

Meteorological Drought Risk Monitoring and Zoning Using Random Forest Model(Case Study: Ardabil Province)

Ahmad Hajarain^{1*}

1. PhD in Geography and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

***Corresponding Author: a.hajarain@ltr.ui.ac.ir**

Extended abstract

Introduction

Natural hazards are an inseparable part of human life and have existed continuously since the creation of mankind. Any unexpected and sudden natural event that causes the weakening and destruction of economic, social, and cultural capabilities, such as loss of life and property, destruction of infrastructure, financial resources, and areas of decline in employment in society, is considered a natural disaster. Preparing risk maps and assessing the susceptibility of the basin to drought can improve the preparedness of a region and reduce the effects of drought by publishing drought mitigation plans at the national and regional levels. Ardabil province, like other provinces in the country, has been experiencing climate change in recent years. Abstract: A 10-year survey and analysis of the Standardized Permeability Index (SPEI) in Ardabil shows that mild to very severe (long-term) droughts occur in many areas of the province, with 68 percent of the province experiencing mild to very severe droughts and only 32 percent experiencing normal to moderate drought conditions. Of the drought-affected area, 19.07 percent is mild, 24.42 percent moderate, 22.56 percent severe, and 72.23 percent very severe. Therefore, it is essential to examine its drought situation in the coming years, considering the need for water resources management in the region.

Methods and Materials

To prepare a map of drought-prone areas, annual statistics from the rain gauge and synoptic stations of this province and the DSI index were used. In this study, based on previous studies, a combination of natural factors (slope, rainfall, temperature, etc.), human factors (land cover changes), and morphometric indices involved in the occurrence of drought, including the topographic wetness index, mass balance index, geographical location index, and wind shelter index, are considered. After collecting and extracting data, maps of information layers will be prepared in ArcGIS and SAGA_GIS software.

Results and Discussion

The present study was conducted with the aim of zoning and predicting drought-sensitive areas using a bagging-random forest hybrid machine learning model in Ardabil province. After preparing a map of the distribution of droughts and identifying the factors affecting their occurrence, a map of the region's susceptibility to drought was prepared using the above method. The results of evaluating the models using the ROC curve show that the model's performance with an area under the curve ($AUC > 0.9$) is excellent in predicting drought-sensitive areas. The results of the permutation study in the above model to determine the factors affecting the occurrence of drought in Ardabil province show that atmospheric factors, including rainfall, temperature, and climate, have the highest and lowest impact on the wind shelter index and mass balance index, respectively. The two wetness indices and geographical location were eliminated due to their very small impact (near zero) on the model in the process of preparing drought sensitivity prediction maps.

Conclusion

Maintaining and increasing vegetation cover in these areas could be a reason for reducing the occurrence of this phenomenon. The results of the final drought prediction map in Ardabil province showed that about 60 percent of this province is very sensitive to droughts and is in critical conditions. The results of the ROC curve and the area under the curve (AUC) showed that this model has provided very acceptable results in terms of separating risk categories (above 60 percent in classes with high and very high sensitivity) and in terms of evaluating models with a performance

level of 0.911. Given the high sensitivity of this province to droughts, it is necessary to take the necessary measures to deal with these events to prevent the worsening of conditions in this province. The results of such research can help managers and officials of micro-national planning largely prevent possible future risks by making correct and implementable decisions in the short term.

Due to the complexity of drought phenomena, simple drought indices cannot properly describe the relationships between climatic, topographic, and anthropogenic factors that affect natural phenomena, especially drought events. To reduce the effects of drought and improve management, it is very important to develop a spatial framework for identifying drought-prone areas at a regional scale. By integrating the results of the drought index with drought prediction models, the factors that affect the development of drought will be significantly revealed. The results of the bagging random forest hybrid model for Ardabil province showed that areas with high sensitivity to drought are more in the south and, to some extent, in the central parts of this province. The presence of low rainfall along with arid and semi-arid climates will lead to an increase in temperature and evapotranspiration, accompanied by a decrease in vegetation cover. The southern part of the province will be less sensitive to future drought than other regions. In general, the decrease in rainfall is one of the main factors affecting and intensifying drought in this province.

Keywords: Climatic factors, Hybrid models, Drought, Natural hazards, Permutation index.

پایش و پهنه‌بندی خطر خشک‌سالی با استفاده از مدل جنگل تصادفی (مورد مطالعه: استان اردبیل)

احمد حجاریان^{۱*}

۱- دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول: a.hajarian@ltr.ui.ac.ir

