

Research Paper



Identifying flood-prone areas in the Yamchi watershed by monitoring spectral indices and satellite data

Batool Zeinali¹ , Mahdi Frotan²

1. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Zeynali.b@uma.ac.ir
2. Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Mahdi.frotan23@gmail.com

Keywords

Flood, 99% percentile, spectral indices, random forest (RF), Yamchi watershed, Ardabil.

Received: 2025/03/24

Accepted: 2025/07/07

Published: 2025/10/20

ABSTRACT**Introduction**

Flooding is one of the most devastating natural phenomena, threatening human lives, property, and the social and economic stability of communities. Both natural and human-induced factors such as climate change and urbanization contribute to the increasing risk of floods. Identifying flood-prone areas and preparing flood zoning maps are essential tools for managing water resources and preventing flood-related damage. The use of satellite data and mathematical models can significantly enhance the accuracy of these maps.

Methodology

This research uses applied and analytical approaches to identify flood-prone areas in the Yamchi watershed. Initially, daily discharge data from Lai, Nir, and Yamchi stations were collected from 2014 to 2021. Then, environmental parameters affecting the occurrence of floods, including land slope, distance from the waterway, land use, and soil moisture, were examined. The necessary analyses were performed in the ArcGIS environment using the Google Earth Engine platform. Important spectral indices were calculated from Landsat 8 satellite images and used as input variables of the regression random forest model. After training the model, its performance was evaluated using R^2 and MSE criteria, and flood-prone areas were classified into five risk classes. To evaluate the accuracy of the model, a representative day of flood occurrence, specifically the April 2017 flood, was examined, and the accuracy of the model in identifying flooded areas was measured by analyzing the ROC curve

*Corresponding Author: Batool Zeinali. Email: Zeynali.b@uma.ac.ir

How to cite this article: Zeinali, Batool., Frotan, Mahdi. (2025). Identifying flood-prone areas in the Yamchi watershed by monitoring spectral indices and satellite data. *Hydrogeomorphology*, 12(44): 132 – 150.

DOI: [10.22034/hyd.2025.66392.1784](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.66392.1784)



Copyright: © by the authors

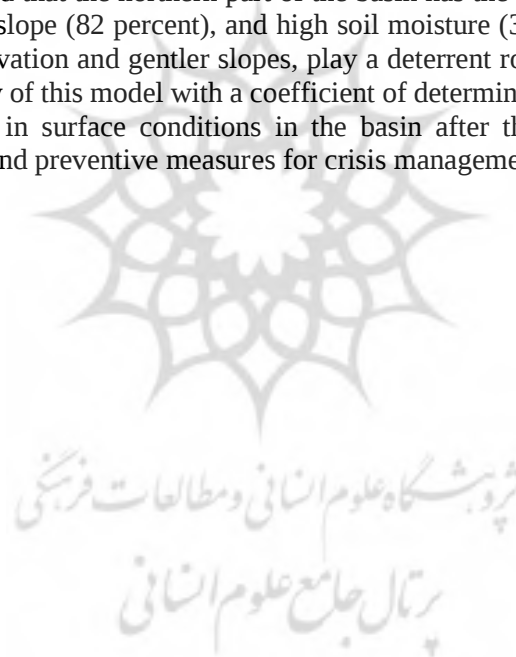
Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

This research identified flood-prone areas in the Yamchi watershed and used daily discharge data from Lai, Nir, and Yamchi stations between 2014 and 2021. The results show that Yamchi station, with a discharge threshold of 10.6 m³/s, has the highest threshold and has recorded 25 flood days. In contrast, Lai station, with a discharge threshold of 0.33 m³/s, has the lowest threshold and has experienced 28 days of flooding. Land use and land slope have been investigated as key factors in the occurrence of floods. The land use map shows that the largest area is devoted to rainfed agricultural land, and steep slopes in the northern areas of the basin increase the risk of flooding. Also, soil moisture is highest in the upstream parts of the basin, and these areas are prone to flooding in the event of heavy rainfall. The use of spectral indices such as AWEI, WRI, NDWI, and LSWI also helped identify flood-prone areas, showing that the northern and eastern regions are at greater risk due to high humidity and topographic conditions. The random forest model has been used as a tool to predict flood susceptibility, and the results indicate its high accuracy in identifying flood-prone areas. Analysis of the April 2017 flood shows that with increased precipitation and soil saturation, runoff flow intensity in the upstream areas of the basin has increased significantly. Finally, the ROC curve evaluates the model's performance in distinguishing between flooded and non-flooded areas and shows that the model performs better than chance. These findings emphasize the need for special attention to flood management in the northern regions of the basin and can contribute to optimal planning to reduce flood risks.

Conclusions

This study analyzed flood-prone areas in the Yamchi watershed using topographic factors, soil moisture conditions, and spectral indices. The results showed that the northern part of the basin has the highest potential for flooding due to its high altitude (4383 meters), steep slope (82 percent), and high soil moisture (35 percent). In contrast, the eastern and western areas, with their lower elevation and gentler slopes, play a deterrent role against flooding. The random forest model confirmed the high accuracy of this model with a coefficient of determination of 0.93 and a low error (0.00021). Radar data also showed changes in surface conditions in the basin after the April 2017 flood, emphasizing the importance of using satellite data and preventive measures for crisis management.





شناسایی مناطق مستعد سیل خیزی در حوضه آبریز یامچی با پایش شاخص‌های طیفی و داده‌های ماهواره‌ای



بتول زینالی^{۱*}، مهدی فروتن^۲

۱- استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. Zeynali.b@uma.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. Mahdi.frotan23@gmail.com

چکیده

سیل یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که شناسایی مناطق مستعد آن برای مدیریت، پیشگیری و کاهش خسارات ضروری است. این پژوهش با رویکردی کاربردی و تحلیلی، به شناسایی نواحی مستعد سیل خیزی در حوضه آبریز یامچی پرداخته است. در ابتدا، داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های لای، نیر و یامچی طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل جمع‌آوری شد. سپس، پارامترهای محیطی مؤثر شامل شیب زمین، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی و رطوبت خاک در محیط ArcGIS و گوگل ارث انجین ترسیم شدند. همچنین، شاخص‌های طیفی NDWI، AWEI، WRI و LSWI از تصاویر لندست ۸ استخراج گردید. پس از استانداردسازی متغیرها، مدل جنگل تصادفی رگرسیونی با ۱۰۰ درخت تصمیم آموزش داده شد. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل استفاده شد. عملکرد مدل با شاخص‌های آماری R^2 و MSE به ترتیب برابر با ۰/۹۳۵۳ و ۰/۰۰۰۲۱۰ ارزیابی شد. در نهایت نواحی مستعد سیل خیزی شناسایی گردیدند. به‌منظور اعتبارسنجی، رویداد سیل آوریل ۲۰۱۷ به‌عنوان نمونه موردی تحلیل شد. نتایج نشان داد که بخش شمالی حوضه، به دلیل ارتفاع زیاد، شیب تند، رطوبت خاک ۳۵ درصد و مقادیر بالای AWEI و WRI، بیشترین پتانسیل برای وقوع سیل خیزی را دارد. در مقابل، نواحی مرکزی و جنوبی به علت شیب ملایم‌تر و رطوبت کمتر خاک، احتمال کمتری برای سیل خیزی نشان دادند. مدل جنگل تصادفی صحت این الگو را تأیید کرد و عملکرد آن با منحنی ROC و مقدار AUC برابر با ۰/۶۱۶، قابل قبول ارزیابی شد. تحلیل داده‌های راداری نیز نشان داد که بازتاب سیگنال‌ها در مناطق شمالی، پیش و پس از وقوع سیلاب، تغییر محسوسی داشته و بیانگر تمرکز منابع آبی در این بخش از حوضه است.

کلیدواژه‌ها

سیل، صدک ۹۹٪، شاخص‌های طیفی، جنگل تصادفی (RF)، حوضه آبریز یامچی، اردبیل.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

*نویسنده مسئول: بتول زینالی

رایانامه: Zeynali.b@uma.ac.ir

ارجاع به این مقاله: زینالی، بتول؛ فروتن، مهدی (۱۴۰۴). شناسایی مناطق مستعد سیل خیزی در حوضه آبریز یامچی با پایش شاخص‌های طیفی و داده‌های ماهواره‌ای. هیدروژنومورفولوژی، ۱۲(۴۴): ۱۳۲-۱۵۰.

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.66392.1784



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

سیل یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی است که بیش از سایر بلایا، جان و مال انسان‌ها و نیز شرایط اجتماعی و اقتصادی جوامع را تهدید می‌کند. با این حال، اگر به‌درستی مدیریت شود، می‌تواند به منبعی ارزشمند برای تأمین آب مورد نیاز منطقه تبدیل شود (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۴: ۲). عوامل طبیعی، به‌ویژه افزایش شدت بارش‌ها در سال‌های اخیر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، از مهم‌ترین دلایل افزایش خطر سیل به شمار می‌روند. علاوه بر این، عوامل انسانی همچون رشد جمعیت، توسعه نامتوازن شهری، ضعف در سیستم‌های زهکشی، بهره‌برداری نادرست از اراضی، مدیریت ناکارآمد دشت‌های سیلابی و عملکرد ضعیف در کنترل مخازن آبی نیز بر شدت این مخاطره می‌افزایند (چزگی و پویان، ۱۴۰۲: ۳۸). سیلاب‌های اخیر در استان اردبیل موجب خسارت‌هایی به بخش‌های مختلف از جمله ۳۶۰۰ میلیارد ریال خسارت به بخش آب استان و آسیب به پل‌های مختلف شده است. این امر ضرورت اجرای اقدامات پیشگیرانه و بازسازی زیرساخت‌ها، از جمله لایروبی و ساماندهی رودخانه‌ها را پررنگ‌تر می‌سازد. همچنین، شناسایی نقاط سیل خیز و تخصیص اعتبارات برای بازسازی این مناطق، گامی مؤثر در جلوگیری از تکرار خسارات مشابه در آینده خواهد بود (اداره آب منطقه‌ای استان اردبیل، ۱۴۰۲). پهنه‌بندی سیل به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای برنامه‌ریزی و شناسایی مناطق مستعد سیل، با هدف کاهش خطرات ناشی از آن شناخته می‌شود. روش‌های موجود برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیل در چهار دسته اصلی قرار می‌گیرند که شامل روش‌های مشاهده‌ای یا استفاده از مشاهدات میدانی، مقایسه عکس‌های هوایی منطقه، محاسبات دستی، و بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی هستند (یوسف‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۰). بنابراین، نقشه پهنه‌بندی سیل به‌عنوان داده‌هایی پایه در پروژه‌های عمرانی شناخته می‌شوند و باید پیش از هرگونه سرمایه‌گذاری یا اقدام اجرایی، در اولویت سازمان‌های مرتبط قرار گیرند (شهیری‌پارسا و همکاران، ۲۰۱۵). با توجه به تأثیر مستقیم سیلاب‌ها بر زندگی انسان‌ها، زیرساخت‌ها و محیط‌زیست، شناسایی مناطق سیل خیز در حوضه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است. این شناسایی، با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی و رشد روزافزون جمعیت، می‌تواند در بهبود مدیریت منابع آب و پیشگیری از خسارات ناشی از سیلاب مؤثر واقع شود. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی، ابزارهایی نوین و دقیق را در اختیار پژوهشگران قرار داده‌اند تا با دقت بالاتر، به شبیه‌سازی سیلاب و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی اقدام کنند.

