

Research Paper

Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests

Parisa Hadinezhad¹, Hamed Asadi^{2,2}, Seyed Mohammad Hojjati³, Mahya Tafazoli⁴ and Rasool Yousefpour⁵

1- PhD Student, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I. R. Iran. (p.hadinezhad@yahoo.com)

2,*- (Corresponding author) Assistant Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I. R. Iran. (h.asadi@sanru.ac.ir)

3- Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I. R. Iran. (s_m_hodjati@yahoo.com)

4- PhD in Forest Soil Science, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I. R. Iran. (mahya_tafazoli@yahoo.com)

5- Assistant Professor, John H. Daniels Faculty of Architecture, Landscape, and Design, University of Toronto, Toronto, Canada. (r.yousefpour@daniels.utoronto.ca)

Received: 02 March 2024

Accepted: 02 September 2024

Extended Abstract

Background and Objective: Drought, driven by water scarcity, disrupts forest dynamics, with projections indicating an upward trend. Forest responses to drought vary based on climatic conditions and environmental factors, making it essential to assess drought severity as a first step toward effective management. Simulation models like Medfate offer valuable insights for predicting drought and informing management strategies. This study evaluates drought conditions in northern Iran's forests, aiming to identify key influencing factors. The analysis incorporates structural (tree height, diameter, and density), climatic (temperature and precipitation), topographic (slope, aspect, and elevation), and soil-related (texture, acidity, nitrogen, and organic carbon) variables. Examining drought indices in the Hyrcanian forests provides crucial information for water resource management and conservation planning. The findings can support long-term predictions and adaptive strategies to mitigate the impacts of climate change on these forests.

Material and Methods: This research was conducted across the entire Hyrcanian forest region in northern Iran. Data were sourced from the national forest inventory, covering variables such as geographic coordinates, elevation, slope, aspect, tree species, diameter, and height for each sample plot. Meteorological data, including precipitation and temperature, were obtained from NASA's POWER project. After data collection, tree density per hectare and basal area were calculated. The drought coefficient was estimated using the Medfate package in R. Generalized linear models (GLM) and cross-validation with the caret package were used for data analysis, and the relative importance of drought-influencing variables was determined. To develop a drought severity zoning map, variogram analysis was conducted in GS+, followed by ordinary kriging for spatial interpolation, with final refinements in ArcGIS.

Results: The GLM model demonstrated strong predictive performance for the drought index ($R^2 = 0.57$, MAE = 0.06, RMSE = 0.08). Analysis revealed that the drought coefficient had a significant positive correlation with slope, forest density, basal area, sand percentage, soil nitrogen, and

temperature. In contrast, elevation, diameter at breast height, organic carbon, and precipitation showed a significant negative correlation with drought severity. Relative importance analysis identified forest density, precipitation, and basal area per hectare as the most influential variables. The kriging model confirmed a strong spatial structure (64%) for the drought coefficient. Model validation indicated minimal bias and high accuracy in estimating drought severity ($R^2 = 0.85$, MAE = 0.09, RMSE = 0.01). The zoning map revealed that drought severity was higher in the eastern Hyrcanian forests compared to the western regions.

Conclusion: This study highlights tree density as the most critical factor influencing drought severity in the Hyrcanian forests. In high-density areas, intensified competition for water leads to greater uptake by trees, depleting soil moisture. Additionally, increased evapotranspiration and canopy interception further reduce available water, exacerbating drought conditions. The eastern Hyrcanian forests are particularly vulnerable due to lower precipitation and humidity levels. These findings emphasize the urgency of implementing targeted management strategies to mitigate drought effects. One recommended approach is selective thinning in drought-prone areas to alleviate water competition. Additionally, slope plays a significant role in drought severity, underscoring the need for restoration efforts in highly affected regions. The study also underscores the importance of further research on drought's impact on biodiversity, forest health, and nutrient cycling. The insights gained from this research can guide the development of conservation and management strategies to enhance forest resilience in northern Iran.

Keywords: Climate change, Drought, Environmental factors, General Linear Model, Medfate Package.

How to Cite This Article: Hadinezhad, P., Asadi, H., Hojjati, S. M., Tafazoli, M., and Yousefpour, R. (2025). Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development*, 10(4), 431-451. DOI: [10.30466/jfrd.2024.55216.1718](https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55216.1718)



عوامل مؤثر بر تنش خشکی درختان در جنگل‌های هیرکانی

پریسا هادی‌نژاد^۱، حامد اسدی^{۲*}، سیدمحمد حجتی^۳، محیا تفضلی^۴ و رسول یوسف‌پور^۵

۱- دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. (p.hadinezhad@yahoo.com)

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. (h.asadi@sanru.ac.ir)

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. (s_m_hodjati@yahoo.com)

۴- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران.

(mahya_tafazoli@yahoo.com)

۵- استادیار، دانشکده معماری، منظر و طراحی، دانشگاه تورنتو، تورنتو، کانادا. (r.yousefpour@daniels.utoronto.ca)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

چکیده

مقدمه و هدف: پدیده خشکی ناشی از کمبود آب، پویایی جنگل‌ها را کاهش داده و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که روند آن رو به افزایش است. واکنش جنگل‌ها به خشکسالی بسته به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های محیطی متفاوت است. بنابراین، ارزیابی اندازه خشکی در جنگل‌ها گام نخست برای مدیریت این بحران است. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند Medfate می‌تواند به پیش‌بینی خشکی و برنامه‌ریزی اقدامات مدیریتی کمک کند. این پژوهش با هدف بررسی وضعیت خشکی در جنگل‌های شمال ایران انجام شده و به دنبال شناسایی عوامل مؤثر بر این پدیده است. متغیرهای ساختاری (ارتفاع، قطر، تراکم)، اقلیمی (دما، بارش)، توپوگرافی (شیب، جهت، ارتفاع) و خاکی (بافت خاک، اسیدیته، نیتروژن، کربن آلی) از جمله عوامل مورد بررسی هستند. تحلیل شاخص خشکی در جنگل‌های هیرکانی، اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع آب و اجرای راهبردهای حفاظتی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها می‌توانند در پیش‌بینی آینده و تدوین استراتژی‌های سازگاری برای کاهش تأثیر تغییر اقلیم بر جنگل‌ها مؤثر باشند.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در کل سطح منطقه جنگل‌های هیرکانی شمال کشور انجام شد. برای این منظور از بانک داده‌های آماربرداری جنگل‌های شمال کشور استفاده شد (اطلاعات موجود شامل موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت، قطر و نوع گونه و ارتفاع درختان برای هر قطعه نمونه است). داده‌های هواشناسی شامل مقدار بارش و دما از پروژه POWER مربوط به سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا (NASA Power) تهیه شد. پس از تهیه داده‌ها، ابتدا تعداد در هکتار درختان و سپس سطح مقطع درختان نیز حساب شد. به منظور محاسبه ضریب خشکی از بسته نرم‌افزاری medfate در نرم‌افزار

R استفاده شد. در نهایت تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته و روش ارزیابی متقابل در نرم‌افزار R و بسته caret انجام شد. در ادامه اهمیت نسبی متغیرهای اثرگذار روی ضریب خشکی محاسبه شد. در نهایت برای تهیه نقشه پهنه‌بندی ضریب خشکی در جنگل‌های شمال کشور، ابتدا واریوگرام در نرم‌افزار GS+ محاسبه شد، سپس با استفاده از روش کریجینگ معمولی نقشه تهیه و در نرم‌افزار ArcGIS ویرایش شد.

یافته‌ها: به‌طور کلی بر اساس نتایج به‌دست آمده، مدل خطی تعمیم‌یافته ارزیابی بسیار مناسبی ($R^2=0/57$)، $MAE=0/06$ و $RMSE=0/08$) برای پیش‌بینی مقدار شاخص خشکی داشت. نتایج بررسی نشان داد که متغیرهای شیب، تراکم جنگل، سطح مقطع، درصد شن و نیتروژن خاک و دما با ضریب خشکی رابطه مثبت و معنی‌دار داشتند. درحالی‌که متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، قطر برابرسینه، کربن آلی و مقدار بارش رابطه منفی و معنی‌دار با ضریب خشکی داشتند. نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که متغیرهای تراکم جنگل، مقدار بارش و سطح مقطع درختان در هکتار مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ضریب خشکی در جنگل‌های هیرکانی بود. نتایج مدل کریجینگ نشان داد که متغیر ضریب خشکی دارای ساختار مکانی قوی (۶۴ درصد) است. همچنین نتایج ارزیابی مدل نیز نشان داد که مدل کریجینگ ارببی بسیار پایین و دقت بسیار مناسبی در برآورد مقدار ضریب خشکی به همراه داشت ($R^2=0/85$ ، $MAE=0/09$ و $RMSE=0/01$). بر اساس نقشه پهنه‌بندی، قسمت‌های شرق جنگل هیرکانی ضریب خشکی بالاتری نسبت به مناطق غربی داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش نشان داد که تراکم درختان مهم‌ترین عامل در پیش‌بینی خشکی جنگل‌های هیرکانی است. در مناطق پرتراکم، رقابت برای منابع آبی افزایش می‌یابد و جذب آب بیشتر توسط درختان، رطوبت خاک را کاهش می‌دهد. همچنین، تبخیر و تعرق بالا و باران‌رایی تاج پوشش موجب کاهش آب در دسترس گیاهان شده و خشکی را تشدید می‌کند. در شرق جنگل‌های هیرکانی، مقدار خشکی بیشتر به دلیل بارندگی کمتر و رطوبت پایین‌تر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اجرای برنامه‌های مدیریتی برای کاهش اثرات خشکی ضروری است. یکی از راهکارهای پیشنهادی، تنک کردن جنگل در مناطق حساس به خشکسالی است تا رقابت برای آب کاهش یابد. همچنین، شیب زمین تأثیر مهمی بر مقدار خشکی دارد و اجرای عملیات احیایی در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد. یافته‌های پژوهش اهمیت پژوهش بیشتر درباره تأثیر خشکی بر تنوع زیستی، سلامت جنگل و چرخه‌های عناصر غذایی را نشان می‌دهد. این اطلاعات می‌توانند به توسعه راهبردهای حفاظتی و مدیریتی برای مقابله با خشکی در جنگل‌های شمال ایران کمک کنند.