چکیده

خشک‌سالی یک پدیده طبیعی است که در هر نوع آب و هوایی امکان وقوع آن وجود دارد و آثار زیانبار آن به مراتب گسترده‌تر و عمیق‌تر از دیگر بلای طبیعی است. این پدیده طبیعی یکی از مضرترین و از لحاظ اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و محیط زیستی زیانبارترین بلای طبیعی به شمار می‌رود. این مطالعه با هدف پیش‌بینی و تهیه نقشه خطر، شناسایی مناطق حساس به منظور توسعه پایداری که خطرات را کاهش و انعطاف‌پذیری را ارتقا می‌دهد، انجام شده است. در این مطالعه از لایه‌های بارندگی، دما، اقلیم، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و شاخص‌های موفومتری از جمله شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص تعادل جرم، شاخص موقعیت جغرافیایی و شاخص پناهگاه بادی به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خشک‌سالی در استان اردبیل از مدل جنگل تصادفی استفاده گردید. تجزیه و تحلیل اهمیت متغیر با استفاده از شاخص جایگشت نشان داد که به ترتیب بارندگی، دما، اقلیم از مهمترین عوامل موثر بر خشک‌سالی استان اردبیل هستند. بررسی نقشه پهنه‌بندی حساسیت این استان به خشک‌سالی با استفاده از مدل ترکیبی فوق نشان داد که حدود ۵۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در رده مناطق دارای حساسیت زیاد و بسیار زیاد به رخداد خشک‌سالی می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی منحنی ROC با سطح زیر منحنی بالای ۰/۹ برای این مدل نشان دهنده دقت بالای این مدل در ارائه نتایج است.

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

مقدمه

مخاطرات طبیعی بخش جدانشدنی از زندگی بشر است و پیوسته از زمان خلقت بشر تاکنون وجود داشته است. هر حادثه طبیعی غیرمترقبه و در مواردی ناگهانی که موجبات تضعیف و نابودی توانمندی‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی مانند: خسارات جانی و مالی، تخریب تأسیسات زیربنایی، منابع اقتصادی و زمینه‌های زوال اشتغال جامعه را فراهم آورد، به‌عنوان بلایای طبیعی قلمداد می‌شود (Wossen et al., 2017). بی‌گمان خشک‌سالی از جمله اصلی‌ترین و قدیمی‌ترین بلایای طبیعی است که انسان‌ها از دیرباز با آن آشنا بوده‌اند. خشک‌سالی یک رویداد اقلیمی شدید در نظر گرفته می‌شود که به تدریج افزایش می‌یابد و ممکن است پیامدهای عمده‌ای داشته باشد (Zhoolideh et al., 2024). بنابراین به عنوان پرهزینه‌ترین خطر طبیعی شناخته می‌شود (Mishra & Singh, 2010). خشک‌سالی یک بلای طبیعی خزنده است (Karimi et al., 2018). خشک‌سالی یک بلیه طبیعی تکرارپذیر و غیرقابل پیش‌بینی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است که در نتیجه تغییر الگوهای جهانی متغیرهای آب و هوایی، به ویژه دما و بارندگی به وقوع می‌پیوندد (Khorrami & Gündüz, 2022). اثرات پدیده خشک‌سالی از نظر فراوانی، شدت، مدت و اثرات اجتماعی درازمدت در جامعه، بیشتر از سایر بلایای طبیعی بوده‌است (Malekan et al., 2021). خشک‌سالی یکی از فاجعه‌بارترین مخاطرات است که با پیامدهای مخرب و گسترده مستقیم یا غیرمستقیم بر جامعه، می‌تواند محیط زیست و اقتصاد آن را تحت تأثیر خود قرار دهد (Sivakumar et al., 2022; Burka et al., 2024). در حال حاضر اثرات مخرب خشک‌سالی با روند صعودی تغییرات آب و هوایی، اقلیم و رشد جمعیت در ارتباط می‌باشد (Gerdener et al., 2020). با این‌وجود تعریف خشک‌سالی و چگونگی ارتباط آن با پدیده‌های هیدرولوژی بسیار مشکل است؛ زیرا اولاً خشک‌سالی ممکن است به طور هم‌زمان تمام اجزاء سیستم هیدرولوژی را تحت‌تأثیر قرار ندهد ثانیاً خشک‌سالی یک پدیده مطلق نبوده؛ بلکه کمبود نسبی رطوبت است در این صورت تقاضای زیاد برای آب نیز می‌تواند خشک‌سالی ایجاد کند (IPCC, 2007). پدیده خشک‌سالی به صورت دوره‌ای رخ داده و حتی مناطق دوردست را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (Mao et al., 2015; Song and Park, 2020; Li et al., 2023). خشک‌سالی با تأثیرات مختلفی که بر روی کره‌های مختلف می‌گذارد به‌عنوان یک پدیده مخرب‌آمیز و فاجعه‌ای علیه بشریت نامبرده می‌شود (Savari and Shokati, 2023). بنابراین پایش و ارزیابی خشک‌سالی و تحلیل پویایی مکانی و زمانی در مقیاس‌های زمانی متعدد برای حفاظت از محیط زیست و احیای مراتع و تعادل منابع زمین و آب در برابر شرایط خشک‌سالی ضروری می‌باشد (Fakhar, & Nazari, 2024). پیش‌بینی مکانی و زمانی دقیق خسارات احتمالی خشک‌سالی در سطح جهانی و کشورمان بسیار دشوار است (Mogholi, 2023). ناهنجاریها و نوسانات در روند پارامترهای هواشناسی از جمله بارندگی و دما یکی از ویژگیهای طبیعی چرخه اتمسفری می‌باشد (Adeniji et al., 2022). این ناهنجاری‌ها در بسیاری از نقاط دنیا شدید است و موجب اختلال در اکوسیستم‌های طبیعی می‌گردد. خشک‌سالی‌ها نشانه روشنی از این نوسانات می‌باشند که بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک دنیا را با شدت‌های زیاد هر چند سال یکبار در بر می‌گیرند. کاهش شدید بارندگی و دوره های خشک ناشی از آن تأثیرهای منفی بسیاری بر مدیریت منابع آب می‌گذارد. ایران کشور پهناوری است که به دلیل موقعیت خاص و ویژگی‌های توپوگرافی، آب‌وهوای متفاوتی دارد. میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۲۲۰ تا ۲۹۵ میلی‌متر گزارش شده است (Afsari et al., 2024)، با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی ایران و قرار داشتن در کمربند خشک آب‌وهوایی جهان و کمبود نزولات جوی، بایستی اذعان داشت که بروز بحران‌های آبی و خشک‌سالی از مشخصه‌های اصلی آب‌وهوای ایران به شمار می‌آید (Khoshnodifar et al., 2023).