در زمینه پهنه‌بندی مناطق سیل خیز، مطالعات مختلفی انجام شده است. سیمز و کولوف^۱ (۲۰۱۲) واکنش‌های گیاهی به سیلاب در یک دشت سیلابی نیمه‌خشک را با استفاده از سنجش از دور بررسی کرده‌اند. ویشنو^۲ و همکاران (۲۰۱۹) تحلیل سیلاب‌های گسترده در ایالت کرالا هند را انجام داده‌اند. جهانگیر و همکاران (۲۰۱۹) از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۳) برای پیش‌بینی و مدل‌سازی سیلاب‌ها در حوضه رودخانه کان در استان تهران بهره برده‌اند. داسالاس^۴ و همکاران (۲۰۱۹) مدل ترکیب‌شده D1-D2 را برای شبیه‌سازی سیلاب‌های ناشی از سرریز رودخانه‌ها به کار گرفته‌اند. ادنان^۵ و همکاران (۲۰۱۹) حساسیت به سیلاب ناگهانی در حوزه‌های رودخانه کارنافولی و سانگو در بنگلادش را بررسی کرده‌اند. سواين^۶ و همکاران (۲۰۲۰) آسیب‌پذیری سیلاب در ایالت بیهار هند را با استفاده از تکنیک GIS-AHP ارزیابی کرده‌اند. فام^۷ و همکاران (۲۰۲۰) با روش‌های مختلف یادگیری ماشین به ارزیابی آسیب‌پذیری سیلاب‌های ناگهانی پرداخته‌اند. کیو^۸ (۲۰۲۱) نقشه‌برداری خطر سیلاب ناگهانی در استان لای چائو، ویتنام را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش یکپارچه GIS-AHP-MCA انجام داده است. همتی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی مادکلارک (ModClark) و GIS به تعیین مناطق سیل خیز حوضه آبریز قرنقو پرداخته‌اند. عبدالعظیمی و همکاران (۱۳۹۹) با مدل TOPSIS-GIS به شناسایی و پهنه‌بندی مناطق سیل خیز شهر شیراز اقدام کرده‌اند. آزادطلب و همکاران (۱۳۹۹) با مدل‌های شاخص آماری (SI^۹) و تابع شواهد قطعی (EBF^{۱۰}) به پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر سمنندج پرداخته‌اند. رضائی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۹) به تحلیل سیل خیزی زیرحوضه‌ها با رویکرد مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره WASPAS در حوضه آبریز ال‌ندچای واقع در شمال غرب ایران پرداخته‌اند. جلالیان (۱۴۰۰) با مدل تحلیل شبکه و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS^{۱۱}) به ارزیابی سیل خیزی در حوضه گرگان‌رود استان گلستان پرداخته است. زیاری و همکاران (۱۴۰۰)

1- Sims & Colloff

2- Vishnu

3- Artificial Neural Network

4- Dasallas

5- Adnan

6- Swain

7- Pham

8- Kieu

9- Statistical Index

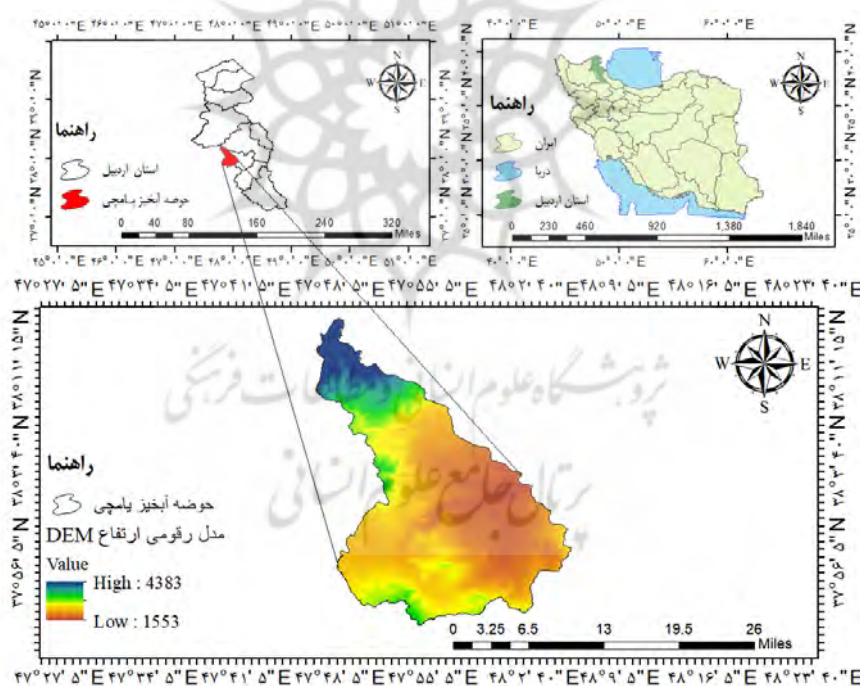
10- Evidence-Based Function

11- Geographic Information System

با تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل فازی در محیط GIS به پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در شهر ایلام اقدام کرده‌اند. محمدی و همکاران (۱۴۰۱) عملکرد مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS¹ را در تعیین پهنه سیلابی رودخانه قوشقرای آذرشهر مقایسه کرده‌اند. محمددوست و شمس‌نیا (۱۴۰۲) با تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در محیط GIS به شناسایی مناطق سیل‌خیز شهرستان دیر پرداخته‌اند. با توجه به مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که سیلاب‌ها تهدیدی جدی برای جان، مال، منابع آبی و زیرساخت‌های شهری هستند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی، به شناسایی مناطق مستعد سیل‌خیزی در حوضه آبریز یامچی پرداخته می‌شود؛ منطقه‌ای که با افزایش سیلاب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و توسعه شهری مواجه است. کاربرد این روش‌ها می‌تواند به بهبود مدیریت بحران و کاهش خطرات سیل کمک شایانی کند.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد یامچی به مساحت ۶۹۸ کیلومتر مربع بین عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۶ دقیقه شرقی، واقع شده و در حدفاصل توده آتشفشانی سبلان و کوه‌های بزغوش قرار دارد. ارتفاع منطقه از ۱۵۰۶ متر در سد یامچی تا ۴۵۰۵ متر در قله هرم متغیر است. زهکش اصلی منطقه بخشی از شبکه رودخانه قره‌سو و سیستم رود ارس است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک و بسیار سرد تعریف شده است. سد یامچی با ظرفیت ۹۵ میلیون مترمکعب برای تأمین آب شرب اردبیل و آبیاری اراضی پایین‌دست استفاده می‌شود (مددی و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۵). شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز یامچی را در سطح استان اردبیل و ایران نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز یامچی در استان اردبیل و ایران

Figure (1): Geographical location of the Yamchi watershed in Ardabil province and Iran

روش پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکردهای کاربردی و تحلیلی، به منظور شناسایی نواحی مستعد سیل خیزی در حوضه آبریز یامچی انجام شد. در گام نخست، داده‌های دبی روزانه مربوط به ایستگاه‌های لای، نیر و یامچی در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل دریافت شد. سپس، وضعیت پارامترهای محیطی مؤثر در سیل خیزی شامل شیب زمین، فاصله از آبراهه (در محیط ArcGIS) و وضعیت کاربری اراضی و رطوبت خاک (در پلتفرم Google Earth Engine) استخراج و مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین در این پلتفرم با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و باندهای طیفی مشخص‌شده در جدول ۱، شاخص‌های طیفی کلیدی نظیر $NDWI^1$ ، $AWEI^2$ ، WRI^3 و $LSWI^4$ برای ارزیابی منابع آبی مورد بررسی قرار گرفتند. تمامی این پارامترها با استفاده از روش Min-Max Scaling در بازه صفر و یک نرمال‌سازی شدند تا اثر تفاوت مقیاس‌ها حذف گردد. سپس این داده‌ها به‌عنوان ورودی مدل جنگل تصادفی رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفتند. در فرآیند مدل‌سازی، داده‌ها به دو بخش، ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون تقسیم شدند و مدل با ۱۰۰ درخت تصمیم آموزش داده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین R^{25} و میانگین مربعات خطا MSE^6 استفاده شد. در گام نهایی، با استفاده از مدل آموزش‌دیده، مناطق مستعد سیل خیزی شناسایی و در پنج کلاس خطر از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند. جهت اعتبارسنجی نتایج، یک روز نماینده از رخدادهای سیلابی منطقه انتخاب گردید. در این راستا، آستانه دبی سیلاب با روش صدک ۹۹ درصد محاسبه شد و روزهایی که دبی آن‌ها از این مقدار فراتر رفت، به‌عنوان روزهای سیلابی فرین در نظر گرفته شدند. به‌منظور تحلیل عمیق‌تر، رخداد سیلابی آوریل ۲۰۱۷ به‌طور ویژه مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، داده‌های مربوط به بارش، رواناب و میزان سیلاب از پایگاه‌های داده ذکرشده در جدول ۲ استخراج و سپس وضعیت این متغیرها در بازه‌های زمانی پیش و پس از وقوع سیلاب ترسیم و تحلیل گردید و در نهایت، با مقایسه داده‌های سیلاب واقعی، دقت مدل جنگل تصادفی در شناسایی نواحی مستعد سیلاب از طریق تحلیل منحنی ROC^7 ارزیابی شد.

