های گذشته تاکنون را فراهم می‌کند (کوئنزر و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). برای این منظور سنجش از دور از شاخص‌های پوشش گیاهی که از ترکیبی باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک حاصل می‌شود، استفاده می‌کنند (مشرا و ماینالی، ۲۰۱۷). یکی از مهم‌ترین این شاخص‌ها، شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI)^{۱۲} است که ارتباط نزدیکی با مقدار پوشش گیاهی، ظرفیت فتوسنتزی و... دارند و می‌توانند یک جایگزینی مناسب^{۱۳} برای داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مستقیم مشخصه‌های جنگل باشد و برای کمی‌سازی و بیان جنبه‌هایی از وضعیت آن از جمله تغییرات روند بلندمدت به کار رود (جین و همکاران، ۲۰۲۰؛ برلانگا-روبلز و رویز-لونا، ۲۰۲۰). هرگونه تغییر در این شاخص نشان‌دهنده تغییر در فعالیت و سبزیگی پوشش گیاهی خواهد بود (بورنز و همکاران، ۲۰۲۰). شاخص EVI نسبت به شاخص معروف NDVI مزایای مانند حساسیت کمتر به اثرات جوی، ضریب تصحیح خاک و احتمال اشباع شدگی کمتر در مناطقی با پوشش گیاهی بسیار متراکم را داد (کیاپاشا و همکاران، ۱۳۹۶؛ کیو و همکاران، ۲۰۱۸). محصولات پوشش گیاهی سنجنده MODIS که بر روی ماهواره‌های Aqua و Terra قرار دارد، یک از مهم‌ترین منبع سری زمانی شاخص EVI هستند. محصولات EVI این سنجنده با تفکیک‌های مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر و فاصله زمانی ۱۶ روزه و براساس الگوریتم ترکیب حداکثر ارزش^{۱۸} تهیه می‌شوند (لیو و همکاران، ۲۰۱۶؛ دکا و همکاران،

1. Mbatha & Xulu, 2018
2. Parida et al., 2020
3. Pan et al., 2018
4. Li et al., 2021
5. Bigsby, 2009
6. Forkel et al., 2013
7. Ghanbari et al., 2022
8. Alcaraz-Segura et al., 2010
9. Kuenzer et al., 2015
10. Zhang et al., 2017
11. Mishra & Mainali, 2017
12. Enhanced Vegetation Index
13. Proxy
14. Jin et al., 2020
15. Berlanga-Robles and Ruiz-Luna, 2020
16. Bórnez et al., 2020
17. Qiu et al., 2018
18. Maximum Voluntary Contraction (MVC)
19. Liu et al., 2016

۲۰۱۹^۱). تغییرات درون سری‌های زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی به سه دسته تغییرات ناگهانی، فصلی و بلندمدت تقسیم می‌شود (عباس‌نژاد و درویش‌صفت، ۱۴۰۲). که تغییرات بلندمدت می‌تواند در اثر تغییرات تدریجی اقلیمی یا شیوه‌های مدیریت زمین مانند تغییر کاربری ایجاد می‌شود (پادهی و دوتا، ۲۰۱۹)^۲، که نتایج این تغییرات در سری زمانی شاخص پوشش گیاهی به‌صورت روندهای مثبت یا افزایشی (Greening) و منفی یا کاهش (Browning) نمایان می‌شوند (مسیح‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ بورل و همکاران، ۲۰۱۷^۳؛ یو و همکاران، ۲۰۲۰^۴).

بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد که سری‌های زمانی EVI مشتق‌شده از مشاهدات MODIS به‌طور گسترده برای مطالعه روند بلندمدت پوشش گیاهان استفاده شد است. به عنوان مثال؛ کوماری و همکاران، (۲۰۲۱)^۵ با هدف تعیین روند بلندمدت پوشش گیاهی در حوضه رودخانه Upper Khoh در رشته‌کوه‌های هیمالیا واقع در هند، از سری زمانی MODIS-EVI با فاصله زمانی ۱۶ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر در در بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش روند Greening در پوشش گیاهی در طول دوره مورد بررسی را نشان داده است. هه و همکاران، (۲۰۲۲)^۶ با استفاده از سری زمانی داده‌های MODIS-EVI با فاصله زمانی ۱۶ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰، به بررسی روند بلند مدت جنگل‌ها در منطقه مکونگ در چین پرداختند. نتایج Greening با شیب ملایم را در این جنگل‌ها نشان داده است. عباس‌نژاد و درویش‌صفت (۱۴۰۲) روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی در استان مازندران را با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI با فاصله زمانی ۸ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داده که ۸۷ درصد از منطقه روند افزایشی و ۱۳ درصد روند کاهش داشته است. مسیح‌پور و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI با فاصله زمانی ۱۶ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر تحقیقی با هدف بررسی روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی در استان کردستان در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داده که ۹۷ درصد منطقه روند Greening داشته اما تنها ۱۲ درصد این روندها در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. کیاپاشا و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از سری زمانی GIMMS-NDVI با فاصله زمانی ۱۵ روزه و تفکیک مکانی ۸ کیلومتری، تحقیقی با هدف بررسی روند بلندمدت تغییرات در کل جنگل‌های هیرکانی در طی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۸۱ انجام دادند. نتایج نشان داده که در ۷۵/۳۵ درصد از جنگل‌های هیرکانی روند Greening رخ داده است. براساس یافته‌های این مطالعات بررسی روند بلندمدت اکوسیستم‌های جنگلی و پاسخ آن‌ها به تغییرات اقلیمی برای مدیریت پایدار و درک بهتر چرخه جهانی کربن ضروری است. ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی به دلیل وسعت و پیچیدگی آن دشوار بوده، اما توسعه سنجش از دور ماهواره‌ای امکان نظارت مؤثر را فراهم کرده است. در این میان، شاخص EVI سنجنده MODIS به دلیل دقت بالاتر، بیشترین کاربرد را در مطالعات پوشش گیاهی داشته است.

جنگل‌ها یک جزء مهم در بیوسفر است که آگاهی از روند تغییرات مکانی و زمانی آن‌ها، می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های راهبردی و کلان مدیریتی اثر گذارد و از این طریق بر مدیریت پایدار جنگل‌ها، اکوسیستم‌های طبیعی، تغییرات اقلیمی و تنوع زیستی در آینده کمک شایانی کند. اهمیت این پژوهش‌ها در جنگل‌های کوهستانی به دلیلی وجود زیست اقلیم‌های^۷ متفاوت دو چندان است. جنگل‌های هیرکانی از جمله جنگل‌های کوهستانی خزان‌کننده با تنوع زیستی بالا در ایران هستند، که بخش‌های از آن از طرف یونسکو به‌عنوان یکی از منحصربه‌فردترین و باشکوه‌ترین زیست‌بوم‌های جهان معرفی شده است (ثاقب طالبی و همکاران، ۲۰۱۴^۸؛ مروی مهاجر، ۱۳۹۰؛ حسینی و همکاران، ۲۰۱۹^۹). با این حال، تنها یک مطالعه توسط کیاپاشا و همکاران (۱۳۹۶) انجام

1. Deka et al., 2019
2. Padhee & Dutta, 2019
3. Burrell et al., 2017
4. Yu et al., 2020
5. Kumari et al. 2021
6. He et al. 2022
7. Bioclimat
8. Sagheb Taleb et al., 2014
9. Hosseini, et al., 2019