محققان روش‌های مختلفی برای ارزیابی و تشخیص شدت خشک‌سالی‌ها ارائه داده‌اند (Soureh & safarpour, 2024). 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 (Ahmadalipour & Moradkhani, 2018).

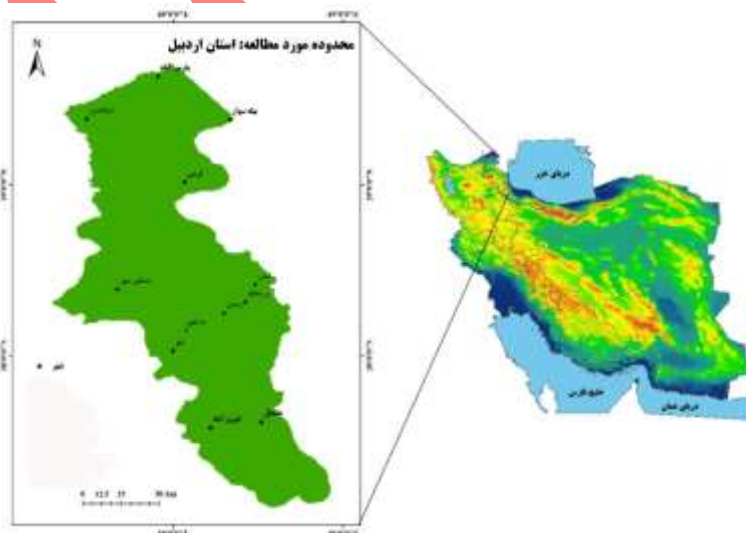
(Hedayat & Kaboli, 2024). تهیه نقشه‌های خطرپذیری و ارزیابی حساسیت حوضه به خشک‌سالی می‌تواند آمادگی یک منطقه را بهبود بخشد و اثرات خشک‌سالی را با انتشار برنامه‌های کاهش خشک‌سالی در سطوح ملی و منطقه‌ای کاهش دهد (Singh et al., 2023).

استان اردبیل نیز همانند سایر استان‌های کشور، طی سال‌های گذشته دچار تغییرات آب و هوایی شده است. چکیده بررسی و تحلیل شاخص (SPEI) (تبخیر و تعرق استاندارد شده) در دوره ۱۰ ساله در اردبیل نشان می‌دهد که درجات خفیف تا بسیار شدید خشک‌سالی (بلندمدت) در بسیاری از مناطق استان وجود دارد، به طوری که ۶۸ درصد از مساحت استان درگیر خشک‌سالی خفیف تا بسیار شدید است و فقط ۳۲ درصد از مساحت استان در شرایط طبیعی تا ترسالی متوسط قرار دارد. از مساحت درگیر خشک‌سالی ۱۹/۰۷ درصد دارای خشک‌سالی خفیف، ۲۴/۴۲ درصد متوسط، ۲۲/۵۶ درصد شدید و ۷۲/۲۳ درصد خشک‌سالی بسیار شدید است. بنابراین بررسی وضعیت خشک‌سالی آن در سال‌های آینده با توجه به لزوم مدیریت منابع آب در منطقه، ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل با مساحت ۱۷۹۵۳ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران بین مختصات ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. جمعیت کل این استان از یک میلیون و ۲۷۰ هزار نفر بر اساس مرکز آمار این کشور در سال ۲۰۲۱ فراتر رفته است. این استان بخشی از فلات مثلثی شکل ایران در شرق فلات آذربایجان بوده که حدود دو سوم آن دارای بافت کوهستانی با اختلاف ارتفاع زیاد و بقیه را مناطق هموار و پست تشکیل می‌دهند. اراضی شمالی و هم مرز با جمهوری آذربایجان را در امتداد ارس، زمین‌های پست و جلگه‌ای تشکیل می‌دهند که کمتر از ۲۰۰ متر از سطح دریای آزاد ارتفاع دارند. در جنوب نیز قسمت‌های اصلی مرکز استان با دره رود قزل اوزن که بین منحنی ۱۴۰۰ - ۸۰۰ متر قرار گرفته است. تعداد روزهای یخبندان ۱۳۰ روز و میزان بارندگی سالانه در شرایط عادی اقلیمی برای تمام استان معادل ۶۰۰ میلی‌متر است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی استان اردبیل را نشان می‌دهد.