جدول (۱): مشخصات شاخص‌های طیفی و داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

Table (1): Characteristics of spectral indices and satellite data used in the research

شاخص طیفی	ماهواره	باندها	قدرت تفکیک مکانی (متر)	طول موج (میکرومتر)
NDWI	Landsat 8	B3 (Green), B5 (NIR)	۳۰	B3: ۰/۵۳-۰/۵۹ B5: ۰/۸۵-۰/۸۸
AWEI	Landsat 8	B3 (Green), B5 (NIR), B6 (SWIR-1), B7 (SWIR-2)	۳۰	B3: ۰/۵۳-۰/۵۹ B5: ۰/۸۵-۰/۸۸ B6: ۱/۵۷-۱/۶۵ B7: ۲/۱۱-۲/۲۹
WRI	Landsat 8	B3 (Green), B4 (Red), B5 (NIR), B6 (SWIR-1)	۳۰	B3: ۰/۵۳-۰/۵۹ B4: ۰/۶۴-۰/۶۷ B5: ۰/۸۵-۰/۸۸ B6: ۱/۵۷-۱/۶۵
LSWI	Landsat 8	B5 (NIR), B6 (SWIR-1)	۳۰	B5: ۰/۸۵-۰/۸۸ B6: ۱/۵۷-۱/۶۵

1- Normalized Difference Water Index
2- Automated Water Extraction Index

3- Water Ratio Index
4- Land Surface Water Index
5- Coefficient of Determination

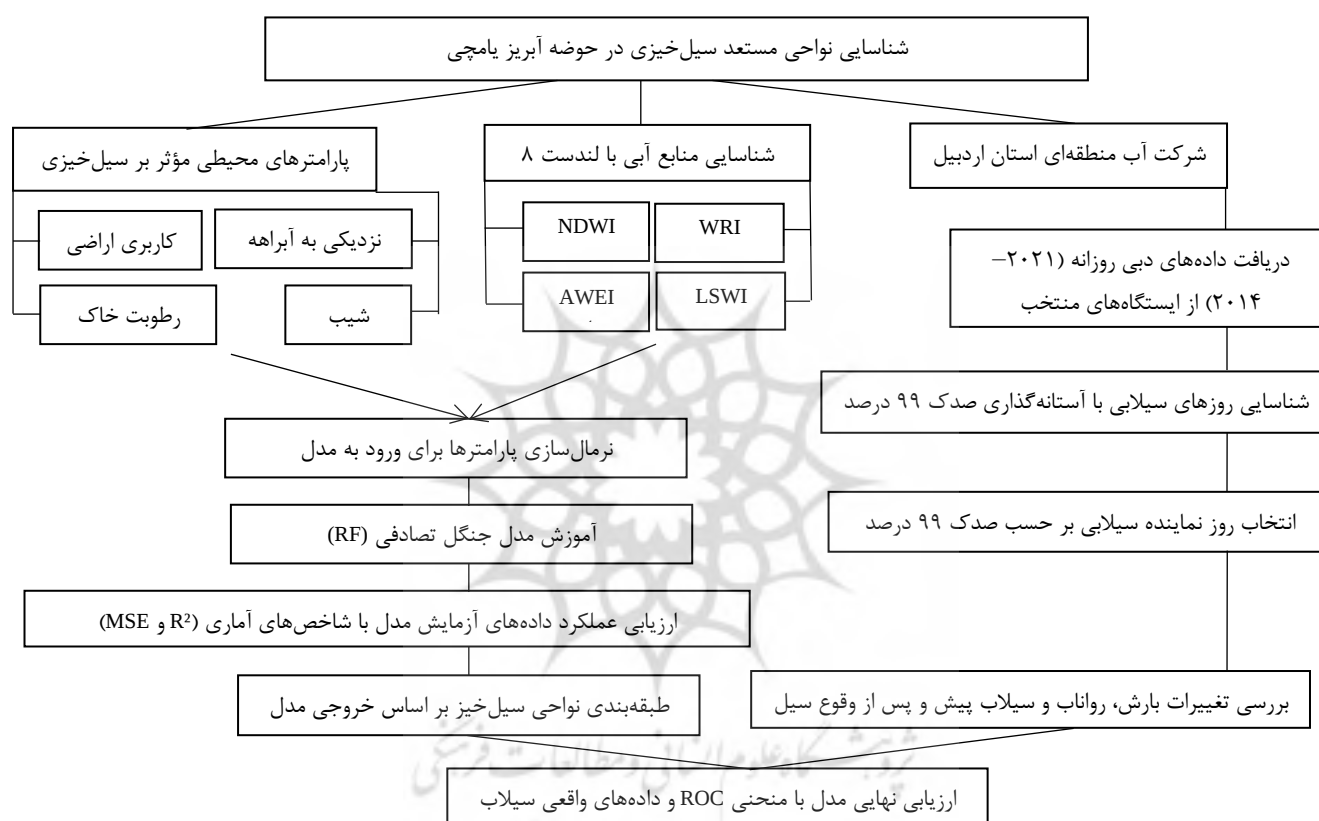
6- Mean Squared Error
7- Receiver Operating Characteristic

جدول (۲): مشخصات متغیرها و پایگاه داده‌های مورد استفاده در تحقیق

Table (2): Characteristics of variables and databases used in the research

متغیر	پایگاه داده	باند	قدرت تفکیک مکانی (متر)	واحد اندازه‌گیری
رطوبت خاک	FLDAS	SoilMoi00_10cm_tavg, SoilMoi10_40cm_tavg	۱۱۱۳۲	مترمکعب بر مترمکعب
باران	CHIRPS	precipitation	۵۵۶۶	میلی‌متر
رواناب	IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE	ro	۴۶۳۸/۳	میلی‌متر
سیلاب	COPERNICUS/S1_GRD	VV	۱۰	دسی‌بل

در شکل ۲، نمودار جریان‌ی روش تحقیق ترسیم شده است.



شکل (۲): نمودار جریان‌ی مراحل انجام تحقیق

Figure (2): Flowchart of research steps

شاخص آب تفاضلی نرمال‌شده NDWI

اختصاص پهنه‌های آبی در تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از شاخص NDWI انجام می‌شود. این شاخص به‌منظور تفکیک نواحی آبی از سایر پوشش‌های سطحی، از بازتاب طیفی باندهای سبز (Green) و فروسرخ نزدیک (NIR) بهره می‌گیرد. مقادیر محاسبه‌شده NDWI برای پهنه‌های آبی معمولاً بزرگ‌تر از صفر هستند. فرمول محاسبه شاخص NDWI به‌صورت رابطه (۱)، ارائه شده است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۵۴۳).

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (1)$$

شاخص اتوماتیک جداسازی آب (AWEI)

این شاخص به طور خاص برای تفکیک پهنه‌های آبی از سایر سطوح مانند مناطق غیرآبی و سایه‌ها استفاده می‌شود و با بهره‌گیری از تضادهای موجود در باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای عمل می‌کند و از پنج باند برای شناسایی پهنه‌های آبی در مقایسه با سایر سطوح کمک می‌گیرد. شاخص مذکور به‌ویژه در جداسازی پهنه‌های آبی از سایه‌ها و مناطق تاریک مانند نواحی دارای ساختمان یا سازه‌های انسانی عملکرد مطلوبی دارد. مقادیر بیش از صفر نشان‌دهنده پهنه‌های آبی بوده، درحالی‌که مقادیر کمتر از صفر به سطوح غیرآبی اشاره دارند (جوادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۵۴۴).

فرمول محاسبه AWEI به شرح رابطه (۲ و ۳) است.

$$AWEI_no\ shadow = 4 \times (Green - SWIR1) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR2) \quad (2)$$

$$AWEI_shadow = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (3)$$

فیزیا و همکاران شرایطی را ارائه کردند که بر اساس آن AWEI می‌تواند نتایج مؤثر و کارآمدی را برای تفکیک آب از پدیده‌های غیرآبی ارائه دهد. این شرایط شامل موارد زیر است:

- ۱- در شرایطی که مشکل اصلی وجود سایه، پدیده‌هایی مانند برف، یخ یا آلبیدوی بالای سطوح انسانی باشد، استفاده از AWEI_shadow می‌تواند به تنهایی آب را از سایر پدیده‌های غیرآبی تفکیک کند.
- ۲- در مواردی که میزان سایه در تصویر اندک است، استفاده از AWEI_no shadow مناسب‌تر بوده و تفکیک دقیق‌تری بین آب و سطوح غیرآبی حاصل می‌شود.
- ۳- در شرایط پیچیده که هم آلبیدوی سطح بالا باشد و هم سایه در تصویر وجود داشته باشد، ترکیب هر دو شاخص AWEI_shadow و AWEI_no shadow پیشنهاد می‌شود تا دقت جداسازی پهنه‌های آبی به حداکثر برسد.
- ۴- در صورتی که نه آلبیدوی بالا و نه سایه در تصویر مشاهده شود، عملکرد هر دو شاخص تقریباً یکسان خواهد بود و تفاوت قابل‌توجهی میان آن‌ها مشاهده نمی‌شود (فیزیا و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۶) (به نقل از اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۹).

شاخص نسبی آب (WRI)

این شاخص برای شناسایی پهنه‌های آبی از نسبت بازتابش باندهای مرئی (سبز و قرمز) به باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (MIR) استفاده می‌کند. معمولاً مقادیر بزرگ‌تر از یک در این شاخص بیانگر حضور پهنه‌های آبی هستند. فرمول محاسبه WRI به شرح رابطه (۴)، است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۵۴۴).

$$WRI = \frac{(GREEN + RED)}{(NIR + MIR)} \quad (4)$$

شاخص آب سطح زمین (LSWI)

این شاخص برای ارزیابی میزان رطوبت سطح خاک و پوشش گیاهی طراحی شده است و از ترکیب بازتابش باند NIR و باند SWIR محاسبه می‌شود. فرمول محاسبه LSWI به صورت رابطه (۵)، است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۴).

$$LSWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (5)$$

مدل جنگل تصادفی (RF)

مدل جنگل تصادفی یکی از تکنیک‌های قدرتمند مدل‌سازی بر پایه درخت تصمیم است که با ترکیب نتایج چندین درخت مختلف، برآورد نهایی را در ارتباط با مخاطرات طبیعی و عوامل زیست‌محیطی ارائه می‌دهد. در مسائل رگرسیون، جنگل تصادفی شامل مجموعه‌ای از درختان مستقل است که هر کدام روی زیرمجموعه‌ای از متغیرهای مستقل آموزش دیده‌اند و خروجی‌های آن‌ها به صورت تلفیقی برای تخمین دقیق احتمال وقوع خطر (متغیر وابسته) استفاده می‌شود. این روش یکی از ابزارهای تحلیلی قوی برای استخراج داده‌ها و بهینه‌سازی تعداد درختان در مدل است. فرآیند ساخت جنگل تصادفی اغلب از طریق روش کیسه‌گذاری انجام می‌گیرد. مفهوم کلیدی کیسه‌گذاری این است که با ترکیب چند مدل یادگیری، عملکرد کلی مدل بهبود می‌یابد. به بیان ساده، جنگل تصادفی مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری ایجاد کرده و با ترکیب آن‌ها، پیش‌بینی‌هایی پایدارتر و دقیق‌تر ارائه می‌دهد. در این روش، بردار تصادفی θ_k مستقل از سایر بردارهای تصادفی $\theta_k - 1$... θ_k بوده و برای هر درخت k به صورت مجزا تولید می‌شود. علاوه بر این، تمامی بردارها از یک توزیع یکسان پیروی می‌کنند. درخت رگرسیونی با استفاده از داده‌های آموزشی رشد کرده و خروجی آن به صورت مجموعه‌ای از درختان به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$k = \{h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x)\} \quad (6)$$

که در اینجا

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_p\} \quad (7)$$

$$h_k(x) = h(x, \theta_k) \quad (8)$$

بردارهای فوق، ورودی‌های بعدی را تشکیل می‌دهند و درخت‌های تولیدشده را می‌سازند. خروجی گروهی هر درخت به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\hat{y}_1 = h_1(x), \hat{y}_2 = h_2(x), \dots, \hat{y}_k = h_k(x) \quad (9)$$

که در آن $\hat{y}_k$ نشان‌دهنده خروجی هر درخت است. در نهایت، خروجی کلی مدل با میانگین‌گیری از پیش‌بینی‌های تمام درختان محاسبه می‌شود (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۲۹).