واژه‌های کلیدی: بسته نرم‌افزاری medfate، تغییر اقلیم، عوامل محیطی، مدل خطی تعمیم یافته.

می‌اندازد (Vose et al., 2015). پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان می‌دهند که در آینده، شاهد افزایش فراوانی، شدت و مدت‌زمان دوره‌های خشکسالی خواهیم بود (Adams et al., 2009; Granier et al., 2011; Dai, 2013). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، روند فراوانی خشکسالی‌های شدید در سطح کره زمین رو به افزایش بوده است (Alexander, 2016). واکنش جنگل‌ها به تنش خشکسالی، به دلیل تنوع اقلیم‌ها و همچنین تفاوت در ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی‌ها، متفاوت است (He et al., 2017). با این وجود، ابهامات زیادی در مورد چگونگی این واکنش وجود دارد. از منظر زیست‌محیطی، واکنش بوم-سازگان جنگلی به خشکسالی را می‌توان از جنبه‌های مختلفی مانند پایداری زمانی، مقاومت و انعطاف‌پذیری بررسی کرد که همگی جزئی از پایداری بوم‌سازگان کل هستند (Tilman, 1999). پایداری بوم‌سازگان جنگلی در برابر خشکسالی می‌تواند با توجه به منطقه، نوع بیوم جنگلی و حتی گونه‌های درختی متفاوت باشد (Vicente et al., 2014; Gazol et al., 2018; Ma et al., 2017). بنابراین، اولین قدم برای مقابله با خشکسالی، بررسی وضعیت فعلی جنگل‌ها از نظر مقدار خشکی است. این امر به مدیران جنگل کمک می‌کند تا با آگاهی از وضعیت موجود، اقدامات لازم را برای مقابله با این پدیده برنامه‌ریزی و اجرا کنند. در این راستا، استفاده از روش‌ها و مدل‌های شبیه‌ساز مناسب با دقت بالا، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی مقدار و وضعیت خشکی در جنگل‌ها پیشنهاد می‌شود. یکی از مدل‌های مناسب برای محاسبه ضریب خشکی در جنگل‌ها، مدل Medfate است (De Cáceres et al., 2022). مدل Medfate ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در جنگل‌ها است. این مدل با در نظر گرفتن عوامل مختلفی

اقلیم، عامل اصلی شکل‌گیری زیست‌بوم‌های اصلی جهان، در حال تغییر است. تغییرات اقلیم، به‌طور چشمگیری بر رشد، تنوع زیستی و احیای درختان در جنگل‌های هیرکانی، مانند دیگر نقاط جهان، تأثیر گذاشته و منجر به دگرگونی‌های اساسی در این بوم-سازگان منحصربه‌فرد می‌شود (LSMOH., 2012). جنگل‌های هیرکانی با تنوع زیستی غنی و قدمتی دیرینه، نقشی محوری در چرخه‌های آب، انرژی و بیوژئوشیمیایی منطقه ایفا می‌کنند و خدمات ارزشمندی مانند تصفیه هوا، جلوگیری از فرسایش خاک و حفظ تنوع زیستی را به جوامع انسانی ارائه می‌دهند (Rohani et al., 2022). با این حال، با توجه به تغییرات اقلیمی، سرنوشت این بوم‌سازگان حیاتی را با ابهام جدی روبرو است (Brodribb et al., 2020; Bannett et al., 2021; Gora & Esquivel., 2021). تأثیرات تغییرات اقلیمی بر جنگل‌ها می‌تواند شامل تغییراتی در الگوهای رشد، رقابت درون و بین‌گونه‌ای، زمان گلدهی و میوه‌دهی، احیا، نرخ بقا و طول عمر درختان باشد. همچنین این تغییرات می‌توانند منجر به وقوع حوادث طبیعی مانند مرگ‌ومیر ناشی از برف، سیل یا آتش‌سوزی‌های شدید، خشکسالی و شیوع گسترده آفات شود (Yousefpour et al., 2012). پیامدهای این شرایط توسط عوامل زیستی، به‌ویژه فعالیت‌های مستقیم انسان بر جنگل‌ها، تشدید می‌شود (Linares et al., 2009; Jian et al., 2015).

یکی از بارزترین پیامدهای تغییر اقلیم جهانی، نابودی گسترده جنگل‌ها در اثر خشکسالی است (Adams et al., 2009; Allen et al., 2010 & 2015). خشکسالی را به‌طور ساده می‌توان کمبود یا فقدان آب تعریف کرد که حیات و پویایی جنگل‌ها را به مخاطره

تحت شرایط تنش خشکی، روزه‌ها به سرعت بسته شده و در صورت تداوم این شرایط، رشد گیاه متوقف خواهد شد. در گیاهان تحت تنش خشکی، سلول‌ها کوچک‌تر شده، برگ‌ها کمتر توسعه پیدا کرده و عملکرد زی توده به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Jahanbazy et al., 2013).

با توجه به اهمیت موضوع پژوهش‌های زیادی در خصوص بررسی عوامل مؤثر بر خشکی انجام شده است به‌عنوان مثال، (De Cáceres et al., 2022) تأثیر اختلاط گونه‌ها بر مصرف آب و تنش خشکی در جنگل‌های مدیترانه را با استفاده از مدل بوم‌سازگان جنگلی بررسی کرد. این پژوهش داده‌های ۱۸۶ قطعه جنگلی مختلط را تجزیه و تحلیل کرد و بر روی صفات کلیدی مانند ارتفاع گیاه، توزیع ریشه و خواص هیدرولیکی آوند چوبی متمرکز شد. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که مصرف آب و تنش خشکی درختان بلوط تحت تأثیر این صفات است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که اختلاط گونه‌ها می‌تواند اثرهای متفاوتی بر مصرف آب و تنش خشکی، تحت تأثیر ساختار توده و شرایط اقلیمی داشته باشد. همچنین در پژوهش دیگری (Schwartz et al., 2020) چگونگی تعدیل عملکرد درخت و پاسخ خشکی را در یک جنگل گرمسیری در پورتوریکو بررسی کرد. با ادغام داده‌های آماربرداری سالانه، صفات عملکردی و معیارهای توپوگرافی مشتق‌شده از LiDAR، این پژوهش از مدل‌های بیزی سلسله مراتبی برای ارزیابی تأثیر خشکسالی، میکروتوپوگرافی بر رشد و بقای درختان استفاده کرد. نتایج نشان داد که رشد و بقا در شرایط مختلف توپوگرافی متفاوت بود. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت توپوگرافی در درک واکنش‌های خشکی گونه‌ها تأکید می‌کنند.

مانند اقلیم، خاک و نوع پوشش گیاهی، به تخمین مقدار خشکی در جنگل‌ها می‌پردازد.

کسب آگاهی از وضعیت خشکی در جنگل‌ها به همراه شناسایی عوامل مؤثر بر آن می‌تواند راهکارهای مناسب برای مدیریت بهینه جنگل‌ها برای مقابله با پدیده خشکی را فراهم کند. بر اساس منابع موجود عوامل متعددی می‌تواند روی خشکی درختان اثرگذار باشد. خشکسالی با طیف وسیعی از شرایط اقلیمی مرتبط است، مانند افزایش میانگین و بیشترین دمای هوا، که موجب افزایش نرخ تبخیر و تعرق، کاهش بارندگی، آفتاب بیشتر و افزایش فشار بخار می‌شود (Julio Camarero et al., 2018). همچنین می‌توان بیان کرد که آسیب‌پذیری درخت در برابر خشکی به ویژگی‌های عملکردی فردی، جمعیتی و گونه‌ای آن مانند استراتژی تنظیم روزه‌ای یا وضعیت هیدرولیک نیز بستگی دارد (Zamora-Pereira et al., 2021). اندازه درخت نیز نقش مهمی در حساسیت درختان به خشکی ایفا می‌کند که معمولاً خشکی اثرهای مخرب-تری برای درختان بلندتر به همراه دارد. ویژگی‌های توده (به‌عنوان مثال، تراکم جنگل، ساختار، ترکیب) نیز با آسیب‌پذیری گونه‌ها برای شکل دادن به پاسخ جنگل به خشکسالی تعامل دارند (Merlin et al., 2015; Bradford et al., 2022).

پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور بیشتر در ارتباط با تحمل نهال‌ها به تنش خشکی انجام شده است. تنش خشکی، اثرهای چندگانه‌ای بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی گیاه بر جای گذاشته که مانند آنها می‌توان به کاهش عملکرد اقتصادی، کاهش پتانسیل آب، محتوای نسبی آب برگ، سنتز پروتئین، مقدار کلروفیل، هدایت روزه‌ای و فتوسنتز اشاره کرد (Asgharpour et al., 2017; Jafari et al., 2020; Saeidi Abueshaghi et al., 2023).