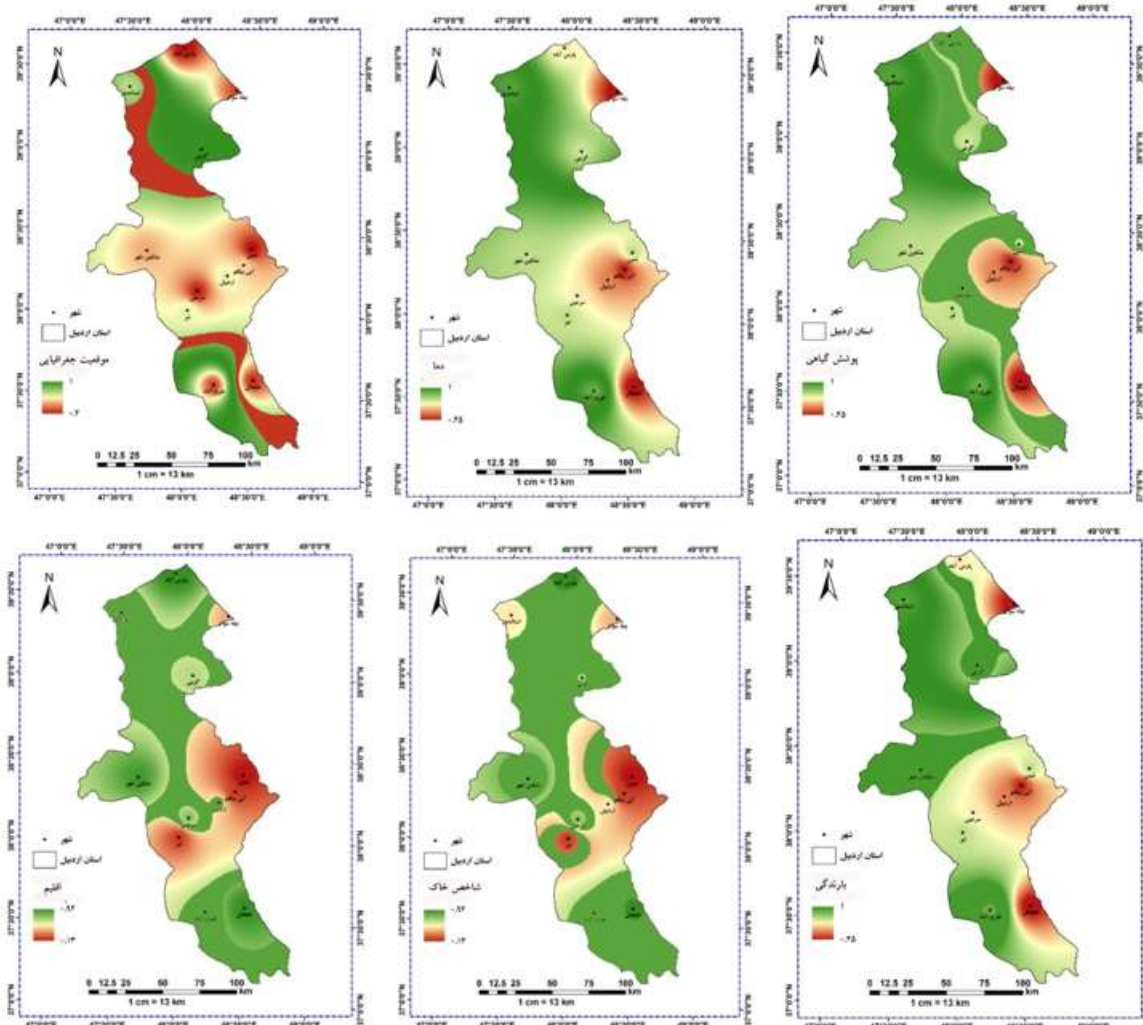


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان اردبیل در تقسیمات کشوری

Fig 1. Geographical Location of Ardabil Province in National Divisions

جمع‌آوری داده‌ها و تهیه لایه‌های عوامل موثر بر وقوع خشک‌سالی

برای تهیه نقشه پهنه‌های دارای خشک‌سالی از آمار سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک این استان و شاخص (SPI) استفاده شد. در این پژوهش بر اساس مطالعه پژوهش‌های پیشین ترکیبی از عوامل طبیعی (شیب، بارندگی، دما و غیره)، عوامل انسانی (تغییرات پوشش زمین) و شاخص‌های موفومتری دخیل در وقوع خشک‌سالی از جمله 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 نرم افزار ArcGIS و SAGA_GIS تهیه خواهد شد.



