



# پژوهش‌های آبخیزداری

## ۱۵۱

دوره ۳۹، شماره ۲

شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵

- پیش بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) در آبخیز بختگان- مهارلو  
سید نصرالله حسینی، بهارک معتمدوزیری، هادی کیادلیری، حسن احمدی ..... ۱
- کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل اثر آتش‌سوزی بر آبگریزی خاک در آبخیز توشن استان گلستان  
کهزاد حیدری، علی نجفی‌نژاد، علی محمدیان‌بهبهانی، مجید اونق، لویزدلیو دیگر ..... ۲۰
- تغییرپذیری زمانی-مکانی اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آینده آبخیزهای کشور  
سیدحمیدرضا صادقی، علی نصیری‌خیاوی، رضا چمنی، نگین بهنیا، وحید موسوی، حمید نوری، پدیده‌السادات صادقی، محمدحسین شوشتری، عبدالواحد خالدی‌درویشان، مهدی وفاخواه، حمیدرضا مرادی‌رکابدارکلانی ..... ۴۴
- تحلیل مقایسه‌ای سه مدل سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در عرصه‌های پخش سیلاب گربایگان فسا  
علی جعفری، حمید حسینی‌مردی، مجتبی پاک‌پرور، امیر اسلامی ..... ۶۳
- پیش‌بینی و مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة استان گلستان  
عبدالحسین بوعلی، نرگس کریمی‌نژاد، مرتضی اکبری، مریم یعقوبی، محسن فراهی ..... ۸۰
- پیش‌بینی الگوی مکانی استعداد سیلگیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان  
عارف بهمنی، هیراد عبقری، امید رحمتی ..... ۹۶
- پیش‌بینی تاب‌آوری آبخیز دشت مرودشت با استفاده از یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر WoE  
سعید علیزاده، رضا قضاوی، ابراهیم امیدوار ..... ۱۱۶

# نشریه علمی "پژوهش‌های آبخیزداری"

صاحب امتیاز: سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵

درجه علمی پژوهشی این نشریه به استناد نامه شماره ۳/۱۸/۱۹۲۹۱۶ به تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۲ مورد تأیید وزارت علوم، تحقیقات و فناوری قرار گرفته است. همچنین این نشریه دارای پروانه انتشار به شماره ۱۶۱۹۹ مورخ ۱۴۰۰/۰۴/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی می‌باشد.

**مدیر مسئول:** ابوالفتح مرادی، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران  
**سردبیر:** علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

## اعضای هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

امیر حمزه حقی آبی، استاد گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان  
داور خلیلی، استاد بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز  
محمدتقی دستورانی، استاد گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد  
محمد زارع، استاد بخش علوم زمین دانشکده علوم دانشگاه شیراز  
سیدمسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران  
مجید صوفی، دانشیار بازنشسته بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران  
سیدیوسف عرفانی فرد، دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران  
عطا الله کاویان، استاد گروه آبخیزداری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
**مدیر داخلی:** سید مسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران  
**ویراستار و کارشناس اداری:** مریم عنایتی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران  
**کارشناس آماری:** لادن جوکار، مربی بازنشسته مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی شیراز، ایران  
**صفحه آرا:** پارسا حقیقی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

این نشریه در پایگاه‌های استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ISSN ۲۹۸۱-۲۰۳۸ به نشانی <https://isc.gov.ir>، نظام نمایه سازی مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (RICEST) به نشانی <https://ricest.ac.ir> ایران ژورنال [www.sid.ir](http://www.sid.ir) و [www.magiran.com](http://www.magiran.com) نمایه می‌شود.

نشریه در رد ویرایش نوشته‌ها و یا خلاصه کردن آنها آزاد است.

استفاده از تصویرهای نشریه با ارجاع به نشریه آزاد است.

**نشانی:** شیراز بلوار، مدرس خیابان جانبازان نبش استاد مردانی غربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، دفتر نشریه پژوهش‌های آبخیزداری

صندوق پستی: ۶۱۷-۷۱۵۵۵

دورنگار: ۳۷۲۰۶۳۷۶ (۰۷۱)

رایانامه: [wmrj@areeo.ac.ir](mailto:wmrj@areeo.ac.ir)

کدپستی: ۶۳۵۱۱-۷۱۵۵۸

تلفن: ۳۷۲۰۴۹۵۹ (۰۷۱) داخلی -۲۲۴

تارنما: <http://wmrj.areeo.ir>



مرکز تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی و منابع انسانی

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی

شماره ۱۵۱، تابستان

فهرست

پیش بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) در آبخیز بختگان- مهارلو

سید نصرالله حسینی، بهارک معتمدوزیری، هادی کیادلیری، حسن احمدی..... ۱

کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل اثر آتش‌سوزی بر آبگریزی خاک در آبخیز توشن استان گلستان

کهزاد حیدری، علی نجفی‌نژاد، علی محمدیان‌بهبهانی، مجید اونق، لویزدبلیو دیگر..... ۲۰

تغییرپذیری زمانی- مکانی اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آینده آبخیزهای کشور

سیدحمیدرضا صادقی، علی نصیری‌خیایوی، رضا چمنی، نگین بهنیا، وحید موسوی، حمید نوری، پدیده‌السادات صادقی،

محمدحسین شوشتری، عبدالواحد خالدی‌درویشان، مهدی وفاخواه، حمیدرضا مرادی‌رکابدارکلانی..... ۴۴

تحلیل مقایسه‌ای سه مدل سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در عرصه‌های پخش‌سیلاب گربایگان فسا

علی جعفری، حمید حسینی‌مرندی، مجتبی پاک‌پرور، امیر اسلامی..... ۶۳

پیش‌بینی و مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة استان گلستان

عبدالحسین بوعلی، نرگس کریمی‌نژاد، مرتضی اکبری، مریم یعقوبی، محسن فراهی..... ۸۰

پیش‌بینی الگوی مکانی استعداد سیلگیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان

عارف بهمنی، هیراد عبقری، امید رحمتی..... ۹۶

پیش‌بینی تاب‌آوری آبخیز دشت مرودشت با استفاده از یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر WoE

سعید علیزاده، رضا قضاوی، ابراهیم امیدوار..... ۱۱۶

## پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) در آبخیز بختگان- مهارلو

سید نصرالله حسینی<sup>۱</sup>، بهارک معتمدوزیری<sup>۲\*</sup>، هادی کیادلیری<sup>۳</sup>، حسن احمدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲ و ۳- دانشیار گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

تغییر اقلیم به معنای تغییرات بلندمدت و برگشت‌ناپذیر در میانگین شرایط آب و هوایی ناشی از عامل‌های طبیعی و انسانی است. تغییر اقلیم موجب افزایش دمای جهانی، ذوب شدن یخ‌های قطبی، افزایش سطح دریا و بروز رویدادهای شدید اقلیمی می‌شود. اثر زیاد این تغییرات بر متغیرهای هواشناسی مانند دما و بارش سبب اختلال در نظم آب‌ساختی می‌شود. با بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی جو به‌عنوان ابزارهای پیشرفته و جامع برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی می‌توان فرآیندهای پویایی و گرم‌پویایی جوی را شبیه‌سازی کرد. از این‌رو، این پژوهش با هدف پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت مدل‌های گزارش ششم در آبخیز بختگان- مهارلو، انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از داده‌های روزانه بارش و دمای کمینه و بیشینه پنج ایستگاه همدید ارسنجان، نی‌ریز، صفاشهر، شیراز و تخت جمشید استفاده شد. سنجه‌های اقلیمی با استفاده از مدل‌های گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس شد. انتخاب نوع ایستگاه بر اساس کافی بودن داده‌ها، پراکندگی و تنوع اقلیمی در آبخیز بود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 از برون‌داد سه مدل ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 استفاده شد. با استفاده از مدل آماری LARS-WG8، ریزمقیاس‌نمایی و اصلاح داده‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها انجام شد. در پایان، پیش‌بینی اقلیمی برای دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵ محاسبه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: [bm vaziri@iau.ir](mailto:bm vaziri@iau.ir)

استناد: حسینی، س. ن.، معتمدوزیری، ب.، کیادلیری، ه.، احمدی، ح. ۱۴۰۵. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) در آبخیز بختگان- مهارلو. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۹(۲):۱۹-۱.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370599.1634

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱ تا ۱۹.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



سپس، داده‌های روزانه بارش و دما ایستگاه‌های همدید آبخیز بختگان- مهارلو پردازش و با دوره پایه مقایسه شدند.

### نتایج و بحث

نتایج مدل ACCESS-ESM1-5 نشان‌دهنده تفاوت میانگین بارش دوره پایه و آینده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود و بیشترین بارش پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دو مدل دیگر مربوط به مدل ACCESS-ESM1 بود و اندازه برآورد مدل‌های MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 به اندازه‌های دوره پایه نزدیک‌تر بود. روند دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده در تمام ایستگاه‌ها و سناریوها در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای افزایشی و در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود. میانگین سالانه دمای بیشینه از ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد به ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. بیشترین دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده مربوط به مدل CNRM-CM6-1 بود. بیشترین دما مربوط به شیراز و تخت جمشید بود. روند دمای کمینه در همه ایستگاه‌ها افزایشی بود. میانگین دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه سانتی‌گراد به ۱۱/۵ درجه (در سناریوی SSP585) افزایش یافت و این یافته نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است. بیشترین دمای کمینه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دیگر مدل‌ها مربوط به مدل CNRM-CM6-1 بود. دامنه تغییرات پیش‌بینی‌شده بارش آبخیز از ۲۴۸/۹ تا ۲۸۸/۷ میلی‌متر و دامنه تغییرات پیش‌بینی‌شده دمای بیشینه و کمینه نیز به ترتیب از ۲۶ تا ۲۶/۹ و ۱۱ تا ۱۱/۹ درجه سانتی‌گراد بود.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش، روند افزایشی بارش و دما (بیشینه و کمینه) با سناریوهای شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای هم‌سو بود که بیانگر گرم‌تر و نسبتاً مرطوب‌تر شدن منطقه بختگان- مهارلو در آینده است. تفاوت میان مدل‌ها نشان‌دهنده نبودن قطعیت در پیش‌بینی‌هاست که ضرورت استفاده از چند مدل و سناریو برای کاهش خطر تصمیم‌گیری است. این تغییرات نیازمند برنامه‌ریزی و سازگاری دقیق برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و سلامت عمومی در منطقه است. بر پایه نتایج این پژوهش در آبخیز بختگان- مهارلو، پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش مصرف آب و افزایش تاب‌آوری اقلیم، الگوی کشت به سوی محصولات کم‌آب‌بر تغییر یابد. افزون بر این، بهره‌گیری از آبیاری هوشمند و اجرای طرح‌های آبخیزداری و آبخوان‌داری نیز پیشنهاد می‌شود. برای بهبود پایداری منابع زیرزمینی، مدیریت مشارکتی منابع، آموزش بهره‌برداران و پایش چاه‌های غیرمجاز پیشنهاد می‌شود. همچنین، برای سازگاری مؤثر با تغییرات اقلیمی، تنوع‌بخشی به معیشت روستایی با توسعه مشاغل سبز و پایدار، پیشنهاد می‌شود.

### واژگان کلیدی

آبخیز بختگان- مهارلو، سناریوهای SSP، مدل LARS-WG، مدل‌های گزارش ششم

### مقدمه

دریاها است. افزون بر این، شدت رویدادهای آب و هوایی مانند موج گرما، طوفان‌ها، خشک‌سالی‌ها و سیل‌ها تکرارپذیرتر و بیشتر شده است (ژای و همکاران ۲۰۲۵). از آنجایی که نخستین اثرات تغییر اقلیم روی متغیرهای هواشناسی بارندگی و دما است و تغییر در این متغیرها سبب برهم زدن نظم بسیاری از رخداد‌های آب‌شناسی می‌شود، بررسی دقیق تغییرات این سنج‌ها برای آینده و روش‌های شبیه‌سازی آن‌ها موضوع مهمی به‌شمار می‌آید (سنویراتنه و همکاران

تغییر اقلیم به معنای تغییرات بلندمدت و برگشت‌ناپذیر در میانگین شرایط آب و هوایی یک منطقه است و شامل تغییرات دما، بارندگی، رطوبت و دیگر عامل‌های جوی است. این تغییرات ممکن است ناشی از عامل‌های طبیعی یا فعالیت‌های انسانی باشند و معمولاً در بازه زمانی چند دهه یا بیشتر رخ می‌دهند (کوندزوچ و همکاران ۲۰۱۸). مشاهده‌ها بیانگر افزایش دمای جهانی زمین و اقیانوس‌ها، ذوب شدن یخ‌های قطبی و یخچال‌های طبیعی، افزایش سطح

پیوسته افزایشی پیش‌بینی شد. با این حال، تفاوت اندازه تغییرات پیش‌بینی شده در GCMها و SSPها متفاوت بود. در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۹۰ بیشترین تغییرات میانگین دمای بیشینه در سطح استان به ترتیب ۲/۶۴ و ۴/۷۲ درجه سانتی‌گراد افزایش در فصل بهار و بیشترین تغییرات میانگین دمای کمینه، به ترتیب ۲/۹۷ و ۴/۳۸ درجه سانتی‌گراد افزایش در فصل پاییز محاسبه شد. نتایج بیانگر پیچیدگی تغییرات آینده بارش و نبودن قطعیت بیشتر در مقایسه با دما بود. بیشترین تغییرات افزایش حجم بارش در سطح استان در سال ۲۰۹۰ در سناریوهای SSP45 و SSP85 در ایستگاه رامسر برابر با ۴۰/۵ و ۵۱/۱۹٪ گزارش شد. فولکرن و همکاران (۲۰۱۸) برای بررسی اثرات بالقوه تغییرات آب و هوایی در آب‌خیز Huai Luang در شمال‌شرقی تایلند از دو مدل SEACAM و CanESM2 همراه با شش سناریوی اقلیمی بهره بردند. نتایج این پژوهش برای ۳۰ سال آینده نشان‌دهنده افزایش اندازه بارش به ترتیب ۲۰/۸۵ و ۱۸/۳۵٪ در مدل‌های SEACAM و CanESM2 بود. در پژوهشی، جهانگیر و همکاران (۲۰۲۲) سنجه‌های اقلیمی استان فارس را با استفاده از مدل‌های پنجم گزارش و سناریوهای RCP ریزمقیاس‌نمایی کردند. در این پژوهش نتایج تمام ایستگاه‌ها نشان‌دهنده تغییرات افزایشی دمای بیشینه و کمینه در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بود. افزون بر این، دوره‌های بازگشت بارش احتمالی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نیز افزایشی بود که نشان‌دهنده افزایش شدت بارش‌ها در چند دهه آینده است. چنگ و همکاران (۲۰۰۸) متغیرهای هواشناسی گوناگونی را در بخش‌های مرکزی-جنوبی کانادا، با استفاده از روش‌های ریزمقیاس سازی آماری سناریوهای اقلیمی روزانه و ساعتی سه مدل گردش عمومی، شبیه‌سازی کردند و دریافتند که عملکرد روش‌های آماری در تولید متغیرهای هواشناسی در مقیاس ایستگاهی مطلوب است. وانگ و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات رواناب را شبیه‌سازی کردند. سپس، با بهره‌گیری از تغییرات اقلیمی، داده‌های CMIP6 و

(۲۰۱۲). با بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی جو به‌عنوان ابزارهای پیشرفته برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی می‌توان فرآیندهای پویایی و گرم‌پویایی جوی را در شبکه‌های سه‌بعدی با استفاده از معادلات پایه حرکت در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف مدل‌سازی کرد (عساکره ۲۰۰۲). مدل‌های گردش عمومی جو به‌عنوان ابتدایی‌ترین و جامع‌ترین مدل‌های اقلیمی شناخته شده‌اند و در طرح‌هایی مانند CMIP6 برای ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند SSPها) به کار می‌روند (افشاری‌نیا و همکاران ۲۰۲۳). در این راستا، پژوهش‌های پرشماری در زمینه تغییرات اقلیمی در داخل و خارج کشور با استفاده از برونداد مدل‌های مختلف انجام شده است. زند و همکاران (۲۰۲۳) با تحلیل روند رخداد‌های حدی اقلیمی در غرب و جنوب‌غرب ایران دریافتند که در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸، روند شاخص‌های گرم مانند شب‌های گرم، روزهای گرم، تعداد روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای در بیشتر ایستگاه‌ها افزایشی بود. از سوی دیگر، روند شاخص‌های سرد مانند روزها و شب‌های سرد و تعداد روزهای یخبندان کاهش‌ی بود که بیانگر حاکمیت گرمایش اقلیمی در این بازه زمانی است. در ایران، رضایی و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر قابلیت روش LSBC در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در منطقه مطالعه شده بود. بر اساس این نتایج از میان الگوهای گوناگون CMIP6 بررسی شده، بهترین عملکرد در زمینه شبیه‌سازی بارش و دما در کشور به ترتیب مربوط به مدل‌های MPI-ESM1-2- و LR و MRI-ESM2-0 بود. در پژوهشی، آقاجانلو و فتحی‌المالو (۲۰۲۴) خشک‌سالی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آبی تحت مدل CMIP6 در استان مازندران را به شکل منطقه‌ای تحلیل کردند. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل تغییرات اقلیمی در آینده با هر پنج GCM دما در منطقه مطالعه شده به‌طور

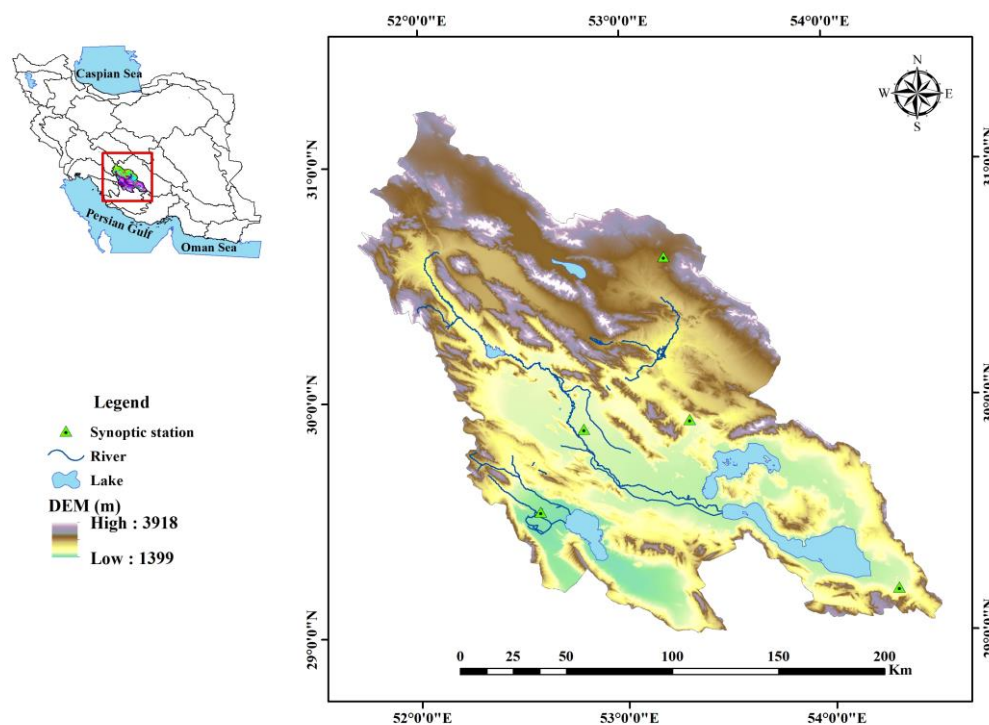
ریزان منابع آب فراهم آورد. از آنجایی که لزوم آشکارسازی و ارزیابی اثرات گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر سنجه دما، بارش و رخداد پدیده‌های حدی اقلیمی، به خاطر تنوع اقلیمی در هر منطقه‌ای ضروری است؛ خشک‌سالی و تغییرات اقلیمی از پدیده‌های اقلیمی ویران‌گر است که در آبخیز بختگان-مه‌ارلو به دلیل شرایط راهبردی منطقه و وجود دریاچه‌های مه‌ارلو و بختگان اهمیت بیشتری دارند. از این رو، در این پژوهش با استفاده از مدل آماری LARS-WG8، فرآیند ریزمقیاس‌نمایی روی داده‌های مدل بزرگ‌مقیاس جوی، تحت سناریوهای SSP، انجام شد و عملکرد مدل‌های تغییر اقلیم در پیش‌بینی بارش و دمای کمینه و بیشینه در آبخیز بختگان-مه‌ارلو بررسی شد.

#### مواد و روش‌ها

##### معرفی منطقه مطالعه‌شده

آبخیز مه‌ارلو-بختگان در فلات مرکزی ایران و استان فارس است و مساحت آن بیش از ۳۱ هزار کیلومتر مربع است. این آبخیز شامل چندین دریاچه و رود مهم چون طشک، بختگان، مه‌ارلو، کر و سیوند است. آبخیز مه‌ارلو-بختگان در مجاورت آبخیزهای هنديجان، مند، سیرجان و کارون بزرگ است. این منطقه میان عرض‌های شمالی ۲۹/۰۱ تا ۳۱/۲۴ درجه و طول شرقی ۵۱/۰۷ تا ۵۴/۵۱ درجه است. مساحت بلندی‌های این آبخیز بیش از ۱۷۴۵۸ کیلومتر مربع (معادل ۵۵/۴۵٪) و مساحت دشت‌های آن معادل ۱۴۰۲۸ کیلومتر مربع (معادل ۴۴/۵۵٪) است. موقعیت آبخیز بختگان-مه‌ارلو و ایستگاه‌های همدید منتخب در شکل ۱ ارائه شده است. در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آبخیز بختگان-مه‌ارلو از آمار و اطلاعات دما و بارش روزانه پنج ایستگاه همدید استفاده شد.

مدل SWAT این شبیه‌سازی را ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای شبیه‌سازی رواناب سطحی تاریخی و آینده در آبخیز رود یانگ‌تسه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این مدل‌ها بود. نتایج پیش‌بینی‌شده در این پژوهش نیز مانند بیشتر مدل‌ها، مؤید افزایش رواناب سالانه و تغییرات فصلی بیشتر تحت سناریوهای انتشار SSP بود که این یافته با پیامدهایی برای مدیریت خطر سیل و خشک‌سالی در آینده همراه خواهد بود. در پژوهشی، غفور و همکاران (۲۰۲۴) مدل‌های گردش عمومی جو و اثرات تغییرات اقلیمی بر آب‌شناسی در آبخیز رود گویاس (اکوادور) تحلیل کردند. در این پژوهش از مدل اقلیمی منطقه‌ای CanRCM4 برای پیش‌بینی تغییرات رواناب سطحی برای آبخیزهای رودهای اصلی کانادا تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش رواناب زمستانی بود و اندازه‌های بیشینه بهاری زودتر رخ داد که دلیل آن به‌ویژه در آبخیزهای شمالی، ناشی از افزایش دما و الگوهای بارش تغییر یافته بود. در ایران نیز پژوهش‌هایی برای بررسی اثر تغییرات اقلیمی روی آبخیزهای ایران و مؤلفه‌های درجه حرارت و بارش در این مناطق در دوره‌های اخیر و آتی بر اساس مدل‌های ارزیابی گزارش چهارم و پنجم انجام شده است؛ که در این گزارش‌ها قدرت تفکیک-پذیری کمتر است و از سناریوهای انتشار قدیمی‌تر در مقایسه با گزارش ارزیابی ششم استفاده می‌شود. از این رو، به نظر می‌رسد که انجام پژوهش‌های تغییر اقلیم در آبخیزهای ایران با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی با وضوح زیاد و به‌ویژه با استفاده از مدل‌های گزارش ششم و تحت سناریوهای انتشار SSP ضروری است. زیرا، با بهره‌گیری از مدل‌های نامبرده می‌توان درکی بهتر از این مناطق در دوره‌های زمانی آتی در مقایسه با مدل‌های پیشین هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (گزارش چهارم و پنجم) برای مدیران و برنامه-



شکل ۱- موقعیت آبخیز بختگان-مهارلو و ایستگاه‌های همدید منتخب.

Figure 1- Location of the Bakhtegan-Maharlu watershed and selected synoptic stations.

ریزمقیاس شد. به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی سنجه‌های اقلیمی در آبخیز بختگان-مهارلو ۵ ایستگاه همدید بر اساس کافی بودن داده‌ها، پراکندگی و تنوع اقلیمی در آبخیز، انتخاب شدند. موقعیت جغرافیایی پنج ایستگاه همدید آبخیز بختگان-مهارلو در جدول (۱) ارائه شده است.

در این پژوهش از آمار و اطلاعات روزانه از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۴ مربوط به پنج ایستگاه همدید ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز و تخت جمشید استفاده شد. از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز برای بررسی توزیع داده‌ها استفاده شد. سپس، اندازه‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه بر پایه جدیدترین گزارش IPCC

جدول ۱- مشخصات پنج ایستگاه همدید منتخب آبخیز بختگان-مهارلو.

Table 1- Characteristics of five selected synoptic stations in the Bakhtegan-Maharlu Watershed.

Station Name	Longitude (degrees)	Latitude (degrees)	Elevation above sea level (m)	Year of establishment
Arsanjan	53.33	29.9	1676	2006
Takhtejamshid	52.89	29.92	1605	2002
Shiraz	52.60	29.56	1488	1951
Safashhar	53.16	30.59	2251	2006
Neyriz	54.39	29.19	1632	2000

متفاوتی درباره آینده اقتصادی و اجتماعی ارائه می‌دهند. عامل دوم، تفاوت‌های ساختاری و سنجه مدل‌های گردش عمومی جو است که باعث تفاوت در پیش‌بینی دما و بارش می‌شود. عامل سوم نوسانات طبیعی سامانه اقلیم و محدودیت‌های داده‌های ورودی

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی

مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار SSP

نبودن قطعیت در مدل‌های گزارش ششم ناشی از چند عامل اصلی است. عامل اول تفاوت در سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSPها) که فرضیات

تولید داده‌های آب‌وهوایی<sup>۳</sup>

داده‌های آب و هوایی مصنوعی با استفاده از پرونده‌های به‌دست‌آمده از داده‌های آب و هوایی دوره دیدبانی شده تولید می‌شوند؛ که خصوصیات آماری آنها مشابه با دوره دیده‌بانی است.

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی مدل از آماره‌های آزمون ضریب تعیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ ) میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> (RMSE) استفاده شد. این آماره‌ها با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شدند (حسن و همکاران، ۲۰۱۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \quad (2)$$

$R^2$ : ضریب تعیین بدون بعد و بیانگر رابطه خطی میان داده‌های بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس است.  $Q_o$ : اندازه‌های مشاهده‌ای،  $Q_s$ : اندازه‌های محاسبه‌شده به‌وسیله مدل،  $\bar{Q}_o$ : اندازه میانگین داده‌های مشاهده‌ای،  $N$ : تعداد نمونه‌ها است.

هر چه اندازه  $R^2$  به عدد ۱ و اندازه RMSE به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است.

پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های مشاهده‌ای، داده‌های اقلیمی با سه مدل ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 و تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل LARS-WG

و روش‌های ریزمقیاس‌سازی که دقت نتایج را در مقیاس‌های محلی کاهش می‌دهد. برای کاهش این نبودن قطعیت‌ها، معمولاً از چند مدل و سناریو همراه با تحلیل‌های آماری بهره‌گیری می‌شود. از این‌رو، در این پژوهش از سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 و سه مدل CMIP6 استفاده شد. مشخصات مدل‌های CMIP6 استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های CMIP6 استفاده‌شده در پژوهش.

Table 2- Specifications of CMIP6 models used in the research.

Model	Developer Country	Spatial Accuracy (degrees)
ACCESS-ESM1-5	Australia	1.25*1.875
CNRM-CM6-1	France	1.4*1.4
MRI-ESM2-0	Japan	1.12*1.12

ریزمقیاس‌نمایی

در این پژوهش از مدل آماری LARS-WG استفاده شد. در انگلیس اولین بار یک مؤسسه تحقیقات کشاورزی با عنوان LARS این مدل را تدوین کرد. در نسخه اولیه این مدل برای هر ایستگاه بایستی به‌طور مجزا اجرا می‌شد اما در نسخه‌های جدیدتر آن توانستند پهنه‌بندی کل منطقه یا کشور مطالعه‌شده را نیز انجام دهند. در این مدل فرایند تولید داده‌های مصنوعی آب و هوایی در سه مرحله به شرح زیر انجام می‌شود.

واسنجی کردن مدل<sup>۱</sup>

در این مرحله داده‌های آب و هوایی دیدبانی‌شده برای تعیین خصوصیات آماری‌شان تحلیل می‌شوند.

صحت‌سنجی مدل<sup>۲</sup>

در این مرحله خصوصیات آماری داده‌های دیده‌بانی و مصنوعی تولیدشده به‌وسیله مدل برای تعیین اینکه آیا تفاوت‌های آماری قابل‌توجهی میان این دو گروه داده‌ها وجود دارد یا خیر تجزیه و تحلیل می‌شود (سمنوف ۲۰۰۳).

3- Generator

4- Coefficient of Determination

5- Root Mean of Square Error

1- SITE ANALYSIS

2- Q test

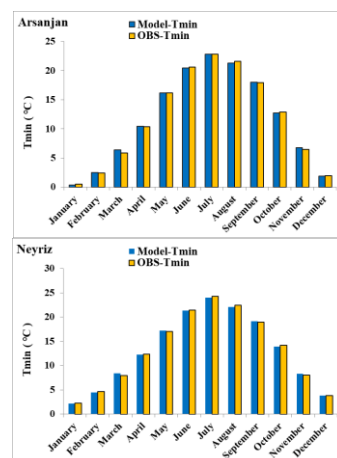
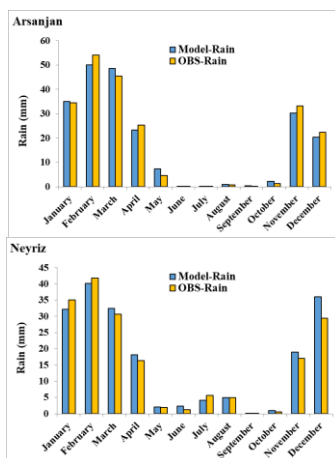
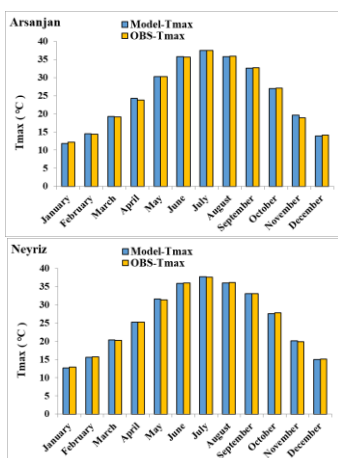
واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۳ نشان‌داده شده است. به‌منظور ارزیابی مدل از اندازه‌های RMSE و  $R^2$  (معیارهای آزمون خطا) استفاده شد. نتایج بیانگر آن بود که دقت مدل در پیش‌بینی دمای کمینه، بیشینه بیشتر از بارش است که معمولاً دلیل آن ماهیت پیچیده‌تر بارش در مقایسه با دما است. مقایسه اندازه‌های پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌ای برای پنج ایستگاه ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز و تخت جمشید برای سنج‌های دمای کمینه، بیشینه و بارش در شکل ۲ ارائه شده است.

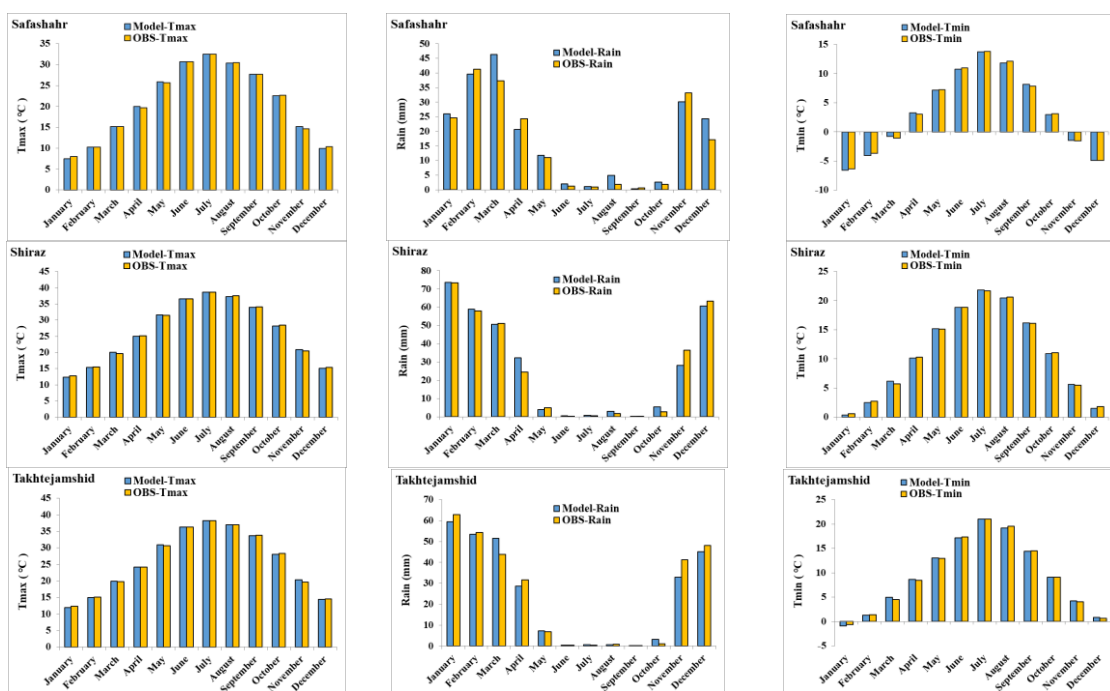
نخست به‌منظور بررسی توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده توزیع بهنجار داده‌های بارش، دمای کمینه و بیشینه در هر پنج ایستگاه هم‌دید در سطح اطمینان ۹۵٪ بود. در این پژوهش اعتبارسنجی مدل LARS-WG بر اساس مقایسه میان داده‌های آماری مشاهده‌ای و داده‌های پیش‌بینی‌شده انجام شد. ابتدا داده‌ها به دو دسته واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم شدند. سپس، ۷۰٪ داده‌ها در مرحله واسنجی (۲۰۱۸-۲۰۰۶) و ۳۰٪ در مرحله صحت‌سنجی (۲۰۲۴-۲۰۱۹) استفاده شدند. نتایج ارزیابی مدل Lars WG در مرحله

جدول ۳- ارزیابی مدل Lars WG در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی.

Table 3- Evaluation of the Lars WG model in the calibration and validation phase.

Station	Verification		Calibrated		
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	
Rain	Arsanjan	0.71	5.01	0.72	4.98
	Neyriz	0.62	6.32	0.64	6.33
	Safashahr	0.66	3.87	0.69	3.74
	Shiraz	0.78	3.21	0.73	3.28
	Takhtejamshid	0.67	3.99	0.65	4.01
Tmax	Arsanjan	0.90	0.25	0.91	0.24
	Neyriz	0.87	0.33	0.86	0.35
	Safashahr	0.94	0.27	0.92	0.29
	Shiraz	0.98	0.19	0.97	0.21
	Takhtejamshid	0.89	0.29	0.86	0.33
Tmin	Arsanjan	0.92	0.28	0.93	0.25
	Neyriz	0.89	0.41	0.91	0.34
	Safashahr	0.94	0.32	0.93	0.32
	Shiraz	0.95	0.23	0.97	0.21
	Takhtejamshid	0.91	0.29	0.88	0.35

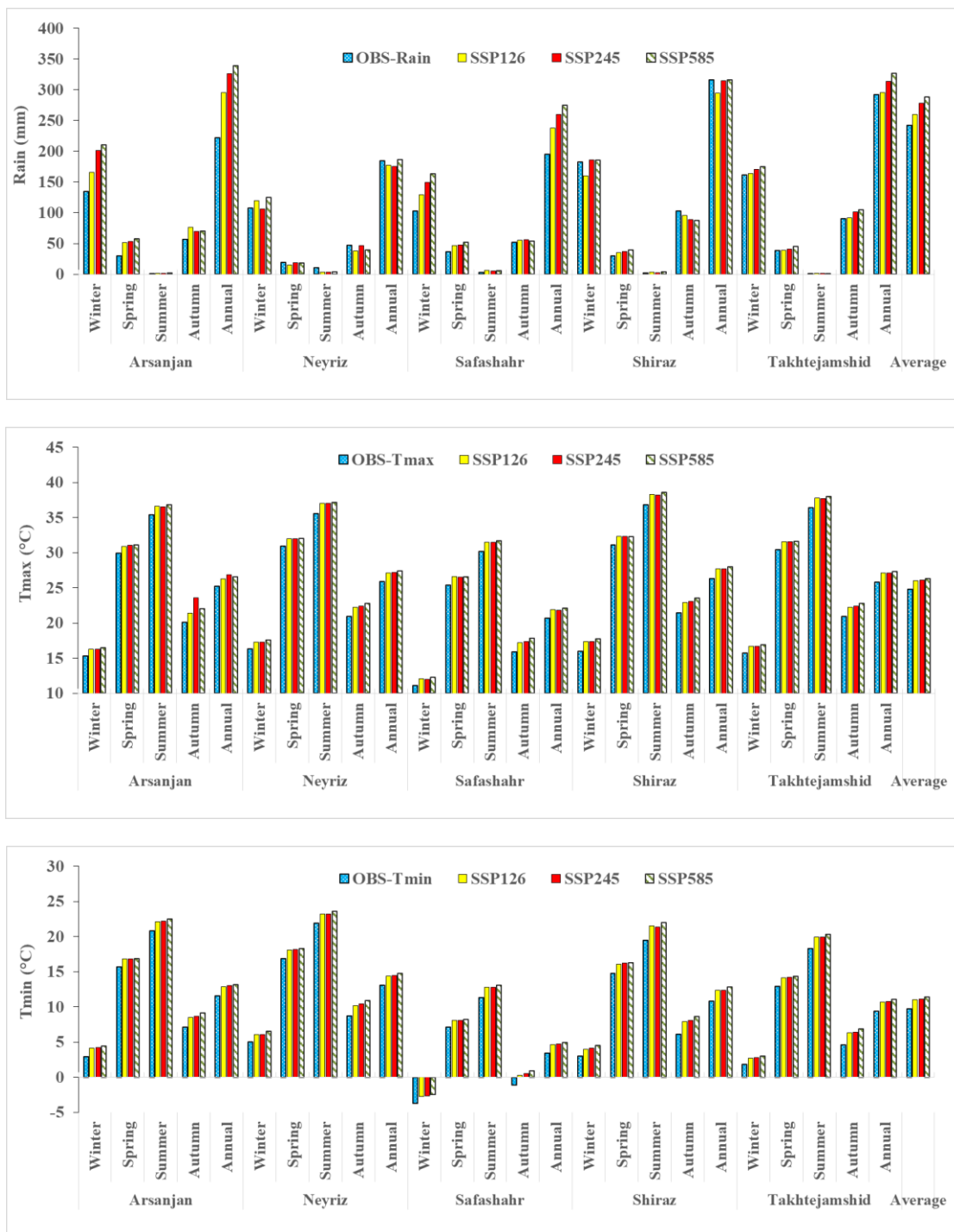




شکل ۲- مقایسه اندازه‌های پیش‌بینی شده مدل Lars WG و مشاهدات پنج ایستگاه همدید آبخیز بختگان-مهارلو.  
 Figure 2 - Comparison of Lars WG model Predicted values and observational values of five synoptic stations in the Bakhtegan-Maharloo Watershed.

۲۴۲ میلی‌متر مشاهده شده به ۲۶۰ تا ۲۸۸ میلی‌متر پیش‌بینی شده در سطح ۹۵٪ معنادار بود. میانگین سالانه دمای بیشینه نیز از ۲۵ درجه مشاهده شده به ۲۶ تا ۲۷ درجه پیش‌بینی شده افزایش یافت. میانگین سالانه دمای کمینه از ۹/۷ درجه مشاهده شده به ۱۱ تا ۱۱/۵ درجه افزایش یافت. بیشترین افزایش بارش و دما مربوط به ایستگاه ارسنجان و تخت‌جمشید بود. تغییرات در ایستگاه نی‌ریز کم و در برخی شرایط در این ایستگاه بارش کاهش یافت. تغییرات بارش و دما باعث تغییر در وضعیت آبی و بوم‌شناختی منطقه خواهد شد که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق مدیریت منابع آب است. افزایش دماهای کمینه سبب کاهش سرمای شب و تغییرات رشد گیاهان می‌شود. از این رو، تحلیل فصلی و سالانه خروجی مدل ACCESS-ESM1-5 نشان داد روند تغییرات منطقه مطالعه شده گرم‌تر شدن تدریجی و تغییرات بارشی است که باید برای سازگاری با تغییرات اقلیمی اقدامات مدیریتی مناسب انجام شود.

تحلیل تغییرات اقلیم آبخیز بختگان-مهارلو با مدل ACCESS-ESM1-5 تحلیل خروجی پیش‌بینی دوره آینده نزدیک (۲۰۴۵-۲۰۲۶) مدل ACCESS-ESM1-5 در مقایسه با دوره پایه به‌طور فصلی و سالانه در شکل ۳ ارائه شده است. در اکثر ایستگاه‌ها، اندازه داده‌های بارش پیش‌بینی شده در هر سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای بیشتر بود، به‌ویژه در فصل زمستان که بیشترین اندازه بارش در تمام ایستگاه‌ها ثبت شد. به‌طور کلی، روند دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها و فصل‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای افزایشی بود. افزایش دما در تابستان و بهار قابل مشاهده بود و بیشترین اندازه‌های پیش‌بینی شده دما مربوط به سناریوی SSP585 بود. دمای فصل تابستان در همه ایستگاه‌ها بیشتر از دیگر فصل‌ها بود که با روند گرمایش جهانی مطابقت دارد. در تمام ایستگاه‌ها، روند دمای کمینه نیز افزایشی بود که بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها است. افزایش این دما بیشتر در تابستان و بهار مشاهده شد. افزایش میانگین سالانه بارش آبخیز از

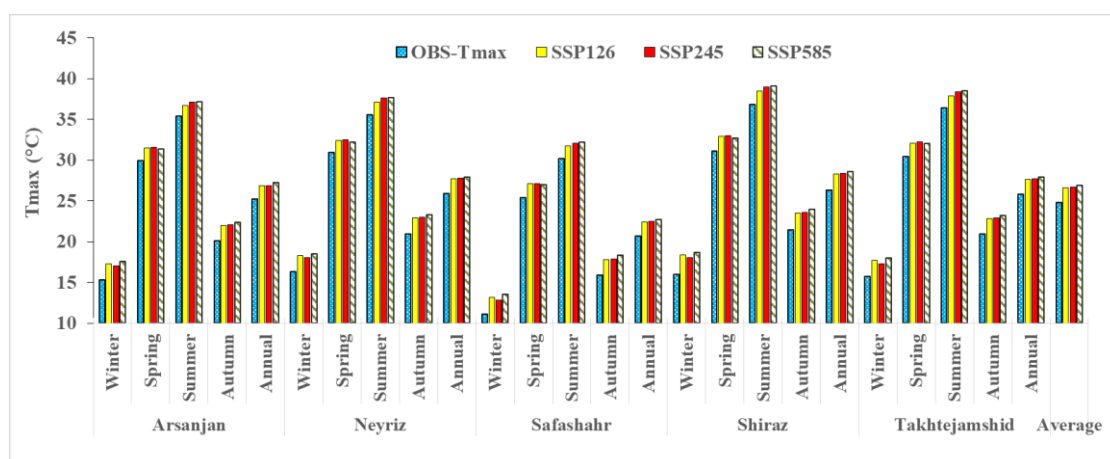
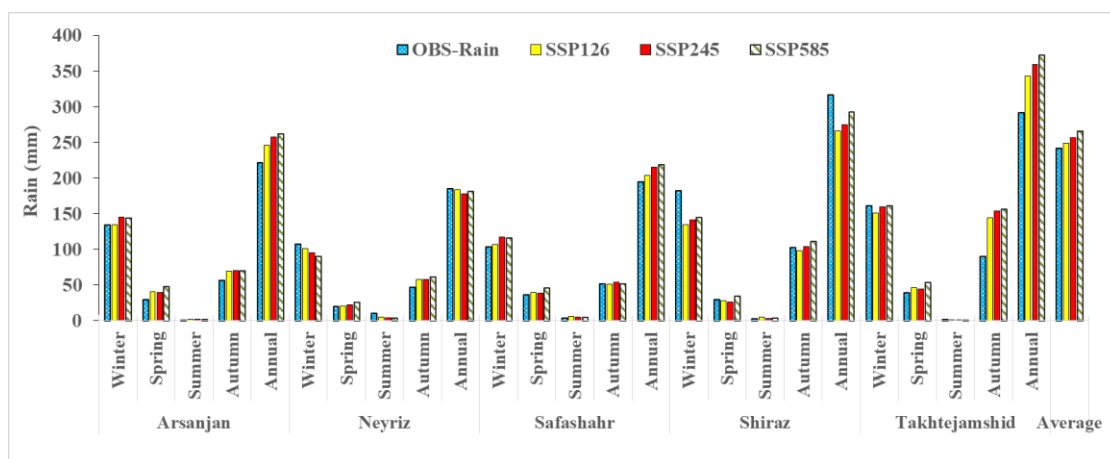


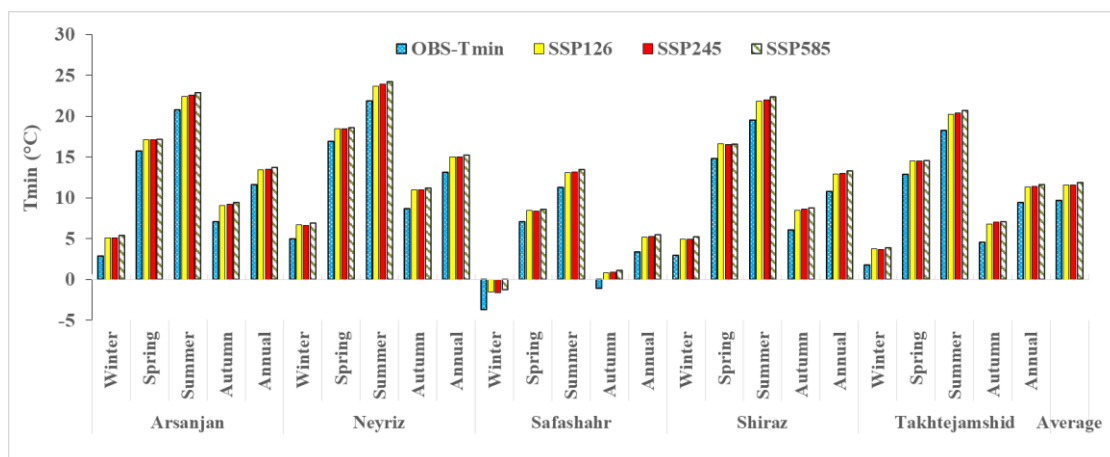
شکل ۳- تغییرات سنجه های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در مدل ACCESS-ESM1-5.

Figure 3- Changes in climate parameters for the near future period (2026-2045) compared to the base period in the ACCESS-ESM1-5 model.

بیشینه ایستگاه‌ها در تمام سناریوها افزایش یافت (در ارسنجان از ۲۵/۲ به ۲۷/۲ درجه سانتی‌گراد). افزایش تدریجی دما در بهار و زمستان نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده گرم‌تر شدن سالانه است. دمای کمینه در ارسنجان از ۱۱/۶ به ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. روند دمای کمینه در تابستان و بهار نیز افزایشی بود. در ایستگاه تخت‌جمشید نرخ شدت تغییرات به‌ویژه در بارش و دمای کمینه بیشتر بود. تغییرات بارش در نی‌ریز در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها کمتر بود. اما، دماهای آن به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت.

تحلیل تغییرات اقلیم آبخیز بختگان-مهارلو تحت مدل CNRM-CM6-1 تحلیل خروجی پیش‌بینی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) مدل CNRM-CM6-1 در مقایسه با دوره پایه به‌طور فصلی و سالانه در شکل ۴ ارائه شده است. تغییرات سالانه بارش در ایستگاه ارسنجان و تخت‌جمشید به‌طور تدریجی افزایشی بود و بیشترین بارش‌ها مربوط به سناریوی SSP585 بود (ارسنجان از ۲۲۲/۰۲ به ۲۶۲/۵۴ میلی‌متر و تخت‌جمشید از ۲۹۱/۷۰ به ۳۷۲/۵۸ میلی‌متر). اما در نی‌ریز، تغییرات سالانه بارش نسبتاً کاهشی بود که نشان‌دهنده تغییرات متفاوت منطقه‌ای است (از ۱۸۴/۹۱ به ۱۸۱/۵۴ میلی‌متر). به‌طور کلی دمای



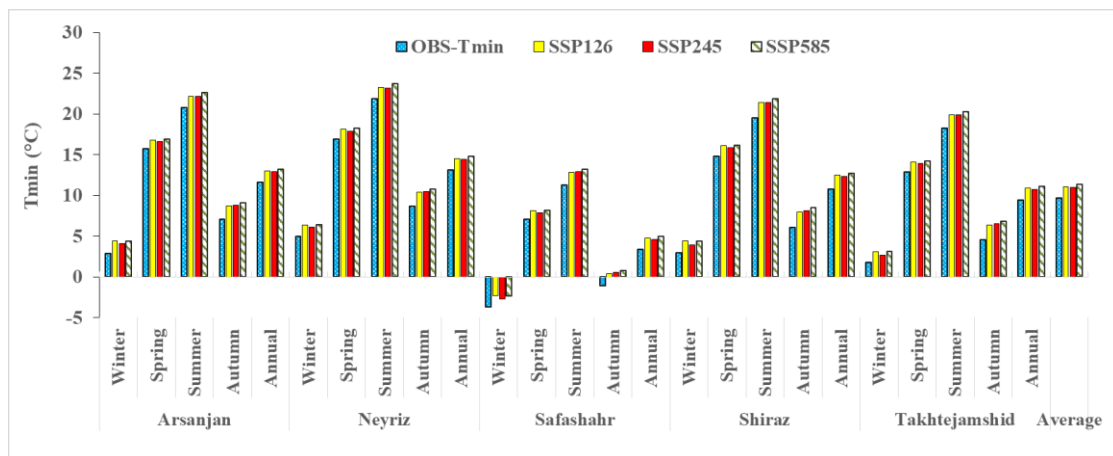
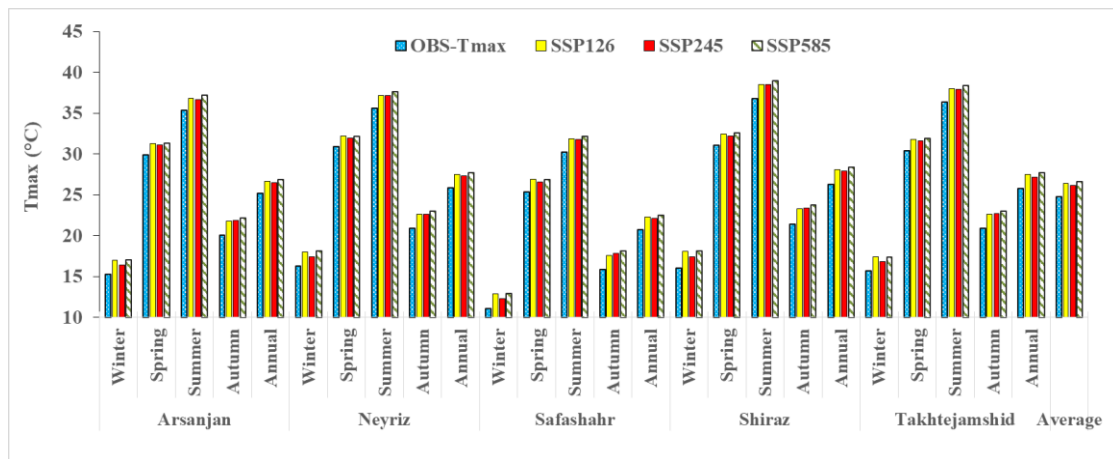
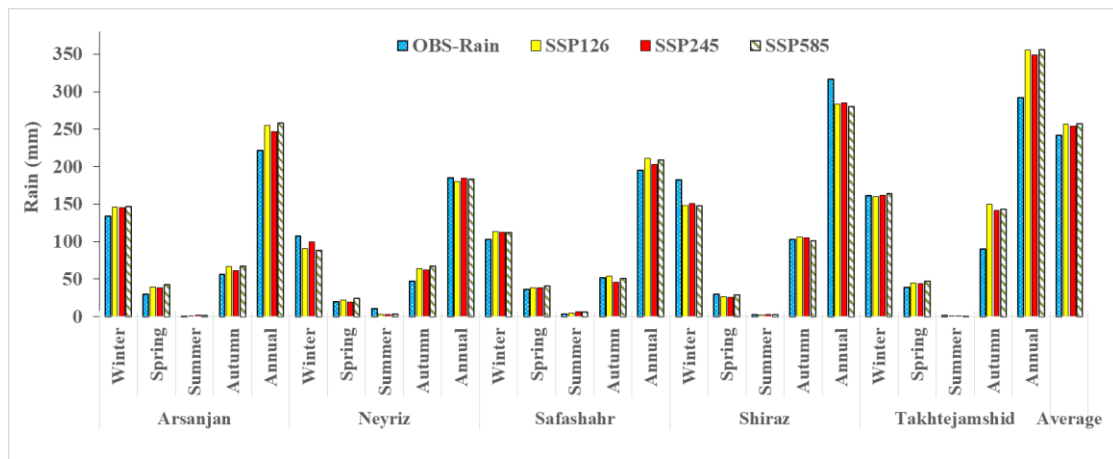


شکل ۴- تغییرات سنجه‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در مدل CNRM-CM6-1.

Figure 4- Changes in climate parameters for the near future period (2026-2045) compared to the base period in the CNRM-CM6-1 model.

دما ۲۸/۳ درجه سانتی‌گراد بود. افزایش دما در سناریوی بدبینانه SSP585 در مقایسه با SSP126 آهسته و تدریجی بود. این یافته نشان‌دهنده روند گرم شدن هوا با افزایش شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای است. روند دمای کمینه افزایشی بود که نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است. مثلاً، میانگین سالانه دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه مشاهده‌ای به ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد در سناریوی SSP585 افزایش یافت. این روند در ایستگاه‌هایی مانند نیریز و ارسنجان برجسته‌تر بود.

تحلیل تغییرات اقلیم آبخیز بختگان-مهارلو تحت مدل MRI-ESM2-0 نتایج اندازه‌های پیش‌بینی شده بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه در پنج ایستگاه (ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز، تخت‌جمشید) با سه سناریوی تغییر اقلیم SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به مدل MRI-ESM2-0 همراه با داده‌های مشاهده‌ای در شکل ۵ ارائه شده است. افزایش دمای بیشینه در تمام ایستگاه‌ها و سناریوها در مقایسه با دوره مشاهده‌ای در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود. بیشترین تغییرات دما مربوط به ایستگاه‌های شیراز و تخت‌جمشید بود. در سناریوی SSP585 برای شیراز



شکل ۵- تغییرات سنج‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در مدل

MRI-ESM2-0.

Figure 5- Changes in climate parameters for the near future period (2026-2045) compared to the base period in the MRI-ESM2-0 model.

## برآیند پیش‌بینی آبخیز بختگان-مهارلو در شرایط تغییر اقلیم

تغییرات سالانه سنجه‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در آبخیز بختگان-مهارلو در جدول ۷ نشان داده شده است. میانگین بارش آبخیز در سناریوی SSP126 برابر با ۲۵۵/۲ میلی‌متر بود، در SSP245 به ۲۶۲/۹ میلی‌متر و در SSP585 به ۲۷۰/۶ میلی‌متر افزایش یافت که این افزایش در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نبود. مدل ACCESS-ESM1-5 در بیشتر سناریوها بارش بیشتری در مقایسه با دو مدل دیگر پیش‌بینی کرد. مدل MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 اندازه‌های کمتر و نزدیک به هم پیش‌بینی کردند. این تفاوت نشان‌دهنده ناسازگاری و نبودن قطعیت در خروجی مدل‌های مختلف است. به‌طور کلی میانگین بارش مشاهده‌شده آبخیز ۲۴۲ میلی‌متر بود و تمام پیش‌بینی‌های مدل‌ها در هر سه سناریو بارش بیشتر از اندازه مشاهده‌شده بود. اما، فقط بر پایه مدل ACCESS-ESM1-5 و سناریوی SSP585 روند بارش دوره پایه و مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود. دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده برای تمام ایستگاه‌ها در هر سه سناریو در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای فعلی (OBS-Tmax) افزایش یافت. این روند افزایشی نشان‌دهنده گرمایش منطقه‌ای در طول دوره پیش‌بینی‌شده است. شدت افزایش به‌تدریج با رفتن از سناریوی خوش‌بینانه (SSP126) به سناریوی بدبینانه‌تر (SSP585) افزایش یافت. تفاوت دمای بیشینه میان SSP126 و SSP245 در اغلب ایستگاه‌ها اندک بود. اما در سناریوی SSP585 افزایش دما ملایم‌تر از سناریوی SSP245 بود. میانگین سالانه دمای بیشینه در کل آبخیز از ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد در داده‌های مشاهده‌ای به ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد در داده‌های پیش‌بینی‌شده افزایش یافت. مدل CNRM-CM6-1 به‌طور معمول بیشترین دمای بیشینه را در میان سه مدل پیش‌بینی کرد که دلیل آن می‌تواند تأثیر سنجه‌های مختلف فیزیکی و پویایی مدل باشد.

دماهای پیش‌بینی‌شده مدل‌های ACCESS-ESM1-5 و MRI-ESM2-0 نزدیک به هم و کمی کمتر از مدل CNRM-CM6-1 بود. بیشترین دمای بیشینه مربوط به ایستگاه‌های شیراز و تخت‌جمشید بود که با شرایط اقلیمی گرم‌تر این مناطق همخوانی دارد. افزایش دمای بیشینه می‌تواند سبب افزایش تبخیر، تغییر در نیاز آبی کشاورزی و افزایش احتمال پدیده‌های امواج گرمایی شود. این موضوع مؤید ضرورت برنامه‌ریزی دقیق برای سازگاری با تغییرات اقلیمی در مناطق مطالعه‌شده است. بر پایه داده‌های پیش‌بینی‌شده سناریوهای شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای در این پنج ایستگاه برای دهه‌های آینده می‌توان نتیجه گرفت که با گرمایش چشم‌گیر دمای روزانه مواجه خواهیم بود. این موضوع بر مدیریت منابع آب، کشاورزی و سلامت عمومی اثرگذار است. روندی دمای کمینه در پنج ایستگاه (ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز و تخت‌جمشید) بر پایه داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده هر سه مدل اقلیمی ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار افزایشی بود. میانگین سالانه دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه سانتی‌گراد در داده‌های مشاهده‌ای فعلی به ۱۱/۲ درجه در سناریوی SSP126 و تا ۱۱/۵ درجه در سناریوی SSP585 افزایش یافت. این افزایش به‌ویژه در ایستگاه نیریز (از ۱۳/۱ به ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد) و ارسنجان (از ۱۱/۶ به ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. روند افزایش دمای کمینه بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است که می‌تواند بر محیط‌زیست، کشاورزی، نیاز آبی گیاهان و بوم‌سازگان منطقه اثرگذار باشد. شایان ذکر است در ایستگاه صفاشهر نیز که کمترین دمای کمینه را داشت نیز افزایش‌هایی مشاهده شد، هرچند که اندازه‌های اولیه و افزایشی آن کمتر از دیگر ایستگاه‌ها بود. مدل CNRM-CM6-1 دمای کمینه بیشتری در مقایسه با دو مدل دیگر پیش‌بینی کرد. اما، می‌توان با میانگین سه مدل برآوردی متعادل‌تر و قابل‌اطمینان‌تر

ارائه داد. نتایج افزایش دمای کمینه در این پژوهش با یافته‌های پژوهش‌های اقلیمی منطقه جنوب و جنوب‌شرق ایران همسو است. این یافته‌ها نشان‌دهنده روند گرم شدن تدریجی هوا و افزایش میانگین دما به‌ویژه در شب‌ها است. این روند افزایشی دمای کمینه ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش گازهای گلخانه‌ای است که در سناریوهای بدبینانه (SSP585) به‌طور واضح‌تری مشاهده شد. این یافته مؤید ضرورت برنامه‌ریزی مناسب برای مدیریت منابع آب و سازگاری با شرایط اقلیمی جدید در منطقه است. اندازه‌های ضخیم‌شده نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین دوره پایه با اندازه‌های پیش‌بینی‌شده در سطح احتمال ۹۵٪ است (جدول ۴). روند تغییرات سنجه‌های اقلیمی در آبخیز نشان داد فقط در مدل ACCESS-ESM1-5 با سناریوی SSP585 تفاوت برآورد سنجه بارش در

دوره پایه و پیش‌بینی‌شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود و در دیگر مدل و سناریوها این تفاوت در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نبود. اما تفاوت داده‌های مشاهده‌ای دمای کمینه و بیشینه با داده‌های پیش‌بینی‌شده (آینده نزدیک) در تمام مدل‌ها و سناریوها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود. نتایج پژوهش‌های فلاح کلاکی و همکاران (۲۰۲۱)، حقیقی و همکاران (۲۰۲۵)، جهانگیر و همکاران (۲۰۲۲) نیز مؤید افزایش دمای منطقه مطالعه‌شده است. تفاوت میان مدل‌ها نشان‌دهنده نبودن قطعیت در پیش‌بینی‌هاست که مؤید ضرورت استفاده از چند مدل و سناریو برای کاهش خطر تصمیم‌گیری است. این تغییرات نیازمند برنامه‌ریزی و سازگاری دقیق برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و سلامت عمومی در منطقه است.