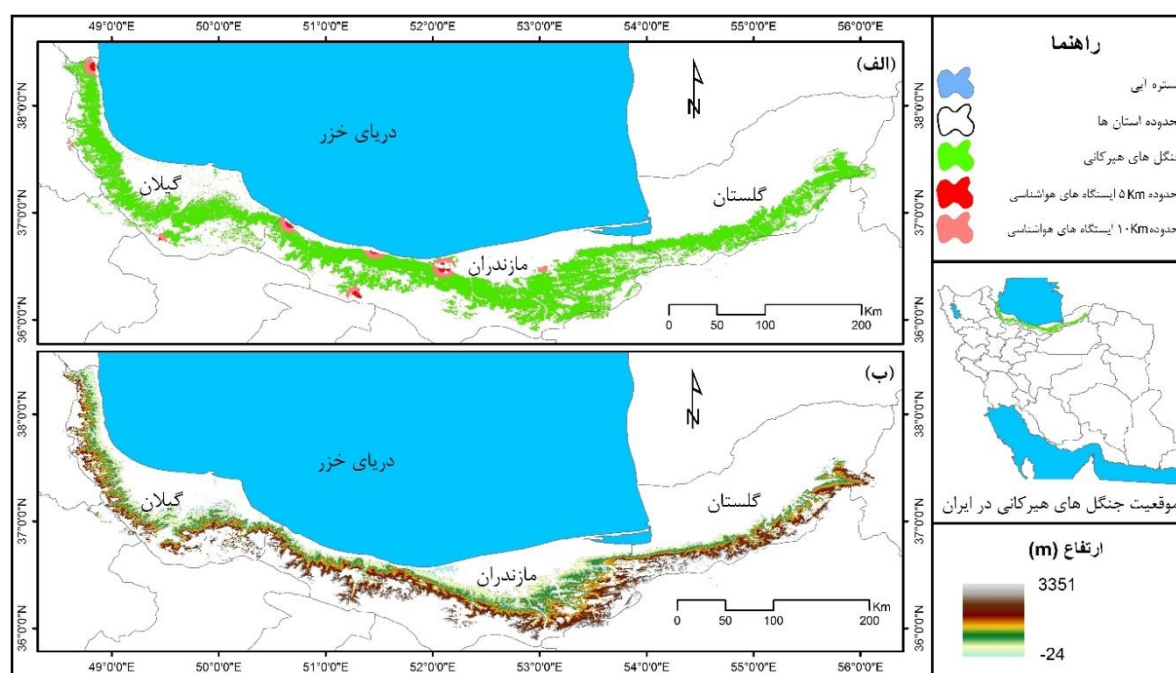
شده که روند بلندمدت این جنگل‌ها را با سری زمانی ۱۵ روزه و تفکیک مکانی ۸ کیلومتری بررسی کرده است. با توجه به تنوع زیستی و ریزاقلیم‌های موجود در جنگل‌های هیرکانی، ضروری است که مطالعات بیشتری با استفاده از سری زمانی با تفکیک مکانی و فاصله زمانی کمتر، و همچنین بررسی پاسخ جنگل‌های هیرکانی به هر یک از پارامترهای اقلیمی انجام شود. از این رو هدف مطالعه حاضر (۱) تجزیه و تحلیل مکانی و زمانی روندهای بلندمدت جنگل‌های هیرکانی با استفاده از سری زمانی شاخص EVI سنجنده MODIS با فاصله زمانی ۸ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و (۲) بررسی تاثیر پارامترهای اقلیمی میانگین دمای حداقل، میانگین دمای حداکثر و بارش بر تغییرات بلندمدت جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۰۳ است.

۱. مواد و روش تحقیق

مطالعه حاضر یک پژوهش کاربردی با هدف بررسی روند زمانی و مکانی تغییرات جنگل‌های هیرکانی و ارتباط آن‌ها با تغییرات پارامترهای اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۰۳ است. جنگل‌های هیرکانی به دلیل اهمیت زیست‌محیطی و همچنین تأثیرات تغییرات سریع پارامترهای اقلیمی در ارتفاعات، از جمله مهم‌ترین زیست‌بوم‌های جهانی محسوب می‌شوند که نیازمند مطالعات دقیق و پایش بلندمدت هستند. در این پژوهش، از سری زمانی شاخص پوشش گیاهی EVI، تهیه شده از محصولات MOD13Q1 و MYD13Q1 سنجنده MODIS با فاصله زمانی ۸ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، استفاده شده است. علاوه بر این، داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک نزدیک به محدوده جنگلی شامل میانگین دمای حداقل، دمای حداکثر و مجموع بارش به‌صورت همزمان با داده‌های EVI برای تحلیل روند و همبستگی اقلیمی به‌کار گرفته شده‌اند. برای انجام تحلیل‌ها، از آزمون کندال و ضریب پیرسون بهره گرفته شده است. استفاده از فناوری‌های سنجش از دور ماهواره‌ای در کنار ابزارهای پردازش ابری نظیر گوگل ارث انجین (GEE^۱) امکان تحلیل دقیق و کارآمد این داده‌ها را فراهم کرده است. این رویکرد به دلیل پردازش سریع، دسترسی رایگان و توانایی بررسی تغییرات در مقیاس‌های زمانی و مکانی گسترده، به‌ویژه در پژوهش‌های اکوسیستمی و اقلیمی، بسیار کاربردی و کارآمد است.

۱-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه کل جنگل‌های هیرکانی ایران با وسعت حدود ۱,۹ میلیون هکتار است که در محدوده جغرافیایی $35^{\circ} 45'$ تا $38^{\circ} 15'$ شمالی و $33^{\circ} 38'$ تا $56^{\circ} 15'$ شرقی واقع شده (شکل ۱). این جنگل‌ها نوار باریکی از جنگل‌های پهن برگ خزان کننده معتدل در سواحل جنوبی دریای خزر و دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز در استان‌های گیلان، مازندران و گلستان قرار گرفته است. جنگل‌های هیرکانی از سطح دریا تا ارتفاع تقریبی ۲۸۰۰ متر امتداد دارند و ۱۸۰ گونه مختلف چوبی (درخت و درختچه) را در خود جای داده‌اند (مروی مهاجر، ۱۳۹۰) که چهار گونه *Parotia Pterocarya Fraxinifolia*، *Gleditschia Caspica* به‌عنوان گونه بومی شناخته می‌شوند. این جنگل‌ها بیشتر بصورت توده‌های مختلط و گاهی اوقات توده‌های خالص شکل گرفته‌اند و جوامع درختی غالب آن در ارتفاعات پایین‌تر عبارت‌اند از: *Quercus-Buxetum*، *Parrotio-Carpinetum*، *Pterocaryo-Alnetum* و *Quercus-Carpinetum*. در ارتفاعات میانی *Fagetum hyrcanum* و در ارتفاعات بالاتر *Macrantetum orientale* و *Macrantetum* می‌باشد (ثاقب طالبی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مروی مهاجر، ۱۳۹۰). به‌طور کلی اقلیم جنگل‌های هیرکانی در شرق مدیترانه‌ای گرم و در غرب مدیترانه‌ای (مروی مهاجر، ۱۳۹۰) با میانگین بارندگی سالانه ۱۰۰۰ میلی‌متر است که از غرب به شرق کاهش می‌یابد (ثاقب طالبی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین میانگین دمای سالانه این منطقه از ۱۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است (ثاقب طالبی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مروی مهاجر، ۱۳۹۰).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی جنگل‌های هیرکانی (الف) و وضعیت توپوگرافی (ب) آن‌ها
Fig. 1. Geographical location of Hyrcanian forests (a) and their topographical situation (b)