شکل ۲. نقشه‌های عوامل اصلی موثر بر رخداد خشک‌سالی در استان اردبیل
Fig 2. Maps of The Main Factors Affecting Drought Occurrence in Ardabil Province

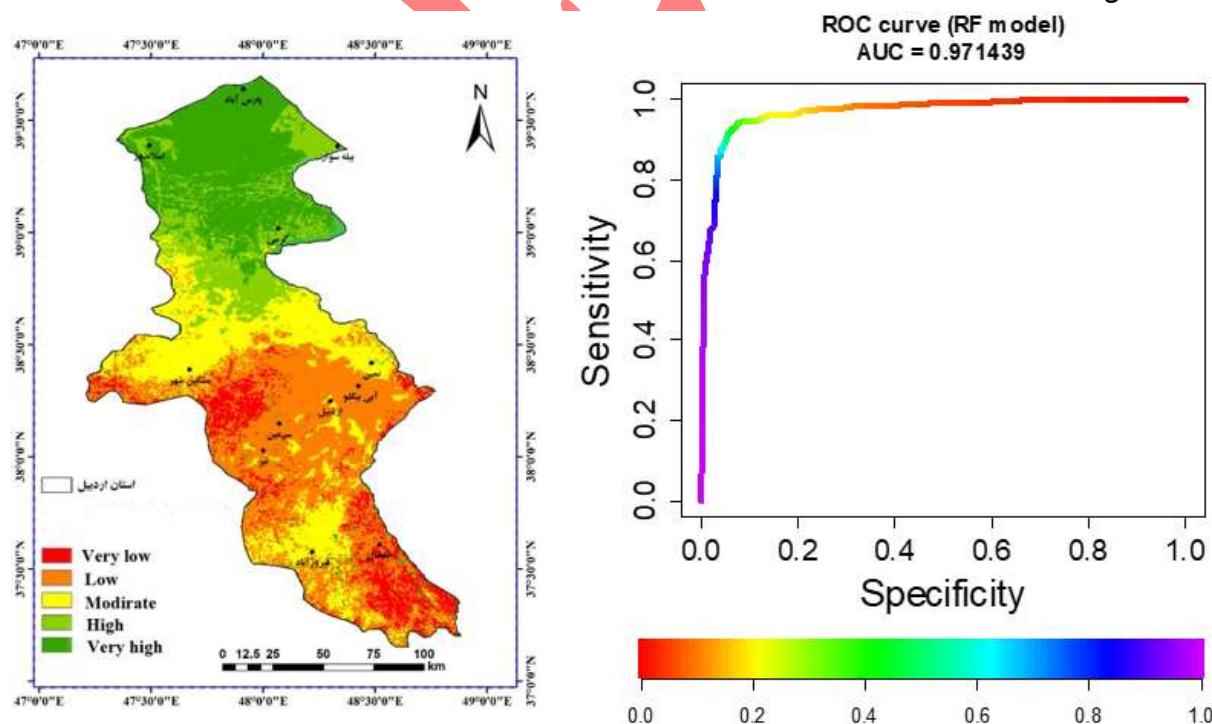
نقشه مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سایت زمین‌شناسی آمریکا دانلود و به منظور تهیه لایه‌های مربوط به شاخص‌های مورفومتری از جمله شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص تعادل جرم و شاخص پناهگاه بادی استفاده گردید. لایه بارندگی، دما و اقلیم از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی، سینوپتیک و کلیماتولوژی برای کل استان تهیه و از طریق درون یابی با روش کریجینگ آماده شد. لایه شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی از تصاویر Sentinel_2 برای ماه خرداد سال ۱۴۰۳ و نقشه خاک استان اردبیل از نقشه جهانی خاک که توسط سایت فائو تهیه شده بود، دانلود و برای این استان استخراج گردید. نقشه لایه‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل (۲) تنظیم شده‌اند.

مدل جنگل تصادفی

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). جنگل تصادفی^۱ یک روش جدید و قدرتمند یادگیری ماشینی است که توسعه بسیاری در فناوری داشته است (Park et al., 2019)، ولی در تحقیقات اکولوژیک شناخته نیستند. این الگوریتم به دلیل سادگی و قابلیت استفاده، هم برای دسته‌بندی و هم رگرسیون، یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین محسوب می‌شود. رویکرد جنگل تصادفی بر پایه روش‌های جدید ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری به وجود آمده است، سپس تمام درختان باهم برای پیش‌بینی ترکیب می‌گردند. پارامترهای کلیدی برای مدل جنگل تصادفی، تعداد درختان و تعداد متغیرهای برای پیش‌بینی ترکیب می‌گردند (Bordbar et al., 2022). در این مطالعه مدل‌سازی و ارزیابی مدل با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) و منحنی ROC این مدل در بسته نرم‌افزاری R Studio انجام شده است.