خشکی در جنگل‌های هیرکانی دارد؛ ۲) مقدار تنش خشکی در قسمت‌های شرق جنگل هیرکانی بیشتر از قسمت‌های غربی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

این پژوهش در کل سطح منطقه جنگل‌های هیرکانی شمال کشور با مساحت تقریبی ۱/۸۵ میلیون هکتار انجام شد (Sagheb Talebi et al., 2014). این جنگل‌ها که به‌عنوان میراث جهانی به ثبت رسیده است، به‌دلیل تنوع گیاهی غنی آن شناخته شده است. جنگل‌های هیرکانی شامل کمربند سبز باریک از جنگل‌های خزان-کننده معتدل است که در دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز و در مرزهای جنوبی دریای خزر به طول حدود ۸۰۰ کیلومتر و عرضی بین ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر امتداد یافته است (Marvi-Mohadjer, 2007). این جنگل‌ها بازمانده دوران سوم زمین‌شناسی هستند و از نظر تعداد گونه درختی و درختچه‌ای جزء جنگل‌های غنی از گونه محسوب می‌شود. این جنگل‌ها شامل ترکیب گونه‌هایی مانند راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky)، بلوط بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.)، ممرز (*Carpinus betulus* L.) و انجیلی (*Parrotia persica* C.A.Mey) است (Sagheb-Talebi, 2014). اقلیم این جنگل‌ها در حقیقت اقلیم نیمه مدیترانه‌ای است که دارای آب و هوای معتدل و مرطوب است. مقدار بارش به‌طور متوسط ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال است و مقدار بارش از غرب (منطقه انزلی حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر) به سمت شرق (منطقه گرگان حدود ۶۰۰ میلی‌متر) کاهش می‌یابد. از نظر مقدار درجه حرارت نیز متوسط سالانه بین ۱۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. از نظر خاک-شناسی، خاک‌های جنگل شمال کشور بیشتر تحول‌یافته

جنگل‌های هیرکانی به تغییرات اقلیمی و دسترسی به آب بسیار حساس است، همچنین پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده روند گرم شدن و تغییر الگوهای بارندگی است (Khoshravesh et al., 2017). که منجر به پیامدهای نگران‌کننده برای این بوم‌سازگان منحصربه‌فرد می‌شود. این موضوع تأکیدی بر نیاز به اقدامات پیشگیرانه حفاظتی و استراتژی‌های مدیریت برای حفاظت از این بوم‌سازگان منحصربه‌فرد در مواجهه با شرایط محیطی در حال تغییر است. با توجه به‌اینکه تغییرات اقلیمی شرایط خشکسالی را در بسیاری از مناطق تشدید می‌کند؛ بنابراین، پژوهش خشکی در جنگل هیرکانی بینش‌های ارزشمندی را برای مدیریت موثر منابع آب و همچنین عملیات حفاظتی و حمایتی در این بوم‌سازگان برای مدیریت بهینه آن فراهم می‌کند. این دانش برای پیش‌بینی روندهای آینده و توسعه استراتژی‌های سازگاری برای محافظت از جنگل در برابر شرایط تغییر اقلیم لازم و ضروری است. بر اساس منابع موجود تاکنون پژوهشی در ارتباط با وضعیت خشکی و عوامل مؤثر بر آن در کل جنگل‌های هیرکانی شمال کشور انجام نشده است بنابراین هدف از اجرای پژوهش حاضر بررسی وضعیت خشکی و عوامل محیطی مؤثر بر آن در کل سطح جنگل‌های هیرکانی بود. پژوهش حاضر به دنبال یافتن پاسخ به این سؤال است که کدام یک از متغیرهای ساختاری جنگل (ارتفاع، متوسط قطر، تراکم جنگل، سطح مقطع در هکتار)، اقلیمی (دما و بارش)، توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا) و خاکی (درصد شن، رس، سیلت، اسیدیت، درصد نیتروژن و کربن آلی) بیشترین تأثیر را روی تنش خشکی درختان در کل سطح جنگل‌های هیرکانی دارد. همچنین این پژوهش به دنبال بررسی این فرضیات است که ۱) از میان متغیرهای ساختاری، تراکم درختان بیشترین تأثیر را روی وضعیت

هستند و از نظر تیپ نیز شامل تیپ خاک راندزین و قهوه‌ای جنگلی است (Marvi-Mohadjer, 2007).

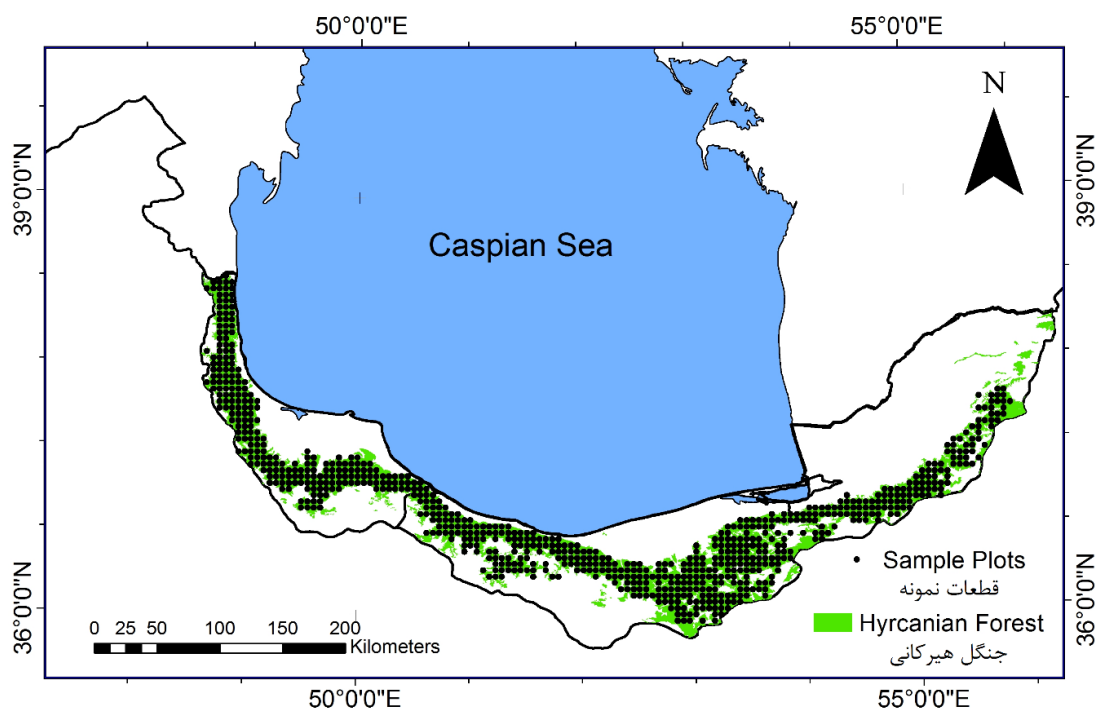
تهیه داده‌ها

برای انجام این پژوهش، از بانک داده‌های آماربرداری جنگل‌های شمال کشور استفاده شد. این بانک داده شامل ۲۷۰۰ قطعه‌نمونه ثابت دایره‌ای شکل ۱۰۰۰ متر مربعی با ابعاد شبکه ۵×۱ کیلومتر در کل سطح جنگل-های شمال کشور است که در طی سال‌های ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۷ توسط گروه کارشناسان با تجربه بر اساس روش متداول تهیه داده ارائه شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور جمع‌آوری شده است (شکل ۱). اطلاعات موجود برای هر قطعه‌نمونه شامل قطر برابر سینه درختان، نوع گونه و ارتفاع درختان شاهد (قطورترین و نزدیک‌ترین درخت به مرکز قطعه‌نمونه) است. همچنین موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت نیز در هر قطعه‌نمونه ثبت شده

است (Valizadeh et al., 2023). در هر قطعه‌نمونه قطر درختان با استفاده از کالیبر با دقت سانتی‌متر و ارتفاع درختان با استفاده از شیب‌سنج اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه ایستگاه هواشناسی برای کل منطقه جنگل هیرکانی وجود ندارد، بنابراین داده‌های هواشناسی شامل مقدار بارش و دما از پروژه POWER

([https://cran.r-](https://cran.r-project.org/web/packages/nasapower/index.htm)

[project.org/web/packages/nasapower/index.htm](https://cran.r-project.org/web/packages/nasapower/index.htm) I) مربوط به سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا (NASA Power) تهیه شد (Sparks, 2018; Gunaratne et al., 2022). داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک برای هر قطعه‌نمونه از بانک جهانی داده‌های خاک SoilGrids 2.0 (<https://soilgrids.org>) تهیه شد (Wang et al., 2022). با توجه به اینکه داده‌های آماربرداری مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۷ است، بنابراین دیگر داده‌های مورد نیاز نیز برای این سال‌ها تهیه شد.