۱-۲. داده‌های مورد استفاده

به منظور بررسی روند بلندمدت جنگل‌های هیرکانی از نسخه ۶ محصولات MOD13Q1 و MYD13Q1 که به ترتیب از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra و Aqua تهیه شده‌اند، استفاده شد. هر دو این مجموعه داده‌های شامل شاخص EVI با تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و فاصله زمانی ۱۶ روزه هستند که پس از اعمال تصحیحات اتمسفری در سطح ۳ و تصحیح BRDF از روی تصاویر روزانه سنجنده MODIS محاسبه و سپس بر اساس الگوریتم ترکیب حداکثر ارزش (MVC) به ۱۶ روزه تبدیل می‌شوند (تستا و همکاران، ۲۰۱۸؛ چن و همکاران، ۲۰۲۱). اما وجود داده‌های پرت در سری زمانی این محصولات نشان می‌دهد که این سطح از تصحیحات هم نتوانسته تأثیرات ابر، برف و یخ را کامل از بین ببرد (استل و همکاران، ۲۰۱۵). در این مطالعه برای از بین بردن این تأثیرات در هر تصویر، پیکسل‌های پوشیده از ابر، برف و یخ بر اساس اطلاعات تضمین کیفیت^۴ MODIS حذف شد. همچنین به منظور بهبود کیفیت سری‌های زمانی و افزایش مشاهدات قابل استفاده در هر سال از ۲۳ به ۴۶ تصویر (استل و همکاران، ۲۰۱۵؛ لوینتل و همکاران، ۲۰۲۱)، دو محصول MOD13Q1 و MYD13Q1 با هم ترکیب و یک سری زمانی با ۸۲۸ تصویر با فاصله ۸ روزه از شاخص EVI برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ تهیه شد. علاوه بر این‌ها، اثر مؤلفه فصلی درون سری‌های زمانی با استفاده از رابطه ۱ حذف شد (ایستمن، ۲۰۰۹؛ شوکنخت و همکاران، ۲۰۱۳؛ کیپاشا و همکاران، ۱۳۹۶).

$$x_i = v_i - \mu \quad \text{رابطه ۱)}$$

1. Testa et al., 2018
2. Chen et al., 2021
3. Estel et al., 2015
4. MODIS quality assurance information
5. Luintel et al., 2021
6. Eastman, 2009
7. Schucknecht et al., 2013

در رابطه بالا، x_i ارزش NDVI ۸ روزه پس از حذف مؤلفه فصلی، v_i ارزش NDVI ۸ روزه، i تعداد تصویر در سری زمانی (۸۲۸-۱) و μ میانگین ارزش NDVI در کل طول دوره است.

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای اقلیمی بر تغییرات بلندمدت جنگل، داده‌های روزانه تمام ایستگاه سینوپتیکی که در فاصله‌ای کمتر از ۱۰ کیلومتر از جنگل‌های هیرکانی قرار داشتند و همچنین در بازه ۲۰۰۳ - ۲۰۲۰ داده اقلیمی را کامل برداشت کرده بودند، از سازمان هواشناسی تهیه شد. سپس سری زمانی از میانگین دمای حداقل، میانگین دمای حداکثر و مجموع بارش در هر ۸ روزه (متناسب با تاریخ داده‌های EVI) برای هر یک ایستگاه‌های در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ ساخته شد. علاوه بر این، دو بافر با فاصله ۵ و ۱۰ کیلومتری از ایستگاه‌های هواشناسی زده و سپس محدوده جنگل داخل هر بافر مشخص شد. در نهایت برای هر یک از این محدوده‌های جنگلی که در فاصله ۵ و ۱۰ کیلومتری ایستگاه سینوپتیک قرار داشتند، میانگین شاخص EVI استخراج و سری زمانی از آنها در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ با فاصله ۸ روزه تهیه شد.

تمامی پیش پردازش و پردازش‌ها مربوط به شاخص پوشش گیاهی در محیط گوگل ارث انجین (GEE)^۱ که یک پلتفرم مبتنی بر ابر^۲ با زبان برنامه نویسی جاوا اسکریپت و مجموعه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های جغرافیایی است، انجام شد.

۳-۱. روش اجرای پژوهش

تجزیه و تحلیل روند تغییرات بلندمدت در کل جنگل‌های هیرکانی با استفاده از کندال و معنی‌داری کندال انجام شد. کندال یک آزمون تحلیل روند ناپارامتریک برای شناسایی روند متغیر موردنظر در طول زمانی است. دامنه این آزمون بین -۱ تا +۱ می‌باشد که -۱ روند یکنواخت نزولی، +۱ روند یکنواخت صعودی و ارزش صفر بیانگر عدم وجود روندی ثابت است (چاودوری و دوتا، ۲۰۱۴^۳؛ لی و همکاران، ۲۰۱۸). اختلاف بین هر یک از ارزش‌ها با استفاده از رابطه ۲ استخراج شد (چاودوری و دوتا، ۲۰۱۴).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه؛ n تعداد مشاهدات سری زمانی، x_k ، x_j ارزش هر پیکسل در زمان‌های j و k و $\text{sgn}(x_j - x_k)$ علامت تغییر مشاهدات متوالی است که به صورت -۱، ۰، +۱ نشان داده می‌شود و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (چاودوری و دوتا، ۲۰۱۴).

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

در نهایت مقدار آزمون کندال (τ) با رابطه ۴ محاسبه شد (نیتی و ایستمن، ۲۰۱۱^۴).

$$\tau = \frac{2s}{n(n-1)} \quad \text{رابطه ۴}$$

آزمون معنی‌داری کندال بر اساس رابطه‌های ۵ و ۶ (چاودوری و دوتا، ۲۰۱۴) برای تعیین معنی‌دار روندها حاصل از روش کندال استفاده شد. خروجی این آزمون، تصویری حاوی ارزش‌های Z_s در هر پیکسل است که ارزش‌های مثبت و منفی به ترتیب روندهای افزایش و کاهش پوشش گیاهی را نشان می‌دهند (نیتی و ایستمن، ۲۰۱۱). معنی‌دار بودن یا نبودن روندها حاصل از روش کندال با استفاده از Z_s در سطح اطمینان ۱۰، ۵ و ۱ درصد بررسی شد.

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{for } S > 0 \\ 0 & \text{for } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه‌ها؛ $\text{var}(S)$ واریانس سری زمانی، m مجموع تکرار مقادیر و t_i فراوانی داده‌هایی است که ارزش یکسانی دارند.

۴-۱. تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روند بلندمدت تغییرات جنگل‌های هیرکانی

ضریب همبستگی پیرسون می‌تواند میزان و جهت همبستگی بین دو متغیر کمی و پیوسته را منعکس کند، بنابراین به طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و عوامل اقلیمی استفاده شده است (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ زولو و همکاران، ۲۰۱۸). در این مطالعه نیز، برای بررسی رابطه بین روند بلندمدت پارامترهای اقلیمی و جنگل‌های هیرکانی در محدوده‌های ۵ و ۱۰ کیلومتر از ایستگاه‌های هواشناسی، ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص EVI و عوامل اقلیمی شامل میانگین دمای حداقل، میانگین دمای حداکثر و بارش براساس رابطه ۷ محاسبه شد (نانزاد و همکاران، ۲۰۱۹).