نتایج و بحث

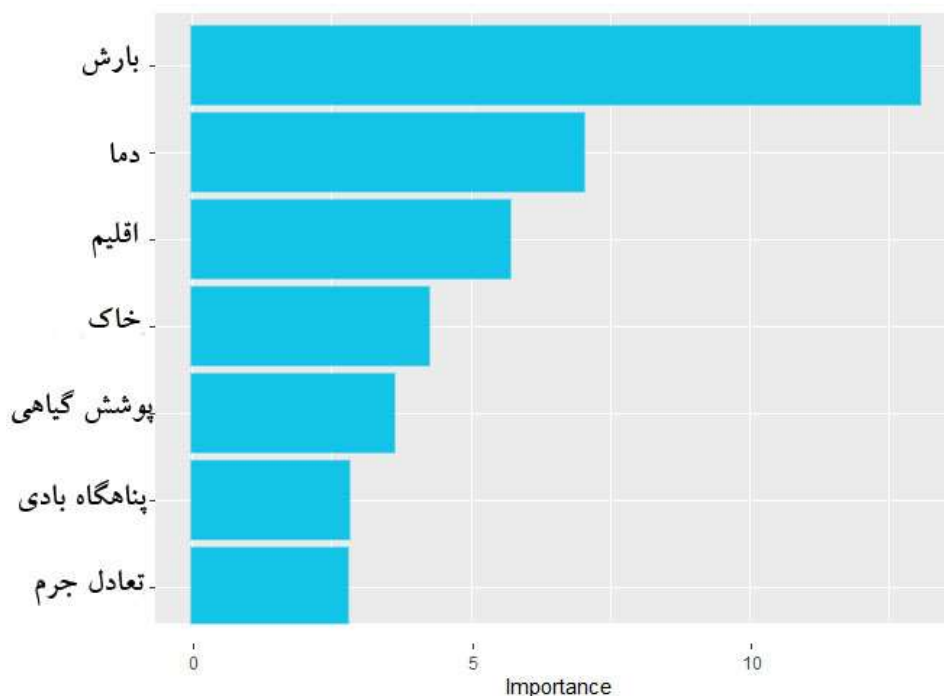
تحقیق حاضر با هدف پهنه‌بندی و پیش‌بینی مناطق حساس به خشک‌سالی با استفاده از مدل یادگیری ماشین ترکیبی - Bagging - Random Forest در استان اردبیل انجام شد. پس از تهیه نقشه پراکنش خشک‌سالی‌های رخ داده و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع، نقشه حساسیت‌پذیری منطقه به وقوع خشک‌سالی با روش فوق تهیه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC نشان می‌دهد که عملکرد مدل با مقدار سطح زیرمنحنی ($AUC > 0.9$) در پیش‌بینی مناطق حساس به رخداد خشک‌سالی عالی می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه‌های حساسیت‌پذیری و نتایج منحنی ROC برای مدل Bagging - Random Forest در استان اردبیل

^۱ Random Forest

Fig 3. Sensitivity Maps and ROC Curve Results For The Bagging – Random Forest Model in Ardabil Province



شکل ۴. نمودار شاخص جایگشت برای مدل Bagging – Random Forest

Fig 4. Permutation Index Chart For the Bagging – Random Forest Model

نتایج حاصل از بررسی جایگشت^۲ در مدل فوق برای تعیین عوامل موثر بر رخداد خشکسالی در استان اردبیل نشان می‌دهد که عوامل جوی از جمله بارندگی، دما، اقلیم به ترتیب بیشترین تاثیر و کمترین تاثیر مربوط شاخص پناهگاه بادی و شاخص تعادل جرم می‌باشد. دو شاخص خیسی و موقعیت جغرافیایی به دلیل تاثیر بسیار ناچیز (در حد صفر) بر مدل در روند تهیه نقشه‌های پیش‌بینی حساسیت به خشکسالی حذف شدند.

نتیجه‌گیری

عوامل جوی عوامل کلیدی و اصلی در وقوع خشکسالی هستند (Nunes, 2022). بر اساس نتایج مدل مناطق جنوبی و مرکزی استان نسبت به سه جهت اصلی دیگر به خشکسالی حساس‌تر می‌باشد. در این استان هرچه از مناطق شمالی به طرف جنوب فاصله می‌گیریم، از میزان بارش، رطوبت و پوشش گیاهی کاسته و بر عواملی مانند دما و تبخیر و تعرق افزوده می‌گردد. بررسی نقشه ارتفاع این استان نشان داد که اغلب مناطق مرتفع و کوهستانی در شمال این استان قرار دارند. وجود مناطق کوهستانی به لحاظ رخداد بارش و تعدیل آب و هوای یک منطقه بسیار کارآمد می‌باشد. لذا نبود این ناهمواری‌ها در مناطق جنوبی دلیلی بر کاهش بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق در این مناطق است. نتایج پژوهش Qubati و همکاران (۲۰۲۳) نیز این دلیل را تایید کرده است (Qubati et al., 2023). بررسی نقشه درون‌یابی لایه بارندگی این منطقه نشان داد که اختلاف بارش در مناطق شمالی این استان نسبت به سایر مناطق بخصوص به جنوب بیش از ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد که به دلیل وسعت زیاد این استان یک امر بدیهی است. چه در پژوهش‌های داخلی از قبیل مصطفی‌زاده و همکاران (Mostafazadeh et al., 2015) و چه در سطح بین الملل (Mani et al., 2023)، نبود بارندگی