نرمال‌سازی Min-Max

این روش که یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین تکنیک‌های نرمال‌سازی محسوب می‌شود، داده‌ها را با استفاده از کمینه و بیشینه هر پارامتر به بازه‌ای استاندارد (بین صفر تا یک) تبدیل می‌کند. این روش مقدار هر داده را از کمینه کسر کرده و سپس حاصل را بر دامنه (تفاضل بیشینه و کمینه) تقسیم می‌کند. خروجی این فرایند، مجموعه‌ای از مقادیر نرمال‌شده در بازه صفر و یک است تا از تأثیر نامطلوب اختلاف مقیاس متغیرها جلوگیری شود (سین‌سامبونتونگ، ۲۰۲۲).

$$X_{\text{norm}} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (10)$$

که در آن X_{norm} مقدار نرمال‌شده و X مقدار اصلی داده است.

معیارهای ارزیابی مدل

در معیار MSE (میانگین مربعات خطا)، هرچه مقدار آن کمتر باشد، نشان‌دهنده دقت و مطلوبیت بیشتر داده‌ها است. همچنین معیار R^2 بیانگر میزان اعتماد به پیش‌بینی‌های یک مدل است؛ به‌طوری که هرچه مقدار R^2 به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نتایج مدل قابل‌اعتمادتر و مطلوب‌تر ارزیابی می‌شوند. در این مطالعه، برای ارزیابی عملکرد مدل از روابط (۱۱) و (۱۲) استفاده شده است. در این روابط، Q_p^t جریان پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_o^t جریان مشاهده شده، و $\bar{Q}_o$ و $\bar{Q}_p$ نیز به ترتیب میانگین جریان‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهند (میرزایی و صراف، ۱۴۰۰: ۶۷۶).

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o) - (Q_p^t - \bar{Q}_p)]^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2 (Q_p^t - \bar{Q}_p)^2} \quad (11)$$

$$MSE = \sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_p^t)^2 \quad (12)$$

منحنی ROC

یکی از روش‌های بسیار کاربردی برای ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) است. این منحنی توانایی مدل را در تفکیک درست بین کلاس‌های مختلف، نمایش می‌دهد. سطح زیر منحنی ROC یا AUC نشان‌دهنده دقت کلی مدل در تفکیک دو کلاس است. اگر مقدار AUC برابر با ۱ باشد، نشان از پیش‌بینی کاملاً صحیح مدل دارد. از شاخص‌های مهم دیگر برای ارزیابی دقت مدل، حساسیت (Sensitivity) و ویژگی (Specificity) هستند (طلائی و شادفر، ۱۴۰۲: ۴۹۰). Sensitivity درصد پیکسل‌هایی را نشان می‌دهد که دارای شرایط واقعی (در اینجا مناطق سیل‌خیز) بوده و مدل به درستی آن‌ها را شناسایی کرده است و طبق رابطه ۱۳، به دست می‌آید.

$$\text{Sensitivity} = \frac{n_{tp}}{n_{tp} + n_{fn}} \quad (13)$$

که در آن n_{tp} تعداد پیکسل‌های دارای سیل‌خیزی که درست پیش‌بینی شده‌اند و n_{fn} تعداد پیکسل‌های دارای سیل‌خیزی که اشتباه پیش‌بینی شده است.

از سوی دیگر، Specificity درصد پیکسل‌هایی است که فاقد سیل‌خیزی بوده‌اند و مدل به درستی آن‌ها را به عنوان مناطق غیرسیل‌خیز تشخیص داده است و طبق رابطه ۱۴، به دست می‌آید.

$$\text{Specificity} = \frac{n_{tn}}{n_{tn} + n_{fp}} \quad (14)$$

که در آن n_{tn} تعداد پیکسل‌های بدون سیل‌خیزی که درست پیش‌بینی شده‌اند و n_{fp} تعداد پیکسل‌هایی است که به اشتباه به عنوان سیل‌خیز پیش‌بینی شده‌اند.

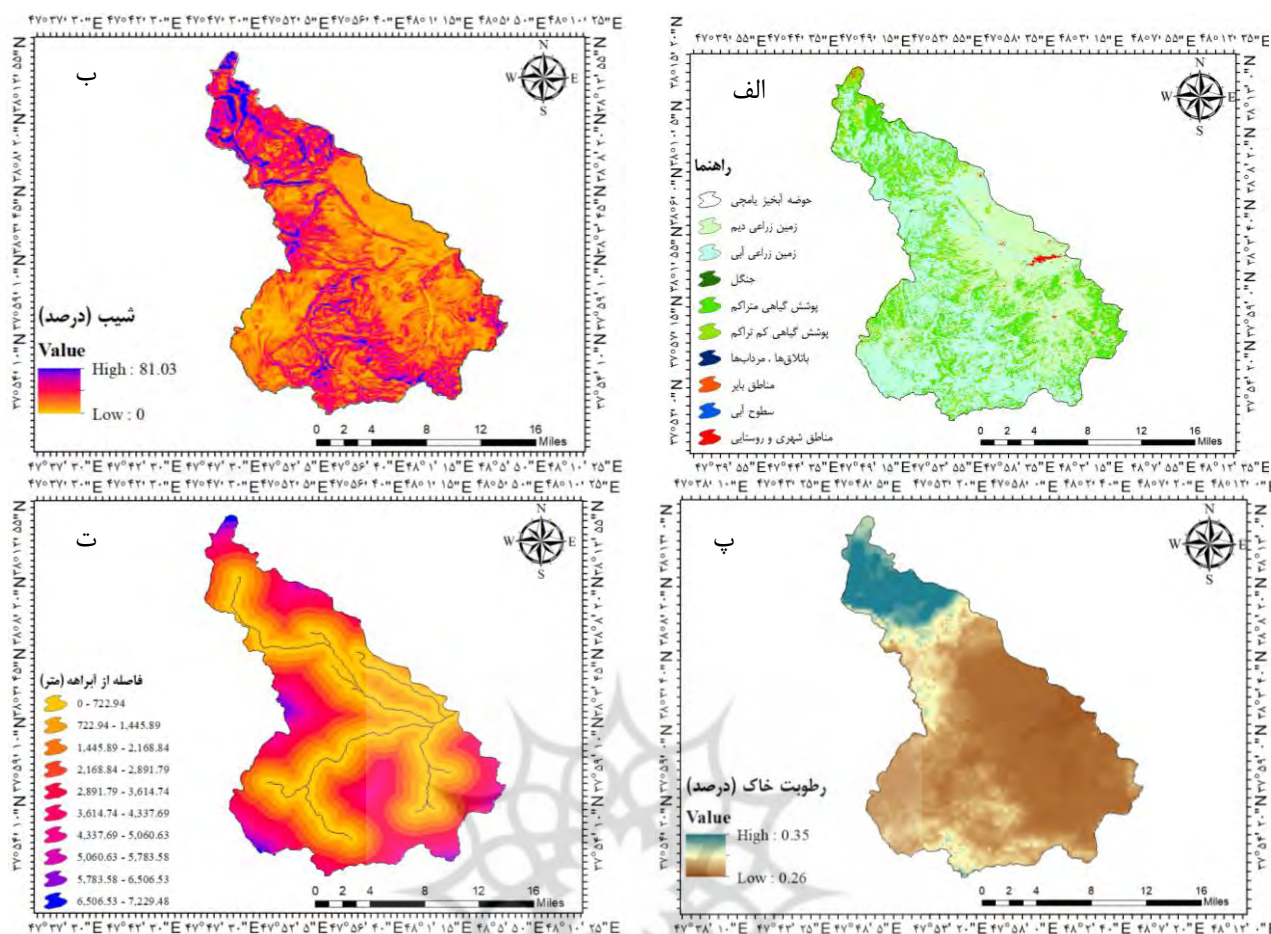
نتایج و بحث

در جدول ۳، نتایج مربوط به صدک ۹۹٪ دبی جریان آب برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ ارائه شده است. بر اساس این جدول، ایستگاه یامچی با مقدار آستانه دبی ۶/۱۰ مترمکعب بر ثانیه، بالاترین حد آستانه را در میان ایستگاه‌ها دارد و تعداد روزهای سیلابی ثبت شده در آن ۲۵ روز است. ایستگاه لای با آستانه دبی ۰/۳۳ مترمکعب بر ثانیه، کمترین مقدار آستانه را داراست و با ثبت ۲۸ روز سیلابی، بیشترین تعداد روزهای سیلابی را در میان ایستگاه‌ها تجربه کرده است. ایستگاه نیر، با مقدار آستانه دبی ۲/۰۹ مترمکعب بر ثانیه، در موقعیت میانی قرار گرفته و تعداد روزهای سیلابی ثبت شده برای آن برابر با ۲۷ روز است.