جدول ۴- برآیند تغییرات سنجه‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در آبخیز بختگان-مهارلو.

Table 4- Result of changes in climatic parameters in the near future period (2026-2045) compared to the base period in the Bakhtegan-Maharloo watershed.

	Model	Arsanjan	Neyriz	Safashahr	Shiraz	Takhtejamshid	Average		
Rain (mm)	SSP126	ACCESS-ESM1-5	<b>295.7</b>	177	237.9	294.6	295.2	260.1	
		CNRM-CM6-1	246.6	184.2	203.5	<b>266.5</b>	343.5	248.9	
		MRI-ESM2-0	254.6	179.7	210.7	283.3	<b>355.5</b>	256.8	
		Average	265.6	180.3	217.4	281.5	331.4	255.2	
		SSP245	ACCESS-ESM1-5	<b>326.2</b>	175.2	<b>260.3</b>	314.7	313.7	278.0
		CNRM-CM6-1	257.9	178.3	215.2	275.1	<b>359.2</b>	257.1	
		MRI-ESM2-0	246.5	184.5	202.4	285.2	348.9	253.5	
		Average	<b>276.8</b>	179.4	225.9	291.7	340.6	262.9	
		SSP585	ACCESS-ESM1-5	<b>339.3</b>	186.2	<b>275.3</b>	315.9	326.7	<b>288.7</b>
		CNRM-CM6-1	262.5	181.5	219.1	293.0	<b>372.6</b>	265.7	
		MRI-ESM2-0	258.4	183.6	208.8	280.2	<b>355.4</b>	257.3	
		Average	<b>286.7</b>	183.8	234.4	296.3	<b>351.6</b>	270.6	
	OBS-Rain	222	184.9	195.1	316.5	291.7	242		
Tmax (°C)	SSP126	ACCESS-ESM1-5	<b>26.3</b>	<b>27.1</b>	<b>21.9</b>	<b>27.8</b>	<b>27.1</b>	<b>26.0</b>	
		CNRM-CM6-1	<b>26.9</b>	<b>27.7</b>	<b>22.4</b>	<b>28.3</b>	<b>27.6</b>	<b>26.6</b>	
		MRI-ESM2-0	<b>26.7</b>	<b>27.5</b>	<b>22.3</b>	<b>28.1</b>	<b>27.5</b>	<b>26.4</b>	
		Average	<b>26.6</b>	<b>27.5</b>	<b>22.2</b>	<b>28.1</b>	<b>27.4</b>	<b>26.3</b>	
		SSP245	ACCESS-ESM1-5	<b>26.9</b>	<b>27.2</b>	<b>21.9</b>	<b>27.7</b>	<b>27.1</b>	<b>26.1</b>
		CNRM-CM6-1	<b>27.0</b>	<b>27.8</b>	<b>22.5</b>	<b>28.4</b>	<b>27.7</b>	<b>26.7</b>	
		MRI-ESM2-0	<b>26.5</b>	<b>27.3</b>	<b>22.1</b>	<b>27.9</b>	<b>27.2</b>	<b>26.2</b>	
		Average	<b>26.8</b>	<b>27.4</b>	<b>22.1</b>	<b>28.0</b>	<b>27.3</b>	<b>26.3</b>	
		SSP585	ACCESS-ESM1-5	<b>26.6</b>	<b>27.4</b>	<b>22.1</b>	<b>28.0</b>	<b>27.3</b>	<b>26.3</b>
		CNRM-CM6-1	<b>27.2</b>	<b>27.9</b>	<b>22.7</b>	<b>28.6</b>	<b>27.9</b>	<b>26.9</b>	
		MRI-ESM2-0	<b>26.9</b>	<b>27.7</b>	<b>22.5</b>	<b>28.4</b>	<b>27.7</b>	<b>26.6</b>	
		Average	<b>26.9</b>	<b>27.7</b>	<b>22.5</b>	<b>28.3</b>	<b>27.6</b>	<b>26.6</b>	
	OBS-Tmax	25.2	25.9	20.7	26.3	25.8	24.8		
Tmin (°C)	SSP126	ACCESS-ESM1-5	<b>12.9</b>	<b>14.4</b>	<b>4.6</b>	<b>12.4</b>	<b>10.7</b>	<b>11.0</b>	
		CNRM-CM6-1	<b>13.4</b>	<b>15.0</b>	<b>5.2</b>	<b>13.0</b>	<b>11.3</b>	<b>11.6</b>	
		MRI-ESM2-0	<b>13.0</b>	<b>14.5</b>	<b>4.8</b>	<b>12.5</b>	<b>10.9</b>	<b>11.1</b>	

Model	Arsanjan	Neyriz	Safashahr	Shiraz	Takhtejamshid	Average
Average	<b>13.1</b>	<b>14.6</b>	<b>4.9</b>	<b>12.6</b>	<b>11</b>	<b>11.2</b>
SSP245						
ACCESS-ESM1-5	<b>13.0</b>	<b>14.5</b>	<b>4.7</b>	<b>12.4</b>	<b>10.8</b>	<b>11.1</b>
CNRM-CM6-1	<b>13.5</b>	<b>15.0</b>	<b>5.3</b>	<b>13.0</b>	<b>11.4</b>	<b>11.6</b>
MRI-ESM2-0	<b>12.9</b>	<b>14.4</b>	<b>4.6</b>	<b>12.3</b>	<b>10.7</b>	<b>11.0</b>
Average	<b>13.1</b>	<b>14.6</b>	<b>4.9</b>	<b>12.6</b>	<b>11.0</b>	<b>11.2</b>
SSP585						
ACCESS-ESM1-5	<b>13.2</b>	<b>14.8</b>	<b>4.9</b>	<b>12.8</b>	<b>11.1</b>	<b>11.4</b>
CNRM-CM6-1	<b>13.7</b>	<b>15.2</b>	<b>5.5</b>	<b>13.3</b>	<b>11.6</b>	<b>11.9</b>
MRI-ESM2-0	<b>13.2</b>	<b>14.8</b>	<b>5.0</b>	<b>12.7</b>	<b>11.1</b>	<b>11.4</b>
Average	<b>13.4</b>	<b>14.9</b>	<b>5.1</b>	<b>12.9</b>	<b>11.3</b>	<b>11.5</b>
OBS-Tmin	11.6	13.1	3.4	10.8	9.4	9.7

\*اعداد پررنگ نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان میانگین دوره پایه و اندازه‌های پیش‌بینی‌شده در سطح احتمال ۹۵٪ است.

\*Bold values represent a significant difference between the baseline mean and the predicted values at the 95% confidence level.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ارزیابی تغییرات اقلیمی در دهه‌های آینده، به‌ویژه با هدف برنامه‌ریزی مدیریتی مناسب برای سازگاری و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی، امری ضروری و مهم است. افزایش دما و تغییر الگوهای بارش اثرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، تنوع زیستی و سلامت عمومی دارند. از این‌رو، برای پیش‌بینی آینده نیازمند استفاده از مدل‌های اقلیمی پیشرفته و دقیق هستیم. در این پژوهش با استفاده از مدل آماری LARS-WG8، امکان ریزمقیاس کردن و اصلاح داده‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها فراهم شد. این شیوه در پژوهش‌های پرشماری برای تحلیل تغییرات اقلیمی آینده در مناطق مختلف از جمله آبخیز بختگان-مه‌ارلو به‌کارگرفته شده است. در این پژوهش با پردازش داده‌های روزانه بارش و دما از ایستگاه‌های هم‌دید منطقه و مقایسه آن‌ها با دوره پایه، امکان تحلیل روند تغییرات و پیش‌بینی برای بازه زمانی ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵ فراهم شد. برآیند تغییرات سنج‌های اقلیمی در آبخیز نشان داد فقط در مدل ACCESS-ESM1-5 با سناریوی SSP585 تفاوت برآورد سنج‌های بارش در دوره پایه و پیش‌بینی‌شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود و در دیگر مدل و سناریوها این تفاوت در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نبود. اما تفاوت داده‌های مشاهده‌ای دمای کمینه و بیشینه با داده‌های پیش‌بینی‌شده (آینده نزدیک) در تمام مدل‌ها و سناریوها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود. اندازه‌های دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده در تمام

ایستگاه‌ها و سناریوها در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای بیشتر بود و با افزایش شدت سناریوها این افزایش نیز بیشتر شد. میانگین سالانه دمای بیشینه آبخیز از ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد به ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. مدل CNRM-CM6-1 بیشترین دمای بیشینه را پیش‌بینی کرد. بیشترین دماها مربوط به ایستگاه شیراز و تحت‌جمشید بود. روند دمای کمینه در همه ایستگاه‌ها افزایشی بود و میانگین دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه سانتی‌گراد به ۱۱/۵ درجه (در سناریوی SSP585) افزایش یافت. این نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است که بر کشاورزی، بوم‌سازگان و منابع آب اثرگذار است. مدل CNRM-CM6-1 دمای کمینه بیشتری در مقایسه با دیگر مدل‌ها پیش‌بینی کرد. در آبخیز بختگان-مه‌ارلو به‌دلیل رویارویی با چالش‌های شدید ناشی از تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌های پیاپی و کاهش سطح آب زیرزمینی، اجرای راهکارهای جامع و هماهنگ ضروری است. بر پایه نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود الگوی کشت به‌سوی محصولات کم‌آب‌بر و مقاوم به خشکی مانند زعفران، پسته و گیاهان دارویی تغییر یابد. این موضوع بر کاهش مصرف آب کشاورزی بسیار تأثیرگذار است. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود از روش‌های نوین آبیاری تحت‌فشار و هوشمند استفاده شود تا از هدر رفت منابع آبی جلوگیری شود. احیای پوشش گیاهی و اجرای طرح‌های آب‌خیزداری و آبخوان‌داری سبب مهار سیلاب‌ها، افزایش نفوذ آب و تغذیه سفره‌های زیرزمینی می‌شود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود با

**تضاد منافع نویسندگان**

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

**دسترسی به داده‌ها**

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

**مشارکت نویسندگان**

نویسنده اول: انجام آزمون‌ها و نگارش مقاله  
نویسنده دوم: تحلیل نتایج و همکاری در نگارش مقاله  
نویسنده سوم: بررسی صحت خروجی مدل  
نویسنده چهارم: مفهوم‌سازی و تدوین چارچوب کلی مقاله

مدیریت دقیق و مشارکتی تقاضای آب، همراه با آموزش بهره‌برداران، مصرف بهینه‌سازی شود تا فشار بر منابع کاهش یابد. پیشنهاد می‌شود از سامانه‌های هشدار زودهنگام برای موج‌های گرمایی و خشک‌سالی بهره‌برداری شود تا توان تطابق کشاورزان با شرایط اقلیمی جدید افزایش یابد. همچنین، پایش و حفاظت از کیفیت منابع آبی با مهار ورود پساب‌های آلوده و مصرف بی‌رویه کود و سم اهمیت ویژه‌ای دارد. بازنگری در سیاست‌های بهره‌برداری، نظارت بر چاه‌های غیرمجاز و توقف اضافه برداشت نیز از گام‌های مهم است. همچنین همزمان با این اقدامات، پیشنهاد می‌شود با توسعه مشاغل جایگزین و پایدار مانند گردشگری طبیعی و صنایع دستی، سبب تنوع‌بخشی به معیشت جوامع محلی شد تا تاب‌آوری منطقه در برابر تغییرات اقلیمی افزایش یابد. مشارکت جوامع محلی، نهادهای دولتی و پژوهشگران در قالب مدیریت جامع آب‌خیز، شرط موفقیت این راهکارهاست.

**فهرست منابع**

- Afsharinia M, Panahi F, ehteram M. 2023. Investigation of climate change using CMIP6 models outputs (Case study: Kashan Plain). *Irrigation and Water Engineering*. 14(2): 237-256. doi: 10.22125/iwe.2023.383176.1704
- Aghajanloo K, Fathi Almalou H. 2024. Local analysis of drought and climate change projection in future periods under the CMIP6 Model (Case study: Mazandaran Province). *Journal Watershed Manage Research*. 15(2):32-48. doi:10.61186/jwmr.15.2.32
- Asakareh H. 2002. Models of general circulation of atmosphere. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*. 11(41): 21-23.
- Cheng CS, Li G, Li Q, Auld H. 2008. Statistical downscaling of hourly and daily climate scenarios for various meteorological variables in south-central Canada. *Theoretical and Applied Climatology*. 91(1): 129-147. doi: 10.1007/s00704-007-0302-8
- Fallah Kalaki M, Shokri Kuchak V, Ramezani Etedali H. 2021. simulating the effects of climate change on runoff using the CMIP5 and CMIP6 climate models by SWAT hydrological model (Case study: Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*. 17(3): 345-359.
- Ghafoor J, Forio MAE, Nolivos I, Arias-Hidalgo M, Goethals PL. 2024. Model-based analysis of the impact of climate change on hydrology in the Guayas River Basin (Ecuador). *Journal of Water and Climate Change*. 15(10): 5021-5040. doi:10.2166/wcc.2024.064
- Haghighi P, Soleimanpour SM, Moradi A. 2025. The effects of climate change on precipitation and temperature using SSP scenarios (case study: Fars province). *Water and Soil Management and Modelling*. 5(2): 199-218. doi: 10.22098/mmws.2024.14691.1425
- Hassan Z, Shamsudin S, Harun S. 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and Applied Climatology*. 116:243-257. doi:10.1007/s00704-013-0951-8
- Jahangir MH, Haghighi P, Danehkar S. 2022. Downscaling climate parameters in Fars province, using models of the fifth report and RCP scenarios. *Ecological Informatics*. 68(4):101558. doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101558
- Kundzewicz ZW, Krysanova V, Benestad RE, Hov, Piniewski M, Otto IM. 2018. Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science and Policy*. 79: 1-8. doi: 10.1016/j.envsci.2017.10.008

- Pholkern K, Saraphirom P, Srisuk K. 2018. Potential impact of climate change on groundwater resources in the Central Huai Luang Basin, Northeast Thailand. *Science of the Total Environment*. 633: 1518-1535. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.300
- Rezaei H, Pashapour H, Sadeghi F. 2024. Performance evaluation of CMIP6 models and forecasting of temperature and precipitation changes under shared socioeconomic pathways (SSP) scenarios in Iran. *Strategic Futures Studies*. 3(10): 7-30.
- Semenov MA, Barrow EM, Lars-Wg A. 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Man Herts UK*. pp. 1-27.
- Seneviratne S, Nicholls N, Easterling D, Goodess C, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.
- Wang S, Zhang HJ, Wang TT, Hossain S. 2024. Simulating runoff changes and evaluating under climate change using CMIP6 data and the optimal SWAT model: A case study. *Scientific Reports*. 14(1): 23228. doi:10.1038/s41598-024-74269-9
- Zand M, Gholamrezaei S, Daryabari SJ, Alijani B. 2023. Detection of climate change by analyzing the occurrence of Extreme-climatic events in the west and southwest of Iran. *Journal of Climate Research*. 1402(54): 37-54.
- Zhai J, Dillon J, Dawson V. 2025. Climate Change Education: Cross-Cultural Perspectives. *ECNU Review of Education*. 8(1): 49-52. doi: 10.1177/2096531124123724



## Climate Change Prediction under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Scenarios in the Bakhtegan-Maharloo Watershed

Seyyed Nasrallah Hosseini<sup>1</sup>, Baharak Motamedvaziri<sup>2\*</sup>, Hadi Kiadaliri<sup>3</sup>  
Hasan Ahmadi<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Natural Resources and Environment, SRB.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2 and 3- Associate Professor, Department of Natural Resources and Environment, SRB.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, University of Tehran, Karaj, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Climate change means long-term, irreversible changes in average climate conditions caused by natural and human factors. Climate change is causing global temperature increases, melting of polar ice caps, rising sea levels, and extreme weather events. The significant impact of these changes on meteorological variables such as temperature and precipitation, which disrupt hydrological order. By using general atmospheric circulation models as advanced and comprehensive tools for simulating and predict climate changes, dynamic and thermodynamic atmospheric processes can be modeled. Therefore, this study aimed to predict climate change under the Sixth Report models in the Bakhtegan-Maharloo watershed.

#### Materials and Methods

In this study, daily precipitation and minimum and maximum temperature data from five synoptic stations of Arsanjan, Neyriz, Safashar, Shiraz and Takht Jamshid were used. Climatic parameters were downscaled using the models of the Sixth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change using the LARS-WG model. The selection of station type was selected based on data adequacy, dispersion and climatic diversity in the watershed. In this study, using three scenarios SSP126, SSP245 and SSP585, the output of three models ACCESS-ESM1-5, CNRM-CM6-1, and MRI-ESM2-0 was used. Using the LARS-WG8 statistical model, downscaling and correction of precipitation and minimum and maximum temperature data were performed to increase the accuracy of the predictions. Finally, the climate projection was calculated for the period 2026 to 2045. Then, daily precipitation and temperature data from the Bakhtegan-Maharloo synoptic stations were processed and compared them with the base period.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** bmvaziri@iau.ir

**Citation:** Hosseini, S. N., Motamedvaziri, B., Kiadaliri, H., Ahmadi, H. 2026. Climate Change Prediction under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Scenarios in the Bakhtegan-Maharloo Watershed. Watershed Management Research. 39(2): 1-19.

**DOI:** 10.22092/wmrj.2025.370599.1634

**Received:** 26 September 2025, **Received in revised form:** 15 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 1-19.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

© Author(s)



### Results and Discussion

The results of the ACCESS-ESM1-5 model showed that the difference between the average precipitation of the base period and the future was significant at the 95% confidence level, and predicted higher precipitation compared to the other two models was related to the ACCESS-ESM1 models, and the estimated magnitude of the CNRM-CM6-1 and MRI-ESM2-0 models was closer to the baseline values. The trend of predicted maximum temperature at all stations and scenarios was increased compared to the observational data and was estimated to be significant and upward at the 95% confidence level. The average annual maximum temperature increased from 24.8°C to 26.9°C. The highest predicted maximum temperature was for the CNRM-CM6-1 model. Shiraz and Persepolis have the highest temperatures. The trend of minimum temperature was increasing in all station. The watershed average minimum temperature increased from 9.7°C to 11.5°C (in the SSP585 scenario), indicating warmer nights and a decrease in nighttime cold. The highest predicted minimum temperature compared to other models was for the CNRM-CM6-1 model. The range of predicted changes in watershed precipitation was from 248.9 to 288.7 mm, and the range of predicted changes in maximum and minimum temperature was from 26 to 26.9 and 11 to 11.9 °C, respectively.

### Conclusion and Suggestion

Based on the results of this study, the increasing trend in precipitation and temperature (maximum and minimum) was consistent with the severity of greenhouse gas emission intensity scenarios, indicating that the Bakhtegan-Maharlu region will become warmer and relatively wetter in the future. The differences between the models indicates the lack of certainty in the projections, which necessitates the use of multiple models and scenarios to reduce decision-making risk. These changes require careful planning and adaptation for water resource management, agriculture, and public health in the region. Based on the results of this research in the Bakhtegan-Maharloo watershed, it is suggested that the cultivation pattern be changed towards low-water-intensive crops in order to reduce water consumption and increase climate resilience. In addition, the use of smart irrigation and the implementation of watershed and aquifer management plans are also recommended. To improve the sustainability of underground resources, participatory resource management, operator training, and monitoring of unauthorized wells are recommended. Also, for effective adaptation to climate change, it is suggested to diversify rural livelihoods by developing green and sustainable jobs.

**Keywords:** Bakhtegan-Maharlu watershed, SSP scenarios, LARS-WG model, Sixth Report models

**Article Type:** Research Article

### Conflicts of interest

The authors of this article declared that they have no conflict of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

### Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

### Authors' Contribution

First Author: Conducted the tests and wrote the article

Second Author: Analyzing the results and collaboration in wrote the article

Third Aauthor: Verified the accuracy of the model output

Fourth Author: Conceptualization and development of the general framework of the article

## کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل اثر آتش‌سوزی بر آب‌گریزی خاک در آبخیز توشن استان گلستان

کهزاد حیدری<sup>۱\*</sup>، علی نجفی‌نژاد<sup>۲</sup>، علی محمدیان بهبهانی<sup>۳</sup>، مجید اونق<sup>۴</sup>، لویزدلیو دیکر<sup>۵</sup>

- ۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
- ۲- استاد گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران
- ۳- دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران
- ۴- استاد گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران
- ۵- استاد گروه فیزیک خاک و مدیریت زمین، بخش علوم محیط زیست، دانشگاه و پژوهشکده واخنینگن، واخنینگن، هلند

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

در دهه‌های گذشته آتش‌سوزی‌های جنگلی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی در بوم‌سازگان‌های جنگلی و مرتعی شناخته شده‌اند. این پدیده افزون بر نابودی تخریب پوشش گیاهی و زیستگاه‌ها، به‌شدت سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود که از جمله مهم‌ترین آن‌ها بروز پدیده آب‌گریزی خاک است. آب‌گریزی خاک می‌تواند منجر به افزایش رواناب سطحی، کاهش نفوذپذیری، تشدید فرسایش و در نهایت کاهش پایداری بوم‌سازگان شود. در سال‌های گذشته، رخداد آتش‌سوزی‌های پیاپی و گسترده در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران، به‌ویژه در استان گلستان، در زمینه مدیریت منابع طبیعی سبب نگرانی‌های جدی شده است. با وجود پژوهش‌های پرشمار در سطح جهانی، پژوهش‌های داخلی در زمینه بررسی اثر آتش‌سوزی بر آب‌گریزی خاک و به‌ویژه استفاده از رویکردهای نوین مدل‌سازی همچون الگوریتم‌های یادگیری ماشین هنوز محدود است. از سوی دیگر، روش‌های سنتی مانند آزمون زمان نفوذ قطره آب (WDPT) یا آزمون اتانول، اگرچه برای شناسایی اولیه مفیدند، اما نمی‌توان روابط پیچیده و غیرخطی میان ویژگی‌های خاک و شدت آب‌گریزی را مدل‌سازی کرد. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی تغییرات زمانی آب‌گریزی خاک پس از آتش‌سوزی و ارزیابی توان الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی شاخص WDPT در آبخیز توشن استان گلستان انجام شد.

نوع مقاله: پژوهشی

\* مسئول مکاتبات: k.heidary@areeo.ac.ir

استناد: حیدری، ک.، نجفی‌نژاد، ع.، محمدیان بهبهانی، ع.، اونق، م.، دیکر، ل. د. ۱۴۰۵. کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل اثر آتش‌سوزی بر آب‌گریزی خاک در آبخیز توشن استان گلستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۲): ۴۳-۲۰.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370992.1637

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵ دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۲۰ تا ۴۳.

© نویسنندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



افزون بر این، در این پژوهش ضمن برطرف کردن محدودیت‌های علمی موجود، ابزاری کاربردی برای مدیریت خطرهای ناشی از آتش‌سوزی و برنامه‌ریزی احیای پس از آن ارائه شد.

#### مواد و روش‌ها

این پژوهش در آبخیز توشن در استان گلستان، بخشی از جنگل‌های هیرکانی ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو، انجام شد. اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب تا مرطوب و میانگین سالانه بارندگی ۶۲۰ میلی‌متر و میانگین دما ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. خاک‌های منطقه عمدتاً لسی با بافت لوم سیلتی با مواد آلی زیاد هستند که شرایطی مستعد برای شکل‌گیری آب‌گریزی پس از آتش فراهم می‌آورند. طرح آزمایش فاکتوریل بود و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو عامل اصلی شامل نوع کاربری زمین و تیمار آتش‌سوزی (شاهد و سوخته) طراحی شد. نمونه‌برداری خاک در سه بازه زمانی (یک روز، یک هفته و یک ماه پس از آتش‌سوزی) و در دو ژرفا (۵- و ۱۰- سانتی‌متر) انجام شد و در مجموع ۹۶ نمونه برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ماده آلی، پایداری خاک‌دانه و جرم‌مخصوص‌ظاهری اندازه‌گیری شدند. شدت آب‌گریزی با شاخص WDPT سنجیده شد. داده‌ها پس از ورود به محیط پایتون پیش‌پردازش شدند؛ داده‌های پرت با روش IQR شناسایی اما حذف نشدند، بهنجارسازی با Z-score انجام شد و هم‌خطی متغیرها با VIF بررسی شد. سپس، داده‌ها به دو بخش آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند. برای مدل‌سازی از ۱۲ الگوریتم یادگیری ماشین شامل مدل‌های پایه، مبتنی بر همسایگی، تجمیعی و ترکیبی استفاده شد. بهینه‌سازی ابرسنجه‌ها با روش جستجوی بیزی و اعتبارسنجی متقاطع پنج‌تایی انجام شد. عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های  $R^2$ ، RMSE، MAE، NSE و CCC ارزیابی شد. افزون بر این، تحلیل حساسیت با روش‌های PFI و SHAP و تحلیل نبودن قطعیت با بوت‌استرپ و شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شد.

#### نتایج و بحث

نتایج نشان داد اثر آتش‌سوزی بر آب‌گریزی خاک، شدید اما کوتاه‌مدت بود. میانگین WDPT یک روز پس از آتش‌سوزی ۵/۲ دقیقه بود که نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه آب‌گریزی است. در هفته اول این اندازه به کمتر از یک دقیقه کاهش یافت و پس از یک ماه تقریباً صفر شد. این یافته بیانگر ماهیت گذرای اثر آتش بر آب‌گریزی سطحی خاک است. تحلیل‌های آماری (ANOVA) نشان داد اثر تیمار آتش‌سوزی و برهم‌کنش آن با زمان و کاربری زمین بر WDPT معنی‌دار بود. در میان الگوریتم‌های یادگیری ماشین، بهترین عملکرد مربوط به درخت تصمیم ( $R^2=0/44$ ) و شیب بوستینگ ( $R^2=0/43$ ) بود، در حالی که دقت مدل‌هایی مانند SVM و وایزی بیزین کمتر بود. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد سیلت، هدایت الکتریکی و ماده آلی مهم‌ترین متغیرها در پیش‌بینی WDPT بودند. نتایج SHAP نیز نشان داد افزایش سیلت و ماده آلی موجب افزایش آب‌گریزی شد، در حالی که اثر افزایش EC کاهش داد. نبودن قطعیت نشان داد پایداری مدل‌های ساده‌تر مانند درخت تصمیم در برابر داده‌های پرت بیشتر بود، در حالی که نبودن قطعیت مدل‌های پیچیده‌تر در اندازه‌های حدی WDPT افزایش یافت. بر پایه این یافته‌ها می‌توان با استفاده از مدل‌های ساده یا مبتنی بر بوستینگ، آب‌گریزی خاک پس از آتش‌سوزی را دقیق‌تر و پایدارتر پیش‌بینی کرد.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش نشان داد اثر آتش‌سوزی بر آب‌گریزی خاک در آبخیز توشن شدید اما کوتاه‌مدت بود و در مدت یک ماه این اثر به‌طور کامل از بین رفت. با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه درخت تصمیم و شیب بوستینگ، می‌توان روابط پیچیده میان ویژگی‌های خاک و شدت آب‌گریزی را با دقت قابل‌قبولی مدل‌سازی کرد. نتایج تحلیل حساسیت و نبودن قطعیت نشان داد در شکل‌گیری آب‌گریزی، نقش متغیرهایی مانند سیلت، هدایت الکتریکی و ماده آلی مهم بود. بر اساس یافته‌های این پژوهش پیشنهاد می‌شود برای مدیریت پس از آتش‌سوزی آب‌گریزی خاک به‌شکل کوتاه‌مدت پایش شود و از مدل‌های ساده و پایدار برای پیش‌بینی تغییرات آن، بهره‌گیری شود. افزون بر این، با ترکیب داده‌های میدانی و داده‌های سنسور از دور و توسعه مدل‌های منطقه‌ای می‌توان سبب بهبود مدیریت خطرهای ناشی از آتش‌سوزی شد. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اثرات بلندمدت آتش‌سوزی بر دیگر

ویژگی‌های خاک و کارکردهای بوم‌سازگان بررسی شود و از الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها بهره‌گیری شود.

## واژگان کلیدی

آب‌گریزی خاک، آتش‌سوزی جنگل، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل حساسیت، نبودن قطعیت

## مقدمه

بیشتر است و با افزایش ژرفا کاهش می‌یابد (تن و همکاران ۲۰۲۵). تغییرات ژرفا بر نفوذ آب، توزیع رطوبت خاک و در نتیجه چرخه آب‌شناخت و عملکرد بوم‌سازگان نقش مهمی دارد (چی و همکاران ۲۰۲۵). در جنگل‌های متراکم با خاک غنی از مواد آلی، مانند جنگل‌های هیرکانی شمال ایران، احتمال تشکیل لایه‌های آب‌گریز پس از آتش‌سوزی بسیار زیاد است (حیدری و همکاران ۲۰۱۸). این شرایط پیامدهایی همچون کاهش رشد گیاهان، تغییر در ترکیب گونه‌ای و افزایش خطر خشکسالی‌های بوم‌شناختی به همراه دارد (بونانومی و همکاران ۲۰۲۴). با وجود پیشرفت‌های گذشته در شناخت ساز و کارهای SWR، بیشتر پژوهش‌های پیشین بر پایهٔ آزمون‌های میدانی و تحلیل‌های آماری ساده مانند آزمون نفوذ قطره آب<sup>۲</sup> یا مولاریته قطره اتانول<sup>۳</sup> بوده‌اند. این روش‌ها اگرچه برای تشخیص و طبقه‌بندی اولیه SWR مفیدند، اما قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی و چند عاملی میان ویژگی‌های خاک و شدت آب‌گریزی را ندارند. در سال‌های گذشته بهره‌گیری از الگوریتم یادگیری ماشین<sup>۴</sup> به‌عنوان رویکردی نوین و قدرتمند در تحلیل داده‌های پیچیده خاک و عامل‌های محیطی گسترش یافته است (گو و همکاران ۲۰۲۱؛ محمودزاده و همکاران ۲۰۲۰؛ مقدم و همکاران ۲۰۲۰؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۹). عملکرد این الگوریتم‌ها، به‌ویژه عملکرد مدل‌هایی مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و ایکس‌جی‌بوست، هم در شناسایی الگوهای پیچیده و روابط غیرخطی میان ویژگی‌های

در سال‌های گذشته آتش‌سوزی‌های جنگلی به‌عنوان یکی از مهمترین مخاطره‌های زیست‌محیطی شناخته شده‌اند و به‌ویژه در مناطق جنگلی، به‌دلیل افزایش فراوانی، شدت و گستره رخداد، یکی از نگرانی‌های اصلی در مدیریت منابع طبیعی و پایداری بوم‌سازگان‌ها هستند (فلینیگان و همکاران ۲۰۰۹؛ سان-میگل-آپانز و همکاران ۲۰۱۸). این رخداد، افزون بر نابودی پوشش گیاهی، حیات وحش و زیستگاه‌ها، بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و آب‌شناختی خاک نیز اثرات شدید و ماندگاری دارد (آرونات و همکاران ۲۰۲۴). خاک به‌عنوان یکی از اجزای اصلی بوم‌سازگان، پس از آتش‌سوزی دستخوش تغییراتی مانند کاهش کربن آلی، ناپایداری خاک‌دانه‌ها، کاهش نفوذپذیری و افزایش خطر فرسایش می‌شود (بنتو-گونسالوز و همکاران ۲۰۱۲). یکی از پیامدهای مهم پس از آتش‌سوزی، بروز و تشدید پدیده آب‌گریزی خاک<sup>۱</sup> است که رواناب سطحی را افزایش داده و منجر به تشدید فرایندهای فرسایشی می‌شود (دوئر و سانتین ۲۰۱۶). آب‌گریزی خاک پدیده‌ای طبیعی است که در کاربری‌های گوناگون زمین و شرایط اقلیمی متفاوت مشاهده می‌شود و منشأ آن به وجود ترکیبات آلی آب‌گریز ناشی از بقایای گیاهی، سوختگی مواد آلی و یا فعالیت میکروارگانیسم‌ها بستگی دارد (آتاناسووا و دور ۲۰۱۱؛ شیکسی و همکاران ۲۰۰۰). شدت و پایداری SWR تحت تأثیر عامل‌هایی مانند شدت و مدت آتش، نوع پوشش گیاهی، بافت و ساختار خاک و ژرفای نیم‌رخ است (گونزالس-پلایو و همکاران ۲۰۲۴). نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که در لایه سطحی خاک (۵-۰ سانتی‌متر) شدت آب‌گریزی

2- Water Drop Penetration Time (WDPT)

3- Molarity Of Ethanol Droplet

4- Machine Learning (ML)

1- Soil Water Repellency (SWR)

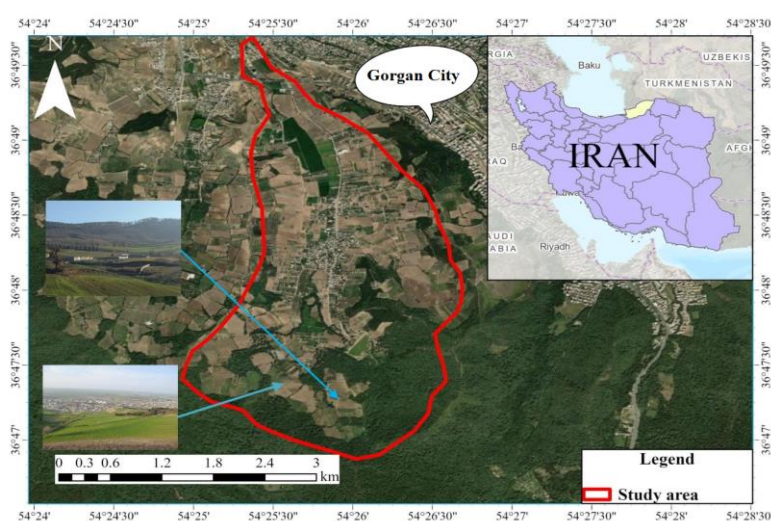
جنوب‌غرب شهر گرگان است و از مناطق جنگلی هیرکانی شمال ایران به‌شمار می‌آید. کمترین و بیشترین اندازه بلندی در آبخیز توشن به ترتیب ۱۴۷ و ۶۰۷ متر است. میانگین سالانه بارندگی منطقه مطالعه شده ۶۲۰ میلی‌متر است و وضعیت رطوبتی خاک زیرک و رژیم حرارتی آن ترمیک است (حیدری و همکاران ۲۰۱۸). منطقه پژوهشی بخشی از جنگل‌های هیرکانی است که به‌عنوان میراث جهانی یونسکو ثبت شده است. پوشش زیراشکوب در این مناطق شامل گیاهان علفی، درختچه‌ها و خزها است که نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی و پایداری بوم‌سازگان دارند. این پوشش گیاهی ضمن جلوگیری از فرسایش خاک و حفظ رطوبت آن زیستگاه مهمی برای بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری است. کاربری‌های اصلی شامل جنگل‌های سوزنی‌برگ، جنگل‌های پهن‌برگ و زمین کشاورزی است. خاک‌های منطقه عمدتاً از نوع لسی و بافت غالب آن‌ها لوم سیلتی با محتوای آهک نسبتاً زیاد است (زادورووا و همکاران ۲۰۲۱). این ویژگی‌ها همراه با تراکم زیاد مواد آلی، شرایطی مستعد برای شکل‌گیری آب‌گریزی پس از آتش‌سوزی فراهم‌آورده است. موقعیت جغرافیایی آبخیز توشن در استان گلستان و ایران در شکل ۱ نشان‌دهنده شده است.

خاک و پدیده‌ها موفق‌بوده است و هم به‌طور مؤثری در مدیریت داده‌های با ابعاد زیاد و کاهش حساسیت به داده‌های پرت به‌کار گرفته شده‌اند (الزبیدی و همکاران ۲۰۲۱). این پیشرفت‌ها به‌ویژه در مناطق با داده‌های محدود، سبب بهبود مدل‌سازی و پیش‌بینی نتایج پیچیده محیطی می‌شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک به‌ویژه آب‌گریزی خاک در آبخیز توشن استان گلستان بود. در این پژوهش از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند درخت تصمیم، شیب بوستینگ و ایکس‌جی‌بوست برای شبیه‌سازی روابط پیچیده میان ویژگی‌های خاک و شدت آب‌گریزی در شرایط پس از آتش‌سوزی استفاده شد. افزون بر این، دقت این الگوریتم‌ها در پیش‌بینی آب‌گریزی خاک ارزیابی شد. در این پژوهش، یادگیری ماشین، به‌ویژه در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها، به‌عنوان رویکردی نوین در بررسی و پیش‌بینی اثرات آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک ارزیابی شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مطالعه‌شده

این پژوهش در آبخیز توشن استان گلستان (شمال‌شرق ایران) انجام شد (شکل ۱). این آبخیز از زیرآبخیزهای قره‌سو در استان نامبرده است که در



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز توشن در استان گلستان و ایران.

Figure 1- Geographic location of the Tushan watershed in Golestan Province and Iran.

## طراحی آزمایش و نمونه‌برداری

در این پژوهش، آزمایش فاکتوریل بود و در قالب طرح کاملاً تصادفی<sup>۵</sup> با دو عامل اصلی شامل نوع کاربری زمین (سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و کشاورزی) و تیمار آتش‌سوزی (شاهد و سوخته) که در فصل تابستان اعمال شد، انجام شد. در این پژوهش، برای کاهش اثر ناهمگنی مکانی، قطعه‌های آزمایشی در محدوده‌ای با شیب، جهت و پوشش گیاهی نسبتاً مشابه انتخاب شدند و تصادفی‌سازی در درون هر کاربری زمین و تیمار آتش‌سوزی انجام شد. افزون بر این، به‌منظور اطمینان از یکنواختی شدت سوختگی، آتش‌سوزی به دو روش تجویزی و مهارشده اجرا شد (شکل ۲) و شاخص‌های چشمی شدت سوختگی (مانند ژرفای خاکستر و بلندای زغال‌سوختگی) در تمام قطعه‌های آزمایشی بررسی شد. این اقدامات باعث شد تغییرات ناشی از عامل‌های مکانی به حداقل برسد و اثرات مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از تیمار آتش‌سوزی و زمان نمونه‌برداری باشد. در هر تیمار، قطعه‌های مجزا انتخاب و آتش‌سوزی به دو روش تجویزی و مهارشده اجرا شد تا یکنواختی شدت سوختگی تضمین شود (بهارج ۲۰۲۵). از خاک منطقه پژوهشی در سه بازه زمانی (یک روز، یک هفته و یک ماه پس از آتش‌سوزی) و در دو ژرفا (۵- و ۱۰-۵ سانتی‌متر) نمونه‌برداری شد. در مجموع ۹۶ نمونه خاک برداشت شد. به‌منظور حفظ ساختار طبیعی خاک نمونه‌برداری از بخش مرکزی هر قطعه با بیلچه استیل و مته دستی انجام شد (ستاد بررسی خاک ۲۰۱۴). نمونه‌ها پس از برداشت در کیسه‌های پلی‌اتیلنی درزدار نگهداری شدند و همراه با برچسب به آزمایشگاه انتقال یافتند. سپس، در دمای محیط خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سرانجام، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مهم خاک، بر پایه استانداردهای نامبرده اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

## اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک

برای سنجش شدت آب‌گریزی، آزمون زمان نفوذ قطره آب (WDPT) بر پایه دستورالعمل دوئر و شیکسبای

(۲۰۱۱) اجرا شد. در این روش، قطره‌ای از آب مقطر (حجم ۵ میلی‌لیتر) به‌وسیله پیپت واسنجی‌شده و روی سطح دست‌نخورده خاک در محل گذاشته شد و زمان نفوذ با کروномتر ثبت شد. هر آزمایش سه بار تکرار و میانگین گزارش شد. طبقه‌بندی شدت آب‌گریزی بر پایه پیشنهاد جردن و همکاران (۲۰۱۳) در پنج طبقه از غیرآب‌گریز تا بسیار آب‌گریز انجام شد. طبقه‌بندی شدت آب‌گریزی در جدول ۲ ارائه شده است. در این پژوهش، اندازه زمان نفوذ قطره (WDPT) به‌عنوان متغیر وابسته برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد و اندازه عددی آن با دیگر متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک، مبنای تحلیل‌های یادگیری ماشین بود.

## پردازش و آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی

برای آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌های یادگیری ماشین، ابتدا مجموعه‌ای از داده‌های خام در نرم‌افزار اکسل بررسی شدند. سپس، داده‌ها به محیط برنامه‌نویسی پایتون انتقال یافتند تا فرآیند پردازش داده‌ها به‌طور دقیق‌تر و بهینه‌تر انجام شود. در ادامه برای شناسایی داده‌های پرت از روش فاصله بین چارکی (IQR) استفاده شد (لوسیتو و همکاران ۲۰۲۴). با این وجود به‌منظور حفظ ساختار طبیعی داده‌ها و جلوگیری از کاهش حجم مؤثر نمونه‌ها، داده‌های پرت حذف نشدند. به جای آن، مدل‌هایی که نسبت به داده‌های پرت حساسیت کمتری دارند از جمله جنگل تصادفی انتخاب شدند (بیرمن ۲۰۰۱). در گام بعدی از روش Z-score برای بهنجارسازی داده‌ها به‌منظور کاهش اثرگذاری متغیرهایی با دامنه مقیاس مختلف استفاده شد. این اقدام به‌ویژه برای الگوریتم‌هایی مانند ایکس‌جی‌بوست که نسبت به مقیاس متغیرها حساس هستند، اهمیت زیادی دارد. سپس، داده‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند تا عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی داده‌های جدید به‌شکل واقع‌بینانه‌ای ارزیابی شود.

## 5- Completely Randomized Design (CRD)



شکل ۲- گونه‌های گیاهی استفاده‌شده در آتش تجویزی.  
Figure 2- Plant species used in the prescribed fire.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های خاک و روش‌های آزمایشگاهی استفاده‌شده در این پژوهش.

Table 1- Characteristics of Measured Soil Physicochemical Properties and Laboratory Methods Used in This Study.

Property	Measurement Method	Scientific Reference
Organic Carbon (OC)	Walkley-Black Method	Enang et al. (2018)
Organic Matter (OM)	Calculated as $1.72 \times \text{OC}$	Nelson & Sommers (1982)
pH and EC	Saturated Paste Extract (Soil:Water 1:2.5)	Kargas et al. (2020)
Soil Texture	Bouyoucos Hydrometer Method	Beretta et al. (2014)
Aggregate Stability	Wet-Sieving Method	Almajmaie et al. (2017)
Water Drop Penetration Time (WDPT)	5 mL Standard Drop on Air-Dried Soil Surface	Doerr et al. (2009)

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت آب‌گریزی خاک بر اساس زمان نفوذ قطره آب (WDPT).

Table 2- Classification of Soil Water Repellency Intensity Based on Water Drop Penetration Time (WDPT).

Hydrophobicity Status	Penetration Time (s)
Non-hydrophobic	< 5
Slightly hydrophobic	5-60
Moderately hydrophobic	60-180
Strongly hydrophobic	180-600
Severely hydrophobic	> 600

این ترتیب داده‌ها برای ورود به فرآیند مدل‌سازی آماده شدند.

#### مدل‌سازی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین

برای پیش‌بینی شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT) پس از آتش‌سوزی، از ۱۲ الگوریتم یادگیری ماشین استفاده شد. این الگوریتم‌ها بر اساس ماهیت و ساختارشان در چهار گروه اصلی دسته‌بندی شدند (جدول ۳). با استفاده از چنین تنوعی، عملکرد مدل‌های ساده، مبتنی بر همسایگی، تجمیعی و ترکیبی مقایسه شد.

در گام بعدی، برای بررسی هم‌خطی میان متغیرهای مستقل، ضریب تورم پراکنش (VIF) محاسبه شد (سالمرن-گومز و همکاران ۲۰۲۰). در شرایطی که اندازه‌های VIF بیش از ۱۰ بود، مدل هم با آن متغیر و هم بدون آن متغیر اجرا شد تا تأثیر حذف یا نگهداری آن بر دقت مدل ارزیابی شود. سرانجام، متغیر بافت خاک با استفاده از روش one-hot encoding و با استفاده از کتابخانه pandas در پایتون به متغیرهای عددی معادل تبدیل شد تا در الگوریتم‌های عددی استفاده شود (کوهن ۲۰۰۸). به

جدول ۳ - دسته‌بندی الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده‌شده برای پیش‌بینی WDPT.

Table 3- Categorization of machine learning algorithms used for predicting WDPT.

Algorithm Group	Models
Linear & Simple Models (Baseline)	Bayesian Ridge, Decision Tree
Neighborhood & Kernel-Based Models	K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM – Polynomial Kernel)
Ensemble Models	Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, LightGBM
Hybrid/Meta-Models	Voting Regressor, Stacking Regressor

#### پیاده‌سازی مدل‌ها

پیاده‌سازی تمام مدل‌ها در محیط پایتون نسخه ۷,۱۳,۳ و با استفاده از کتابخانه‌های scikit-learn, xgboost, lightgbm و optuna برای تنظیم ابرسنجه‌ها انجام شد. داده‌ها پس از پیش‌پردازش به دو مجموعه آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند. سنجه‌های اصلی مانند max\_depth, n\_estimators و learning\_rate برای هر مدل بهینه‌سازی شدند. بهینه‌سازی ابرسنجه‌ها با روش جستجوی بیزی در قالب ۵ بار اعتبارسنجی متقاطع انجام شد. برای ارزیابی عملکرد، شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب همبستگی توافقی (CCC) استفاده شدند. در راستای بهینه‌سازی مدل‌ها، به‌ویژه در مدل‌هایی مانند ایکس‌جی‌بوست که حساسیت زیادی به مقیاس داده‌ها دارند، بهنجارسازی داده‌ها با روش Z-score انجام شد. برای شناسایی و مدیریت

داده‌های پرت از روش فاصله بین چارکی (IQR) استفاده شد و با شناسایی داده‌های پرت، از مدل‌هایی که به داده‌های پرت حساسیت کمتری دارند (مانند جنگل تصادفی) بهره‌گرفته شد تا تأثیر آن‌ها بر دقت مدل‌ها به حداقل برسد. افزون بر این، برای ارزیابی صحت مدل‌ها و کاهش خطر overfitting، از جستجوی بیزی برای بهینه‌سازی دقیق ابرسنجه‌ها و اعتبارسنجی متقاطع پنج‌تایی استفاده شد.

#### تحلیل حساسیت و نبودن قطعیت

برای شناسایی متغیرهای مهم مؤثر بر WDPT، از دو رویکرد مکمل استفاده شد.

#### رویکرد Permutation Feature Importance (PFI)

از این رویکرد برای سنجش اندازه حساسیت مدل‌ها به تغییرات ویژگی‌ها استفاده شد.

#### رویکرد SHAP (Shapley Additive Explanations)

از این رویکرد برای تحلیل سهم هر متغیر و جهت اثر آن بر پیش‌بینی‌ها و همچنین تعامل‌های غیرخطی

زمانی پس از آتش‌سوزی (یک روز، یک هفته و یک ماه) محاسبه شد (جدول ۴). درصد سیلت در روز اول ۵۵/۸٪ بود و تا هفته اول تقریباً ثابت باقی ماند (۵۶٪) و پس از یک ماه به ۵۶/۴٪ رسید. درصد رس در روز اول ۳۵/۹٪ بود و یک ماه پس از آتش‌سوزی به ۳۷/۱٪ افزایش یافت، در حالی که درصد شن از ۸/۲۸٪ به ۶/۵٪ کاهش یافت. تغییرات اسیدیته خاک قابل توجه نبود که نشان‌دهنده اثر محدود آتش‌سوزی بر ذخایر کربنی لایه سطحی است. از سوی دیگر، کاهش تدریجی میانگین وزنی-قطر ذرات و جرم‌مخصوص ظاهری خاک نشان‌دهنده شل‌شدن نسبی ساختار خاک در این دوره بود. یکی از مهمترین شاخص‌ها، زمان نفوذ قطره آب بود که در روز اول به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (۲/۴۸ دقیقه) و پس از گذشت یک ماه به‌طور کامل برابر با صفر شد. این تغییرات نشان‌دهنده گذرا بودن اثر آبریزی خاک پس از آتش‌سوزی است. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین که نشان داده‌اند اثرات آبریزی در نتیجه آتش‌سوزی معمولاً گذرا بوده و در مدت زمان کوتاهی از بین می‌روند، هم‌راستا است (دوئر و همکاران ۲۰۰۹).

استفاده شد. به‌منظور ارزیابی نبودن قطعیت و پایداری مدل‌ها، دو روش به‌کار گرفته شد. روش Bootstrap: در این بخش، با استفاده از ۲۰۰ بار نمونه‌گیری تصادفی از داده‌های آزمون، اندازه‌های  $R^2$  و RMSE برای مدل‌های منتخب محاسبه شد. نتایج پراکنش نقاط در فضای  $R^2$ -RMSE همراه با بیضی‌های اطمینان ۹۵٪ برای هر مدل رسم شد. روش Monte Carlo Simulation: با ۵۰۰ تکرار و افزودن نویز تصادفی (۵٪ انحراف معیار ویژگی‌ها)، بازه‌های اطمینان پیرامون پیش‌بینی‌ها محاسبه شد. شایان ذکر است که تحلیل حساسیت و نبودن قطعیت برای مدل‌های برتر (بر اساس دقت و پایداری) و همچنین یک مدل پیشرفته مبتنی بر boosting انجام شد. این انتخاب باعث گردآوری نتایج و جلوگیری از افزایش بیش از حد حجم مقاله شد.

#### نتایج و بحث

##### بررسی آماری اولیه داده‌ها

برای ارزیابی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در ژرفا ۱۰-۰ سانتی‌متر، آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار ده شاخص اصلی در سه بازه

جدول ۴- آمار توصیفی متغیرهای مهم در روز اول پس از آتش‌سوزی.

Table 4- Descriptive statistics of key variables on the first day following the wildfire.

Property	One day post-fire (mean $\pm$ SD)	One week post-fire (mean $\pm$ SD)	One month post-fire (mean $\pm$ SD)
Silt (%)	55.8 $\pm$ 4.55	56.0 $\pm$ 4.51	56.4 $\pm$ 4.12
Sand (%)	8.28 $\pm$ 2.55	6.63 $\pm$ 1.92	6.50 $\pm$ 1.83
Clay (%)	35.9 $\pm$ 3.43	37.4 $\pm$ 4.90	37.1 $\pm$ 4.45
pH	7.58 $\pm$ 0.31	7.60 $\pm$ 0.27	7.61 $\pm$ 0.15
EC (dS m <sup>-1</sup> )	1.02 $\pm$ 0.20	0.95 $\pm$ 0.19	0.93 $\pm$ 0.17
OC (%)	1.26 $\pm$ 0.74	1.27 $\pm$ 0.72	1.30 $\pm$ 0.74
OM (%)	2.17 $\pm$ 1.28	2.19 $\pm$ 1.25	2.24 $\pm$ 1.28
MWD (mm)	0.36 $\pm$ 0.17	0.33 $\pm$ 0.15	0.31 $\pm$ 0.14
BD (g cm <sup>-3</sup> )	1.66 $\pm$ 0.16	1.62 $\pm$ 0.13	1.57 $\pm$ 0.12
WDPT (min)	2.48 $\pm$ 4.28	0.48 $\pm$ 1.00	0.00 $\pm$ 0.00

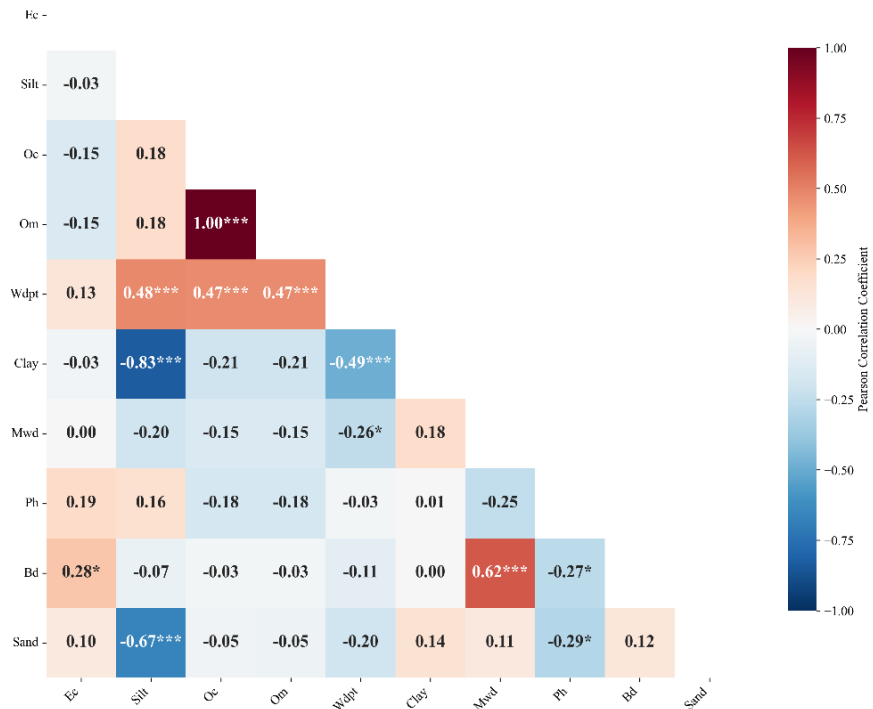
آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک در طول زمان و بازسازی تدریجی ساختار خاک است. با گذشت زمان، اثرات آتش‌سوزی کاهش یافت و همبستگی روابط میان ویژگی‌های خاک و WDPT کمتر شد. در تجزیه و تحلیل همبستگی، افزون بر رابطه‌های میان WDPT و ویژگی‌های خاک مانند درصد رس و شن، MWD (میانگین وزنی-قطر خاکدانه‌ها) نیز به‌عنوان شاخصی از پایداری خاکدانه بررسی شد. نتایج نشان داد در بازه زمانی یک ماه پس از آتش‌سوزی، همبستگی میان میانگین وزنی-قطر خاکدانه‌ها با WDPT مثبت کم ( $P < 0.05$ ,  $R^2 = 0.29$ ) بود که نشان‌دهنده کاهش تدریجی اثرات آتش‌سوزی بر ساختار خاک و بازسازی تدریجی خاکدانه‌ها در طول زمان است. همچنین، نتایج میانگین وزنی-قطر خاکدانه‌ها نشان داد آتش‌سوزی بر پایداری خاکدانه‌ها اثرگذار بود و سبب تغییر ویژگی‌های آب‌گریزی خاک شد. نقشه‌های حرارتی<sup>۶</sup> رسم‌شده و تغییرات ضریب‌های همبستگی در سه بازه زمانی مطالعه‌شده در شکل ۳ نشان‌دهنده شده است.

در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده همبستگی مثبت و رنگ آبی بیانگر همبستگی منفی است؛ همچنین شدت رنگ متناسب با بزرگی ضریب همبستگی تغییر می‌کند. این یافته بیانگر آن است که با گذشت زمان، شدت همبستگی‌ها کاهش یافت و در برخی موارد جهت آنها نیز تغییر یافت؛ موضوعی که بیانگر تعدیل تدریجی اثر آتش‌سوزی بر روابط میان WDPT و ویژگی‌های خاکی است.

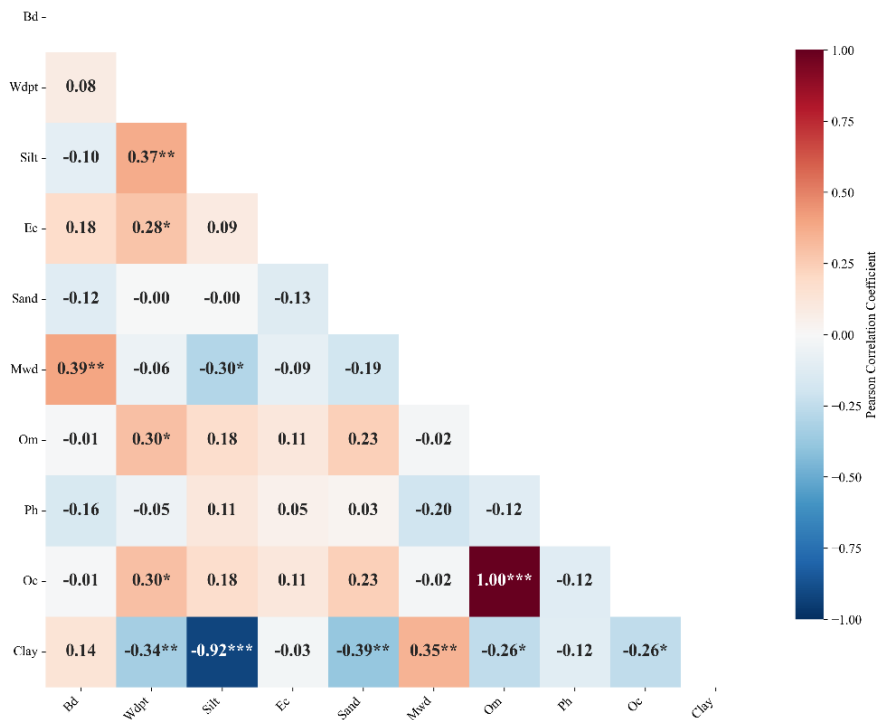
### تحلیل همبستگی شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT) با ویژگی‌های خاکی

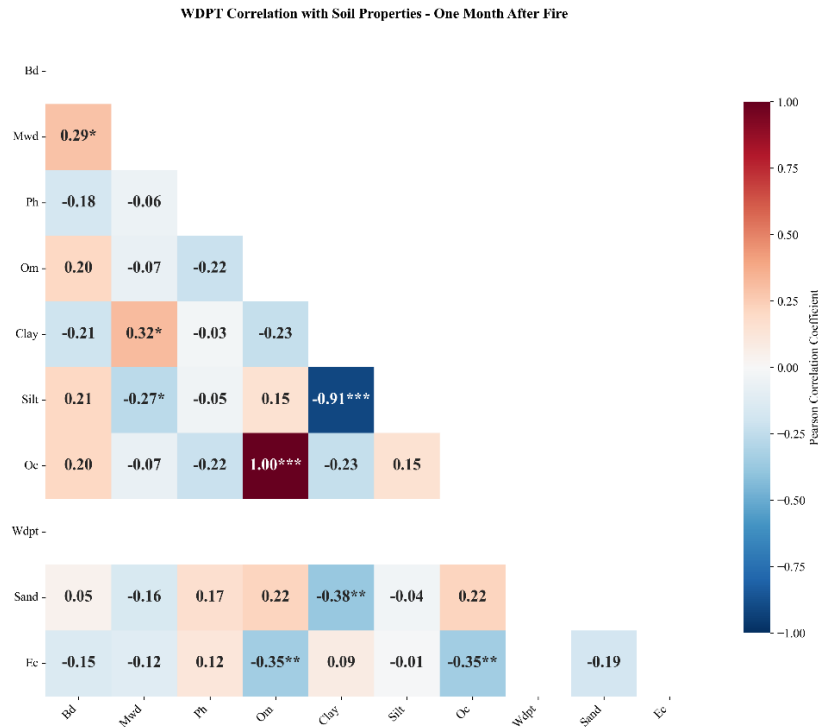
به‌منظور ارزیابی کمی روابط میان شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT) و مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در بازه‌های زمانی مختلف پس از رخداد آتش‌سوزی، از ضریب همبستگی پیرسون به‌عنوان شاخص سنجش ارتباط خطی استفاده شد. تمام محاسبه‌ها بر اساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده در سه مقطع زمانی یک روز، یک هفته و یک ماه پس از آتش‌سوزی انجام شد. نتایج بررسی تغییرات مکانی-زمانی ضریب‌های همبستگی در شکل ۴ ارائه‌شده است. در بازه یک روز پس از آتش‌سوزی، بیشترین همبستگی منفی و معنادار میان WDPT و درصد رس ( $R^2 = -0.83$ ,  $P < 0.001$ ) خیلی زیاد) مشاهده شد. این همبستگی منفی خیلی زیاد را می‌توان به اثرات اولیه آتش‌سوزی بر ساختار خاک نسبت داد. آتش‌سوزی باعث تغییرات شدید در ساختار خاک، به‌ویژه در لایه‌های سطحی، و افزایش آب‌گریزی در خاک‌هایی با محتوای رس زیاد می‌شود. همچنین، رابطه همبستگی WDPT با درصد شن منفی و در حد متوسط ( $R^2 = -0.67$ ,  $P < 0.001$ ) بود که نشان‌دهنده اثرات آتش‌سوزی بر پراکندگی ذرات شن و کاهش نفوذپذیری خاک است. همبستگی دیگر ویژگی‌های خاک در این بازه از نظر آماری معنادار نبود. در بازه یک هفته پس از آتش‌سوزی، همبستگی میان WDPT و ماده آلی مثبت و بسیار زیاد ( $R^2 = 0.9$ ,  $P < 0.001$ ) بود که دلیل آن اثرات آتش‌سوزی بر افزایش تجزیه مواد آلی و کاهش آب‌گریزی خاک است. افزون بر این، همبستگی میان WDPT و درصد رس منفی و کم ( $R^2 = -0.26$ ) بود که نشان‌دهنده کاهش اثرات آتش‌سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در این بازه زمانی است. در بازه زمانی یک ماه پس از آتش‌سوزی، هیچ رابطه مهم و معناداری میان WDPT و دیگر ویژگی‌های خاکی شناسایی نشد، اما همبستگی میان WDPT با میانگین وزنی-قطر خاکدانه‌ها مثبت کم ( $R^2 = 0.29$ ) بود که نشان‌دهنده کاهش اثرات

WDPT Correlation with Soil Properties - One Day After Fire



WDPT Correlation with Soil Properties - One Week After Fire





شکل ۳- نقشه حرارتی همبستگی WDPT با ویژگی‌های خاکی در سه بازه زمانی پس از آتش‌سوزی.

