

Research Paper

Spatial analysis of meteorological drought susceptibility with a forest and watershed monitoring approach in Kurdistan Province**Abdulaziz Hanifinia¹, Hiran Abghari^{*2} and Khabat Khosravi³**

1- Ph.D. Student of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (aziz.hanifi1372@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (h.abghari@urmia.ac.ir)

3- Postdoctoral researcher, University of Prince Edward Island, Canada. (khabat.khosravi@gmail.com)

Received: 06 January 2025

Accepted: 02 March 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Meteorological drought, as one of the most catastrophic types of drought, has direct and indirect destructive impacts on society and can even influence the occurrence of other natural phenomena. Iran, due to its geographical position in the arid and semi-arid belt, is highly prone to drought, having experienced frequent and severe droughts in watersheds and forested areas over the past three decades. Accurate spatial prediction (identification of starting points) and temporal forecasting of potential drought damages at both global and national levels is highly challenging. However, in a general assessment, research has shown that damages caused by meteorological drought are more pronounced in forested areas compared to watersheds. Identifying influencing factors, measuring, predicting, and defining a natural hazard such as drought is often very difficult and impractical due to its complexity. Therefore, implementing adaptive measures tailored to the region requires the identification of key components, recognition of complex relationships, and a comprehensive understanding of influencing factors, along with the assessment of drought risks through the preparation of drought vulnerability and sensitivity maps.

Material and Methods: The geographical location of Kurdistan Province is between 34°44' and 36°30' N latitude and 45°31' to 48°16' E longitude from the Greenwich meridian. A map of drought distribution points was prepared using the Drought Severity Index (DSI) in the Google Earth Engine environment. Natural, anthropogenic, and morphometric factors involved in drought occurrence were considered. The digital elevation model was downloaded from the USGS website and used to prepare information layers of elevation, slope, and morphometric indices. Layers of precipitation, temperature, evapotranspiration, and climate were prepared from data of rain gauge, synoptic, and climatological stations across the province and interpolated using the kriging method. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was extracted from Sentinel-2 imagery, and the soil map of Kurdistan Province was obtained from the FAO soil database. Information layers were prepared in ArcGIS and SAGA_GIS software. The drought sensitivity map was generated using a hybrid machine learning model (Bagging–Random Forest). The contribution of each factor to drought occurrence was evaluated using the permutation index, and the model performance was assessed with the ROC curve in the R programming environment.

Results: The results of model evaluation using the ROC curve after preparing the drought sensitivity map with the Bagging–Random Forest method show that the model has excellent performance ($AUC > 0.9$) in identifying sensitive areas. The analysis of the percentage of areas with sensitivity and vulnerability within the study area indicated that about 60% of watersheds and forested areas in the province fall within the range of moderate to very high vulnerability. The results of the permutation analysis for the model in determining the factors influencing drought occurrence in Kurdistan Province revealed that climatic factors such as precipitation, temperature, climate, and evapotranspiration had the highest influence, whereas the NDVI and the mass balance index had the lowest impact.

Conclusion: The results of the hybrid Bagging–Random Forest model for Kurdistan Province showed that highly drought-sensitive areas are mainly located in the eastern and partially southern parts of the province. Since most of the forested watersheds and valuable rangelands are situated in the western parts of the province, their sensitivity to drought is relatively lower compared to other regions. However, the evaluation of the model's predictive map in western areas, which include high-quality forests and rangelands, indicated that forested watersheds are in a more critical condition than other watersheds. Therefore, priority in future planning should be given to these areas.

Keywords: Climatic factors, combined models, natural hazards, permutation index.

How to Cite This Article: Hanifinia, A., Abghari, H., and Khosravi, K. (2025). Spatial analysis of meteorological drought susceptibility with a forest and watershed monitoring approach in Kurdistan Province. *Forest Research and Development*, 11(2), 165-181. DOI: [10.30466/jfrd.2025.55575.1738](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.55575.1738)



Copyright ©2024 Hanifinia et al. Published by Urmia University.

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

تحلیل مکانی حساسیت پذیری خشکسالی هواشناسی با رویکرد پایش جنگل‌ها و حوزه‌های آبخیز استان کردستان

عبدالعزیز حنیفی‌نیا^۱، هیراد عبقری^{۲*} و خه‌بات خسروی^۳

۱- دانشجوی دکتری مدیریت حوزه‌های آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (aziz.hanifi1372@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (h.abghari@urmia.ac.ir)

۳- پژوهشگر فوق دکتری، دانشگاه جزیره پرنس ادوارد، کانادا. (Khabat.khosravi@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

چکیده

مقدمه و هدف: خشکسالی هواشناسی به عنوان یکی از فاجعه‌بارترین انواع خشکسالی‌ها با پیامدهای مخرب و گسترده مستقیم یا غیرمستقیم بر جامعه است که می‌تواند در صورت رخداد حتی دیگر پدیده‌های طبیعی را نیز تحت تاثیر قرار دهد. کشور ایران از نظر موقعیت جغرافیایی در نوار خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و مستعد خشکسالی است که در طی سه دهه اخیر خشکسالی‌های مکرر و شدیدی را در حوزه‌های آبخیز و جنگلی تجربه کرده است. پیش‌بینی مکانی (عدم شناسایی نقاط شروع آن) و زمانی دقیق خسارات احتمالی خشکسالی در سطح جهانی و کشور بسیار دشوار است. اما در یک بررسی کلی، تحقیقات نشان داده است که خسارات ناشی از خشکسالی هواشناسی در مناطق جنگلی نسبت به حوزه‌های آبخیز خود را بیشتر نمایان کرده است. شناسایی عوامل موثر، اندازه‌گیری، پیش‌بینی و تعریف یک مخاطره طبیعی مانند خشکسالی به دلیل پیچیدگی که دارد، اغلب بسیار دشوار و عملی نیست. از این رو، اجرای اقدامات سازگار و متناسب با منطقه مستلزم شناسایی اجزای اصلی، تشخیص روابط پیچیده و درک کامل عوامل موثر و ارزیابی خطرات خشکسالی از طریق تهیه نقشه‌های خطرپذیری و حساسیت خشکسالی است.

مواد و روش‌ها: موقعیت جغرافیایی استان کردستان بین مختصات ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. نقشه پراکنش نقاط خشکسالی با شاخص (DSI) در محیط گوگل ارث انجین تهیه شد. عوامل طبیعی، انسانی و شاخص‌های موفومتری دخیل در وقوع خشکسالی در نظر گرفته می‌شوند. نقشه مدل رقومی ارتفاعی از سایت زمین‌شناسی آمریکا دانلود و به منظور تهیه لایه‌های اطلاعاتی ارتفاع، شیب و شاخص‌های موفومتری استفاده شد. لایه بارندگی، دما، تبخیر و تعرق و اقلیم از داده‌های ایستگاه‌های بارانسنجی، سنوپتیک و کلیماتولوژی برای کل استان تهیه و با روش کریجینگ آماده شد. لایه شاخص تفاوت

نرمال شده پوشش گیاهی از تصاویر Sentinel_2 و نقشه خاک استان کردستان از نقشه خاک سازمان فائو استخراج شد. نقشه‌های لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار ArcGIS و SAGA_GIS تهیه خواهد شد. نقشه مناطق دارای حساسیت به خشکسالی با استفاده از مدل یادگیری ماشین ترکیبی Bagging – Random Forest، تاثیر هر عامل در رخداد خشکسالی با شاخص جایگشت و ارزیابی مدل با منحنی ROC در محیط برنامه نویسی R انجام شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از ارزیابی مدل با استفاده از منحنی ROC بعد از تهیه نقشه حساسیت‌پذیری منطقه به وقوع خشکسالی با روش Bagging – Random Forest نشان می‌دهد که مدل با مقدار سطح زیرمنحنی ($AUC > 0.9$) در تعیین مناطق حساس دارای عملکرد سطح عالی است. نتایج حاصل از بررسی درصد مساحت مناطق حساس و دارای آسیب‌پذیری در محدوده مورد بررسی نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد حوزه‌های آبخیز و جنگلی استان در محدوده مناطق دارای آسیب‌پذیری متوسط تا خیلی زیاد قرار دارد. نتایج حاصل از بررسی جایگشت (Permutation) برای مدل فوق در تعیین عوامل موثر بر رخداد خشکسالی در استان کردستان نشان می‌دهد که عوامل جوی مانند بارندگی، دما، اقلیم و تبخیر و تعرق به ترتیب بیشترین تاثیر و کمترین تاثیر مربوط شاخص نرمال شده تفاوت پوشش زمین و شاخص تعادل جرم است.