جدول (۳): نتایج صدک ۹۹٪ برای روزهای سیلابی حوضه آبریز یامچی طی دوره (۲۰۱۴-۲۰۲۱)
Table (3): 99% percentile results for flood days in the Yamchi watershed during the period (2014-2021)

ایستگاه	مقدار آستانه دبی (مترمکعب بر ثانیه)	فراوانی روزها
یامچی	۶/۱۰	۲۵
لای	۰/۳۳	۲۸
نیر	۲/۰۹	۲۷

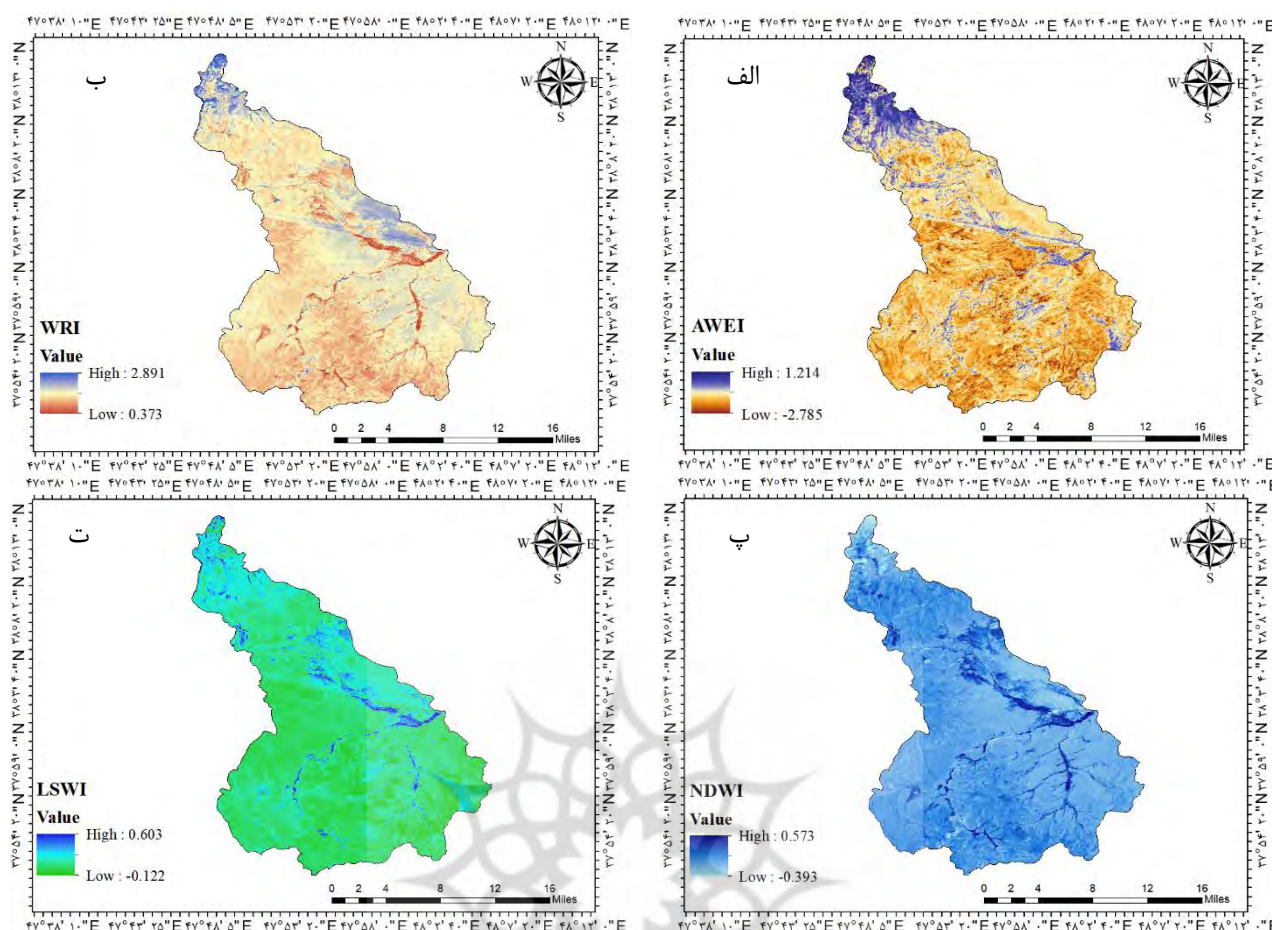
کاربری اراضی نقش کلیدی در بررسی و مدیریت سیل خیزی ایفا می کند، چرا که تغییرات در کاربری مستقیماً رفتار هیدرولوژیکی منطقه را تحت تأثیر قرار می دهد. در شکل (۳، الف)، وضعیت کاربری اراضی حوضه آبریز یامچی به تصویر کشیده شده است. بر اساس این نقشه، ۹ کلاس کاربری با دقت کلی ۸۲ درصد طبقه بندی شده اند. بیشترین مساحت به زمین های زراعی دیم با $۶۶۳/۳۲$ کیلومتر مربع اختصاص دارد، در حالی که کمترین مساحت به کلاس سطوح آبی با $۳۳/۲۹$ متر مربع تعلق دارد. تمرکز مناطق شهری و روستایی در بخش های شرقی حوضه و وجود مناطق بایر در بخش های شمالی، به دلیل نفوذناپذیری خاک، این مناطق را به نقاط مستعد برای رواناب و سیل خیزی تبدیل کرده است. در شکل (۳، ب)، نقشه شیب حوضه آبریز یامچی ارائه شده که تأثیر شیب زمین بر سرعت جریان آب و احتمال سیل خیزی را نشان می دهد. در مناطق شمالی حوضه، شیب به حداکثر ۸۲ درصد می رسد که منجر به افزایش سرعت جریان آب باران و رواناب می شود. این وضعیت در شرایطی مانند بارش های شدید یا ذوب برف، خطر سیل خیزی را تشدید می کند. در مقابل، در بخش های شرقی و جنوب غربی حوضه، شیب منطقه به کمتر از ۵ درصد کاهش یافته است. این شیب ملایم باعث کاهش سرعت جریان آب شده و زمان بیشتری برای نفوذ به خاک فراهم می کند، که در نتیجه احتمال تجمع رواناب و سیل خیزی کاهش می یابد. رطوبت خاک از جمله عوامل کلیدی مؤثر بر پتانسیل سیل خیزی بوده و تحت تأثیر عواملی همچون بارش، دما، تبخیر و تعرق، نوع و عمق خاک، شیب زمین و پوشش گیاهی قرار دارد. بررسی رطوبت خاک می تواند اطلاعات ارزشمندی درباره میزان آب موجود در خاک منطقه ارائه دهد. در شکل (۳، پ)، نقشه میانگین رطوبت خاک تا عمق ۴۰ سانتی متری خاک در حوضه آبریز یامچی طی سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ به نمایش درآمده است. بر اساس این نقشه، بخش های بالادست حوضه دارای بیشترین رطوبت خاک بوده و نسبت حجم آب موجود در خاک به حجم کل خاک در این مناطق به ۳۵ درصد می رسد. در نواحی شرقی، رطوبت خاک به حداقل ۲۶ درصد کاهش یافته است. اختلاف ده درصدی بین حداکثر و حداقل رطوبت خاک در این حوضه به وضوح مشهود است. این تفاوت ها نشان می دهد که در شمال حوضه، به واسطه ارتفاع بالا و وجود اراضی بایر، احتمال وقوع رواناب و سیلاب در صورت بارش های شدید و اشباع خاک بالا است؛ در حالی که بخش های شرقی با رطوبت کمتر و توپوگرافی ملایم، حساسیت کمتری نسبت به سیلاب دارند. در شکل (۳، ت)، وضعیت فاصله از آبراهه در حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که تجمع و اتصال آبراهه های فرعی در بخش شرقی حوضه رخ داده و این منطقه در زمان بارندگی شدید یا ذوب برف، پتانسیل بالایی برای پر شدن سریع از آب دارد. به طور کلی، نواحی واقع در شعاع ۷۰۰ متری از آبراهه ها، بیش از سایر مناطق در معرض تأثیر طغیان رودخانه قرار دارند و در صورت هم زمانی با شیب زیاد، مانند مناطق شمالی حوضه، سرعت بالای جریان می تواند موجب تخریب قابل توجه شود.



شکل (۳): الف) نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز یامچی، ب) نقشه شیب حوضه آبریز یامچی، پ) نقشه میانگین رطوبت خاک حوضه آبریز یامچی طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۱، ت) نقشه فاصله از آبراهه در حوضه آبریز یامچی

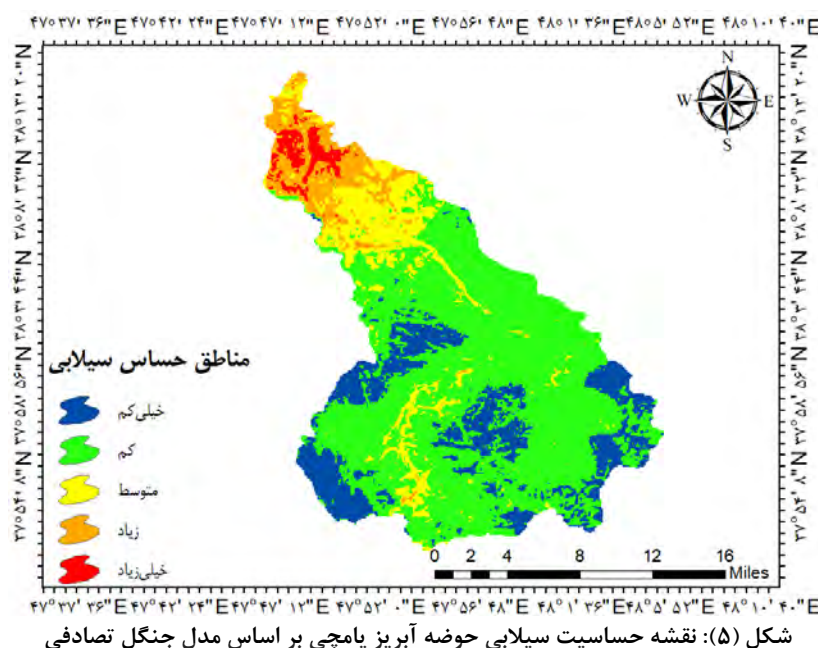
Figure (3): a) Land use map of the Yamchi watershed, b) Slope map of the Yamchi watershed, c) Map of average soil moisture of the Yamchi watershed during the years 2014-2021, d) Map of distance from the waterway in the Yamchi watershed

شناسایی پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های طیفی، می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره نواحی مستعد سیل خیزی فراهم کند، زیرا این شاخص‌ها میزان رطوبت موجود در پوشش گیاهی یا سطح زمین را ارزیابی می‌کنند. یکی از شاخص‌های مهم در این زمینه، AWEI است که وضعیت آن برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ در شکل (۴، الف) برای حوضه آبریز یامچی نمایش داده شده است. بر اساس این شاخص، بیشینه مقدار (۱/۲۱) در نواحی شمالی حوضه مشاهده می‌شود که خاک‌های مرطوب و سطوح آبی را به وضوح از مناطق خشک متمایز می‌کند. در مقابل، با حرکت به سمت نواحی مرکزی و جنوبی حوضه، وسعت سطوح خشک افزایش یافته و مقدار شاخص به کمینه ۲/۷۸- کاهش می‌یابد. شاخص WRI، که وضعیت آن در شکل (۴، ب) ارائه شده، نتایجی مشابه را نشان می‌دهد. بر اساس این شاخص، نواحی شمالی و شرقی حوضه با مقدار ۲/۸۹ دارای سطح بالایی از رطوبت هستند، در حالی که مناطق غربی و جنوبی، به دلیل کاهش پوشش گیاهی و شرایط خشک، دچار کمبود رطوبت‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تمرکز منابع آب در مناطق مرتفع بوده است. شاخص NDWI نیز مطابق شکل (۴، پ) بیانگر حضور آب آزاد یا رطوبت بالا در نواحی شمالی، شرقی و بخش‌هایی از مرکز حوضه است. در این نواحی، بیشینه مقدار شاخص به ۰/۳۹ می‌رسد. با این حال، در برخی از بخش‌های شرقی و جنوبی حوضه، رگه‌هایی از خاک خشک و تنش آبی مشاهده می‌شود. در نهایت شاخص LSWI در شکل (۴، ت) ارائه شده، الگوی مشابهی را نمایان می‌سازد. در این نقشه، مناطق با رطوبت بالا و پوشش گیاهی سالم در شمال و شرق حوضه با مقادیر حدود ۰/۶۰ مشخص شده‌اند، در حالی که نواحی غربی و جنوبی با خشکی و پوشش گیاهی تحت تنش مواجه‌اند. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نواحی شمالی و شرقی حوضه یامچی، به دلیل رطوبت بالای خاک، در صورت وقوع اشباع، دارای پتانسیل بالایی برای بروز سیلاب هستند.