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

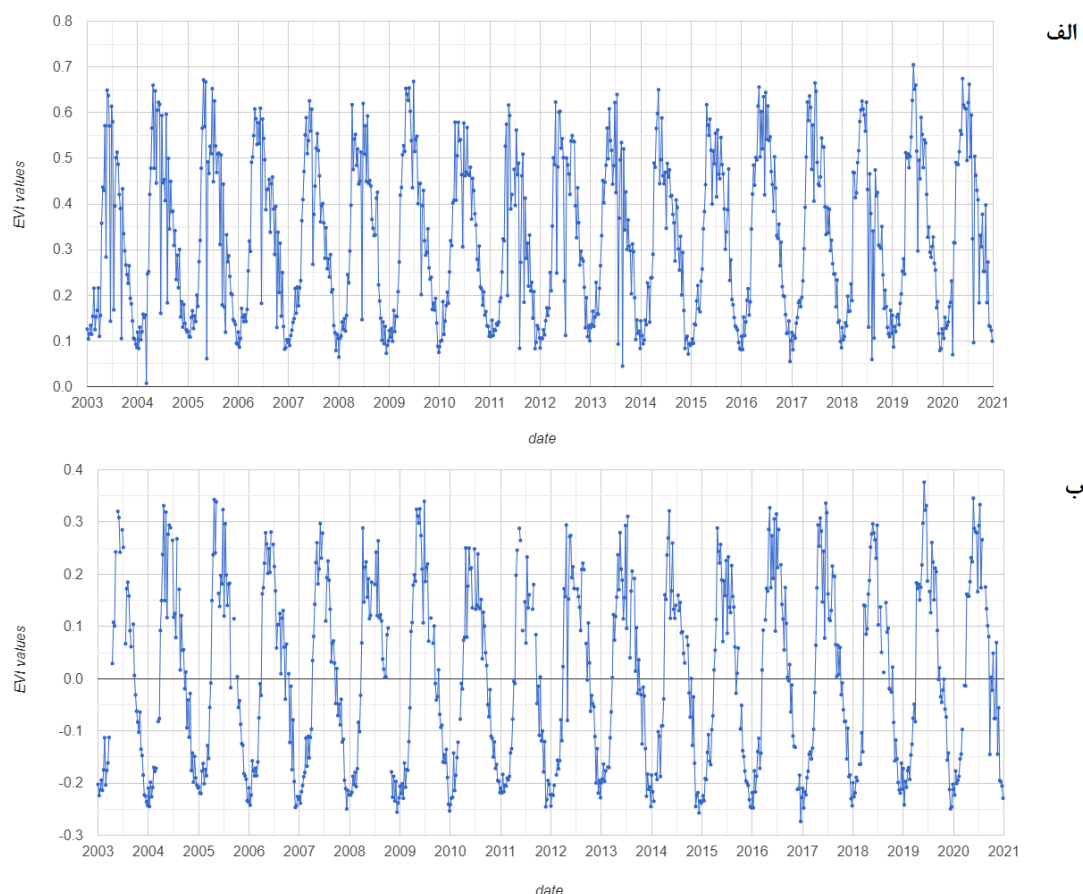
در این رابطه؛ $r_{x,y}$ ضریب همبستگی، n طول سری زمانی، i تعداد هر داده در سری زمانی (۱-۸۲۸) x_i و y_i به ترتیب شاخص پوشش گیاهی و عامل اقلیمی در i ، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب میانگین شاخص‌های پوشش گیاهی و عامل اقلیمی می‌باشند.

۲. نتایج و بحث

۲-۱. سری زمانی تهیه شده

یکی از مهمترین نکات در مطالعات روند فعالیت پوشش گیاهی برپایه سری‌های زمانی ماهواره‌ای در اختیار داشتن سری زمانی با کیفیت مناسب که شامل داده با تفکیک مکانی بالا، فاصله زمانی کم و عدم وجود داده‌های پرت، است (لوپنتل و همکاران، ۲۰۲۱). در این مطالعه سری زمانی EVI با فاصله ۸ روزه، از ترکیب محصولات MOD13Q1 و MYD13Q1 برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ تهیه شده و پس از حذف مؤلفه‌های فصلی و تأثیرات ابر، برف و یخ، برای تحلیل روند بلندمدت مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲، منحنی ارزش‌های EVI در یک پیکسل (واقع در جنگل‌های مازندران با طول و عرض جغرافیایی ۱۷/۵۲ و ۳۹/۳۶) از سری زمانی ۸ روزه پس از حذف مؤلفه‌های فصلی و تأثیرات ابر، برف و یخ با سری زمانی اولیه مقایسه شده است. ایجاد سری زمانی ۸ روزه از شاخص‌های پوشش گیاهی، تعداد مشاهدات قابل استفاده در سال را از ۲۳ به ۴۶ افزایش داده و ماسک کردن داده‌های متأثر از ابر، برف و یخ موجب حذف داده‌های پرت شده است که در نهایت بهبود کیفیت سری‌های زمانی از نظر تفکیک زمانی و حذف پیکسل‌های متأثر از ابر، برف و یخ به همراه داشت است. ایجاد سری زمانی با فاصله زمانی کم در بررسی روندهای جنگل‌های کوهستانی با تنوع زیستی بالا اهمیت بالایی دارد، چرا که عباس‌نژاد و درویش صفت (۱۴۰۲)،

ناصری و همکاران (۲۰۲۳)^۱ و رایش و همکاران (۲۰۱۸)^۲ تأیید کرده‌اند که استفاده از مشاهدات با تفکیک زمانی بالا می‌تواند اطلاعات قابل اعتمادتری در پویایی گیاه و ویژگی‌های آن ارائه دهد. علاوه بر این‌ها، ارزش‌های EVI در طول سری زمانی پس از حذف مؤلفه فصلی کاهش یافته که با نتایج مطالعه مشابه همسو است (مسیح‌پور و همکاران، ۱۳۹۷).



شکل ۲. منحنی تغییرات ارزش EVI در یک پیکسل از سری زمانی پیش از حذف مؤلفه فصلی و تأثیر ابر، برف و یخ (الف) و پس از حذف مؤلفه فصلی و تأثیر ابر، برف و یخ (ب)

Fig. 2. EVI value change curve in one pixel of the time series before removing the seasonal component and the effect of cloud, snow and ice (a) and after removing the seasonal component and the effect of cloud, snow and ice (b)

۲-۲. تجزیه تحلیل روند بلندمدت تغییرات جنگل‌های هیرکانی

نتایج تجزیه و تحلیل روند بلندمدت جنگل‌های هیرکانی براساس آزمون کندال و معنی داری آن در جدول ۱ آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که Greening در بیشتر جنگل‌های هیرکانی رخ داده است، به‌طوری‌که میزان Greening و Browning به ترتیب در ۷۷/۰۲٪ و ۲۲/۹۸٪ از منطقه مشاهده شده است. یافته‌های تحلیل معنی‌داری روندهای کندال نیز نشان می‌دهد که در ۳۴/۵۴ درصد از منطقه شامل ۳۰/۵۶ درصد از روندهای Greening و ۳/۹۸ درصد از روندهای Browning در سطوح ۱٪ معنی‌دار هستند. همچنین روندهای Greening معنی‌دار در سطوح ۱ تا ۵٪ و ۵ تا ۱۰٪ به ترتیب در ۱۱/۱۹ و ۶/۲۲ درصد از منطقه و روندهای Browning معنی‌دار در سطوح ۱ تا ۵٪ و ۵ تا ۱۰٪ به ترتیب در ۲/۲۰ و ۱/۶۱ درصد از منطقه رخ داده است. علاوه بر این ۴۴/۲۴ درصد از منطقه عدم معنی‌داری را نشان داده‌اند، که شامل ۲۹/۰۵ درصد از روندهای Greening و ۱۵/۱۹ درصد از