نتیجه‌گیری: نتایج مدل ترکیبی Bagging – Random Forest برای استان کردستان نشان داد که مناطق دارای حساسیت بالا به خشکسالی بیشتر شرق و تا حدودی قسمت‌های جنوبی این استان را در بر می‌گیرد. از آنجایی که اغلب حوزه‌های جنگلی و دارای مراتع مرغوب در غرب این استان قرار دارند؛ بنابراین حساسیت این مناطق به خشکسالی نسبت به دیگر مناطق در درجات پایین‌تری قرار می‌گیرد. نتایج ارزیابی نقشه پیش‌بینی مدل در مناطق غربی این استان که دارای جنگل‌ها و مراتع مرغوب هست، نشان داد که حوزه‌های دارای مناطق جنگلی نسب حوزه‌های آبخیز در شرایط بحرانی‌تری قرار دارد و اولویت برنامه‌ریزی‌های آینده باید در این مناطق باشد.

واژه‌های کلیدی: عوامل اقلیمی، مدل‌های ترکیبی، مخاطرات طبیعی، شاخص جایگشت.

روند صعودی تغییرات آب و هوایی، اقلیم و رشد جمعیت تقویت می‌شود (Gerdener et al., 2020). در صورت رخداد خشکسالی حتی دیگر پدیده‌های طبیعی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان بسیاری از خسارات ناشی از رخداد دیگر پدیده‌های طبیعی مانند سیلاب و آتش‌سوزی را دنباله رخداد پدیده خشکسالی تلقی کرد. فراوانی رویدادهای اقلیمی مانند بارش‌های حدی، دماهای بالا، امواج گرمایی در قرن بیست و یکم بر طبق گزارش چهارم و پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم دارای تغییرات بی‌سابقه‌ای بوده است. با افزایش این متغیرهای جهانی تعداد رخداد، شدت وقوع و مدت خشکسالی نیز افزایش قابل‌توجهی پیدا خواهد کرد (IPCC, 2007; Massoudi et al., 2024). پدیده خشکسالی به‌صورت دوره‌ای رخ داده و حتی مناطق دوردست را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (Sheikh Mao et al., 2015; Oveisi et al., 2024). بنابراین پیش‌بینی مکانی (عدم شناسایی نقاط شروع آن) و زمانی دقیق خسارات احتمالی خشکسالی در سطح جهانی و کشورمان بسیار دشوار است. کشور ایران از نظر موقعیت جغرافیایی در نوار خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و مستعد خشکسالی است که در طی سه دهه اخیر خشکسالی‌های مکرر و شدیدی را تجربه کرده است. بر اساس گزارش تقریبی و برآوردی مرکز ملی هوا و تغییر اقلیم سازمان حفاظت محیط زیست، مقدار خسارات ناشی از خشکسالی بدون درنظر گرفتن خسارات نامحسوس، در طی ده سال اخیر حدود ۱۶۰ میلیون دلار برآورد شده است. (مرکز ملی هوا و تغییر اقلیم سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۴۰۲). شناسایی عوامل موثر، اندازه‌گیری، پیش‌بینی و تعریف یک مخاطره طبیعی مانند خشکسالی به دلیل پیچیدگی که دارد، اغلب بسیار دشوار و عملی نیست. از این‌رو، اجرای اقدامات سازگار و متناسب با منطقه مستلزم

اثرهای تعدیل‌کننده آب و هوا تأثیر گسترده‌ای بر کشاورزی، محیط زیست، عوامل اجتماعی و بلایای طبیعی مانند خشکسالی دارد (Ahmed et al., 2019). خشکسالی یک بلای طبیعی تکرارپذیر و غیرقابل پیش‌بینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است که در نتیجه تغییر الگوهای جهانی متغیرهای آب و هوایی، به‌ویژه دما و بارندگی به وقوع می‌پیوندد (Khorrami and Gündüz, 2022). خشکسالی هواشناسی به‌عنوان منشا رخداد انواع دیگر خشکسالی‌ها (خشکسالی کشاورزی، خشکسالی هیدرولوژیکی، خشکسالی‌های اجتماعی و اقتصادی) بوده و همه آنان در نتیجه رخداد خشکسالی هواشناسی به وقوع می‌پیوندند. وقوع خشکسالی می‌تواند اثرهای شدیدی بر حوزه آبخیز و جنگلی داشته باشد؛ به‌طوری که با وقوع خشکسالی در حوزه آبخیز تمامی عناصر موجود و طبیعی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. همچنین در حوزه‌های جنگلی خشکسالی از طریق تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، ذخیره کربن، خطر آتش‌سوزی و چرخه بیوژئوشیمیایی منجر به تحلیل تاج پوشش جنگلی و افزایش مرگ و میر درختان می‌شود (Anderegg et al., 2020). نگرانی‌ها در خصوص رخداد خشکسالی در حوزه‌های جنگلی نسبت به حوزه‌های آبخیز برای مدیران برنامه‌ریز در خصوص منابع طبیعی از اهمیت بیشتری برخوردار است (Azizi et al., 2018). رخداد خشکسالی در جنگل‌ها منجر به مرگ و میر درختان شده و به‌طور چشمگیری خطر «آتش‌سوزی گسترده» را افزایش دهند. آتش‌سوزی‌های با شدت بالا و حرکت سریع می‌توانند خسارات زیادی علاوه بر محیط جنگلی به حوزه‌های آبخیز نیز وارد کند. (Stephens et al., 2018). در حال حاضر اثرهای مخرب خشکسالی با

به منظور تهیه نقشه خطر خشکسالی در استان کردستان استفاده می‌شود. استان کردستان نیز همانند دیگر استان‌های کشور، طی سال‌های گذشته دچار تغییرات آب‌وهوایی شده است. دو متغیر اصلی رخداد خشکسالی (بارندگی و دما) در طی سال‌های اخیر در این استان دچار تغییرات قابل توجهی شده‌اند. از این رو، این عوامل دلایلی دال بر افزایش احتمال خشکسالی در این استان می‌باشند.