شکل (۴): (الف) نقشه شاخص AWEI، (ب) شاخص WRI، (پ) شاخص NDWI، (ت) شاخص LSWI حوضه آبریز بامچی سالهای ۲۰۱۴-۲۰۲۱
Figure (4): A) Map of AWEI index, B) WRI index, C) NDWI index, D) LSWI index of Yamchi watershed for the years 2014-2021

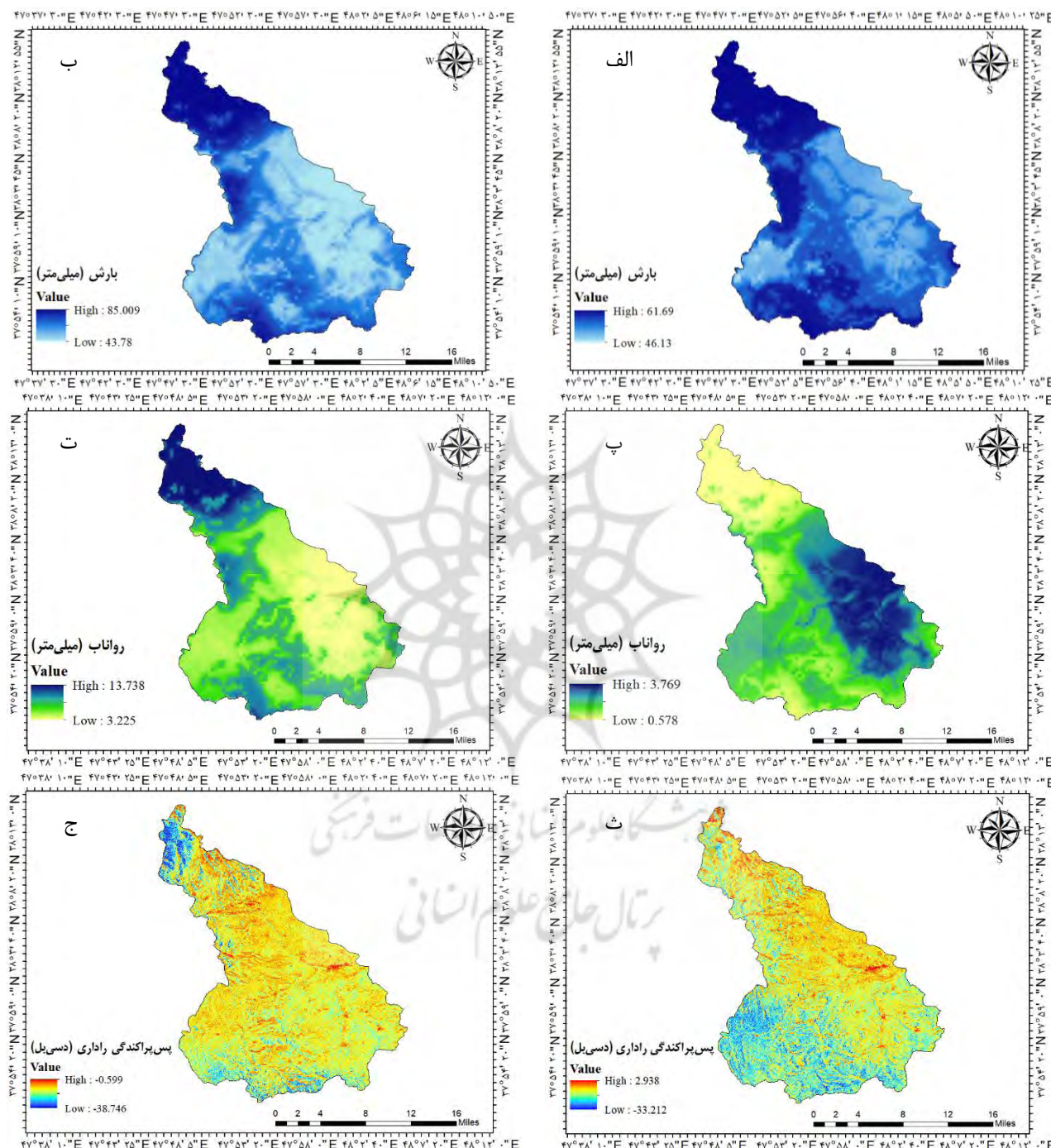
در شکل ۵، پهنه‌بندی مناطق حساس به سیل‌خیزی با بهره‌گیری از مدل جنگل تصادفی رگرسیونی ارائه شده است. در فرایند مدل‌سازی، ۷۰ درصد از داده‌های نمونه به‌منظور آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای ارزیابی عملکرد آن مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد مدل بر اساس شاخص‌های خطای آماری بررسی شد. بر این اساس میانگین مربعات خطا (MSE) برابر با ۰/۰۰۰۲۱۰ و ضریب تعیین R^2 معادل ۰/۹۳۵۳ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی حساسیت به سیل است. در نقشه پهنه‌بندی ارائه‌شده، سطوح خطر سیل‌پذیری منطقه مورد مطالعه در پنج کلاس از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که نواحی شمالی حوضه دارای بیشترین حساسیت نسبت به سیل‌خیزی بوده و عمدتاً در طبقات خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته‌اند. این دو طبقه به‌ترتیب مساحت‌هایی معادل ۱۳/۵۱ و ۳۹/۹۸ کیلومتر مربع از سطح حوضه را پوشش می‌دهند. در مقابل، با حرکت به سمت مناطق جنوبی‌تر حوضه (عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر)، شدت حساسیت به سیلاب کاهش یافته و سطوح خطر در این نواحی از «متوسط» تا «خیلی کم» متغیر است. با توجه به این نتایج، انتظار می‌رود مناطق شمالی حوضه در هنگام بارش‌های شدید و افزایش رواناب، بیشترین پتانسیل سیل‌خیزی را داشته باشند. در ادامه، به‌منظور ارزیابی عینی عملکرد مدل، یکی از رخداد‌های سیلابی واقعی در منطقه مورد مطالعه مورد تحلیل قرار خواهد گرفت تا میزان موفقیت مدل در پیش‌بینی نواحی مستعد سیل‌خیزی به‌صورت عملی مورد سنجش قرار گیرد.



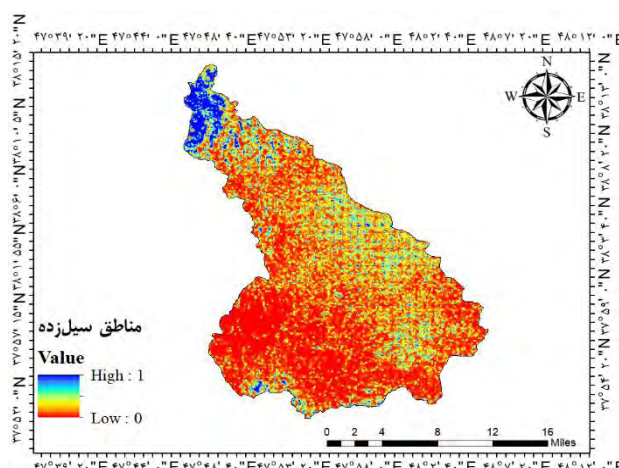
شکل (۵): نقشه حساسیت سیلابی حوضه آبریز یامچی بر اساس مدل جنگل تصادفی
Figure (5): Flood susceptibility map of Yamchi watershed based on the random forest model