Figure 3- Heatmap of correlations between WDPT and soil properties across three post-fire time intervals.



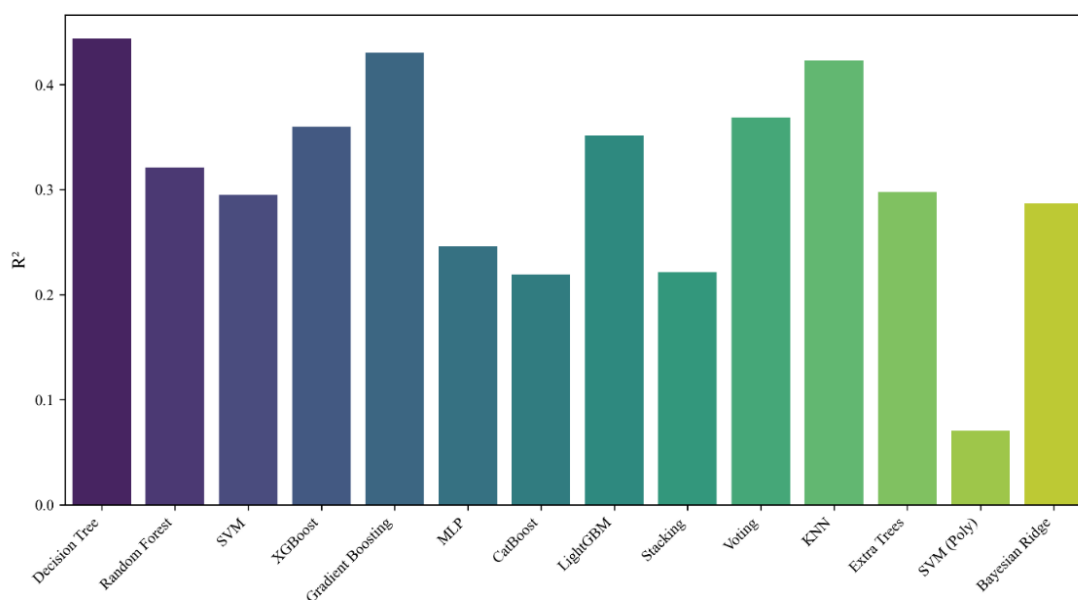
شکل ۴- نقشه حرارتی مقایسه عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT) پس از

آتش‌سوزی بر اساس معیارهای RMSE, MAE, R<sup>2</sup>, NSE و CCC.

Figure 4- Heatmap comparison of machine learning models' performance in predicting soil water repellency (WDPT) post-fire based on RMSE, MAE, R<sup>2</sup>, NSE, and CCC metrics.

۴). با این حال، با بررسی دقیق نتایج مدل‌ها یافته‌های ارزشمندی از رفتار هر الگوریتم مشاهده شد. نتایج مقایسه کلی مدل‌ها در میان الگوریتم‌های استفاده شده نشان داد بهترین عملکرد مربوط به درخت تصمیم ساده ( $R^2=0.44$ ,  $RMSE=3.76$ )،  $MAE=1.7$ ,  $CCC=0.63$  بود. نتایج مقایسه اندازه‌های ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شده، در شکل ۵ ارائه شده است. بر پایه نتایج شکل ۵ عملکرد درخت تصمیم ساده در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها بهتر بود.

نتایج مدل‌های یادگیری ماشین در این پژوهش نتایج به‌کارگیری مجموعه‌ای از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی WDPT پس از آتش‌سوزی بیانگر یکسان نبودن عملکرد مدل‌ها و وجود تفاوت محسوسی میان آنها بود. بر پایه نقشه حرارتی مقایسه عملکرد مدل‌ها اندازه‌های نسبتاً کم ضریب تبیین (بیشترین اندازه  $R^2$  برابر ۰/۴۴) بیانگر پیچیدگی زیاد فرآیندهای مؤثر بر آب‌گریزی و محدودیت داده‌های موجود است (شکل



شکل ۵- مقایسه اندازه‌های ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شده در پیش‌بینی شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT) پس از آتش‌سوزی.

Figure 5- Comparison of the coefficient of determination ( $R^2$ ) values of machine learning models used for predicting the soil water repellency index (WDPT) post-fire.

مدل‌های Boost-tree، عملکرد این مدل به دلیل تفسیرپذیری زیاد، قابل قبول بود که با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا است. نتایج پژوهش‌های دیگری نیز در زمینه پیش‌بینی ویژگی‌های خاک با یافته‌های این پژوهش هماهنگی دارد (پادریان و همکاران ۲۰۲۰، چن و همکاران ۲۰۱۹). در میان مدل‌های تجمیعی، بهترین عملکرد مربوط به الگوریتم شیب بوستینگ بود ( $R^2=0.43$ ,  $CCC=0.62$ ). در این راستا، نتایج

نتایج بررسی اولیه کمی غیرقابل انتظار بود اما با توجه به محدودیت داده‌ها و ناهمگنی نمونه‌ها، قابل توجیه بودند. در چنین شرایطی، تصمیم‌پذیری مدل‌های ساده در مقایسه با مدل‌های پیچیده معمولاً بهتر است. در این راستا، پانیاواراپورن و همکاران (۲۰۲۵) عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری ماشین در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک را ارزیابی کردند و دریافتند که با وجود دقت کمتر مدل درخت تصمیم در مقایسه با

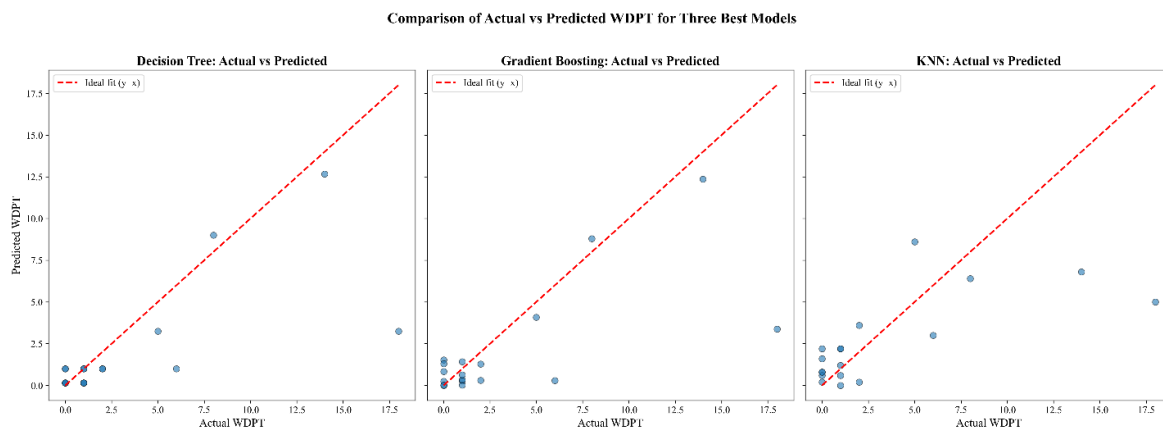
از سوی دیگر، عملکرد مدل‌های SVM با کرنل چندجمله‌ای ( $R^2=0.07$ ) و Bayesian Ridge ( $R^2=0.29$ ) کم بود که احتمالاً دلیل آن وابستگی بیشتر آنها به داده‌های گسترده و پایدار است. در حالی که پویایی ویژگی‌های خاک پس از آتش‌سوزی زیاد است. افزون بر این، ترکیب مدل‌ها با روش‌های Voting ( $R^2=0.37$ ) و Stacking ( $R^2=0.22$ ) بهبود معنادار دقت پیش‌بینی نشد. این یافته با نتایج پژوهش‌های فرانک و همکاران (۲۰۱۱) و لامیچان و همکاران (۲۰۲۵) هماهنگی دارد. این پژوهشگران گزارش کردند که در شرایط با حجم داده کم و متغیرهای هم‌بسته، مدل‌های ترکیبی الزاماً برتری محسوسی بر مدل‌های منفرد ندارند.

زیادی از داده‌ها حول خط یک‌به‌یک بودند که نشان‌دهنده همبستگی مناسب میان اندازه‌های واقعی و پیش‌بینی شده است.

پژوهش فرناندز-گارسیا و همکاران (۲۰۱۹) بیانگر دقت بیشتر این الگوریتم در مقایسه با جنگل تصادفی در پیش‌بینی فرآیندهای خاکی پیچیده بود که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. در این پژوهش، دقت جنگل تصادفی در مقایسه با درخت تصمیم و شیب بوستینگ کمتر بود ( $R^2 \approx 0.32$ ). عملکرد مدل‌های XGBoost ( $R^2=0.36$ ,  $CCC=0.55$ ) و LightGBM ( $R^2=0.35$ ,  $CCC=0.54$ ) متوسط بود که با یافته‌های پیشین در زمینه پیش‌بینی رطوبت خاک هم‌راستا است. نتایج پژوهش لامیچان و همکاران (۲۰۲۵) نیز مؤید آن بود که ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با مدل‌های فیزیکی تصمیم‌پذیری را در مناطق با داده محدود افزایش داد.

#### تحلیل دقیق سه مدل برتر

بیشترین دقت مربوط به مدل درخت تصمیم ( $R^2=0.44$ ) بود که به‌طور قابل توجهی گویای تغییرات شاخص WDPT بود. برپایه شکل ۶، بخش



شکل ۶- مقایسه اندازه‌های واقعی و پیش‌بینی شده شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT) به‌وسیله سه مدل برتر (خط قرمز نقطه‌چین بیانگر حالت ایده‌آل پیش‌بینی ( $y = x$ ) است).

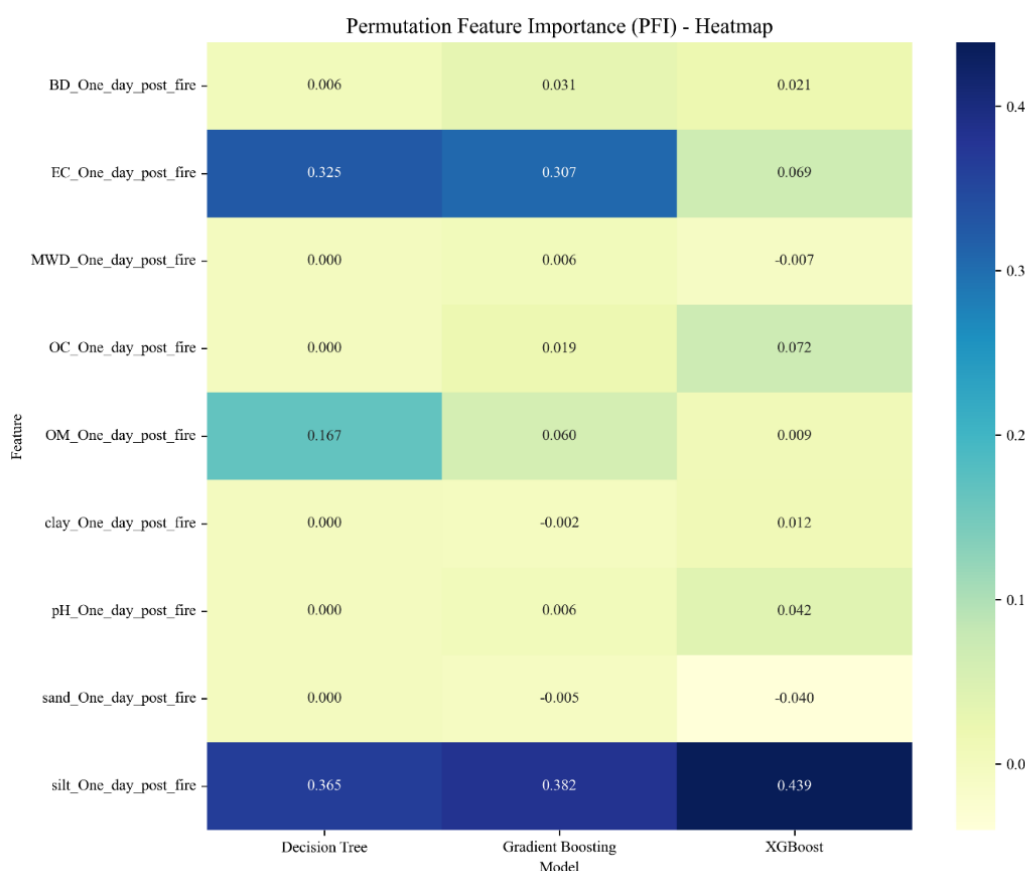
Figure 6- Comparison of observed versus predicted soil water repellency (WDPT) values by the top three models (the red dashed line represents the ideal prediction scenario, ( $y = x$ )).

این نتایج با یافته‌های لامیچان و همکاران (۲۰۲۵) و فریدمن (۲۰۰۱) همخوانی دارد. عملکرد مدل KNN ( $R^2=0.42$ )، به‌رغم سادگی نسبی، مشابه درخت تصمیم و شیب بوستینگ بود، اما به توزیع داده‌ها و

عملکرد مدل شیب بوستینگ ( $R^2=0.43$ ) مشابه درخت تصمیم بود و در محدوده اندازه‌های میانی WDPT دقیق بود، اما پراکندگی آن در اندازه‌های حدی (خیلی کم یا خیلی زیاد) بیشتر بود.

درخت تصمیم، شیب بوستینگ و ایکس‌جی‌بوست استفاده شد. نتایج نشان داد در هر سه مدل، بیشترین اهمیت مربوط به درصد سیلت یک روز پس از آتش‌سوزی است (شکل ۷). این نتایج مؤید نقش مهم بافت خاک در پایداری آب‌گریزی است. این یافته در پژوهش‌های دوئر و توماس (۲۰۰۰) و بنتو-گونسالوز و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش شده است.

انتخاب سنجه  $k$  حساس بود و اندازه MAE آن بیشتر (۲/۳۳) بود که با یافته‌های کاور و هارت (۱۹۶۷) هم‌راستا است. نتایج این پژوهشگران مؤید حساسیت  $k$  به ساختار داده و انتخاب همسایگی است. در تحلیل حساسیت و شناسایی مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر شاخص آب‌گریزی خاک پس از آتش‌سوزی، از روش اهمیت ویژگی جایگشتی روی سه مدل برتر یعنی



شکل ۷- اهمیت ویژگی‌های خاک در پیش‌بینی شاخص آب‌گریزی بر اساس روش اهمیت ویژگی جایگشتی برای سه مدل یادگیری ماشین منتخب.

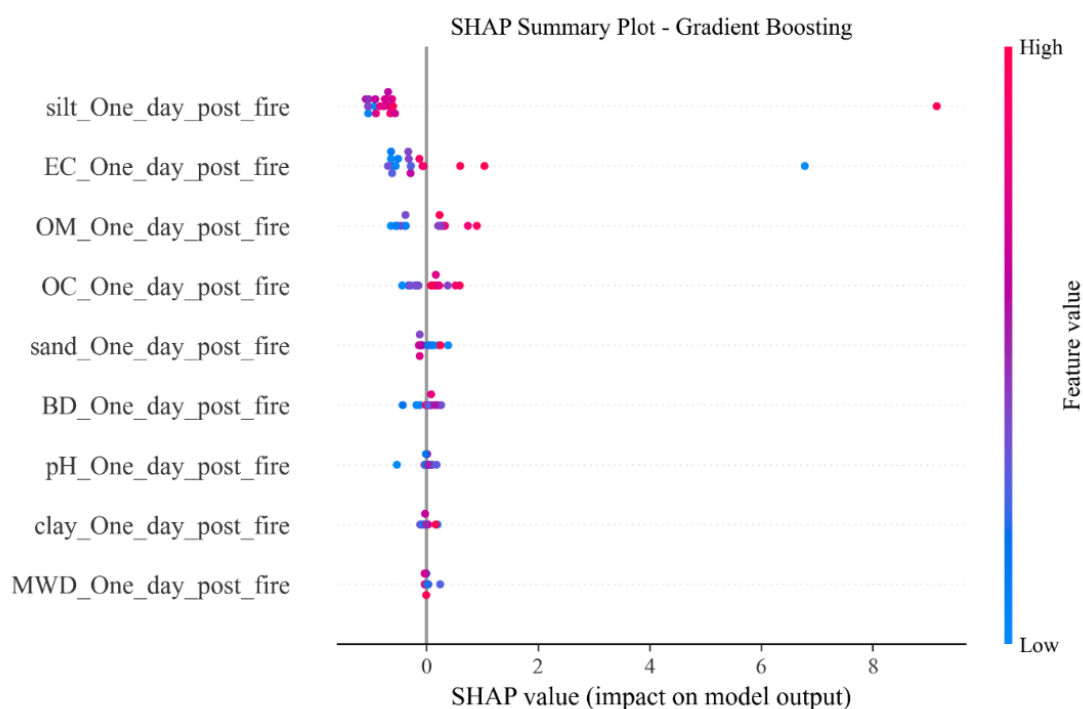
Figure 7- Importance of soil features in predicting the soil water repellency index based on the Permutation Feature Importance method for three selected machine learning models.

آتش‌سوزی سبب افزایش پایداری آب‌گریزی خاک می‌شود، هم‌راستا است. با بهره‌گیری از مدل شیب بوستینگ، می‌توان اثر غیرخطی و برهم‌کنش ویژگی‌ها را بهتر نشان داد، در حالی که حساسیت

افزون بر درصد سیلت، جایگاه هدایت الکتریکی و ماده آلی نیز در هر سه مدل نیز مهم بود (شکل ۷). این نتایج با یافته‌های بودی و همکاران (۲۰۱۳) مبنی بر اینکه افزایش هدایت الکتریکی و ماده آلی پس از

مربوط به افزایش سیلت است (شکل ۸). همچنین، اثر هدایت الکتریکی به‌طور معناداری کمتر از دیگر ویژگی‌ها بود. این یافته نشان‌دهنده تعامل پیچیده عامل‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. در پژوهش‌هایی استفاده از SHAP به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای شفاف‌سازی تصمیمات مدل‌های یادگیری ماشین در علوم خاک گزارش شده است (لاندربرگ و لی ۲۰۱۷؛ مولنار ۲۰۲۰).

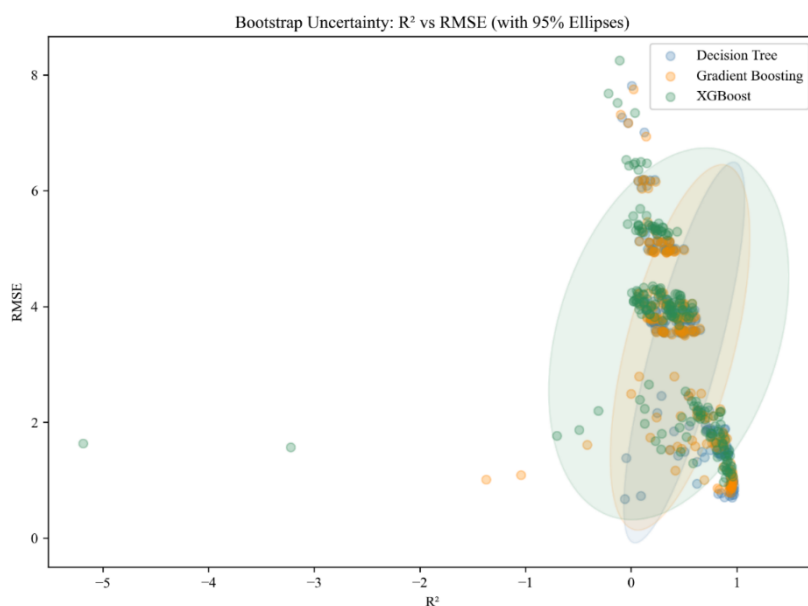
ایکس‌جی‌بوست افزون بر سیلت، به درصد شن و پایداری خاکدانه نیز زیاد بود. این یافته با نتایج پژوهش ژائو و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر اینکه این مدل در داده‌های با تنوع بافتی زیاد به ویژگی‌های ساختاری خاک، حساسیت بیشتری دارد، مطابقت دارد. برای تکمیل تحلیل حساسیت، از روش SHAP نیز استفاده شد. با بهره‌گیری از این روش سهم نسبی هر متغیر و جهت اثر آن بر خروجی مدل بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین اثر بر شاخص WDPT



شکل ۸- چکیده SHAP برای مدل شیب بوستینگ در پیش‌بینی شاخص آب‌گریزی خاک (WDPT).  
Figure 8- SHAP summary plot for the Gradient Boosting model in predicting the soil water repellency index (WDPT).

(۲۰۲۲) نیز تأکید شده است. نتایج این پژوهش‌ها بیانگر آن است که در مدیریت پایدار پس از آتش‌سوزی، نمی‌توان فقط به یک دسته از ویژگی‌های خاک (مثلاً بافت یا ویژگی شیمیایی) اکتفا کرد.

به‌طور کلی نتایج تحلیل حساسیت نشان داد ترکیب عامل‌های فیزیکی (بافت خاک) و شیمیایی (هدایت الکتریکی و ماده آلی) در مهار آب‌گریزی پس از آتش‌سوزی تعیین‌کننده است. این هم‌افزایی در پژوهش‌های جدیدتر مانند مارکوت و همکاران



شکل ۹- پراکنش شاخص‌های عملکرد  $R^2$  و RMSE برای سه مدل منتخب بر اساس بازنمونه‌گیری بوت‌استرپ، همراه با بیضی‌های اطمینان ۹۵٪ برای هر مدل.

Figure 9- Scatter plot of  $R^2$  and RMSE performance metrics for the three selected models based on bootstrap resampling, with 95% confidence ellipses for each model.

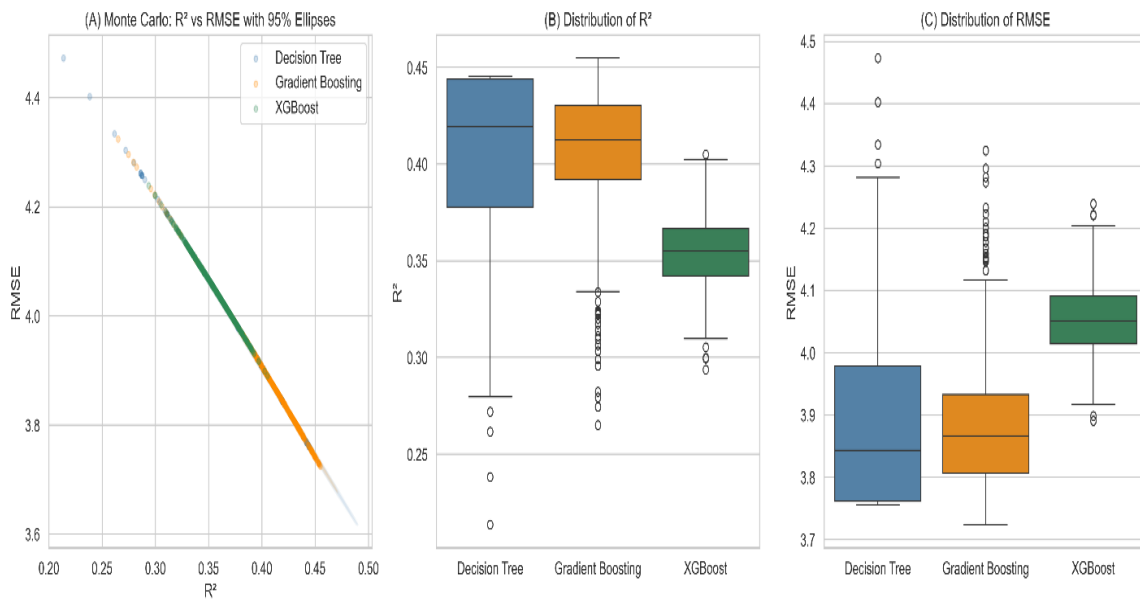
#### تحلیل نبودن قطعیت Bootstrap

درخت تصمیم و شیب بوستینگ بیانگر پایداری و دقت بیشتر و عملکرد قابل‌اعتمادتر این مدل‌ها در پیش‌بینی با شرایط مختلف داده‌ای بود. این نتایج با یافته‌های فرانک و همکاران (۲۰۱۱) و هستی و همکاران (۲۰۰۹) مبنی بر اینکه در شرایط داده‌های محدود و ناهمگن، ثبات و پایداری مدل‌های ساده‌تر یا مرحله‌ای بیشتر است و عملکرد آنها در پیش‌بینی‌های برون‌نمونه قابل اعتمادتر است، همخوانی دارد.

#### شبیه‌سازی مونت‌کارلو

به‌منظور ارزیابی نبودن قطعیت ناشی از نویز ورودی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۵۰۰ تکرار روی مدل شیب بوستینگ اجرا شد. در هر تکرار، به داده‌های آزمون نویز تصادفی معادل ۵٪ از انحراف معیار هر ویژگی افزوده شد و سپس پیش‌بینی‌ها ثبت شد. در ادامه میانگین پیش‌بینی‌ها و بازه اطمینان ۹۵٪ محاسبه و در کنار اندازه‌های واقعی رسم شد (شکل ۱۰).

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد پایداری نسبی الگوریتم‌های درخت تصمیم و شیب بوستینگ با میانه  $R^2$  حدود ۰/۴۵ و دامنه پراکندگی محدود، در برابر تغییرات داده بیشتر است (شکل ۹). از سوی دیگر، الگوریتم ایکس‌جی‌بوست با وجود داشتن میانه مشابه، در تعدادی از بازنمونه‌گیری‌ها اندازه‌های  $R^2$  آن منفی و RMSE زیاد بود. این یافته نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این الگوریتم به تغییرات جزئی در داده‌های ورودی و احتمال بیش‌برازش در مجموعه‌های کوچک است. تحلیل بیضی‌های اطمینان نشان داد درخت تصمیم و شیب بوستینگ خوشه‌های متراکم‌تری در فضای عملکرد ایجاد کرده‌اند. با ارزیابی بیضی‌های اطمینان، پراکندگی نتایج مدل‌ها به‌شکل گرافیکی بررسی شد. از سوی دیگر، اندازه و شکل این بیضی‌ها نیز بیانگر اطلاعاتی در زمینه پایداری مدل‌ها در برابر تغییرات داده‌ها بود. بیضی‌های کوچکتر و متراکم‌تر در



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو برای سه مدل درخت تصمیم، شیب بوستینگ و ایکس‌جی‌بوست شامل (A): پراکنش  $R^2$ -RMSE همراه با بیضی اطمینان ۹۵٪، (B) توزیع  $R^2$ ، و (C) توزیع RMSE.

Figure 10- Monte Carlo simulation results for the three models (Decision Tree, Gradient Boosting, and XGBoost), including: (A)  $R^2$ -RMSE scatter plot with 95% confidence ellipse, (B)  $R^2$  distribution, and (C) RMSE distribution.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان داد اثر آتش‌سوزی بر آب‌گریزی خاک، شدید اما کوتاه‌مدت بود. شاخص WDPT در روز نخست پس از آتش-سوزی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت، اما پس از یک هفته به‌طور چشمگیری کاهش یافت و در پایان ماه نخست تقریباً به صفر رسید. از این‌رو، پایداری آب‌گریزی در خاک‌های منطقه محدود به بازه‌ای کوتاه‌مدت بود. مدل‌سازی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین نشان داد بهترین عملکرد در پیش‌بینی WDPT مربوط به درخت تصمیم و شیب بوستینگ بود و با بهره‌گیری از آنها می‌توان بخش قابل توجهی از تغییرات داده‌ها را توضیح داد. از سوی دیگر، عملکرد مدل‌های پیچیده‌تر مانند ایکس‌جی‌بوست و LightGBM متوسط بود و عملکرد برخی مدل‌ها مانند SVM و وایزی بیزین کم‌تر بود. این یافته بیانگر آن است که در شرایط داده‌های کوچک و ناهمگن،

نتایج شبیه‌سازی بیانگر هم‌خوانی زیاد میان میانگین پیش‌بینی‌ها (خط آبی) با اندازه‌های مشاهده‌شده بود و در اغلب نمونه‌ها، باند اطمینان ۹۵٪ (ناحیه آبی) باریک باقی ماند (شکل ۱۰). این یافته بیانگر اطمینان و دقت زیاد مدل در شرایط معمولی است. با این حال، در اندازه‌های حدى شاخص نفوذپذیری آب در خاک (خیلی زیاد یا خیلی کم)، پهنای باند افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد نبودن قطعیت در شرایط غیرمعمول یا داده‌های کم‌نمونه است. این یافته با نتایج پژوهش‌های مارکوت و همکاران (۲۰۲۲) و فرناندز-گارسیا و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اینکه مدل‌ها در محدوده داده‌های پرت یا کم‌نمونه، به‌دلیل نبود الگوهای مشابه در داده‌های آموزشی، پیش‌بینی‌هایی با اطمینان کمتر ارائه می‌دهند، مطابقت دارد.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

نویسنده چهارم: طراحی مطالعه، نظارت بر اجرای پژوهش، بازبینی متن مقاله

نویسنده پنجم: ارائه راهنمایی‌های تخصصی، بازبینی و ویرایش علمی مقاله

انتخاب مدل‌های ساده‌تر یا مرحله‌ای می‌تواند مناسب‌تر باشد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که درصد سیلت، هدایت الکتریکی و ماده آلی سه عامل مهم در مهار WDPT پس از آتش‌سوزی است. از این‌رو، هم ویژگی‌های فیزیکی و هم تغییرات شیمیایی خاک در شکل‌گیری آب‌گریزی نقش دارند. نتایج بررسی نبودن قطعیت نیز نشان داد پایداری درخت تصمیم و شیب بوستینگ در خروجی‌ها بیشتر بود و در بیشتر نمونه‌گیری‌ها نتایج آنها مشابه بود، در حالی که ایکس‌جی‌بوست حساسیت بیشتری به تغییرات نشان داد. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیز نشان داد اطمینان پیش‌بینی‌ها در محدوده اندازه‌های معمول WDPT زیاد بود، اما در اندازه‌های حدی نبودن قطعیت افزایش یافت.

بر پایه یافته‌های این پژوهش پیشنهاد می‌شود از مدل‌های ساده‌تر یا الگوریتم‌های شیب بوستینگ با تنظیمات پایدار که ابزار مناسبی برای پیش‌بینی پدیده آب‌گریزی هستند، بهره‌گیری شود. افزون بر این، از دیدگاه مدیریتی، پیشنهاد می‌شود در هفته‌های نخست پس از آتش‌سوزی اقدامات پیشگیرانه که نقش و اهمیت ویژه‌ای دارند، انجام شود تا اثرات منفی بر پایداری خاک کاهش یابد و فرسایش سطحی مهار شود.

### فهرست منابع

- Almajmaie A, Hardie M, Acuna T, Birch C. 2017. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability. *Soil and Tillage Research*. 167:39-45. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2016.11.003>
- Alzubaidi L, Zhang J, Humaidi AJ, Al-Dujaili A, Duan Y, Al-Shamma O, Santamaría J, Fadhel MA, Al-Amidie M, Farhan L. 2021. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*. 8(1):1-74. <https://doi.org/10.1186/S40537-021-00444-8>
- Arunrat N, Kongsurakan P, Solomon LW, Sreenonchai S. 2024. Fire Impacts on Soil Properties and Implications for Sustainability in Rotational Shifting Cultivation: A Review.

- Agriculture. 14(9):1660-1675. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091660>
- Atanassova I, Doerr SH. 2011. Changes in soil organic compound composition associated with heat-induced increases in soil water repellency. *European Journal of Soil Science*. 62(4):516-532. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01350.x>
- Bento-Gonçalves A, Vieira A, Úbeda X, Martin D. 2012. Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma*. 191:3-13. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2012.01.004>
- Beretta AN, Silbermann AV, Paladino L, Torres D, Bassahun D, Musselli R, García-Lamohte A. 2014. Análisis de textura del suelo

con hidrómetro: Modificaciones al método de Bouyoucus. *Ciencia e Investigación Agraria*. 41(2):263–271. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013>

Bhardwaj AP. 2025. Modeling the Long-Term Effectiveness of Prescribed Burns in Reducing Wildfire Risk (Master's thesis, State University of New York at Buffalo). ProQuest Dissertations and Theses Global).

Bodí MB, Muñoz-Santa I, Armero C, Doerr SH, Mataix-Solera J, Cerdà A. 2013. Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires. *Catena*. 108:14–25.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.002>

Bonanomi G, Motti R, Abd-ElGawad AM, Idbella M. 2024. Soil water repellency along elevation gradients: The role of climate, land use and soil chemistry. *Geoderma*. 443:116847. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116847>

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Certini G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*. 143(1):1–10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>

Chen L, Ren C, Li L, Wang Y, Zhang B, Wang Z, Li L. 2019. A comparative assessment of geostatistical, machine learning, and hybrid approaches for mapping topsoil organic carbon content. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 8(4): 174–180.

Cover TM, Hart PE. 1967. Nearest Neighbor Pattern Classification. *IEEE Transactions on Information Theory*. 13(1):21–27. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>

Debano LF. 2000. Water repellency in soils: A historical overview. *Journal of Hydrology*. 231–232:4–32. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00180-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00180-3)

Doerr SH, Santín C. 2016. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 371(1696):1–12. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2015.0345>

Doerr SH, Shakesby RA. 2011. Handbook of Soil Sciences Properties and Processes, second edition. In: Handbook of Soil Sciences Properties and Processes, second edition. CRC press, Taylor and Francis group. pp. 515–525. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51269-7.50023-0>

Doerr SH, Shakesby RA, MacDonald LH. 2009. Soil water repellency: a key factor in post-fire erosion. In: Cerdà A, Robichaud PR,

Editors. *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Science Publishers, New Hampshire, Enfield, NH. pp. 197–223. <https://doi.org/10.1201/9781439843338>

Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. 2000. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*. 51(1–4): 33–65. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8)

Doerr SH, Thomas AD. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*. 231–232:134–147. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00190-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00190-6)

Enang RK, Yerima BPK, Kome GK, Van Ranst E. 2018. Assessing the Effectiveness of the Walkley-Black Method for Soil Organic Carbon Determination in Tephra Soils of Cameroon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 49(19):2379–2386. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1510948>

Fernández-García V, Miesel J, Baeza MJ, Marcos E, Calvo L. 2019. Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire. *Applied Soil Ecology*. 135:147–156. <https://doi.org/10.1016/J.APSSOIL.2018.12.002>

Flannigan MD, Krawchuk MA, De Groot WJ, Wotton BM, Gowman LM. 2009. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*. 18(5):483–507. <https://doi.org/10.1071/WF08187>

Frank E, Hall MA, Witten IH. 2011. Data mining: Practical machine learning tools and techniques. 3<sup>rd</sup> ed. Elsevier (Morgan Kaufmann), Burlington, MA, USA. pp. 1–664. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-19715-5>

Friedman JH. 2001. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*. 29(5):1189–1232. <https://doi.org/10.1214/AOS/1013203451>

González-Pelayo O, Prats SA, van den Elsen E, Malvar MC, Ritsema C, Bautista S, Keizer JJ. 2024. The effects of wildfire frequency on post-fire soil surface water dynamics. *European Journal of Forest Research*. 143(2):493–508. <https://doi.org/10.1007/S10342-023-01635-Z/METRICS>

Gu C, Zhou Q, Cusick RD, Margenot AJ. 2021. Evaluating agronomic soil phosphorus tests for soils amended with struvite. *Geoderma*. 399:115093. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115093>

- Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. 2009. *The Elements of Statistical Learning*. 2nd ed. Springer, New York, USA. pp. 1–745. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Heidary K, Najafinejad A, Mohammadian Behbahani A, Ownegh M. 2018. Assessment of soil water repellency intensity and its temporal variability after prescribed fire in forest areas of toshen watershed, Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*. 25(4):27–47. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14663.2960>
- Jordán A, Zavala L, Mataix-Solera J, Doerr S. 2013. Soil water repellency: origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena*. 108:1–5. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816213001057>
- Kargas G, Londra P, Sgoubopoulou A. 2020. Comparison of soil EC values from methods based on 1:1 and 1:5 soil to water ratios and ECe from saturated paste extract based method. *Water*. 12(4):1010. <https://doi.org/10.3390/W12041010>
- Kuhn M. 2008. Building predictive models in R using the caret package. *Journal of Statistical Software*. 28(5):1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Lamichhane M, Mehan S, Mankin KR. 2025a. Soil moisture prediction using remote sensing and machine learning algorithms: A Review on Progress, Challenges, and Opportunities. *Remote Sensing*. 17(14):2397. <https://doi.org/10.3390/RS17142397/S1>
- Lundberg SM, Lee SI. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017-December: pp. 4765–4774. <https://arxiv.org/pdf/1705.07874>
- Lusito S, Pugnana A, Guidotti R. 2024. Solving imbalanced learning with outlier detection and features reduction. *Machine Learning*. 113(8):5273–5330. <https://doi.org/10.1007/S10994-023-06448-0/TABLES/24>
- Mahmoudzadeh H, Matinfar HR, Taghizadeh-Mehrjardi R, Kerry R. 2020. Spatial prediction of soil organic carbon using machine learning techniques in western Iran. *Geoderma Regional*. 21:e00260. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2020.E00260>
- Marcotte AL, Limpens J, Stoof CR, Stoorvogel JJ. 2022. Can ash from smoldering fires increase peatland soil pH? *International Journal of Wildland Fire*. 31(6):607–620. <https://doi.org/10.1071/WF21150>
- Moghaddam DD, Rahmati O, Haghizadeh A, Kalantari Z. 2020. A Modeling Comparison of Groundwater Potential Mapping in a Mountain Bedrock Aquifer: QUEST, GARP, and RF Models. *Water*. 12(3):679. <https://doi.org/10.3390/W12030679>
- Molnar C. 2020. *Interpretable Machine Learning*. 1st ed. Lulu.com, Morrisville, NC, USA. pp. 1–318. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book>
- Nelson DW, Sommers LE. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page AL, Editor. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. pp. 539–579. <https://doi.org/10.2134/AGRONMONOGR9.2.2ED.C29>
- Padarian J, Minasny B, McBratney AB. 2020. Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. *Soil*. 6(1): 35-52.
- Panyavaraporn J, Horkaew P, Arjwech R, Eua-apiwatch S. 2025. Machine learning approaches for soil moisture prediction using ground penetrating radar: A Comparative Study of Tree-Based Algorithms. *Earth*. 6(3):98. <https://doi.org/10.3390/EARTH6030098>
- Qi L, Li X, Pan Y, Yu T. 2025. Impacts of forest fire on hydro-sediment using the SWAT model: a case study in the Zhangweinan Canal, China. *Acta Geophysica*. 73(5):4761–4780. <https://doi.org/10.1007/S11600-025-01634-1/TABLES/12>
- Rahmati O, Kalantari Z, Samadi M, Uuemaa E, Moghaddam DD, Nalivan OA, Destouni G, Bui DT. 2019. GIS-based site selection for check dams in watersheds: Considering geomorphometric and topo-hydrological factors. *Sustainability*. 11(20):5639. <https://doi.org/10.3390/SU11205639>
- Salmerón-Gómez R, García-García CB, García-Pérez JA. 2020. Overcoming the inconsistencies of the variance inflation factor: A redefined VIF and a test to detect statistical troubling multicollinearity. *Sociological Methods and Research*. 51(1): 150–189. <https://doi.org/10.1177/0049124119882452>
- San-Miguel-Ayanz J, Durrant T, Boca R, Libertà G, Branco A, DE R, Ferrari D, Maianti P, Artes VT, Pfeiffer H. 2018. Luxembourg: publications office of the European Union, European Commission Joint Research Centre. pp. 1–175.
- Shakesby RA, Doerr SH, Walsh RPD. 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity:

Current problems and future research directions. *Journal of Hydrology*. 231–232:178–191.

[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00193-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00193-1)

Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12<sup>th</sup> edition. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington DC.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1581780>

Then M, Shemehsavar S, Henry DJ, Harper RJ. 2025. The effects of climatic and soil properties on soil water repellency. *Catena*. 258:109218.

<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2025.109218>

Zádorová T, Skála J, Žížala D, Vaněk A, Penížek V. 2021. Harmonization of a large-scale national soil database with the World Reference Base for Soil Resources 2014. *Geoderma*. 384:114819.

<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114819>

Zhao G, Gao P, Tian P, Sun W, Hu J, Mu X. 2020. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *Catena*. 185:104284.

<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104284>



## Application of Machine Learning Algorithms in Analyzing the Effect of Fire on Soil Water Repellency in Tushan Watershed, Golestan Province

Kohzad Heidary<sup>1\*</sup>, Ali Najafi Nejad<sup>2</sup>, Ali Mohammadian Behbahani<sup>3</sup>, Majid Ownegh<sup>4</sup>,  
Louis.W. Dekker<sup>5</sup>

- 1- Research Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran
- 2- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan, Iran
- 3- Associate Professor, Department of Desert Area Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan, Iran
- 4- Professor, Department of Desert Areas Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
- 5- Environmental Sciences Department, Soil Physics and Land management Group, Wageningen University and research, Wageningen, Netherlands

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

In recent decades, forest fires have been recognized as one of the most important environmental threats to forest and rangeland ecosystems. In addition to destroying vegetation and habitats, this phenomenon also severely changes the physical and chemical properties of the soil, the most important of which is the occurrence of the phenomenon of soil water repellency. Soil water repellency can lead to increased surface runoff, reduced permeability, increased erosion, and ultimately reduced ecosystem stability. In recent years, the occurrence of successive and widespread fires in the Hyrcanian forests of northern Iran, particularly in Golestan Province, has caused serious concerns in the field of natural resource management. Despite numerous studies worldwide, domestic research on the effect of fire on soil water repellency, especially the use of new modeling approaches such as machine learning algorithms, is still limited. On the other hand, traditional approaches such as the Water Drop Penetration Time (WDPT) test or ethanol test, although useful for initial identification, cannot model the complex and nonlinear relationships between soil properties and water repellency intensity. Therefore, this study aimed to investigate the temporal changes in soil water repellency after fire and evaluate the power of Machine learning (ML) algorithms in predicting the WDPT index in the Tushan watershed of Golestan Province.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** k.heidary@areeo.ac.ir

**Citation:** Heidary, K., Najafi Nejad, A., Mohammadian Behbahani, A., Ownegh, M., Dekker, L.W. 2026. Application of Machine Learning Algorithms in Analyzing the Effect of Fire on Soil Water Repellency in Tushan Watershed, Golestan Province. *Watershed Management Research*. 39(2): 20-43.

**DOI:** 10.22092/wmrj.2025.370992.1637

**Received:** 12 October 2025, **Received in revised form:** 27 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 20-43.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



In addition, this research, while addressing existing scientific limitations, provided a practical tool for managing fire risks and planning post-fire recovery.

### Materials and Methods

The study was conducted in the Tushan watershed in Golestan Province, part of the Hyrcanian Forests registered on the UNESCO World Heritage List. The climate of the region is semi-humid to humid, with an average annual rainfall of 620 mm and mean temperature of 16 °C. The soils in the region are mainly loess with silty loam texture and high organic matter content, which provide conditions susceptible to the formation of soil water repellency after fire. The experimental design was factorial and was designed in a completely randomized design with two main factors including land-use type and fire treatment (burned vs. control). Soil samples were collected at three time intervals (one day, one week, and one month after the fire) and at two depths (0–5 and 5–10 cm), and total of 96 samples were collected. Physical and chemical properties of the soil, including texture, pH, EC, OC, OM, aggregate stability, bulk density, were measured. The soil water repellency intensity was measured by the WDPT test. After entering the data into the Python environment, they were preprocessed; outliers were identified using the IQR method but not removed, normalization was performed using Z-score, and the collinearity of variables was checked using VIF. Then, the data was divided into two parts: training (70%) and testing (30%). Twelve ML algorithms were implemented for modeling, including basic, neighborhood-based, aggregate, and hybrid models. Optimization of the hyperparameters was performed using Bayesian search and five-way cross-validation. The performance of the model was evaluated with  $R^2$ , RMSE, MAE, NSE, and CCC indices. In addition, sensitivity analysis was performed using PFI and SHAP methods, and uncertainty analysis was performed using bootstrap and Monte Carlo simulations.

### Results and Discussion

The results show that the effect of fire on soil water repellency was severe but short-lived. The average WDPT one day after the fire was 2.5 minutes, indicating a significant increase in water repellency. In the first week, this decreased to less than a minute and after a month, it was almost zero. This finding indicates the transient nature of the effect of fire on soil surface water repellency. Statistical analyses ANOVA showed that the effects of fire treatment and its interaction with time and land-use on WDPT was significant. Among ML models, the best performance was for Decision Tree ( $R^2=0.44$ ) and Gradient Boosting ( $R^2=0.43$ ), while models such as SVM and Bayesian inference were less accurate. The results of sensitivity analysis showed that silt, EC, and OM were the most important variables in predicting WDPT. SHAP results also showed that increasing silt and OM increased water repellency, while increasing EC had a decreasing effect. The uncertainty analysis indicated that simpler models such as Decision Tree were more robust to outliers, while the uncertainty of more complex models increased at extreme WDPT values. Based on these findings, soil water repellency after fire can be predicted more accurately and stably using simple or boosting-based models.

### Conclusion and Suggestions

This study demonstrated that the effect of fire on soil water repellency in the Tushan watershed was severe but short-lived, and this effect completely disappeared within one month. By using machine learning algorithms, especially Decision Tree and Gradient Boosting, complex relationships between soil properties and water repellency intensity can be modeled with acceptable accuracy. The results of sensitivity and uncertainty analysis showed that variables such as silt, EC, and OM played an important role in the formation of water repellency. Based on the findings of this study, it is suggested that for post-fire management, soil water repellency should be monitored in the short-term and simple and stable models should be used to predict its changes. In addition, by combining field data and remote sensing data and developing regional models, it is possible to improve fire risk management. As a result, it is suggested that future research should examine the long-term effects of fire on other soil properties and ecosystem functions, and that deep learning algorithms be used to increase the accuracy of predictions.

**Keywords:** Forest fire, machine learning algorithms, sensitivity analysis, soil water repellency, uncertainty

**Article Type:** Research Article

**Conflicts of interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

**Data Availability Statement**

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

**Authors' Contribution**

Author 1: Software/statistical analyses, Writing – original draft preparation

Author 2: Supervision, editing and reviewing the article, reviewing the results

Author 3: Conceptualization, consulting, reviewing the text of the article, statistical analyses

Author 4: Study design, supervising the implementation of the research, reviewing the text of the article

Author 5: Providing expert guidance, reviewing and editing the article



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آب‌نخرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مركز تحقيقات آموزش منابع طبيعي فارس

## تغییرپذیری زمانی-مکانی اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آینده آبخیزهای کشور

- سیدحمیدرضا صادقی<sup>۱</sup>، علی نصیری‌خیایوی<sup>۲</sup>، رضا چمنی<sup>۳</sup>، نگین بهنیا<sup>۴</sup>، وحید موسوی<sup>۵</sup>، حمید نوری<sup>۶</sup>،  
پدیده‌السادات صادقی<sup>۷</sup>، محمدحسین شوشتری<sup>۸</sup>، عبدالواحد خالدی‌درویشیان<sup>۹</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۱۰</sup>، حمیدرضا مرادی رکابدارکلانی<sup>۱۱</sup>  
۱، ۱۰- استاد گروه مهندسی آب‌نخرداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
۲- پژوهشگر مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، اردبیل، ایران  
۳ و ۴- پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آب‌نخرداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
۵ و ۹- دانشیار گروه مهندسی آب‌نخرداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
۶- دانشیار گروه مرتع و آب‌نخرداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران  
۷- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب‌نخرداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
۸- دانش‌آموخته دکتری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

سلامت آبخیز یک واژه گسترده و دربرگیرنده منابع آبی، کیفیت بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، جامعه‌های گیاهی و جانوری، گیاهان بومی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، فرآیندهای بارش-رواناب، ویژگی‌های ریخت‌شناسی است. امنیت آبی و غذایی کشور به‌عنوان اصلی‌ترین اهداف کلان ملی به‌دلیل مدیریت ناصحیح منابع آب و سرزمین، در معرض تهدید است. از سوی دیگر، ارزیابی و مدیریت جامع آبخیزها، در جامعه‌های علمی بین‌المللی به‌عنوان رویکردی مؤثر و کارا برای مدیریت آب، سرزمین و منابع وابسته به آن‌ها و ایجاد تعادل میان نیازهای اقتصادی-اجتماعی جامعه‌های آبخیزنشین و سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. افزون بر این، آگاهی از سلامت آبخیزها یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین بخش‌ها در مدیریت پایدار و جامع آبخیزها به‌شمار می‌آید. از این‌رو، در این پژوهش اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آبخیزهای رده سوم کشور، پیش‌بینی شد.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: sadeghi@modares.ac.ir

استناد: صادقی، س. ح. ر.، نصیری‌خیایوی، ع.، چمنی، ر.، بهنیا، ن.، موسوی، و.، نوری، ح.، صادقی، پ.، شوشتری، م. ح.، خالدی‌درویشیان، ع.، وفاخواه، م.، مرادی رکابدارکلانی، ح. ر. ۱۴۰۵. تغییرپذیری زمانی-مکانی اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آینده آبخیزهای کشور. پژوهش‌های آب‌نخرداری. ۳۹(۲): ۶۲-۴۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.371015.1638

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آب‌نخرداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۴۴ تا ۶۲.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



## مواد و روش‌ها

برای دستیابی به هدف پژوهش، بیش از ۵۲۰ معیار مختلف مرتبط با شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ از عامل‌های محیطی، اقلیمی و انسانی برای حدود ۶۴۰ آبخیز شناسایی و جمع‌آوری شد. سپس، به دلیل همبستگی درونی معیارها، از آزمون تورم پراکنش برای کاهش داده‌ها و حذف معیارهای هم‌راستا استفاده شد. در پایان، شاخص‌های نهایی در دو دسته ایستا و پویا تعریف شدند. در ادامه، معیارهای اثرگذار بر وضعیت سلامت و امنیت آبخیزها با دقت مکانی مطلوب زیرآبخیزها و در مدل PSR استخراج و اندازه معیارها برای شرایط کنونی (۲۰۲۳) محاسبه شد. پس از تعیین معیارهای پویا، از روش‌های مختلف شامل وایزی، مدل SARIMA و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شد و معیارهای پویا برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ پیش‌بینی شد. پس از پیش‌بینی معیارهای پویا، دوباره مدل مفهومی PSR برای سال‌های آینده استفاده شد و سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در نرم‌افزار ARC-GIS نسخه ۱۰/۸ پهنه‌بندی شد. برای ارزیابی وضعیت آینده، پیش‌بینی شاخص‌های پویا بر اساس داده‌های زمانی سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ انجام شد و اثر هر شاخص بر سلامت آبخیز تحلیل شد.

## نتایج و بحث

تحلیل پهنه‌بندی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان‌دهنده توزیع ناهمگون وضعیت سلامت آبخیزها بود. در مناطق شمالی (گیلان، مازندران) به دلیل بارندگی زیاد و پوشش گیاهی مترکم، سلامت آبخیزها مطلوب (۶۰ تا ۷۰ درصد در طبقات خوب و بسیارخوب) بود. از سوی دیگر، وضعیت مناطق جنوبی (هرمزگان، سیستان و بلوچستان) به دلیل کم‌بارشی و فعالیت‌های نامناسب انسانی، ضعیف‌تر (۴۰ تا ۵۰ درصد در طبقات متوسط تا ضعیف) بود. بر این اساس در سال‌های آینده، سلامت مناطق شمال‌غربی نسبتاً کاهش خواهد یافت، درحالی‌که مناطق شرقی (مانند خراسان‌رضوی) به دلیل خشک‌سالی و برداشت بی‌رویه آب، به شدت آسیب خواهد دید و سلامت آنها به کمتر از ۲۰ درصد خواهد رسید. در مجموع نتایج نشان داد اثر شاخص پاسخ (حدود ۶۰ درصد) در مقایسه با شاخص‌های فشار و حالت بر سلامت سامانه آبخیزهای مطالعه‌شده بسیار بیشتر بود. از این‌رو، می‌توان گفت در سال‌های آینده (سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳) اندازه اثرگذاری تغییرات شاخص‌های مدل PSR بر شاخص سلامت آبخیز، قابل توجه نخواهد بود.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر پایه نتایج این پژوهش، مدیریت آبخیزها در آینده باید بر واکنش‌پذیری سریع استوار باشد زیرا، این مدیریت به‌طور فزاینده‌ای به اقدامات انطباقی مانند احیای پوشش گیاهی و مهار سیلاب وابسته خواهند شد. افزون بر این، اگرچه اثر فشارهای انسانی (حدود ۲۰ درصد) نسبتاً پایدار است، اما نوسانات آن نیازمند مدیریت یکپارچه فعالیت‌های بشری مانند کشاورزی و توسعه شهری است. از سوی دیگر، پایداری نسبی شاخص حالت (حدود ۱۹ درصد) بیانگر لزوم توجه به راهبردهای بلندمدت مانند حفاظت از منابع خاک و آب است. از این‌رو، ترکیب اقدامات کوتاه‌مدت انعطاف‌پذیر با سیاست‌های پایدار حفاظتی، ابزار مدیریت بهینه آبخیزها در تغییرات محیطی آینده خواهد بود. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش مؤید رویکرد پویا و سازگار در مدیریت آبخیزها است، به شیوه‌ای که ترکیب راهبردهای کوتاه‌مدت واکنشی مبتنی بر پایش (مانند تغییر موقت الگوی کشت در پاسخ به خشک‌سالی) و راهبردهای بلندمدت حفاظتی، بازخوردی برای اصلاح و تقویت راهبردهای بلندمدت و پایدار (مانند احیای بوم‌سازگان و مدیریت جامع منابع آب) و زمینه‌ساز ایجاد یک رویکرد مدیریت سازگار است و سبب هم‌بستگی سامانه‌ای میان این دو سطح شده و یا با بهبود آن ضامن حفظ سلامت آبخیزها در برابر تغییرات آینده است. بر اساس نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که نهادهای حاکمیتی مانند سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و وزارت نیرو، از یافته‌های این پژوهش در قالب آیین‌نامه‌های تخصیص بودجه برای طرح‌های آبخیزداری بهره‌گیرند.

## واژگان کلیدی

پیش‌بینی سلامت آبخیز، رویکرد مفهومی PSR، مدل‌سازی پویا، مدیریت جامع آبخیز

## مقدمه

سلامت آبخیز یک واژه گسترده و دربرگیرنده منابع آبی، کیفیت بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، جامعه‌های گیاهی و جانوری، گیاهان بومی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، فرآیندهای بارش-رواناب، ویژگی‌های ریخت‌شناسی است (جات و همکاران ۲۰۰۸؛ حزباوی و همکاران ۲۰۱۸؛ ابراهیمی گت‌کش و صادقی ۲۰۲۴). افزون بر این، بوم‌سازگان‌های سالم به‌طور طبیعی پویا و اغلب توانایی حفظ سلامت خود را دارند. با این حال، در بسیاری از بوم‌سازگان‌ها به دلیل تغییر کاربری زمین، افزایش بی‌رویه سطح برداشت آب زیرزمینی و ساخت سدها، وضعیت طبیعی آن‌ها دچار اختلال شده است (ماتو و همکاران ۲۰۱۸؛ مؤمنیان و همکاران ۲۰۱۸). از دیگر ویژگی‌های یک آبخیز سالم، داشتن ساختار و عملکرد لازم برای حفظ سلامت بوم‌سازگان‌های آبی، حاشیه آبی و خشکی‌زی است که دربرگیرنده وضعیت پوشش گیاهی مطلوب برای حمایت از فرآیندهای پویای آب‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی در محدوده تغییرات طبیعی آن‌ها باشد (لیانگ و همکاران ۲۰۱۰).

سلامت و پایداری آبخیز از مفاهیم مهم حفاظت و مدیریت پایدار آبخیزها به‌شمار می‌آید. ضرورت انجام این پژوهش نبودن یک چهارچوب مفهومی جامع و دستورالعمل عملیاتی و شفاف برای ارزیابی جامع آبخیزها، بود (صادقی و همکاران ۲۰۲۰؛ نصیری‌خیاوی و همکاران ۲۰۲۴). از دیگر ویژگی‌های بوم‌سازگان‌ها و زیستگاه‌های جانوری و گیاهی پیوستگی، اندازه مناسب و کیفیت مطلوب آب آن‌هاست. آبخیزها به سامانه‌های اقتصادی-اجتماعی وابسته‌اند، یعنی سلامت و رفاه جامعه‌های انسانی، با سلامت و رفاه آبخیزهایی که در آن زندگی می‌کنند ارتباط متقابل و تنگاتنگ دارد. از این‌رو، تعیین شاخص‌هایی در سلامت آبخیزها با درجه اطمینان قابل‌قبول، ضروری است (صادقی و همکاران ۲۰۱۹؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۰). در ارزیابی سلامت آبخیز، معیارها و شاخص‌های مهمی شامل عامل‌های انسانی، اقلیمی، آب‌شناسی، زمین‌شناسی، خاکی و پوشش گیاهی به‌عنوان معیار

شرایط کنونی سلامت آبخیز معرفی و توسعه داده‌شده است. در این راستا، استفاده جداگانه از هرکدام از این معیارها نمی‌تواند گویای وضعیت سلامت بوم‌سازگان مطالعه‌شده باشد. بر این اساس در این پژوهش ترکیبی از این معیارها مدنظر بود. اما، شیوه ترکیب و تلفیق این معیارها و شاخص‌ها بسته به شرایط پژوهشی متفاوت است و یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی سلامت منابع آب و خاک و بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. از این‌رو، مدل‌های مفهومی مختلفی برای تبیین این معیارها و شاخص‌ها در قالب یک چهارچوب مشخص ارائه شده‌اند (دای و همکاران ۲۰۰۷؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۳ الف و ب؛ حزباوی و صادقی ۲۰۱۶).