1. Nasiri et al., 2023

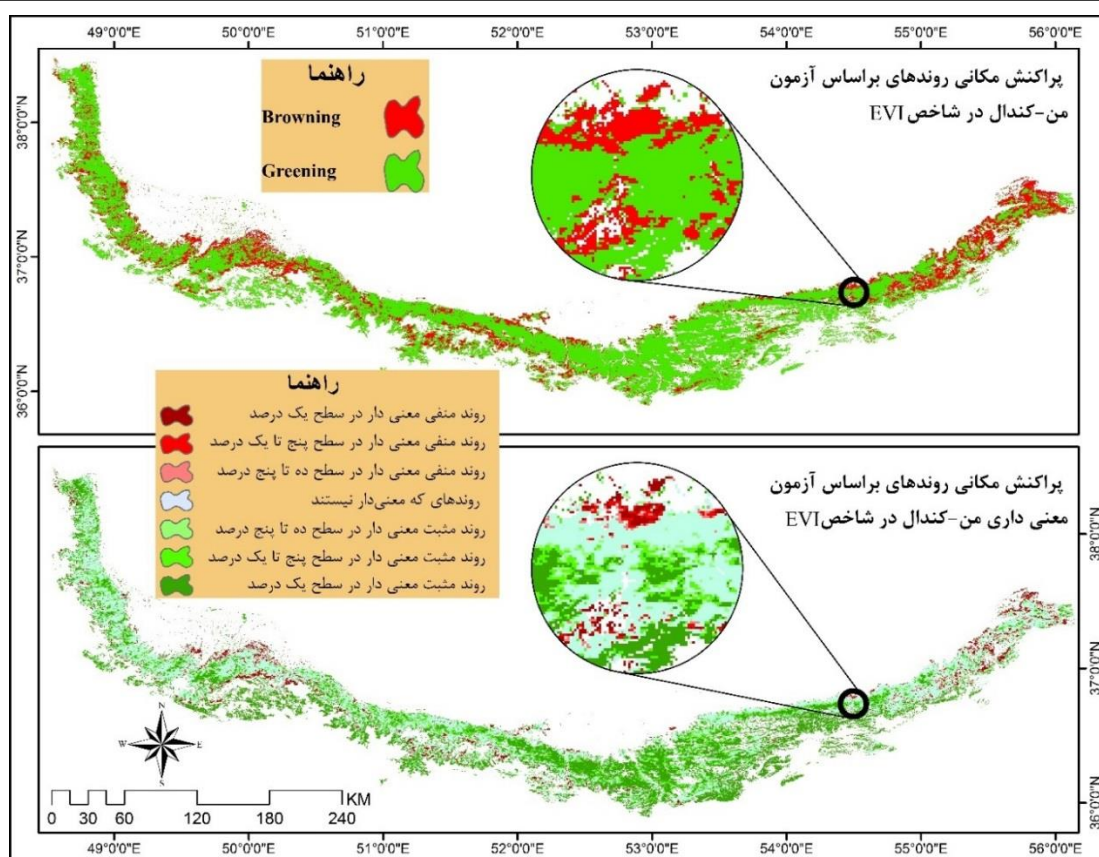
2. Reiche et al., 2018

روندهای Browning می‌شود. این نتایج در مطالعه کیپاشا و همکاران (۱۳۹۶) که با استفاده از سری زمانی NOAA-NDVI با فاصله ۱۶ روزه و تفکیک ۸ کیلومتری انجام شده بود نیز مشاهده گردید، به این صورت که روند Greening در بیش ۸۰ درصد جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی ۲۰۱۲-۱۹۸۱ گزارش شده است. همچنین این روند Greening با یافته‌های لی و همکاران (۲۰۱۵)، امت و همکاران (۲۰۱۹)^۱ و تیان و همکاران (۲۰۲۱)^۲ که Greening در نیم کره شمال را گزارش کردند، پشتیبانی می‌شود. روندهای Greening و Browning جنگل به تغییر مقدار و کیفیت پوشش گیاهی زنده در مناطق جنگلی در طول زمان اطلاق می‌شود. به این صورت که روندهای Greening جنگل در نتیجه افزایش کمیت و بهره‌وری درختان در جنگل‌های هیرکانی است.

جدول ۱. نتایج تجزیه و تحلیل روند بلندمدت و معنی‌داری آن‌ها براساس آزمون کندال به صورت درصد از سطح منطقه
(روند مثبت = Greening و روند منفی = Browning)

کندال	
۷۷/۰۲	Greening
۲۲/۹۸	Browning
۱۰۰	مجموع
معنی‌داری کندال	
۳۰/۵۶	روند مثبت معنی‌دار در سطح یک درصد
۱۱/۱۹	روند مثبت معنی‌دار در سطح پنج تا یک درصد
۶/۲۲	روند مثبت معنی‌دار در سطح ده تا پنج درصد
۴۴/۲۴	روندهای که معنی‌دار نیستند

پراکنش مکانی روندها حاصل از آزمون کندال و همچنین معنی‌داری روندهای کندال در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس این شکل، اکثر بخش‌های مرکزی و مناطق غربی جنگل‌های هیرکانی روند Greening رخ داده، درحالی‌که روندهای Browning از غرب به شرق افزایشی می‌یابد به‌طوری‌که در مناطق شرقی سطوحی که روندهای Browning نشان می‌دهند، غالب می‌شود. پراکنش مکانی معنی‌داری روندهای کندال نیز نشان می‌دهد که بیشتر روندهای Greening معنی‌دار در بخش‌های مرکزی و همچنین ارتفاعات مناطق غربی رخ داده است. همچنین سطوح وسیع از روندهای Browning که در بخش‌های شرقی رخ داده‌اند در سطوح کوچک به صورت پراکنده معنی‌دار می‌باشند.



شکل ۳. پراکنش مکانی روندهای Browning و Greening بر اساس آزمون کندال و همچنین معنی‌داری روندهای کندال در سه سطح ۱۰، ۵ و ۱ درصد

Fig. 3. Spatial distribution of Greening and Browning trends based on the Kendall test as well as the significance of Kendall trends at three levels of $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$, and $P \leq 0.10$

۲-۳. همبستگی بین روند بلندمدت جنگل‌های هیرکانی با داده اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی

همان‌طور که بیان شد، به منظور بررسی تاثیر تغییرات اقلیم بر جنگل‌های هیرکانی، سری زمانی از میانگین شاخص EVI در محدوده‌های جنگلی که در فاصله ۵ و ۱۰ کیلومتری ایستگاه سینوپتیک تهیه شد. نتایج نشان داد که محدوده‌های جنگلی در فاصله ۵ کیلومتری ایستگاه‌های رامسر، آستارا، منجیل، نوشهر، قاراخیل و سیاه بیشه و در فاصله ۱۰ کیلومتری ایستگاه‌های رامسر، آستارا، منجیل، نوشهر، قاراخیل، سیاه بیشه، ساری و خلخال را شامل می‌شوند. نتایج همبستگی پیرسون بین میانگین EVI در محدوده جنگل‌هایی که در فاصله ۵ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی با داده اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی، در جدول ۲ آمده است. براساس این جدول، همبستگی بین EVI و میانگین دمای حداکثر در تمامی مناطق مورد بررسی مثبت و حداکثر و حداقل آن به ترتیب در محدوده ایستگاه‌های آستارا و منجیل با ضرایب ۰/۶۴۸ و ۰/۴۰۱ مشاهده می‌شود. همبستگی بین EVI و میانگین دمای حداقل نیز در تمام مناطق مورد بررسی مثبت و بالاترین همبستگی در ایستگاه آستارا با ضریب ۰/۶۴۵ و پایین‌ترین در ایستگاه منجیل با ضریب ۰/۳۵۶ مشاهده می‌شود. این در حالی است که همبستگی بین EVI و بارش در بیشتر ایستگاه‌ها منفی و ضعیف است.