داده‌های دبی ثبت شده در ایستگاه‌های یامچی، لای و نیر در ماه آوریل سال ۲۰۱۷، حاکی از افزایش چشمگیر جریان آب در حوضه یامچی بوده‌اند. بیشینه دبی ثبت شده در تاریخ ۱۵ آوریل به ۱۹/۴ مترمکعب بر ثانیه رسیده است که این مقدار، بیانگر وقوع شرایط بحرانی در این روز خاص است وضعیت میانگین بارش یک ماه پیش و یک ماه پس از رخداد سیلاب، در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب به تصویر کشیده شده است. طبق این داده‌ها، میزان تجمع بارش در بخش‌های شمالی حوضه (۶۱/۶۹ میلی‌متر) نسبت به نواحی شرقی (۴۶/۱۳ میلی‌متر) بالاتر بوده و اختلافی نزدیک به ۲۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود. با ورود به ماه آوریل و شدت گرفتن بارش‌ها، این اختلاف به بیش از ۴۰ میلی‌متر افزایش یافته و میانگین بارش در نواحی شمالی به ۸۵ میلی‌متر رسیده است، در حالی که سایر بخش‌ها تغییر محسوسی را تجربه نکرده‌اند. این افزایش بارش، نقش بسزایی در افزایش رواناب سطحی و دبی جریان آب ایفا کرده است. در شکل ۶-پ، نقشه وضعیت رواناب سطحی حوضه یامچی در ماه مارس ۲۰۱۷، یعنی یک ماه پیش از سیلاب، نمایش داده شده است. بر اساس این نقشه، بخش شرقی حوضه، با دارا بودن مناطق شهری، روستایی و مراتع کم‌تراکم، بیش‌ترین حجم رواناب را با مقدار ۳/۷۶ میلی‌متر به خود اختصاص داده است. در مقابل، نواحی شمالی در این بازه زمانی کمترین میزان رواناب را تجربه کرده‌اند. وضعیت رواناب در آوریل ۲۰۱۷، در شکل ۶-ت ارائه شده و تغییرات بارز نسبت به ماه قبل را به وضوح نشان می‌دهد. در این دوره، به دلیل افزایش بارش و اشباع خاک در ارتفاعات، شدت جریان رواناب در مناطق بالادست حوضه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و بیشینه آن به ۱۳/۷۹ میلی‌متر رسیده است. با این حال، در سایر نواحی حوضه، تغییر چشمگیری در رواناب مشاهده نمی‌شود. شکل ۶-ث، انرژی بازتاب شده از سطح زمین در ماه مارس را بر اساس داده‌های ماهواره سنتینل-۱ نشان می‌دهد. در این تصویر، نواحی شمالی و شرقی عمدتاً خشک بوده‌اند و پس‌پراکندگی سیگنال‌ها در این مناطق به بیشینه مقدار ۲/۹۳ دسی‌بل رسیده است. در مقابل، وجود آب سطحی در جنوب غرب حوضه موجب جذب و تضعیف سیگنال رادار شده و کمینه پس‌پراکندگی تا مقدار ۳۳/۲۱- دسی‌بل کاهش یافته است. در شکل ۶-ج، نقشه سیلاب مربوط به آوریل ۲۰۱۷ نمایش داده شده است. در این تصویر، نواحی شمالی حوضه به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر سیلاب قرار گرفته‌اند. کاهش چشمگیر پس‌پراکندگی راداری در این مناطق، که به ۳۸/۷۴- دسی‌بل رسیده، موید افزایش رواناب و شدت جریان آب است. در حالی که، در نواحی مرکزی و پایین‌دست، شرایط به سمت پایداری رفته و پس‌پراکندگی به ۰/۵۹- دسی‌بل افزایش یافته که بیانگر کاهش تجمع آب و تثبیت شرایط است. در نهایت، شکل ۶-ح نقشه‌ای باینری از مناطق سیل‌زده را ارائه می‌دهد که با استفاده از آستانه سیلابی و مقایسه تصاویر ماه مارس و آوریل تولید شده است. در این نقشه، نواحی دارای مقدار ۱ به‌عنوان مناطق سیل‌زده در شمال حوضه مشخص شده‌اند. همچنین، سیلاب‌هایی با شدت کمتر در شرق حوضه نیز شناسایی شده‌اند. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد

که نواحی شمالی حوضه، به دلیل ترکیب ارتفاعات زیاد، شیب‌های تند و خاک‌های مرطوب، مستعد سیل‌خیزی در هنگام بارش‌های سنگین هستند. بررسی روزهای فرین در این مطالعه نیز به‌خوبی این موضوع را تأیید می‌کند.



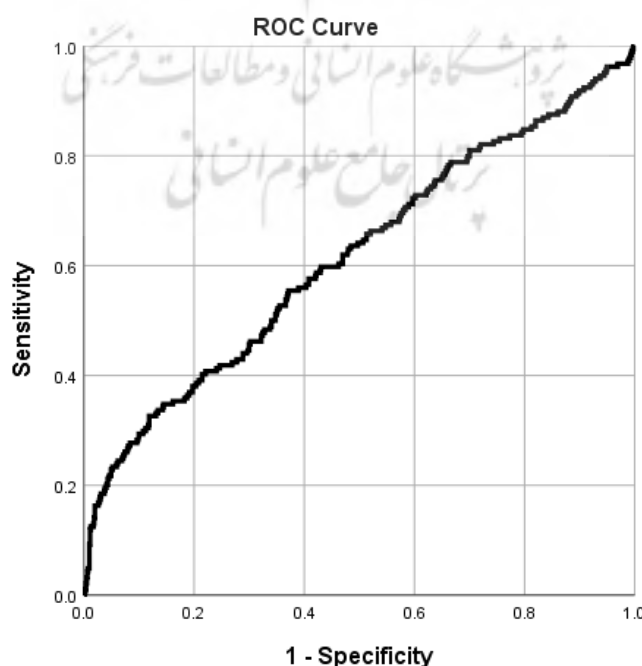
ح



شکل (۶): نقشه الف) میانگین بارش یک ماه قبل از وقوع سیل (مارس ۲۰۱۷)، ب) میانگین بارش یک ماه بعد از وقوع سیل (آوریل ۲۰۱۷)، پ) وضعیت رواناب یک ماه قبل از وقوع سیل (مارس ۲۰۱۷)، ت) رواناب یک ماه بعد از وقوع سیل (آوریل ۲۰۱۷)، ث) وضعیت سیلاب یک ماه قبل از وقوع سیل (مارس ۲۰۱۷)، ج) سیلاب یک ماه بعد از وقوع سیل (آوریل ۲۰۱۷)، ح) مناطق سیل زده در ماه آوریل (۲۰۱۷)، در حوضه آبریز یامچی

Figure (6): Map a) Average rainfall one month before the flood (March 2017), b) Average rainfall one month after the flood (April 2017), c) Runoff status one month before the flood (March 2017), d) Runoff one month after the flood (April 2017), e) Flood status one month before the flood (March 2017), c) Flood one month after the flood (April 2017), h) Flooded areas in April (2017), in the Yamchi watershed

در شکل ۷، منحنی ROC ارائه شده، عملکرد مدل جنگل تصادفی را در فرآیند پهنه‌بندی مناطق حساس به سیل خیزی را در مقایسه با داده‌های واقعی سیلاب مورد ارزیابی قرار داده است. این منحنی میزان تفکیک‌پذیری مدل در تمایز بین مناطق سیلاب زده و غیرسیلابی را نشان می‌دهد و از حساسیت (sensitivity) در مقابل ویژگی (specificity) تشکیل شده است. محور افقی، بیانگر نرخ مثبت‌های کاذب و محور عمودی، نشان‌دهنده نرخ مثبت‌های واقعی است. مقدار AUC (مساحت زیر منحنی ROC) در این مدل برابر با ۰/۶۱۶ محاسبه شده است که نشان می‌دهد مدل جنگل تصادفی عملکردی بهتر از حد تصادفی ($AUC = 0.5$) دارد.



شکل (۷): نمودار منحنی ROC برای مقایسه نتیجه مدل جنگل تصادفی با داده واقعی سیل مورد مطالعه

Figure (7): ROC curve diagram for comparing the result of the random forest model with the actual flood data studied.

نتیجه گیری

تحلیل نواحی مستعد سیل خیزی در حوضه آبریز یامچی نشان داد که ترکیب عوامل توپوگرافی، شرایط رطوبتی خاک، و شاخص‌های طیفی، الگوی مکانی مشخصی از خطر سیل خیزی در این منطقه ایجاد کرده است. بخش شمالی حوضه، با ارتفاع قابل توجه ۴۳۸۳ متر و شیب تند ۸۲ درصد، وجود مناطق بایر و تجمع رواناب، به عنوان مستعدترین منطقه برای سیل خیزی شناسایی شد. در نواحی شرقی نیز به دلیل حضور سکونتگاه‌های انسانی و تراکم بالای آبراهه‌ها، پتانسیل وقوع سیلاب وجود دارد؛ اما به دلیل ارتفاع پایین تر (۱۵۵۳ متر) و شیب ملایم تر (حدود ۵ درصد)، این مناطق تا حدی نقش تعدیل کننده در برابر سیلاب ایفا می کنند. بررسی شاخص‌های طیفی نظیر AWEI و WRI نیز این الگوی مکانی را تأیید کرد؛ به طوری که مقادیر مثبت این شاخص‌ها و رطوبت بالای خاک (تا ۳۵ درصد) در نواحی شمالی، بر پتانسیل بالای تجمع آب و وقوع سیلاب دلالت دارد. در مقابل، نواحی مرکزی و جنوبی حوضه، با رطوبت کمتر خاک (حدود ۲۶ درصد) و مقادیر منفی شاخص‌های طیفی، شرایط خشک تری داشته و احتمال وقوع سیلاب در آن‌ها کمتر است. مدل جنگل تصادفی نیز صحت بر این استدلال داشته و مشخص نمود قسمت شمالی حوضه پتانسیل سیل خیزی خیلی زیادی با ضریب تعیین ۰/۹۳ درصد و خطای MSE پایین ۰/۰۰۲۱۰ داشته در مقابل برای جنوب شرق و جنوب غرب حوضه پتانسیل کمتری را از نظر سیل خیزی منطقه نشان داده است. مقایسه عملکرد مدل با داده‌های واقعی سیلاب آوریل ۲۰۱۷، با مقدار AUC برابر با ۰/۶۱۶، نشان داد که مدل عملکردی قابل قبول دارد. تحلیل بارش و رواناب در بازه‌ی زمانی قبل و بعد از سیلاب آوریل ۲۰۱۷ نشان داد که پیش از وقوع سیلاب، بخش شرقی حوضه با رواناب ۳/۷۶ میلی متر بیشترین تجمع رواناب را داشته است. پس از سیلاب، با افزایش بارش در بخش شمالی حوضه به میزان ۸۰ میلی متر تمرکز رواناب به سمت شمال حوضه منتقل شد و حجم آن به میزان چشمگیر ۱۳/۷۶ میلی متر افزایش یافت. داده‌های راداری نیز تغییرات مهمی در شرایط سطحی حوضه را آشکار کردند. یک ماه پیش از سیلاب، پهنه‌های آبی در جنوب غرب حوضه با بازتاب کمتر و مقدار ۳۳/۲۱- دسی بل شناسایی شدند، در حالی که در مناطق شمال و شرق حوضه، بازتاب بیشتری در مناطق خشک با مقدار ۲/۹۳ دسی بل ثبت شد. پس از وقوع سیلاب، بازتاب پهنه‌های آبی در شمال حوضه به ۳۳/۷۴- دسی بل کاهش یافت، که نشان دهنده افزایش گستره و تجمع آب در این منطقه بود. به طور همزمان، شدت بازتاب در مناطق خشک مرکز و جنوب حوضه نیز کاهش یافت و به مقدار ۰/۵۹- دسی بل رسید، که این تغییرات ناشی از مرطوب شدن خاک و تغییر شرایط سطحی منطقه بود. این یافته‌ها بر اهمیت پایش مداوم با استفاده از شاخص‌های طیفی و داده‌های ماهواره‌ای تأکید دارند. استفاده از ابزارهای سنجش از دور می تواند در شناسایی سریع مناطق مستعد سیل خیزی، ارزیابی تأثیرات سیلاب، و تدوین برنامه‌های مدیریت بحران مؤثر باشد. در همین راستا، پیشنهاد می شود که اقدامات پیشگیرانه نظیر ساخت سازه‌های کنترل سیلاب، تقویت زیرساخت‌ها، و مدیریت مناسب کاربری اراضی در اولویت برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، به ویژه در مناطق شمالی و جنوب غربی حوضه، قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. به عنوان نمونه، فرجی و فاطمی (۱۴۰۱) بر کارایی شاخص WRI در شناسایی پهنه‌های آبی تأکید داشته‌اند. همچنین، جوادی و همکاران (۱۳۹۹) و اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۳) نیز دقت بالای شاخص AWEI در تمایز نواحی مرطوب و آبی را گزارش کرده‌اند. یافته‌های مدل جنگل تصادفی نیز با نتایج فیض الله پور (۱۴۰۳) مبنی بر کارآمدی این مدل در شناسایی مناطق مستعد سیلاب مطابقت دارد.