چکیده بررسی و تحلیل شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در دوره ۱۰ ساله در کردستان نشان می‌دهد که درجات خفیف تا بسیار شدید خشکسالی (بلندمدت) در بسیاری از مناطق استان وجود دارد، به طوری که ۸۹/۷۷ درصد از مساحت استان درگیر خشکسالی خفیف تا بسیار شدید است و فقط ۱۰/۲۳ درصد از مساحت استان در شرایط طبیعی تا ترسالی متوسط قرار دارد (سازمان هواشناسی استان کردستان، ۱۴۰۱). تاثیر عوامل ذاتی و دخالت‌های انسانی مانند تغییر سطح مراتع و جنگل‌های استان با تغییر در کمیت و کیفیت پوشش گیاهی، این استان را بیشتر در معرض رخداد خشکسالی‌ها قرار داده است. بنابراین بررسی وضعیت خشکسالی آن در سال‌های آینده با توجه به لزوم مدیریت منابع آب در منطقه، ضروری است. شناسایی و انتخاب تعداد عوامل موثر بر رخداد از مهم‌ترین چالش‌ها در تهیه نقشه پیش‌بینی مخاطرات طبیعی با توجه به شناخت از محدوده مورد بررسی است. از این رو، در این پژوهش سعی شده است که از عوامل محیطی، انسانی و همراه آن‌ها شاخص‌های مورفومتری نیز مدنظر قرار گرفتند. علاوه بر آن استفاده از مدل ماشینی عمیق به عنوان روشی نوین یکی دیگر از نقاط قوت این پژوهش هستند.

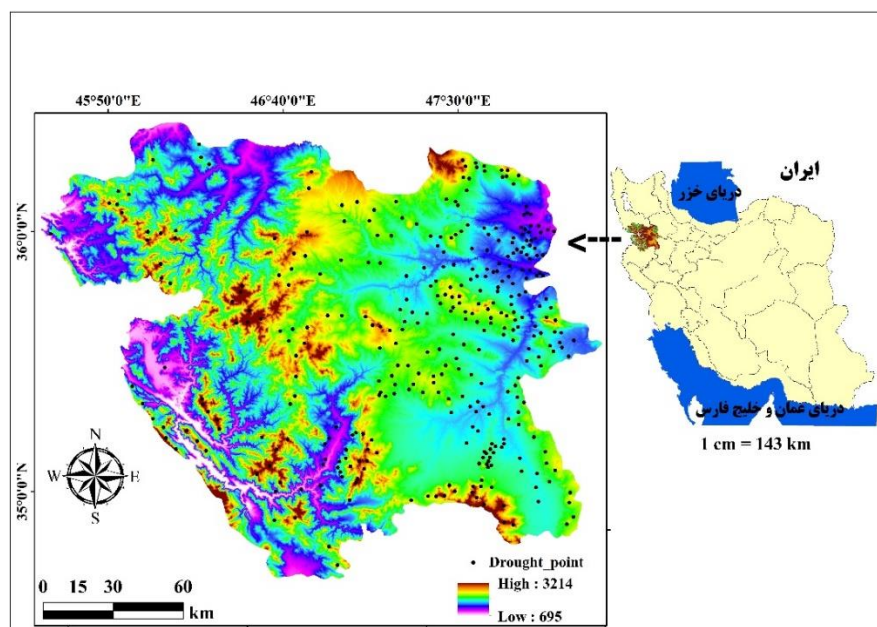
مواد و روش‌ها

شناسایی اجزای اصلی، تشخیص روابط پیچیده و درک کامل عوامل موثر و ارزیابی خطرات خشکسالی از طریق تهیه نقشه‌های خطرپذیری و حساسیت خشکسالی است (Ahmadalipour and Moradkhani, 2018). تهیه نقشه‌های خطرپذیری و ارزیابی حساسیت حوضه به خشکسالی می‌تواند آمادگی یک منطقه را بهبود بخشد و اثرهای خشکسالی را با انتشار برنامه‌های کاهش خشکسالی در سطوح ملی و منطقه‌ای کاهش دهد (Singh et al., 2023). در زمینه تهیه نقشه‌های خطرپذیری و ارزیابی حساسیت خشکسالی مدل‌های بسیار زیادی وجود دارند که بر اساس نتایج پژوهش‌های جدید، مدل‌های هیبریدی و یادگیری ماشینی دارای اهمیت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها می‌باشند. دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری بالا، امکان استفاده از داده‌های بزرگ، قدرت در استخراج ویژگی‌ها و امکان پیش‌بینی دقیق در مواقعی که الگوها پیچیده باشند، از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل‌ها می‌باشند (Azevedo et al., 2024). از محبوب‌ترین مدل‌های یادگیری ماشینی در تحقیقات مربوط به مخاطرات طبیعی می‌توان به مدل جنگل تصادفی (Park et al., 2019; Wang et al., 2024; Wang et al., 2022)، مدل خطی تعمیم‌یافته (Saha et al., 2022; Janizadeh et al., 2023)، مدل الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (Hanifinia et al., 2025; Hanifinia and Nazarnejad, 2022; Yusof et al., 2023)، مدل شبکه عصبی مصنوعی (Ansari et al., 2023; Gupta et al., 2024) و بسیاری دیگر از مدل‌های از این نوع اشاره کرد. در این پژوهش، از مدل Bagging Random Forest به عنوان یک روش نوین و ترکیبی از خانواده مدل جنگل تصادفی با مزیت‌هایی همچون انعطاف‌پذیری بالا، بهره‌گیری کامل از داده‌های موجود و مدل‌سازی بهتر داده‌های پیچیده و غیرخطی، سرعت بالا در تفسیر داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش

استان کردستان با مساحت ۲۸۲۰۳ کیلومتر مربع در غرب ایران در مجاورت کشور عراق بین مختصات ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. این استان از نظر وسعت از ۵۰ درصد استان‌های کشور ایران بزرگتر است. جمعیت کل این استان از یک میلیون و ۶۰۰ هزار نفر بر اساس مرکز آمار این کشور در سال ۲۰۲۱ فراتر رفته است. از نظر وضعیت توپوگرافی کردستان منطقه‌ای کوهستانی است که در کنار آن دشت‌های مرتفع با دره‌های U و V زیادی گسترده شده‌اند. اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه ۲۴۰۰ متر در بازه ۳۳۱۰-۹۰۰ متر است. وجود چنین اختلاف ارتفاعی منجر به وجود آمدن اقلیم‌های مختلف می‌شود. سرچشمه سه رود اصلی و بزرگ ایران شامل زرينه

رود، سیروان و قزل اوزن از این استان است که زرينه-رود و سیروان به دریاچه ارومیه و قزل اوزن در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. اقلیم کردستان متأثر از توده‌های هوای گرم و مرطوب مدیترانه‌ای است که این توده‌ها با برخورد به رشته کوه بزرگ البرز متراکم و موجب بارندگی‌هایی در فصول مختلف سال می‌شوند. تعداد روزهای یخبندان ۱۰۹ روز و مقدار بارندگی سالانه در شرایط عادی اقلیمی برای تمام استان معادل ۵۰۰ میلی‌متر است. رشته‌کوه‌های غرب کشور به‌صورت رشته‌هایی موازی، تمامی پهنه‌های استان را دربر گرفته و محدوده‌های طبیعی آن را تشکیل می‌دهند. برخی از این مناطق کوهستانی در جنوب استان دارای پوشش وسیع جنگلی و مرتعی هستند. بخش بیشتر استان کردستان در پایانه شمال باختری با قلمروی ساختاری -رسوبی در زون سندج - سیرجان قرار دارد شکل (۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان کردستان در تقسیمات کشوری

Figure 1. Geographical location of Kurdistan Province in national divisions

تاریخی وقوع خطرات طبیعی مانند اطلاعات از سازمان‌های دولتی، بررسی‌های علمی و جوامع محلی).