جدول ۲. ضریب همبستگی پیرسون بین میانگین EVI در محدوده جنگل‌هایی که در فاصله ۵ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی با داده اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی

میانگین دمای حداکثر						
سیاه بیشه	قاراخیل	نوشهر	منجیل	رامسر	آستارا	
۰/۶۲۲	۰/۶۱۶	۰/۵۸۸	۰/۴۰۱	۰/۵۹۲	۰/۶۴۸	EVI
میانگین دمای حداقل						
۰/۶۱۸	۰/۶۲۳	۰/۵۹۰	۰/۳۶۵	۰/۵۸۸	۰/۶۴۵	EVI
بارش						
-۰/۱۵۷	۰/۱۱۷	-۰/۰۸۴	۰/۰۱۵	-۰/۰۵۶	-۰/۰۷۲	EVI

نتایج همبستگی پیرسون بین میانگین EVI در محدوده جنگل‌هایی که در فاصله ۱۰ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی با داده اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی، در جدول ۳ آمده است. براساس این جدول، نتایج تا حدود زیادی مشابه نتایج جدول ۲ است به طوری که همبستگی مثبت بین EVI و داده‌های اقلیمی میانگین دمای حداکثر و میانگین دمای حداقل در محدوده همه ایستگاه‌های هواشناسی وجود داد. با این تفاوت که مقدار همبستگی کمی افزایش یافته است. این در حالی است که بین EVI و بارش در محدوده همه ایستگاه‌های هواشناسی همبستگی منفی ضعیف (بین -۰/۰۱۷ تا -۰/۱۸۱) برقرار است.

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین میانگین EVI در محدوده جنگل‌هایی که در فاصله ۱۰ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی با داده اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی

میانگین دمای حداکثر								
سیاه بیشه	ساری	قاراخیل	نوشهر	منجیل	رامسر	خلخال	آستارا	
۰/۶۲۲	۰/۵۶۴	۰/۶۳۷	۰/۶۲۹	۰/۶۳۹	۰/۶۲۷	۰/۶۵۹	۰/۶۵۴	EVI
میانگین دمای حداقل								
۰/۶۲۰	۰/۵۶۱	۰/۶۴۴	۰/۶۳۴	۰/۶۳۲	۰/۶۲۴	۰/۶۴۶	۰/۶۴۹	EVI
بارش								
-۰/۱۶۶	-۰/۱۲۹	-۰/۱۳۷	-۰/۱۱۰	-۰/۱۴۷	-۰/۰۷۵	-۰/۱۴۰	-۰/۰۷	EVI

روند Greening جنگل می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند افزایش بارندگی، دما و سطح دی‌اکسیدکربن در جو باشد (مسیح‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ عباس‌نژاد و درویش‌صفت، ۱۴۰۲) که منجر به افزایش فتوسنتز و رشد گیاهان می‌شود. از سوی دیگر، Browning می‌تواند ناشی از عواملی مانند خشکسالی، هجوم حشرات، شیوع بیماری، آتش‌سوزی و فعالیت‌های انسانی مانند جنگل‌زدایی و تغییر کاربری باشد. این دلایل ضرورت ارزیابی روند زمانی و مکانی شاخص‌های پوشش گیاهی و پارامترهای اقلیمی و همچنین رابطه بین الگوهای زمانی و مکانی جنگل‌های هیرکانی با پارامترهای اقلیمی در دوره زمانی بلندمدت شد. از بین سه پارامتر اقلیمی مورد بررسی میانگین دمای حداکثر، میانگین دمای حداقل و بارش، مشاهده شد که میانگین دمای حداکثر و میانگین دمای حداقل نقش بیشتری در روند Greening جنگل‌های هیرکانی دارند. شاخص پوشش گیاهی EVI با میانگین دمای حداکثر و میانگین دمای حداقل در اکثر مناطق جنگل‌های هیرکانی همبستگی مثبت و قوی دارند به طوری که میانگین ضریب همبستگی پیرسون بین EVI با میانگین دمای حداکثر و میانگین دمای حداقل به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۵۷ در محدوده ۵ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی و ۰/۶۳، ۰/۶۳ در محدوده ۱۰ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی است. این نتایج با نتایج مطالعات پراوالیه و همکاران، (۲۰۲۲) در جنگل‌های رومانی و لی و همکاران (۲۰۱۵) در جنگل‌های چین که دما را به عنوان

عاملی در Greening گزارش کرده‌اند، سازگار است. شاخص EVI در محدوده‌های ۵ و ۱۰ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی همبستگی منفی ضعیفی با بارش نشان داده‌اند. که نشان دهنده تأثیر کم بارش بر Greening جنگل هیرکانی است. این نتایج با نتایج مطالعات زیادی مانند ژانگ و همکاران (۲۰۲۰)^۱، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)^۲، هونگچائو و همکاران (۲۰۲۳)^۳ و هوانگ و همکاران (۲۰۲۳)^۴ که در نقاط مختلف نیمکره شمالی بخصوص عرض‌های جغرافیای بالا تأثیر بارش را کمتر از دما در در روند جنگل‌ها گزارش کرده‌اند، همسو است.

میانگین ضریب همبستگی پیرسون بین EVI با میانگین دمای حداکثر و میانگین دمای حداقل در محدوده ۵ کیلومتری ایستگاه‌های هواشناسی کمتر از میانگین ضریب همبستگی در محدوده ۱۰ کیلومتری است. دلیل این مورد، می‌تواند نسبت سطح مساحت به مرز جنگل باشد. به عنوان مثال ایستگاه منجیل در محدوده ۵ کیلومتری بیش از چهار یا پنج پیکسل را شامل نمی‌شد با توجه به این که این محدوده هم حاشیه جنگل و در مرز با سایر کاربری‌ها می‌باشند ممکن است دخالت انسانی باعث این همبستگی پایین شده باشد. اما این ایستگاه در محدوده ۱۰ کیلومتری سطح بیشتری از جنگل را شامل می‌شد که میانگین EVI اثرات تخریب یک پیکسل از جنگل می‌تواند کاهش دهد. همچنین روند دما هوا در جنگل‌های هیرکانی براساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی افزایشی است. این روند افزایشی دما توسط مطالعات سبوحی و همکاران (۲۰۱۲)^۵ و علوی‌نیا و همکاران (۲۰۲۱)^۶ که روند افزایشی دما را در ایران و مطالعات ژولین و سوبرینو (۲۰۱۰)^۷ و یانگ و همکاران (۲۰۲۲)^۸ که روند افزایش دما را در نقاط مختلف نیمکره شمالی گزارش کرده‌اند، نیز پشتیبانی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی روند بلندمدت تغییرات جنگل‌های هیرکانی و واکنش آن‌ها به عوامل مختلف اقلیمی با استفاده از سری زمانی MODIS-EVI با فاصله زمانی ۸ روزه و تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی در بازه زمانی ۲۰۲۱ - ۲۰۰۳ انجام شده است. نتایج آزمون کندال و معنی‌داری آن نشان داد روند Greening و Browning به ترتیب در ۷۷ و ۲۳ درصد منطقه رخ داده‌اند که از این مقدار به ترتیب ۴۷/۹۷ و ۷/۷۹ درصد آن‌ها در سطح ۱۰٪ معنی‌دار می‌باشند. بنابراین در بخش عمده‌ای از جنگل‌های هیرکانی Greening اتفاق افتاده است که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند افزایش بارندگی، دما و دی‌اکسید کربن موجود در جو باشد که باعث تحریک فتوسنتز و رشد گیاهان می‌شوند. همچنین در بخش‌هایی از جنگل‌های هیرکانی روند Browning مشاهده شد که می‌تواند ناشی از عوامل مختلف از جمله خشکسالی، هجوم حشرات، شیوع بیماری، آتش‌سوزی و فعالیت‌های انسانی مانند جنگل‌تراشی باشد. براساس مطالعه کیپاشا و همکاران (۱۳۹۶)، درجه حرارت در جنگل‌های هیرکانی در سال ۱۹۸۱ شروع به افزایش کرد و بر اساس نتایج ما، این روند افزایشی ادامه دارد. در کل نتیجه می‌گیریم که روند Greening در جنگل‌های هیرکانی در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ رخ داده است و دما را به‌عنوان اصلی‌ترین عامل اقلیمی مؤثر بر این جنگل‌ها معرفی می‌کنیم. با این حال، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است، از جمله عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک در داخل جنگل‌های هیرکانی که می‌تواند دقت تحلیل همبستگی بین تغییرات پوشش گیاهی و پارامترهای اقلیمی را تحت تأثیر قرار دهد. از نظر مدیریتی، نتایج این پژوهش می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های حفاظتی و بهره‌برداری پایدار از جنگل‌های هیرکانی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود نظارت بر مناطق دارای روند Browning افزایش یابد و برای کاهش اثرات خشکسالی، آتش‌سوزی و دیگر عوامل مخرب، راهکارهای حفاظتی مناسبی اتخاذ شود. عدم