References

- Abdolazimi, H., Roshun, S. H., Shamsnia, S. A., & Shahinfar, H. (2021). Identification of potential areas to flood inundation in Shiraz city using TOPSIS-GIS. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 159-139. <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.43413.1565>(in persian).
- Adnan, M. S. G., Dewan, A., Zannat, K. E., & Abdullah, A. Y. M. (2019). The use of watershed geomorphic data in flash flood susceptibility zoning: A case study of the Karnaphuli and Sangu river basins of Bangladesh. *Natural Hazards*, 99(2), 425-448. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03749-3>.

- Ahmadzadeh, H., Saeedabadi, R., & Noori, E. (2015). A study and zoning of the areas prone to flooding with an emphasis on urban floods (Case study: City of Maku). *Hydrogeomorphology*, 2(2), 1-24. [https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.1.0\(in persian\)](https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.1.0(in%20persian)).
- Asghari Saraskanroud, S., Khonkham, S., & Abdi, O. (2024). Evaluation of water indicators using Landsat and Sentinel satellite images (Case area: Zaribar Lake). *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 4(12), 115-95. [https://doi.org/10.22034/rsgi.2024.64194.1111\(in persian\)](https://doi.org/10.22034/rsgi.2024.64194.1111(in%20persian)).
- Asghari, S., Jalilyan, R., Pirozineghad, N., Madadi, A., & Yadeghari, M. (2020). Evaluation of water extraction indices using Landsat satellite images (Case study: Gamasiab River of Kermanshah). *Journal of Geographical Studies*, 20(58), 53-70. [https://doi.org/10.29252/jgs.20.58.53\(in persian\)](https://doi.org/10.29252/jgs.20.58.53(in%20persian)).
- Azadtalab, M., Shahabi, H., Shirzadi, A., & Chapi, K. (2020). Flood hazard mapping in Sanandaj using combined models of statistical index and evidential belief function. *Motaleate Shahri*, 9(36), 27-40. [https://doi.org/10.34785/J011.2021.801\(in persian\)](https://doi.org/10.34785/J011.2021.801(in%20persian)).
- Chezgi, J., & Poyan, S. (2024). Determining flood-prone areas using machine learning models in the Shahrestank Watershed Area of Khosf City. *Journal of Water Management and Soil Erosion in Iran*, 17(63), 4. Retrieved from [http://jwmsei.ir/article-1-1127-fa.html\(in persian\)](http://jwmsei.ir/article-1-1127-fa.html(in%20persian)).
- Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case study of HEC-RAS 1D-2D coupling simulation: 2002 Baeksan flood event in Korea. *Water*, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>.
- Faraji, M., & Fatemi, B. (2022). Comparative analysis of remote sensing water indexes for wetland water body monitoring using Landsat images and the Google Earth Engine platform (Case study: Meighan Wetland, Iran). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 10(2), 39-62. [http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-871-fa.html \(in persian\)](http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-871-fa.html%20(in%20persian)).
- Feyzolahpour, M. (2024). Investigating the flood-affected areas of Khuzestan in the period from 7 March 2019 to 24 April 2019 using NDVI, NDBaI, and NDWI indices and analyzing the degradation process of Hourol Azim wetland from 2000 to 2023 using Random Forest Model (RTC). *Geography and Human Relationships*, 6(4), 423-449. [https://doi.org/10.22034/gahr.2023.413223.1931\(in persian\)](https://doi.org/10.22034/gahr.2023.413223.1931(in%20persian)).
- Hemmati, M., Shahnazi, M., Ahmadi, H., & Salarjazi, M. (2017). Flood peak flow simulation and determination of flood source area in the Qaranqu watershed using hydrological Mod-Clark model and GIS. *Irrigation and Water Engineering*, 7(4), 65-80. Retrieved from [https://www.waterjournal.ir/article_74156.html?lang=en\(in persian\)](https://www.waterjournal.ir/article_74156.html?lang=en(in%20persian)).
- Jahangir, M. H., Mousavi Reineh, S. M., & Abolghasemi, M. (2019). Spatial prediction of flood zonation mapping in Kan River Basin, Iran, using artificial neural network algorithm. *Weather and Climate Extremes*, 25, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100215>.
- Jalaliyan, S. I. (2022). Evaluating and zoning flooding on a temporal and spatial scale (Study Area: Gorgan River Watershed in Golestan Province). *Geographical Planning of Space*, 11(42), 143-162. [https://doi.org/10.30488/gps.2020.213834.3157\(in persian\)](https://doi.org/10.30488/gps.2020.213834.3157(in%20persian)).
- Javadi, F., Rezayan, S., & Jozi, S. A. (2020). Evaluating satellite indicators in determining the level of aquatic areas using satellite sensors (Case study: Zaribar Wetland, Kurdistan Province). *Journal of Ecohydrology*, 7(2), 539-550. [https://doi.org/10.22059/ije.2020.295355.1267\(in persian\)](https://doi.org/10.22059/ije.2020.295355.1267(in%20persian)).
- Kieu, Q. L. (2021). Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS integration method: A case study of Lai Chau province, Vietnam. *Geographia Technica*, 16(2), 105-115. https://doi.org/10.21163/gt_2021.162.09.
- Madadi, A., Faal Naziri, M., & Piroozi, E. (2022). Evaluation of land use changes and its effects on soil erosion in the basin upstream of Yamchi Dam in Ardabil, using ARAS multi-criteria decision algorithm and modern remote sensing methods. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(2), 52-70. [https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.315438.1314\(in persian\)](https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.315438.1314(in%20persian)).
- Mirzaee, N., & Sarraf, A. (2022). Application of data fusion models in river flow simulation using signals of large-scale climate, case study: Jiroft Dam Basin. *Watershed Engineering and Management*, 13(4), 672-689. [https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.343547.1816\(in persian\)](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.343547.1816(in%20persian)).

- Mohammad Doust, A., & Shamsnia, S. A. (2023). Identification and zoning of flood-prone areas using AHP - GIS (Case study: Dayyer County, Bushehr Province). *Journal of Geography and Environmental Studies*, 47, 152-167. [https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087845.1402.12.47.9.5\(in persian\)](https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087845.1402.12.47.9.5(in%20persian)).
- Mohammadi, M., Ebrahimnezhadian, H., Asgarkhan Maskan, M., & Vaziri, V. (2022). Evaluation of the one and two-dimensional HEC-RAS models' performance in determining flood zone of rivers. *Journal of Water and Soil Science*, 26(2), 187-201. Retrieved from [http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4149-fa.html\(in persian\)](http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4149-fa.html(in%20persian)).
- Noroozi, A. A., Saneie, M., & Rezghi, Z. (2019). Identification and differentiation of rice fields using semi-automatic in north Iran. *Journal Name*, 4(1), 11-21. <https://sanad.iau.ir/en/Journal/iapb/Article/1095958/FullText> (in persian).
- Pham, B. T., Avand, M., Janizadeh, S., Phong, T. V., Al-Ansari, N., Ho, L. S., Das, S., Le, H. V., Amini, A., Bozchaloei, S. K., Jafari, F., & Prakash, I. (2020). GIS based hybrid computational approaches for flash flood susceptibility assessment. *Water*, 12(3), 683. <https://doi.org/10.3390/w12030683>.
- Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, A., Valizadeh Kamran, K., & Rahimpour, T. (2020). Flood analysis of subbasins using WASPAS model (Case study: Aland Chai Basin, Northwest of Iran). *Hydrogeomorphology*, 7(24), 83-106. <https://doi.org/10.22034/hyd.2020.39815.1534> (in persian).
- ShahiriParsa, A., Heydari, M., Sadeghian, M. S., & Moharrampour, M. (2015). Flood Zoning Simulation by HEC-RAS Model (Case Study: Johor River-Kota Tinggi Region). 1(1): <https://doi.org/10.5281/zenodo.18264>.
- Sims, N. C., & Colloff, M. J. (2012). Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows. *Ecological Indicators*, 18, 387-391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.007>.
- Sinsomboonthong, S. (2022). Performance Comparison of New Adjusted Min-Max with Decimal Scaling and Statistical Column Normalization Methods for Artificial Neural Network Classification. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, Article ID 3584406. <https://doi.org/10.1155/2022/3584406>.
- Swain, K. C., Singha, C., & Nayak, L. (2020). Flood susceptibility mapping through the GIS-AHP technique using the cloud. *MDPI*, 9(12), 720. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120720>.
- Tahmasebi, M. R., Shabanlou, S., Rajabi, A., & Yosefvand, F. (2021). Flood probability zonation using a comparative study of two well-known random forest and support vector machine models in northern Iran. *Water and Irrigation Management*, 11(2), 223-235. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.317527.856> (in persian).
- Talaei, R., & Shadfar, S. (2023). Landslide susceptibility modeling using artificial neural network and logistic regression methods at the Saezchay Basin, south of Ardabil Province. *Watershed Engineering and Management*, 15(3), 481-503. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.360475.1996> (in persian).
- Vishnu, C. L., Sajinkumar, K. S., Oommen, T., Coffman, R. A., Thrivikramji, K. P., Rani, V. R., & Keerthy, S. (2019). Satellite-based assessment of the August 2018 flood in parts of Kerala, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 758-767. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1543212>.
- Yousefzadeh, A., Zeinali, B., Valizadeh Kamran, K., & Asghari Sar Eskinrood, S. (2019). The extraction of flood potential of Simineh River Basin applying satellite images, topographic wetness index and morphological features. *Geography and Environmental Sustainability*, 9(3), 49-61. [https://doi.org/10.22126/ges.2019.4294.2071\(in persian\)](https://doi.org/10.22126/ges.2019.4294.2071(in%20persian)).
- Ziari, K., Rajai, S. A., & Darabkhani, R. (2021). Flood zoning using hierarchical analysis and fuzzy logic in GIS: Case study: Ilam City. *Emergency Management*, 10(1), 21-30. [https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1400.10.1.2.2\(in persian\)](https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1400.10.1.2.2(in%20persian)).