شکل ۱ - موقعیت قطعات نمونه بانک داده‌های آماربرداری جنگل‌های هیرکانی

Figure 1. The location of sampling plots of Hyrcanian forest inventory data bank

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از تهیه داده‌ها، ابتدا تعداد در هکتار درختان و سپس سطح مقطع درختان (رابطه ۱) در هر قطعه نمونه محاسبه شد.

$$BA = \frac{\pi}{4} DBH^2 \quad (1)$$

در رابطه فوق، BA سطح مقطع (متر مربع) و DBH نشان‌دهنده قطر برابر سینه (سانتی متر) است. برای محاسبه ضریب خشکی از بسته نرم‌افزاری medfate ([https://cran.r-](https://cran.r-project.org/web/packages/medfate/index.html)

[project.org/web/packages/medfate/index.html](https://cran.r-project.org/web/packages/medfate/index.html)) در نرم‌افزار R استفاده شد (De Cáceres et al., 2022; Torres-Ruiz et al., 2024). بسته نرم‌افزاری medfate یک شبیه‌ساز است که برای پیش‌بینی عملکرد و پویایی توده‌های جنگلی در مقیاس‌های زمانی از روز تا سال طراحی شده است (Nadal-Sala et al., 2023). به‌طور کلی، ورودی‌های اصلی مدل شامل داده‌های پوشش درختی (قطر برابر سینه، ارتفاع کل و تعداد در هکتار) موجود در توده جنگلی است. دیگر متغیرهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب خشکی شامل اطلاعات خاک (درصد اجزای بافت خاک شامل رس، شن، سیلت، چگالی ظاهری) و متغیرهای اقلیمی (دما، بارش) است که می‌تواند توسط خود بسته فراگیری و تهیه شود. در نهایت متغیرهای توپوگرافی (درصد شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا) و موقعیت جغرافیایی آخرین ورودی‌های مدل هستند (De Cáceres et al., 2022).

برای بررسی اثر متغیرهای مورد بررسی (جدول ۱) روی شاخص خشکی از مدل خطی تعمیم‌یافته در نرم‌افزار R و بسته caret استفاده شد. مدل خطی تعمیم‌یافته - یافته، بسط مدل‌های خطی است به عبارت دیگر این مدل ارتقا یافته مدل خطی است که از حالت طبیعی خود داده‌ها استفاده می‌نماید و در نتیجه داده‌های استفاده شده

می‌تواند غیرخطی بوده و یا واریانس آنها ثابت نباشد. مدل‌های خطی تعمیم‌یافته، به‌طور کلی ابزارهایی تحلیلی برای انواع داده‌های مختلف هستند و روابط ریاضی آن توسط Nelder and Baker (1972) تهیه شد و به‌طور موفقیت‌آمیز در پژوهش‌های بوم‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های خطی تعمیم‌یافته می‌تواند برای مواقعی که مشاهدات توزیع نرمالی ندارند و زمانی که دیگر روش‌های مدل رگرسیون مناسب نیستند، به‌کار رود.

برای ارزیابی مدل خطی تعمیم‌یافته از روش ارزیابی متقابل (10-Fold Cross Validation) استفاده شد. در این روش، داده‌ها به ۱۰ بخش تقسیم می‌شوند. در هر مرحله، یک بخش به‌عنوان مجموعه ارزیابی و بقیه به‌عنوان مجموعه آموزش استفاده می‌شوند و این فرایند ۱۰ بار تکرار می‌شود تا ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد مدل ارائه شود. همچنین اهمیت نسبی متغیرهای مورد بررسی نیز با استفاده از بسته نرم‌افزاری caret محاسبه شد. در ادامه برای ارزیابی دقت مدل خطی تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی مقدار ضریب خشکی از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (Mean Absolute Error) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) استفاده شد (Huang and Deng 2021; Biecek and Burzykowski 2021; Hojjati et al., 2022; Valizadeh et al., 2023).

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی ضریب خشکی در جنگل‌های شمال کشور از روش زمین آمار کریجینگ معمولی در نرم‌افزار GS+ استفاده شد. به‌طور کلی این روش شامل دو بخش اصلی واریوگرافی و کریجینگ است. واریوگرافی اولین قدم برای مدل‌سازی ساختار مکانی به‌منظور استفاده در کریجینگ است. واریوگرام از طریق رابطه ۲ قابل محاسبه است:

واریوگرام تجربی و نمونه‌های اندازه‌گیری شده در جامعه، نقاط نمونه‌برداری نشده را بدون اریب و با حداقل واریانس برآورد کند. عمومی‌ترین روش آن که در علوم محیط زیستی نیز کاربرد دارد، کریجینگ معمولی است. پس از آماده شدن نقشه در نرم‌افزار GS+ خروجی آن با فرمت رستر تهیه شده و لایه نهایی در نرم‌افزار ArcGIS ویرایش شد. همچنین برای ارزیابی مدل کریجینگ نیز از ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (Mean Absolute Error) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) استفاده شد.

نتایج

قبل از اجرای مدل خطی تعمیم‌یافته، همبستگی متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن نشان داد که هیچ کدام از متغیرها همبستگی پیرسون معنی‌دار و بالا (بیشتر از ۰/۸۰) نداشتند، بنابراین تمام آنها در محاسبات و مدلسازی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

$\hat{\gamma}(h)$ مقدار واریوگرام برای تعداد N جفت نمونه است که با فاصله h (گام یا Lag) از یکدیگر جدا شده‌اند و $z(x_i)$ و $z(x_i + h)$ نیز مقادیر متغیر ناحیه‌ای x در نقاط i و $i+h$ هستند. مقدار واریوگرام به فاصله بین مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای در دو نقطه وابسته است. اگر این مقدار به جهت نیز وابسته باشد، واریوگرام را ناهمسانگرد و در غیر این صورت همسانگرد نامیده می‌شود. نسبت واریانس ساختاردار به حد آستانه، ساختار مکانی واریوگرام است. ساختار اگر ۷۵ درصد و بیشتر باشد، نشان‌دهنده ساختار قوی، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده ساختار متوسط و کمتر از ۲۵ درصد نشان‌دهنده ساختار ضعیف متغیر مورد بررسی است. از بین مدل‌های موجود به منظور برازش واریوگرام (شامل خطی، کروی، نمایی و گوسی) متداول‌ترین مدلی که بیشترین کاربرد را در پژوهش‌های زیست محیطی دارد، مدل کروی و نمایی است.

کریجینگ، روش درونیابی و برآورد زمین‌آمار است که قادر است بر اساس مدل برازش‌شده بر

جدول ۱- فهرست، آمار توصیفی و مخفف متغیرهای محیطی مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. List, basic descriptive statistics, and abbreviation of environmental variables used in this study

انحراف معیار Standard Error	کمترین Minimum	بیشترین Maximum	میانگین Mean	منبع تهیه Reference	واحد Unit	نام متغیر Variable name
0.13148	0.00	0.64	0.1471	بسته نرم‌افزاری medfate The medfate Package	-	خشکی Drought
154.40785	10.00	1140.00	217.3156	داده‌های آماربرداری Inventory Data	تعداد در هکتار Number per Hectare	تراکم جنگل Forest Density
13.68880	13.00	200.00	36.1970	داده‌های آماربرداری Inventory Data	سانتی‌متر Centimetre	قطر برابر سینه Diameter at Breast Height

ادامهٔ جدول ۱.

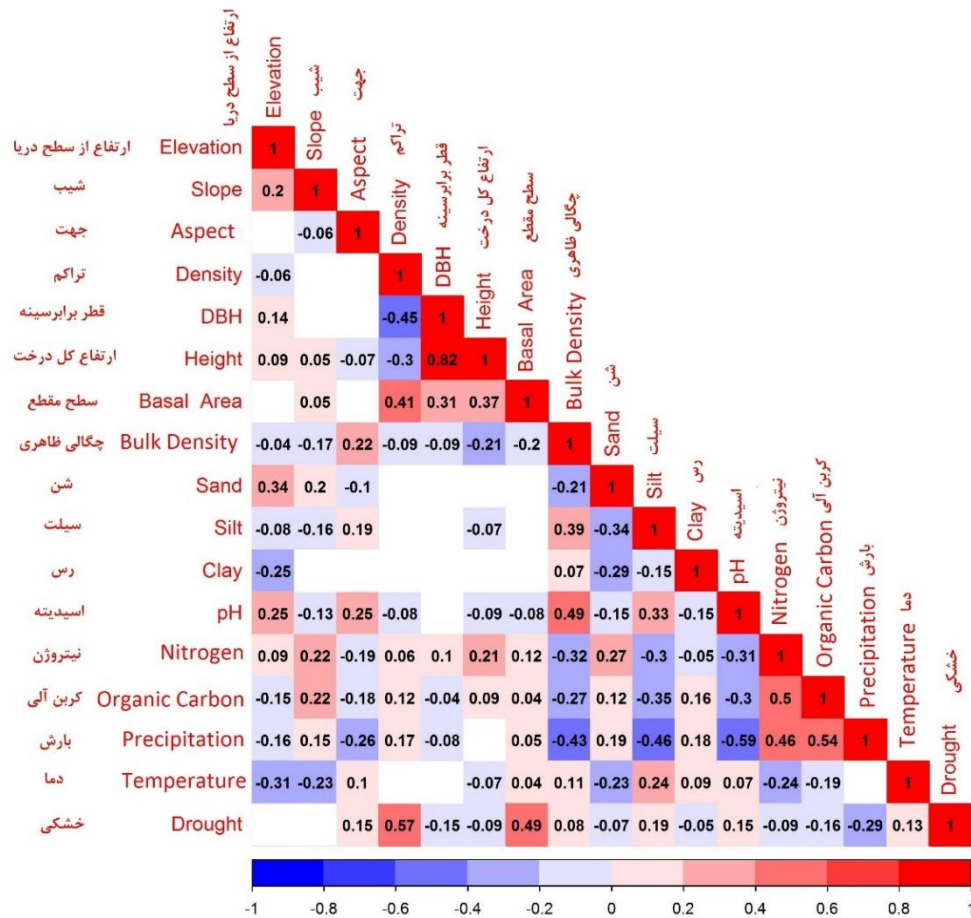
Continued table 1.