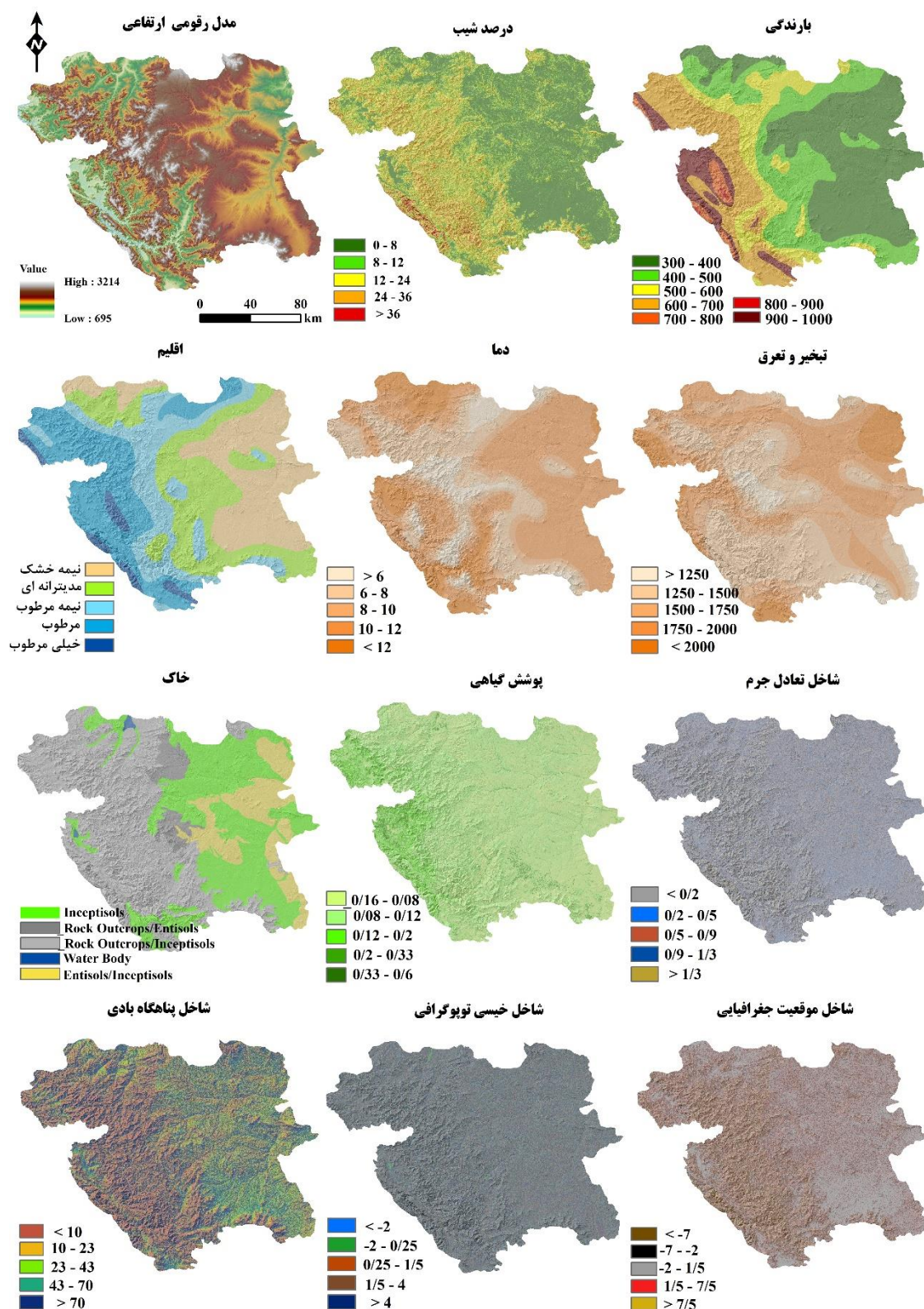
نقشه پراکنش نقاط خطرات طبیعی شامل جمع-آوری (جمع آوری داده‌های مرتبط در مورد سوابق

که این داده‌ها پایه و اساس درک الگوهای گذشته و روند مخاطرات طبیعی در منطقه هدف را فراهم می‌کند. برای تهیه نقشه پراکنش نقاط خشکسالی از شاخص شدت خشکسالی (DSI) در محیط گوگل ارث انجین استفاده شد. در این پژوهش براساس پژوهش‌های پیشین ترکیبی از عوامل طبیعی (شیب، بارندگی، دما و غیره)، عوامل انسانی (تغییرات پوشش زمین) و شاخص‌های موفومتری دخیل در وقوع خشکسالی مانند شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص تعادل جرم، شاخص موقعیت جغرافیایی و شاخص پناهگاه بادی در نظر گرفته می‌شوند. بعد از گردآوری و استخراج داده‌ها، نقشه‌های لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار ArcGIS و SAGA_GIS تهیه شد. نقشه مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سایت زمین‌شناسی آمریکا دانلود و به‌منظور تهیه لایه‌های اطلاعاتی ارتفاع، شیب و همچنین تهیه لایه‌های مربوط به شاخص‌های مورفومتری مانند شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص تعادل جرم و شاخص پناهگاه بادی استفاده شد. لایه بارندگی، دما، تبخیر و تعرق و اقلیم از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی، سنوپتیک و کلیماتولوژی برای کل استان تهیه و از طریق درون‌یابی با روش کریجینگ آماده شد. لایه شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی از تصاویر Sentinel_2 برای ماه خرداد سال ۲۰۲۲ تهیه و در نهایت از این نقشه با هدف بررسی ارتباط بین پوشش گیاهی - جنگلی استان کردستان با خشکسالی نمودار میان-همبستگی (Cross-Correlation) رسم شد. نقشه خاک استان کردستان از نقشه جهانی خاک که توسط

سایت فائو تهیه شده بود، دانلود و برای این استان کردستان استخراج شد. نقشه لایه‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل (۲) تنظیم شده‌اند. در این پژوهش سه لایه شاخص توپوگرافی، شاخص خیسی و لایه کاربری اراضی به دلیل تاثیر بسیار ناچیز در در مراحل مدلسازی از فرایند حذف شدند.

مدل‌های یادگیری ماشین ترکیبی (مدل‌های هیبریدی)

در آمار و یادگیری ماشین، از الگوریتم‌های یادگیری ترکیبی استفاده می‌کنند تا عملکرد پیش‌بینی بهتری نسبت به هر یک از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌صورت مفرد به‌دست آورند (Rokach, 2010). برخلاف یک مجموعه آماری در مکانیک آماری، که معمولاً بی‌نهایت است، یک مجموعه یادگیری ماشین تنها از مجموعه محدود مشخصی از مدل‌های جایگزین تشکیل شده است، اما به‌طور معمول اجازه می‌دهد تا ساختار بسیار انعطاف‌پذیرتری در میان آن گزینه‌ها وجود داشته باشد. یادگیری ترکیبی می‌تواند چندین مزیت مانند بهبود دقت پیش‌بینی، برطرف کردن اشکالات احتمالی ناشی از بررسی مدل‌ها به‌صورت انفرادی، افزایش تنوع و بهبود نتایج در داده‌های خروجی، استفاده همزمان از نتایج چندین مدل و غیره را داشته باشد (Bordbar et al., 2022). البته، برای استفاده موثر از مدل‌های ماشینی ترکیبی، نیاز به داده‌های کیفیت بالا و متنوع است. همچنین، پیش پردازش داده‌ها و انتخاب ویژگی‌های مناسب نیز از اهمیت بالایی برخوردار است (Talukdar et al., 2021). در این پژوهش یک مدل ترکیبی از خانواده یک الگوریتم محبوب به نام جنگل تصادفی استفاده خواهد شد.



شکل ۲. نقشه‌های عوامل اصلی موثر بر رخداد خشکسالی در استان کردستان

Figure 2. Maps of the main factors affecting the occurrence of drought in Kurdistan Province

مدل Bagging – Random Forest

پیش‌بینی‌ها از تمام درخت‌های رگرسیون منفرد بر روی x^* انجام داد.