در پژوهشی لیانگ و همکاران (۲۰۱۰) امنیت محیط‌زیست پکن را با استفاده از مدل مفهومی فشار، حالت و پاسخ PSR بررسی و گزارش کردند که شاخص امنیت محیط‌زیست پکن از ۰/۵۸۹ در سال ۲۰۰۴ به ۰/۵۴۰ در سال ۲۰۰۸ کاهش یافت. آنها دلیل اصلی کاهش شاخص را اقتصاد پرسرعت در حال توسعه و افزایش فشار جمعیت، زمین، منابع و فشار محیط شهری معرفی کردند. در چین، در راستای ارزیابی نمونه‌ای سلامت آبخیز، وو و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از رویکرد مفهومی PSR وضعیت سلامت چندین بوم‌سازگان آبی در رودهای یانگ‌چنگ، چانگ‌دانگ و تاشان را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که وضعیت سلامت در رودهای یانگ‌چنگ و تاشان در وضعیت سالم و رود چانگ‌دانگ در وضعیت خطر بوم‌شناختی است. این پژوهشگران گزارش کردند فشار اجتماعی-اقتصادی و سلامت آبزیان دو عامل اصلی اثرگذار بر خطر محیط‌زیستی منطقه است. در استان کرمانشاه صادقی و همکاران (۲۰۲۳) اثرپذیری شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مدت یک دوره آماری را بررسی کردند. بر پایه نتایج این پژوهش در دوره‌های زمانی ۱۹۶۱ تا ۱۹۸۰، ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ اندازه تغییرات شاخص‌های سلامت آبخیز با افزایش

## مواد و روش‌ها

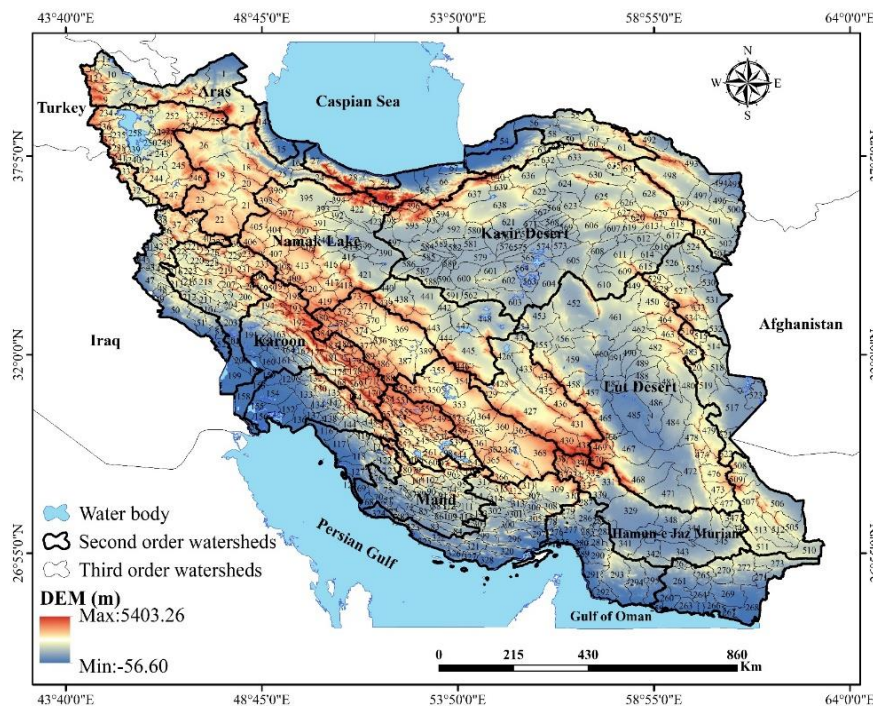
## معرفی منطقه مطالعه شده

گستره مطالعه شده در این پژوهش شامل ۶۴۰ آبخیز رده سوم کل کشور بود که پراکنش جغرافیایی آنها در شکل ۱ ارائه شده است. برای دستیابی به هدف اصلی پژوهش، ابتدا معیارها و شاخص‌های اثرگذار بر وضعیت سلامت و امنیت آبخیزهای اولویت‌دار رده سوم کشور با دقت مکانی مناسب زیرآبخیزها استخراج شد (صادقی و همکاران ۲۰۲۳الف). سپس، تمام متغیرهای مؤثر بر سلامت آبخیز از دیگر منابع موجود و مرتبط (حزبای و صادقی ۲۰۱۶؛ صادقی و همکاران ۲۰۱۹؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۰)، گردآوری شد. همچنین، تمام این داده‌ها برای یک دوره آماری مشابه (۱۳۵۰ تا ۱۴۰۲) آماده‌سازی و همگون شدند. سپس، شاخص‌ها و معیارهای استفاده شده در این پژوهش در دو دسته ایستا یا ثابت در کوتاه‌مدت و پویا یا متغیر در کوتاه‌مدت طبقه‌بندی شدند. در مرحله مقدماتی، ۱۷۳ معیار از عامل‌های محیطی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان شاخص فشار و ۳۳۱ معیار از عامل‌های محیطی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان شاخص حالت و ۱۳ معیار از عامل‌های محیطی و انسانی به‌عنوان شاخص پاسخ انتخاب شدند. همچنین، به‌دلیل وجود همبستگی میان برخی متغیرهای استفاده شده، از آزمون تورم پراکنش<sup>۱</sup> (VIF) برای کاهش داده‌ها و حذف متغیرهای با هم‌راستایی<sup>۲</sup> استفاده شد و شاخص‌های نهایی فشار، حالت و پاسخ در دو دسته معیارهای ایستا و پویا متناسب با موجودیت و یا بازسازی سری زمانی ارائه شد. در این پژوهش، برای حذف متغیرهای هم‌راستا، آستانه VIF برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد و در مراحل محاسبه‌ای بعدی از ۱۳۷ معیار نهایی استفاده شد.

دوره آماری، متفاوت بود و در دوره‌های کوتاه‌مدت این تغییرات در مقایسه با کل دوره بیشتر بود. بیشترین اندازه تغییرات در ۳۰ سال ابتدایی دوره آماری مشاهده شد و با افزایش مدت دوره آماری تا پایان دوره، اندازه تغییرات این شاخص‌ها کاهش یافت. از این‌رو، نتایج ۳۰ سال پایانی دوره آماری، برای محاسبه شاخص‌های سلامت کنونی، مطلوب و قابل اطمینان بود. در آبخیز صفاورد (جواهرده) رامسر، رجبی و همکاران (۲۰۲۴) اثر تغییر اقلیم و کاربری بر تغییر سلامت آبخیز برای مدت ۱۰ تا ۲۰ سال آینده را بررسی و گزارش کردند اثرات تغییر اقلیم و کاربری بر شاخص سلامت آبخیز در آینده معنی‌دار نخواهد بود. این پژوهشگران بر تغییر از وضعیت ناسالم به شرایط متوسط با گرایش منفی تأکید کردند. همچنین، نتایج کمی‌سازی وضعیت سلامت آبخیز در دوره کنونی و دوره‌های پیش‌بینی ۱۰ و ۲۰ ساله نشان داد که اندازه‌های شاخص سلامت آبخیز مشابه بود، اما تغییرات شاخص سلامت در زیرآبخیزها در ابتدای دوره مطالعه شده، از شرایط نسبتاً ناسالم تا سلامت متوسط بود. پژوهش‌های گوناگونی در زمینه مدل‌های مفهومی ارزیابی سلامت در مقیاس آبخیز انجام شده است. در این پژوهش‌ها بیشتر وضعیت سلامت کنونی آبخیزها تحلیل شده است و به ارزیابی آینده سلامت آبخیزها بر اساس تغییرات پویای متغیرهای گوناگون با اثر متفاوت بر وضعیت سلامت کم‌تر توجه شده است. افزون بر این، به‌رغم انجام پژوهش‌های پرشمار در زمینه پیش‌بینی متغیرهای آب‌اقلیمی کاربری زمین، هنوز به‌طور جامع و در سطح ملی اثر این متغیرها بر وضعیت سلامت آبخیز بررسی نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف پیش‌بینی سلامت آبخیز و نیز تعیین اندازه اثرگذاری کمی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر شاخص سلامت آبخیز در آبخیزهای رده سوم کشور به‌عنوان واحدهای کاری مناسب مدیریتی در سطح کلان و بخش‌های اصلی اجرایی، انجام شد.

1-Variance Inflation Factor

2- Collinearity



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیزهای رده سوم مطالعه‌شده در ارزیابی سلامت ایران.

Figure 1- Geographical location of third-order watersheds studied in health assessment, Iran.

شد. افزون بر این، پایگاه‌های داده‌های مرتبط در محیط‌های متنوع شامل Excel نسخه ۲۰۱۳، ARC-Fragstats نسخه ۱/۰/۸، TerrSet نسخه ۲۰۲۳، SPSS نسخه ۴/۲، موتور Google Earth و برای پشتیبانی فرآیند تحلیل پژوهش ۲۰۱۶ آماده‌سازی شدند. روند نمای روش‌شناسی پژوهش در شکل ۲ نشان‌داده شده است.

پس از تهیه معیارهای ایستا و پویا برای شرایط کنونی، به‌منظور تعیین شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳، شاخص‌های پویا با استفاده از مدل SARIMA<sup>۳</sup> در هر آبخیز پیش‌بینی شد. از مدل SARIMA برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی مهم (دما، بارش و شاخص خشکی در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه) استفاده شد. همچنین، از مدل زنجیره Markov در نرم‌افزار TerrSet برای پیش‌بینی روند تغییرات کاربری/پوشش زمین بهره گرفته شد. بر این اساس،

#### روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش از داده‌ها و اطلاعات موجود در مقیاس آبخیزهای رده سوم کشور فقط در پژوهش پیشین (گزارش خاتمه‌یافته بنیاد با شماره طرح ۴۰۰۵۷۹۴) استفاده شد. همچنین، داده‌های طرح در حال تکمیل بنیاد با شماره ۴۰۲۷۵۰۹ و دیگر پژوهش‌های در حال انجام و برنامه‌ریزی‌شده‌ای است که از سوی نهادهای حاکم بر امور منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، سازمان هواشناسی، پژوهشگاه منابع آب ایران، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز ملی آمار ایران و بنیاد ملی علم ایران، حمایت می‌شود. مدل مفهومی فشار-وضعیت-پاسخ به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، بر مبنای این منابع تنظیم و پیاده‌سازی شد.

در این پژوهش، داده‌های به‌دست‌آمده از اطلاعات و نقشه‌های پایه مرتبط با متغیرها، از جمله داده‌های توسعه‌ای و زیرساختی، شامل داده‌های اقلیمی، آب‌شناختی، خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، کاربری زمین/پوشش زمین، از منابع موجود تهیه و استخراج

3- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average

افزون بر این، برای ارائه نتایج بهینه از دیگر روش‌ها مانند وایازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین از قبیل جنگل تصادفی<sup>۴</sup> (RF)، ماشین بردار پشتیبان<sup>۵</sup> (SVM) و K نزدیک‌ترین همسایه<sup>۶</sup> (KNN) استفاده شد. شایان ذکر است که از زبان برنامه‌نویسی Python در محیط Anaconda3 برای پیاده‌سازی تمام رویکردها شامل SARIMA، وایازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شد (ابوبکار و همکاران ۲۰۱۶؛ یزد و همکاران ۲۰۱۹). همچنین، برای پیش‌بینی معیارهای پویا، ترکیبی از مدل SARIMA و الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. به‌منظور انتخاب معیار نهایی پیش‌بینی، یک فرآیند اعتبارسنجی چندمعیاره به‌کار گرفته شد. عملکرد هر مدل با استفاده از سنج‌های RMSE، MAE و R<sup>2</sup> برای داده‌های آزمون ارزیابی و تحلیل باقی‌مانده‌ها انجام شد. سرانجام، برای هر متغیر، مدلی به‌عنوان خروجی نهایی انتخاب شد که افزون بر داشتن بهترین معیارهای عملکرد، توجیه نظری قوی‌تری و منطبق‌تری با ماهیت متغیر مطالعه‌شده داشته باشد. برای مثال، برای داده‌های با ساختار زمانی قوی از SARIMA و برای متغیرهای با روابط غیرخطی پیچیده از یادگیری ماشین به‌عنوان مدل نهایی استفاده شد.

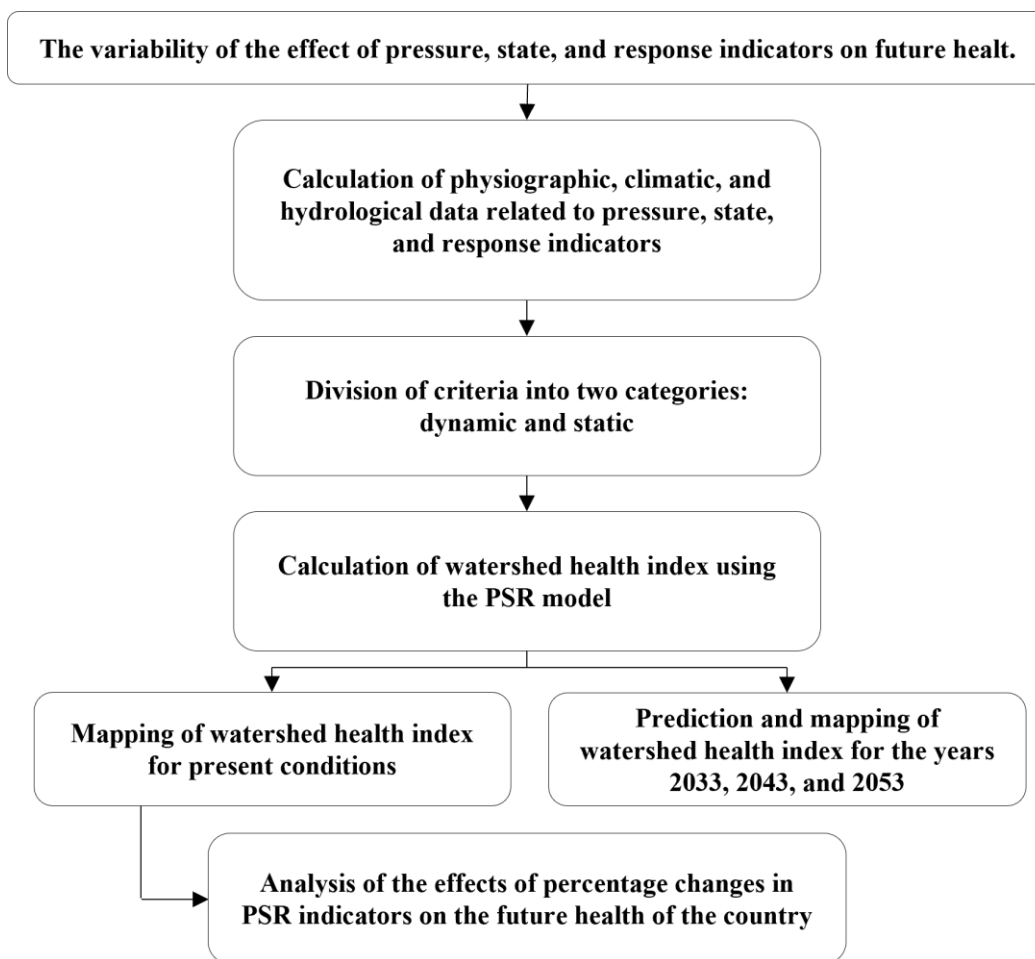
پس از بهنجارسازی متغیرهای نهایی ایستا و پویا، شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر اساس میانگین حسابی اندازه‌های بهنجارشده معیارهای مطالعه‌شده محاسبه شدند. سرانجام، برای تعیین وضعیت نهایی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور، از میانگین هندسی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ برای هر یک از زیرآبخیزها با استفاده از رابطه ۱ استفاده شد (صادقی و همکاران، ۲۰۲۳؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۴؛ حزباوی و همکاران، ۲۰۱۸).

برای مقایسه پهنه‌بندی سلامت آبخیز در زمان‌های مختلف، چهار نقشه برای زمان کنونی و سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ به‌طور جداگانه تهیه شد. همچنین، مداخله نسبی تغییرات معیارهای پویا در شرایط کنونی و یا یک مقطع قبل، انجام شد. سرانجام، پهنه‌بندی جدید برای سال مطالعه‌شده آینده، تهیه شد (چمنی و همکاران ۲۰۲۲).

در این پژوهش ارزیابی نسبی و مقایسه‌ای آبخیزهای مختلف در سطح کشور با یکدیگر انجام شد و سپس روند تغییرات، تحلیل شد. پس از تعیین اندازه شاخص‌های محاسبه‌ای ایستا و پویای رویکرد ارزیابی سلامت بوم‌سازگان، اندازه‌های شاخص سلامت به ۱۰ طبقه تقسیم‌بندی شد. در مجموع، طبقه‌های استفاده‌شده شامل سالم، سالم با گرایش منفی، نسبتاً سالم با گرایش منفی، نسبتاً سالم با گرایش مثبت، متوسط سالم با گرایش منفی، متوسط سالم با گرایش مثبت، نسبتاً ناسالم با گرایش مثبت، نسبتاً ناسالم با گرایش منفی، ناسالم با گرایش مثبت و ناسالم بود (چمنی و همکاران ۲۰۲۳؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۳). سپس، با استفاده از وایازی چندمتغیره اندازه اثر سه شاخص اصلی فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آبخیز در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ پیش‌بینی شد (چمنی و همکاران ۲۰۲۳؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۳ الف و ب).

$$\text{میانگین هندسی} = \left[ \prod_{n=1}^k X_n \right]^{\frac{1}{k}} \quad (1)$$

- 
- 4- Random Forest  
5- Support Vector Machine  
6- K-Nearest Neighbors



شکل ۲- روندنمای پژوهش.

Figure 2- Flowchart of research methodology.

## نتایج و بحث

نقشه‌های شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای زمان حال، سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. همچنین، پس از کمی‌سازی و پهنه‌بندی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ، اقدام به پهنه‌بندی شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های آینده شد.

معیارهای ارزیابی عملکرد و صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی معیارهای پویای شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در جدول ۱ و اندازه‌های ضریب Kappa و دقت نهایی پیش‌بینی اثر کاربری زمین در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، پس از کمی‌سازی و پهنه‌بندی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ، شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای شرایط کنونی و سال‌های آینده، پهنه‌بندی شد. بر این اساس،

جدول ۱- آماره‌های ارزیابی پیش‌بینی معیارهای پویای شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور.

**Table 1- Evaluation statistics in predicting dynamic criteria of the health index of the third-order watersheds of Iran.**

Criteria*	Optimal model	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
Mean rainfall erosion	Power Regression	0.75	17.2	16.04
Erosion damage	Linear Regression	0.81	9.08	5.98
Daily groundwater changes	SARIMA	0.78	0.99	0.78
Palmer drought index	SARIMA	0.81	0.97	0.79
Potential evapotranspiration	Random Forest	0.82	0.99	0.81
Population	Linear Regression	0.98	1.24	0.98
Mean water erosion	Linear Regression	0.89	0.91	0.82
Precipitation components	SVM	0.88	0.91	0.79
Temperature components	Random Forest	0.86	0.65	0.55
BSI index	SARIMA	0.83	1.56	0.97
LST index	SARIMA	0.9	0.91	0.72
NDSI index	SARIMA	0.91	0.83	0.69
NDTI index	SVM	0.87	0.98	0.86
NDVI index	Random Forest	0.84	1.22	0.92
NDWI index	Random Forest	0.93	0.78	0.67
Soil salinity index	SVM	0.95	0.66	0.52
TVDI index	KNN	0.96	0.55	0.45
Wind components	SARIMA	0.85	3.21	2.12

\*: BSI (شاخص خاک لخت)، LST (دمای سطح زمین)، NDSI (شاخص بهنجار شده تفاضل برف)، NDTI (شاخص بهنجار شده تفاضل خاک‌ورزی)، NDVI (شاخص بهنجار شده تفاضل گیاهی)، NDWI (شاخص بهنجار شده تفاضل آب)، TVDI (شاخص خشکی، دما، پوشش گیاهی).

\*: BSI (Bare Soil Index), LST (Land Surface Temperature), NDSI (Normalized Difference Snow Index), NDTI (Normalized Difference Tillage Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), and TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index).

جدول ۲- ضریب Kappa و دقت نهایی پیش‌بینی اثر شاخص کاربری زمین.

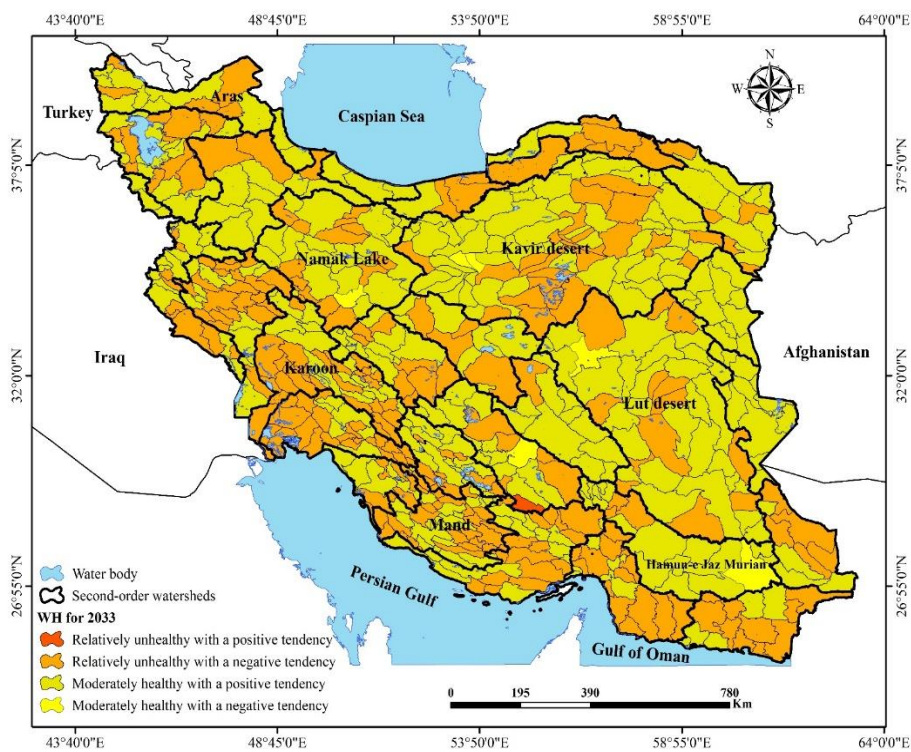
**Table 2- Kappa coefficient and final accuracy in land-use impact prediction.**

Year	Kappa coefficient	Qualitative interpretation of the Kappa coefficient	Production accuracy
2033	0.94	Excellent agreement	0.96
2043	0.84	Excellent agreement	0.91
2053	0.78	Remarkable agreement	0.87



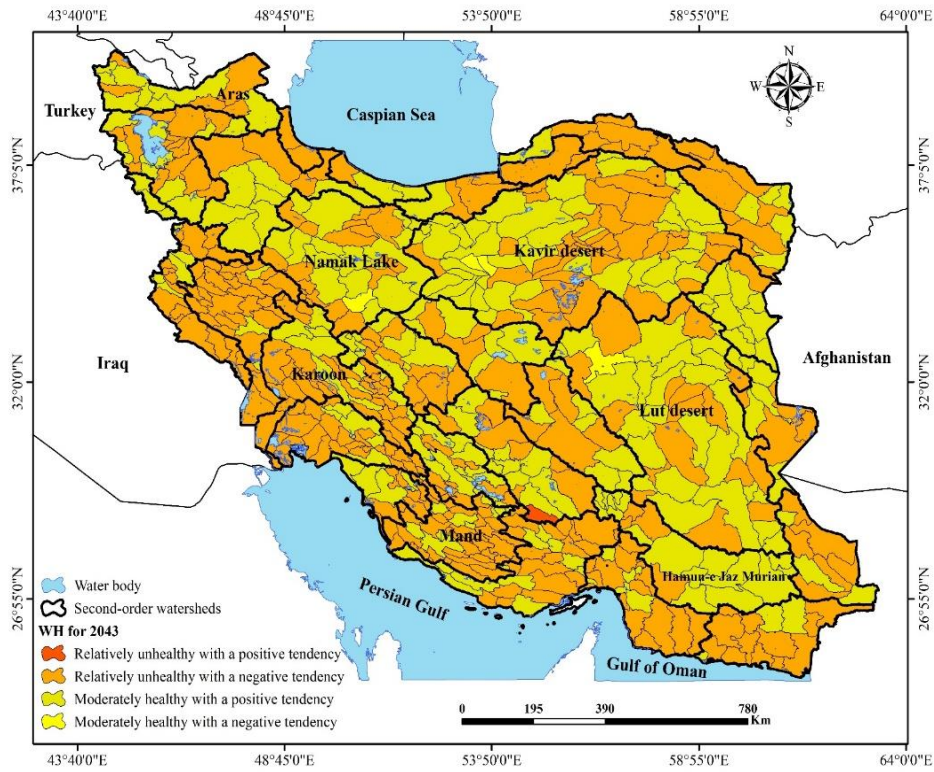
شکل ۳- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور در شرایط کنونی.

Figure 3- Zoning of health status in the country's third-order watersheds under current conditions.



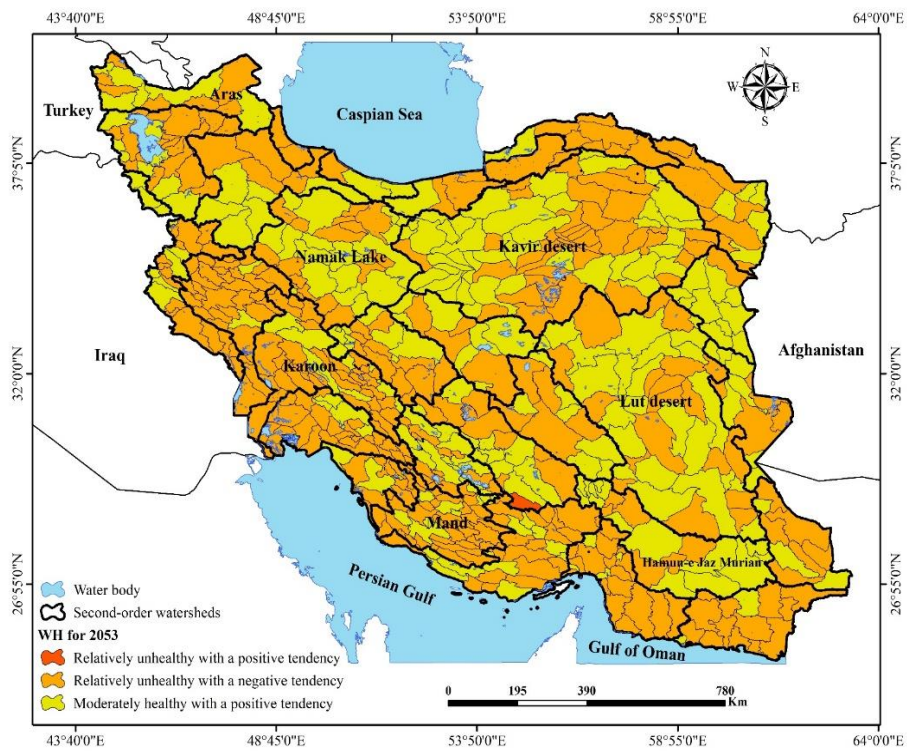
شکل ۴- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای سال ۲۰۳۳.

Figure 4- Zoning of health status in the country's third-order watersheds for the year 2033.



شکل ۵- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای سال ۲۰۴۳.

Figure 5- Zoning of health status in the country's third-order watersheds for the year 2043.



شکل ۶- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای سال ۲۰۵۳.

Figure 6- Zoning of health status in the country's third-order watersheds for the year 2053.

جدول ۳- اندازه اثر شاخص‌های PSR بر شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور.

Table 3- Contribution of PSR indices to the health index of Iran's third-order watersheds.

PSR Model Indicators	Effect size in target years (%)		
	2033	2043	2053
Pressure	19.49	20.13	19.70
State	19.31	18.37	19.35
Response	61.20	61.50	60.94

ناسالم سلامت آبخیز در این منطقه از ایران بود. از دیدگاه کلان و مبتنی بر نتایج، الگوی ناهمگون و رو به افزایش سلامت آبخیزها، فراتر از یک پراکندگی مکانی صرف است و شوربختانه بیانگر شکل‌گیری یک شکاف بوم‌شناختی نگران‌کننده میان مناطق شمالی و مناطق جنوبی/شرقی کشور است. این شکاف به معنای تفاوت فزاینده در تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها، امنیت آبی و معیشتی جامعه‌های محلی است. تداوم این روند سبب تشدید نابرابری‌های محیط‌زیستی، ایجاد چرخه‌های معیوب فقر و نابودی محیط‌زیست در مناطق محروم، ایجاد فشار برای مهاجرت‌های محیط‌زیستی میان استان‌ها و یا دیگر آشفته‌گی‌های بوم‌شناختی می‌شود.

در این پژوهش نتایج تحلیل نشان داد شاخص سلامت آبخیزها تحت تأثیر ترکیب پیچیده‌ای از عامل‌های متغیر اقلیمی، آب‌شناختی و انسانی است. در شرایط کنونی، ناهمگونی شدید در توزیع سلامت آبخیزها مشاهده شد. وضعیت مناطق شمالی کشور (گیلان و مازندران) با ۴۵ درصد مساحت در طبقه متوسط سالم، نسبتاً مطلوب است. در این راستا، نتایج پژوهش صادقی و همکاران (۲۰۲۳) در آبخیز آسیاب‌رود در شهرستان چالوس نشان داد وضعیت سلامت در این منطقه از شمال ایران در طبقه متوسط است که با یافته‌های این پژوهش، هم‌راستا است. درحالی‌که وضعیت مناطق جنوب‌شرقی با ۷۰ درصد مساحت در طبقه نسبتاً ناسالم، بحرانی‌تری بود. این الگو عمدتاً تحت تأثیر توزیع نابرابر بارش‌ها و فشارهای متفاوت انسانی است. از سوی دیگر، برای سال ۲۰۳۳، پیش‌بینی‌ها بیانگر افزایش ناهمگونی موجود است. مناطق شمالی با حفظ ۶۰ تا ۷۰ درصد مساحت در طبقه‌های خوب، روند نابودی‌شان کندتر است. درحالی‌که روند نابودی مناطق شرقی و جنوبی با بیش از ۵۰ درصد مساحت در طبقه‌های ضعیف، بیشتر

ارزیابی مقایسه‌ای اندازه تغییرات شاخص سلامت برای سال‌های آینده در مقایسه با زمان کنونی در آبخیزهای رده سوم کشور

نتایج تحلیل پهنه‌بندی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان داد وضعیت سلامت به‌شکل ناهمگون توزیع‌شده است (شکل‌های ۳ تا ۶). در مناطق شمالی (گیلان، مازندران) به‌دلیل بارندگی زیاد و پوشش گیاهی متراکم، سلامت آبخیزها مطلوب است (۶۰ تا ۷۰ درصد در طبقه‌های خوب و بسیارخوب). از سوی دیگر، مناطق جنوبی (هرمزگان، سیستان و بلوچستان) به‌دلیل بارش کم و فعالیت‌های نامناسب انسانی، وضعیت ضعیف‌تر است (۴۰ تا ۵۰ درصد در طبقه‌های متوسط تا ضعیف). در سال‌های آینده، سلامت مناطق شمال‌غربی نسبتاً کاهش خواهد یافت، درحالی‌که مناطق شرقی (مانند خراسان‌رضوی) به‌دلیل خشک‌سالی و برداشت بی‌رویه آب، به‌شدت آسیب خواهد دید و سلامت آن‌ها به کمتر از ۲۰ درصد خواهد رسید. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پارکس و همکاران (۲۰۱۰) و نصیری‌خیای و همکاران (۲۰۲۴)، هم‌راستا است. نتایج کلی ارزیابی با یافته‌های صادقی و همکاران (۲۰۲۳الف) در تحلیل سلامت آبخیزهای رده دوم کشور هماهنگی دارد. بررسی تطبیقی نقشه‌های سلامت آبخیز در شرایط کنونی و سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان‌دهنده روند نابودی تدریجی و نگران‌کننده آبخیزهای رده سوم در سطح کشور است. در این راستا، در آبخیز شازند در استان مرکزی حزیای و همکاران (۲۰۱۸) کاربرد مدل مفهومی سلامت آبخیز مبتنی بر شاخص‌های فشار-حالت- پاسخ (PSR) در چهار سال ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بر اساس مدل PSR بیانگر وضعیت نسبتاً

سوی دیگر، افزایش ۶۴/۲۰ درصد تراکم جمعیتی در نقاط خاص، فشار بر منابع محلی را تشدید خواهد کرد. صادقی و همکاران (۲۰۲۳) نیز سلامت آبخیز آسیاب‌رود در شهرستان چالوس ارزیابی کردند و دریافتند که از میان عامل‌های بررسی‌شده، بیشترین اثر مربوط به عامل اقلیم و عامل انسانی بود.

بیشترین آسیب‌پذیری مربوط به مناطق شرقی و جنوب‌شرقی کشور با کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصد سلامت آبخیز تا سال ۲۰۵۳ بود که دلیل آن ترکیب عامل‌های کاهش بارش، افزایش دما و فشارهای انسانی است. حتی سلامت مناطق شمالی با منابع آب نسبتاً کافی نیز تا سال ۲۰۵۳، ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش ظرفیت جبران‌پذیری بوم‌سازگان‌ها است. رفتار نامنظم شاخص‌هایی مانند تنوع Shannon نشان‌دهنده وجود آستانه‌های بوم‌شناختی و تغییرات ناگهانی در سامانه‌های آبخیز است. به‌طورکلی، اثر همکنش عامل‌های مختلف (مانند کاهش بارش و افزایش فرسایش) تشدیدکننده است و منجر به کاهش سلامت کلی آبخیزها می‌شود. کاهش تدریجی ظرفیت خودترمیمی آبخیزها از دیگر یافته‌های مهم این پژوهش بود. در این راستا، حتی تغییرات کوچک در فراسنجه‌های محیطی نیز بر سلامت کلی سامانه به‌طور قابل‌توجهی اثرگذار بود. این تغییرات هم بر کارکردهای بوم‌شناختی آبخیزها اثرگذارند و هم خدمات بوم‌سازگانی ارائه‌شده به جامعه‌های محلی را نیز دچار اختلال خواهند کرد. ازجمله این خدمات می‌توان به کاهش کیفیت و کمیت منابع آب، افزایش فرسایش خاک و کاهش تنوع زیستی اشاره کرد. از این‌رو، نتایج این تحلیل بیانگر ضرورت اتخاذ رویکردهای مدیریتی جامع و یکپارچه در سطح آبخیزها است که بتوان هم‌زمان با پوشش ابعاد بوم‌شناختی، اجتماعی و اقتصادی راه‌کارهای مناسب برای هر منطقه را نیز ارائه داد.

**تحلیل اثر شاخص‌های PSR بر شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور**

اندازه‌های اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر شاخص وضعیت سلامت آبخیز در جدول ۳ ارائه‌شده

است. شایان ذکر است برای سال ۲۰۳۳ روند نابودی مناطق با سلامت مطلوب در مقایسه با زمان کنونی ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج پیش‌بینی برای سال ۲۰۴۳، متفاوت بود. مناطق شمال‌غربی با ۶۰ تا ۷۰ درصد مساحت در طبقه سالم، کانون‌های مثبت به‌شمار می‌آیند، اما در روند نابودی مناطق مرکزی و جنوبی با ۵۰ تا ۶۰ درصد مساحت در طبقه ناسالم، افزایش چشم‌گیری مشاهده شد. کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصد مناطق با سلامت خوب در استان‌های مرکزی در مقایسه با سال ۲۰۳۳ هشداردهنده است.

نتایج پیش‌بینی برای سال ۲۰۵۳، بیانگر تشدید بحران در مقیاس کشوری بود. سلامت مناطق شمالی در مقایسه با سال ۲۰۴۳، ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت. وضعیت مناطق شرقی و جنوبی با کم‌تر از ۲۰ درصد مساحت در طبقه سالم بحرانی و بی‌سابقه است. گسترش طبقه‌های ناسالم به ۶۰ تا ۷۰ درصد در برخی استان‌های مرکزی، بیانگر تشدید روند بیابان‌زایی است. کاهش ۱۱/۹۰ درصد بارش سالانه تا سال ۲۰۵۳ همراه با تغییر الگو به سوی بارش‌های نامنظم، موجب کاهش تغذیه آبخوان‌ها و تشدید تنش آبی خواهد شد. همچنین، افزایش ۲/۸۷ درصد دمای میانگین سالانه تا سال ۲۰۵۳ منجر به افزایش تبخیر-تعرق بالقوه و کاهش رطوبت خاک خواهد شد که بر پوشش گیاهی اثرگذار است. از سوی دیگر، کاهش ۳۴/۵۰ درصد شاخص تفاضل برف تا سال ۲۰۵۳، سبب تغییر زمان و حجم رواناب‌ها خواهد شد و سامانه‌های آب‌شناختی را با چالش مواجه خواهد کرد. نوسانات روزانه افزایش‌یافته منابع آب زیرزمینی نشان‌دهنده تخلیه شدید سفره‌ها است. شوربختانه، افزایش ۱۵/۵۲ درصد میانگین فرسایش خاک تا سال ۲۰۵۳، حاصلخیزی زمین‌ها را تهدید می‌کند. همچنین، کاهش ۳۴/۴۰ درصد مراتع و ۱۵/۹۰ درصد جنگل‌ها، ظرفیت نگهداری آب و خاک را کاهش خواهد داد. از مهم‌ترین نقاط ضعف و اثرگذار بر سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های آینده، افزایش ۸۱/۴۰ درصد زمین‌های بایر (نشان‌دهنده پیش‌روی پدیده بیابان‌زایی) است. از

مستقیم برای پیش‌بینی کمی نقاط تغییر یا شکست<sup>۷</sup> طراحی نشده بود، ولی یافته‌های آن به‌عنوان سندی هشداردهنده برای شناسایی مناطق و شاخص‌های با اثر زیاد برای ایجاد تغییرات غیرقابل‌بازگشت است. نتایج این پژوهش نشان داد تاب‌آوری بوم‌شناختی مناطق خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان که هم‌اکنون در طبقه‌های سلامت ضعیف تا خیلی ضعیف هستند، بسیار کم است. در چنین شرایط ناپایدار، تداوم فشارهای مهم شناسایی شده در این پژوهش (مانند برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و کاهش بارش) منجر می‌شود این سامانه‌ها آستانه‌های بحرانی را پشت سر گذاشته و به‌طور غیرقابل‌بازگشت (مانند بیابان‌زایی کامل یا نابودی آبخوان) فروپاشیده شوند و یا به‌بیان دیگر رهاسازی یا گسست<sup>۸</sup> رخ دهد.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سلامت آبخیز یک واژه گسترده و دربرگیرنده منابع آبی، کیفیت بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، جامعه‌های گیاهی و جانوری، گیاهان بومی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، فرآیندهای بارش-رواناب، ویژگی‌های ریخت‌شناسی است. امنیت آبی و غذایی کشور به‌عنوان اصلی‌ترین اهداف کلان ملی به‌دلیل مدیریت ناصحیح منابع آب و سرزمین، در معرض تهدید است. از سوی دیگر، ارزیابی و مدیریت جامع آبخیزها، در جامعه‌های علمی بین‌المللی به‌عنوان رویکردی مؤثر و کارا برای مدیریت آب، سرزمین و منابع وابسته به آن‌ها و ایجاد تعادل میان نیازهای اقتصادی-اجتماعی جامعه‌های آبخیزنشین و سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. از این‌رو، در این پژوهش اثرات شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آبخیزهای رده سوم کشور پیش‌بینی شد. نتایج تحلیل نشان داد که مدیریت آبخیزها در آینده باید بر واکنش‌پذیری سریع استوار باشد. زیرا، این مدیریت به‌طور فزاینده‌ای به اقدامات انطباقی مانند احیای پوشش گیاهی و مهار سیلاب وابسته خواهند شد. در

است. بر پایه نتایج این جدول اثر شاخص پاسخ (حدود ۶۰ درصد) در مقایسه با شاخص‌های فشار و حالت بر سلامت سامانه آبخیزهای مطالعه‌شده در تمام سال‌های بررسی شده ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ بسیار بیشتر بود. از سوی دیگر، اندازه اثر شاخص‌های فشار و حالت تقریباً یکسان و در مجموع کمتر از ۴۰ درصد بود.

از این‌رو، می‌توان گفت در سال‌های آینده (سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳) تغییرات اندازه اثر شاخص‌های مدل PSR بر شاخص سلامت آبخیز، قابل توجه نخواهد بود. اندازه اثر شاخص پاسخ (حدود ۶۰ درصد) بیانگر آن است که مدیریت و عکس‌العمل سامانه‌های انسانی و طبیعی در برابر تغییرات، عامل اصلی تعیین‌کننده سلامت آبخیزها هستند. این یافته کاملاً با نتایج بخش پیشین مبنی بر اهمیت فشارهای نامناسب انسانی (مانند برداشت بی‌رویه آب) و کاهش ظرفیت خودترمیمی بر نابودی بوم‌سازگان‌ها، هم‌خوانی دارد و بیانگر آن است که مدیریت نادرست همچنان به‌عنوان مهم‌ترین عامل بحران در آینده تلقی و سبب تشدید اثرات منفی فشارها و تغییرات حالت خواهد شد. اثر شاخص فشار و عامل‌هایی مانند فشارهای مستقیم انسانی و فشارهای اقلیمی (کاهش بارش، افزایش دما) را نمایان می‌سازد.

نتایج پیش‌بینی‌های این پژوهش حتی در یک سناریوی عادی و بدون در نظر گرفتن رخدادهای بی‌سابقه بیانگر بحرانی شدن وضعیت غالب آبخیزهای کشور است و این یک هشدار جدی است.

اگرچه اثر شاخص پاسخ در تبیین تغییرپذیری سلامت در میان آبخیزها بسیار مهم بود، اما این به‌معنای بی‌اثر بودن فشارها نیست، بلکه بیانگر تفاوت در کیفیت مدیریت (پاسخ) است. بر پایه نتایج این پژوهش کاهش سلامت حتی در مناطق با مدیریت نسبتاً مطلوب (شمالی)، نشان‌دهنده شدت و سرعت فشارهای نوظهور، به‌ویژه فشارهای اقلیمی است که در حال پیشی گرفتن از اثربخشی سطح کنونی اقدامات پاسخ است. در این پژوهش چارچوب PSR به‌طور

7- Tipping Points

8- Release

که نهادهای حاکمیتی مانند سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، وزارت نیرو و استانداری‌ها، از یافته‌های این پژوهش در قالب دستورالعمل‌های اجرایی و آیین‌نامه‌های تخصیص بودجه برای طرح‌های آبخیزداری بهره‌گیرند. همچنین پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌یادگیری عمیق برای بهبود پیش‌بینی متغیرهای پویا به دلیل توانایی این مدل‌ها در یادگیری روابط پیچیده غیرخطی و وابستگی‌های زمانی بلندمدت استفاده شود. از سوی دیگر، انجام شبیه‌سازی اثر سیاست‌های مدیریتی (مانند تغییر الگوی کشت، احیای جنگل‌ها، طرح تنفس، تعادل رابطه دام و مرتع و مهار فرسایش) بر تغییرپذیری وضعیت سلامت و امنیت بوم‌شناختی آبخیزهای کشور در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

#### سپاس‌گزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره "۴۰۳۹۰۲۹" انجام‌شده است.

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

#### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

#### مشارکت نویسندگان

سیدحمیدرضا صادقی: نظارت، مفهوم‌سازی، مجری طرح، ویرایش متن، بازبینی نتایج  
 علی نصیری‌خیای: مفهوم‌سازی، تهیه پیش‌نویس اولیه، تحلیل‌های آماری و نرم‌افزاری  
 رضا چمنی: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری  
 نگین بهنیا: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری  
 وحید موسوی: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری

راستای شیوه واکنش سریع، پیشنهاد می‌شود اولویت‌بندی هوشمند مناطق مختلف کشور از نقشه بحرانی ارائه‌شده از نتایج این پژوهش بهره‌گرفته شود. افزون بر این، اگرچه اثر فشارهای انسانی (حدود ۲۰ درصد) نسبتاً پایدار است، اما نوسانات آن نیازمند مدیریت یکپارچه فعالیت‌های بشری مانند کشاورزی و توسعه شهری است. از سوی دیگر، پایداری نسبی اثر شاخص حالت، بیانگر لزوم توجه به راهبردهای بلندمدت مانند حفاظت از منابع خاک و آب است. از این‌رو، ترکیب اقدامات کوتاه‌مدت انعطاف‌پذیر با سیاست‌های پایدار حفاظتی، ابزار مدیریت بهینه آبخیزها در تغییرات محیطی آینده خواهد بود. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش مؤید رویکرد پویا و سازگار در مدیریت آبخیزها است، به شیوه‌ای که می‌توان با ترکیب اقدامات کوتاه‌مدت واکنشی و راهبردهای بلندمدت حفاظتی سلامت آبخیزها در برابر تغییرات آینده را تضمین کرد.

در این پژوهش، می‌توان به خطاهای اندازه‌گیری در داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور، تفاوت در وضوح مکانی و زمانی در داده‌های مختلف دورسنجی و زمینی، فرضیه‌های ساده‌کننده در مدل‌های SARIMA و یادگیری ماشین و چشم‌پوشی احتمالی از پیچیدگی‌های آبخیز و نبودن قطعیت در سناریوهای تغییر کاربری زمین (به‌ویژه تحت تأثیر سیاست‌های انسانی) به‌عنوان منابع خطا و نبودن قطعیت‌ها اشاره کرد. بر پایه نتایج این پژوهش مشخص شد که مدل PSR، قابلیت تعیین حدود آستانه برای تاب‌آوری سامانه‌های طبیعی را ندارد. از سوی دیگر، پیش‌بینی‌های این پژوهش مبتنی بر فرض تداوم روندهای کنونی در عامل‌های اقلیمی، محیطی و مدیریتی است. این مدل تنش‌های غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی در مقیاس کلان و مؤثر بر سامانه از جمله تحولات ناگهانی اقتصادی-اجتماعی (مانند تحریم‌های شدید، درگیری‌ها یا مهاجرت‌های گسترده) را در نظر نمی‌گیرد. به این دلیل بایستی پیش‌بینی‌ها به‌عنوان چشم‌اندازی مدیریتی در شرایط عادی و با احتیاط تفسیر و در نظر گرفته شوند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود

پدیده‌السادات صادقی: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری

حمید نوری، محمدحسین شوشتری، عبدالواحد خالدی درویشان، مهدی وفاخواه و حمیدرضا مرادی رکابدارکلائی: تهیه داده و اطلاعات

### فهرست منابع

- Abubakar A, Chiroma H, Zeki A, Uddin M. 2016. Utilising key climate element variability for the prediction of future climate change using a support vector machine model. *International Journal of Global Warming*. 9(2):129–151. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2016.074952>
- Chamani R, Sadeghi SHR, Zare S, Shekohideh H, Mumzaei A, Amini H, Hemmati L, Zarei R. 2023. Flood-oriented watershed health and ecological security conceptual modeling using PSR approach for the Sharghonj Watershed, South Khorasan Province, Iran. *Natural Resource Modeling*. e12385. <https://doi.org/10.1111/nrm.12385>
- Dai Q, Chuobin L, Sha X, Xue L, Zheng Z, Junliang T, Guoliang W. 2007. Health diagnoses of ecosystems subject to a typical erosion environment in Zhifanggou watershed, north-west China. *Frontiers of Forestry in China*. 2:241–250. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11461-007-0040-1>
- Gatgash ZE, Sadeghi SHR. 2024. Comparative effect of conventional and adaptive management approaches on watershed health. *Soil and Tillage Research*. 235:105869. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105869>
- Hazbavi Z, Jantiene EM, Nunes J, Keesstra S, Sadeghi SHR. 2018. Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*. 87:196–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.054>
- Hazbavi Z, Sadeghi SHR, Gholamalifard M, Davudirad AA. 2020. Watershed health assessment using the pressure--state--response (PSR) framework. *Land Degradation and Development*. 31(1):3–19. <https://doi.org/10.1002/ldr.3420>
- Hazbavi Z, Sadeghi SHR. 2017. Watershed health (Part two): Pressure, state and response conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*. 4(15):25–30. [https://www.wmji.ir/article\\_696852.html?lang=en](https://www.wmji.ir/article_696852.html?lang=en)
- Jat MK, Khare D, Garg PK, Shankar V. 2009. Remote sensing and GIS-based assessment of urbanisation and degradation of watershed health. *Urban Water Journal*. 6(3):251–263. <https://doi.org/10.1080/15730620801971920>
- Khiavi AN, Tavooosi M, Khodamoradi H, Kuriqi A. 2024. Integration of watershed eco-physical health through algorithmic game theory and supervised machine learning. *Groundwater for Sustainable Development*. 101216. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101216>
- Liang P, Liming D, Guijie Y. 2010. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. *Procedia Environmental Sciences*. 2:832–841. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.094>
- Liang P, Liming D, Guijie Y. 2010. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. *Procedia Environmental Sciences*. 2:832–841. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.094>
- Mao X, Wang X, Chen Q, Yin X. 2014. A PSR-framework-based health assessment of Ulansuhai Lake in China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 23:2093–2102. <https://www.pjoes.com/A-PSR-Framework-Based-Health-Assessment-r-nof-Ulansuhai-Lake-in-China,89399,0,2.html>
- Momenian P, Nazarnezhad H, Miryaghoubzadeh M, Mostafazadeh R. 2018. Assessment and prioritizing of subwatersheds based on watershed health scores (Case study: Ghotorchay, Khoy, West Azerbaijan). *Journal of Watershed Management Research*. 9(17):1–13. <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.1>
- Nasiri Khiavi A, Tavooosi M, Khodamoradi H, Kuriqi A. 2024. Integration of watershed eco-physical health through algorithmic game theory and supervised machine learning. *Groundwater for Sustainable Development*. 101216. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101216>
- Parkes MW, Morrison KE, Bunch MJ, Hallström LK, Neudoerffer RC, Venema HD, Waltner-Toews D. 2010. Towards integrated governance for water, health and social-ecological systems: The watershed governance prism. *Global Environmental Change*. 20(4):

693–704.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.06.001>

Rajabi MR, Vafakhah M, Sadeghi SHR. 2024. Predicting the effect of hydro-climatic and land-use dynamic variables on watershed health status. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(31):44150–44168. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34071-6>

Sadeghi SHR, Chamani R, Silabi MZ, Tavosi M, Katebikord A, Darvishan AK, Moosavi V, Sadeghi PS, Vafakhah M, Rekabdarkolaei HM. 2023a. Watershed health and ecological security zoning throughout Iran. *Science of The Total Environment*. 905:167123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167123>

Sadeghi SHR, Hazbavi Z, Gholamalifard M. 2019. Zonation of health dynamism for the Shazand Watershed based on low and high flow discharges. *Watershed Engineering and Management*. 11(3):589–608.

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120288.1427>

Sadeghi SHR, Zabihi Silabi M, Sarvi Sadrabad H, Riahi M, Modarresi Tabatabaei S. 2023b. Watershed health and ecological security modeling using anthropogenic, hydrologic, and climatic factors. *Natural Resource Modeling*, e12371. <https://doi.org/10.1111/nrm.12371>

Wu D, Chen, T, Zhang L, Ling H, Yang J, Shen C. 2024. Ecological risk assessment under the PSR framework and its application to shallow urban lakes. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(16):23568–23578. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32651-0>

Yazd HRGH, Salehnia N, Kolsoumi S, Hoogenboom G. 2019. Prediction of climate variables by comparing the k-nearest neighbor method and MIROC5 outputs in an arid environment. *Climate Research*. 77(2):99–114. <https://doi.org/10.3354/cr01545>



## Spatio-Temporal Variability of the Effect of Pressure, State, and Response Indices on the Future Health of Iran's Watersheds

Seyed Hamidreza Sadeghi<sup>1</sup>\*, Ali Nasiri Khiavi<sup>2</sup>, Reza Chamani<sup>3</sup>, Negin Behnia<sup>4</sup>, Vahid Moosavi<sup>5</sup>, Hamid Noori<sup>6</sup>, Padideh Sadat Sadeghi<sup>7</sup>, Mohammad Hossein Shoushtari<sup>8</sup>, Abdulvahed Khaledi Darvishan<sup>9</sup>, Mehdi Vafakhah<sup>10</sup>, Hamidreza Moradi Rekabdarkolaei<sup>11</sup>

- 1, 10, and 11- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 2- Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran
- 3 and 4- Postdoctoral Fellow, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 5 and 9- Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 6- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Malayer University, Iran
- 7- Former M.Sc., Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 8- Former Ph.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Watershed health is a broad term that encompasses water resources, ecological quality (including vegetation, plant and animal communities, native plants, geomorphological features, and precipitation-runoff processes), and morphological features. The country's water and food security, as the main national goals, are under threat due to improper management of water and land resources. Comprehensive assessment and management of watersheds are considered effective and efficient approaches by international scientific communities for managing water, land, and their dependent resources, and for balancing the socio-economic needs of watershed communities with the health and sustainability of ecosystems. Also, awareness of watershed health is considered one of the most fundamental aspects of sustainable, comprehensive watershed management. Therefore, in this study, the effects of pressure, state, and response indicators on the health of the country's third-order watersheds were predicted.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** sadeghi@modares.ac.ir

**Citation:** Sadeghi, S.H.R., Nasiri Khiavi, A., Chamani, R., Behnia, N., Moosavi, V., Noori, H., Sadeghi, P.S., Shoushtari, M.H., Khaledi-Darvishan, A., Vafakhah, M., Moradi Rekabdarkolaei, H.R. 2026. Spatio-Temporal Variability of the Effect of Pressure, State, and Response Indices on the Future Health of Iran's Watersheds. *Watershed Management Research*. 39(2): 44-62.

**DOI:** 10.22092/wmrj.2025.371015.1638

**Received:** 13 October 2025, **Received in revised form:** 27 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 44-62.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

© Author(s)



### Materials and Methods

To achieve the research aim, more than 520 criteria related to pressure, state, and response indicators from environmental, climatic, and human factors were identified and collected for about 640 watersheds. Then, due to correlations among criteria, the variance inflation factor test was used to reduce the data and eliminate criteria with severe multicollinearity. Finally, the indicators were divided into two categories: static and dynamic. Next, the criteria affecting the health and security status of watersheds were extracted with appropriate spatial accuracy at the sub-watershed and PSR model levels, and their values were calculated for the current conditions (2023). After determining the dynamic criteria, various methods, including regression, the SARIMA model, and machine learning algorithms, were used to predict dynamic criteria for 2033, 2043, and 2053. After predicting the dynamic criteria, the PSR conceptual model was applied to future years, and the health zoning of the country's third-order watersheds was conducted in ArcGIS 10.8. To assess future status, dynamic indicators were predicted from time-series data for 2033, 2043, and 2053, and the effects of each indicator on watershed health were analyzed.

### Results and Discussion

A spatial zoning analysis of the health of the country's third-order watersheds in 2033, 2043, and 2053 showed that health status was heterogeneous. In the northern regions (Gilan, Mazandaran), high rainfall and dense vegetation cover result in favorable watershed health (60-70% in the good and very good classes). In contrast, the southern regions (Hormozgan and Sistan and Baluchestan) have poorer status (40-50% in the moderate to poor classes) due to low rainfall and inappropriate human activities. Accordingly, in the coming years, the health of northwestern regions is expected to decline somewhat, while eastern regions (such as Khorasan Razavi) will be severely affected by drought and excessive water extraction, with health declining to below 20%. Overall, the results showed that the response index (about 61%) had a greater effect on the health of the study watershed system than the pressure and state indices. Therefore, no significant change was observed in the future study years (2033, 2043, and 2053) in the impact of the PSR model indices on the watershed health index.

### Conclusion and Suggestions

The analysis showed that future watershed management should be based on rapid responsiveness, as it will increasingly rely on adaptive measures such as vegetation restoration and flood control. Also, although the impact of human pressures (about 20%) is relatively stable, its fluctuations require integrated management of human activities such as agriculture and urban development. On the other hand, the relative stability of the state index (about 19%) indicates the need to focus on long-term strategies, such as soil and water resource conservation. Therefore, combining flexible short-term measures with sustainable conservation policies will be the key to optimal watershed management in the face of future environmental changes. Overall, the findings of this study support a dynamic and adaptive approach to watershed management, in which the combination of short-term, reactive strategies based on monitoring (such as temporary changes in cropping patterns in response to drought) and long-term conservation strategies provides feedback for modifying and strengthening long-term, sustainable strategies (such as ecosystem restoration and integrated water resources management) and paves the way for the creation of an adaptive management approach, leading to a systemic correlation between these two levels or, by improving it, ensuring the health of watersheds against future changes. According to the study's results, it is recommended that governing bodies, such as the Natural Resources and Watershed Management Organization and the Ministry of Energy of Iran, use these findings to develop regulations for budget allocation to watershed management projects.

**Keywords:** Dynamic modeling, integrated watershed management, PSR conceptual framework, watershed health prediction

**Article Type:** Research Article

**Acknowledgement**

This work is based upon research funded by the Iran National Science Foundation (INSF) under project No. 4039029.

**Conflicts of interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

**Data Availability Statement**

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

**Authors' Contribution**

Seyed Hamidreza Sadeghi: Supervision, Conceptualization, Project Investigator, Manuscript Editing, Results Control

Ali Nasiri Khiavi: Conceptualization, Writing - Original Draft Preparation, Statistical and Software Analyses

Reza Chamani: Software and Statistical Analyses

Negin Behnia: Software and Statistical Analyses

Vahid Moosavi: Software and Statistical Analyses

Padideh Sadat Sadeghi: Software and Statistical Analyses

Hamid Noori, Mohammad Hossein Shoushtari, Abdolvahed Khaledi Darvishan, Mehdi Vafakhah, and Hamidreza Moradi Rekabdarkolaei: Data Curation

## تحلیل مقایسه‌ای سه مدل سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در عرصه‌های پخش سیلاب گریاگان فسا

علی جعفری<sup>۱\*</sup>، حمید حسینی‌مردی<sup>۲</sup>، مجتبی پاک‌پرور<sup>۳</sup>، امیر اسلامی<sup>۴</sup>

- ۱- استادیار بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران
- ۲- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۳- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۴- دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

مدیریت پایدار آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مستلزم برآورد دقیق اجزای تعادل آب، به‌ویژه تبخیر-تعرق واقعی (ETA) است. در کشاورزی آبی، تبخیر-تعرق واقعی به‌ویژه برای درک مصرف آب به‌وسیله پوشش گیاهی، حیاتی است. در سال‌های گذشته، با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری ETA مبتنی بر میدان، مدل‌های سنجش از دور ماهواره‌ای مانند متریک، سیبال و سپس اهمیت بیشتری دارند. در این پژوهش، عملکرد این سه مدل در برآورد ETA در دشت گریاگان استان فارس، ارزیابی و مقایسه انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

این پژوهش در دشت گریاگان در جنوب‌شرقی استان فارس با آب و هوای خشک و میانگین سالانه بارندگی ۲۳۰ میلی‌متر انجام شد. تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ از فصل کشاورزی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ استفاده شد. پس از انجام اصلاحات هندسی، رادیومتری و جو، مدل‌های سیبال، متریک و سپس بر اساس معادله تعادل انرژی سطح اجرا شدند.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: a\_j472000@yahoo.com

استناد: جعفری، ع، حسینی‌مردی، ح، پاک‌پرور، م، اسلامی، ا. ۱۴۰۵. تحلیل مقایسه‌ای سه مدل سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در عرصه‌های پخش سیلاب گریاگان فسا. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۹(۲): ۶۳-۷۹.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.371213.1642

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۶۳ تا ۷۹.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



با استفاده از این مدل‌ها، تشعشع خالص، شار حرارتی خاک، شار حرارت محسوس و شار گرمای نهان برآورد شد و سپس ETa لحظه‌ای و روزانه محاسبه شد. برای اعتبارسنجی از داده‌های مزرعه، بیلان آب خاک و تاریخچه آبیاری استفاده شد. شاخص‌های NDVI برای استخراج پیکسل‌های کشاورزی و ارزیابی مصرف آب محصول استفاده شد.