انحراف معیار Standard Error	کمترین Minimum	بیشترین Maximum	میانگین Mean	منبع تهیه Reference	واحد Unit	نام متغیر Variable name
4.08899	2.79	39.27	17.5751	داده‌های آماربرداری Inventory Data	متر Metre	ارتفاع کل درخت Total Tree Height
13.29481	0.13	88.57	24.1166	داده‌های آماربرداری Inventory Data	متر مربع در هکتار m ² /ha ⁻¹	سطح مقطع Basal Area
0.09287	0.38	1.43	1.2340	SoilGrids 2.0	گرم بر سانتی‌متر مکعب g/cm ⁻³	چگالی ظاهری Bulk Density
6.03573	0.00	44.90	21.9520	SoilGrids 2.0	درصد Percentage	شن Sand
7.11036	0.00	66.43	42.8301	SoilGrids 2.0	درصد Percentage	سیلت Silt
6.55779	0.00	48.30	33.7127	SoilGrids 2.0	درصد Percentage	رس Clay
0.66393	2.27	7.80	6.7187	SoilGrids 2.0	-	اسیدیته pH
0.04936	0.12	0.47	0.2977	SoilGrids 2.0	درصد Percentage	نیتروژن Nitrogen
0.74247	0.41	5.29	2.4323	SoilGrids 2.0	درصد Percentage	کربن آلی Soil organic carbon
2.68672	8.42	18.14	13.5318	NASAPOWER	درجه سانتی‌گراد Degree Celsius	دما Temperature
231.18417	204.72	1004.39	578.2838	NASAPOWER	میلی‌متر Millimeter	بارش Precipitation
722.51561	-5.00	11811.00	948.4452	داده‌های آماربرداری Inventory Data	متر Metre	ارتفاع از سطح دریا Elevation
21.43019	0.00	110.00	40.0357	داده‌های آماربرداری Inventory Data	درصد Percentage	شیب Slope
0.27598	0.00	1.00	0.2649	داده‌های آماربرداری Inventory Data	-	جهت Radiation

برابرسینه، کربن آلی و مقدار بارش رابطه منفی و معنی - دار با ضریب خشکی داشتند (جدول ۳). متغیرهای ارتفاع درختان، جهت، چگالی ظاهری، درصد سیلت و رس و pH خاک رابطه معنی‌داری با ضریب خشکی نداشتند. نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که متغیرهای تراکم جنگل، مقدار بارش و سطح مقطع

به‌طور کلی بر اساس نتایج به‌دست آمده، مدل خطی تعمیم یافته ارزیابی بسیار مناسبی برای پیش‌بینی مقدار شاخص خشکی در جنگل‌های هیرکانی به‌همراه داشت (جدول ۲). نتایج بررسی نشان داد که متغیرهای شیب، تراکم جنگل، سطح مقطع، درصد شن و نیتروژن خاک و دما با ضریب خشکی رابطه مثبت و معنی‌دار داشتند. درحالی که متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، قطر

درختان در هکتار مهم ترین عوامل مؤثر بر ضریب خشکی در جنگل های هیرکانی بود (شکل ۳).



شکل ۲- نتایج همبستگی پیرسون متغیرهای مورد بررسی - رنگ قرمز و آبی به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی دار مثبت و منفی است و مربع های خالی نشان دهنده عدم معنی دار بودن همبستگی است (تعداد نمونه برابر با ۲۷۰۰ است).

Figure 2. Pearson Correlation results of the studied variables - red and blue colors indicate significant positive and negative correlation, respectively, and blank squares indicate no significant correlation (n=2700).

نمایی دارای ساختار مکانی قوی (۶۴ درصد) است. همچنین نتایج ارزیابی مدل کریجینگ نیز نشان که ارزیابی بسیار پایین و دقت بسیار مناسبی در برآورد مقدار ضریب خشکی به همراه داشت (جدول ۴). بر اساس نقشه پهنه بندی مشاهده می شود که به طور کلی قسمت های شرق جنگل هیرکانی ضریب خشکی بالاتری نسبت به مناطق غربی داشت (شکل ۴).

در تجزیه و تحلیل واریوگرام، مدل نمایی بالاترین مقدار ضریب تبیین (R^2) را داشت و به عنوان بهترین مدل واریوگرام انتخاب شد. با توجه به اینکه دامنه واریوگرام برای همه جهت ها یکسان بود، بنابراین می توان بیان کرد که ناهمسانگردی وجود ندارد. مشخصات واریوگرام همسانگرد با مدل نمایی در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج نشان داد که ضریب خشکی با مدل

جدول ۲ - نتایج ارزیابی مدل خطی تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی ضریب خشکی در جنگل‌های هیرکانی

Table 2. Evaluation results of the general linear model for predicting the drought in Hyrcanian forests

جذب میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین	میانگین قدر مطلق خطا
Root Mean Square Error	Rsquared	Mean Absolute Error
0.085±0.003	0.57±0.040	0.06±0.002

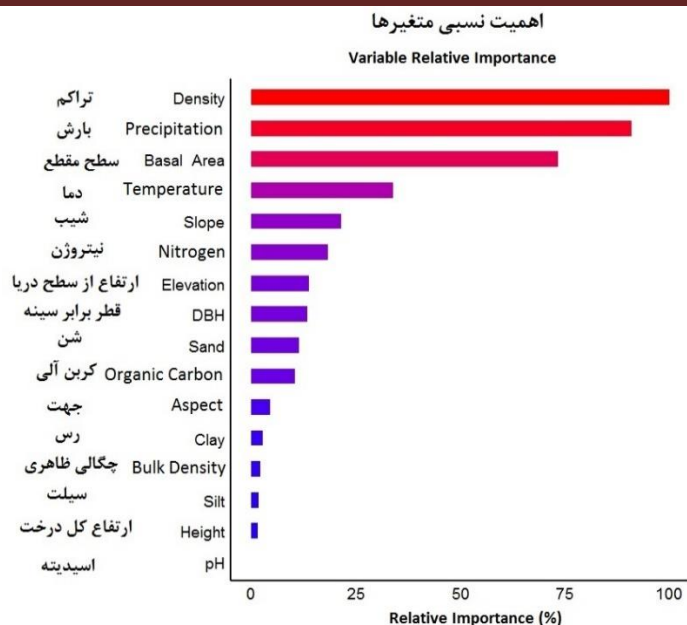
جدول ۳ - مقادیر ضرایب متغیرهای مورد بررسی برای پیش‌بینی خشکی

Table 3. Values of the coefficients of the studied variables for drought prediction

t	مقدار ضریب ± اشتباه معیار	
t value	Estimate ± Std. Error	
88.437***	0.147±0.001	ضریب ثابت Constant
-3.74***	-0.007±0.002	ارتفاع از سطح دریا Elevation
5.58***	0.01±0.002	شیب Slope
1.491ns	0.003±0.002	جهت Aspect
24.391***	0.061±0.003	تراکم جنگل Forest Density
-3.638***	-0.012±0.003	قطر برابر سینه Diameter at Breast Height
0.805ns	0.002±0.003	ارتفاع کل درخت Total Tree Height
18.033***	0.043±0.002	سطح مقطع Basal area
0.944ns	0.002±0.002	چگالی ظاهری Bulk Density
3.174**	0.006±0.002	شن Sand
-0.816ns	-0.002±0.002	سیلت Silt
1.084ns	0.002±0.002	رس Clay
-0.428ns	-0.001±0.002	اسیدیته pH
4.827***	0.01±0.002	نیتروژن Nitrogen
-2.896**	-0.006±0.002	کربن آلی Soil Organic Matter
-22.216***	-0.057±0.003	بارش Precipitation
8.563***	0.016±0.002	دما Temperature

***: نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۰۱، **: نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ و ns: نشان‌دهنده عدم وجود معنی‌داری است.

***: Indicates significance at the 0.0001 level, **: Indicates significance at the 0.001 level, and ns: Indicates non-significance.