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_{b=1}^B f_b(x')}}{B-1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه B یک شاخص آزاد و مربوط به تعداد نمونه است. در این پژوهش مدلسازی و ارزیابی مدل در بسته نرم‌افزاری R Studio انجام شده است.

اعتبارسنجی مدل

منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) برای اعتبارسنجی مدل‌های فوق استفاده شد. منحنی ROC به عنوان رسم نرخ مثبت واقعی در مقابل نرخ مثبت کاذب برخی از نقاط برش احتمالی آزمون تشخیصی تعریف می‌شود. معمولاً برای ارزیابی خوب بودن تناسب با محاسبه مساحت دریافتی زیر منحنی (AUC) استفاده می‌شود (Saha et al., 2020).

Rotello and Chen (2016) منحنی ROC را بر اساس مقادیر AUC به دست آمده به پنج گروه (عالی AUC بین ۰/۹۰ و ۱/۰۰، خوب AUC بین ۰/۸۰ و ۰/۹۰، منصفانه، بین ۰/۷۰ و ۰/۸۰، ضعیف دارای AUC بین ۰/۶۰ و ۰/۷۰ و با AUC بین ۰/۵۰ و ۰/۶۰ شکست خورده) تقسیم‌بندی می‌کنند. برای تولید منحنی ROC برای پژوهش حاضر از نرم‌افزار R استفاده شد.

نتایج

این بررسی با هدف پهنه‌بندی و پیش‌بینی مناطق حساس به خشکسالی با استفاده از مدل یادگیری ماشین ترکیبی Bagging – Random Forest در حوضه‌های آبخیز و جنگلی استان کردستان انجام شد. پس از تهیه نقشه پراکنش خشکسالی‌های رخ داده و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع، نقشه حساسیت‌پذیری منطقه به وقوع خشکسالی با روش فوق تهیه شد. نتایج حاصل از نقشه حساسیت‌پذیری استان به وقوع خشکسالی با روش Bagging – Random Forest نشان می‌دهد که در

جنگل تصادفی یکی از محبوب‌ترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. این یک نوع الگوریتم یادگیری ماشینی گروهی است که به آن Bootstrap Aggregation یا bagging می‌گویند. Bagging یک الگوریتم مجموعه‌ای است که چندین مدل را در زیر مجموعه‌های مختلف یک مجموعه داده آموزشی برازش می‌دهد، سپس پیش‌بینی‌های همه مدل‌ها را با هم ترکیب می‌کند. از مهم‌ترین مزیت‌های این تکنیک می‌توان به متالگوریتم بودن آن برای مجموعه یادگیری ماشینی است که برای بهبود پایداری و دقت الگوریتم‌های یادگیری ماشینی مورد استفاده در طبقه‌بندی آماری و رگرسیون طراحی شده است (Breiman, 1996). تکنیک عمومی Bagging در الگوریتم آموزشی برای جنگل‌های تصادفی، جمع‌آوری یا بسته‌بندی را برای یادگیرندگان درختی اعمال می‌کند. با توجه به یک مجموعه آموزشی $X=x_1, \dots, x_n$ با پاسخ‌های $Y=y_1, \dots, y_n$ بسته‌بندی مکرر (B) بار یک نمونه تصادفی را با جایگزینی مجموعه آموزشی انتخاب می‌کند و درخت‌ها را با این نمونه‌ها متناسب می‌کند:

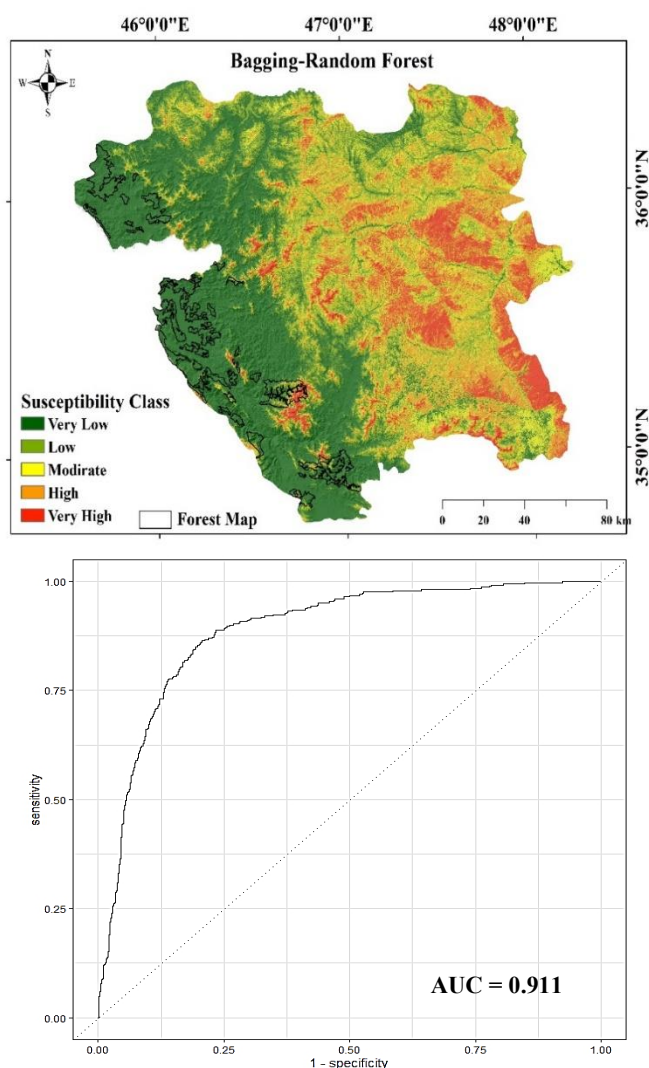
پس از آموزش، پیش‌بینی‌هایی برای نمونه‌های دیده نشده x^* را می‌توان با میانگین‌گیری پیش‌بینی‌های همه درخت‌های رگرسیون فردی روی x^* انجام داد:

$$\hat{f} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B f_b(x) \quad \text{رابطه (۱)}$$

تکرار مراحل فوق به افزایش پایداری و بهبود عملکرد مدل کمک خواهد کرد. علاوه بر آن با آموزش ساده-سازی یک رابطه قابل قبول بین درخت طبقه‌بندی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، تخمینی از عدم قطعیت پیش‌بینی را می‌توان به عنوان انحراف استاندارد