#### نتایج و بحث

نتایج نشان داد بیشترین دقت در برآورد ETa مربوط به مدل متریک ( $R^2 = 0/87$ ،  $RMSE = 0/85$  میلی‌متر در روز) بود که دلیل آن استفاده از واسنجی داخلی با پیکسل‌های لنگر بود. عملکرد مدل سبب نیز قابل قبول بود ( $R^2 = 0/79$ ). مدل سیبال، به‌رغم شباهت ساختاریش به متریک، به دلیل واسنجی‌نشده محلی، دقت کمتری ( $R^2 = 0/74$ ) داشت. با این حال با استفاده از مدل سیبال، نقشه‌های فضایی بهتری از ETa تولید شد. انتخاب مدل برای برآورد ETa به کاربرد مد نظر، در دسترس بودن داده‌های میدانی و دقت عددی یا مکانی دلخواه بستگی دارد. مدل متریک همراه با واسنجی پیکسل مرجع، برای ارزیابی‌های منطقه‌ای در مقیاس مزرعه مناسب‌تر بود. از سوی دیگر، با استفاده از سیبال و سبب می‌توان بینش‌های فضایی اولیه را در شرایط داده‌های میدانی محدود، ارائه داد. عملکرد برتر متریک بیانگر اهمیت ترکیب مشاهده‌های زمینی با تصویرهای ماهواره‌ای بود.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که مدل متریک ابزاری قابل اعتماد برای برآورد دقیق ETa در زمین‌های کشاورزی دشت گرباگان است و می‌توان به‌وسیله آن بر مصرف آب نظارت کرد و آبیاری را برنامه‌ریزی و بهره‌وری را ارزیابی کرد. افزون بر این، طبقه‌بندی پیکسل مبتنی بر NDVI به‌طور قابل توجهی برآورد مصرف آب کشاورزی را بهبود بخشید. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از تصویرهای ماهواره‌ای با وضوح زمانی زیاد (به‌عنوان مثال، Sentinel-2) و ترکیب مشاهده‌های میدانی بیشتر، استفاده شود.

#### واژگان کلیدی

اندازه‌گیری میدانی، بیلان آب خاک، پیکسل، داده‌های هواشناسی، سنجش از دور

#### مقدمه

مبتنی بر بیلان انرژی سطحی، امکان برآورد ETa با دقت و پوشش مکانی گسترده فراهم شده است. در این روش‌ها با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای حرارتی و طیفی، اجزای بیلان انرژی از جمله تابش خالص، شار گرمای محسوس و نهان، و شار گرمای خاک را در مقیاس پیکسلی محاسبه می‌کنند و نقشه‌های پراکنش مکانی-زمانی ETa را ارائه می‌دهند.

در این میان، سه الگوریتم مطرح و پرکاربرد وجود دارد. الگوریتم سبب که با بهره‌گیری از آن و داده‌های حرارتی و طیفی، می‌توان اجزای بیلان انرژی را مدل‌سازی کرد و ETa را در مقیاس پیکسلی استخراج کرد. این الگوریتم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای تحلیل مصرف آب گیاهان و مدیریت منابع آب کاربرد دارد.

یکی از نیازهای اساسی در مدیریت منابع آب و حل معادلات بیلان آبی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که سهم ETa در چرخه آب‌شناختی بسیار چشم‌گیر است، آگاهی دقیق از اندازه تبخیر-تعرق واقعی در انواع پوشش‌های گیاهی است. با این حال، برآورد دقیق ETa در مقیاس‌های منطقه‌ای و فصلی با چالش‌هایی همراه است که دلیل آن پیچیدگی‌های شرایط محیطی، ناهمگونی سطح زمین، و محدودیت‌های روش‌های سنتی اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای است. این روش‌ها، مبتنی بر داده‌های ایستگاهی و ضریب‌های گیاهی، به دلیل ناتوانی در نمایش تغییرات مکانی گسترده و اثرپذیری از پستی و بلندی‌ها، دقت و تعمیم‌پذیری محدودی دارند. با بهبود فناوری‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های

همکاران (۲۰۱۳). اگرچه مدل سبب در مقایسه با مدل متریک ساده‌تر است و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، دقت آن در بسیاری از شرایط قابل قبول است و در برخی مناطق حتی با نتایج متریک قابل مقایسه است.

در مقایسه با دو مدل نامبرده، مدل سیبال به‌عنوان یکی از نخستین رویکردهای بیلان انرژی سطح زمین در برآورد تبخیر-تعرق واقعی شناخته شده است. این مدل به‌وسیله باستیانسن (۲۰۰۰) توسعه یافت. از سوی دیگر، به‌دلیل قابلیت اجرای ساده، کاربرد گسترده‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. در ایران نیز سیبال از نخستین مدل‌هایی بود که استفاده شد و نتایج رضایت‌بخشی از اجرای آن گزارش کردند (عمادزاده، ۲۰۰۷، غلامی و همکاران، ۲۰۰۹).

افزون بر این، نتایج پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که مدل‌های نامبرده بسته به شرایط محیطی و نوع داده‌های ورودی عملکرد متفاوتی دارند. در این راستا، در دشت فریمان سالاری و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که عملکرد مدل سیبال با ضریب تعیین ۰/۹۶ و RMSE تقریبی ۰/۵ میلی‌متر در روز بسیار مطلوب بود. رستمی‌زاد و همکاران (۲۰۲۴) نیز در آبخیز سد خسیوه نشان دادند که ضریب تعیین و شاخص توافق مدل سیبال به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۹۲ بود. نتایج پژوهش فاخر و کاویانی (۲۰۲۴) در دشت اردبیل نیز نشان داد که عملکرد مدل‌های سیبال و متریک هر دو مناسب بود، اما دقیق‌ترین مدل، مدل سیبال با ضریب تعیین ۰/۹۷ بود. نتایج پژوهش‌های بین‌المللی نیز بیانگر الگوهای مشابه است. در این راستا، در پژوهشی در منطقه ریاض عربستان، عملکرد مدل متریک برتر از دیگر مدل‌ها گزارش شده است (العزبه و همکاران، ۲۰۲۴).

در ایران، پژوهش‌های انجام شده برای کاربرد مدل سبب کمتر است؛ اما نتایج موجود بیانگر کارایی قابل قبول این مدل در شرایط گوناگون اقلیمی کشور است (پریوش و داوری، ۲۰۱۵؛ ماهور و همکاران، ۲۰۱۵). از سوی دیگر، بررسی‌های جدیدتر نیز الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی مانند سیبال، سبب و تی‌سبب را به‌عنوان ابزارهای کارآمد برآورد ETa معرفی

الگوریتم متریک روشی با دقت زیاد و واسنجی داخلی که می‌توان با بهره‌گیری از آن، تبخیر-تعرق واقعی را با انطباق قابل توجهی با اندازه‌گیری‌های زمینی در مقیاس‌های گسترده، برآورد کرد. در این الگوریتم با استفاده از حداقل داده‌های زمینی می‌توان ETa را به‌طور قابل اعتمادی برآورد کرد.

الگوریتم سیبال که با بهره‌گیری از آن و با محاسبه مؤلفه‌های بیلان انرژی از داده‌های سنجش از دور می‌توان ETa را برآورد کرد. در مناطق ناهمگون با بهره‌گیری از سیبال همزمان با در نظر گرفتن عامل‌های اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و خصوصیات خاک می‌توان ETa را با دقت مناسبی برآورد کرد. در ایران، استفاده از این مدل‌ها نیز بهبود چشمگیری داشته است و در پژوهش‌های پرشماری کارایی آن‌ها در مدیریت منابع آب مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارزیابی شده است.

در دهه‌های گذشته کاربرد فناوری سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق واقعی گسترش چشمگیری یافته و در پژوهش‌های داخلی و خارجی پرشماری بر کارایی آن در مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی تأکید شده است. بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، سه الگوریتم سیبال (SEBAL)، سبب (SEBS) و متریک (METRIC) از رایج‌ترین و معتبرترین مدل‌ها به‌شمار می‌آیند.

مدل متریک به‌وسیله گروه پژوهشی دانشگاه آیداهو که پیش‌تر در تدوین روش مرجع FAO-56 مشارکت داشته‌اند، توسعه یافت و به‌دلیل نیاز کمتر به داده‌های میدانی، دقت زیاد، و امکان واسنجی با داده‌های ایستگاهی، در بسیاری از پژوهش‌های جهانی استفاده شده است (آلن، ۲۰۱۳؛ تاسیومی، ۲۰۱۹؛ یانگ، ۲۰۲۲). عملکرد این مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است و می‌توان با بهره‌گیری از آن تبخیر-تعرق واقعی را دقیق‌تر برآورد کرد.

نخستین بار مدل سبب به‌وسیله سو (۲۰۰۲) معرفی شد. با این مدل می‌توان بر پایه بیلان انرژی سطحی و داده‌های طیفی و هواشناسی تبخیر-تعرق را برآورد کرد. در پژوهش‌های جهانی پرشماری کارایی این مدل در شرایط مختلف اقلیمی بررسی شده است (سو و همکاران، ۲۰۰۵، مک‌کابه و همکاران، ۲۰۰۶ و لو و

دشت گربایگان استان فارس مقایسه و ارزیابی شد. نتایج این پژوهش با تمرکز بر دقت، کاربردپذیری، و قابلیت انطباق مدل‌ها با شرایط محلی، در بهبود مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی کاربرد خواهد داشت.

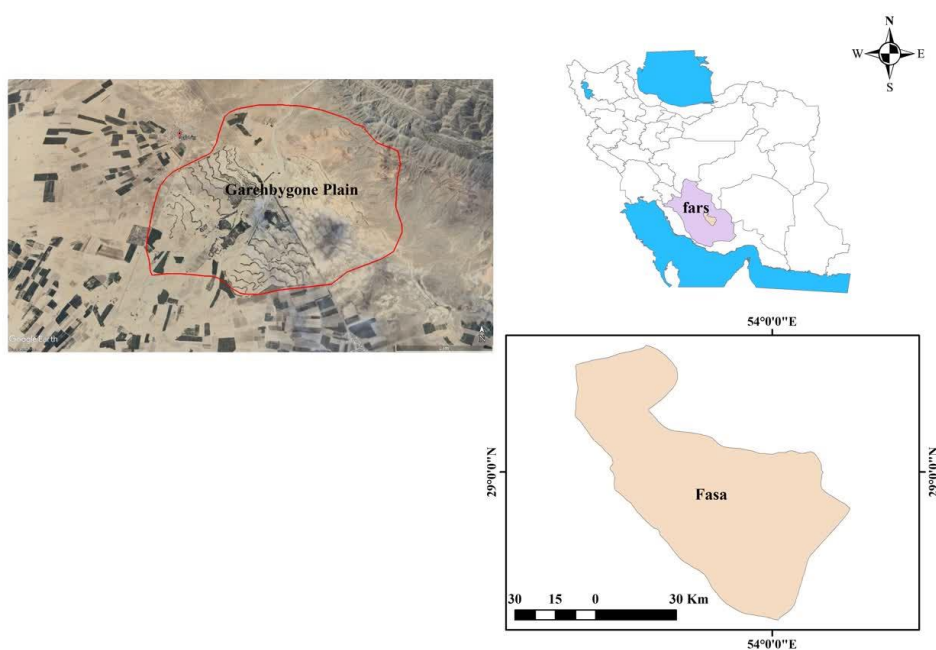
#### مواد و روش‌ها

##### معرفی منطقه پژوهش‌شده و داده‌های مشترک

این پژوهش در دشت گربایگان در جنوب‌شرقی استان فارس انجام شد. اقلیم منطقه خشک و میانگین سالانه بارش ۲۲۰-۲۳۰ میلی‌متر است. این منطقه شامل زمین‌های کشاورزی و مرتعی است که پخش سیلاب و آبخوانداری بیش از ۴۰ سال است در این زمین‌ها انجام‌شده است (شکل ۱).

کرده‌اند (رئیزی و همکاران ۲۰۲۵). افزون بر این، نتایج پژوهش‌های ماندال و همکاران (۲۰۲۳) و یانگ (۲۰۲۲) نشان داد که تبخیر-تعرق به‌شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک و نوع پوشش گیاهی است و انتخاب مدل مناسب نیازمند شناخت دقیق شرایط محیطی است.

نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که اگرچه عملکرد هر سه الگوریتم‌های سیبال، سبس و متریک در برآورد تبخیر-تعرق مطلوب است، اما عملکرد آن‌ها وابسته به شرایط محیطی، سنج‌های اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و کیفیت داده‌های ورودی است. همچنین، با توجه به اثرات اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، و نقش پخش سیلاب در تغییر رطوبت خاک و الگوهای تبخیر-تعرق، ضرورت دارد که این مدل‌ها در مقیاس محلی به‌طور دقیق ارزیابی شوند. در این پژوهش کارایی سه مدل سبس، متریک و سیبال در برآورد تبخیر-تعرق واقعی



شکل ۱- موقعیت دشت گربایگان در جنوب‌شرقی فسا در استان فارس (a، b و c موقعیت مزرعه‌های آزمایش‌شده).

Figure 1- The location of Dasht Gerbaigan in the southeast of Fasa in Fars province (a, b and c location of the tested farms).

#### داده‌های استفاده‌شده

- تصویرهای ماهواره‌ای لندست-۸ و ۹: این تصویرها شامل ۹ باند بازتابی و ۲ باند حرارتی با تفکیک مکانی

در هر سه مدل (متریک، سبس و سیبال)، داده‌های زیر به‌طور مشترک استفاده شدند:

۳۰ متر برای باندهای بازتابی و ۱۰۰ متر برای حرارتی بودند.

- داده‌های هواشناسی: این داده‌ها (شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشید و ساعات آفتابی) برای تاریخ‌های متناظر با تصویرهای ماهواره‌ای از ایستگاه‌های منطقه<sup>۱</sup> دریافت شد.

- پردازش تصویرها: در این مرحله تصحیح هندسی، رادیومتریک و جوی انجام شد و داده‌های بازتابی و دمای سطح استخراج شد.

#### مدل متریک

این مدل بر اساس بیلان انرژی سطح زمین و روش واسنجی داخلی برای محاسبه تبخیر-تعرق به کار برده شد. شیوه کار به شرح زیر بود:

- محاسبه تابش خالص ( $R_n$ ): این مؤلفه از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی با استفاده از معادلات استاندارد محاسبه شد.

- برآورد شار گرمای خاک ( $G$ ): این مؤلفه با استفاده از رابطه‌های تجربی وابسته به نوع خاک و پوشش سطح محاسبه شد.

- برآورد شار گرمای محسوس ( $H$ ): این مؤلفه بر اساس اختلاف دمای سطح و دمای هوای نزدیک زمین و سنج‌های اصلاح‌شده (به‌طور محلی) محاسبه شد.

- محاسبه شار گرمای نهان ( $\lambda E = LE$ ): این مؤلفه با استفاده از رابطه<sup>۱</sup> محاسبه شد.

$$\lambda E = R_n - H - G \quad (1)$$

$\lambda E$ : شار نهان گرمایی،  $R_n$ : شار خالص تابشی،  $G$ : شار گرمایی به درون زمین،  $H$ : شار محسوس گرمایی به هوا ( $W/m^2$ ) است.

- محاسبه ضریب تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_{RF}$ ): این مؤلفه با استفاده از مدل فائو پنمن - مانتیس<sup>۲</sup> و داده‌های ایستگاهی برای تبدیل تبخیر-تعرق لحظه‌ای به روزانه محاسبه شد.

- اعتبارسنجی مدل: با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) و بیلان آب خاک منطقه انجام شد.

#### مدل سبب

مدل سبب یک مدل فیزیکی است که با بهره‌گیری از آن و با استفاده از معادلات بیلان انرژی و سنج‌های سطحی می‌توان تبخیر-تعرق را برآورد شد. شیوه کار به شرح زیر بود:

- محاسبه تابش خالص، دمای سطح و آلبیدو: این مؤلفه‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای محاسبه شدند.

- استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI و LAI: از این مؤلفه‌ها برای تعیین وضعیت گیاهان و سنج‌های گسیلندگی و مقاومت سطح استفاده شد.

- برآورد شار گرمای محسوس ( $H$ ) و شار گرمای نهان ( $LE$ ): این مؤلفه‌ها با استفاده از مدل فیزیکی معادله انتقال حرارت و اختلاف دما میان سطح و هوا برآورد شدند.

- محاسبه تبخیر-تعرق: این مؤلفه در قالب لحظه‌ای و تبدیل به اندازه روزانه با استفاده از داده‌های هواشناسی و الگوریتم سبب محاسبه شد.

- اعتبارسنجی مدل: با مقایسه نتایج با داده‌های تبخیر-تعرق مرجع و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شد.

#### مدل سیبال

مدل سیبال بر اساس ارزیابی بیلان انرژی و نسبت بوون برای محاسبه تبخیر-تعرق طراحی شد. شیوه کار به شرح زیر بود:

- شناسایی نقاط گرم و سرد: در تصویر ماهواره‌ای برای تعیین دمای حداقل و حداکثر سطح انجام شد.

- محاسبه ضریب‌های اختلاف دمای سطح: این مؤلفه برای برآورد شار گرمای محسوس ( $H$ ) و گرمای نهان ( $LE$ ) محاسبه شد.

- استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح: این مؤلفه‌ها برای برآورد سنج‌های مقاومت تبخیری و انتقال حرارت به کار برده شدند.

۱- ایستگاه همدید فسا و ایستگاه تبخیر سنجی ایستگاه آبخیزداری کوثر

2- FAO Penman-Monteith

درصد رطوبت خاک پس از آبیاری به‌ویژه در لایه سطحی ۰-۳۰ سانتی‌متر، از ۲/۵۷٪ به ۷/۷۱٪ افزایش یافت که بیانگر تغییر قابل‌توجه ذخیره رطوبت خاک ( $\Delta S$ ) در لایه ریشه است.

میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک ۵/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد که برای محاسبه ظرفیت نگهداشت آب و سنج‌های ورودی مدل‌ها استفاده شد (جدول ۲).

ژرفای نفوذ آب با افزایش نوبت‌های آبیاری افزایش یافت و پس از آبیاری هشتم به ۲۱۳ سانتی‌متر رسید (جدول ۲). این داده‌ها برای تعیین لایه مؤثر ریشه و ارزیابی سهم آب نفوذی در  $ET_a$  واقعی مدل‌ها به کار برده شدند.

نتایج تحلیل بافت خاک نشان داد خاک منطقه عمدتاً شنی لوم تا لوم‌شنی بود و قابلیت نگهداری مؤثر آب در این خاک تا ژرفای حدود ۱۵۰ سانتی‌متر بود که این اندازه از ژرفا به‌عنوان مرجع برای تفکیک آب برگشتی از آب در دسترس تبخیر-تعرق در محاسبات بیلان آب خاک در نظر گرفته شد. با استفاده از ترکیب اطلاعات درصد رطوبت، ژرفای نفوذ آب و بافت خاک، ورودی‌های مهم برای واسنجی مدل‌های  $ET_a$  به‌دست آمد و رابطه میان داده‌های میدانی با خروجی مدل‌ها بررسی و به حالت بهینه درآورده شد.

- محاسبه تبخیر-تعرق لحظه‌ای و روزانه: این مؤلفه بر اساس بیلان انرژی سطح و داده‌های هواشناسی متناظر محاسبه شد.

- اعتبارسنجی مدل: با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق مرجع، بیلان آب خاک و داده‌های میدانی آبیاری انجام شد.

#### اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها

نتایج به‌دست آمده از هر سه مدل با داده‌های تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) و اندازه‌گیری‌های میدانی آبیاری و آب برگشتی مقایسه شدند. افزون بر این، برای ارزیابی صحت مدل‌ها از بیلان آب خاک منطقه استفاده شد. مقایسه آماری داده‌ها با استفاده از معیارهای ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای میانگین مطلق ( $MAE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) انجام شد.

#### برآورد مصرف آب کشاورزی

با استفاده از نقشه‌های  $NDVI$  و تفکیک پیکسل‌های زراعی از دیگر پوشش‌ها، اندازه تبخیر-تعرق واقعی در زمین‌های کشاورزی با هر سه مدل محاسبه شد و مصرف سالانه آب برآورد شد.

#### نتایج و بحث

##### بررسی شرایط فیزیکی و رطوبتی خاک منطقه

نتایج درصد رطوبت خاک مزرعه آزمایشی C (متعلق به کیامرث نکوئیان) قبل و بعد از آبیاری هشتم در جدول ۱ نشان‌دهنده شده است. بر پایه این داده‌ها،

جدول ۱- درصد رطوبت خاک و تغییر ذخیره رطوبت ( $\Delta S$ ) در مزرعه آزمایشی C.

Table 1 – Soil Moisture Percentage and Change in Soil Water Storage ( $\Delta S$ ) in Experimental Farm C.

$\Delta$ Moisture (%)	Moisture After 8th Irrigation (%)	Moisture Before 8th Irrigation (%)	Depth (cm)
37.2	71.7	34.5	0-30
8.3	30.7	22.4	30-60
6.7	12.10	25.5	60-90
21.1	54.5	33.4	90-120
4.9	97.4	2.5	120-150
-	67.4	-	150-180
-	57.2	-	180-210
-	49.1	-	210-240

جدول ۲- ژرفای نفوذ آب پس از هر نوبت آبیاری (cm).

Table 2 – Water Infiltration Depth after Each Irrigation (cm).

Irrigation Number	Farm A	Farm B	Farm C
1	79	32	84
2	163	42	139
3	168	76	156
4	173	98	161
5	183	142	179
6	194	164	185
7	208	186	193
8	214	213	213
9	231	231	221
10	-	-	234
11	-	-	238

جدول ۳- بافت خاک و درصد میانگین رطوبت در مزرعه C.

Table 3 – Soil Texture and Moisture Percentage in Experimental Farm C.

Soil Texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Sampling Depth (cm)
Sandy Loam	15.4	23.6	61	0-30
Sandy Loam	8.2	18.2	73	30-60
Sandy Loam	11	18.2	70	60-90
Sandy Loam	10	25.4	64	90-120
Loam/Sandy Loam	10	38	52	120-150
Sandy Loam	19	23.6	57	150-180
Sandy Loam	19	14.6	66	180-210
Loamy Sand	6	10.8	82	210-240

یازدهمین آبیاری بلندی آن به ۷/۶ سانتی‌متر رسید. با تبدیل این بلندی به حجم آب برگشتی و مجموع آن در کل زمین‌ها، اندازه‌های دقیقی برای مدیریت منابع آبی فراهم خواهد آمد.

نتایج مدل متریک برآورد تبخیر-تعرق و آب برگشتی با استفاده از درصد رطوبت خاک و جرم مخصوص ظاهری، اندازه آب برگشتی پس از هر نوبت آبیاری محاسبه شد (جدول ۵). روند بلندی آب برگشتی در نیم‌رخ خاک با افزایش نوبت آبیاری افزایش یافت، به‌گونه‌ای که پس از

جدول ۴- محاسبه اندازه آب برگشتی در مزرعه آزمایشی C.

Table 4- Calculation of the amount of returned water in the Experimental Farm C.

Irrigation time	Return water height (cm)	Density (B.D) (g/cm <sup>3</sup> )	Corrected Return water height (cm)	Return water volume (m <sup>3</sup> /ha)	Farm area (ha)	Total volume of returned water (m <sup>3</sup> )
first watering	0.00	1.56	0.00	0.0	15.2	0.0
Second irrigation	0.00	1.56	0.00	0.0	15.2	0.0
Third irrigation	0.00	1.56	0.00	0.0	15.2	0.0
Fourth irrigation	0.59	1.56	0.95	95.0	15.2	1444.0
Fifth irrigation	1.97	1.56	3.15	315.0	15.2	4788.0
Sixth irrigation	2.42	1.56	3.87	387.0	15.2	5882.4
Seventh irrigation	3.17	1.56	5.08	508.0	15.2	7721.6
The eighth irrigation	4.76	1.56	7.62	762.0	15.2	11582.4
Ninth irrigation	4.62	1.56	8.99	899.0	15.2	13664.8
10 <sup>th</sup> irrigation	7.04	1.56	11.26	1126.0	15.2	17115.2
11 <sup>th</sup> irrigation	7.60	1.56	12.17	1217.0	15.2	18498.4

در این پژوهش به دلیل ناچیز بودن تغییر ذخیره رطوبت و بسته بودن کرت‌های آبیاری، معادله بیلان آب خاک به شکل رابطه ۳ ساده‌تر و استفاده شد.

$$ET_a = Peff + I - RF \quad (3)$$

نتایج مقایسه نشان داد مدل متریک تبخیر-تعرق واقعی را به طور میانگین ۷/۴٪ بیشتر برآورد کرده است که این اندازه خطا در دامنه دقت قابل قبول بود و عملکرد مدل در شرایط منطقه‌ای مطلوب ارزیابی شد (جدول ۶). یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مک‌کیب و وود (۲۰۰۶)، وان در کوواست و همکاران (۲۰۰۹) و لیو و همکاران (۲۰۱۴) هم‌راستا است.

برای ارزیابی دقت مدل متریک در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa)، اندازه‌های محاسبه‌شده با استفاده از رابطه ۲ (معادله بیلان آب خاک) مقایسه شدند.

$$ET_a = Peff + I - Ro - RF - \Delta \quad (2)$$

$\Delta S$ : تغییرات ذخیره رطوبت خاک، Peff: اندازه بارندگی، I: اندازه آبیاری، Ro: اندازه رواناب خروجی از مزرعه، RF: اندازه آب برگشتی کشاورزی و ETa: اندازه تبخیر-تعرق واقعی است.

جدول ۵- مقایسه تبخیر-تعرق واقعی و مدل متریک در زمین‌های گربایگان فسا.

Table 5- Comparison of actual evapotranspiration and METRIC Model in Garbaigan lands of Fasa.

Volume of irrigation water (m <sup>3</sup> )	effective precipitation (mm), Peff	Return water volume(m <sup>3</sup> ) RF	Changes in soil moisture storage $\Delta S$	volume of runoff from the farm Ro (m <sup>3</sup> )	Actual evapotranspiration ETa (m <sup>3</sup> )	Evaporation-transpiration resulting from the METRIC Model (m <sup>3</sup> )
188941	9307	80477	0	0	117771	127196

نتایج مدل سبب و انسجی، اعتبارسنجی و برآورد مصرف آب در این پژوهش، از مدل سبب برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) دشت گربایگان با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای لندست-۸ و داده‌های هواشناسی بهره‌گرفته شد. برای صحت‌سنجی عملکرد این مدل، خروجی‌های آن با نتایج محاسبه‌شده از معادله فائو پنمن-مانتیس برای نقاط آبی (نظیر استخرها) مقایسه شد. ضریب گیاهی Kc برای این نقاط ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج و انسجی اولیه مدل نشان داد انطباق مدل با ETo ضعیف بود ( $R^2 \approx 0.54$ ). با اصلاح معادله و استفاده از سنجه سرعت باد، به‌ویژه بادهای بعدازظهر فصل گرم، تطابق مدل به طور قابل‌توجهی افزایش یافت ( $R^2 \approx 0.91$ )، که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در شرایط اقلیمی خاص منطقه بود.

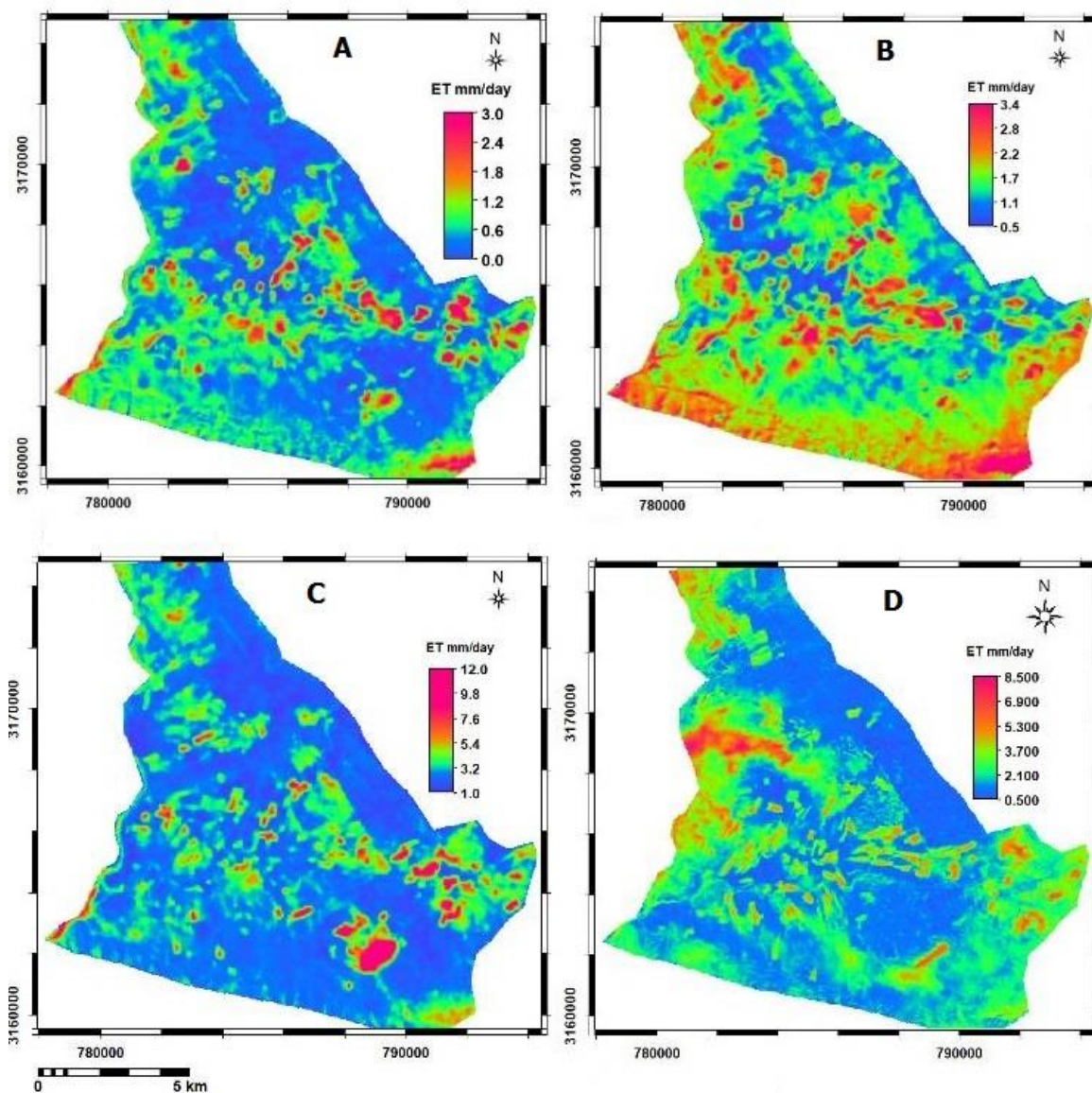
نتایج مدل سیبال استخراج نقشه‌ها و تحلیل ETa در این پژوهش، تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ سطح ۲ دوره مهر ۱۳۹۷ تا اسفند ۱۴۰۰ به‌عنوان داده‌های ورودی در اجرای مدل سیبال استفاده شدند. سپس،

نتایج و انسجی اولیه مدل نشان داد انطباق مدل با ETo ضعیف بود ( $R^2 \approx 0.54$ ). با اصلاح معادله و استفاده از سنجه سرعت باد، به‌ویژه بادهای بعدازظهر فصل گرم، تطابق مدل به طور قابل‌توجهی افزایش یافت ( $R^2 \approx 0.91$ )، که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در شرایط اقلیمی خاص منطقه بود.

برای اعتبارسنجی مدل در طول فصل رشد، نقشه‌های میانی شامل NDVI، آلیدو، گسیلندگی، LST،

زمینی ETa، مدل فائو پنمن - مانتیس به‌عنوان معیار مرجع انتخاب شد.

اندازه‌های تبخیر-تعرق واقعی (ETa) و تبخیر-تعرق مرجع (ETo) استخراج شد و با توجه به نبود داده‌های



شکل ۲- نقشه تبخیر-تعرق منطقه گربایگان فسا با استفاده از مدل سیبال

[A(۱۳۹۸/۰۹/۱۰)، B(۱۴۰۰/۱۰/۰۱)، C(۱۳۹۹/۰۳/۲۱) و D(۱۴۰۰/۱۲/۲۱)].

Figure 2- Evapotranspiration map of the Garbaygan-Fasa region using the SEBAL model [(A: 09/10/2019), (B: 10/01/2021), (C: 03/21/2020), (D: 12/21/2021)].

در دوره پاییز ۱۳۹۸ تا پایان ۱۴۰۰ نشان داد افزودن سنجه سرعت باد موجب افزایش دقت برآورد ETa در منطقه شد. برای تولید نقشه‌های نهایی ETa، نقشه‌های میانی در محیط نرم‌افزار انوی تهیه شدند. اندازه‌های ETa در فصل سرد میان ۰/۸ تا ۲/۳ میلی‌متر و در فصل گرم

اندازه‌های ETa مدل سیبال برای پیکسل‌های مرتبط با محدوده‌های آبی در بازه زمانی بررسی شد و با اندازه‌های ETa محاسبه‌شده به‌وسیله مدل مرجع مقایسه شد. ضریب گیاهی (Kc) برای این نواحی برابر ۱/۰۵ در نظر گرفته شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). نتایج واسنجی مدل

میدانی و ماهواره‌ای می‌تواند به بهبود دقت و مدیریت بهتر منابع آب کمک کند.

#### اندازه مصرف آب کشاورزی در منطقه مطالعه شده

بر اساس محاسبات مدل‌ها و داده‌های میدانی، اندازه مصرف آب کشاورزی در محدوده پخش سیلاب دشت غربایگان برای سال‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در سال‌های آبی ۹۷-۹۸ و ۹۹-۹۸ مصرف آب خالص نزدیک به ۶ میلیون متر مکعب بود، در حالی که در سال آبی ۱۴۰۰-۹۹ این اندازه تقریباً به نصف کاهش یافت و در نیمه دوم سال ۱۴۰۰ مجدداً روند آن افزایشی بود. این تغییرات با داده‌های بارش مؤثر ایستگاه تحقیقات آبخوانداری کوثر همسو بود و بیشترین مصرف آب در سالی ثبت شده که بیشترین اندازه بارش (۴۳۵ میلی‌متر) در آن رخ داده است (شکل ۳).

میان ۱/۸ تا ۵/۶ میلی‌متر در روز متغیر بود (شکل ۲). این تغییرات مؤید الگوی فصلی منطقی و تطابق با شرایط اقلیمی منطقه بود. تحلیل نتایج بیانگر اهمیت استفاده از داده‌های جامع و بهینه‌سازی سنج‌های مدل برای برآورد دقیق‌تر ETa بود.

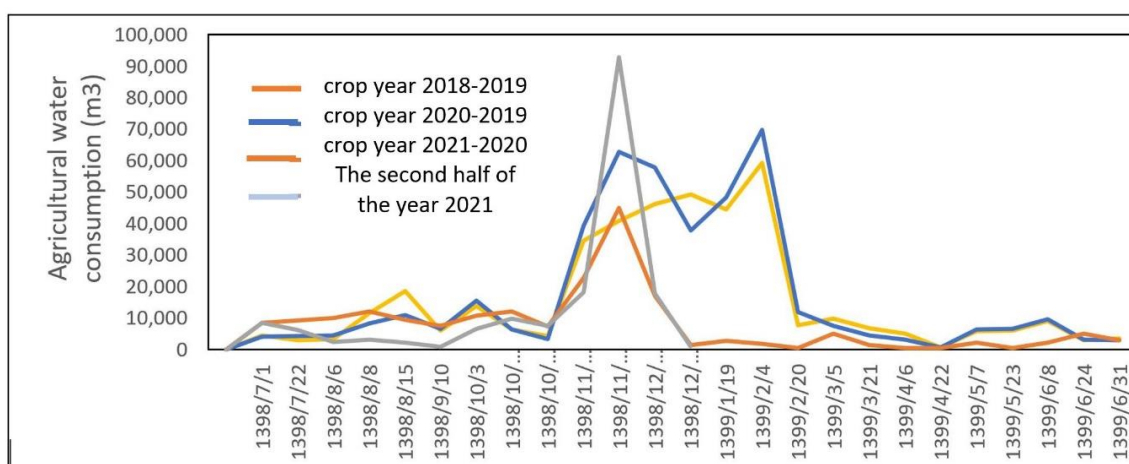
#### مقایسه کلی

مدل متریک بر مبنای داده‌های میدانی و بیلان آب است و با بهره‌گیری از آن می‌توان اندازه آب برگشتی و تبخیر-تعرق را به‌طور دقیق برآورد کرد. مدل‌های سبس و سیبال بر اساس داده‌های ماهواره‌ای هستند و با بهره‌گیری از آنها می‌توان تفکیک مکانی و زمانی تبخیر-تعرق را به‌ویژه پس از اصلاح سنج‌های اقلیمی (مانند سرعت باد) در حد مطلوبی انجام داد. نتایج هر سه مدل در دامنه اندازه‌های منطقی و قابل قبول بود و با داده‌های اقلیمی و کشاورزی منطقه همخوانی داشت. استفاده همزمان از داده‌های

جدول ۶- محاسبات اندازه مصرف آب زمین‌های کشاورزی بر اثر تبخیر-تعرق.

Table 6- Calculations of water consumption of agricultural lands due to evaporation-transpiration.

Period of consumption	net water consumption (MCM)	Rainfall (mm)
crop year (2018-2019)	5591769	256
crop year (2019-2020)	6051082	435
crop year (2020-2021)	2816936	66
The second half of the year 2021	2429320	69



شکل ۳- تغییرات مصرف آب کشاورزی در محدوده پخش سیلاب غربایگان.

Figure 3- Changes in agricultural water consumption in the area Garbaigan floods.

این، مقایسه یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مشابه در دشت اردبیل و ریاض عربستان (فاخر و کاویانی ۲۰۱۴، الازبا ۲۰۲۴) بیانگر آن است که دقت الگوریتم‌های مبتنی بر توازن انرژی با تصحیح دقیق سنجه‌ها، در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر، بیشتر است.

با تحلیل داده‌های میدانی خاک، مشخص شد افزایش قابل توجه رطوبت خاک و ژرفای نفوذ آب، به‌ویژه در لایه‌های سطحی، نقش مهمی در دقت برآورد ETa دارد. به‌بیان دیگر، با بهره‌گیری از مدل متریک به‌خوبی می‌توان تغییرات  $\Delta S$  و آب برگشتی را در محاسبات بیلان آب لحاظ کرد، در حالی که مدل‌های سبس و سیبال به‌دلیل محدودیت‌های داده‌ای و نیاز به سنجه‌های برآوردی، دقت کمتری در بازتاب این تغییرات داشتند. بافت خاک شنی لوم تا لوم شنی منطقه نیز نشان داد که ظرفیت ذخیره رطوبت محدود بود و نفوذپذیری زیاد خاک باعث افزایش حساسیت ETa به نوسانات بارش و آبیاری شد. این ویژگی بیانگر آن است که چرا اصلاح سنجه سرعت باد و حساسیت به دوره رشد گیاه در مدل‌های سبس و سیبال موجب بهبود برآورد ETa می‌شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت مدل متریک برای پژوهش‌های بلندمدت و برنامه‌ریزی راهبردی، به‌دلیل دقت بیشتر و کارایی در تحلیل مکانی، مناسب‌تر است.

مدل سبس به‌دلیل سادگی، سرعت پردازش و کارایی در شرایط داده‌ای محدود، گزینه‌ای اقتصادی برای پایش‌های گسترده و سریع است.

مدل سیبال با تمرکز بر سنجه‌های اقلیمی و اندام‌شناختی، برای تحلیل‌های فصلی و مدیریت آبیاری دقیق به‌کار برده می‌شود.

می‌توان گفت با ترکیب این مدل‌ها هم دقت حفظ شد و هم کارایی اجرایی افزایش یافت. در نتیجه چارچوب جامع‌تری برای مدیریت بهینه منابع آب در دشت گربایگان ارائه شد. با استفاده از این تحلیل محدودیت‌ها و چرایی تفاوت عملکرد مدل‌ها به‌روشنی بیان شد و از تکرار نتایج جلوگیری شد.

تحلیل نتایج این پژوهش نشان داد که دقت مدل‌های مختلف در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) عمدتاً ناشی از تفاوت‌های بنیادی در روش‌های پیاده‌سازی توازن انرژی، استفاده از داده‌های ورودی و حساسیت به سنجه‌های اقلیمی و گیاهی است. در مدل متریک به‌دلیل بهره‌گیری از توازن کامل انرژی، تصحیحات دقیق رادیومتریکی و جوی، و استفاده از داده‌های میدانی می‌تواند دقیق‌ترین برآوردهای ETa را ارائه داد. افزون بر این، در بازه‌های زمانی تصویرهای لندست دقت این مدل بیشتر بود. زیرا، با بهره‌گیری از مدل متریک جزئیات تغییرات مکانی پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک بازتاب داده شد. محدودیت اصلی مدل متریک، تکرار ۱۶ روزه تصویرهای لندست بود که تحلیل‌های روزانه یا پیوسته را محدود می‌کرد. با این حال، با ترکیب داده‌های مدل متریک با داده‌های هواشناسی یا سنجنده‌های با تفکیک زمانی بیشتر این محدودیت کاهش یافت.

اگرچه دقت مدل سبس در مقایسه با متریک کمتر بود، اما به‌دلیل سادگی داده‌های ورودی، امکان استفاده در شرایط داده‌ای محدود و حساسیت کمتر به تصحیحات جوی پیچیده، عملکرد مدل سبس در شرایط نیمه‌خشک منطقه

مناسب بود. اصلاح سنجه‌هایی مانند سرعت باد در این مدل باعث بهبود برآورد ETa شد. زیرا، نقش این سنجه در انتقال گرمای محسوس و برآورد تبخیر از سطح خاک مهم است. مشابه این اثر در مدل سیبال نیز مشاهده شد. با لحاظ کردن سرعت باد و تفاوت‌های گونه‌ای و رشدی پوشش گیاهی، نوسانات فصلی ETa با واقعیت میدانی هم‌خوانی مطلوبی داشت. این یافته بیانگر آن است که در مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی، سنجه‌های محلی اقلیمی و اندام‌شناختی، حتی در مدل‌های ماهواره‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت نتایج خروجی دارند. نتایج این پژوهش با یافته‌های پاک‌پرور و همکاران (۲۰۱۴)، زارع خورمری و همکاران (۲۰۲۱) و سینگ و سنای (۲۰۱۵) به‌ویژه در رابطه با عملکرد متریک در بازتاب تغییرات مکانی و زمانی ETa، هم‌راستا است. افزون بر

جدول ۷- مقایسه عملکرد مدل‌های سیبال، متریک و سبس در برآورد ETa  
(برگرفته از برخی منابع علمی ۲۰۲۰-۲۰۲۵).

Table 7- Performance comparison of SEBAL, METRIC and SEBS models in estimating ETa (taken from some scientific sources 2020-2025).

reference	Performance in arid and semi-arid climates	Limitations	benefits	Accuracy (RMSE / R <sup>2</sup> )	Model
Allen (2013), Singh and Senay (2015) Fagher et al (2024)	Very good, especially in precision farming	- The need for reference field data - Complexity in implementation - Images with low repetition (Landsat)	- High accuracy - Complete atmospheric and radiometric corrections - Sensitive to spatial characteristics	RMSE: ±0.80 mm/day R <sup>2</sup> : 0.92-0.96	METRIC
Bastiaanssen (2000), Zare Khurmiret al (2021)	acceptable; Suitable for growth cycle analysis	- Accuracy less than METRIC - dependent on parameters such as wind speed	- Less need for ground data - Suitable for seasonal analysis - Easier implementation than METRIC	RMSE: 0.92-1.5 mm/day R <sup>2</sup> : 0.80-0.89	SEBAL
Su (2002) Pakparvar et al (2014) Fagher et al (2024) Zoratipouret al (2019)	Optimum performance in semi-arid climate and low data	- Less sensitivity to local parameters - Accuracy dependent on meteorological data	- Fast and simple implementation - Less need for complex corrections - Good performance on limited data	RMSE: 0.62-1.53 mm/day R <sup>2</sup> : 0.90-0.96	SEBS

مناسب، گزینه برتر است. در مدل سیبال با تمرکز بر سنج‌های اقلیمی مانند سرعت باد و ویژگی‌های اندام‌شناختی پوشش گیاهی، می‌توان نوسانات فصلی و تفاوت‌های رشدی گیاهان را با دقت قابل قبول بازسازی کرد. اگرچه دقت آن کمی کمتر از مدل متریک بود، اما سهولت کاربرد و حساسیت آن به تغییرات دوره‌های رشد گیاهان، سبب شد تا مدل سیبال به‌عنوان ابزاری مناسب برای پژوهش‌های فصلی و مدیریت آبیاری معرفی شود. به‌دلیل سرعت پردازش زیاد در مدل سبس، سادگی اجرا و نیاز کمتر به داده‌های دقیق محلی، به‌رغم دقت کمتر در مقایسه با دو مدل دیگر، به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و عملی برای پایش‌های گسترده و دوره‌ای در شرایط داده‌ای

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد هر یک از مدل‌های سنجش از دور سیبال، متریک و سبس بر اساس ویژگی‌ها و سنج‌های خاص خود، در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETa) در اقلیم نیمه‌خشک دشت گرگان متفاوت بود. در مدل متریک با بهره‌گیری از توازن کامل انرژی و تصحیحات دقیق جوی و رادیومتریک، ETa با بیشترین دقت برآورد شد. در این مدل تغییرات مکانی ناچیز پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک به‌خوبی بازتاب داده شد. در این راستا، بر اساس دقت زیاد مدل متریک می‌توان گفت این مدل برای پژوهش‌های بلندمدت، برنامه‌ریزی دقیق مدیریت منابع آب و کشاورزی با نیازهای داده‌ای

دقیق سهم تغذیه سفره‌های زیرزمینی و بهبود مدیریت منابع آبی، پژوهش‌های جامع بیلان حجمی آب شبکه‌های آبیاری و پخش سیلاب پیشنهاد می‌شود.

#### سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از تمام همکاران و کارشناسان بخش سنجش از دور و علوم آب که در مراحل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای و تحلیل نتایج، همراهی و همکاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین، از حمایت‌های مالی و تسهیلات فراهم‌شده به‌وسیله پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس سپاسگزاریم.

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

#### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

#### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: طراحی مفهومی، روش‌شناسی، نگارش پیش‌نویس اولیه

نویسنده دوم: پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای، تحلیل نتایج

نویسنده سوم: ویرایش مقاله، نظارت

نویسنده چهارم: گردآوری داده‌ها، تحلیل نتایج

محدود به‌ویژه در اقلیم نیمه‌خشک معرفی شد. نتایج بررسی‌های میدانی (رطوبت خاک، نفوذپذیری زیاد و تغییرات مرحله‌ای آب آبیاری)، با نتایج مدل‌ها همخوانی مناسبی داشت که این یافته مؤید اهمیت توجه به ویژگی‌های خاک در مدیریت بهینه منابع آب است. افزون بر این، تفاوت قابل توجه در ضریب تبخیر-تعرق (Kc) بر اساس نوع پوشش گیاهی و مرحله رشد، بیانگر اهمیت استفاده از مدل‌های حساس به این سنجش‌ها است.

با توجه به محدودیت‌های زمانی تصویرهای ماهواره‌ای، پیشنهاد می‌شود برای بهبود دقت و تداوم زمانی پایش، از سنجش‌هایی با تکرار زمانی بیشتر یا روش‌های ریزمقیاس‌سازی استفاده شود. همچنین، با توجه به مزایا و محدودیت‌های هر مدل، انتخاب یا ترکیب مدل‌ها باید متناسب با هدف پژوهش، داده‌های در دسترس و سطح دقت مورد نیاز باشد. می‌توان گفت با ترکیب این مدل‌ها هم دقت حفظ شد و هم کارایی اجرایی افزایش یافت. در نتیجه چارچوب جامع‌تری برای مدیریت بهینه منابع آب در دشت گریگان ارائه شد. یافته‌های این پژوهش هم‌راستا با مطالعات پیشین (سینگ و سنی ۲۰۱۵؛ پاک‌پرور و همکاران ۲۰۱۴؛ زارع خرم‌پری و همکاران ۲۰۲۱) تأکید می‌کند که مدل‌های مبتنی بر توازن انرژی و تصحیح دقیق سنجش‌ها، بهترین ابزار برای پایش ETa در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک هستند.

بر پایه نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود برای اعتبارسنجی دقیق مدل‌ها، زیرساخت‌های اندازه‌گیری زمینی مانند لایسیمتر و برج‌های Eddy Covariance توسعه یابند. همچنین پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت برآوردها از داده‌های هواشناسی با وضوح زمانی زیاد (ساعتی یا کمتر) استفاده شود. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود برای بهبود تفکیک زمانی نقشه‌های تبخیر-تعرق از تصاویرهای ماهواره‌ای با تکرار زمانی بیشتر یا استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌سازی بهره‌گیری شود. در منطقه مطالعه‌شده راه‌اندازی ایستگاه‌های هواشناسی خودکار با قابلیت ارسال داده‌های آنلاین پیشنهاد می‌شود. برای تعیین

## فهرست منابع

- Alazba AA, Shakir AS, Al-Ghobari HM. 2024. Evaluation of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration in an arid region. *Earth Systems and Environment*. 8(4): 563–576. <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00379-z>
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Allen RG. 2013. REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. University of Idaho.
- Bastiaanssen WGM. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*. 229(1–2):87–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Emadzadeh M. 2007. Application of remote sensing in estimating water use efficiency at watershed scale (Case study: Qarasu Sub-Watershed). Master's Thesis, Sharif University of Technology. (In Persian).
- Fakher MS, Kavyani A. 2024. Estimation of actual evapotranspiration using Py\_SEBAL and METRIC algorithms in Moghan Plain, Ardabil Province. *Journal of Water and Soil Conservation*. 13(1): 105–120.
- Gholami Sefidkoochi MA, Mirlotfi M. 2009. Calculation of actual evapotranspiration of wheat using remote sensing (Case study: Gorganrud watershed). In 10<sup>th</sup> National Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction. Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian).
- Liu Y, Wang C, Liu X, He HS. 2014. Response of actual evapotranspiration to climate and land cover changes in Northeastern China. *Advances in Meteorology*. pp. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/960890>
- Lu Y, Liu R, Xu W. 2013. Estimating actual evapotranspiration in an arid region using Landsat data and SEBAL model. *Journal of Arid Land*. 5(1):28–40. <https://doi.org/10.1007/s40333-012-0140-2>
- Mandal N, Chanda K. 2023. Performance of machine learning algorithms for multi-step ahead prediction of reference evapotranspiration across various agro-climatic zones and cropping seasons. *Journal of Hydrology*. 13(3): 73–92. <https://doi.org/10.52547/gisj.13.3.73>
- Mahour H, Asadi N, Soltani S, Rezaei H. 2015. Investigating the effect of climate and vegetation cover on actual evapotranspiration using METRIC algorithm. *Journal of Water and Soil Science (Agricultural Science and Technology)*. 19(75): 101–114. (In Persian).
- McCabe MF, Wood EF. 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105(4):271–285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.006>
- Pakparvar M, Delavar M, Khosravi H. 2014. Comparison of evapotranspiration estimation using SEBAL and METRIC algorithms (Case study: Qazvin Plain, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*. 21(5): 63–78. (In Persian).
- Parivash P, Davari K. 2015. Evaluation of the Surface Energy Balance System (SEBS) algorithm in estimating actual evapotranspiration using satellite images (Case study: Neyshabur watershed). Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Raeesi M, Haghighizadeh A, Nozari H, Vazinivand H. 2025. Estimating actual evapotranspiration of irrigated crops and orchards in Nahavand city using the SEBAL algorithm. *Modeling and Management of Water and Soil*. 5(1): 213–230. <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.15091.1462>
- Rostamizad G, Pakparvar M, Abdi-Nezhad P, Abdollahi Z, Khalafi J. 2024. Estimating the amount of evapotranspiration in the area affected by flood spreading using the METRIC algorithm. *Watershed Engineering and Management*, 16(1), 154–169. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.361980.2016>
- Salari, H., Kashki, A., Karami, M., Zandi, R. (2023). Evaluation of climate change impacts on water requirement of cotton crop in Razavi Khorasan Province. *Journal of Climatology Research*. 14(53): 163–172. (In Persian).
- Singh RK, Senay GB. 2015. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over South Florida. *Remote Sensing*. 7(5): 5667–5695. <https://doi.org/10.3390/rs70505667>
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(1): 85–99. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Su Z, Schmugge T, Kustas W, Massman W. 2005. Evaluation of two models for estimating the surface energy balance over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing of Environment*. 94(3): 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.006>

Tasumi M. 2019. Evapotranspiration and consumptive irrigation requirements. In *Irrigation and Drainage*. ASCE. pp. 239–266. <https://doi.org/10.1061/9780784415445.ch11>

<https://www.unccd.int/resources/global-land-outlook>

Van Der Kwast J, Maathuis BHP, De Jong SM. 2009. Comparison of empirical models and SEBAL using ASTER imagery to estimate evapotranspiration in Libya. *International Journal of Remote Sensing*. 30(10): 2615–2626. <https://doi.org/10.1080/01431160802555891>

Yang Y. 2022. Evaluation of SEBAL model for estimating actual evapotranspiration using remote sensing data in arid regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*,

25: 100692.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100692>

Zare Khurmiri A, Ghanbarpour MR, Moftakhari HR. 2021 Evaluating SEBAL and METRIC models for estimating evapotranspiration in arid regions of Iran. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. 13(1): 99–112. (In Persian).

Zoratipour E, Soltani ASM, Zoratipour A. 2019. Spatial and temporal evaluation of different methods for prediction of reference evapotranspiration: Case study, Khuzestan Province. *Iranian Journal of Eco Hydrology*. 6(2): 465–478.

<https://doi.org/10.22059/ije.2019.272676.1017>



## Comparative Analysis of Three Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration in the areas flood water spreading of Garbaygan Fasa

Ali Jafari<sup>1\*</sup>, Hamid Hosseinimarandi<sup>2</sup>, Mojtaba Pakparvar<sup>3</sup>, Amir Eslami<sup>4</sup>

- 1- Assistant Professor, Forsts Rangelands and Watershed Management Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran
- 2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
- 3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
- 4- Associate Professor, Agricultural Engineering Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Sustainable water management in arid and semi-arid regions requires accurate estimation of water balance components, especially actual evapotranspiration (ET<sub>a</sub>). In irrigated agriculture, actual evapotranspiration is particularly crucial for understanding water consumption by vegetation. In recent years, due to the limitations of field-based ET<sub>a</sub> measurements, satellite remote sensing models such as METRIC, SEBAL, and SEBS have gained increasing importance. This study aims to evaluate and compare the performance of these three models in estimating ET<sub>a</sub> over the Garbayegan Plain, Fars Province, Iran.

#### Materials and Methods

The study was conducted in the Garbayegan Plain, located in southeastern Fars Province with an arid climate and an average annual rainfall of about 230 mm. Landsat 8 and 9 satellite imagery from the 2022–2023 agricultural season were used. After applying geometric, radiometric, and atmospheric corrections, the SEBAL, METRIC, and SEBS models were implemented based on the surface energy balance equation. Using these models, net radiation, soil heat flux, sensible heat flux, and latent heat flux were estimated, and instantaneous and daily ET<sub>a</sub> were subsequently to calculate. Field data, soil water balance, and irrigation records were used for validation. NDVI indices were applied to extract agricultural pixels and to evaluate crop water consumption.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Author's E-mail:** a\_j472000@yahoo.com

**Citation:** Jafari, A., Hosseini Marandi, H., Pakparvar, M. Eslami, A. 2026. Comparative Analysis of Three Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration in the areas flood water spreading of Garbaygan Fasa. *Watershed Management Research*. 39(2): 63-79.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2025.371213.1642

**Received:** 31 October 2025, **Received in revised form:** 23 November 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 63-79.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



### Results and Discussion

The results showed that the highest accuracy in ETa estimation was achieved by the METRIC model ( $R^2 = 0.87$ , RMSE = 0.85 mm/day), primarily due to its use of internal calibration via anchor pixels. The performance of the SEBS model was also acceptable ( $R^2 = 0.79$ ). Although SEBAL is structurally similar to METRIC, its lack of local calibration resulted in lower accuracy ( $R^2 = 0.74$ ). Nevertheless, SEBAL produced more detailed spatial maps of ETa. The selection of an appropriate model for ETa estimation depends on the intended application, the availability of field data, and the required numerical or spatial accuracy. The METRIC model, when combined with reference pixel calibration, was found to be more suitable for regional assessments at the farm scale. On the other hand, SEBAL and SEBS can provide useful preliminary spatial insights under limited field data conditions. The superior performance of METRIC highlights the importance of integrating ground observations with satellite imagery.

### Conclusion and Suggestions

The findings of this study indicate that the METRIC model is a reliable tool for accurately estimating ETa in agricultural lands of the Garbayegan Plain. It can be used to monitor water consumption, support irrigation scheduling and evaluate water use efficiency. Furthermore, NDVI-based pixel classification significantly improved estimation of agricultural water consumption. It is recommended that future studies employ satellite imagery with high-temporal-resolution satellites (e.g., Sentinel-2) for model calibration and validation, along with a greater integration of field observations.

**Keywords:** Field measurements, meteorological data, pixels, remote sensing, soil water balance

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgement

The authors sincerely acknowledge all colleagues and experts in the remote sensing and water sciences fields who have assisted in data collection, satellite imagery processing, and result analysis. The authors also express their gratitude for the financial support and facilities provided by the Soil and Watershed Conservation Research Institute and the Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Fars.

### Conflicts of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data Availability Statement

The data and results used in this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

### Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, methodology, writing – original draft

Author 2: Satellite image processing and results analysis

Author 3: Manuscript editing, supervision

Author 4: Data collection, analysis of results



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی منابع طبیعی

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

## پیش‌بینی و مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة استان گلستان

عبدالحسین بوعلی<sup>۱</sup>، نرگس کریمی‌نژاد\*<sup>۲</sup>، مرتضی اکبری<sup>۳</sup>، مریم یعقوبی<sup>۴</sup>، محسن فراهی<sup>۵</sup>

۱- محقق پسادکتری گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استادیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۵- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده علوم محیطی و توسعه پایدار، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

فرسایش آبی یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی در سراسر جهان است که منجر به نابودی خاک، کاهش حاصلخیزی و افزایش رسوبدهی در رودها می‌شود. استان گلستان، به‌ویژه مناطق شمالی آن با خاک‌های حساس لسی و شرایط اقلیمی خاص، یکی از کانون‌های اصلی فرسایش در ایران به‌شمار می‌آید. موضوع بررسی‌شده، ضعف روش‌های سنتی در ارائه پهنه‌بندی دقیق، سریع و قابل اطمینان برای فرسایش آبی در مناطق حساس استان گلستان است؛ جایی که روابط پیچیده و غیرخطی میان عامل‌های محیطی نیازمند رویکردهای پیشرفته‌تر است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌دلیل قابلیت مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی مکانی پدیده‌هایی مانند فرسایش به‌شمار می‌آیند. هدف این پژوهش، مدل‌سازی مکانی فرسایش آبی در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین و مقایسه کارایی آن‌ها با یک مدل ترکیبی (Ensemble) بود.

#### مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده زمین‌های شمالی استان گلستان با مساحت ۴۹۴۴٫۵ کیلومتر مربع بود که به‌دلیل پستی‌بلندی شیب‌دار، بارندگی‌های فصلی و خاک‌های لسی، مستعد فرسایش آبی است.

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: narges.karimi991@gmail.com

استناد: بوعلی، ع، کریمی‌نژاد، ن، اکبری، م، یعقوبی، م، فراهی، م. ۱۴۰۵. پیش‌بینی و مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة استان گلستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۲): ۸۰-۹۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.371189.1641

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۴/۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۸۰ تا ۹۵.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

© نویسندگان



از این رو، ابتدا لایه‌های اطلاعات مربوط به عامل‌های مؤثر بر فرسایش تهیه شد. این عامل‌ها ۸ شاخص محیط زیستی و اقلیمی شامل شاخص بارش (داده‌های ایستگاهی)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص بافت سطحی خاک (TGSI)، لایه کاربری زمین، شاخص رطوبت سطحی (NDMI)، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، شاخص خاک لخت (BI) و شاخص شوری خاک (NDSI) بودند که همگی از تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ استخراج شدند. نقشه موقعیت فرسایش‌های مشاهده‌شده به‌عنوان لایه وابسته در مدل‌سازی استفاده شد. بر این اساس در بازدید میدانی ۱۰۰ نقطه (۵۰ نقطه از فرسایش آبی و ۵۰ نقطه از نبودن آن) برداشت شد. در این پژوهش، از ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش و از ۳۰٪ آن برای آزمون استفاده شد. سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبانی (SVM) و وایزای درختی تقویت‌شده (BRT) برای آموزش مدل به‌کار گرفته شدند. سرانجام، یک مدل ترکیبی (Ensemble) بر اساس میانگین وزنی خروجی از هر یک از این سه مدل ساخته شد تا دقت پیش‌بینی افزایش یابد. عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب کاپا، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده و شاخص آماری تسلیل ارزیابی شد.