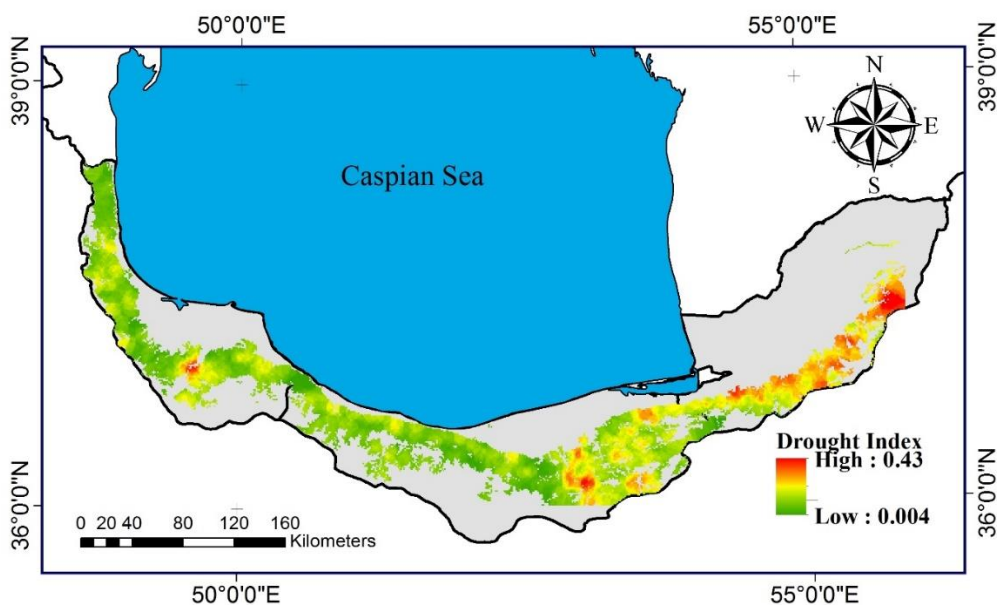
شکل ۳- اهمیت نسبی متغیرهای موردبررسی برای پیش‌بینی خشکی

Figure 3. The relative importance of the studied variables for predicting the drought

جدول ۴ - نتایج مشخصه‌های واریوگرام برای ضریب خشکی

Table 4. The results of variogram parameters for drought

مدل Model	Nugget Effect	Sill	ساختار مکانی Spatial Dependency	ضریب تیین Rsquared	جذب میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error	میانگین قدر مطلق خطا Mean Absolute Error
Exponential	0.014	0.040	0.64	0.85	0.013	0.094



شکل ۴- نقشه ضریب خشکی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از روش درونیابی کریجینگ

Figure 4. Drought interpolation map in Hyrcanian forests using kriging method

بحث

رژیم‌های هیدرولوژیکی متفاوتی داشته باشند که بر شاخص خشکی بر اساس در دسترس بودن آب در خاک تأثیر می‌گذارد (Hu et al., 2017).

در ارتباط با اثر تراکم جنگل می‌توان کرد که تراکم بالای درختان می‌تواند منجر به افزایش رقابت برای منابع آبی در بین درختان شود. در مناطق جنگلی پرتراکم، درختان ممکن است آب بیشتری از خاک جذب کنند که منجر به کاهش رطوبت خاک و افزایش رقابت برای آب می‌شود (Zamora-Pereira et al., 2021; Bradford et al., 2022). همچنین با افزایش مقدار تراکم جنگل می‌توان بیان کرد که تاج درختان با افزایش مقدار باران‌رایی از رسیدن مستقیم آب به کف جنگل جلوگیری می‌کند (Tafazoli et al., 2019). این باران‌رایی می‌تواند بر مقدار رطوبت خاک تأثیر بگذارد و به شرایط خشکسالی کمک کند (Tafazoli et al., 2015). در رابطه با اثر منفی قطر برابر سینه روی تنش خشکی درختان می‌توان بیان کرد که درختان بزرگتر با قطر برابر سینه بیشتر دارای تنه‌های بزرگتر هستند که می‌توانند آب بیشتری را ذخیره کنند (Kramer, 2012). از طرف دیگر درختان بالغ دارای سیستم‌های ریشه‌ای گسترده‌تری هستند که می‌توانند به قسمت‌های عمیق‌تری در خاک نفوذ کنند (Schenk and Jackson, 2002). اثر مثبت تراکم جنگل بر تنش خشکی در دیگر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Bottero et al., 2017; Steckel et al., 2020).

در رابطه با اثر مثبت شن روی خشکی می‌توان بیان کرد که خاک‌های شنی معمولاً دارای زهکشی خوبی هستند و به آب اجازه می‌دهند تا به سرعت در خاک نفوذ کند. در حالی که این پدیده می‌تواند به جلوگیری از غرقابی شدن خاک کمک کند، با این حال به این معنی

در این پژوهش، وضعیت خشکی با استفاده از مدل medfate در کل جنگل‌های هیرکانی شمال کشور بررسی شد. به طور کلی بر اساس نتایج به دست آمده متغیرهای شیب، تراکم جنگل، سطح مقطع، درصد شن و نیتروژن خاک با ضریب خشکی رابطه مثبت و معنی‌دار داشتند. از طرف دیگر ارتفاع از سطح دریا، قطر برابر سینه، کربن آلی و مقدار بارش رابطه منفی و معنی‌دار با ضریب خشکی داشتند. در ارتباط با شیب زمین می‌توان بیان کرد که معمولاً شیب بر الگوهای زهکشی یک منطقه تأثیر می‌گذارد. شیب‌های تندتر منجر به افزایش رواناب شده و در نهایت مقدار آب موجود در خاک برای درختان را کاهش می‌دهد که منجر به ایجاد تنش خشکی خواهد شد (Daws et al., 2002; Schwartz et al., 2020). همچنین شیب زمین می‌تواند با ایجاد تغییرات میکرو اقلیم نیز روی مقدار تنش خشکی درختان اثرگذار باشد. برای مثال، شیب‌های رو به جنوب نور مستقیم خورشید بیشتری دریافت می‌کنند و نرخ تبخیر بالاتری را دارند که منجر به ایجاد شرایط خشک‌تر می‌شود. در مقابل شیب‌های رو به شمال رطوبت بیشتری را حفظ می‌کنند و شرایط خشکی محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Guarín et al., 2005). تغییرات در ارتفاع از سطح دریا بیشتر با تغییرات دما نیز همراه است به طوری که با افزایش ارتفاع، دما به طور کلی کاهش می‌یابد. دمای خنک‌تر در ارتفاعات بالاتر می‌تواند بر مقدار تبخیر تأثیر بگذارد و از دست دادن آب از خاک را کاهش دهد و در نهایت بر شاخص خشکی تأثیر بگذارد (Li et al., 2023). تغییرات در الگوهای بارش با ارتفاع می‌تواند بر مقدار رطوبت خاک تأثیر بگذارد. مناطق در ارتفاعات بالاتر ممکن است

خواهد شد که می‌تواند مقاوت درختان را نسبت به خشکی افزایش دهد (Xu et al., 2023).

نتایج نشان داد که تراکم درختان مهم‌ترین عامل در پیش‌بینی مقدار خشکی در جنگل‌های هیرکانی بود. همانگونه که اشاره شد، تراکم بالای درخت موجب افزایش تقاضای کلی برای آب در بوم‌سازگان می‌شود (Bottero et al., 2017). در مناطق جنگلی پر تراکم، جذب و تعرق تجمعی آب توسط تعداد زیادی از درختان می‌تواند به‌طور زیادی بر سطح رطوبت خاک تأثیر بگذارد و به‌طور بالقوه منجر به افزایش شرایط خشکی شود (Kropp et al., 2019). در یک جنگل متراکم، درختان منفرد برای منابع آبی محدود در خاک رقابت می‌کنند. این رقابت در دوره‌های خشک که دسترسی به آب کاهش می‌یابد، تشدید می‌شود. افزایش رقابت برای آب می‌تواند منجر به تنش آبی بیشتر برای درختان شود و در مجموع موجب افزایش شاخص خشکی جنگل می‌شود. در طول شرایط خشکسالی، جنگل‌های متراکم ممکن است تنش بیشتری داشته باشند که منجر به کاهش رشد و افزایش آسیب‌پذیری در برابر آفات و بیماری‌ها نیز خواهد شد (Jactel et al., 2012).

سطح مقطع درخت ارتباط نزدیکی با کل سطح برگ و پتانسیل تعرق جنگل دارد (Roche et al., 2020). سطح مقطع بیشتر منجر به افزایش نیاز آبی درخت و در نهایت حساسیت بیشتر درختان به خشکی می‌شود (Ruiz-Benito et al., 2014). همچنین لازم به ذکر است که سطح مقطع نشان‌دهنده پیچیدگی ساختاری و ترکیب جنگل است. تغییرات در سطح مقطع ممکن است منعکس‌کننده تغییرات در ترکیب گونه‌های درختی باشد (Valizadeh et al., 2023) که بر پاسخ کلی بوم‌سازگان به تنش خشکی تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، تولید و سلامت بوم‌سازگان جنگلی با

است که خاک‌های شنی ظرفیت نگهداری آب کمتری دارند (Weil and Brady 2016). در نتیجه، در مناطقی که درصد شن بالاتری دارند، خاک ممکن است مستعد زهکشی تندتر باشد، که منجر به کاهش رطوبت خاک در طول دوره‌های خشک می‌شود و منجر به افزایش شاخص خشکی خواهد شد (Bens et al., 2007). با توجه به‌اینکه نیتروژن خاک و مقدار ضریب خشکی رابطه مثبتی داشتند، می‌توان بیان کرد که گیاهانی که به منابع کافی نیتروژن دسترسی دارند برگ، ساقه و ریشه و در نهایت زی‌توده بیشتری می‌توانند تولید کنند. این افزایش زی‌توده می‌تواند منجر به پوشش جنگلی متراکم‌تر در مناطق غنی از نیتروژن شود (Boggs et al., 2007). با افزایش تراکم پوشش گیاهی به دلیل زی‌توده بالاتر، رقابت برای منابع آب ممکن است تشدید شود. گیاهان بیشتر با زی‌توده افزایش یافته در مجموع آب بیشتری از خاک جذب می‌کنند. رقابت برای آب می‌تواند منجر به نرخ تعرق بالاتر، به ویژه در دوره‌های خشک شود. این افزایش تقاضای آب با پوشش گیاهی متراکم‌تر می‌تواند منجر به شاخص خشکی بالاتر شود (Steckel et al., 2020).