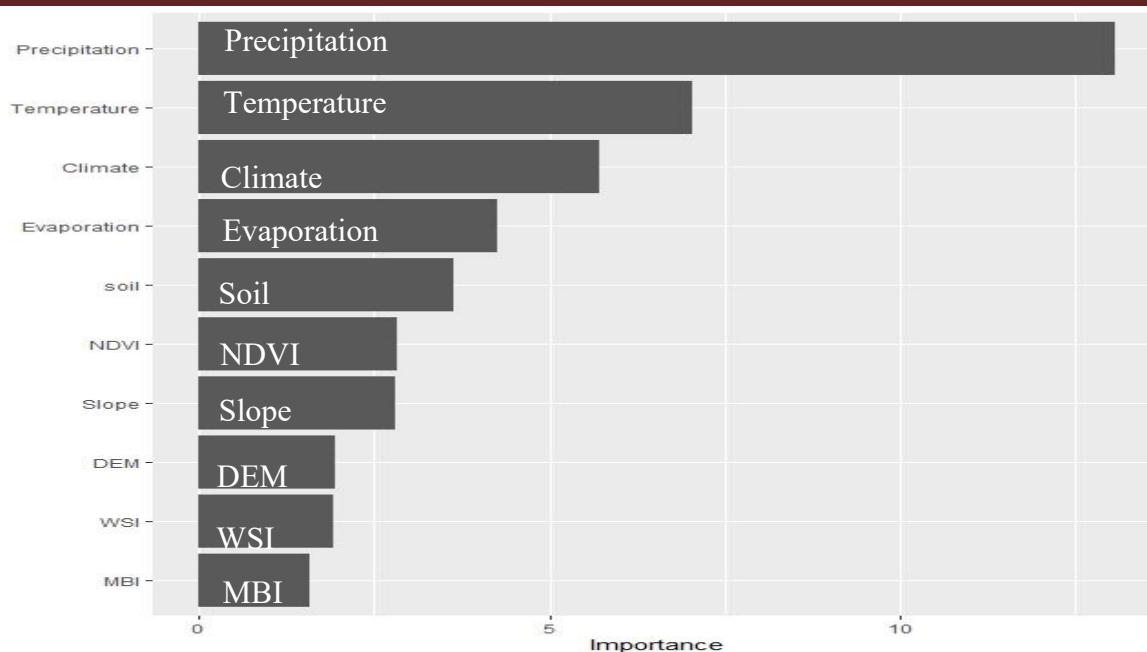
حساسیت زیاد و خیلی زیاد به خشکسالی قرار دارد. نتایج حاصل از بررسی جایگشت مدل فوق برای تعیین عوامل موثر بر رخداد خشکسالی در استان کردستان نشان می‌دهد که عوامل جوی مانند بارندگی، دما، اقلیم و تبخیر و تعرق به ترتیب بیشترین تاثیر و کمترین تاثیر مربوط شاخص نرمال شده تفاوت پوشش زمین و شاخص تعادل جرم است.

مناطق دارای حوزه‌های آبخیز نسبت به حوزه‌های جنگلی دارای حساسیت بیشتری به رخداد خشکسالی هستند. ارزیابی مدل با استفاده از منحنی ROC و مقدار سطح زیرمنحنی ($AUC > 0.9$) در تعیین مناطق حساس دارای عملکرد سطح عالی است. همچنین نتایج حاصل از بررسی درجات ارزیابی سطح استان به خشکسالی نشان می‌دهد که حدود ۴۰ درصد استان در درجات



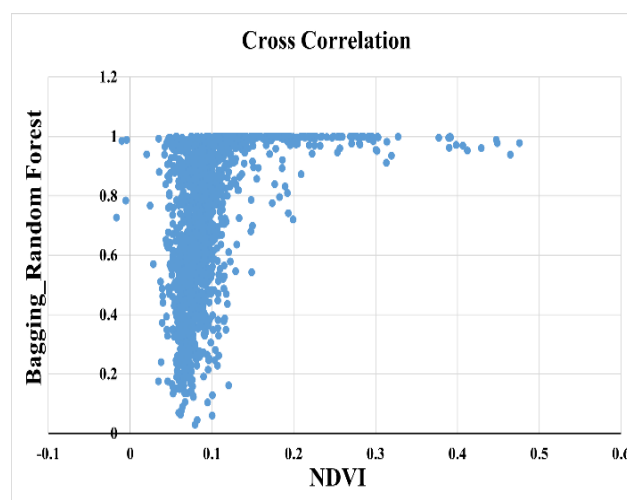
شکل ۳. نقشه حساسیت‌پذیری و نتایج منحنی ROC برای مدل Bagging – Random Forest

Figure 3. Sensitivity map and ROC curve results for the Bagging Random Forest model



شکل ۴- شاخص جایگشت برای مدل Bagging Random Forest

Figure 4. Permutation index graph for the Bagging Random Forest model



شکل ۵- ارتباط NDVI با نقشه خشکسالی استان کردستان

Figure 5. Relationship between NDVI and drought map of Kurdistan Province

به سه جهت اصلی دیگر به خشکسالی حساس تر هستند که این نتایج همسو با تحقیقات (Torabinezhad et al. 2023) است. در این استان هرچه از مناطق غربی به طرف شرق فاصله می گیریم، از مقدار بارش، رطوبت و پوشش گیاهی کاسته و بر عواملی مانند دما و تبخیر و تعرق افزوده می شود. بررسی نقشه ارتفاع این استان نشان داد که اغلب مناطق مرتفع و کوهستانی در غرب

دو شاخص خیزی و توپوگرافی به دلیل تأثیر بسیار ناچیز (در حد صفر) بر مدل در روند تهیه نقشه های پیش بینی حساسیت به خشکسالی حذف شدند.

بحث

عوامل جوی عوامل کلیدی و اصلی در وقوع خشکسالی هستند. بر اساس نتایج مدل مناطق شرقی استان نسبت

این استان قرار دارند. وجود مناطق کوهستانی از نظر رخداد بارش و تعدیل آب و هوای یک منطقه بسیار کارآمد است. از این رو، نبود این ناهمواری‌ها در مناطق شرقی دلیلی بر کاهش بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق در این مناطق است. به واسطه تاثیر ارتفاعات زاگرس (تاثیر مستقیم بر کاهش دما، فشار هوا، افزایش تشکیل ابرها) به شدت از حساسیت این مناطق به خشکسالی کاسته شده است. نتایج پژوهش Al-Qubati et al. (2023) نیز این دلیل را تایید کرده است. بررسی نقشه درونیابی لایه بارندگی این منطقه نشان داد که اختلاف بارش در مناطق غربی این استان نسبت به دیگر مناطق به‌خصوص سمت شرق بیش از ۴۰۰ میلی‌متر است که به‌دلیل وسعت زیاد این استان یک امر بدیهی است. بنابراین این اختلاف بارندگی می‌تواند بر افزایش خشکسالی در مناطق شرقی موثر باشد. بررسی‌های قبلی در سطح حوضه‌های کشور Torabinezhad et al. (2023) و سراسر جهان Mani et al. (2023) نشان داده است که نبود بارندگی و رطوبت، دمای بالا و افزایش مقدار تبخیر و تعرق در حد معمول از مهم‌ترین دلایل رخداد خشکسالی هستند که نتایج این پژوهش همسو با این بررسی‌ها بوده است. در حوضه‌های آبخیز دارای پوشش مرتعی مرغوب و حوضه‌های جنگلی استان کردستان به‌دلیل وجود پوشش مناسب به روی زمین تا حدودی یک تعادل میان بارندگی، تبخیر و تعرق و دما برقرار است. بنابراین حفظ منابع آب منجر به پیشگیری از خشکسالی و حفظ تعادل بوم‌شناسی در این مناطق کمک کرده است. یکی دیگر از عوامل بسیار موثر و کارآمد بر رخداد خشکسالی اقلیم منطقه است که در این استان پنج نوع از رده‌های اقلیم وجود دارد. نتایج نقشه حساسیت‌پذیری استان با مدل فوق نشان داد که هرچه از منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک (مناطق شرق

استان) دور و به مناطق دارای اقلیم مدیترانه‌ای تا خیلی مرطوب (مناطق غرب استان) نزدیک‌تر می‌شویم، از نظر رخداد خشکسالی دارای کمترین خطر هستند. تنوع و تراکم بالای پوشش گیاهی به‌خصوص در حوضه‌های جنگلی و مراتع مرغوب استان بنابر دلایلی همچون حفظ رطوبت خاک (جذب آب و نگهداشت از طریق انتقال بین خاکی)، پایداری و افزایش قابلیت نگهداشت آب تاثیر بر الگوهای بارش یک منطقه (کمک به توزیع و پراکنش مناسب ابرها)، تاثیر بر کاهش دما (متعادل- سازی مقدار دی‌اکسیدکربن) می‌تواند بر کاهش رخداد و تاثیرات خشکسالی موثر باشد. بررسی لایه پوشش گیاهی در استان کردستان بر اساس آخرین نقشه هوایی ماه خرداد ۲۰۲۲ نشان داد که این استان از یک الگوی نامناسب پراکنش پوشش گیاهی برخوردار است؛ به‌طوری‌که فقط حدود ۲۰ درصد از مراتع آن شامل بخشی از ارتفاعات غرب دارای پوشش گیاهی مرغوب است. نتایج بررسی لایه پوشش گیاهی و جنگل‌های استان با نقشه حساسیت‌پذیری خطر رخداد خشکسالی نشان داد که در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و جنگلی مقدار رخداد خشکسالی کم و عکس آن نیز یعنی در مناطق دارای پوشش گیاهی تنک، مقدار خطر رخداد خشکسالی نیز بیشتر است.