### نتایج و بحث

نتایج ارزیابی نشان داد که عملکرد هر یک از سه مدل به‌طور جداگانه RF، SVM و BRT در مدل‌سازی فرسایش آبی قابل قبول بود، اما عملکرد مدل ترکیبی (Kappa=۰/۹۰، ROC=۰/۹۳ و TSS=۰/۸۹) با بهره‌گیری از نقاط قوت هر یک از سه مدل نامبرده، در تفکیک دقیق پهنه‌های مستعد به فرسایش از پهنه‌های پایدار و کاهش خطاهای طبقه‌بندی برتر بود. این برتری مؤید آن است که در مدل ترکیبی (Ensemble) با میانگین‌گیری وزنی، می‌توان نبودن قطعیت‌ها را مؤثرتر از هر یک از مدل‌ها به‌طور جداگانه مدیریت کرد و یک خروجی پایدار و قابل اطمینان به‌دست آورد. نقشه پتانسیل فرسایش نهایی تولیدشده به‌وسیله این مدل دقیق بود و به‌وضوح نشان داد که مناطق شمالی، غربی و جنوب‌غربی منطقه مطالعه‌شده کانون‌های اصلی فرسایش آبی هستند. این الگوی مکانی صرفاً تصادفی نبوده، بلکه ریشه در تعامل پیچیده عامل‌ها دارد؛ در این مناطق با پستی‌بلندی شیب‌دار، سرعت جریان آب و قدرت فرساینده‌گی آن افزایش یافته و هم‌زمان با دریافت بارندگی‌های بیشتر انرژی لازم برای فرآیند فرسایش فراهم می‌آید و پوشش گیاهی که به‌عنوان سد دفاعی اولیه خاک عمل می‌کند، ضعیف است. با تحلیل اهمیت متغیرها نیز مشخص شد بارش به‌عنوان عامل محرک و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به‌عنوان عامل مقاوم، به‌ترتیب مهم‌ترین مهارکنندگان فرسایش در این منطقه است. این یافته بیانگر آن است که با هرگونه اقدام حفاظتی که بتوان پوشش گیاهی را بهبود بخشید (مانند کاشت، مدیریت چرای دام و جلوگیری از نابودی)، می‌توان به‌طور مستقیم اثرات ویرانگر باران را خنثی کرد. این اقدام مؤثرترین راهکار برای مهار فرسایش در مناطق حساس است. از این رو، نتایج این پژوهش هم یک نقشه دقیق ارائه داد و هم یک چارچوب علمی برای اولویت‌بندی و اجرای اقدامات مدیریتی مبتنی بر شواهد فراهم آورد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برتری مدل ترکیبی در این پژوهش، بیانگر قابلیت اطمینان زیاد رویکردهای مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی در کاهش خطا و افزایش دقت پیش‌بینی بود. استعداد مناطق پرخطر در بخش‌های شیب‌دار و با پوشش گیاهی کم، با اصول فیزیک فرسایش کاملاً سازگار است. اهمیت زیاد بارش و پوشش گیاهی مؤید آن است که مدیریت پایدار زمین، از جمله اجرای عملیات زیستی (مانند کاشت گونه‌های مقاوم و با ریشه‌های ژرف) مؤثرترین راهکار برای مهار فرسایش در منطقه بوده و بر پایه گزارش‌های علمی ۳۰ تا ۵۰٪ از رواناب سطحی و فرسایش را کاهش می‌دهد. تصمیم‌گیرندگان، مدیران منابع طبیعی و برنامه‌ریزان شهری و روستایی از نقشه فرسایش تولیدشده در این پژوهش می‌توانند به‌عنوان یک ابزار علمی و کاربردی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و تخصیص بهینه منابع، بهره‌گیرند. بر پایه نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با در نظر گرفتن محدودیت‌ها (مانند تفکیک مکانی برخی داده‌ها) از مدل‌های ترکیبی پیشرفته‌تر و داده‌هایی با دقت بیشتر استفاده شود.

## واژگان کلیدی

روش‌های یادگیری ماشین، شمال استان گلستان، فرسایش آبی، مدل‌سازی

## مقدمه

فرسایش خاک یکی از چالش‌های مهم محیط زیستی است که اثرات منفی قابل توجهی بر کشاورزی، منابع آب و بوم‌سازگان طبیعی دارد (ویجیتکوسوم ۲۰۲۰). استان گلستان یکی از مناطق مهم تولید محصولات زراعی (مانند گندم، جو، برنج و سیب‌زمینی) است. این استان به دلیل داشتن خاک‌های حاصلخیز و شرایط اقلیمی مناسب، در تأمین امنیت غذایی کشور نقش مهمی دارد. بخش عمده‌ای از تولیدات کشاورزی استان گلستان از زمین‌های لسی تأمین می‌شود که به دلیل فرسایش‌پذیری زیاد، توجه ویژه به کیفیت خاک و مدیریت مؤثر این زمین‌ها ضروری است (نجفی‌نیا و همکاران ۲۰۱۸). بر پایه نتایج بررسی‌ها اندازه فرسایش خاک در این منطقه تحت تأثیر کاربری‌های مختلف، متفاوت است؛ به طوری که در شهرستان‌های کلاله و مراوه‌تپه، کاربری‌های زراعی (۱۳۷۹۵۶ هکتار) و مرتعی (۲۸۱۶۶۲ هکتار) بیشترین تأثیر را بر فرسایش دارند (جعفری اردکانی و همکاران ۲۰۰۹). این نهشته‌ها سبب تغذیه سرشاخه‌های گرگان‌رود و اترک شده و با تولید رسوب زیاد در پایین‌دست عواقب زیست‌محیطی و اقتصادی جدی به همراه دارد. به طور ویژه، نرخ تولید رسوب در این نهشته‌ها ممکن است به ۲۱ تا ۲۷ تن در هکتار برسد (عرب‌خدری ۲۰۲۱). مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش در زمین‌های لسی، هم برای شناسایی و مدیریت این خطرها ضروری است و هم کشاورزان و مدیران منابع طبیعی می‌توانند با بهره‌گیری از آنها در تصمیم‌گیری‌ها و تعیین تدابیر مناسب، از کاهش کیفیت خاک (فرسایش و رسوب) و آسیب‌های تولیدات جلوگیری کنند (موسوی و همکاران ۲۰۲۱). با توجه به پیچیدگی عامل‌های مؤثر بر فرسایش خاک، ممکن است استفاده از روش‌های سنتی برای ارزیابی و مدل‌سازی این پدیده ناکافی باشد (معماریان و اکبری

۲۰۲۱). مدل‌های سنتی مانند  $PSIAC^1$  و  $IRIFR^2$  به طور گسترده‌ای برای ارزیابی فرسایش آبی و بادی استفاده می‌شوند (جهانی و همکاران ۲۰۲۴). این مدل‌ها معمولاً بر اساس داده‌های میدانی و ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند بافت، شیب، پوشش گیاهی و بارش طراحی شده‌اند (بشری و همکاران ۲۰۲۳؛ معماریان و همکاران ۲۰۲۳). با این مدل‌ها معمولاً نمی‌توان تعاملات پیچیده میان عامل‌های مختلف را به خوبی شبیه‌سازی کرد. در نتیجه ممکن است دقت پیش‌بینی آن‌ها کم باشد (بوعلی و همکاران ۲۰۲۴). به این دلیل، در سال‌های پیشین به استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری ماشین توجه بیشتری شده است (اکبری و همکاران ۲۰۱۶). با این روش‌ها می‌توان حجم زیادی از داده‌های ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و پستی‌بلندی را پردازش کرد و با شناسایی الگوهای فرسایش پیش‌بینی دقیقی از اندازه آن، ارائه داد (بوعلی و همکاران ۲۰۲۵؛ القاضی و همکاران ۲۰۲۳).

نتایج پژوهشی در زمین‌های شرق دریاچه ارومیه نشان داد بهترین عملکرد در پیش‌بینی فرسایش‌پذیری بادی خاک مربوط به مدل شبکه عصبی هیبرید شده با الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA) بود (راعی و همکاران ۲۰۲۰). جلالی‌فرد و همکاران (۲۰۱۸) فرسایش تونلی را در زمین‌های لسی استان گلستان بررسی کردند و با استفاده از وایازی لجستیک خطر تشکیل تونل را پیش‌بینی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد متغیرهای مختلف مانند مقاومت خاک و فاصله از آبراهه تأثیر زیادی بر خطر تشکیل تونل دارند. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در آبخیز باختگان نشان داد عملکرد مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی

1-Iran Research Institute of Forest and Rangelands

2- Pacific Southwest Inter- Agency Committee

بر فرسایش خاک را دقیق‌تر شناسایی کرد و راهکارهای مدیریتی مناسبی برای کاهش اثرات منفی آن ارائه داد. با توجه به اهمیت موضوع (تهدید و فرصت نهشته‌های لسی) و نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع طبیعی، انجام این پژوهش می‌تواند گامی مؤثر برای حفاظت از خاک و توسعه پایدار در منطقه به‌شمار آید.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعه‌شده

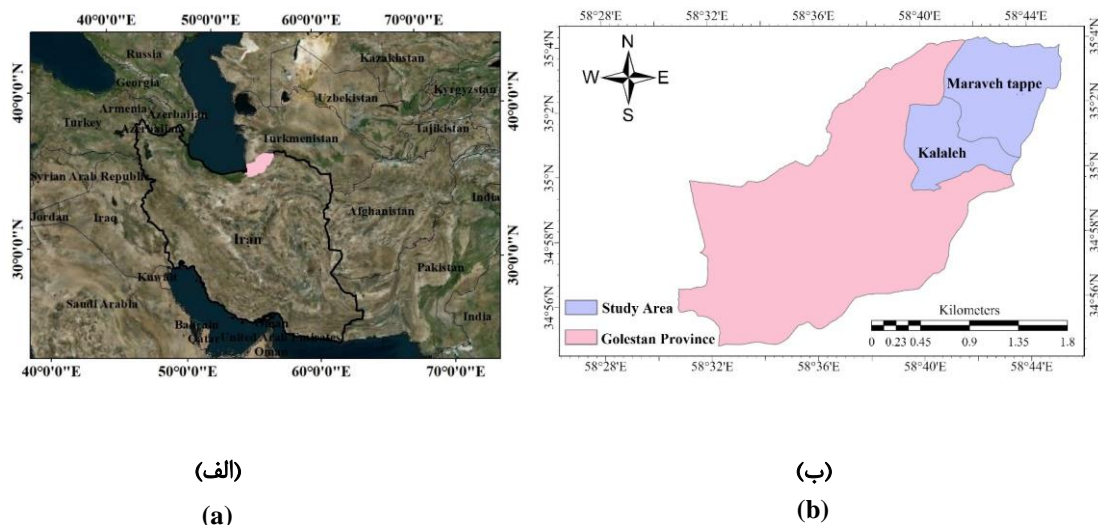
منطقه پژوهشی شمال‌شرق استان گلستان شامل شهرستان‌های کلاله و مراوه تپه با مساحت ۴۹۴۴٫۵ کیلومتر مربع بود (شکل ۱). بیش از دو سوم استان گلستان آب و هوای خشک و نیمه‌خشک دارد که با نزدیک شدن به سوی شمال و شهرستان‌های مراوه تپه و کلاله، خشکی آن افزایش می‌یابد. میانگین سالانه بارش و دمای منطقه در مدت دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۰) به ترتیب ۲۷۵/۴ میلی‌متر و ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شد.

#### لایه‌های ورودی

از جمله عوامل مؤثر بر فرسایش آبی می‌توان به عامل‌های اقلیمی، خاک، پستی بلندی و پوشش گیاهی اشاره کرد (یانگ و همکاران ۲۰۲۳). اولین گام برای مدل‌سازی مکانی فرسایش با مدل‌های یادگیری ماشین، تعیین و انتخاب عامل‌های مؤثر بر فرسایش است (محمدی‌فرد و غلامی ۲۰۲۱). از این رو، در این طرح ابتدا با بررسی منابع و ارزیابی مدل‌های موجود، عامل‌های تأثیرگذار بر فرسایش آبی تعیین شد. دومین ورودی به مدل‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی مکانی، نقاط فرسایشی است. در این پژوهش نقاط فرسایش آبی، در بازدیدهای میدانی تعیین شد. بر این اساس ۱۰۰ نقطه فرسایش آبی در منطقه شناسایی شد.

فرسایش بادی و مدل ماشین بردار پشتیبانی برای پیش‌بینی فرسایش آبی، خوب بود. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد زیاد مدل‌های هوش مصنوعی در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده فرسایش خاک است (رن و همکاران ۲۰۲۴). پیری و مبارکی (۲۰۲۱) در زمین‌های قرقری شهرستان هیرمند به‌منظور پیش‌بینی شوری خاک از روش‌های زمین‌آمار و مدل‌های هوش مصنوعی شامل شبکه عصبی مصنوعی، درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد در برآورد شوری خاک دقت روش‌های هوش مصنوعی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از روش‌های زمین‌آمار بود.

اگرچه در پژوهش‌های پیشین از دقت زیاد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پهنه‌بندی فرسایش گزارش شده است، اما اغلب این پژوهش‌ها بر اساس کاربرد جداگانه این مدل‌ها بوده و از قابلیت مدل‌های ترکیبی برای کاهش نبودن قطعیت در آنها بهره‌گیری نشده است. افزون بر این، در بیشتر این پژوهش‌ها به تلفیق جامع شاخص‌های سنجش از دور برای فرسایش آبی کمتر توجه شده است. از این رو، سعی شد در این پژوهش این خلأ جبران شود. مروری بر نتایج پژوهش‌های پیشین بیانگر آن است که پژوهشگران برای غلبه بر محدودیت‌های مدل‌های سنتی، به استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی روی آورده‌اند. در این راستا، کارایی زیاد مدل‌هایی مانند شبکه‌های عصبی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی انواع فرسایش (آبی و بادی) در مناطق مختلف ایران از جمله استان گلستان به اثبات رسیده است. با این حال، هدف این پژوهش ارزیابی و مدل‌سازی فرسایش خاک در نهشته‌های لسی شمال شرق استان گلستان (شهرستان‌های مراوه تپه و کلاله)، با استفاده از روش‌های داده‌کاوی بود. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری یک مدل ترکیبی وزنی مبتنی بر سه الگوریتم یادگیری ماشین و ادغام شاخص‌های ماهواره‌ای برای ارائه دقیق‌ترین پهنه‌بندی مکانی فرسایش آبی در شمال استان گلستان بود. با بهره‌گیری از نتایج این پژوهش می‌توان عامل‌های مؤثر



شکل ۱ - موقعیت منطقه مطالعه شده: الف- ایران، ب- شهرستان‌های کلاله و مراوه‌تپه در استان گلستان  
**Figure 1- Location of the study area: a) Iran, b) Kalaleh and Maraveh Tappeh counties in Golestan Province.**

به تحلیل دقیق‌تری از وضعیت رطوبت، مواد آلی و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دست یافت. افزون بر این، نقاط آموزشی برای اجرای مدل‌ها بر اساس بودن (۵۰ نمونه) و نبودن (۵۰ نمونه) فرسایش آبی که در مدت بازدید میدانی برداشت شده بودند، اجرا شد. از این‌رو، از مناطقی هم که فرسایش آبی وجود نداشت، نمونه‌گیری شد. به‌منظور یکپارچه‌سازی لایه‌های ورودی برای مدل‌سازی، تمام لایه‌های محیطی با استفاده از روش‌های استاندارد نزدیکترین همسایه و درون‌یابی دوخطی هم‌مقیاس-سازی شدند. هدف این پژوهش، ایجاد یک مدل جامع و کارآمد برای پیش‌بینی فرسایش آبی بود که بتوان به مدیریت بهتر منابع طبیعی و کشاورزی کمک کرد.

#### مدل‌های یادگیری ماشین

در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی فرسایش خاک، ۳ روش یادگیری ماشین با ویژگی‌ها و مزایای ویژه خود به‌کار گرفته شد. تمام این مدل‌ها در محیط برنامه‌نویسی R اجرا شدند. سنج‌های مدل‌ها بر اساس تنظیمات بهینه‌سازی شده در فرآیند مدل‌سازی تعیین شدند. در مدل SVM از هسته RBF به‌دلیل عملکرد خوب در مدل‌سازی روابط غیرخطی برای داده‌های

تعیین شاخص‌های سنجش از دوری و پستی‌بلندی برای تهیه شاخص‌های سنجش از دوری نیز از تصویر ماهواره‌ی لندست استفاده شد. به‌منظور سهولت در استفاده از باندها، این تصویر از سامانه موتور گوگل‌ارث تهیه شد. در این پژوهش از تصویر لندست ۸ استفاده شد. تصویرها در تاریخ تیر ماه ۱۴۰۳ انتخاب شدند تا اثر تغییرات فصلی به حداقل برسد. این داده‌ها به‌طور پیش‌فرض با تصحیحات رادیومتریک و جوی بودند و متغیرها و شاخص‌ها بر اساس همین داده‌های تصحیح‌شده استخراج شدند.

در این پژوهش، به‌منظور مدل‌سازی فرسایش آبی از مجموعه‌ای از شاخص‌های سنجش از دوری استفاده شد که به‌طور ویژه برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف فرسایش خاک طراحی شده‌اند. این شاخص‌ها شامل NDVI (شاخص تفاضلی بهنجار شده پوشش گیاهی)، NDMI (شاخص رطوبت بهنجار شده)، NDSI (شاخص شوری بهنجار شده)، TGSi (اندازه ذرات بالای سطح خاک) و BSI (شاخص خاک لخت)، CHRIPS (بارش)، کاربری زمین و مدل رقومی ارتفاعی (تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری ایران با دقت ۳۰ متر)، هستند. با استفاده از این شاخص‌ها، می‌توان

اندازه توافق میان پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های واقعی را می‌سنجد، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد کلی مدل در دسته‌بندی صحیح نمونه‌ها به کار گرفته شد. دامنه تغییرات این شاخص از +۱ تا -۱- متغیر است (بوفانا و همکاران ۲۰۲۰). منحنی مشخصه عملکرد نیز، با نمایش تصویری از تعادل میان نرخ مثبت واقعی و نرخ مثبت کاذب در آستانه‌های مختلف، امکان ارزیابی جامع‌تری از عملکرد مدل در تفکیک طبقه‌ها را فراهم آورد. در این شاخص طبقه‌های عالی (۰/۹ - ۱)، بسیارخوب (۰/۸ - ۰/۹)، خوب (۰/۷ - ۰/۸)، متوسط (۰/۶ - ۰/۷) و ضعیف (۰/۵ - ۰/۶) برای همبستگی کیفی و کمی سطح زیر منحنی ارائه شده است (دوکوتا و همکاران ۲۰۱۳). سرانجام، آمار مهارت واقعی مبتنی بر آستانه، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی حساسیت مدل به تغییرات در آستانه تصمیم‌گیری، به کار گرفته شد تا از ارائه نتایج قابل قبول در شرایط مختلف به‌وسیله مدل اطمینان حاصل شود. طبقه‌های در شاخص TSS به ترتیب ضعیف (کمتر از ۰/۲) متوسط (۰/۲ تا ۰/۶) و خوب (بزرگ‌تر از ۰/۶) در نظر گرفته شده است (الوش و همکاران ۲۰۰۶). استفاده از این سه شاخص، امکان ارزیابی چندوجهی و دقیق‌تری از عملکرد مدل‌ها را فراهم آورد.

### نتایج و بحث

#### شاخص‌های سنجش از دوری

در مدل‌سازی فرسایش آبی منطقه شمال استان گلستان (شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة)، هر یک از شاخص‌های تعیین‌شده، عامل‌های تعیین‌کننده شدت فرسایش به‌شمار می‌آیند. شاخص BI بیانگر مناطقی با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی بود که اندازه‌های بیشتر آن در جنوب و جنوب‌شرق منطقه، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری این نواحی در برابر فرسایش آبی بود. شاخص Chirps بیانگر اندازه و پراکندگی بارش بود. اندازه‌های بیشتر این شاخص در نواحی مرکزی و جنوبی بیانگر توان بیشتر برای ایجاد رواناب و فرسایش بود. مدل رقومی ارتفاع، نمایانگر شیب و

محیطی، استفاده شد. در مدل RF تعداد ۵۰۰ درخت بر اساس آزمون اندازه‌های مختلف با بهترین عملکرد به کار گرفته شد. در مدل BRT نرخ یادگیری برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد تا از بیش‌برازش جلوگیری شده و فرایند یادگیری به‌طور پایدار انجام شود. مدل جنگل تصادفی<sup>۳</sup> یکی از روش‌های خوب در یادگیری ماشین است که برای طبقه‌بندی و وایازی استفاده می‌شود. این مدل با ایجاد مجموعه‌ای از درختان تصمیم و ترکیب نتایج آن‌ها دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد. جنگل تصادفی به دلیل کاهش خطر بیش‌برازش و قابلیت پردازش داده‌های بزرگ و پیچیده، به‌عنوان یک روش بسیار مؤثر شناخته شده است (بلگیو و دراگو ۲۰۱۶). مدل ماشین بردار پشتیبان<sup>۴</sup> یک الگوریتم قدرتمند برای شناسایی مرزهای میان طبقه‌ها است. این مدل با استفاده از هسته‌های مختلف، به‌ویژه هسته خطی، داده‌ها را در فضاهای چندبعدی تفکیک می‌کند. SVM به دلیل به کارگیری داده‌های غیرخطی و پیچیده، برای تحلیل فرسایش خاک بسیار مناسب است (تانگ و همکاران ۲۰۲۰). مدل وایازی درختی پیشرفته<sup>۵</sup> ترکیبی از چندین درخت تصمیم است که برای بهبود دقت پیش‌بینی طراحی شده است. این مدل با تمرکز بر الگوهای پیچیده داده‌ها، روابط غیرخطی میان متغیرها را شناسایی می‌کند. عملکرد BRT با استفاده از روش‌های تقویت به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و به‌عنوان یک ابزار مؤثر در تحلیل فرسایش خاک شناخته شده است (پارک و همکاران ۲۰۱۶).

#### ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این پژوهش از سه شاخص ضریب کاپا، منحنی تشخیص عملکرد<sup>۶</sup> و آمار واقعی مهارت مرتبط با آستانه<sup>۷</sup> به‌عنوان روش‌های ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شد. در این پژوهش داده‌ها با روش ۷۰٪ آموزش و ۳۰٪ آزمون تقسیم شدند. ضریب کاپا، که

- 3- Random Forest (RF)
- 4- Support Vector Machine (SVM)
- 5- Boosted Regression Trees (BRT)
- 6- Receiver Operating Characteristic (ROC)
- 7- True Skill Statistic (TSS)

استفاده از مدل BRT عمدتاً نواحی شمالی و مرکزی منطقه به‌عنوان پهنه‌های با توان فرسایشی زیاد شناسایی شد.

بر اساس اندازه شاخص OOB Error برابر با ۰/۱۲، مدل RF (بیشترین اندازه ۰/۹۸)، مناطق گسترده‌تر و پراکنده‌تری در شمال و مرکز را در طبقه‌های پرخطر شناسایی کرد و مرزهای خطر را گسترده‌تر رسم کرد. مدل SVM نیز شبیه دیگر مدل‌ها بود. برخی تفاوت‌های محلی بیانگر آن بود که با اندازه بیشتر شاخص عملکرد ( $ROC = ۰/۸۴$ ,  $KAPPA = ۰/۸۴$  و  $TSS=۰/۸۷$ ) مناطق خطر با دقت مکانی بیشتری شناسایی شد. دلیل عملکرد زیاد و الگوریتم پیشرفته مدل SVM آن است که بر اساس شناسایی شرایط متفاوت و تعیین توابع گوناگون ناسنجه‌ای، امکان بیشترین اندازه تفکیک در میان داده‌ها را فراهم می‌آورد (واپنیک ۱۹۹۵). بر پایه نتایج جدول ۱، عملکرد هر یک از سه مدل به‌طور جداگانه در ارزیابی فرسایش خاک نسبتاً مطلوب بود، اما عملکرد مدل ترکیبی ( $Kappa=۰/۹۰$ ,  $ROC=۰/۹۳$  و  $TSS ۰/۸۹$ )، به مراتب برتر بود. این مدل بر پایه میانگین وزنی خروجی سه الگوریتم و متناسب با معیارهای کارایی هر مدل ساخته شد، به‌گونه‌ای که سهم مدل‌های دقیق‌تر در ترکیب بیشتر بود.

نقشه خروجی مدل ترکیبی نشان داد که این رویکرد ضمن ترکیب نقاط قوت هر یک از مدل‌های استفاده‌شده به‌طور جداگانه، مرزهای مکانی فرسایش را با وضوح و جزئیات بیشتری در مقایسه با کاربرد هر یک از آنها نشان داد و با بهره‌گیری از این رویکرد توزیع مکانی نواحی پرخطر به‌طور واقع‌بینانه‌تر رسم شد. مقایسه سه مدل یادگیری ماشین نشان داد که دقت مکانی مدل SVM بیشتر بود، اما عملکرد مدل ترکیبی برتر بود و با بهره‌گیری از آن مرزهای فرسایش واقع‌بینانه‌تر رسم شد. این یافته با نتایج پژوهش‌های اخیر مبنی بر استفاده از مدل‌های ترکیبی برای پیش‌بینی فرسایش در مناطق خشک و نیمه‌خشک هم‌راستا است (بوعلی و همکاران ۲۰۲۴).

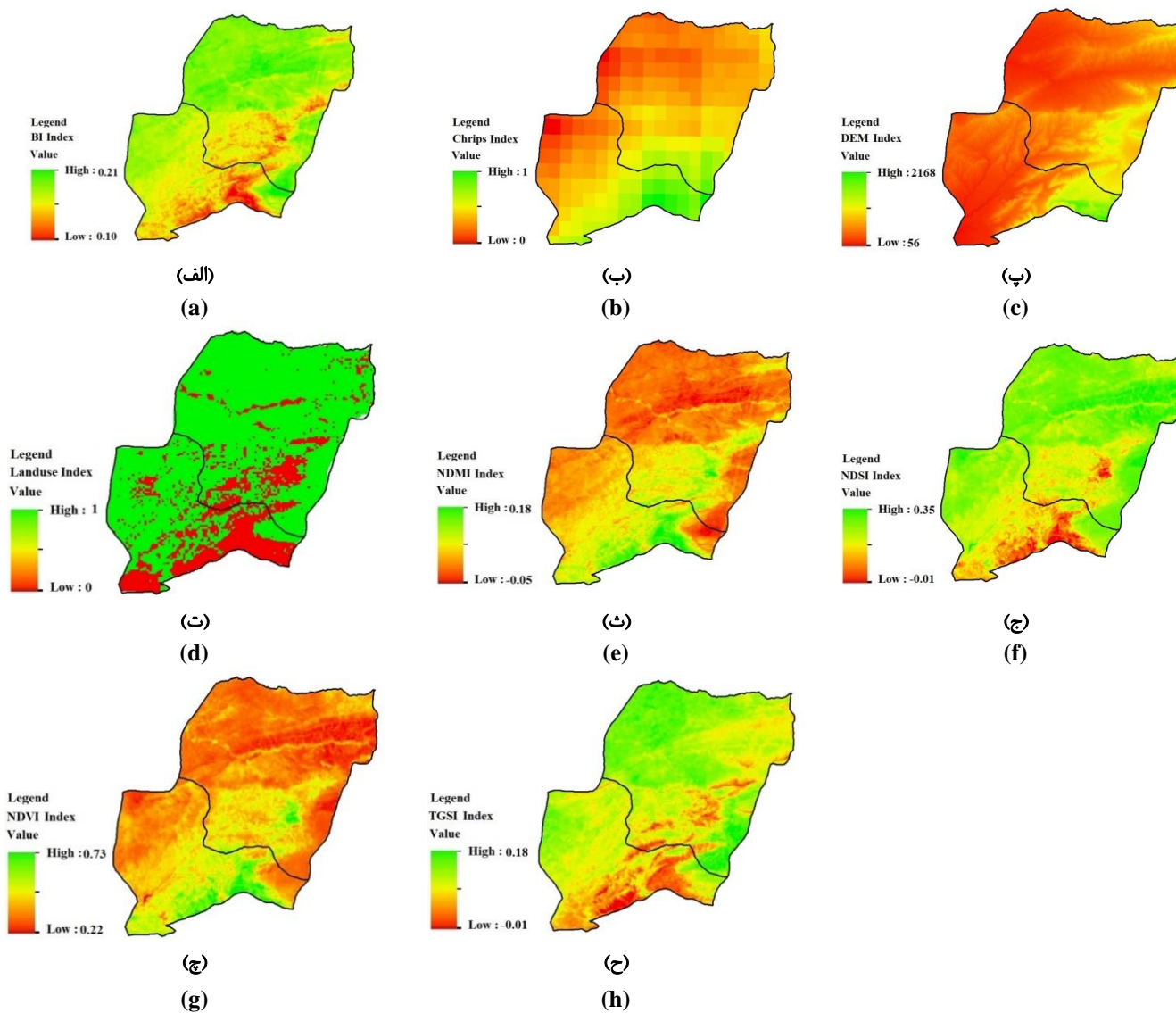
بلندی زمین بود که شیب زیاد در نواحی جنوبی و شرقی، عامل مهمی در جابجایی ذرات خاک و افزایش فرسایش بود. شاخص کاربری زمین نشان‌دهنده پراکندگی مناطق کشاورزی و منابع طبیعی بود و مناطق با پوشش گیاهی ضعیف‌تر به‌شدت در معرض تهدید فرسایش بودند. شاخص NDMI بیانگر وضعیت رطوبت خاک بود و اندازه‌های کمتر آن در جنوب، نشان‌دهنده خشکی و افزایش حساسیت خاک به فرسایش بود.

شاخص NDSI بیانگر اندازه شوری خاک بود. خاک‌های شور بیشتر در مناطق جنوبی و شرقی مشاهده شد و ساختار فیزیکی ضعیف مسبب کاهش پایداری آن‌ها در برابر جریان آب و افزایش استعداد آن‌ها به فرسایش بود. شاخص NDVI بیانگر تراکم و سلامت پوشش گیاهی بود. شاخص TGSi نیز به‌طور ویژه، نشان‌دهنده بافت خاک سطحی و خصوصیات مرتبط با آن بود. اندازه‌های کم شاخص‌های NDVI و TGSi در جنوب منطقه، نمایانگر اهمیت پوشش گیاهی به‌عنوان عاملی برای کاهش فرسایش بود. در مجموع، با بررسی شاخص‌های مختلف ارائه‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که با حرکت در منطقه به‌سوی نواحی بلند و با شیب بیشتر، خاک لخت‌تر، شوری بیشتر، و پوشش گیاهی تنک‌تر شده و این موضوع نشان‌دهنده افزایش خطر و شدت فرسایش آبی در منطقه است.

مجموعه این شاخص‌ها، امکان تحلیل جامع و مدل‌سازی دقیق فرسایش آبی را در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلاله فراهم آورد. این نتایج با یافته‌های اکبری و همکاران (۲۰۲۰) و پژوهش‌های مشابه در مناطق خشک ایران همخوانی دارد.

#### مدل‌سازی فرسایش آبی

پس از تهیه نقشه‌های شاخص‌های سنجش از دوری و تعیین نقاط بودن و نبودن فرسایش آبی، مدل‌سازی انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سه الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین برای مدل‌سازی مکانی فرسایش آبی در شمال استان گلستان به‌کار گرفته شد (شکل ۳). با مقایسه نقشه‌های به‌دست آمده و با



شکل ۲- شاخص‌های سنجش از دور انتخاب‌شده به منظور مدل‌سازی فرسایش آبی. الف- شاخص خاک لخت، ب- شاخص بارش، پ- شاخص بلندی، ت- شاخص کاربری زمین، ث- شاخص رطوبت خاک، ج- شاخص شوری خاک، چ- شاخص پوشش گیاهی و ح- شاخص بافت سطحی خاک.

Figure 2- Selected remote sensing indices for water erosion modeling. a) Bare Soil Index, b) Precipitation Index, c) Elevation Index, d) Land Use Index, e) Soil Moisture Index, f) Soil Salinity Index, g) Vegetation Index and Surface, h) Soil Texture Index.

کاهش فرسایش آبی ارائه داد و سبب بهبود سامانه‌های مدیریت خاک شد. بر این اساس، اندازه اهمیت شاخص‌های بررسی‌شده در مدل ترکیبی تعیین شد. نتایج نشان داد که به ترتیب اهمیت بارش، پوشش گیاهی (NDVI)، بافت خاک سطحی (TGSI)، کاربری زمین، رطوبت سطحی (NDMI)، تغییرات بلندی (DEM)، خاک لخت (BI) و شاخص شوری خاک (NDSI)، بیشتر بود (شکل ۴). تحلیل نتایج بیانگر همخوانی اهمیت نسبی هر یک از متغیرها با الگوی مکانی شاخص مربوطه در منطقه بود. به بیان دیگر، بیشترین اثرگذاری در نقشه منطقه مربوط به متغیرهایی بود که بیشترین وزن را داشتند و پراکنش مکانی آنها با نمودار اهمیت متغیرها تطابق قابل توجهی داشت. این موضوع نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان ارزش آماری متغیرها و اثر آنها در منطقه بود. با بهره‌گیری از این اطلاعات در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی می‌توان از خطرات ناشی از فرسایش آبی جلوگیری کرد.

چهار طبقه فرسایش آبی بر اساس اندازه‌های خروجی مدل ترکیبی و با روش Natural Breaks (Jenks) آستانه‌بندی شدند تا تغییرات طبیعی داده‌ها و توزیع مکانی شدت فرسایش به خوبی نمایان شود. طبقه‌بندی انجام‌شده با داده‌های میدانی بودن و نبودن فرسایش اعتبارسنجی شد و هم‌خوانی مناسبی میان طبقه‌های پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌ای واقعی مشاهده شد. بر اساس نقشه ترکیبی، خطر فرسایش آبی در مناطق شمالی، غربی و جنوب‌غربی منطقه بیشتر بود. بر اساس نقشه ترکیبی ۲۳٪ از منطقه (۱۳۵۷۲،۳۱ هکتار) در طبقه فرسایش آبی کم، ۱۵٪ (۷۳۷۰۷ هکتار) در طبقه متوسط، ۲۲٪ (۱۱۰۴۳۲ هکتار) در طبقه شدید و ۴۰٪ (۱۹۶۷۳۸ هکتار) در طبقه بسیار شدید فرسایش آبی طبقه‌بندی شدند (شکل ۳).

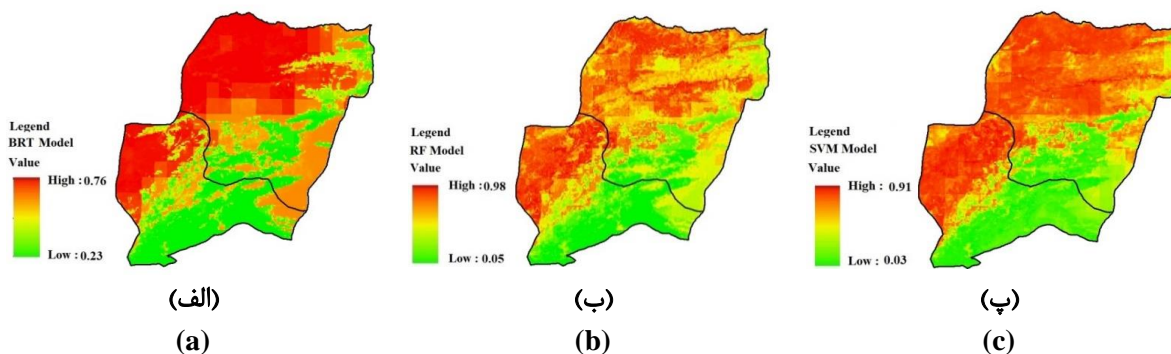
#### مهم‌ترین متغیرها

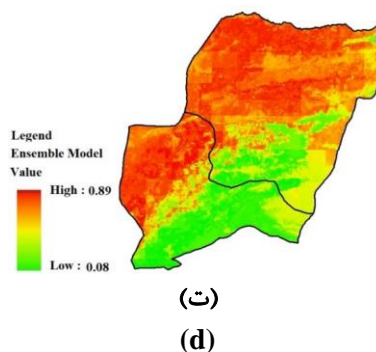
شناسایی متغیرهای تأثیرگذار بر فرسایش آبی اهمیت زیادی در پژوهش‌های محیط‌زیست، حفاظت از منابع طبیعی و توسعه پایدار دارد. با شناخت این متغیرها، می‌توان برنامه‌های مناسبی برای مهار و

جدول ۱- ارزیابی عملکرد مدل‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف.

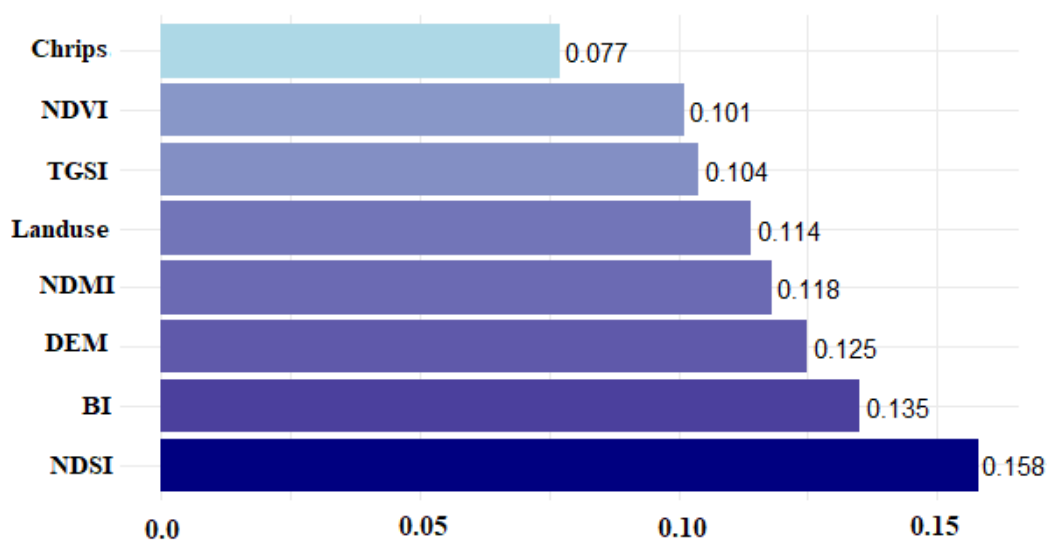
Table 1- Performance evaluation of models based on different indicators.

Models	KAPPA	ROC	TSS	Weighted average
BRT	0.77	0.81	0.59	2.17
SVM	0.84	0.84	0.87	2.55
RF	0.81	0.80	0.61	2.22
Ensemble	0.90	0.93	0.89	-





شکل ۳- مدل‌سازی فرسایش آبی با استفاده از مدل‌های الف-BRT، ب-RF، ج-SVM و ت- ترکیبی.  
Figure 3- Water erosion modeling using a) BRT, b) RF, c) SVM, and d) the hybrid model.



شکل ۴- اهمیت متغیرهای اثرگذار بر فرسایش آبی در مدل ترکیبی.  
Figure 4- Importance of variables affecting water erosion in a hybrid model.

جدول ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز بیانگر برتری مدل ترکیبی (Ensemble) در مقایسه با کاربرد هر یک از سه مدل BRT، RF و SVM به‌طور جداگانه بود. در مدل ترکیبی با تلفیق خروجی این الگوریتم‌ها و وزن‌دهی مبتنی بر عملکرد هر کدام، دقت و وضوح مکانی پیش‌بینی فرسایش آبی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. بر اساس نقشه ترکیبی، بیشترین احتمال فرسایش آبی مربوط به محدوده‌های شمالی، غربی و جنوب‌غربی منطقه بود که دلیل آن می‌تواند

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر پایه نتایج این پژوهش، مدل‌سازی فرسایش آبی در شمال استان گلستان تحت تأثیر مجموعه‌ای از شاخص‌های محیطی و بوم‌شناختی است. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به بارش، پوشش گیاهی (NDVI)، بافت خاک سطحی (TGSi)، کاربری زمین، رطوبت سطحی (NDMI)، تغییرات بلندی (DEM)، خاک لخت (BI) و شوری خاک (NDSI) اشاره کرد.

**تضاد منافع نویسندگان**

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

**دسترسی به داده‌ها**

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

**مشارکت نویسندگان**

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله  
 نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج  
 نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های نرم‌افزاری  
 نویسنده چهارم: بازدید میدانی جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها  
 نویسنده پنجم: جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، ویرایش و بازبینی مقاله

شرایط پستی‌بلندی، پوشش گیاهی ضعیف و وجود خاک‌های حساس به فرسایش در این مناطق باشد. اهمیت زیاد متغیرهای بارش و پوشش گیاهی در تعیین شدت فرسایش، مؤید نقش مهم این عوامل در تحریک رواناب سطحی و تثبیت خاک است.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی اثرات تغییرات اقلیمی بر فرسایش آبی، به‌کارگیری شاخص‌های دقیق‌تر رطوبت خاک و پوشش گیاهی بررسی شوند و بازدیدهای میدانی به منظور افزایش دقت مدل‌های یادگیری ماشین گسترش یابند. با این اقدامات می‌توان دقت پیش‌بینی، وضوح مکانی و قابلیت تعمیم مدل‌ها را افزایش داد و مبنای تصمیم‌گیری علمی و مدیریت پایدار خاک در مناطق حساس به فرسایش آبی را برنامه‌ریزی کرد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد مدل‌های ترکیبی یادگیری ماشین در شناخت دقیق‌تر و مدیریت بهینه فرسایش آبی، رویکردی مؤثر است و برای برنامه‌ریزی‌های پایدار حفاظت خاک در مناطق حساس مانند شمال استان گلستان می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های علمی و مدیریتی برای مقابله با تهدیدات فرسایش آبی باشد.

**فهرست منابع**

- Akbari M, Ownegh M, Asgari HR, Sadoddi A, Khosravi H. 2016. Desertification risk assessment and management program. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2(4):365–380. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2016.02.04.006>
- Akbari M, Modarres R, Alizadeh Noughani M. 2020. Assessing early warning for desertification hazard based on E-SMART indicators in arid regions of northeastern Iran, *Journal of Arid Environments*. Elsevier, 174:104086. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104086>.
- Alqadhi S, Mallick J, Talukdar S, Alkahtani M. 2023. An artificial intelligence-based assessment of soil erosion probability indices and contributing factors in the Abha-Khamis watershed, Saudi Arabia. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 11: p. 1189184. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1189184>
- Arab Khadri H. 2021. The status of water erosion and sediment yield in Iran: A statistical and comparative analysis. *Strategic Research in Agricultural Sciences and Natural Resources*, 6(2): 139–156. ( In Persian).
- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*. 43(6):1223–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Bashari H, Boali A, Soltani S. 2023. Accommodating uncertainty in soil erosion risk assessment: Integration of Bayesian belief networks and MPSIAC model. *Natural Hazards Research*. 1(4): 134 – 147. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.009>
- Belgiu M, Drăgu L. 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and

- future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 114: 24-31.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Boali A, Asgari H. R, Mohammadian Behbahani A, Salmanmahiny A, Naimi B. 2024. Remote sensing applications: Society and environment remotely sensed desertification modeling using ensemble of machine learning algorithms. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 34(14): 1-16.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101149>
- Boali A, Kariminejad N, Hosseinalizadeh M. 2024. Enhancing wind erosion risk assessment through remote sensing techniques. *Plos one*. 19(10): e0308854.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308854>
- Boali A, Hosseinalizadeh M, Kariminejad N, Asgari HR, Behbahani AM, Naimi B, Shafaie V, Rad MM. 2025. Evaluation of early warning signals for soil erosion using remote sensing indices in northeastern Iran. *Scientific Reports*. 15 (9742):1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94926-x>
- Bofana J, Zhang M, Nabil M, Wu B, Tian F, Liu W, Moyo C. 2020. Comparison of different cropland classification methods under diversified agroecological conditions in the Zambezi River Basin. *Remote Sensing*. 12(13): p. 2096. <https://doi.org/10.3390/rs12132096>
- Devkota KC, Regmi AD, Pourghasemi HR, Yoshida K, Pradhan B, Ryu IC, Althuwaynee OF. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*. 65(1): 135-165. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0347-6>
- Jalali Fard A, Hosseinalizadeh M, Kamaki Choghi B, Azim Mohseni M. 2018. Modeling of piping erosion in loess lands. *Environmental Erosion Research*. 8(4): 1-18. (In Persian).
- Jafar Ardakani A, Bayat R, Piran HR, Shariat Jafari M. 2009. Investigation of erosion and sedimentation status in the loess deposits of Golestan province. Paper presented at the 6th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment, Tehran, Iran. (In Persian).
- Jahani M, Taleghani S, Akbari, M. 2024. Quantitative evaluation of soil erodibility potential using SLEMSA model (Case study: Karkheh watershed, Lorestan province, *Environmental Erosion Research Journal*. 14 (2):161-179.  
<https://doi.org/10.61186/jeer.14.2.10>
- Memarian H, Abdi Bastami S, Akbari M, Tajbakhsh SM, Azamirad M. 2023. An integrative approach of the physical-based stability index mapping with the maximum entropy stochastic model for risk analysis of mass movements. *Environment, Development and Sustainability*. 25: 2808-2830.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02165-1>
- Memarian H, Akbari M. 2021. Prediction of combined effect of climate and land use changes on soil erosion in Iran using GloSEM data. *Journal of Ecohydrology*. 8(2): 513-534.  
<https://doi.org/10.22059/ije.2021.320754.1482>. (In Persian).
- Mohamadifar A, Gholami H. 2021. Assessment of the interpretability of data mining for the spatial modelling of water erosion using game theory. *Catena*, 20(10): 51-78).  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105178>
- Najafi Nia M, Khoramali F, Kiani F, Motlagh MB. 2018. Micromorphology of early Pleistocene loess soils and their comparison with modern loesses. *Journal of Agronomy Engineering*. 41(4):67-82. (In Persian).  
<https://doi.org/10.22055/agen.2018.22565.1360>
- Park S, Jungho I, Jang E, Rhee J. 2016. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 216: 157-169.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011>
- Piri H, Mobaraki M. 2022. Comparison of artificial intelligence and geostatistical methods in soil surface salinity prediction in Ghorghori, Hirmand. *Journal of Environmental and Water Engineering*. 8(3):622-635. (In Persian).  
<https://doi.org/10.22034/jewe.2022.312194.1656>
- Raei B, Ahmadi A, Neyshabouri M, Ghorbani M, Asadzadeh F. 2020. Assessment of the efficiency of some artificial intelligence methods in modeling soil wind erodibility in a part of the eastern lands of Urmia Lake. *Iranian Journal of Water and Soil Research*. 51(1): 61-76. (In Persian).  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.283359.668233>
- Ren Z, Liu C, Zhao X, Jin Y, Ou Y, Liu R, Cheng H. 2024. A large-scale riverbank erosion risk assessment model integrating multi-source data and explainable artificial intelligence (XAI). *Ecological Indicators*. 166: p. 112575.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112575>
- Tang X, Li J, Liu M, Liu W, Hong H. 2020. Flood susceptibility assessment based on a novel random Naïve Bayes method: A comparison between different factor discretization methods. *Catena*, 190. p. 104536.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104536>  
Vapnik VN. 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. The Nature of Statistical Learning Theory. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>  
Wijitkosum S. 2020. Factor influencing land degradation sensitivity and desertification in a drought prone watershed in Thailand.

International Soil and Water Conservation Research. 9(2):217-228.  
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.005>  
Yang X, Yang Q, Zhu H, Wang L, Wang C, Pang G, Hussain S. 2023. Quantitative Evaluation of Soil Water and Wind Erosion Rates in Pakistan. Remote Sensing. 15(9): 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs15092404>



## Prediction and Modeling of Soil Erosion Rates Using Machine Learning Algorithms in Maraveh Tappeh and Kalaleh Counties, Golestan Province

Abdolhossein Boali<sup>1</sup>, Narges Kariminejad<sup>2</sup>, Morteza Akbari<sup>3</sup>,  
Maryam Yaghoobi<sup>4</sup>, Mohsen Farahi<sup>5</sup>

- 1- Postdoctoral Researcher, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- 2- Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
- 3- Associate Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- 4- PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
- 5- Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Environmental Sciences and Sustainable Development, University of Saravan, Saravan, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Water erosion is one of the major environmental hazards worldwide, leading to soil degradation, reduced fertility, and increased sedimentation in rivers. Golestan Province, particularly its northern regions with sensitive loess soils and specific climatic conditions, is considered one of the main erosion hotspots in Iran. The investigated issue is the limitation of traditional methods in providing accurate, rapid, and reliable zoning of water erosion in the sensitive regions of Golestan Province, where complex and nonlinear relationships among environmental factors require more advanced approaches. Machine learning (ML) algorithms, due to their ability to model complex and non-linear relationships between variables, are powerful tools for the spatial prediction of phenomena such as erosion. The objective of this study was to model the spatial potential of water erosion in the Maraveh Tappeh and Kalaleh counties using advanced machine learning algorithms and to compare their performance with an ensemble model.

#### Materials and Methods

The study area covers the northern lands of Golestan Province, with an area of approximately 4944.5 km<sup>2</sup>, which is susceptible to water erosion due to its steep topography, seasonal rainfall, and loess soils.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** narges.karimi991@gmail.com

**Citation:** Boali, A., Kariminejad, N., Akbari, M., Yaghoobi, M., Farahi, M. 2026. Prediction and Modeling of Soil Erosion Rates Using Machine Learning Algorithms in Maraveh Tappeh and Kalaleh Counties, Golestan Province. *Watershed Management Research*. 39(2): 80-95.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2025.371189.1641

**Received:** 16 November 2025, **Received in revised form:** 03 December 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp.80-95.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Therefore, first, layers of informational of factors affecting erosion were first prepared. These factors included eight environmental and climatic indices: Precipitation Index (station data), Vegetation Index (NDVI), Topographic Grain Size Index (TGSI), Land Use layer, Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Digital Elevation Model (DEM), Bare Soil Index (BI), and Normalized Difference Salinity Index (NDSI), all of which were extracted from Landsat 8 satellite imagery. A map of observed erosion locations was used as the dependent variable layer in the modeling. Accordingly, 100 points (50 points of water erosion and 50 points of its absence) were taken during the field visit. In this study, 70% of the data was used for training and 30% for testing. Three machine learning algorithms Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Boosted Regression Trees (BRT) were employed to train the models. Finally, an ensemble model was developed based on the weighted average of the outputs of these three individual models to enhance prediction accuracy. The performance of the models was evaluated using statistical indices, including the Kappa coefficient, Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, and True Skill Statistic (TSS).

### **Results and Discussion**

The evaluation results indicated that the performance of each of the three individual models (RF, SVM, and BRT) in modeling water erosion was acceptable, however, the ensemble model (Kappa=0.90, ROC=0.93, and TSS=0.89), by leveraging the strengths of all three models, demonstrated superior performance in accurately distinguish erosion-prone from stable zones and in reducing classification errors. This superiority confirms that the ensemble approach, using weighted averaging, uncertainties can be managed more effectively than in any individual model, resulting in a more stable, reliable output. The final erosion potential map, generated by this model was clearly identified that the northern, western, and southwestern parts of the study area are the main hotspots for water erosion. This spatial pattern is not random but is rooted in the complex interaction of factors; in these areas have steep topography, which increases water flow velocity and its erosive power, receive higher rainfall, providing the necessary energy for the erosion process, and possess weaker vegetation cover, which acts as the soil's primary defense. Analysis of variable importance also revealed that precipitation as a driving factor and the Vegetation Index (NDVI) as the resisting factor, are respectively the most influential controls on erosion in the region. This finding indicates that any conservation measure that improve vegetation cover (such as planting, grazing management, and preventing degradation) can directly neutralize the destructive effects of rainfall. This approach is the most effective strategy for controlling erosion in sensitive areas. Therefore, the results of this study not only provide an accurate map but also offer a scientific framework for prioritizing and implementing evidence-based management actions.

### **Conclusion and Suggestions**

The superiority of the ensemble model in this research demonstrates the high reliability of weighted averaging approaches in reducing error and enhancing prediction accuracy. The concentration of high-risk areas in steep slopes with low vegetation cover is fully consistent with the principles of erosion physics. The high importance of precipitation and vegetation cover emphasizes that sustainable land management, such as implementing biological operations (such as planting resistant and deep-rooted species) is the most effective strategy for erosion control in the region, and according to scientific reports, can reduce surface runoff and erosion by 30–50%. Decision-makers, natural resource managers, and urban and rural planners can use the erosion potential map produced in this study as a practical scientific tool for prioritizing conservation measures and optimize resource allocation. Based on the results of this study, it is recommended that future research, while considering existing limitations (such as the spatial resolution of some datasets), make use of more advanced ensemble models and higher-accuracy data.

**Keywords:** Modeling, machine learning methods, northern Golestan Province, water erosion

**Article Type:** Research Article

**Conflicts of Interest**

The authors of this article declare that there are no beneficial conflicts of interest in the writing and publication of the materials and results of this research.

**Data Availability Statement**

The data and results used in this study will be made available by the corresponding author upon request.

**Authors' Contribution**

Author 1: Conceptualization, Software, Writing, original draft

Author 2: Supervision, writing, review, editing, Validation

Author 3: Conceptualization, Consultation, Writing, review and editing, Software

Author 4: Investigation, Data Curation

Author 5: Data Curation, Writing, review and editing



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آب‌نخورداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش ترویج کشاورزی

## پیش‌بینی الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان

عارف بهمنی<sup>۱</sup>، هیراد عبقری<sup>۲\*</sup>، امید رحمتی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه

ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

هرساله در کشور سیلاب‌ها خسارت‌های مالی و تلفات جانی زیادی را به‌دنبال دارند. اگرچه ارزش علمی داده‌های موقعیت رخدادهای سیل، زیاد است اما در بسیاری از پژوهش‌های سیل، پهنه‌های سیل‌گیری صرفاً بر اساس دیدگاه کارشناسی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مشخص شده‌اند. در این پژوهش الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان استان کردستان با استفاده از داده‌های مکانی رخداد سیل‌گیری در دهه گذشته پیش‌بینی شد و برای دستیابی به این هدف از مدل ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان یک مدل مبتنی بر یادگیری ماشینی، استفاده شد.

#### مواد و روش‌ها

به‌منظور اجرای این پژوهش، نخست یک پایگاه داده در سامانه اطلاعات جغرافیایی برای رخدادهای سیل‌گیری آبخیز سیروان با استفاده از اطلاعات بانک سیل اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان تهیه شد. شمار ۱۰۲ رخداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان در بازه زمانی ده ساله (۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴)، تأیید شد. از آنجایی که مدل‌های یادگیری ماشینی نیازمند نقاط با و بدون رخداد سیل‌گیری هستند، بر اساس روش واحدکاری، نقاط بدون رخداد سیل‌گیری نیز انتخاب شدند. این پایگاه داده با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از مصاحبه حضوری با افراد بومی این منطقه تکمیل شد. بر اساس خصوصیات مختلف آبخیز سیروان و بررسی نتایج پژوهش‌های علمی، شانزده عامل مؤثر بر رخداد سیل‌گیری انتخاب شد و نقشه‌های رقمی آن‌ها تهیه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: h.abghari@urmia.ac.ir

استناد: بهمنی، ع.، عبقری، ه.، رحمتی، ا. ۱۴۰۵. پیش‌بینی الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۲): ۹۶-۱۱۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.371438.1645

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۹۶ تا ۱۱۵.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

© نویسندگان



عامل‌های مؤثر بر سیل‌گیری شامل بلندی، جهت دامنه، درصد شیب، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، کاربری زمین، بیشینه بارندگی ۲۴ ساعته، شمار بارش‌های با اندازه بیشتر از میانگین ایستگاه هواشناسی، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی، انحنای سطح، انحنای مقطع، بافت خاک، فاصله از جریان، شاخص موقعیت پستی بلندی، شاخص رطوبت پستی بلندی و فاصله عمودی از آبراهه، بودند که در مدل‌سازی به‌عنوان متغیرهای مستقل، استفاده شدند. داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل‌گیری به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی با نسبت‌های ۷۰٪ و ۳۰٪ تقسیم شدند. پس از اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان در محیط نرم‌افزار R، نقشه استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان تهیه شد و الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری، بررسی شد. دقت نقشه نامبرده با استفاده از آماره مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده، ارزیابی شد.

### نتایج و بحث

نتایج اعتبارسنجی نشان داد که دقت مدل ماشین بردار پشتیبان بر اساس اندازه مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده ( $AUC = 0.921$ ) برابر با ۹۲/۱٪ بود. بر اساس طبقه‌بندی رایج عملکرد مدل‌ها و با توجه به اینکه دقت مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری بیشتر از ۹۰٪ به‌دست آمد، کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان، بسیار خوب بود. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، درصد استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان در طبقه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۵۱، ۱۰، ۱۷، ۲۰ و ۲٪ بود. برای اقدامات اجرایی و اولویت بندی مناطق در راستای مدیریت سیل بر پایه درصد استعداد سیل‌گیری، مشخص شد از میان ۱۲۷ زیرآبخیز سیروان شمار ۱۵ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد و ۸ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد است. تراکم جمعیت در تمام زیرآبخیزها در طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد (مانند گازرخانه، پالنگان، شویشه، ساوجی، سلین، ساناو، زریبار و غیره) و زیرآبخیزها در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد (مانند سنندج، باباریز، مریوان، موجش، دولباغ، دورود و خامسان) نسبتاً زیاد است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش، عملکرد مدل ماشین بردار پشتیبان در شناسایی مناطق مستعد سیل‌گیری، بسیار خوب بود. بر اساس کمبود داده‌های تخصصی و منابع مالی در دستگاه‌های اجرایی، کاربرد این مدل در مدیریت و برنامه‌ریزی اقدامات اصلاحی آبخیزداری حائز اهمیت است. در این پژوهش، اولویت‌بندی زیرآبخیزهای اجرایی بر اساس شدت سیل‌گیری انجام شد. زیرا، در شرایط کمبود داده، ضمن صرفه‌جویی در زمان و منابع، موجب بهبود اثربخشی اقدامات اصلاحی آبخیزداری نیز خواهد شد. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود از مدل ماشین بردار پشتیبان در سطوح کلان‌تر استانی، منطقه‌ای و ملی و همچنین مطالعات تفصیلی-اجرایی آبخیزداری برای مدیریت خطر بهره گرفت.

### واژگان کلیدی

اولویت‌بندی، خطر، سیل، شبیه‌سازی، مدیریت آبخیز

### مقدمه

است و حتی ممکن است سهم زیادی از بارش سالانه در یک یا چند رخداد بارندگی محدود به زمین برسد (نبی‌نژاد و شوترامپف ۲۰۲۳). بخش‌های زیادی از کشور ایران نیز به‌دلیل شرایط اقلیمی و همچنین نابودی پوشش گیاهی و خاک در دهه‌های گذشته،

هرساله سیلاب‌ها موجب خسارت‌های سهمگینی بر زیرساخت‌ها شده و در برخی شرایط تلفات جانی زیادی به‌دنبال دارند (ابگاز و همکاران ۲۰۲۴). وضعیت بارندگی مناطقی از جهان با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک خاص و از دیدگاه مکانی و زمانی نامنظم

شرایط مساعدی برای شکل‌گیری سیل دارند و هر ساله با بحران‌های ناشی از رخداد سیلاب روبرو هستند. در دهه گذشته با توجه به تغییر کاربری زمین و فشار زیاد بر بوم‌سازگان‌های مرتعی و جنگلی، شدت سیلاب‌ها افزایش چشمگیری داشته است. نابودی زیرساخت‌ها، مناطق مسکونی و عرصه‌های کشاورزی و منابع طبیعی به وسیله سیلاب‌ها از دیدگاه اقتصادی هزینه‌های زیادی را به کشور تحمیل کرده و بر پیشرفت اقتصادی کشور تأثیرگذار است. در این راستا، در فروردین‌ماه ۱۳۹۸ یک سیلاب شدید در استان کردستان رخ داد که خسارت‌های آن ۳۶۵۰ میلیارد ریال برآورد شد (خبرگزاری جمهوری اسلامی، کد خبر ۸۳۲۹۵۱۱۵). از این‌رو، انجام پژوهش‌های سیل در کشور بسیار ضروری است و برنامه‌های حفاظت آب و خاک و مدیریت و مهار سیلاب به تفکیک آبخیزهای کشور نیز باید تدوین شود. این موضوع مستلزم شناسایی پهنه‌های مستعد سیل‌گیری و ارائه نسخه‌های مدیریتی کاربری زمین و آگاه‌سازی جامعه‌های محلی از خطر سیل و دعوت به همکاری با دستگاه‌های اجرایی برای مهار و کاهش خطر سیل است (بابائی و همکاران ۲۰۲۰).