کربن آلی خاک با بهبود ساختار خاک به ظرفیت نگهداری آب در خاک کمک می‌کند (Weil and Brady 2016). مقدار بالاتر کربن آلی می‌تواند توانایی خاک را برای حفظ آب به ویژه در دوره‌های خشک افزایش دهد. خاک‌هایی با محتوای کربن آلی بالاتر تمایل به حفظ آب بیشتری دارند که در نهایت منجر به کاهش خشکسالی می‌شود (Rawls et al., 2003). کربن آلی خاک به‌عنوان منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌های خاک نیز عمل می‌کند. از آنجایی که فعالیت میکروبی برای چرخه مواد مغذی و سلامت درختان ضروری است، بنابراین بیشتر بودن مواد آلی و به دنبال آن بهبود چرخه غذایی در نهایت موجب بهبود سلامت درختان

مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی بر اساس نتایج به دست آمده، متغیرهای شیب، تراکم جنگل، سطح مقطع، درصد شن و نیتروژن خاک و دما با ضریب خشکی رابطه مثبت و معنی دار ولی متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، قطر برابرسینه، کربن آلی و مقدار بارش رابطه منفی و معنی دار با ضریب خشکی داشتند. همچنین بر اساس نقشه پهنه‌بندی تهیه شده، قسمت‌های شرق جنگل هیرکانی ضریب خشکی بالاتری نسبت به مناطق غربی داشت. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که هر دو فرضیه پژوهش حاضر مبنی بر اینکه تراکم درختان بیشترین تأثیر را روی وضعیت خشکی دارد و همچنین مقدار تنش خشکی در قسمت‌های شرق جنگل هیرکانی بیشتر است، تأیید شد. بنابراین ضروری است که برنامه‌های مدیریتی برای مقابله با خشکسالی در این جنگل‌ها تدوین و اجرا شود. با توجه به اثر مثبت تراکم جنگل و سطح مقطع روی خشکی می‌توان بیان کرد که اجرای عملیات تنک کردن در مناطقی که حساسیت به تنش خشکی بیشتری دارند می‌تواند راهکاری برای مقابله با این پدیده باشد. همچنین با توجه به اثر شیب روی خشکی، توجه به این مناطق به منظور اجرای عملیات احیایی لازم و ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، لازم است بررسی‌های بیشتری برای بررسی اثرهای خشکی بر تنوع زیستی، سلامت جنگل و چرخه‌های بیوشیمیایی در جنگل‌های شمال ایران انجام شود.

References

Adams, H.D.; Guardiola-Claramonte, M.; Barron-Gafford, G.A.; Villegas, J.C.; Breshears, D.D.; Zou, C.B.; Troch, P.A.; Huxman, T.E., Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the*

سطح مقطع مرتبط است. شرایط خشکسالی می‌تواند بر تولید درختان تأثیر بگذارد و سطح مقطع بالاتر ممکن است نشان‌دهنده آسیب پذیری بیشتر در برابر تنش ناشی از خشکی باشد که بر سلامت کلی جنگل تأثیر می‌گذارد. رابطه مثبت سطح مقطع با تنش خشکی در دیگر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Bottero et al., 2017; Schmitt et al., 2020; Steckel et al., 2020).

با توجه به نتایج مدل کریجینگ، قسمت‌های شرق جنگل‌های هیرکانی مقادیر خشکی بالاتری نسبت به مناطق غربی داشت. تغییرات مکانی در خشکی اغلب ناشی از تفاوت در شرایط رطوبت محلی و تفاوت گونه‌ها در فیزیولوژی و پاسخ به خشکی است (McLaughlin et al., 2017). بخش‌های غربی و شرقی جنگل هیرکانی الگوهای اقلیمی مشخصی را نشان می‌دهند. میانگین بارندگی سالانه از ۵۳۰ میلی‌متر در منطقه شرقی تا ۱۳۵۰ میلی‌متر در منطقه غربی متغیر است. رطوبت نسبی به‌طور مداوم بالا است و از ۷۴/۶ درصد در شرق تا ۸۴/۶ درصد در غرب متغیر است. در طول دهه گذشته، جنگل هیرکانی میانگین دمای سالانه را در محدوده ۱۵ درجه سانتی‌گراد در غرب تا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد در شرق تجربه کرده است. خشکی بوم‌شناسی از غرب به شرق افزایش می‌یابد و در شرق تا سه ماه می‌رسد (Sagheb Talebi et al, 20014).

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تغییرات وضعیت خشکی و عوامل محیطی مؤثر بر آن در جنگل‌های شمال کشور

national academy of sciences 2009 106(17), 7063-7066.

Asgharpour, E.; Azadfar, D.; Saeedi, Z., Evaluation of *Acer cappadocicum* Gled seedlings to drought stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)* 2017, 30(1), 1-11. (In Persian)

Allen, C.D.; Macalady, A.K.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.;

- Kitzberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D.D.; Hogg, E.H., A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* **2010** *259*, 660–684.
- Allen, C.D.; Breshears, D.D.; McDowell, N.G., On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* **2015** *6*(8), 1-55.
- Alexander, L.V., Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes* **2016** *11*, 4–16.
- Bennett, A.C.; Dargie, G.C.; Cuni-Sanchez, A.; Tshibamba Mukendi, J.; Hubau, W.; Mukinzi, J.M.; Phillips, O.L.; Malhi, Y.; Sullivan, M.J.; Cooper, D.L.; Adu-Bredu, S., Resistance of African tropical forests to an extreme climate anomaly. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2021**, *118*(21), 2003169118.
- Bens, O.; Wahl, N.A.; Fischer, H.; Hüttl, R.F., Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties. *European Journal of Forest Research* **2007**, *126*, 01-109.
- Biecek, P.; Burzykowski, T.; Explanatory model analysis: explore, explain, and examine predictive models. CRC Press 2021
- Boggs, J.L.; McNulty, S.G.; Pardo, L.H., Changes in conifer and deciduous forest foliar and forest floor chemistry and basal area tree growth across a nitrogen (N) deposition gradient in the northeastern US. *Environmental Pollution* **2007**, *149*(3), 303-314.
- Bottero, A.; D'Amato, A.W.; Palik, B.J.; Bradford, J.B.; Fraver, S.; Battaglia, M.A.; Asherin, L.A. Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought. *Journal of Applied Ecology* **2017**, *54*(6), 1605-1614.
- Bradford, J.B.; Shriver, R.K.; Robles, M.D.; McCauley, L.A.; Woolley, T.J.; Andrews, C.A.; Crimmins, M.; Bell, D.M., Tree mortality response to drought-density interactions suggests opportunities to enhance drought resistance. *Journal of Applied Ecology* **2022**, *59*(2), 549-559.
- Brodribb, T. J.; Powers, J.; Cochard, H.; Choat, B., Hanging by a thread? Forests and drought. *Science* **2020** *368*, 261–266.
- Dai, A., Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* **2013** *3*, 52–58.
- Daws, M. I.; Mullins, C. E.; Burslem, D. F. R. P.; Paton, S. R.; Dalling, J. W., Topographic position affects the water regime in a semideciduous tropical forest in Panam'a. *Plant and Soil* **2002**, *238*, 79–90.
- De Cáceres, M.; Molowny-Horas, R.; Cabon, A.; Martínez-Vilalta, J.; Mencuccini, M.; García-Valdés, R.; Nadal-Sala, D.; Sabaté, S.; Martin-StPaul, N.; Morin, X.; Batllori, E., MEDFATE 2.8. 1: A trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geoscientific Model Development Discussions* **2022**, 1-52.
- Gazol Burgos, A.; Camarero, J.J.; Vicente Serrano, S.M.; Sánchez-Salguero, R.; Gutiérrez, E.; Luis, M.D.; Sangüesa-Barreda, G.; Novak, K.; Rozas, V.; Tíscar, P.A.; Linares, J.C., Forest resilience to drought varies across biomes. *Global change biology* **2018** *24*(5), 2143-2158.
- Gora, E. M.; Esquivel-Muelbert, A., Implications of size-dependent tree mortality for tropical forest carbon dynamics. *Nature Plants* **2021** *7*, 384–391.
- Granier, C.; Bessagnet, B.; Bond, T.; D'Angiola, A.; Denier van der Gon, H.; Frost, G.J.; Heil, A.; Kaiser, J.W.; Kinne, S.; Klimont, Z.; Kloster, S., Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period. *Climatic change* **2011** *109*, 163-190.
- Guarín, A.; Taylor, A. H., Drought triggered tree mortality in mixed conifer forests in Yosemite National Park, California, USA. *Forest Ecology Management* **2005**, *218*, 229–244.
- Gunaratne, M.D.N.; De Silva, S.H.N.P., Amarasinghe, R.K.; Can NASA Power Climatic Data Fill the Gap of Climatic Data Required for Agriculture and Forest Ecosystems Modeling? In Proceedings of International Forestry and Environment Symposium **2022**, 141p.
- He, H.S.; Gustafson, E.J.; Lischke, H., Modeling forest landscapes in a changing climate: theory and application. *Landscape Ecology* **2017** *32*, 1299-1305.