بر اساس شکل ۵ اغلب مناطق دارای حساسیت بالا در بازه ۱- تا ۲/۰ شاخص NDVI قرار دارد. این بازه از شاخص بیان‌کننده پوشش گیاهی و جنگلی تنک و کم تراکم است. نتایج این پژوهش همسو با نتایج بررسی Bandak et al. (2024) برای این استان است. حفظ پوشش گیاهی و جنگلی در مناطق بالا تر از ۰/۳ شاخص NDVI می‌تواند دلیلی بر کاهش وقوع این پدیده باشد.

وجود شیب زیاد در ارتفاعات بالا بر مقدار نفوذ آب در لایه‌های خاک تاثیر می‌گذارد. بنابراین زمان تمرکز کاهش پیدا می‌کند. هرچه مقدار زمان تمرکز کم شود بر دبی پیک افزوده شده و در نهایت مقدار رواناب بیشتری از حوضه خارج می‌شود. بنابراین بدون در نظر گرفتن تاثیر ارتفاعات وجود شیب تاثیر عکس بر رخداد خشکسالی دارد. در این پژوهش نیز شیب یکی از عوامل کم تاثیر بر رخداد خشکسالی‌های محدوده مورد بررسی است. تغییرات کاربری اراضی با افزایش مقدار بارندگی در یک حوضه ارتباط مستقیم دارد؛ به‌طوری که اغلب تغییرات کاربری زمین در مناطق با بارندگی بالا رخ می‌دهد (Mogholi, 2024). بررسی نقشه خاک استان نشان می‌دهد که اغلب خاک‌های غرب استان از نوع خاک‌های جوان تشکیل شده بر روی صخره‌های سنگی بوده و تنها در بخش‌هایی از جنوب و شرق دارای خاک‌های مرغوب است. قرارگیری مراتع مرغوب و مناطق جنگلی بر روی خاک‌های جوان منجر به محافظت از جریان‌های آبی (کنترل حرکت آب از طریق گرفتن سرعت قطره آب، افزایش سرعت خاک زایی و وجود لاشبرگ) افزایش قابلیت نفوذ و ذخیره آب (منابع آب زیر زمینی) و در نهایت کاهش رخداد خشکسالی در این مناطق شده است. این نتایج همسو با پژوهش Haidari et al. (2024) است. نتایج نقشه نهایی پیش‌بینی رخداد خشکسالی در سطح استان کردستان نشان داد که حدود ۶۰ درصد این استان به رخداد خشکسالی‌ها حساس و بسیار حساس و در شرایط بحرانی قرار دارد. نتایج منحنی ROC و مقدار AUC نشان داد که این مدل از نظر تفکیک

رده‌های خطر (بالای ۶۰ درصد در کلاس‌های دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد) و هم از نظر ارزیابی مدل-ها با سطح عملکرد نتایج بسیار قابل قبولی را ارائه کرده است. با توجه به حساسیت بالای این استان به رخداد خشکسالی ضروری است برای جلوگیری از وخیم‌تر شدن شرایط در این استان تمهیدات لازم به‌منظور مقابله با این رخدادها انجام شود. نتایج تحقیقات این چینی می‌تواند به مدیران و مسئولان برنامه‌ریز کشوری کمک کند تا با اتخاذ تصمیمات درست و قابل اجرا در کوتاه مدت تا حدود زیادی از خطرات احتمالی پیش رو جلوگیری کنند.

نتیجه‌گیری کلی

شاخص‌های ساده خشکسالی به دلیل پیچیدگی پدیده‌های خشکسالی نمی‌توانند روابط بین عوامل اقلیمی، توپوگرافی و انسان‌زایی را که بر پدیده‌های طبیعی بالاخص رویداد خشکسالی تاثیر می‌گذارند، را به درستی توصیف کنند. برای کاهش اثرهای خشکسالی و بهبود مدیریت، توسعه یک چارچوب فضایی برای شناسایی مناطق مستعد خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای بسیار مهم است. از طریق ادغام نتایج شاخص خشکسالی با مدل‌های پیش‌بینی این پدیده، عواملی که بر توسعه خشکسالی اثر دارند به‌طور قابل توجهی نمایان خواهند شد. الگوریتم‌های پیشرفته ماشینی ساده و ترکیب این الگوریتم‌ها دانش علمی جدیدی را به فرآیند ایجاد چارچوبی برای پیش‌بینی مکانی خشکسالی را ایجاد می‌کند. نتایج مدل ترکیبی Bagging Random Forest برای استان کردستان نشان داد که مناطق دارای حساسیت بالا به خشکسالی بیشتر شرق و تا حدودی قسمت‌های جنوبی این استان را در بر می‌گیرد. از

برنامه‌ریزی‌های آینده باید در این مناطق باشد. کاهش بارندگی همراه با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در سال‌های آتی منجر به افزایش دما و تبخیر و تعرق توأم با کاهش پوشش گیاهی خواهد بود. در حالت کلی محدوده غرب استان به وقوع خشکسالی دارای حساسیت کمتری خواهد بود. کاهش بارندگی از اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار و تشدید خشکسالی در این استان است.

آنجایی که اغلب حوزه‌های جنگلی و دارای مراتع مرغوب در غرب این استان قرار دارند؛ بنابراین حساسیت این مناطق به خشکسالی نسبت به دیگر مناطق در درجات پایین‌تری قرار می‌گیرد. نتایج ارزیابی نقشه پیش‌بینی مدل در مناطق غربی این استان که دارای جنگل‌ها و مراتع مرغوب هست، نشان داد که حوزه‌های دارای مناطق جنگلی نسب حوزه‌های آبخیز در شرایط بحرانی‌تری قرار دارد و اولویت