در سال‌های گذشته، پژوهشگران مناطق مستعد سیل‌گیری با استفاده از داده‌های تاریخی سیل را پیش‌بینی کرده‌اند. با توسعه مدل‌های آماری، داده‌کاوی و یادگیری ماشینی همراه با بسترهای تهیه و تفسیر لایه‌های رقومی عامل‌های محیطی مختلف، زمینه پژوهش سیلاب آبخیزها و شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر فراهم شده است (خسروی و همکاران ۲۰۱۹، کاظمی و همکاران ۲۰۲۴). در گذشته، تخصیص منابع مالی به طرح‌های مهار سیل و آبخیزداری بدون توجه به نقشه‌های استعداد سیل و محل اجرای این اقدامات و صرفاً بر اساس دیدگاه کارشناسی بوده است. بدیهی است که در چنین شرایطی، بودجه‌های اجرایی غیربهبهینه به بخش‌های مختلف یک استان یا یک آبخیز اختصاص یافته و اندازه اثرگذاری اقدامات مهار سیل کارایی لازم را نداشته است.

بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، پژوهشگران از مدل‌های یادگیری ماشینی و داده‌کاوی مختلف برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری استفاده کرده‌اند. پیشنهاد این پژوهشگران استفاده از نقشه استعداد سیل در برنامه‌های مدیریت سیلاب است (دودانگه و همکاران ۲۰۲۰، اسلام و همکاران ۲۰۲۱، وهبا و همکاران ۲۰۲۴). همچنین، عابدی و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری داده‌های موقعیت سیلاب‌های گذشته و عامل‌های محیطی مختلف، نقشه استعداد سیل‌گیری را با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی، درخت وایزی تقویت‌شده<sup>۱</sup> و تقویت شیب شدید، تولید کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده دقت زیاد مدل جنگل تصادفی بود. در آبخیز کیسر استان مازندران، عرب‌عامری و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> مناطق مستعد سیل‌گیری را شناسایی کردند و گزارش کردند که از نقشه به‌دست‌آمده می‌توان برای مدیریت سیلاب در مقیاس آبخیز استفاده کرد. افزون بر محدوده‌های طبیعی (مانند آبخیزها)، سلیم و همکاران (۲۰۲۲) در شهر برلین آلمان برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج ایشان بیانگر دقت زیاد مدل‌های یادگیری ماشینی در تجزیه و تحلیل مناطق مستعد سیل‌گیری در محیط‌های شهری بود. بر پایه نتایج این پژوهش‌ها، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی برای پیش‌بینی استعداد سیل رو به گسترش است و آینده خوبی برای مدیریت و مهار سیلاب پیش‌بینی می‌شود. در دهه گذشته اگرچه سیلاب‌های پرشماری در آبخیز سیروان استان کردستان رخ داده است، اما پژوهش‌های محدودی در زمینه سیل انجام شده است (رضائی‌مقدم و همکاران ۲۰۱۶، رحمتی و همکاران ۲۰۲۴). با این وجود، پهنه‌های مستعد سیل‌گیری شناسایی نشده‌اند. از سوی دیگر، در این آبخیز نقشه‌های سیل‌گیری وجود ندارد. از این‌رو، عموماً اقدامات آبخیزداری بدون

1- Boosted regression trees

2- Support vector machine

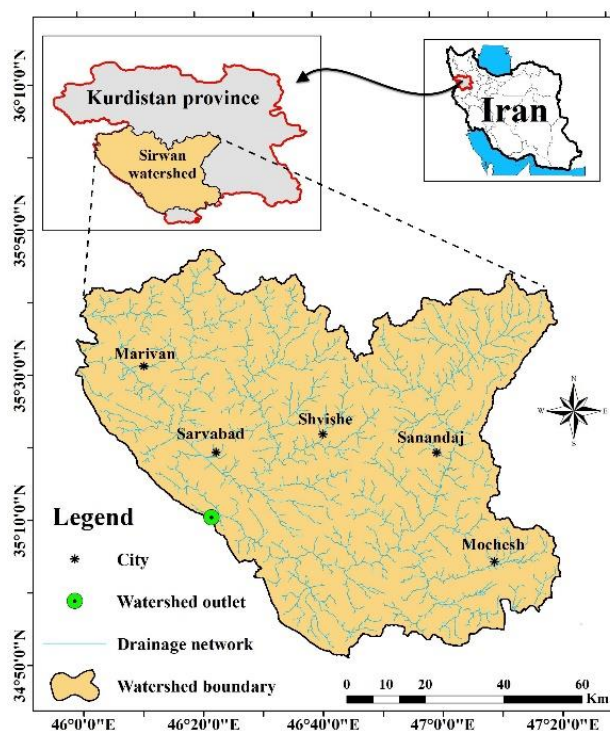
ناهمواری‌های زیادی دارد، به طوری که بلندی زمین در این آبخیز از ۷۰۸ تا ۳۰۱۰ متر متغیر است. کاربری‌های مختلفی در این آبخیز مشاهده شد و بیشترین سطح کاربری مربوط به جنگل، مرتع و زمین مسکونی بود. رودهای این منطقه پریچ و خم و نسبتاً ژرف است. شبکه زهکشی آبخیز سیروان را از بخش‌های مختلف به سمت جنوب غربی آبخیز سیروان هدایت می‌کنند. اقلیم این آبخیز از نوع معتدل مدیترانه‌ای است. براساس داده‌های بارندگی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۴، میانگین سالانه بارش آبخیز سیروان از دیدگاه مکانی از ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. جریان خروجی این آبخیز به کشور عراق می‌ریزد. سنندج، مریوان، سروآباد، شویشه و موجش از مناطق مسکونی شهری این آبخیز به‌شمار می‌آیند.

توجه به پیش‌بینی استعداد سیلاب انجام شده است. در این پژوهش، با در نظر گرفتن نقاط رخداد سیل در گذشته و همچنین تعیین عامل‌های مؤثر بر شکل‌گیری سیل، پهنه‌های مستعد سیلاب با استفاده از مدل یادگیری ماشینی شناسایی شد و دقت پیش‌بینی مدل به‌طور کمی ارزیابی شد. مدل ماشین بردار پشتیبان در شماری از کشورها برای پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری استفاده شده است. اما، کارایی آن در مناطقی با پستی‌بلندی شدید مانند آبخیز سیروان ارزیابی نشده است.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده آبخیز سیروان در جنوب استان کردستان بود. این آبخیز یکی از پرآب‌ترین مناطق غرب کشور است و از دیدگاه پستی‌بلندی نیز



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز سیروان.

Figure 1- Geographical location of the Sirwan Watershed.

## روش پژوهش

## جمع‌آوری داده‌های سیل‌گیری

اطلاعات موقعیت مکانی رخداد‌های سیل‌گیری ارزشمند هستند و به‌وسیله آنها می‌توان داده‌های مهمی را برای مدل ماشین بردار پشتیبان فراهم آورد. در این پژوهش، داده‌های موقعیت مکانی رخداد سیل‌گیری به‌عنوان متغیر وابسته برای مدل استفاده شد. داده‌های موقعیت مکانی رخداد‌های سیل از بانک‌های اطلاعاتی دستگاه‌های اجرایی استان شامل شرکت آب منطقه‌ای، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری، هلال‌احمر و اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای جمع‌آوری شد. ساختار این داده‌ها برداری<sup>۳</sup> بود و نشان‌دهنده موقعیت دقیق پهنه سیل بود. از دیدگاه زمانی، رخداد‌های سیل سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴ در این پایگاه داده جمع‌آوری شدند. بر اساس بازدیدهای میدانی مستقیم و مصاحبه با افراد بومی هر منطقه (شامل دهیاری‌ها و افراد معتمد روستاها)، صحت داده‌های رخداد سیل‌گیری تأیید شد. افزون بر مصاحبه با جامعه‌های محلی که به‌طور چشمی سیلاب‌های گذشته را مشاهده کرده‌اند، در بازدیدهای میدانی رودهای منطقه مطالعه‌شده نیز آثار رخداد سیل مانند داغاب و بقایای گل و لای در بالای شاخه درختان، شواهد و نشانه‌های علمی مناسبی برای تأیید داده‌های رخداد سیل بودند. دستگاه موقعیت‌یابی جهانی<sup>۴</sup> (GPS) نیز برای ثبت مشاهده‌ها و ارزیابی صحت داده‌های سیلاب استفاده شد.

شمار ۱۰۲ رخداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان در بازه زمانی ده ساله (۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴) برای استفاده در این پژوهش انتخاب شد (شکل ۲). از آنجایی که اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان عموماً نیازمند داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل است، بر اساس تحلیل‌های داده‌های موقعیت مکانی و بازدیدهای میدانی، نقاط بدون رخداد سیل‌گیری شناسایی شدند.

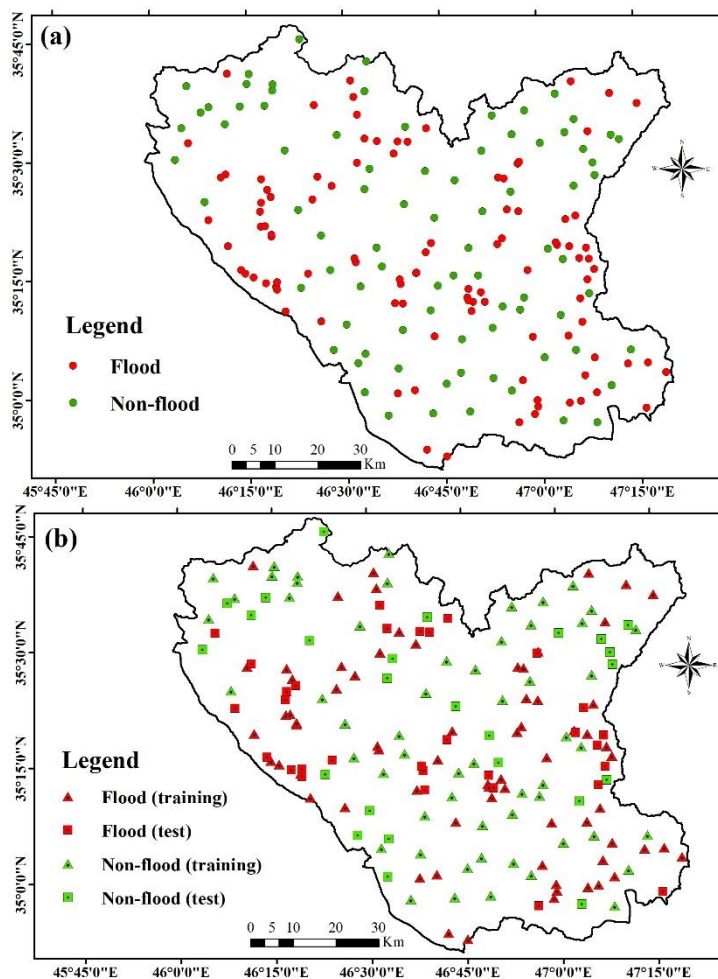
روش‌های مختلفی برای تعیین نقاط بدون رخداد سیل‌گیری وجود دارد. در این پژوهش، نقاط بدون

رخداد سیل‌گیری بر اساس روش واحدکاری انتخاب شدند. به‌منظور شناسایی واحدهای کاری که شرایط رخداد سیل‌گیری را ندارد، از روش پیشنهادی تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در این روش، پهنه‌هایی که در مناطق بلند بودند، شرایط لازم برای سیل‌گیری را نداشته و به‌طور واحدکاری شناسایی شدند. سرانجام، نقاط بدون رخداد سیل‌گیری به‌طور تصادفی در پهنه‌های نامبرده انتخاب شدند.

اجرای مدل‌سازی نیازمند دو گروه داده شامل آموزش و اعتبارسنجی است. داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی (آزمون) تقسیم شدند. در گروه آموزش ۷۰٪ از مجموعه داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل استفاده شد و بر اساس آن روابط میان متغیرها شناسایی شد و ساختار مدل ساخته شد. این در حالی است که در گروه داده‌های اعتبارسنجی از ۳۰٪ داده‌های رخداد سیل‌گیری که در مرحله اجرای مدل و آموزش استفاده‌نشده بود و صرفاً پس از اتمام مدل‌سازی و تولید نقشه استعداد سیل‌گیری برای ارزیابی کارایی مدل به‌کار گرفته شد. بدون استفاده از معیارهای ارزیابی و به‌کارگیری داده‌های گروه اعتبارسنجی، اعتبار مدل برای هرگونه پیش‌بینی تأیید نشد. موقعیت داده‌های گروه آموزش و گروه اعتبارسنجی به تفکیک نقاط رخداد و بدون رخداد سیل در شکل ۲ ارائه شده است. شمار ۷۱ رخداد سیل‌گیری در گروه آموزش و شمار ۳۱ رخداد سیل‌گیری در گروه اعتبارسنجی استفاده شد. داده‌های موقعیت سیل‌گیری و بدون سیل‌گیری به‌شکل برداری تهیه شد و برای ورود به مدل آماده شدند. از آنجایی که برای اجرای مدل در این پژوهش از نرم‌افزار R شد، نیازی به تبدیل داده‌های برداری به شکل‌های دیگر نبود و با این نرم‌افزار می‌توان اطلاعات برداری را فراخوانی کرد. از مزیت‌های مهم دیگر این نرم‌افزار، رایگان بودن آن است که فضای مناسبی برای انجام مدل‌سازی (مخصوصاً در کشورهای درحال توسعه) فراهم آورده است.

3- Vector

4- Global Positioning System



شکل ۲- موقعیت رخدادهای سیل‌گیری در آبخیز سیروان:

الف) موقعیت‌های رخداد سیل و بدون رخداد سیل و ب) تقسیم داده‌ها به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی.

Figure 2- Location of the flood inundation events in the Sirwan Watershed: a) locations of occurred flood and non-occurred flood and b) dividing training and validation groups.

در این پژوهش عامل‌های محیطی به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) برای فرایند مدل‌سازی، استفاده شدند. متغیرهای محیطی نیز شامل بلندی، جهت شیب، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، کاربری زمین، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، بیشینه بارش ۲۴ ساعته، شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه، انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، درصد شیب، بافت خاک، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی و فاصله عمودی از جریان بودند. لایه مدل رقومی ارتفاع زمین (DEM) منطقه پژوهشی از

انتخاب عامل‌های محیطی مؤثر بر رخداد سیل‌گیری اثرات عامل‌های محیطی مختلف آب‌شناختی، پستی‌بلندی، زمین‌ریخت‌شناختی، پوشش گیاهی، کاربری زمین، خاک‌شناسی و زمین‌شناسی بر رخداد سیل‌گیری زیاد است (چاودری و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش، ۱۶ متغیر محیطی به‌عنوان عامل‌های اثرگذار بر شکل‌گیری سیل و رخداد سیل‌گیری بر اساس پژوهش‌های پیشین در این آبخیز (رضائی‌مقدم و همکاران ۲۰۱۶، رحمتی و همکاران ۲۰۲۴) و همچنین تحلیل‌های کارشناسی در بازدیدهای میدانی، انتخاب شدند.

شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه منطقه پژوهشی با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ تولید شد. نقشه بافت خاک نیز بر اساس داده‌های بانک جهانی خاک<sup>۶</sup> از سامانه گوگل ارث انجین تهیه شد. صحت طبقه‌های بافت خاک در بازدیدهای میدانی ارزیابی شد. نقشه‌ها با ماهیت برداری، در نرم‌افزار ArcGIS به شکل رستری و با اندازه سلول ۳۰ متر تبدیل شدند. به‌منظور اجرای مدل در محیط نرم‌افزار R، شکل لایه‌های متغیرهای مستقل به ASCII تبدیل شد.

#### بررسی هم‌خطی چندگانه عامل‌های محیطی

بررسی هم‌خطی چندگانه قبل از اجرای مدل‌ها ضروری است. از دیدگاه آماری، هم‌خطی چندگانه<sup>۷</sup>، هنگامی رخ می‌دهد که میان متغیرهای مستقل همبستگی وجود دارد. هنگامی که بدون توجه به آزمون‌های هم‌خطی چندگانه، مدل‌سازی انجام شود، اعتبار مدل قابل تأیید نیست؛ زیرا درجه اهمیت متغیرهای مستقل در مدل‌سازی صحیح نیست (چان و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، از آماره عامل تحمل<sup>۸</sup> برای بررسی وضعیت هم‌خطی چندگانه متغیرهای مستقل استفاده شد.

آماره تحمل با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (سلیمان و همکاران ۲۰۲۱).

$$TOL = R_{ij}^2 - 1 \quad (1)$$

TOL: آماره تحمل و  $R_{ij}^2$  ضریب تعیین دو متغیر  $i$  و  $j$  است.

تمام متغیرهای مستقل دوجه‌دو با یکدیگر در این آزمون سنجیده و آماره تحمل برای آن‌ها محاسبه شد. در شرایطی که اندازه آماره تحمل کمتر از ۰/۱ باشد، مشکل هم‌خطی چندگانه در میان متغیرهای مستقل وجود دارد (دوتا و دکا ۲۰۲۴). در این شرایط، یکی از متغیرها که همبستگی زیادی با دیگر متغیرها دارد، از فهرست متغیرهای مستقل حذف می‌شود.

#### مدل ماشین بردار پشتیبان

پایگاه تصویرهای سنجنده SRTM<sup>۵</sup> دریافت شد. قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع از سنجنده SRTM ۳۰ متر بود. لایه‌های جهت دامنه، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، انحنا سطح، انحنا مقطع، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، شیب زمین، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی و فاصله عمودی از آبراهه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع زمین و در نرم‌افزارهای ArcGIS و SAGA-GIS به شکل رستری، تهیه شدند. به‌منظور یکسان‌سازی لایه‌های عامل‌های محیطی، اندازه سلول لایه‌های رستری ۳۰ متر در نظر گرفته شد. در شرایطی که اندازه سلول لایه‌های عامل‌های محیطی یکسان نبود، مدل ماشین بردار پشتیبان اجرا نشد و کاربرد با خطا روبرو شد. افزون بر اندازه سلول لایه‌های رستری مربوط به عامل‌های محیطی، نوع سامانه مختصات و شمار سطر و ستون لایه‌های رستری باید یکسان باشد. در این پژوهش سامانه مختصات تمام لایه‌های رقومی به متریک (UTM) تبدیل شد.

نقشه کاربری زمین از پایگاه اطلاعاتی نقشه جهانی کاربری زمین شرکت ESRI دریافت شد که با استفاده از روش یادگیری عمیق و بر اساس تصویرهای سنجنده سنتینل ۲ در سال ۲۰۲۰ تهیه‌شده بود (کارا و همکاران ۲۰۲۱). نقشه کاربری زمین بر اساس بازدیدهای میدانی تدقیق شد. شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) بر اساس تصویرهای سنجنده سنتینل ۲ در بازه زمانی مربوط به رخداد سیل‌ها (میانگین فصل‌های بهار سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴) در سامانه گوگل ارث انجین تهیه شد.

اندازه بیشینه بارش ۲۴ ساعته هر ایستگاه هواشناسی درون و پیرامون منطقه پژوهشی بر اساس داده‌های بارندگی محاسبه شد. سپس، نقشه بیشینه بارش ۲۴ ساعته آبخیز سیروان با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ تولید شد.

شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه هر ایستگاه هواشناسی به گونه‌ای محاسبه شد که اندازه آستانه، میانگین بلندمدت هر ایستگاه باشد. از این‌رو، نقشه

6- Soil Grid  
7- Multicollinearity  
8- Tolerance

5- Space Shuttle Radar Topography Mission

مدل ماشین بردار پشتیبان<sup>۹</sup> یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری نظارت‌شده است که برای مسائل طبقه‌بندی و در برخی شرایط برای وایزی به‌کار گرفته می‌شود. ایده اصلی این مدل یافتن یک فرآیند<sup>۱۰</sup> است که بتواند داده‌ها را به بهترین شیوه به دو یا چند دسته مجزا تقسیم کند. شیوه انتخاب این ابرصفحه به‌گونه‌ای است که فاصله آن تا نزدیک‌ترین نقاط هر طبقه که بردارهای پشتیبان نام دارند، بیشترین فاصله باشد. با افزایش حاشیه میان طبقه‌ها به‌وسیله ماشین بردار پشتیبان می‌توان قدرت تعمیم‌دهی مدل را افزایش داد. در حالت خطی، داده‌ها به‌طور مستقیم به‌وسیله یک ابرصفحه جدا می‌شوند، اما در شرایطی که داده‌ها غیرخطی باشند، با استفاده از توابع هسته‌ای<sup>۱۱</sup>، داده‌ها به یک فضای با ابعاد بزرگ‌تر نگاشت می‌شوند تا جداسازی خطی در آن فضا امکان‌پذیر شود. توابع هسته‌ای متداول شامل خطی، چندجمله‌ای و شعاعی هستند. آموزش این مدل معمولاً با حل یک مسئله بهینه‌سازی محدب انجام می‌شود تا ضریب‌های بردار وزن و بایاس تعیین شوند. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل، استفاده از زیرمجموعه‌ای از داده‌ها (بردارهای پشتیبان) برای تصمیم‌گیری پایانی است که باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش کارایی آن می‌شود. در کاربردهای طبقه‌بندی، با استفاده از ماشین بردار پشتیبان می‌توان مرزهای تصمیم بسیار دقیق و پایدار ایجاد کرد، به‌ویژه در داده‌هایی با ابعاد زیاد عملکرد این مدل مناسب است. مدل ماشین بردار پشتیبان کرنل‌های مختلفی شامل خطی، منحنی، تابع پایه شعاعی و چندجمله‌ای دارد. کرنل روی ساختار مدل اثرگذار است. در این پژوهش بر اساس یافته‌های تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر دقت زیاد کرنل‌های تابع پایه شعاعی، از کرنل تابع پایه شعاعی استفاده شد. هنگامی که از کرنل تابع پایه شعاعی در مدل ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌شود، تنظیم سنج‌های گاما (γ) و هزینه (C) برای ساختار مدل ضروری است. با

سنجه گاما می‌توان اندازه اثرگذاری هر یک از داده‌ها بر شکل تابع تصمیم در ساختار مدل را تعیین کرد. با افزایش سنج گاما در مدل می‌توان بر جزئیات محلی تمرکز کرد و حساسیت مدل به تغییرات را افزایش داد، اما، اندازه زیاد آن نیز سبب افزایش خطر بیش‌برازش می‌شود. سنج هزینه، اندازه حساسیت مدل در برابر خطاهای طبقه‌بندی را مهار می‌کند. با افزایش سنج هزینه در مدل می‌توان روی داده‌های آموزشی بیشتر تمرکز کرد و خطاها را کاهش داد، اما احتمال بیش‌برازش نیز افزایش می‌یابد (واینر و فونسکا ۲۰۲۱). در این پژوهش، برای یافتن ساختار مناسب مدل، اندازه متفاوت این سنج‌ها ارزیابی شد و سرانجام ساختار مدل نهایی شد.

به‌منظور اجرای مدل یادگیری ماشینی در محیط نرم‌افزار R از بسته sdm استفاده شد. به‌منظور استفاده از بسته sdm، باید شکل متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته به‌ترتیب شکل ASCII و Shapefile باشند. بر این اساس در این پژوهش، با توجه به پیچیدگی ارتباط میان عامل‌های محیطی و همچنین غیرخطی بودن پدیده سیل‌گیری، مدل ماشین بردار پشتیبان انتخاب و کارایی آن ارزیابی شد.

#### اعتبارسنجی نتایج مدل

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل در هنگام مواجه با داده‌های جدید (داده‌هایی که در مرحله آموزش مدل استفاده نشده‌اند) اعتبارسنجی مدل نامیده می‌شود. اعتبارسنجی یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های مدل‌سازی است و بدون انجام آن نتایج مدل‌سازی اعتبار علمی ندارد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، داده‌های رخداد سیل‌گیری (متغیر وابسته) به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند. آزمون اعتبارسنجی فقط بر اساس داده‌های گروه اعتبارسنجی انجام می‌شود (چوبین و همکاران ۲۰۲۳). در این پژوهش از مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) به‌عنوان معتبرترین آماره ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل استفاده شد (رحمتی و همکاران ۲۰۱۹). ماهیت این آماره مستقل از آستانه است و بدون دخالت دیدگاه

9- Support Vector Machine

10- Hyperplane

11- Kernel Functions

تغییرات بلندی در این آبخیز واضح بود و اندازه بلندی از حدود ۷۰۰ تا ۳۰۱۰ متر متغیر بود (شکل ۳a). تغییرات بلندی در یک آبخیز می‌تواند سرمنشأ بسیاری از ویژگی‌های آب‌شناختی و زمین‌ریخت‌شناختی باشد.

بر اساس نقشه جهت‌های دامنه، در این آبخیز ۹ طبقه مختلف برای جهت‌های دامنه در نظر گرفته شد. هر دامنه از دیدگاه اندازه دریافت انرژی خورشیدی، استقرار پوشش گیاهی، تحول خاک، رطوبت خاک و رفتارهای آب‌شناختی متفاوت بودند (شکل ۳b).

اندازه‌های خیلی کم و خیلی زیاد شاخص همگرایی در این آبخیز مربوط به قسمت‌های گوناگون بود (شکل ۳c). در بخش‌هایی که شاخص همگرایی زیاد است، جریان‌های سطحی به راحتی یکی می‌شوند و به شکل جریان یکپارچه و با آبدهی بیشتر به رودهای آبخیز وارد می‌شوند (ادریس و همکاران ۲۰۲۲). در بخش‌هایی که شاخص همگرایی کمتر است، شرایط ظاهری زمین برای تجمع جریان‌ها فراهم نیست. از این رو، با استفاده از این شاخص می‌توان اطلاعات مناسبی برای درک فرایند شکل‌گیری سیل برای بهره‌گیری کارشناسان فراهم آورد.

تراکم زهکشی آبخیز سیروان از صفر تا ۲/۳ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر بود. در این آبخیز بیشترین تراکم زهکشی مربوط به بخش‌های شرقی و شمال‌غربی بود (شکل ۳d).

بر پایه نقشه کاربری زمین در آبخیز سیروان هفت کاربری مختلف زمین شامل کاربری کشاورزی، باغ، جنگل، مسکونی، زمین بایر، پهنه‌های آبی و مراتع شناسایی شدند (شکل ۳e). بیشترین سطح کاربری در این آبخیز به ترتیب مربوط به کاربری‌های جنگل و کشاورزی بود.

شاخص بهنجارشده تفاوت پوشش گیاهی نیز نشان‌دهنده وضعیت تراکم پوشش گیاهی بود که در این آبخیز اندازه آن از اندازه‌های منفی تا ۰/۶۱۹ متغیر بود. دلیل اندازه‌های منفی وجود پهنه‌های آبی در این آبخیز است. هرچه اندازه این شاخص بزرگ‌تر باشد، تراکم پوشش گیاهی نیز بیشتر است (شکل -

کارشناسی محاسبه می‌شود (فراتینی و همکاران ۲۰۱۰). برای محاسبه این آماره، ابتدا خروجی مدل به همراه داده‌های گروه اعتبارسنجی وارد نرم‌افزار آماری MedCalc می‌شود و منحنی مشخصه عملکرد گیرنده رسم می‌شود. مساحت زیر این منحنی نشان‌دهنده اندازه دقت مدل است. بر اساس دقت به دست آمده، می‌توان عملکرد مدل را نیز طبقه‌بندی کرد.

#### الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان

در این پژوهش، نتیجه مدل یک نقشه رستری بود که نشان‌دهنده الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان در هر سلول بود. این نقشه به عنوان استعداد رخداد سیل‌گیری نیز معرفی شد. به بیان دیگر، بازه تغییرات اندازه عددی این نقشه از صفر تا یک است و هرچه اندازه آن به عدد یک نزدیک‌تر شود، استعداد سیل‌گیری نیز بیشتر می‌شود. پس از تولید این نقشه، به منظور درک بهتر و استفاده بیشتر آن به وسیله کارشناسان دستگاه‌های اجرایی، نقشه رستری در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی به پنج طبقه مختلف استعداد سیل‌گیری (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد) طبقه‌بندی شد.

#### نتایج و بحث

عامل‌های محیطی مؤثر بر سیل‌گیری آبخیز سیروان پدیده سیل با فرایندی پیچیده که در اثر مشارکت عامل‌های محیطی مختلف رخ می‌دهد و معمولاً خسارت‌های زیادی را به وجود می‌آورد. در این پژوهش، بر اساس بررسی نتایج پژوهش‌های علمی، مشاهده‌های میدانی و تحلیل‌های کارشناسی ۱۶ عامل محیطی مؤثر بر سیل‌گیری از دیدگاه‌های گوناگون شامل اقلیم، پستی بلندی، کاربری زمین، پوشش گیاهی، خاک‌شناسی، آب‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی انتخاب شدند که نقشه آنها در شکل ۳ ارائه شده است. بر پایه شکل ۳، تغییرات مکانی و تنوع عامل‌های محیطی در آبخیز سیروان از دیدگاه‌های بررسی شده بیانگر آن است که تجسم و تحلیل نقش این عامل‌ها در شکل‌گیری سیل به سادگی امکان‌پذیر نیست.

آبخیز نامبرده مربوط به قسمت‌های جنوب‌غربی بود (شکل-۳۱).

بر پایه نقشه بافت خاک در آبخیز سیروان هشت طبقه گوناگون از بافت خاک شناسایی شد (شکل-۳m). بیشترین سطح از بافت خاک در این آبخیز مربوط به طبقه‌های بافت خاک لومی رسی سیلنتی و لومی سیلنتی بود.

شاخص فاصله از جریان در این آبخیز نشان داد برخی از مناطق به آبراهه‌ها و رودها نزدیک هستند و برخی دیگر فاصله طولی زیادی با مجاری زهکشی دارند. اندازه این شاخص در آبخیز سیروان از صفر تا بیش از دو هزار متر متغیر بود (شکل-۳n).

اندازه شاخص رطوبت پستی‌بلندی نیز در این آبخیز از صفر تا ۲۳ متغیر بود (شکل-۳o). در مناطقی که شاخص رطوبت پستی‌بلندی بیشترین اندازه بود، اندازه جریان آب نیز در بالادست بیشتر بود و شرایط پایین‌دست این مناطق نیز برای ماندابی شدن جریان و رخداد سیل‌گیری مناسب بود. بیشترین اندازه این شاخص در این آبخیز مربوط به قسمت‌های شمال‌غربی، شرقی و جنوبی بود.

اندازه شاخص فاصله عمودی از جریان نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم از دیدگاه خروجی جریان از ظرف آبراهه‌ها و رودها و ورود جریان به زمین دشت سیلابی در این آبخیز از صفر تا ۹۷۳ متر متغیر بود (شکل-۳p). این شاخص بیانگر آن بود که مناطقی که فاصله عمودی سطح زمین تا جریان کمتری دارند، در شرایطی که فاصله طولی آن‌ها نسبت به شبکه زهکشی کم باشد، عموماً مستعد رخداد سیل هستند.

۳f). از این‌رو، بیشترین تراکم پوشش گیاهی در قسمت‌های شمال‌غربی آبخیز سیروان بود. نقش تغییرات مکانی تراکم پوشش گیاهی در مقیاس آبخیز به‌نوبه خود در تشکیل رواناب و ایجاد سیل، بسیار مهم است. اندازه این شاخص در قسمت‌هایی از این آبخیز که میان صفر تا ۰/۲۵ بود، پوشش گیاهی خاک نیز مناسب نبود.

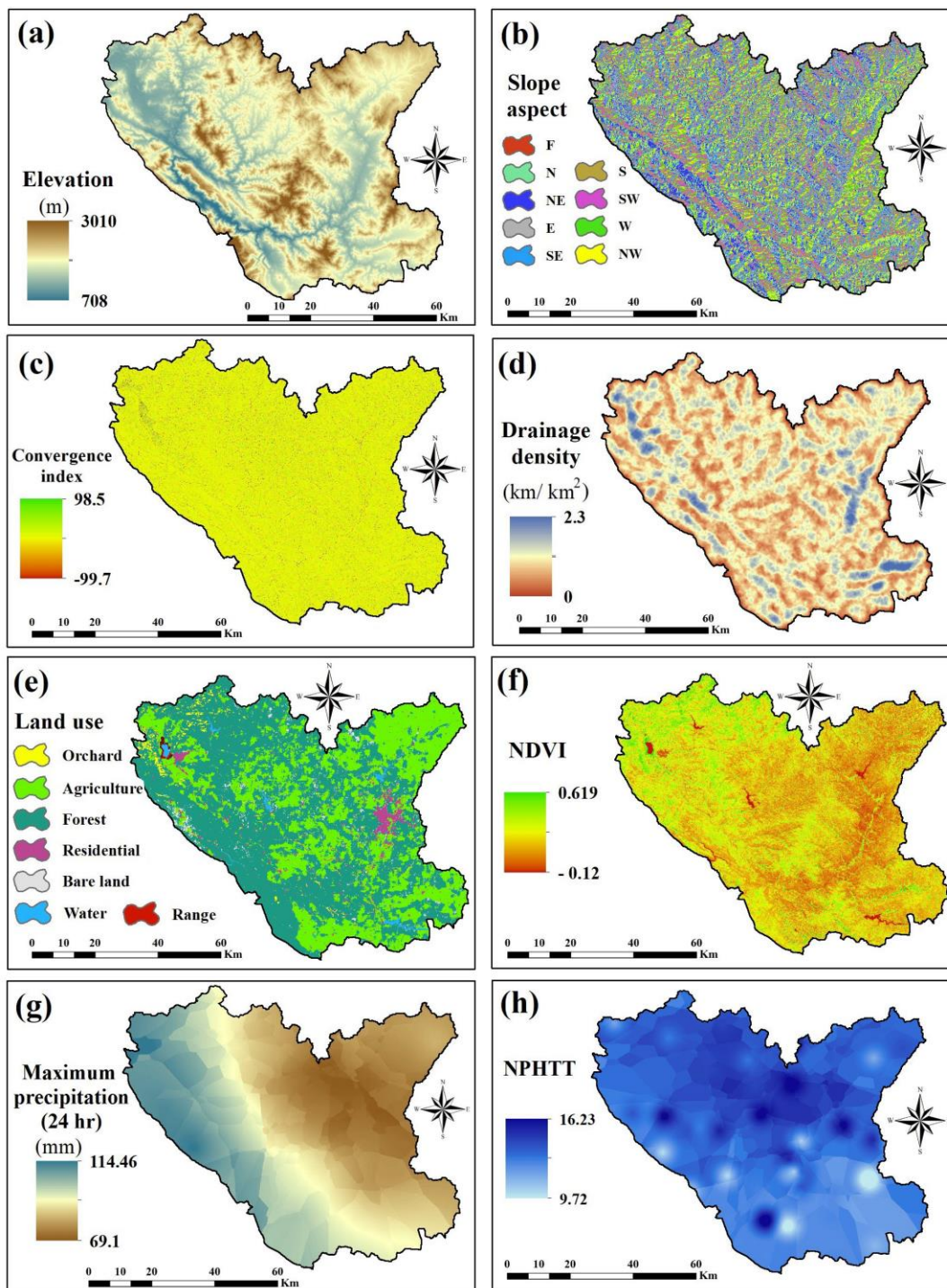
اندازه بیشینه بارش ۲۴ ساعته در آبخیز سیروان از ۶۹/۱ تا ۱۱۴/۴۶ میلی‌متر بر ساعت متغیر بود. بیشترین اندازه این شاخص در مقایسه با دیگر قسمت‌های این آبخیز مربوط به مناطق غربی و شمال‌غربی بود (شکل-۳g).

اندازه شاخص شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه در آبخیز سیروان از حدود ۶ تا ۱۶ رخداد متغیر بود (شکل-۳h). این متغیر نشان داد که بارش‌های سنگین که عامل اصلی شکل‌گیری سیلاب‌ها هستند، در کدام قسمت‌های آبخیز بیشتر تکرار شده‌اند.

نقشه‌های انحای سطح و انحای مقطع، نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده انحای سطح زمین از دیدگاه‌های افقی و عمودی بودند. بر پایه نقشه‌های انحای سطح و انحای مقطع، دامنه‌ها به طبقه‌های محدب، مقعر و تخت دسته‌بندی شدند (شکل-۳ i j).

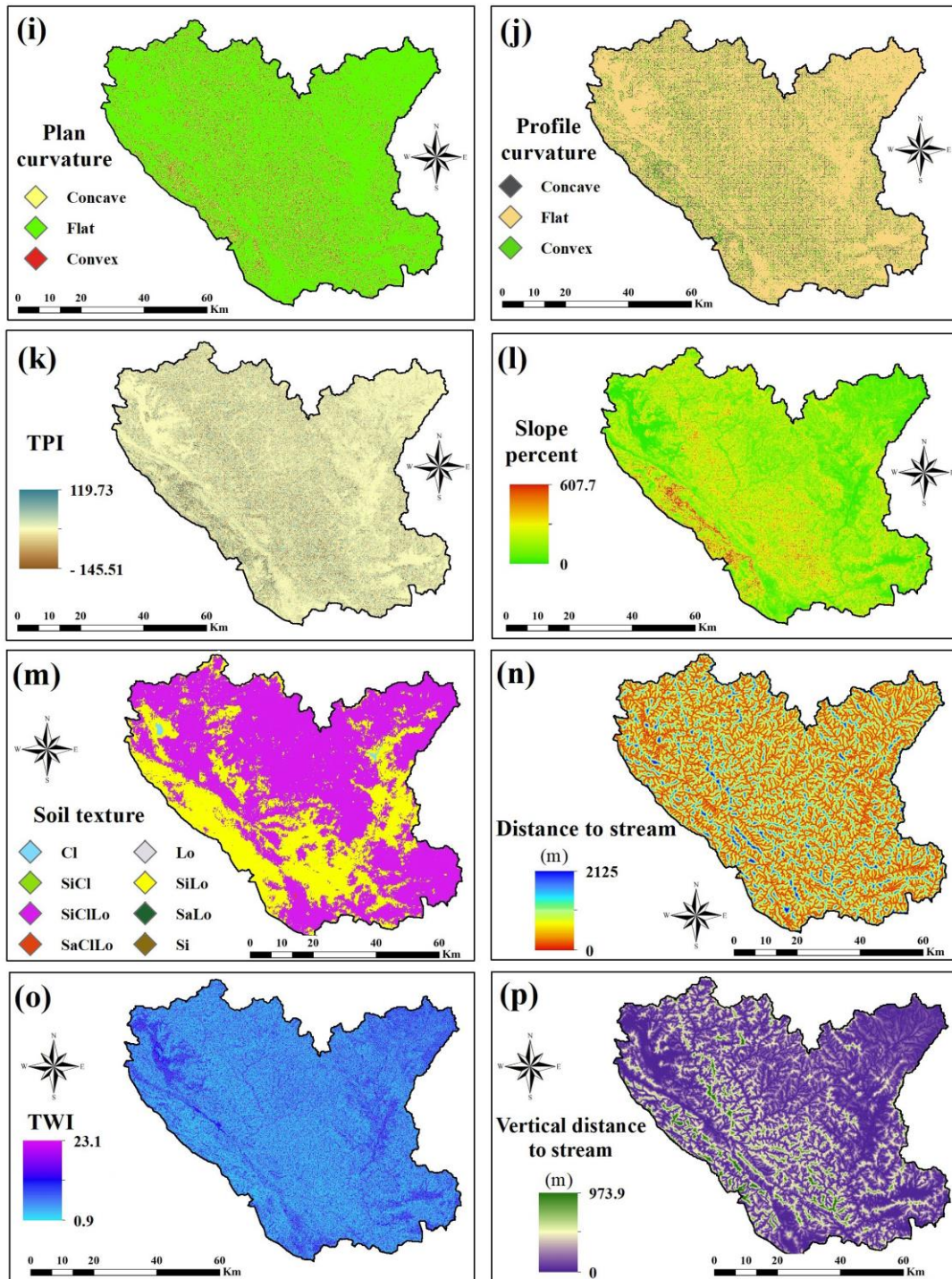
شاخص موقعیت پستی‌بلندی در این آبخیز نشان‌دهنده تغییرات زیاد مکانی پستی‌بلندی در این آبخیز بود و بیشترین اندازه این شاخص مربوط به بخش‌های غربی بود (شکل-۳k).

اندازه شاخص شیب زمین در این آبخیز از صفر تا بیش از ۶۰۰ متغیر بود. بیشترین اندازه این شاخص در



شکل ۳- متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان: (a) بلندی، (b) جهت شیب، (c) شاخص همگرایی، (d) تراکم زهکشی، (e) کاربری زمین، (f) شاخص بهنجارشده تفاوت پوشش گیاهی، (g) بیشینه بارش ۲۴ ساعته، (h) شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه، (i) انحناى سطح، (j) انحناى مقطع، (k) شاخص موقعیت پستی‌بلندی، (l) درصد شیب بافت خاک، (m) فاصله از جریان، (n) شاخص رطوبت پستی‌بلندی و (p) فاصله عمودی از جریان.

Figure 3- Independent variables for predicting flood susceptibility in the Sirwan Watershed: a) elevation, b) slope aspect, c) convergence index, d) drainage density, e) land use, f) NDVI, g) maximum precipitation 24hr, h) NPHTT, i) plan curvature, j) profile curvature, k) topographic position index (TPI), l) slope percent, m) soil texture, n) distance from stream, o) topographic wetness index (TWI), and p) vertical distance from stream.



شکل ۳- ادامه.

Figure 3- Continued.

مکانی رخدادهای سیل در این آبخیز تولید شد در شکل ۴ نشان‌داده شده است. اندازه ارزش عددی سلول‌های نقشه به‌دست آمده از مدل‌سازی در حالت

الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان نقشه استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان که با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و بر اساس داده‌های

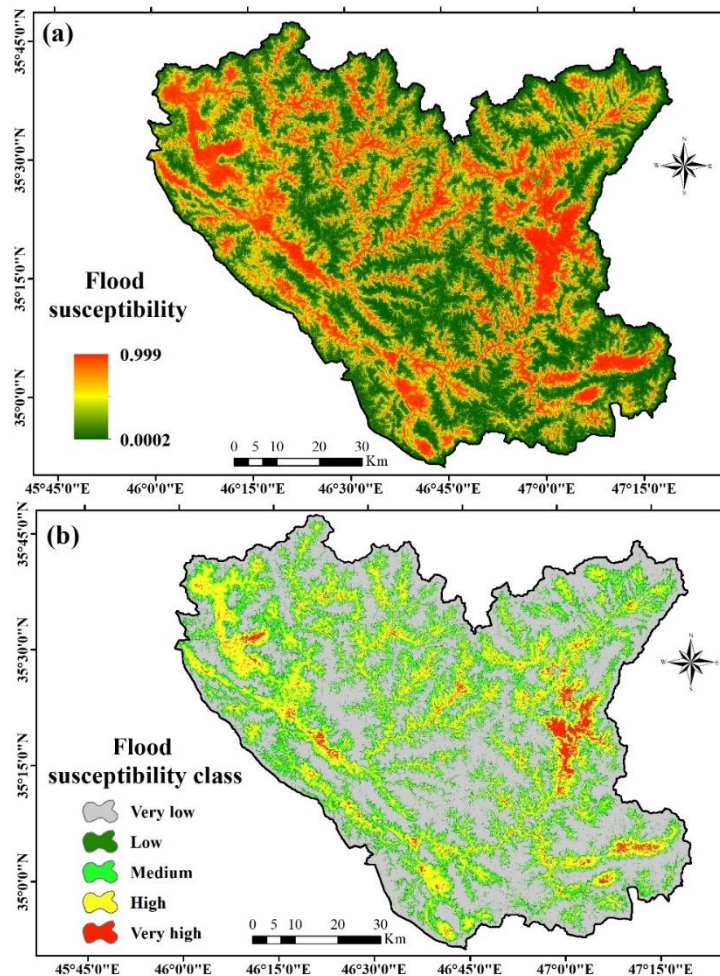
فرایند تشکیل رواناب و سیل را در مناطق بحرانی آبخیز، مهار کرد.

در این پژوهش به‌منظور درک بهتر و استفاده آسان‌تر از نقشه استعداد سیل به‌وسیله کارشناسان و متخصصان، نقشه طبقه‌بندی استعداد سیل‌گیری بر اساس روش گام‌های یکسان در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. بر اساس این نقشه، آبخیز سیروان به پنج طبقه استعداد خیلی‌کم (صفر تا ۰/۲)، کم (۰/۲ تا ۰/۴)، متوسط (۰/۴ تا ۰/۶)، زیاد (۰/۶ تا ۰/۸) و خیلی‌زیاد (۰/۸ تا ۱) تقسیم شد. پهنه‌های مربوط به طبقه استعداد زیاد و خیلی‌زیاد مناطق بحرانی به‌شمار می‌آیند و مهار سیل در این مناطق در اولویت است.

مساحت طبقه‌های استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان در شکل ۵ ارائه شده است. محاسبه‌ها و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که مساحت طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی‌کم ۴۰۳۳۷۷ هکتار، طبقه استعداد سیل‌گیری کم ۷۷۶۴۹ هکتار، طبقه استعداد سیل‌گیری متوسط ۱۳۵۴۲۳ هکتار، طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد ۱۵۸۷۶۳ هکتار و طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی‌زیاد ۱۸۰۸۸ هکتار، بود. به‌بیان دیگر، از کل مساحت آبخیز سیروان ۵۱٪ مربوط به طبقه خیلی‌کم، ۱۰٪ مربوط به طبقه کم، ۱۷٪ مربوط به طبقه متوسط، ۲۰٪ مربوط به طبقه زیاد و ۲٪ مربوط به طبقه خیلی‌زیاد است. بر پایه مشخص شدن مساحت پهنه‌های استعداد سیل‌گیری، اولویت‌های اجرایی و مدیریت سیل در این پژوهش تعیین شد. بر پایه نتایج این پژوهش در زمان اجرای برنامه‌های عملیاتی و مدیریتی، با آگاهی از موقعیت استقرار جامعه‌های محلی و زیرساخت‌ها می‌توان اطلاعات مهم بیشتری برای تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی مکان‌های اجرای طرح‌ها فراهم آورد. به‌بیان دیگر، در پهنه‌های مربوط به طبقه‌های استعداد سیل‌گیری زیاد و خیلی‌زیاد، مناطق بحرانی‌تر بر اساس وضعیت جامعه‌های محلی و زیرساخت‌های مهم، مشخص می‌شوند.

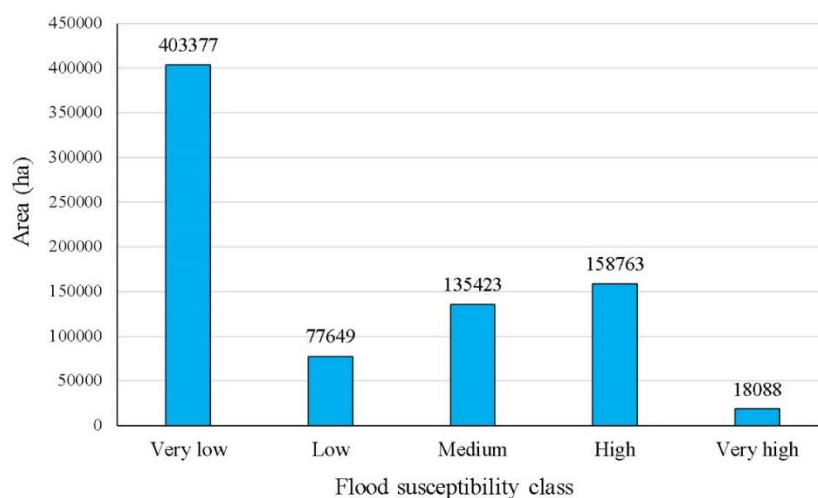
کلی میان صفر تا یک متغیر بود. به‌بیان دیگر ارزش عددی سلول‌ها بیانگر استعداد رخداد سیل بودند. در این پژوهش، اندازه ارزش عددی سلول‌های نقشه استعداد رخداد سیل‌گیری از ۰/۰۰۲ تا ۰/۹۹۹ متغیر بود. اندازه‌های میانگین و انحراف معیار این نقشه رستری به‌ترتیب ۰/۳۸۷ و ۰/۳۷۲ به‌دست آمد. بر پایه شکل ۴، بزرگ‌ترین پهنه‌های مستعد سیل در این آبخیز در بخش‌های شرقی و شمال‌غربی بودند. استعداد سیل‌گیری در قسمت‌هایی از جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی این آبخیز نیز زیاد بود. استعداد سیل‌گیری در بخش‌های مرکزی این آبخیز کم بود. در این پژوهش بر اساس نتایج مدل‌سازی، سیل یک پدیده پیچیده است که با مشارکت عامل‌های محیطی پرشماری رخ می‌دهد. هنگامی که شرایط اقلیمی شروع یک بارش سنگین و به‌دنبال آن رواناب‌های زیاد را پدید می‌آورد، عامل‌های زمینی مانند پوشش گیاهی، خاک، پستی‌بلندی و غیره نقش مهمی در استعداد شکل‌گیری سیل دارند. افزون بر این، در برخی مناطق، شرایط زمینی برای تشکیل سریع رواناب و شکل‌گیری سیل فراهم است، اما شرایط بارندگی با شدت زیاد و سنگین در این مناطق فراهم نیست. از این‌رو، می‌توان گفت حتی یک عامل محیطی هم بر شرایط رخداد سیل‌گیری تأثیرگذار بوده و سبب تشدید یا مهار آن می‌شود.

کارشناسان دستگاه‌های اجرایی با بهره‌گیری از نقشه استعداد رخداد سیل‌گیری به‌عنوان یک ابزار مفید می‌توانند اطلاعات کاربردی در اختیار داشته باشند. در برخی شرایط اجرای عملیات آبخیزداری در آبخیزها بدون توجه به استعداد رخداد سیل‌گیری انجام شده و این موضوع به‌دلیل توجه نداشتن به نقشه‌های سیل‌گیری عموماً موجب هدررفت سرمایه خواهد شد. با بهره‌گیری از نقشه استعداد سیل‌گیری می‌توان اولویت‌های مهم و بحرانی را برای اجرای عملیات آبخیزداری و مدیریت سرزمین تعیین کرد. با اجرای برنامه‌های راهبردی مدیریت جامع آبخیز و در کنار آن انجام اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری می‌توان



شکل ۴- نتایج مدل‌سازی در آبخیز سیروان با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان: (a) نقشه استعداد سیل‌گیری و (b) نقشه پهنه‌بندی استعداد سیل‌گیری.

Figure 4- Modeling results in the Sirwan Watershed using SVM: a) flood susceptibility map, and b) flood susceptibility class map.



شکل ۵- مساحت طبقه‌های استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان.

Figure 5- Area of flood susceptibility classes in the Sirwan Watershed.

پشتیبان در آبخیز سیروان در پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری ۹۲٪/۱ است. بر اساس طبقه‌بندی رایج عملکرد مدل‌ها و با توجه به اینکه دقت مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری بیشتر از ۹۰٪ به‌دست آمد، کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان، بسیار خوب بود. این یافته با نتایج پژوهش‌های تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) مبنی بر کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان برای شناسایی مناطق مستعد سیل‌گیری یک آبخیز در مالزی، همخوانی دارد.

**ارزیابی کارایی مدل پیش‌بینی‌کننده**  
اعتبارسنجی نتایج مدل مهم‌ترین بخش فرایند مدل‌سازی به‌شمار می‌آید. بدون توجه به دقت پیش‌بینی مدل، نتایج پیش‌بینی بی‌اعتبار است. نتایج ارزیابی عملکرد مدل در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش معیار اصلی ارزیابی مدل، مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) بود. در این پژوهش اندازه مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) برابر با ۰/۹۲۱ به‌دست آمد. این اندازه بیانگر آن بود که دقت مدل ماشین بردار

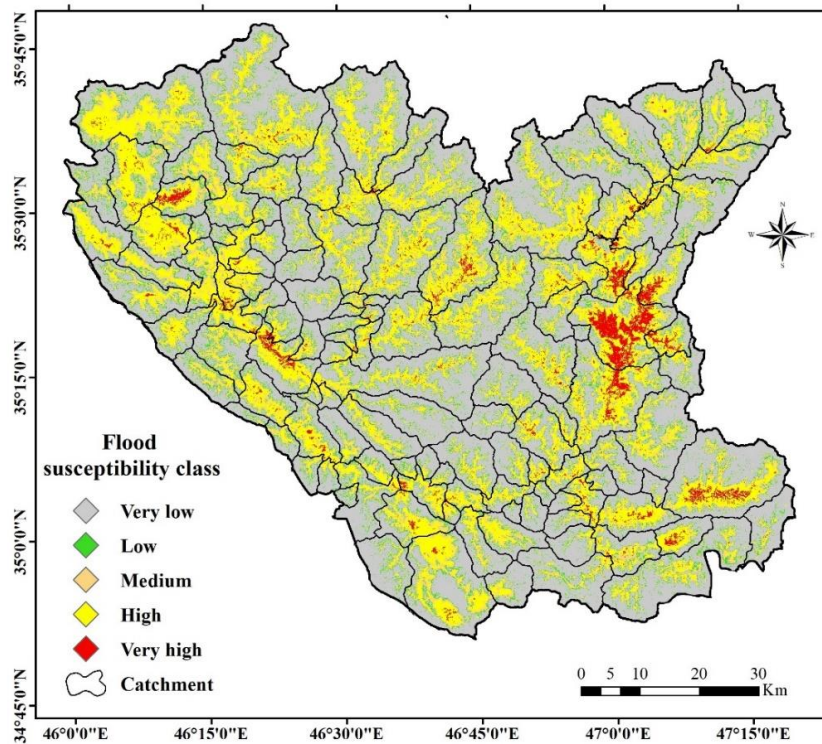
جدول ۱- نتایج اعتبارسنجی مدل برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان.

**Table 1- Results of model validation for flood susceptibility prediction in the Sirwan Watershed.**

Evaluation approach	Evaluation criteria	Value
Cut-off independent threshold	AUC	0.921

تعیین شد. بهترین اندازه سنج‌های گاما و هزینه به‌ترتیب ۰/۴ و ۱۸ به‌دست آمد.

در این پژوهش، اندازه سنج‌های گاما و هزینه در مدل ماشین بردار پشتیبان با استفاده از روش سعی و خطا



شکل ۶- تطبیق پراکنش زیرآبخیزها با نقشه طبقه‌های استعداد سیل‌گیری.

**Figure 6- Overlaying distribution of Sub-watershed with flood susceptibility classes map.**

به دلیل اینکه در آبخیز سیروان پژوهش‌های محدودی در زمینه سیل انجام شده است، امکان مقایسه یافته‌های آن‌ها با نتایج به دست آمده در این پژوهش به سادگی فراهم نیست. در پژوهشی، رحمتی و همکاران (۲۰۲۴) اثرات عامل‌های محیطی بر استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان بر اساس رخدادهای تاریخی سیل و با استفاده از مدل پیشینه بی‌نظمی را بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که عملکرد مدل نامبرده زیاد بود ( $AUC = 0/921$ ). البته باید گفت افزون بر تفاوت میان نوع مدل به کار گرفته شده، داده‌های موقعیت سیل، شمار و نوع متغیرهای پیش‌بینی کننده نیز در این دو پژوهش یکسان نیست. از سوی دیگر، رحمتی و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل شامل فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت پستی بلندی، تراکم زهکشی و کاربری زمین است که با یافته‌های این پژوهش مبنی بر استفاده از عامل‌های نامبرده به عنوان متغیرهای مستقل در مدل‌سازی و تأیید اهمیت آن‌ها در زمینه پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل مناطق مستعد سیل، هم‌راستا است.

تطبيق زیرآبخیزهای سیروان با نقشه طبقه‌های استعداد سیل‌گیری در شکل ۶ نشان داده شده است. در آبخیز سیروان شمار ۱۲۷ زیرآبخیز در دستگاه اجرایی به عنوان واحدهای کاری مدنظر هستند. بر اساس نتایج این تطبیق، می‌توان گفت اولویت‌پذیری واحدهای اجرایی متفاوت است. مثلاً در این راستا، کمترین شدت سیل‌گیری مربوط به زیرآبخیزهای باینجوب و آسوله بود که به تبع آن کمترین اولویت اجرای اقدامات آبخیزداری نیز مربوط به این زیرآبخیزهاست. به بیان دیگر، ظرفیت این زیرآبخیزها برای طرح‌های توسعه‌ای بیشتر است.

نتایج بررسی موقعیت واحدهای اجرایی با طبقه‌های استعداد سیل‌گیری نشان داد که از میان ۱۲۷ زیرآبخیز شمار ۱۵ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد و ۸ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد بودند. بر پایه نتایج جدول ۴، مشخص شد زیرآبخیزهای شهری سنندج، شهری مریوان و موجش در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد هستند که با توجه به تراکم جمعیتی زیاد و زیرساخت‌های شهری مهم نیازمند توجه بیشتری برای انجام طرح‌های اجرایی آبخیزداری و مهار سیلاب هستند.

جدول ۲- چیدمان زیرآبخیزها در طبقه‌های شاخص استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان.

Table 2- Sub-watershed located in considerable flood susceptibility classes in the Sirwan Watershed.

Class	No. of Sub-watershed	Name of Sub-watershed
High	15	Gazerkhani, Palangan, Shwishe, Sawji, Sleen, Sianaw, Danan, Ghshlagh, Zrivar, Bahramabad, Almaneh, Rokhalan, Mamoukh, Chour, Ghaleji
Very High	8	Sanandaj, Babarez, Marivan, Gholian, Mochesh, Doulbakh, Doroud, Khamsan

سیل و کمبود منابع مالی، برای انجام اقدامات اصلاحی آبخیزداری در زیرآبخیزهای اجرایی، استفاده از نقشه استعداد سیل‌گیری به عنوان ابزار اولویت‌بندی، ضروری است. در زیرآبخیزهایی با استعداد سیل‌گیری زیاد و خیلی زیاد و با توجه به تمرکز سکونت‌گاه‌های جمعیتی و زیرساخت‌های شهری، ضرورت انجام اقدامات اصلاحی و حفاظتی در مناطق بالادست آن‌ها بسیار اهمیت دارد. افزون بر این، می‌توان از ظرفیت

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به خسارت‌ها و پیامدهای سیلاب، پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری ضروری است. در این پژوهش، تحلیل‌های اعتبارسنجی مبتنی بر داده‌های میدانی سیل نشان داد که دقت مدل ماشین بردار پشتیبان برای شناسایی مناطق مستعد سیل، بسیار خوب است. بر پایه یافته‌های این پژوهش و با توجه به کمبود داده‌های تخصصی مکان‌محور رخداد

**سپاس‌گزاری**

از حمایت‌های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان برای در اختیار قرار دادن اطلاعات و داده‌های سیل و همکاری در بهبود فرایند انجام پژوهش، قدردانی می‌شود.

**تضاد منافع نویسندگان**

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

**دسترسی به داده‌ها**

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسؤل در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

**مشارکت نویسندگان**

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، پردازش داده، مدل‌سازی، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: مفهوم‌سازی، مهار نتایج و ویرایش و بازبینی مقاله

نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، پردازش داده، مدل‌سازی و تحلیل نتایج

زیرآبخیزهای بدون استعداد سیل‌گیری یا سیل‌گیری کم، در آمایش سرزمین و برنامه‌های توسعه‌ای زیرساخت‌ها بهره برد. بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت با بررسی عامل‌های بلندی، جهت شیب، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، کاربری زمین، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی، بیشینه بارش ۲۴ ساعته، شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه، انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، درصد شیب، بافت خاک، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی و فاصله عمودی از جریان، می‌توان داده‌های مهمی برای مدل‌سازی سیل در مدل‌سازی با ماشین بردار پشتیبان فراهم آورد. با توجه به اهمیت ثبت داده‌های رخداد سیل و کاربرد آن‌ها در مدل‌سازی، پیشنهاد می‌شود به تهیه و تکمیل بانک داده سیل در سطوح استانی و ملی و همچنین آبخیزهای فرامرزی توجه بیشتری شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اهمیت عامل‌های محیطی در پیش‌بینی فرایند سیل‌گیری در آبخیز سیروان بررسی شود. زیرا می‌توان فرایند شکل‌گیری سیل در مقیاس آبخیز و مدیریت عامل‌های محیطی برای کاهش استعداد سیل را بهتر تحلیل کرد.