1. Zhang et al., 2020
2. Zhang et al., 2022
3. Hongchao et al., 2023
4. Huang et al., 2023
5. Saboohi et al., 2012
6. Alavinia et al., 2021
7. Julien & Sobrino 2010
8. Yang et al et al., 2022

وجود ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک در نهایت ما سامانه GEE را به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای بررسی روند بلندمدت پوشش گیاهی و متغیرهای اقلیمی معرفی می‌کنیم.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به شماره ۴۰۰۲۶۹ انجام گرفته، نگارندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را ابراز می‌دارند.

منابع

- عباس‌نژاد آلچین، احمد؛ درویش صفت، علی اصغر؛ و بذرافشان، جواد. (۱۳۹۷). مقایسه قابلیت داده‌های ماهواره لندست ۸ و مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق جنگل‌های خزری با مدل ترکیبی پنمن مانیتیت. نشریه جنگل/یران، ۳: ۳۸۹-۴۰۲. https://www.ijf-iseforestry.ir/article_79979.html
- عباس‌نژاد آلچین، احمد؛ درویش صفت، علی اصغر. (۱۴۰۲). بررسی روند تغییرات سرسبزی پوشش گیاهی (Greening و Browning) با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI در استان مازندران. نشریه علوم و فنون چوب و جنگل، ۳۰(۱)، ۱۲۵-۱۴۰. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2023.20755.1991>
- عباس‌نژاد آلچین، احمد؛ درویش صفت، علی اصغر؛ و بذرافشان، جواد. (۱۳۹۹). تهیه و ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق براساس داده‌های ماهواره لندست ۸ و مدل SEBAL در جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل‌های پل سفید و کیاسر). محصولات جنگلی و چوب، ۷۳(۳)، ۲۵۹-۲۷۰. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2020.284419.1007>
- کیاپاشا، خدیجه؛ درویش صفت، علی اصغر؛ ضرغام، نصرا اله؛ عطارد، پدram؛ نادى، مهدى؛ و شپمن، مایکل؛ (۱۳۹۶). روند تغییرات سبزشدگی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از سری زمانی NOAA-NDVI در دوره ۲۰۱۲-۱۹۸۱. نشریه جنگل و فرآورده‌های جنگلی. دوره ۷۰ (۳) ۴۰۹-۴۲۰. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2017.206833.748>
- مسیح پور مهرنوش، درویش صفت، علی اصغر؛ رحمانی رامین، (۱۳۹۸)، تحلیل روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI (مطالعه موردی: استان کردستان) نشریه جنگل و فرآورده‌های جنگلی. دوره ۷۲ (۳) ۱۹۳-۲۰۴. <https://doi.org/10.22059/jfwp.2019.277944.995>
- Alavinia, S. H., & Zarei, M. (2021). Analysis of spatial changes of extreme precipitation and temperature in Iran over a 50-year period. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2269-E2289. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6691>.
- Alcaraz-Segura, D. O. M. I. N. G. O., Chuvieco, E., Epstein, H. E., Kasischke, E. S., & Trishchenko, A. (2010). Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16(2), 760-770. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01956.x>.
- Berlanga-Robles, C. A., & Ruiz-Luna, A. (2020). Assessing seasonal and long-term mangrove canopy variations in Sinaloa, northwest Mexico, based on time series of enhanced vegetation index (EVI) data. *Wetlands Ecology and Management*, 28(2), 229-249. doi: <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09698-4>.
- Bigsby, H. (2009). Carbon banking: Creating flexibility for forest owners. *Forest Ecology and Management*, 257(1), 378-383. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.053>.
- Bórnez, K., Descals, A., Verger, A. and Peñuelas, J., (2020). Land surface phenology from VEGETATION and PROBA-V data. Assessment over deciduous forests. *International Journal of*

- Applied Earth Observation and Geoinformation, 84, p.101974. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101974>.
- Burrell, A. L., Evans, J. P., & Liu, Y. (2017). Detecting dryland degradation using time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND). *Remote Sensing of Environment*, 197, 43-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.018>.
- Chaudhuri, S., & Dutta, D. (2014). Mann–Kendall trend of pollutants, temperature and humidity over an urban station of India with forecast verification using different ARIMA models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(8), 4719–4742. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3716-8>.
- Chen, F., Liu, Z., Zhong, H., & Wang, S. (2021). Exploring the Applicability and Scaling Effects of Satellite-Observed Spring and Autumn Phenology in Complex Terrain Regions Using Four Different Spatial Resolution Products. *Remote Sensing*, 13(22), 4582. doi: <https://doi.org/10.3390/rs13224582>.
- Chen, T., Guo, R., Yan, Q., Chen, X., Zhou, S., Liang, C., Wei, X., & Dolman, H. (2022). Land management contributes significantly to observed vegetation browning in Syria during 2001–2018. *Biogeosciences*, 19(5), 1515-1525. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-19-1515-2022>.
- Deka, J., Kalita, S., & Khan, M. L. (2019). Vegetation Phenological Characterization of Alluvial Plain Shorea robusta-dominated Tropical Moist Deciduous Forest of Northeast India Using MODIS NDVI Time Series Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(8), 1287-1293. doi: <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00973-y>.
- Eastman, J.R. (2009). *IDRISI Taiga - Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs Clark University, Worcester.
- Emmett, K. D., Renwick, K. M., & Poulter, B. (2019). Disentangling climate and disturbance effects on regional vegetation greening trends. *Ecosystems*, 22(4), 873-891. doi: <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0300-3>.
- Estel, S., Kuemmerle, T., Alcántara, C., Levers, C., Prishchepov, A., & Hostert, P. (2015). Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 163, 312-325. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>.
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S., & Reichstein, M. (2013). Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113-2144. doi: <https://doi.org/10.3390/rs5052113>.
- Ghanbari Motlagh, M., Abbasnezhad Alchin, A., & Daghestani, M. (2022). Detection of high fire risk areas in Zagros Oak forests using geospatial methods with GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 835. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10192-5>.
- He, B., Wu, X., Liu, K., Yao, Y., Chen, W., & Zhao, W. (2022). Trends in Forest Greening and Its Spatial Correlation with Bioclimatic and Environmental Factors in the Greater Mekong Subregion from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 14(23), 5982. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14235982>.
- Hongchao, J., Guang, Y., Xiaomin, L., Bingrui, J., Zhenzhu, X., & Yuhui, W. (2023). Climate extremes drive the phenology of a dominant species in meadow steppe under gradual warming. *Science of The Total Environment*, 869, 161687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161687>.
- Hosseini, S. M. (2019). Outstanding universal values of Hyrcanian Forest, the newest Iranian property, inscribed in the UNESCO's World Heritage List. *Tourism Res*, 1(3), 1-17.
- Huang, X., An, R., Wang, H., Xing, F., Wang, B., Fan, M., ... & Lu, H. (2023). Differential effects of climatic and non-climatic factors on the distribution of vegetation phenology trends on the Tibetan plateau. *Heliyon*, 9(10). doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14389>.