- Hojjati, S.M.; Tafazoli, M.; Asadian, M.; Baluee, A., Estimation of carbon sequestration and forest soil respiration using machine learning models in Eastern Forests of Mazandaran Province. *Forest Research and Development* **2022**, 8(4), 371-388. (In Persian)
- Hu, Z.; Wang, G.; Sun, X., Precipitation and air temperature control the variations of dissolved organic matter along an altitudinal forest gradient, Gongga Mountains, China. *Environmental Science and Pollution Research* **2017**, 24, 10391-10400.
- Huang, S, Deng, H., Data Analytics: A Small Data Approach. CRC Press 2021
- Jactel, H.; Petit, J.; Desprez-Loustau, M.L.; Delzon, S.; Piou, D.; Battisti, A.; Koricheva, J., Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology* **2012**, 18(1), 267-276.
- Jafari, Z.; Matinkhah, S.H.; Ebrahimi, K., Study of Physiological Indices of Some Drought Resistance Trees in Natural Conditions. *Desert Management* **2020**, 7(14), 107-118. (in Persian)
- Jahanbazy Goujani, H.; Hosseini Nasr, S.M.; Sagheb-Talebi, K.; Hojjati, S.M., Effect of drought stress induced by altitude, on four wild almond species. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* **2013**, 21(2), 373-386. (In Persian)
- Jian, Z.; Shongming, H.; Fangliang, H., Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2015** 12, 4009-4014.
- Julio Camarero, J.; Gazol, A.; Sangüesa-Barreda, G.; Cantero, A.; Sánchez-Salguero, R.; Sánchez-Miranda, A.; Granda, E.; Serramalquer, X.; Ibáñez, R.; Forest growth responses to drought at short-and long-term scales in Spain: squeezing the stress memory from tree rings. *Frontiers in Ecology and Evolution* **2018**, 6, 9.
- Khoshravesh, M.; Mirnaseri, M.; Pesarakloo, M., Change detection of precipitation trend of northern part of Iran using Mann-Kendall Non-Parametric Test. *Journal of Watershed Management Research* **2017**, 8(16), 223-231. (In Persian)
- Kramer, P., Physiology of woody plants, Elsevier. 2012
- Kropp, H.; Loranty, M.M.; Natali, S.M.; Kholodov, A.L.; Alexander, H.D.; Zimov, N.S.; Mack, M.C.; Spawn, S.A., Tree density influences ecohydrological drivers of plant-water relations in a larch boreal forest in Siberia. *Ecohydrology* **2019**, 12(7), e2132.
- Li, J.; Gao, X.; Yan, A.; Chang, S.; Li, Q., Altitudinal differentiation of forest resilience to drought in a dryland mountain. *Forests* **2023**, 14(7), 1284.
- Ma, Z.; Liu, H.; Mi, Z.; Zhang, Z.; Wang, Y.; Xu, W.; Jiang, L.; He, J.S., Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production. *Nature Communications* **2017** 8, 1-7.
- Marvie Mohadjer, MR., Silviculture. Tehran: Tehran University Press 2007
- McLaughlin, B.C.; Blakey, R.; Weitz, A.P.; Feng, X.; Brown, B.J.; Ackerly, D.D.; Dawson, T.E.; Thompson, S.E., Weather underground: Subsurface hydrologic processes mediate tree vulnerability to extreme climatic drought. *Global change biology* **2020**, 26(5), 3091-3107.
- Merlin, M.; Perot, T.; Perret, S.; Korboulewsky, N.; Vallet, P., Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine. *Forest Ecology and Management* **2015**, 339, 22-33.
- Nadal-Sala, D.; Grote, R.; Kraus, D.; Hochberg, U.; Klein, T.; Wagner, Y.; Tatarinov, F.; Yakir, D.; Ruehr, N.K., Integration of tree hydraulic processes and functional impairment to capture the drought resilience of a semi-arid pine forest. *Biogeosciences Discussions* **2023**, 1-35.
- Nelder, J. A.; Baker, R. J., Generalized Linear Models. Wiley Online Library, New Jersey. 1972
- Rawls, W.J.; Pachepsky, Y.A.; Ritchie, J.C.; Sobecki, T.M.; Bloodworth, H., Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* **2003**, 116(1-2), 61-76.
- Roche, J.W.; Ma, Q.; Rungee, J.; Bales, R.C., Evapotranspiration mapping for forest management in California's Sierra Nevada. *Frontiers in Forests and Global Change* **2020**, 3, 69.
- Rohani, K.; Hosseini Nasr, S.M.; Asadi, H.; Tafazoli, M., The effect of recreation, rural population and forest roads on the diversity of forest understory species (case study:

- Zarin Abad Forests of Sari). *Forest Research and Development* **2022**, 8(2), 165-179. (In Persian)
- Ruiz-Benito, P.; Madrigal-Gonzalez, J.; Ratcliffe, S.; Coomes, D.A.; Kändler, G.; Lehtonen, A.; Wirth, C.; Zavala, M.A., Stand structure and recent climate change constrain stand basal area change in European forests: a comparison across boreal, temperate, and Mediterranean biomes. *Ecosystems* **2014**, 17, 1439-1454.
- Saeidi Abueshaghi, Z.; Pilehvar, B.; Sayedena, S.V., Vegetative and physiological responses of purple seedlings to water stress. *Forest Research and Development* **2023**, 9(3), 349-363. (In Persian)
- Sagheb Talebi, K.S.; Sajedi, T.; Pourhashemi, M., Forests of Iran. A treasure from the past, a hope for the future, Springer Netherlands 2014
- Schmitt, A.; Trouvé, R.; Seynave, I.; Lebourgeois, F., Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites. *Annals of Forest Science* **2020**, 77, 1-21.
- Schenk, H.J.; Jackson, R.B., Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology* 2002 480-494.
- Schwartz, N.B.; Feng, X.; Muscarella, R.; Swenson, N.G.; Umaña, M.N.; Zimmerman, J.K.; Uriarte, M., Topography and traits modulate tree performance and drought response in a tropical forest. *Frontiers in Forests and Global Change* **2020**, 3, 596256.
- Sparks, A.H., nasapower: a NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. *Journal of Open Source Software* **2018**, 3(30), 1035.
- Steckel, M.; Moser, W.K.; del Río, M.; Pretzsch, H., Implications of reduced stand density on tree growth and drought susceptibility: a study of three species under varying climate. *Forests* **2020**, 11(6), 627.
- Tafazoli, M.; Atarod, P.; Hojjati, S.M.; Tafazoli, M., Rainfall interception by *Quercus castaneifolia*, *Acer velutinum*, and *Pinus brutia* plantations within the growing season in Darabkola Forest of Mazandaran Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* **2015**, 23(1), 1-12. (In Persian)
- Tafazoli, M.; Attarod, P.; Hojjati, S.M.; Tafazoli, M., Throughfall Chemistry of Persian Maple (*Acer velutinum*) and Turkish Pine (*Pinus brutia*) Plantations in East of Mazandaran. *Ecology of Iranian Forest* **2019**, 7(14), 39-47. (In Persian)
- Tilman, D., The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology* **1999** 80(5), 1455-1474.
- Torres-Ruiz, J.M.; Cochard, H.; Delzon, S.; Boivin, T.; Burrell, R.; Cailleret, M.; Corso, D.; Delmas, C.E.; De Caceres, M.; Diaz-Espejo, A.; Fernández-Conradi, P., Plant hydraulics at the heart of plant, crops and ecosystem functions in the face of climate change. *New Phytologist* **2024**, 241(3), 984-999.
- Valizadeh, E.; Asadi, H.; Jaafari, A.; Tafazoli, M., Machine learning prediction of tree species diversity using forest structure and environmental factors: a case study from the Hyrcanian forest, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* **2023**, 195(11), 1334.
- Vicente-Serrano, S.M.; Lopez-Moreno, J.I.; Beguería, S.; Lorenzo-Lacruz, J.; Sanchez-Lorenzo, A.; García-Ruiz, J.M.; Azorin-Molina, C.; Morán-Tejeda, E.; Revuelto, J.; Trigo, R.; Coelho, F., Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters* **2014** 9(4), 044001.
- Vose, J.M.; Clark, J.S.; Luce, C.H.; Patel-Weynand, T., Effects of drought on forests and rangelands in the United States: a comprehensive science synthesis. 2015
- Wang, M.; Guo, X.; Zhang, S.; Xiao, L.; Mishra, U.; Yang, Y.; Zhu, B.; Wang, G.; Mao, X.; Qian, T.; Jiang, T., Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate. *Nature communications* **2022**, 13(1), 1-11.
- Weil, R.R.; Brady, N.C., The nature and properties of soils. 15th ed. Doral (FL): Pearson. 2016
- Xu, H.; Huang, L.; Chen, J.; Zhou, H.; Wan, Y.; Qu, Q.; Wang, M.; Xue, S., Changes in soil microbial activity and their linkages with soil carbon under global warming. *Catena* **2023**, 232, 107419.
- Yousefpour, R.; Jacobsen, J.B.; Thorsen, B.J.; Meilby, H.; Hanewinkel, M.; Oehler, K., A review of decision-making approaches to handle uncertainty and risk in adaptive forest management under climate change. *Annals of forest science* **2012** 69, 1-15.

Zamora-Pereira, J.C.; Yousefpour, R.; Cailleret, M.; Bugmann, H.; Hanewinkel, M., Magnitude and timing of density reduction are key for the resilience to severe drought in

conifer-broadleaf mixed forests in Central Europe. *Annals of Forest Science* **2021**, 78(3), 1-28.