References

- Ahmadalipour, A.; Moradkhani, H.; Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960–2100. *Science of the Total Environment* **2018**, 644, 520-535.
- Ahmadi, A.; Noorali, H.; Campana, M.; Barroudi, M.; Analyzing the hydropolitical tensions of the Hirmand/Helmand River through the evaluation of land use changes using the SVM method. *Human Geography Research* **2023**, 55(4), 225-243. (In Persian)
- Ahmed, K.; Shahid, S.; Chung, E. S.; Wang, X. J.; Harun, S. B.; Climate change uncertainties in seasonal drought severity-area-frequency curves: Case of arid region of Pakistan. *Journal of Hydrology* **2019**, 570, 473-485.
- Al-Qubati, A.; Zhang, L.; Pyarali, K.; Climatic drought impacts on key ecosystem services of a low mountain region in Germany. *Environmental Monitoring and Assessment* **2023**, 195(7), 800.
- Anderegg, W.R.L.; Anderegg, L.D.L.; and Huang, C.; Testing Early Warning Metrics for Drought-Induced Tree Physiological Stress and Mortality. *Global Change Biology* **2019**, 25: 2459–69.
- Ansari, A.; Rao, K. S.; Jain, A. K.; Ansari, A.; Formulation of multi-hazard damage prediction (MhDP) model for tunnelling projects in earthquake and landslide-prone regions: A novel approach with artificial neural networking (ANN). *Journal of Earth System Science* **2023**, 132(4), 164.
- Azevedo, B. F.; Rocha, A. M. A.; Pereira, A. I.; Hybrid approaches to optimization and machine learning methods: a systematic literature review. *Machine Learning* **2022**, 1-43.
- Azizi, M.; Rostami, F.; & Heidari, R. H.; Evaluation of livelihood resilience of agroforestry system users in Paveh city in the face of drought. *Forest Research and Development* **2023**, 9(1), 29-45. (In Persian)
- Bandak, I.; Karami, P.; Karaji, M. G.; Dragovich, D., Exclosure and Changes in Soil and Vegetation Properties in Different Land Utilization (1976–2021) in Kurdistan Grasslands, Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **2024**, 1-13.
- Bordbar, M.; Aghamohammadi, H.; Pourghasemi, H. R.; Azizi, Z., Multi-hazard spatial modeling via ensembles of machine learning and meta-heuristic techniques. *Scientific Reports* **2022**, 12(1), 1451.
- Breiman, L., Bagging predictors. *Mach Learn* **1996**, 24:123–140
- Gerdener, H.; Engels, O.; Kusche, J., A framework for deriving drought indicators from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Hydrol Earth Syst Sci* **2020**, 24(1):227–248.
- Gupta, N.; Kanungo, D. P.; Das, J., Multi-hazard susceptibility mapping of landslides and earthquakes in Bhagirathi Valley region of Uttarakhand Himalaya, India. *Journal of Spatial Science* **2024**, 1-26.
- Haidari, M.; Matinizedeh, M.; Pourhashemi, M.; Nouri, E.; Bagheri Delijani, N., Investigating changes in the physical and chemical characteristics of soil in control and dieback stands in Marivan county, Kurdistan province in Iran. *Forest Research and Development* **2024**, 10(1), 95-111.

- Hanifinia, A.; Abghari, H., Predicting flood-prone areas using generalized linear and maximum entropy machine learning models. *Journal of Natural Environmental Hazards* **2025**, 14(43), 19-34. (In Persian)
- Hanifinia, A.; and Nazarnejad, H.; The Effect of Morphometry Indices on Improving the Performance of Data Mining Models for Landslide Sensitivity Zoning in Chirikabad Watershed, Urmia. *Journal of Geography and Environmental Hazards* **2022**, 10(4), 47-68. (In Persian)
- IPCC., Climate Change. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva **2007**, Switzerland: 104.
- Jaferyan, E.; pilehvar, B.; & Tavakoli, M.; (). Physiological responses of mature Persian oak (*Quercus brantii* L.) under natural conditions to drought stress. *Forest Research and Development* **2024**, 10(2), 167-181. (In Persian)
- Janizadeh, S.; Bateni, S. M.; Jun, C.; Im, J.; Pai, H. T.; Band, S. S.; Mosavi, A., Combination four different ensemble algorithms with the generalized linear model (GLM) for predicting forest fire susceptibility. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* **2023**, 14(1), 2206512.
- Khorrani, B.; Gündüz, O., Detection and analysis of drought over Turkey with remote sensing and model-based drought indices. *Geocarto International* **2022**, 37(26), 12171-12193.
- Mani, Z. A.; Khorram-Manesh, A.; Goniewicz, K., Global health emergencies of extreme drought events: Historical impacts and future preparedness. *Atmosphere* **2024**, 15(9), 1137.
- Mao, Y.; Nijssen, B.; Lettenmaier, D. P., Is climate change implicated in the 2013–2014 California drought? A hydrologic perspective. *Geophysical Research Letters* **2015**, 42(8), 2805-2813.
- Massoudi, M.; Goodarzi, M.; Moini, A.; Motamedvaziri, B., Evaluation and Comparison of Different Meteorological Drought Indices and Determination of Relevant Index in Fars Province. *Journal of Crops Improvement* **2024**, 26(3), 605-620. (In Persian)
- Mogholi, M., Evaluation and Modeling of Land Use Changes of Firozabad Using Multitemporal Satellite Imagery. *Human Geography Research* **2024**, 56(2), 191-212. (In Persian)
- Nazeri Tahroudi, M.; Ramezani, Y.; Ahmadi, F., Hydrogeological Drought Management Based on HDMI Multivariate Index. *Environment and Water Engineering* **2020**, 6(4), 473-484. (In Persian)
- Park, H.; Kim, K.; Lee, D. K., Prediction of severe drought area based on random forest: Using satellite image and topography data. *Water* **2019**, 11(4), 705.
- Rokach, L., "Ensemble-based classifiers". *Artificial Intelligence Review* **2010**, 33 (1–2), 1–39.
- Rotello, C. M.; & Chen, T.; ROC curve analyses of eyewitness identification decisions: An analysis of the recent debate. *Cognitive Research: Principles and Implications* **2016**, 1, 1-12.
- Saha, S.; Saha, A.; Hembram, T. K.; Kundu, B.; Sarkar, R., Novel ensemble of deep learning neural network and support vector machine for landslide susceptibility mapping in Tehri region, Garhwal Himalaya. *Geocarto International* **2022**, 37(27), 17018-17043.
- Sheikh Oveisi, M.; Taheri, A.; Mirlotfi, P. R., Political and security approaches to drought in Sistan and tension with Afghanistan. *Geography (Regional Planning)* **2024**, 143-158. (In Persian)
- Singh, P.; Kannaujiya, A. K.; Deep, A.; Singh, S.; Mohanty, T.; Prakash, K., Spatio-temporal drought susceptibility assessment of Ken River Basin, Central India, and its evaluation through river's morphometry. *Geological Journal* **2023**, 58(2), 755-779.
- Stephens, S.L.; Collins, B.M.; Biber, E.; and Fulé, P.Z.; "U.S. Federal Fire and Forest Policy: Emphasizing Resilience in Dry Forests." *Ecosphere* **2018**, 7: 1–19.
- Talukdar, S.; Mankotia, S.; Shamimuzzaman, M.; Shahfahad, Mahato, S., Wetland-inundated area modeling and monitoring using supervised and machine learning classifiers. *Advances in remote sensing for natural resource monitoring* **2021**, 346-365.
- Torabinezhad, N.; Zarrin, A.; Dadashi-Roudbari, A., Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation

- Evapotranspiration Index (SPEI). *Water and Soil* **2023**, 37(3), 473-486. (In Persian)
- Wang, H.; Li, Y.; Huang, G.; Zhang, Q.; Ma, Y.; Li, Y., Development of a random-forest-copula-factorial analysis (RFCFA) method for predicting propagation between meteorological and hydrological drought. *National Science Open* **2024**, 3(1), 20230022.
- Wang, Q.; Zhao, L.; Wang, M.; Wu, J.; Zhou, W.; Zhang, Q.; Deng, M., A random forest model for drought: Monitoring and validation for grassland drought based on multi-source remote sensing data. *Remote Sensing* **2022**, 14(19), 4981.
- Yi, S.; Pei, W., Study on agricultural drought disaster risk assessment in Heilongjiang reclamation area based on SSAPSO optimization projection pursuit model. *Environmental Monitoring and Assessment* **2024**, 196(5), 1-19.
- Yusof, M. K. T. M.; Rashid, A. S. A.; Apandi, N. M.; Khanan, M. F. B. A.; Rahman, M. Z. B. A., A review of the application of support vector machines in landslide susceptibility mapping. *Disaster Advances* **2023**, 16(11), 71-83.