- Jiang, L., Bao, A., Guo, H., & Ndayisaba, F. (2017). Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 599, 967-980. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.012>.
- Jin, X., Li, Z., Feng, H., Ren, Z., & Li, S. (2020). Estimation of maize yield by assimilating biomass and canopy cover derived from hyperspectral data into the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, 227, 105846. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105846>.
- Julien, Y. and J. A. Sobrino, (2010). "Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data," *Remote Sensing of Environmental*, vol. 114, pp. 618–625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.001>.
- Karkauskaite, P., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2017). Evaluation of the plant phenology index (PPI), NDVI and EVI for start-of-season trend analysis of the Northern Hemisphere boreal zone. *Remote Sensing*, 9(5), 485. doi: <https://doi.org/10.3390/rs9050485>.
- Kuenzer, C., Dech, S., & Wagner, W. (2015). Remote sensing time series revealing land surface dynamics: Status quo and the pathway ahead. In *Remote Sensing Time Series* (pp. 1-24). doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_1.
- Kumari, N., Srivastava, A., & Dumka, U. C. (2021). A long-term spatiotemporal analysis of vegetation greenness over the himalayan region using google earth engine. *Climate*, 9(7), 109. doi: <https://doi.org/10.3390/cli9070109>.
- Li, D., Lu, D., Wu, M., Shao, X., & Wei, J. (2018). Examining land cover and greenness dynamics in Hangzhou Bay in 1985–2016 using Landsat time-series data. *Remote Sensing*, 10(1), 32. doi: <https://doi.org/10.3390/rs10010032>.
- Li, Y., Chen, Y., Sun, F., & Li, Z. (2021). Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan Mountain, Central Asia. *Ecological Indicators*, 129, 107912. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107912>.
- Li, Y., Zhao, M., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E., & Li, S. (2015). Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature communications*, 6(1), 6603. <https://doi.org/10.1038/ncomms7603>.
- Liu, Y., Wu, C., Peng, D., Xu, S., Gonsamo, A., Jassal, R. S., ... & Chen, J. M. (2016). Improved modeling of land surface phenology using MODIS land surface reflectance and temperature at evergreen needleleaf forests of central North America. *Remote Sensing of Environment*, 176, 152-162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.001>.
- Luintel, N., Ma, W., Ma, Y., Wang, B., Xu, J., Dawadi, B., & Mishra, B. (2021). Tracking the dynamics of paddy rice cultivation practice through MODIS time series and PhenoRice algorithm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108538>.
- Marvie Mohadjer, M. R., (2005). *Silviculture*. Tehran, Iran: Tehran Univ. Publ., p. 387 (in Persian).
- Mbatha, N., & Xulu, S. (2018). Time Series Analysis of MODIS-Derived NDVI for the Hluhluwe-Imfolozi Park, South Africa: Impact of Recent Intense Drought. *Climate*, 6(4), 95. doi: <https://doi.org/10.3390/cli6040095>.
- Mishra, N. B., & Mainali, K. P. (2017). Greening and browning of the Himalaya: Spatial patterns and the role of climatic change and human drivers. *Science of The Total Environment*, 587, 326-339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.177>.
- Nanzad, L., Zhang, J., Tuvdendorj, B., Nabil, M., Zhang, S., & Bai, Y. (2019). NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016. *Journal of arid environments*, 164, 69-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.02.003>.
- Nasiri, V., Heidarlou, H. B., Alchin, A. A., Moradi, F., Rahmanian, S., Afshari, S., ... & Griess, V. C.

- (2023). How do conservation policies, climate and socioeconomic changes impact Hyrcanian forests of northern Iran?. *Ecological Informatics*, 78, 102351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102351>.
- Neeti, N., & Eastman, J. R. (2011). A contextual mann-kendall approach for the assessment of trend significance in image time series. *Transactions in GIS*, 15(5), 599-611. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01280.x>.
- Padhee, S. K., & Dutta, S. (2019). Spatio-temporal reconstruction of MODIS NDVI by regional land surface phenology and harmonic analysis of time-series. *GIScience & Remote Sensing*, 56(8), 1261-1288. doi: <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1648854>.
- Pan, N., Feng, X., Fu, B., Wang, S., Ji, F., & Pan, S. (2018). Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends. *Remote Sensing of Environment*, 214, 59-72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.034>.
- Parida, B. R., Pandey, A. C., & Patel, N. R. (2020). Greening and browning trends of vegetation in India and their responses to climatic and non-climatic drivers. *Climate*, 8(8), 92. doi: <https://doi.org/10.3390/cli8080092>.
- Prăvălie, R., Sîrodoev, I., Nita, I. A., Patriche, C., Dumitrașcu, M., Roșca, B., ... & Birsan, M. V. (2022). NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*, 136, 108629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108629>.
- Qiu, J., Yang, J., Wang, Y., & Su, H. (2018). A comparison of NDVI and EVI in the DisTrad model for thermal sub-pixel mapping in densely vegetated areas: A case study in Southern China. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8): 2105-2118. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1443229>.
- Reiche, J., Hamunyela, E., Verbesselt, J., Hoekman, D., & Herold, M. (2018). Improving near-real time deforestation monitoring in tropical dry forests by combining dense Sentinel-1 time series with Landsat and ALOS-2 PALSAR-2. *Remote Sensing of Environment*, 204, 147-161. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.034>.
- Sagheb Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future (No. 15325). Springer Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>.
- Schucknecht, A., Erasmi, S., Niemeyer, I., and Matschullat, J. (2013). Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 40-59. doi: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134601>.
- Saboohi, R., Soltani, S., & Khodaghali, M. (2012). Trend analysis of temperature parameters in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 109, 529-547. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0617-9>.
- Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L., & Mondino, E. B. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 132-144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.10.005>.
- Tian, F., Liu, L. Z., Yang, J. H., & Wu, J. J. (2021). Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities. *Ecological Indicators*, 125, 107479. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107479>.
- Xulu, S., Peerbhay, K., Gebreslasie, M., & Ismail, R. (2018). Drought influence on forest plantations in Zululand, South Africa, using MODIS time series and climate data. *Forests*, 9(9), 528. doi: <https://doi.org/10.3390/f9090528>.

- Yang, T., Li, Q., Zou, Q., Hamdi, R., Cui, F., & Li, L. (2022). Impact of snowpack on the land surface phenology in the tianshan mountains, central Asia. *Remote Sensing*, 14(14), 3462. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14143462>
- Yu, L., Yan, Z., & Zhang, S. (2020). Forest Phenology Shifts in Response to Climate Change over China–Mongolia–Russia International Economic Corridor. *Forests*, 11(7), 757. doi: <https://doi.org/10.3390/f11070757>
- Zhang, J., Zhao, J., Wang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., & Guo, X. (2020). Comparison of land surface phenology in the Northern Hemisphere based on AVHRR GIMMS3g and MODIS datasets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.05.005>
- Zhang, R., Qi, J., Leng, S., & Wang, Q. (2022). Long-term vegetation phenology changes and responses to pre-season temperature and precipitation in Northern China. *Remote Sensing*, 14(6), 1396. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14061396>
- Zhang, Y., Song, C., Band, L. E., Sun, G., & Li, J. (2017). Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening?. *Remote Sensing of Environment*, 191, 145-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.011>