² Permutation

و رطوبت و دمای بالاتر از حد معمول، از مهم‌ترین دلایل رخداد خشک‌سالی هستند که با نتایج حاصل از این پژوهش مطالعه هم راستا می‌باشد. در این مطالعه در مناطقی از استان که میزان بارندگی کم بوده است، همسو با آن بر میزان دما افزوده شده است که بر اساس نقشه پیش‌بینی حساسیت استان با روش Bagging – Random Forest این مناطق دارای خطر بالا به وقوع خشک‌سالی می‌باشند. یکی دیگر از عوامل بسیار موثر و کارآمد بر رخداد خشک‌سالی مربوط به اقلیم منطقه می‌باشد که در این استان پنج نوع از رده‌های اقلیم وجود دارد. در این حوضه مناطقی که دارای اقلیم مدیترانه‌ای تا خیلی مرطوب هستند به لحاظ رخداد خشک‌سالی دارای کمترین خطر می‌باشند. تنوع و تراکم بالای پوشش گیاهی بنابر دلایلی همچون حفظ رطوبت خاک (جذب آب و نگهداشت از طریق ترانسپیراسیون 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 میزان دی اکسید کربن) می‌تواند بر کاهش رخداد و تاثیرات خشک‌سالی موثر باشد. نتایج بررسی لایه پوشش گیاهی با نقشه حساسیت پذیری خطر رخداد خشک‌سالی نشان داد که در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم میزان رخداد خشک‌سالی کم و عکس آن میز یعنی در مناطق دارای پوشش گیاهی تنک میزان خطر رخداد خشک‌سالی نیز بیشتر است که در راستای نتایج تحقیق Soureh and Safarpour در سال ۲۰۲۴ برای این استان می‌باشد (Soureh & Safarpour, 2024). حفظ و افزایش پوشش گیاهی در این مناطق می‌تواند دلیلی بر کاهش وقوع این پدیده باشد. نتایج نقشه نهایی پیش‌بینی رخداد خشک‌سالی در سطح استان اردبیل نشان داد که حدود ۶۰ درصد این استان به رخداد خشک‌سالی‌ها بسیار حساس و در شرایط بحرانی قرار دارد. نتایج منحنی ROC و مقدار سطح زیر منحنی (AUC) نشان داد که این مدل از لحاظ تفکیک رده‌های خطر (بالای ۶۰ درصد در کلاس‌های دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد) و هم از لحاظ ارزیابی مدل‌ها با سطح عملکرد ۰/۹۱۱ نتایج بسیار قابل قبولی را ارائه کرده است. با توجه به حساسیت بالای این استان به رخداد خشک‌سالی ضروری است به جهت جلوگیری از وخیم‌تر شدن شرایط در این استان تمهیدات لازم در جهت مقابله با این رخدادها صورت گیرد. 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.

شاخص‌های ساده خشک‌سالی به دلیل پیچیدگی پدیده‌های خشک‌سالی نمی‌توانند روابط بین عوامل اقلیمی، توپوگرافی و انسان‌زایی را که بر پدیده‌های طبیعی بالاخص رویداد خشک‌سالی تأثیر می‌گذارند، را به درستی توصیف کنند. برای کاهش اثرات 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 به طور قابل توجهی نمایان خواهند شد.

نتایج مدل ترکیبی Bagging Random Forest برای استان اردبیل نشان داد که مناطق دارای حساسیت بالا به خشک‌سالی بیشتر در جنوب و تا حدودی قسمت‌های مرکزی این استان را در بر می‌گیرد. وجود بارندگی کم همراه با اقلیم خشک و نیمه خشک منجر به افزایش دما و تبخیر و تعرق توأم با کاهش پوشش گیاهی خواهد بود. محدوده جنوب استان به وقوع خشک‌سالی در آینده نسبت به سایر مناطق دارای حساسیت کمتری خواهد داشت. در حالت کلی کاهش بارندگی از اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار و تشدید خشک‌سالی در این استان می‌باشد.

منابع

Adeniji, O. D., Adeyemi, S. O., & Ajagbe, S. A. (2022). An improved bagging ensemble in predicting mental disorder using a hybridized random forest-artificial neural network model. *Informatica*, 46(4). <https://doi.org/10.31449/inf.v46i4.3916>

- Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). Projected Climate Change Impacts on the Number of Dry and Very Heavy Precipitation Days by Century's End: A Case Study of Iran's Metropolises. *Water*, 16(16), 2226. <https://doi.org/10.3390/w16162226>
- Ahmadalipour, A., & Moradkhani, H. (2018). Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960–2100. *Science of the total environment*, 644, 520-535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.023>
- Al-Qubati, A., Zhang, L., & Pyarali, K. (2023). Climatic drought impacts on key ecosystem services of a low mountain region in Germany. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 800. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11397-1>
- Bordbar, M., Aghamohammadi, H., Pourghasemi, H. R., & Azizi, Z. (2022). Multi-hazard spatial modeling via ensembles of machine learning and meta-heuristic techniques. *Scientific Reports*, 12(1), 1451. <https://doi.org/s41598-022-05364-y>
- Burka, A., Biazin, B., & Bewket, W. (2024). Drought susceptibility modeling with geospatial techniques and AHP model: a case of Bilate River Watershed, Central Rift Valley of Ethiopia. *Geocarto International.*, 39(1), 2395319. <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2395319>
- Fakhar, M. S. and Nazari, B. (2024). Multitemporal Analysis of Drought in Iran: Monitoring and Evaluation of Spatial and Temporal Characteristics Using MODIS Indices. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(1), 39-58. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7011.1050>
- Gerdener H, Engels O, Kusche J. 2020. A framework for deriving drought indicators from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Hydrol Earth Syst Sci*. 24(1):227–248.
- He, S., Chen, K., Liu, Z., & Deng, L. (2023). Exploring the impacts of climate change and human activities on future runoff variations at the seasonal scale. *Journal of Hydrology*, 619, 129382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129382>
- Hedayat, H., & Kaboli, H. S. (2024). Drought risk assessment: The importance of vulnerability factors interdependencies in regional drought risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 100, 104152. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104152>
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. 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, Switzerland: 104.
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Integrative Agriculture*, 17, 1-15 [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Khorrami, B., & Gündüz, O. (2022). Detection and analysis of drought over Turkey with remote sensing and model-based drought indices. *Geocarto International.*, 37(26), 12171-12193. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2066197>
- Mani, Z. A., Khorram-Manesh, A., & Goniewicz, K. (2024). Global health emergencies of extreme drought events: Historical impacts and future preparedness. *Atmosphere*, 15(9), 1137. <https://doi.org/10.3390/atmos15091137>
- Khoshnodifar, Z., Karimi, H., & Ataei, P. (2023). Mechanisms to change farmers' drought adaptation behaviors in Sistan and Baluchistan province, Iran. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1121254. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1121254/full>
- Li, Y., Huang, Y., Fan, J., Zhang, H., Li, Y., Wang, X., & Deng, Q. (2023). Meteorological and Hydrological Drought Risks under Future Climate and Land-Use-Change Scenarios in the Yellow River Basin. *Atmosphere*, 14(11), 1599. <https://doi.org/10.3390/atmos14111599>
- Malekan, A., Dadvarkhani, F., & darban astane, A. (2021). Drought management in rural areas with emphasis on the resilience approach, studied in Kangavar city. *Human Geography Research*, 53(2), 717-732. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhgr.2021.310008.1008169>
- Mao, Y.; Nijssen, B.; Lettenmaier, D.P. Is climate change implicated in the 2013–2014 California drought? A hydrologic perspective. *Geophys. Res. Lett.* 2015, 42, 2805–2813. <https://doi.org/10.1002/2015GL063456>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology.* , 391, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

- Mogholi, M. (2024). Evaluation and Modeling of Land Use Changes of Firozabad Using Multitemporal Satellite Imagery. *Human Geography Research*, 56(2), 191-212. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhgr.2023.346292.1008526>
- Mostafazadeh, R., Shahabi, M., & Zabihi, M. (2015). Analysis of meteorological drought using the Triple Diagram Model in the Kurdistan Province, Iran. *Geographical Planning of Space*, 5(17), 129-140. [In Persian]
- Nunes, L. J. (2022). Analysis of the temporal evolution of climate variables such as air temperature and precipitation at a local level impacts the definition of strategies for adaptation to climate change. *Climate*, 10(10), 154. <https://doi.org/10.3390/cli10100154>
- Park, H., Kim, K., & Lee, D. K. (2019). Prediction of severe drought area based on random forest: Using satellite image and topography data. *Water*, 11(4), 705. <https://doi.org/10.3390/w11040705>
- Savari, M., & Shokati Amghani, M. (2023). Effects of small-scale farmers' adaptation behaviors in drought conditions on household food security level in West Azerbaijan province. *Journal of Geography and Planning*, 27(86), 71-92. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gp.2023.14973>
- Singh, P., Kannaujiya, A. K., Deep, A., Singh, S., Mohanty, T., & Prakash, K. (2023). Spatio-temporal drought susceptibility assessment of Ken River Basin, Central India, and its evaluation through river's morphometry. *Geological Journal*, 58(2), 755-779. <https://doi.org/10.1002/gj.4622>
- Sivakumar, V. L., Krishnappa, R. R., & Nallanathel, M. (2021). Drought vulnerability assessment and mapping using Multi-Criteria decision making (MCDM) and application of Analytic Hierarchy Process (AHP) for Namakkal District, Tamil Nadu, India. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1592-1599. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.657>
- Song, Y., & Park, M. (2020). Assessment of quantitative standards for mega-drought using data on drought damages. *Sustainability*, 12(9), 3598. <https://doi.org/10.3390/su12093598>
- Soureh, E., & Safarpour, F. (2025). Assessing the Performance of Vegetation Indices in Drought Analysis Using Remote Sensing Techniques (Case Study: Kurdistan Province). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*. [In Persian]
- Wossen, T., Abdoulaye, T., Alene, A., Feleke, S., Menkir, A., & Manyong, V. (2017). Measuring the impacts of adaptation strategies to drought stress: The case of drought-tolerant maize varieties. *Journal of Environmental Management*, 203, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.058>
- Zhoolideh, M., Motee, N., & Asadi, A. (2024). Monitoring and Predicting Land Use Changes in Kurdistan Province by GIS and CA-Markov Model. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 55(2), 379-395. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2022.335433.669110>