**فهرست منابع**

- Abedi R, Costache R, Shafizadeh-Moghadam H, Pham QB. 2022. Flash-flood susceptibility mapping based on XGBoost, random forest and boosted regression trees. *Geocarto International*. 37(19): 5479-5496. DOI: 10.1080/10106049.2021.1920636
- Abegaz R, Xu J, Wang F, Huang J. 2024. Impact of flooding events on buried infrastructures: A review. *Frontiers in Built Environment*. 10: p.1357741. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1357741
- Arabameri A, Seyed Danesh A, Santosh M, Cerda A, Chandra Pal S, Ghorbanzadeh O, Chowdhuri I. 2022. Flood susceptibility mapping using meta-heuristic algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 13(1): 949-974. DOI: 10.1080/19475705.2022.2060138
- Babai B, Mohammadi A, Seyedian M, Tomaj A. 2020. The role of flood management approach on the resilience of local communities

- Case study: Flooded villages of the Gorganrood watershed. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*. 10(36): 63-73.
- Chan JYL, Leow SMH, Bea KT, Cheng WK, Phong SW, Hong ZW, Chen YL. 2022. Mitigating the multicollinearity problem and its machine learning approach: A review. *Mathematics*. 10(8): p. 1283. DOI: 10.3390/math10081283
- Choubin B, Hosseini FS, Rahmati O, Youshanloei MM. 2023. A step toward considering the return period in flood spatial modeling. *Natural Hazards*. 115(1): 431-460. DOI: 10.1007/s11069-022-05561-y
- Chowdhury ME, Islam AS, Zaman RU, Khadem S. 2025. A machine learning-based approach for flash flood susceptibility mapping considering rainfall extremes in the northeast region of Bangladesh. *Advances in Space Research*. 75(2):1990-2017. DOI: 10.1016/j.asr.2024.10.047

- Dodangeh E, Choubin B, Eigdir AN, Nabipour N, Panahi M, Shamshirband S, Mosavi A. 2020. Integrated machine-learning methods with resampling algorithms for flood susceptibility prediction. *Science of the Total Environment*, 705 :135983. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135983
- Dutta P, Deka S. 2024. A novel approach to flood risk assessment: Synergizing with geospatial based MCDM-AHP model, multicollinearity, and sensitivity analysis in the Lower Brahmaputra Floodplain, Assam. *Journal of Cleaner Production*. 467: p. 142985. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142985
- Fratini P, Crosta G, Carrara A. 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*. 111(1-4): 62-72. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.12.004
- Idrees MO, Olateju SA, Omar DM, Babalola A, Ahmadu HA, Kalantar B. 2022. Spatial assessment of accelerated surface runoff and water accumulation potential areas using AHP and data-driven GIS-based approach: the case of Ilorin metropolis, Nigeria. *Geocarto International*. 37(27): 15877-15895. DOI: 10.1080/10106049.2022.2102236
- Islam ARMT, Talukdar S, Mahato S, Kundu S, Eibek KU, Pham QB, Kuriqi A, Linh NTT. 2021. Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*. 12(3): p.101075. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.09.006
- Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, Mazzariello JC, Mathis M, Brumby SP. 2021. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In 2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium (IGARSS). pp. 4704-4707. IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499
- Kazemi M, Mohammadi F, Nafooti MH, Behvar K, Kariminejad N. 2024. Flood susceptibility mapping using machine learning and remote sensing data in the Southern Karun Basin, Iran. *Applied Geomatics*. 16(3): 731-750. DOI: 10.1007/s12518-024-00582-7
- Khosravi K, Melesse AM, Shahabi H, Shirzadi A, Chapi K, Hong H. 2019. Flood susceptibility mapping at Ningdu catchment, China using bivariate and data mining techniques. In *Extreme hydrology and climate variability*. Elsevier. pp. 419-434. DOI: 10.1016/B978-0-12-815998-9.00033-6
- Nabinejad S, Schüttrumpf H. 2023. Flood risk management in arid and semi-arid areas: A comprehensive review of challenges, needs, and opportunities. *Water*. 15(17): p. 3113. DOI: 10.3390/w15173113
- Rahmati O, Kornejady A, Choubin B, Jaafari A, Amini A. 2024. Evaluating the Impact of Environmental Factors on Flood Susceptibility in the Sirwan Watershed Based on Historical Flood Events. *Watershed Management Research*. 37(1):80-97. DOI: 10.22092/wmrj.2023.361544.1527
- Rahmati O, Kornejady A, Samadi M, Deo RC, Conoscenti C, Lombardo L, Dayal K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Pourghasemi HR, Kumar S, Bui DT. 2019. PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. *Science of the Total Environment*. 664: 296-311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.017
- Rezai Moghadam MH, Nikjou MR, Mokhtari D, Hoseinzadeh R, Maleki H. 2016. Estimating the discharge and flood levels of past Sirwan River floods using geomorphological and flood evidence. *Natural Geography*. 9(33): 1-18.
- Seleem O, Ayzel G, de Souza ACT, Bronstert A, Heistermann M. 2022. Towards urban flood susceptibility mapping using data-driven models in Berlin, Germany. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 13(1): 1640-1662. DOI: 10.1080/19475705.2022.2097131
- Sulaiman MS, Abood MM, Sinnakaudan SK, Shukor MR, You GQ, Chung XZ. 2021. Assessing and solving multicollinearity in sediment transport prediction models using principal component analysis. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 27(1):343-353. DOI: 10.1080/09715010.2019.1653799
- Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hydrology*. 512: 332-343. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.008
- Tehrany MS, Pradhan B, Mansor S, Ahmad N. 2015. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*. 125: 91-101. DOI: 10.1016/j.catena.2014.10.017
- Wahba M, Sharaan M, Elsadek WM, Kanae S, Hassan HS. 2024. Examination of the efficacy of machine learning approaches in the generation of flood susceptibility maps. *Environmental Earth Sciences*. 83(14): p. 429. DOI: 10.1007/s12665-024-11696-x
- Wainer J, Fonseca P. 2021. How to tune the RBF SVM hyperparameters? An empirical evaluation of 18 search algorithms. *Artificial Intelligence Review*. 54(6): 4771-4797. DOI: 10.1007/s10462-021-10011-5



## Predicting the Spatial Pattern of Flood Susceptibility Using Support Vector Machine Model in the Sirwan Watershed

Aref Bahmani<sup>1</sup>, Hiran Abghari<sup>2\*</sup>, Omid Rahmati<sup>3</sup>

1- Ph.D. in Watershed Management Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Floods cause significant financial losses and loss of life in the country every year. Although information on the location of flood events is of high scientific value, in many flood studies, flood zones have been determined solely based on expert's opinion and multi-criteria decision-making methods. This study predicts the spatial pattern of flood susceptibility in the Sirwan watershed of Kurdistan province using spatial information on flood events in the last decade, and to achieve this objective, a support vector machine model, as a machine learning-based approach, was employed.

#### Materials and Methods

In order to carry out this research, first a database in the geographic information system was prepared for flooding events in the Sirwan watershed using bank flood data from the Main Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Kurdistan Province. The number of 102 flooding events in the Sirwan watershed was confirmed in the ten-year period (2015-2015). Since machine learning models require points of occurrence and non-occurrence of flooding, points of non-occurrence of flooding were also selected based on the homogeneous-unit method. This database was completed using information obtained from face-to-face interviews with local communities in this area. Based on the various characteristics of the Sirwan watershed and a review of scientific sources, sixteen factors affecting flooding events were selected and their digital maps were prepared. Factors affecting flooding included elevation, slope aspect, slope percentage, convergence index, drainage density, land use, maximum 24-hour precipitation, number of rainfalls higher than the average of the meteorological station, normalized vegetation difference index, plan curvature, profile curvature, soil texture, distance from the stream, topographic position index, topographic

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** h.abghari@urmia.ac.ir

**Citation:** Bahmani, A., Abghari, H., Rahmati, O. 2026. Predicting the Spatial Pattern of Flood Susceptibility Using Support Vector Machine Model in the Sirwan Watershed. *Watershed Management Research*. 39(2): 96-115.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2025.371438.1645

**Received:** 16 November 2025, **Received in revised form:** 10 December 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 96-115.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



wetness index, and vertical distance from the stream, which were used as independent variables in the modeling. Flooding occurrence and non-occurrence data were randomly divided into two training and validation groups with proportions of 70% and 30%. After implementing the support vector machine model in the R software environment, a flood susceptibility map of the Sirwan watershed was prepared and the spatial pattern of flood susceptibility was examined. The accuracy of the aforementioned map was evaluated using the area under the curve (AUC) statistic of the receiver operating characteristic.

### **Results and Discussion**

After validation, the results showed that the support vector machine model with an area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of 0.921 (92.1%) has a high capability to predict flood-prone areas. Given that the model's prediction accuracy is reported to be more than 90%, based on the common classification of model efficiency, the performance of the support vector machine model in the Sirwan watershed is considered excellent. Based on the analyses, the very low, low, medium, high, and very high flood susceptibility classes include 51, 10, 17, 20, and 2% of the Sirwan watershed, respectively. Given the identification of flood-prone areas, the implementation priorities for the flood management plan have been clearly identified for implementing measures. Out of the 127 sub-watersheds of the Sirwan sub-watershed, 15 sub-watersheds are in the high flood-prone class and 8 sub-watersheds are in the very high flood-prone class. Population density is relatively high in all sub-watersheds in the high flood susceptibility category (such as Gazrokhani, Palangan, Shwishe, Sawji, Sleen, Sianaw, Danan, Zaribar, etc.) and in sub-watersheds in the very high flood susceptibility category (such as Sanandaj, Babarez, Marivan, Gholian, Mochesh, Doulbakh, Doroud, and Khamsan).

### **Conclusions and Suggestions**

Based on the results of this study, the performance of the support vector machine model in identifying areas prone to flooding was very good. Based on the lack of specialized data and financial resources in the executive agencies, the application of this model in the management and planning of watershed improvement measures is important. In this study, prioritization of operational watersheds was performed based on the severity of flooding. Because, in conditions of data scarcity, it will not only save time and resources, but also improve the effectiveness of watershed management remedial measures. According to the results of this study, it is suggested that the support vector machine model be used at larger provincial, regional, and national levels, as well as in detailed-implementation studies of watershed management for risk management.

**Keywords:** Flood, hazard, prioritization, simulation, watershed management

**Article Type:** Research Article

### **Acknowledgement**

We would like to appreciate the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Kurdistan Province and Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center for providing flood information and data and collaborating in improving the research process is appreciated.

### **Conflicts of Interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### **Data Availability Statement**

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### **Authors' Contribution**

Author 1: Conceptualization, data analysis, modeling, writing - original draft preparation

Author 2: Conceptualization, results controlling, manuscript editing

Author 3: Conceptualization, data analysis, modeling, results interpretation



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش منابع کشاورزی

## پیش‌بینی تاب‌آوری آبخیز دشت مرودشت با استفاده از یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر WoE

سعید علیزاده<sup>۱</sup>، رضا قضاوی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم امیدوار<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کاشان

۲- استاد دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان

۳- دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

در قرن پیش‌رو با تشدید خشک‌سالی‌ها و افزایش فعالیت‌های انسانی بر منابع آب‌های زیرزمینی، ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های آبخوان به‌عنوان یک شاخص مهم پایداری منابع آب، اهمیت ویژه‌ای دارد. از این‌رو، برای سنجش توانایی آبخوان در بازگشت به وضعیت مطلوب پس از فشارهای آب‌شناختی، از شاخص کمی (CRS) به‌عنوان معیار، استفاده می‌شود. دشت مرودشت با ۱۴۸ هزار هکتار زمین‌های زارعی آبی، ۲۲ هزار هکتار زمین‌های دیم، قطب کشاورزی استان فارس است. اما به‌دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی چالش‌های مختلفی مانند افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست و شکاف‌های پرشماری رخ داده است که خطر فرونشست در نواحی باستانی تخت‌جمشید و نقش‌رستم نیز نمایان است. از این‌رو، این پژوهش با رویکرد جامع تلفیق مدل وزن‌دهی شواهد (WoE)، روش‌های انتخاب ویژگی پیشرفته و روش‌های اعتبارسنجی و با هدف پیش‌بینی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی در آبخیز دشت مرودشت اجرا شد و نقشه کاربردی و قابل اطمینان توزیع مکانی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی این دشت، برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تولید شد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا ۲۱ متغیر محیطی، آب‌زمین‌شناختی و اقلیمی به‌عنوان عامل‌های تعیین‌کننده وضعیت آب‌های زیرزمینی شناسایی و به‌شکل لایه‌های شبکه‌ای تهیه شدند. سپس، با به‌کارگیری یک رویکرد چندمرحله‌ای ویژگی‌ها مبتنی بر پراکنش، همبستگی، هم‌خطی و اطلاعات متقابل، انتخاب شدند. در این پژوهش، ۱۰ عامل از مؤثرترین عامل‌ها (تراکم کرنل چاه‌های بهره‌برداری، تراکم آبراهه، فاصله از چاه‌های کشاورزی، فاصله از گسل، انحنا سطح، فاصله از چاه‌های صنعتی، میانگین افت، ضخامت آبخوان، فاصله از آبراهه اصلی، تراکم چاه‌های بهره‌برداری) برای مدل‌سازی نهایی انتخاب شدند.

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: ghazavi@kashanu.ac.ir

استناد: علیزاده، س.، قضاوی، ر.، امیدوار، ا. ۱۴۰۵. پیش‌بینی تاب‌آوری آبخیز دشت مرودشت با استفاده از یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر WoE. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۲): ۱۳۷-۱۱۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.371489.1647

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱۱۶ تا ۱۳۷.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



روابط میان شاخص CRS و این عامل‌ها با روش ترکیب شواهد و محاسبه وزن‌های WoE تعیین شد. با جمع وزن‌های WoE، نقشه نهایی تاب‌آوری تولید و سپس بر اساس روش طبقه‌بندی چندکی به پنج طبقه تقسیم شد. اعتبارسنجی مدل با ۳ روش اعتبارسنجی متقاطع طبقه‌بندی‌شده، روش بوت‌استرپ (۱۰۰۰ تکرار) و تحلیل واسنجی، انجام شد.

### نتایج و بحث

یافته‌های اعتبارسنجی مدل نشان داد که عملکرد مدل در پیش‌بینی شاخص تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی (CRS) بسیار خوب ( $AUC = 0.920$ ) و پایداری آماری آن قابل اطمینان است. در آبخیز مطالعه‌شده تاب‌آوری آب زیرزمینی با طبقات مختلف و دقت مناسب، شناسایی شد. نقشه نهایی بر اساس روش طبقه‌بندی چندکی به پنج طبقه بسیار کم ( $0 - 0.223$ )، کم ( $0.223 - 0.367$ )، متوسط ( $0.367 - 0.503$ )، زیاد ( $0.503 - 0.669$ )، خیلی زیاد ( $0.669 - 1$ )، تقسیم شد. این طبقات منعکس‌کننده تغییرپذیری ذاتی داده‌ها بودند. زیرا بر اساس توزیع تجربی اندازه‌های شاخص بهنجار شده، که از ترکیب وزن‌های WoE عامل‌های مؤثر محاسبه شدند، هر طبقه تقریباً شامل ۲۰٪ از سطح مطالعه‌شده بود. در این پژوهش، اندازه‌های کم شاخص تاب‌آوری در بیشتر مناطق (میانگین =  $0.48$ ) بیانگر تاب‌آوری بسیار کم سامانه آبخوان در برابر فشارهای آب‌شناختی بود.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان مناطق بحرانی با کمترین تاب‌آوری را شناخت. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود بر پایه نتایج به‌دست آمده مناطقی که در طبقه بسیار کم تاب‌آوری هستند باید در اولویت اول برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مانند کاهش برداشت‌های غیرمجاز، اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، ایجاد مناطق حفاظتی و نظارتی فنی-حقوقی باشند و در آنها نظارت شدید انجام شود. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود از این چارچوب مدل‌سازی به‌عنوان یک مبنای علمی قابل تعمیم برای ارزیابی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی در دیگر دشتهای بحرانی کشور استفاده شود.

### واژگان کلیدی

آب زیرزمینی، بوت‌استرپ، شاخص تاب‌آوری، مدل‌سازی، مدیریت منابع آب

### مقدمه

افزایشی تقاضای آب در بخش‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی هم‌خوانی ندارد (مشیرپناهی و همکاران ۲۰۲۰). نقش آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از ارکان بنیادین آب‌کره زمین، در تأمین منابع آب شیرین برای مصارف انسانی، کشاورزی و صنعتی بسیار مهم است. افزون بر این، در پایداری زیست‌بوم‌ها و تداوم فرآیندهای بوم‌شناختی نیز نقش اساسی دارند (سینگ‌ها و ناواری ۲۰۲۲؛ سایتو و همکاران ۲۰۲۱). در مناطق خشک، تغییرات اقلیمی و افزایش فشار ناشی از فعالیت‌های انسانی بر منابع آب زیرزمینی بیش از حد اثرگذار است (دشموخ و همکاران ۲۰۲۲). افزون بر خطر جدی ناشی از کاهش سطح آب‌های زیرزمینی که سبب فرونشست زمین می‌شود (تزامپوگلو و همکاران ۲۰۲۳)،

میانگین بارش سالانه در ایران کمتر از ۲۷۳ میلی‌متر است که ۷۰٪ آن به‌سرعت به‌وسیله فرآیندهای تبخیر و تعرق به جو باز می‌گردد (سلطانی و همکاران ۲۰۲۳). از میان باقی‌مانده، نزدیک به ۹۰٪ مربوط به بخش کشاورزی است. در بخش کشاورزی تقریباً ۶۰٪ از آب مصرفی به‌دلیل راندمان کم سامانه‌های آبیاری هدر می‌رود (علیزاده و همکاران ۲۰۰۵). در این شرایط، نقش آب‌های زیرزمینی بسیار مهم است. زیرا بیش از ۶۰ درصد از کل منابع آبی لازم برای کشور را تأمین می‌کنند (نوری و همکاران ۲۰۲۳). با این حال، ویژگی‌های آب‌شناختی ایران همراه با ناهمگونی‌های بسیار در توزیع مکانی و زمانی منابع آبی، با الگوی

شورشدن خاک، نابودی پوشش گیاهی و بیابان‌زایی نیز سبب نابودی بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر می‌شود (عبدالرحمان ۲۰۲۳). امنیت آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک با چالش بهره‌برداری بیش از حد در مقایسه با گذشته روبرو است (الائو و همکاران ۲۰۲۴) و با این رویکرد تاب‌آوری سامانه‌های آب زیرزمینی از نگرانی‌های اصلی است (شیواکوتی و همکاران ۲۰۱۹). با انجام پژوهش‌هایی در پایداری بوم‌سازگان، تاب‌آوری موضوع پژوهشی در علوم آب‌شناسی، اقلیم‌شناسی و بوم‌شناسی شد (هولینگ ۱۹۷۳؛ هائو و وینه ۲۰۱۸؛ نیوتن و اسپنس ۲۰۲۳؛ ذوقی و امیری ۲۰۲۵). تاب‌آوری بیانگر سرعت بازگشت یک سامانه منابع آب پس از رویارویی با وضعیت نامطلوب به وضعیت مطلوب است (لی و لینس ۲۰۰۷). تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی توانایی یک سامانه آب زیرزمینی در بازیابی به حالت اول پس از یک اختلال خارجی و مداخلات انسانی و طبیعی است (ریچی و همکاران ۲۰۱۵؛ اسکاتلون و همکاران ۲۰۲۳). آسیب‌پذیری و تاب‌آوری سامانه‌های زمین‌آب‌شناسی دائماً به دلیل اثر تنش‌های اقلیمی و دخالت‌های انسانی ناشی از تغییرات کاربری زمین و برداشت آب زیرزمینی در حال تغییر است. تغییر عملکرد تنش‌ها بر توانایی سامانه برای جذب شوک یا بازیابی، همراه با افزایش یا کاهش تاب‌آوری و اندازه آسیب‌پذیری در برابر نابودی در یک مسیر دگرگون خواهد بود (جاویدنژاد و همکاران ۲۰۲۰). شاخص قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری (RRV)<sup>۱</sup> اولین بار به‌وسیله هاشیموتو (۱۹۸۲) به‌کار برده شد و به‌وسیله دیگر پژوهشگران با رویکردی منطقی، کارایی و قابلیت اجرای آن بررسی شد (زینگ و همکاران ۲۰۲۰؛ بهیری و ریدی ۲۰۲۲؛ فولادی و همکاران ۲۰۲۱؛ مقدم و ملک‌محمودی ۲۰۲۵). پژوهش روی تاب‌آوری کسب و کارهای کوچک نشان داد که باید این مقوله به ماتریس خطر اضافه شود و اگر تاب‌آوری در محاسبات لحاظ شود، اولویت‌ها درباره اینکه کدام خطرها مهم‌تر هستند تغییر می‌کند و ارزیابی واقعی‌تر و مؤثرتر خواهد بود (واعظی و همکاران ۲۰۲۳). در

کتاب برنامه‌ریزی شهری تاب‌آور محور، ماتریس تاب‌آوری یک نقشه راه جامع است که با بررسی پرسش‌های مهم در یک سامانه پیچیده (مانند شهر) می‌توان آن را به‌طور کامل بررسی کرد. با پاسخگویی به این پرسش که در هر یک از چهار مرحله بحران (آماده‌سازی، مقابله، بازیابی، سازگاری)، عملکرد سامانه در چهار زمینه فیزیکی، اطلاعاتی، شناختی و اجتماعی چگونه است؟ نقاط ناشناخته، شکاف‌های هماهنگی و نیازمندی‌ها برای بهبودی تعیین می‌شود. با پاسخ به این پرسش‌ها می‌توان به ابزاری قدرتمند در برنامه‌ریزی و هماهنگی همراه با افزایش تاب‌آوری دست یافت (شریفی و یاماگاتا ۲۰۱۸). برای مقابله با بحران تغییرات اقلیمی، باید مهندسی سنتی، حفاظت از طبیعت و فناوری روز را با هم ترکیب کرد تا یک سامانه آبی مقاوم و تاب‌آور به‌دست آید (گراناتا و دینونو ۲۰۲۵). با روش جدید تصمیم‌گیری بر مبنای رأی‌گیری و با استفاده از برنامه‌ریزی ساختاری و هوشمندانه می‌توان مقاومت را در برابر بحران را افزایش داد و شانس بازیابی سفره آب زیرزمینی را نیز افزایش داد (مقدسی و همکاران ۲۰۲۲).

روش‌های مختلف تاب‌آوری روی منابع آب بررسی شده است. اما، همچنان چالش کمی‌سازی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی باقی‌مانده است. پژوهش‌های پیشین به‌طور عمده در راستای انتخاب شاخص‌های منفرد (هوند و همکاران ۲۰۱۸؛ لین و همکاران ۲۰۲۱) یا ارائه چارچوبی برای شاخص‌ها (بهبودیان و همکاران ۲۰۲۱؛ گیلسپی و همکاران ۲۰۱۹) و ارزیابی آن‌ها انجام شده‌اند. با بررسی روش‌های تک‌عاملی و ارزیابی آن‌ها تناقض‌هایی در نتایج تاب‌آوری مشخص می‌شود که دلیل آن تفاوت در انتخاب شاخص‌ها و روش‌های محاسباتی است (جونس ۲۰۱۹). هرچند که در ارزیابی ساختاریافته و نظام‌مند شاخص‌ها عامل‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود اما فقط سطح متوسطی از اندازه تاب‌آوری در مقیاس محلی برآورد می‌شود که این موضوع نیز محاسبه توزیع مکانی مشخصه تاب‌آوری و تأیید قابلیت اطمینان انتخاب وزن‌ها برای هر شاخص

احتمال رخداد تاب‌آوری در حضور شواهد مکانی مانند شاخص‌های آب‌زمین‌شناختی، کاربری زمین، بارش و دیگر عامل‌های مؤثر استفاده می‌شود (وی و همکاران ۲۰۱۳)؛ خوش‌طینت و همکاران (۲۰۱۹). در این مدل با محاسبه وزن‌های شواهد مثبت ( $W^+$ ) و منفی ( $W^-$ ) برای هر لایه مؤثر و جمع جبری این وزن‌ها، نقشه نهایی پیش‌بینی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی تولید می‌شود. افزون بر این، در مدل‌های پیش‌بینی که تعادل میان طبقه‌ها وجود ندارد، با  $WoE$  می‌توان نبودن این تعادل را مدیریت کرد. با استفاده از  $WoE$ ، می‌توان اثرات مختلف را برحسب وزن‌ها و نرخ‌ها تعیین کرد و این موضوع سبب تفسیر بهتر نتایج خواهد شد.

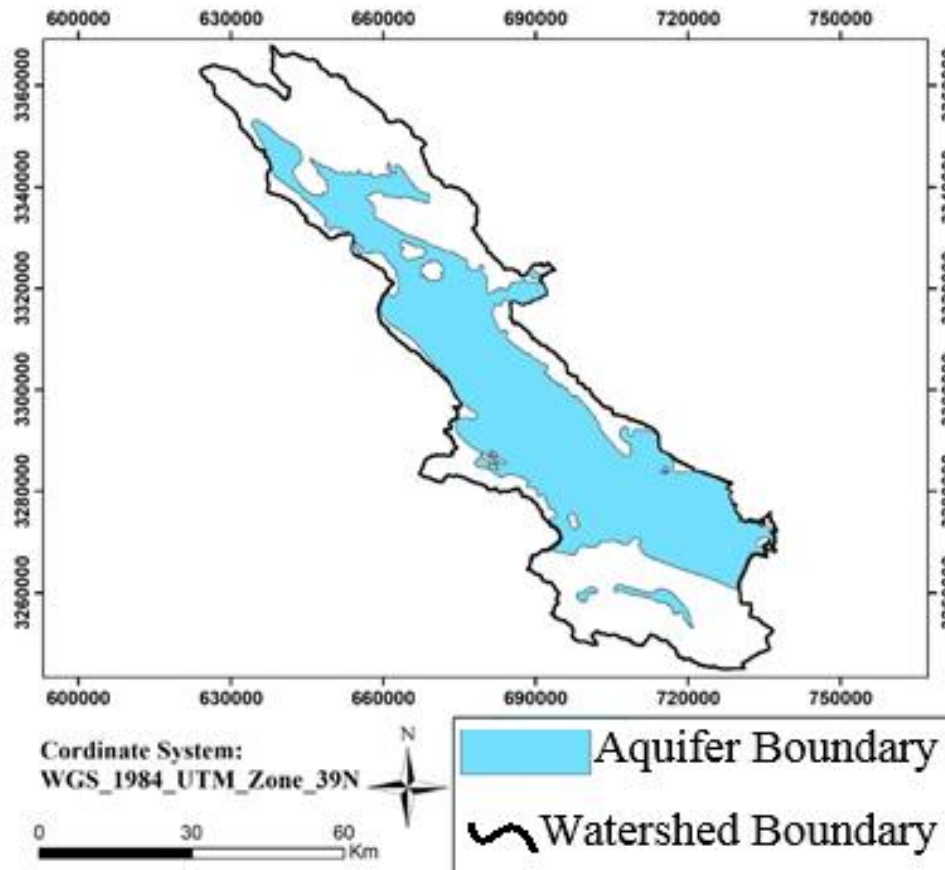
در این پژوهش با روش کدنویسی پیچیده در زبان پایتون، وزن شواهد ( $WoE$ ) برای پیش‌بینی شاخص عملکرد تاب‌آوری آب زیرزمینی مدل‌سازی شد. هدف این پژوهش، ساخت یک مدل حرفه‌ای از وزن شواهد بود که بر اساس شاخص تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی ( $CRS$ )، تاب‌آوری مکانی آب‌های زیرزمینی در منطقه دشت مرودشت پیش‌بینی شد و اعتبار این شاخص در پیش‌بینی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی نیز ارزیابی شد.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعه‌شده

منطقه پژوهشی یکی از محدوده‌های آبخیز مهارلو و بختگان در استان فارس دشت مرودشت-خرامه بود که میان طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی و میان عرض‌های ۲۹ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی است. دشت مرودشت از گسترده‌ترین دشت‌های ایران است و بیشینه بلندی ۳۰۹۹ متر در کوه دشتک و میانگین بلندی ۱۵۹۰ متر است. این دشت در برگیرنده ۳/۸٪ از سطح استان فارس است (شکل ۱).

را دشوار می‌کند (پترسون ۲۰۰۲). امروزه، پژوهش‌های اندکی روی پیش‌بینی مکان محور تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی انجام شده است (رهودی ۲۰۲۳) و مدیریت مؤثر و بلندمدت منابع آب نیازمند یک روش محاسبه‌ای مقیاس‌پذیر مکانی برای ارزیابی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی است که مستلزم نگاهت به توزیع مکانی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی است. عامل‌های طبیعی و انسانی مؤثر بر توزیع مکانی تاب‌آوری آب زیرزمینی شامل شرایط زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی است (سان و همکاران ۲۰۲۲؛ هوند و همکاران ۲۰۱۸؛ فو و همکاران ۲۰۱۹؛ ونگ و همکاران ۲۰۲۵). عامل‌های انسانی ناشی از رفتار انسانی است که باعث افت سطح آب زیرزمینی و آلودگی آب زیرزمینی می‌شود (خطری و تایگی ۲۰۱۵؛ نارانی و همکاران ۲۰۱۸؛ گورلیک و ژینگ ۲۰۱۵). روش‌هایی که به‌طور گسترده برای بررسی توزیع مکانی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند شامل روش همپوشانی و شاخص (گوگو و داسارگوئس ۲۰۰۰؛ شریستا و همکاران ۲۰۱۷؛ وو و همکاران ۲۰۲۱)، منطق فازی (تئودوریدو و همکاران ۲۰۱۷؛ هیل ۲۰۲۲)، نسبت فراوانی و دمپستر - شفر (صفری و همکاران ۲۰۲۳؛ ونگ و همکاران ۲۰۲۳؛ ونگ و همکاران ۲۰۲۵) است. پژوهشگران با به‌کارگیری مدل نسبت فراوانی به‌دنبال روشی ساده و سریع هستند تا با تعیین روابط و همبستگی میان شاخص‌های تاب‌آوری و لایه‌های مکانی مؤثر بر وضعیت آبخوان، توزیع مکانی تاب‌آوری آب زیرزمینی را پیش‌بینی کنند. اما در این رویکرد قادر به هوشمندسازی اطلاعات ناهمگن، مدیریت نبودن قطعیت، (مائو و تاد ۲۰۱۳؛ مجید و همکاران ۲۰۲۳) یا تفاوت میان خطاهای ساختاری و تصادفی نیستند. در مدل‌سازی مکانی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی با رویکرد وزن شواهد ( $WoE$ )، از احتمال پیشین برای بیان شیوع کلی تاب‌آوری در مناطق محدوده پژوهشی و از احتمال پسین برای برآورد



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز مرودشت - خرامه.

Figure 1- Geographical location of Marvdasht- Kherameh Watershed in Fars Province.

#### روش پژوهش

شاخص‌ها بیان‌کننده رابطه انسان با محیط پیرامونش هستند. زیرا با آنها می‌توان بسیاری از پیچیدگی‌های دنیای واقعی را به داده‌های معنی‌دار و قابل مدیریت تبدیل کرد (گائو و همکاران ۲۰۲۴). کاربرد اصلی شاخص‌ها برای کمی‌سازی، ساده‌سازی، بررسی رابطه‌ها، مقایسه و ترتیب‌دادن عامل‌ها و بررسی جنبه‌های مختلف آنها است. مهم‌ترین کاربرد آن‌ها توصیف و شرح وضعیت منبع است. پیش‌منظم شاخص‌ها، نشان‌دهنده سری زمانی است که به‌شیوه‌ای می‌تواند بیانگر عملکرد سامانه یا پاسخ آن به مدیریت باشد (کارنی، ۲۰۰۷)؛ از این رو، شاخص‌ها برای پیش‌بینی نیز مناسب هستند. شاخص‌های تاب‌آوری آب زیرزمینی پشتیبان مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی است و با تجزیه و تحلیل روند

اقلیم دشت مطالعه‌شده با روش دومارتن نیمه معتدل خشک در محدوده خرامه و نیمه خشک سرد در شمال دشت است. میانگین تبخیر سالانه در دوره ۵۰ ساله (۱۳۵۰-۱۴۰۰) در دشت ۲۷۵۲ میلی‌متر و ۱۹۵۴ میلی‌متر در بلندی‌ها است و میانگین بارش‌های جوی از نوع باران ۳۰۱ میلی‌متر است. دشت مرودشت با ۱۴۸ هزار هکتار زمین‌های زارعی آبی، ۲۲ هزار هکتار زمین‌های دیم، قطب کشاورزی استان فارس است. اما به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی چالش‌های مختلفی مانند افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست و شکاف‌های پرشماری رخ داده است که خطر فرونشست در نواحی باستانی تخت‌جمشید و نقش‌رستم نیز نمایان است. از این رو، این منطقه به‌عنوان محدوده پژوهشی در این پژوهش انتخاب شد.

تغییرات سطح آب زیرزمینی، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از چاه‌های مراکز صنعتی، فاصله از چاه‌های کشاورزی، تراکم آبراهه، سنگ‌شناسی، ضخامت آبخوان، میانگین افت تراز آب زیرزمینی، تراکم کرنل چاه‌ها) در تعیین آب‌های زیرزمینی انتخاب شد (شکل ۲).

از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، داده‌های سطح آب زیرزمینی در یک دوره زمانی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۴، که لایه‌های استفاده‌شده آن در شکل ۳ نشان داده‌شده است، استفاده شد.

در این پژوهش با توجه به آمار سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای موجود در سطح دشت، شاخص معرفی شده برای کل چاه‌های دشت محاسبه شد. سپس، با عامل‌های موثر طبیعی و انسانی بر تاب‌آوری در مدل‌سازی با روش‌های آماری وزن‌دهی خواهد، بررسی شد. عامل‌های محیطی مؤثر بر تاب‌آوری آب زیرزمینی شامل: شیب زمین، جهت شیب، انحنای سطح، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، تراکم گسل، تراکم آبراهه، سنگ‌شناسی، کاربری زمین، فاصله از جاده، فاصله از چاه، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، فاصله از معادن، تغییرات سطح ایستابی و ضخامت آبخوان بر پایه پژوهش‌های پیشین (الرزوق و همکاران ۲۰۱۹؛ آندو عالم و دیمیک ۲۰۱۹؛ ادريس نيا و همکاران ۲۰۱۷) همگی در محیط نرم‌افزار ArcGis8.2 تهیه شدند.

مدل رقومی ارتفاع منطقه از پایگاه<sup>۴</sup> (USGS) با وضوح ۳۰ متری تهیه شد. دیگر داده‌ها نیز از لایه زمین‌شناسی تهیه شد و داده‌های مربوط به زمین‌آب‌شناسی از سازمان آب منطقه‌ای فارس جمع‌آوری شد (شکل ۳).

فرآیندهای طبیعی و انسانی بر منابع آب در مکان و زمان می‌تواند داده‌های مدیریتی ارائه داد.

شاخص استفاده‌شده در این پژوهش برای تاب‌آوری آب زیرزمینی در جدول ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش یک روش تک عاملی برای بررسی تاب‌آوری آب زیرزمینی دشت آبخیز دشت مرودشت، استفاده شد. شاخص تاب‌آوری سامانه در بحران (CRS) بیانگر سرعت بازگشت یک سامانه از وضعیت نامطلوب به حالت قابل قبول است (سوییا و همکاران ۲۰۲۱؛ هاشیموتو و همکاران ۱۹۸۲).

### شاخص تاب‌آوری سامانه در بحران (Calamity Resilience System)

این شاخص معیاری است که توانایی سامانه (آبخوان) را برای بازگشت سریع به وضعیت قابل قبول<sup>۲</sup> (S) پس از ورود به وضعیت نامطلوب یا بحرانی<sup>۳</sup> (U)، اندازه‌گیری می‌کند. در این پژوهش برای ارزیابی شاخص تاب‌آوری آب زیرزمینی در منطقه مطالعه‌شده از معیارهای سنتی استفاده شد (نایر و ایندو ۲۰۲۱). در ابتدا یک سری زمانی پژوهش شد و برای هر چاه مشاهده‌ای میانگین چندساله سطح آب زیرزمینی تعیین شد. منظور از وضعیت قابل قبول افزایش سطح آب زیرزمینی از میانگین سالانه است و از وضعیت نامطلوب منظور سطح آب زیرزمینی کمتر از میانگین سالانه است.

در این پژوهش این شاخص با استفاده از رابطه ارائه‌شده در جدول ۱، محاسبه شد. اندازه‌های این شاخص از صفر تا ۱ متغیر است و هر چه بزرگ‌تر باشد بیانگر تاب‌آوری بیشتر آب زیرزمینی در منطقه است.

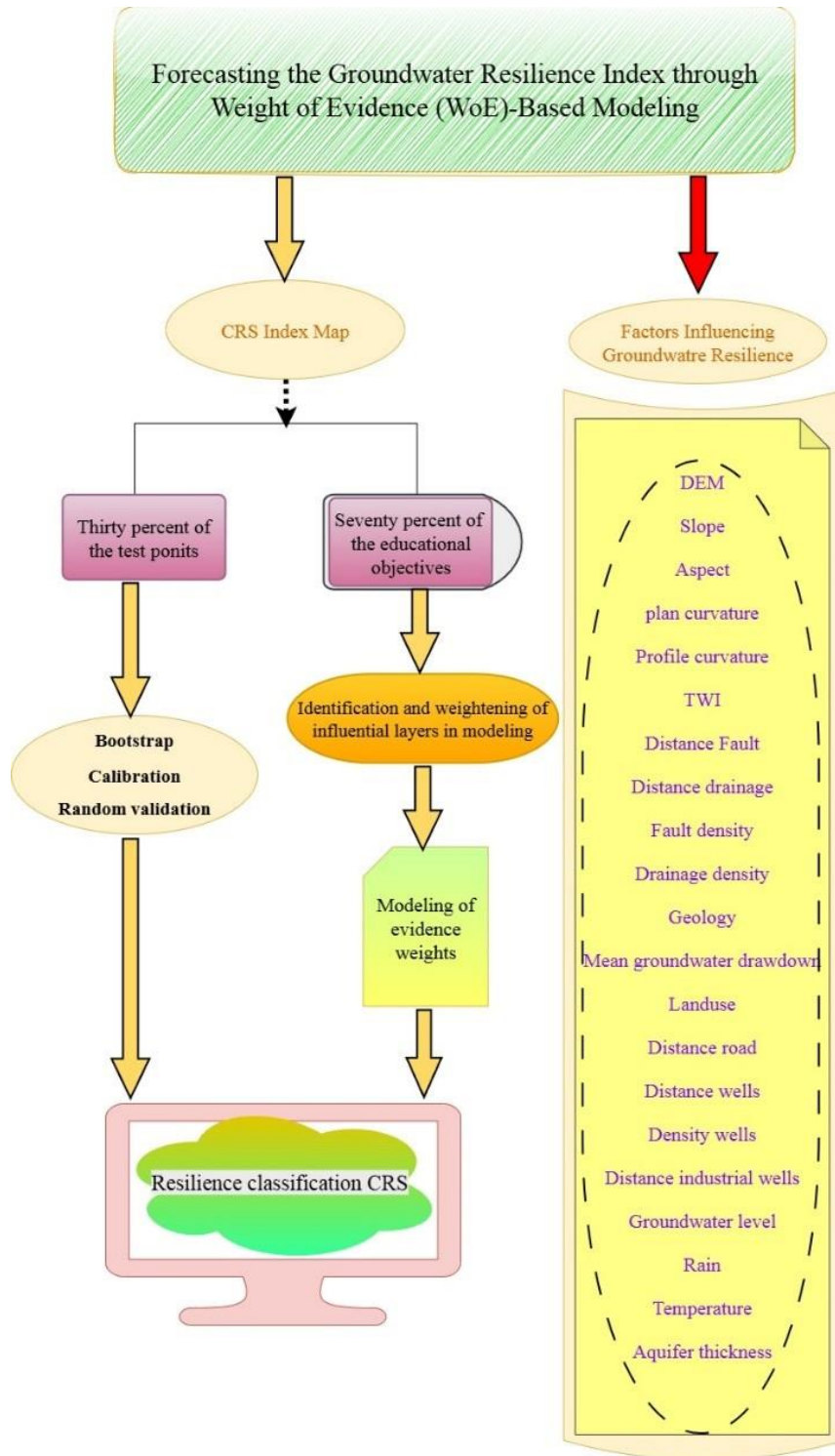
### داده‌های لازم

بیست و یک عامل محیطی مؤثر به‌طور مستقیم و غیرمستقیم برای ۶۲ چاه مشاهده‌ای در منطقه پژوهشی (مدل رقومی ارتفاع، لایه شیب، جهت شیب، کاربری زمین تهیه‌شده از سامانه ابری گوگل ارث انجین، انحنای نیم‌رخ، انحنای عرضی، تراکم کرنل چاه‌های بهره‌برداری،

4- United States Geological Survey

2- Satisfactory state

3- Unsatisfactory state



شکل ۲- روندنمای اجرای پژوهش.

Figure 2-Flowchart of the Research Methodology.

رخداد یک پدیده دودویی و عامل‌های مؤثر بر آن است. این مدل اولین بار در اکتشافات معدنی توسعه یافت. سپس، در عرصه‌های علوم زمین از جمله زمین‌لغزش،

مدل وزندهی شواهد در این گام، مدل وزندهی شواهد (WoE) بررسی شد. این مدل یک روش آماری بی‌زین برای تحلیل رابطه میان

$Np, i$ : تعداد چاه‌های کم‌تاب‌آور ( $D=1$ ) در طبقه  $i$ ،  
 $Np/Np$ : تعداد کل چاه‌های کم‌تاب‌آور،  $Ni/Ni$ : تعداد کل  
چاه‌ها در طبقه  $i$ ،  $N/N$ : تعداد کل چاه‌های مشاهده‌ای  
است. نتیجه تفسیر این رابطه چنین است:

اگر:  $WoE_i > 0$  طبقه  $i$  با کم‌تاب‌آوری هم‌بستگی مثبت  
داشته باشد، نشان‌دهندهٔ عامل‌های محیطی یا  
آب‌زمین‌شناختی خطرناک است.

اگر:  $WoE_i < 0$  طبقه  $i$  با کم‌تاب‌آوری هم‌بستگی منفی  
داشته باشد نشان‌دهندهٔ شرایط مساعد برای تاب‌آوری  
است.

اگر:  $WoE_i = 0$  طبقه  $i$ ، هیچ داده‌ای از  
تاب‌آوری ارائه نمی‌دهد.

در این مدل‌سازی، هر عامل محیطی (مانند شیب،  
تغییرات تراز آب و کاربری زمین) به‌طور خودکار به  
بازه‌های بهینه تقسیم شد و برای هر بازه، نرخ رویداد و  
وزن  $WoE$  محاسبه شد. با این شیوه هم می‌توان تأثیر  
نسبی هر عامل را کمی‌سازی کرد و هم می‌توان نقاط  
قوت و ضعف ذاتی سرزمین را در برابر تنش‌های آبی  
شناسایی کرد و روابط علت و معلولی میان ویژگی‌ها و  
کاهش تاب‌آوری را تحلیل کرد و در پایان راهبردهای  
مدیریتی را در مناطق پرخطر اولویت‌بندی کرد.  
همچنین، برای اطمینان از قابلیت مدل، از اعتبارسنجی  
جامع شامل اعتبارسنجی متقاطع طبقه‌بندی‌شده،  
بوت‌استرپ و تحلیل منحنی واسنجی استفاده شد. در  
نتیجه، مدل  $WoE$  در این پژوهش، نه به‌عنوان یک ابزار  
پیش‌بینی تاب‌آوری، بلکه به‌عنوان یک روش تحلیلی  
برای کمی‌سازی عامل‌های مؤثر بر کاهش تاب‌آوری به‌کار  
گرفته شد.

#### شیوه تولید نقشه نهایی

در این پژوهش، مدل‌سازی کم‌تاب‌آوری ذاتی آبخوان  
مروذشت با استفاده از روش وزن‌دهی شواهد انجام شد.  
با رویکرد به‌کار گرفته شده که یک چارچوب آماری  
بیزین است می‌توان رابطه میان رخداد یک پدیده  
دودویی و عامل‌های محیطی مؤثر بر آن را کمی‌سازی  
کرد. در این روش استاندارد تعریف دقیق و عینی رویداد،  
اولین و مهم‌ترین پیش‌نیاز روش  $WoE$  است. در این  
پژوهش، رویداد هدف کم‌تاب‌آور تعریف شده است، نه

سیلاب، فرونشست زمین و ارزیابی ظرفیت آب‌های  
زیرزمینی به‌کار برده شد. در این پژوهش، این رویکرد  
برای ارزیابی ظرفیت ذاتی تاب‌آوری آبخوان‌ها به‌کار  
گرفته شد، به‌گونه‌ای که عامل‌های محیطی و  
آب‌زمین‌شناسی مؤثر بر تاب‌آوری شناسایی شدند و اثر  
نسبی هر یک از آن‌ها کمی‌سازی شد. در این پژوهش،  
در رویکرد  $WoE$ ، رویداد هدف ( $D$ ) به‌شکل دودویی و  
بر اساس یک شاخص کمی قابل اندازه‌گیری بود و  
شاخص تاب‌آوری سامانه در بحران ( $CRS$ ) برای هر چاه  
مشاهده‌ای محاسبه شد. سپس، چاه‌هایی که اندازهٔ  
 $CRS$  آن‌ها کمتر از آستانه علمی  $0/3$  بود (یعنی ناتوانی  
سامانه در بازیابی پایدار پس از تنش) به‌عنوان نماینده  
کم‌تاب‌آوری در نظر گرفته شدند. این آستانه بر اساس  
روش (هاشیموتو و همکاران ۱۹۸۲) و کاربرد آن در  
پژوهش‌های مختلف انتخاب شد و به‌عنوان رویداد مثبت  
( $D=1$ ) در مدل  $WoE$  تعریف شد، به‌طوری که برای  
چاه با  $D=1$  و  $CRS < 0/3$ ، وضعیت سامانه ناپایدار و  
خطرناک است و برای چاه با  $D=0$  و  $CRS \geq 0/3$   
وضعیت تاب‌آوری متوسط است.

بر اساس این تعریف، وزن شواهد برای هر طبقه  $i$  از یک  
ویژگی (مانند یک بازه شیب یا یک واحد زمین‌شناسی)  
یعنی آن عامل تا چه اندازه احتمال رخداد پدیده را  
افزایش یا کاهش می‌دهد، به‌بیان دیگر، با وزن شواهد  
می‌توان تأثیر مثبت و منفی هر عامل را تشخیص داد  
(ریاض و همکاران ۲۰۲۴). در این پژوهش وزن شواهد  
با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$WoE_i = \ln(P(D | Bi)P(D | \bar{Bi})) \quad (1)$$

$(P(D | Bi))$ : احتمال رخداد کم‌تاب‌آوری در طبقه  $i$ ،  
 $Bi$ : تعلق یک پیکسل (یا چاه) به طبقه  $i$  از یک عامل  
شواهد،  $\bar{Bi}$ : تعلق نداشتن به طبقه  $i$ .

در محاسبات، احتمالات با استفاده از برآوردهای فراوانی  
و با اجرای هموارسازی لاپلاس و با استفاده از رابطه ۲  
به‌طور تقریبی محاسبه شد.

$$P(D | Bi) \approx \frac{N_{p,i}+0.5}{N_p+1}, P(D | \bar{Bi}) \approx \frac{(N_i-N_{p,i})+0.5}{(N-N_p)+1} \quad (2)$$

سپس، نتیجه نهایی به‌شکل رابطه ۳ ارائه شد.

$$WoE_i = \ln \left( \frac{\left( \frac{N_{p,i}+0.5}{N_p+1} \right)}{\left( \frac{N_i-N_{p,i}+0.5}{(N-N_p)+1} \right)} \right) \quad (3)$$

ویژگی‌ها بر اساس معیار اطلاعات متقابل<sup>۸</sup> نهایی شد. سپس، با مدل نهایی و با استفاده از جمع وزن‌های WoE در تمام لایه‌های انتخاب‌شده، یک نقشه پیوسته از احتمال کم‌تاب‌آوری ذاتی آبخوان تولید شد. این نقشه به‌شکل بهنجار شده در بازه (صفر و ۱) و به‌شکل طبقه‌بندی‌شده با پنج طبقه بسیار کم تا بسیار زیاد ارائه شد. این طبقه‌بندی صرفاً برای آسان‌سازی تفسیر چشمی نتایج و سازگاری با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی طراحی شد و هیچ‌گونه نقشی در تعریف متغیر وابسته یا فرآیند آموزش مدل ندارد. در مجموع، این پژوهش با تعریف دقیق و مفهومی رویداد (کم‌تاب‌آوری)، به‌کارگیری آستانه علمی مبتنی بر ادبیات تخصصی ( $CRS < 0.3$ )، پیاده‌سازی چارچوب اعتبارسنجی جامع، شفافیت کامل در انتخاب ویژگی‌ها و مستندسازی دقیق کدنویسی، تمام ابهامات روش‌شناختی رایج در پژوهش‌های مشابه را برطرف ساخت. در نتیجه، نقشه تولیدشده از نظر آماری معتبر، و از دیدگاه آب‌زمین‌شناختی و مدیریتی نیز قابل دفاع و کاربردی است و از آن می‌توان به‌عنوان ابزار مهمی در برنامه‌ریزی‌های پایدار مدیریت آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهره برد.

در ارزیابی نهایی مدل برای صحت اعتبار علمی آن و پرهیز از خطاهای بیش‌برازش<sup>۹</sup> یک چارچوب جامع اعتبارسنجی سه مرحله‌ای عبارت بود از: ۱- اعتبارسنجی متقاطع طبقه‌بندی‌شده با گزارش دقیق معیار AUC. ۲- اعتبارسنجی بوت‌استرپ با محاسبه فاصله اطمینان ۹۵٪ برای AUC. ۳- تحلیل واسنجی مدل با استفاده از منحنی واسنجی و نمره بریر<sup>۱۰</sup>. در تحلیل واسنجی مدل به‌منظور سنجش قابلیت اطمینان احتمال‌های پیش‌بینی‌شده، قابلیت تعمیم و پایداری آماری مدل نیز به‌طور هم‌زمان ارزیابی شد.

تفسیر و تشریح این رویکرد چندبعدی، مبتنی بر چند سطح مکمل از اعتبارسنجی بود.

تاب‌آور. زیرا، به‌دلیل رخداد فرونشست در دشت مطالعه‌شده، کم‌تاب‌آوری رخ داده است. از این‌رو، ابتدا شاخص تاب‌آوری سامانه در بحران (CRS) برای هر چاه مشاهده‌ای با در نظر گرفتن سری زمانی تراز آب، محاسبه شد. سپس، چاه‌هایی که اندازه CRS آن‌ها کمتر از آستانه علمی ۰/۳ بود، به‌عنوان نماینده نبودن توانایی در سامانه برای بازیابی پایدار پس از تنش شناسایی شد و به‌عنوان رویداد مثبت ( $D = 1$ ) در مدل تعریف شدند. این آستانه بر اساس چارچوب طبقه یک انتخاب شد (هاشیموتو و همکاران ۱۹۸۲) و از نظر آب‌زمین‌شناختی و مدیریتی کاملاً استاندارد بود. این تعریف، برای همسوسازی مدل با هدف اصلی یعنی شناسایی مناطق بحرانی بود. هر یک از لایه‌های مؤثر (مانند: شیب، زمین‌شناسی، تغییرات تراز آب و کاربری زمین) با استفاده از الگوریتمی در کتابخانه<sup>۵</sup> سایکت لرن<sup>۶</sup>، به بازه‌های معنادار تقسیم شدند. در شرایطی که تعداد اندازه‌های منحصربه‌فرد یک لایه کمتر از پنج بود، تعداد طبقه‌ها به‌همان اندازه محدود شد. در لایه‌های پیوسته، تقسیم‌بندی بر اساس راهبرد چارک انجام شد، به‌طوری که هر طبقه تقریباً شامل تعداد یکسانی از نقاط نمونه‌برداری (چاه‌ها) بود. در این رویکرد، ضمن کاهش اثر داده‌های پرت، بیشترین تفاوت آماری (نرخ رویداد) میان طبقه‌ها مشخص شد. سپس، برای هر طبقه، وزن WoE با استفاده از رابطه ۳ و با اعمال هموارسازی لاپلاس (برای پایداری آماری در طبقه‌های کم‌شمار) محاسبه شد. پیش از مدل‌سازی، ویژگی‌های بهینه با رویکردی چندمرحله‌ای انتخاب شدند. در نخستین گام، ویژگی‌هایی که پراکنش آن‌ها کمتر از آستانه تعیین‌شده (۰/۰۱) بود، به‌دلیل تغییرناپذیری معنادار، حذف شدند. در گام دوم، از میان جفت ویژگی‌هایی که همبستگی مطلق میان آن‌ها از ۰/۸ بیشتر بود، یکی از اعضای هر جفت بر اساس معیارهای آماری و اهمیت مفهومی، حذف شد. در گام سوم، ویژگی‌های با ضریب تأثیر<sup>۷</sup> هم‌خطی بیش از ۱۰، به‌عنوان عامل‌های با هم‌خطی زیاد، از مجموعه ورودی خارج شدند. در پایان، انتخاب

8- Mutual Information  
9- Overfitting  
10- Brier Score

5- KBinsDiscretizer  
6- Scikit-learn  
7- Variance Inflation Factor

## نتایج و بحث

با استفاده از روش‌های حذف هم‌خطی زیاد، کاهش پراکنش و اطلاعات متقابل تعداد لایه‌های ورودی در مدل‌سازی به ۱۰ عامل کاهش یافت. لایه‌های ورودی و نمودار وزن لایه‌های ورودی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. سپس، مجموعه عامل‌های بهینه‌شده به‌عنوان لایه‌های شاهد در مدل نظریه وزن شواهد ایجاد شدند که در جدول ۲ و شکل ۴ نشان داده شده است.

یافته‌ها برای پیش‌بینی مکانی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی در آبخیز دشت مرودشت ترکیب شدند. سرانجام، نقشه طبقه‌بندی تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی تولید شد. با شاخص استفاده‌شده در این پژوهش به عنوان معیارهای کمی می‌توان تغییرات بلندمدت در تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی را بررسی و مدل‌سازی کرد. تمام ویژگی‌های آماری این مدل در نمودارها و نقشه‌های وزنی مختلف قابل مشاهده است. نمودارها هم برای ۲۱ لایه وزنی و هم بعد از اعمال روش‌های حذف هم‌خطی، تهیه شدند. از دیدگاه مفهوم نظریه (جدول ۱) اندازه شاخص CRS میان صفر تا ۱ متغیر است و کمینه، بیشینه و میانگین آن در منطقه به ترتیب صفر، ۰/۱۶۹۵ و ۰/۰۴۵۹ بود. این اندازه‌ها در ۶۲ چاه مشاهده‌ای متغیر بود. فقط ۱۴/۵۲٪ از چاه‌های منطقه در طبقه کم‌تاب‌آوری و ۵۳ چاه در طبقه تاب‌آوری بسیار کم بودند. این وضعیت بیانگر شرایط بسیار بد منابع آب زیرزمینی دشت بود و این توزیع آماری به‌خوبی نشان داد پایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه دچار بحران است.

کاربرد مدل وزن شواهد در نقشه‌برداری تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی

با تشریح نمودارهای اهمیت نسبی وزن لایه‌های مؤثر در مدل، وزن هر لایه تعیین شد (جدول ۲ و شکل ۴).

۱- اعتبارسنجی مقاطع استراتیفاید<sup>۱۱</sup>

در این پژوهش، مدل با استفاده از اعتبارسنجی مقاطع پنج قسمتی ( $k=5$ )، ارزیابی شد. با این روش می‌توان از سوگیری در برآورد عملکرد جلوگیری کرد و این رویکرد با حفظ نسبت طبقه‌ها در هر بخش انجام شد. معیار اصلی ارزیابی، مساحت زیر منحنی<sup>۱۲</sup> ROC(AUC) بود که نشان‌دهنده توانایی مدل در تشخیص و تفکیک میان مناطق پرخطر و کم‌خطر است. افزون بر این، از نمره بریر برای سنجش واسنجی احتمالات پیش‌بینی‌شده، استفاده شد.

## ۲- اعتبارسنجی بوت‌استرپ

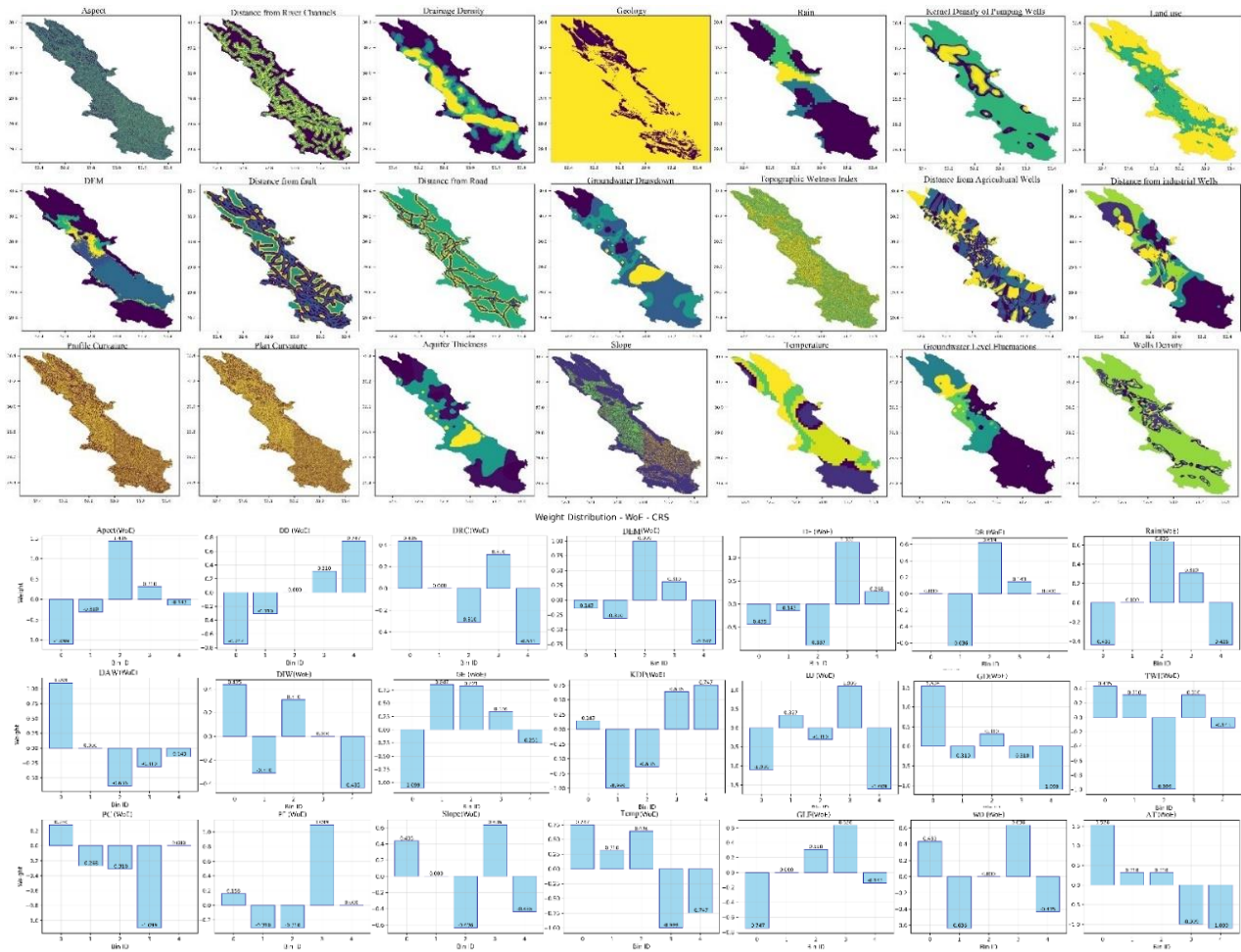
برای سنجش پایداری آماری مدل، از روش بوت‌استرپ با ۱۰۰۰ تکرار استفاده شد و در هر تکرار، یک نمونه تصادفی با جایگذاری از داده‌های آموزشی استخراج شد و مدل مجدداً آموزش و ارزیابی شد و سپس با فاصله اطمینان ۹۵٪، AUC محاسبه شد.

۳- واسنجی احتمال<sup>۱۳</sup>

این رویکرد، نشان‌دهنده تطابق میان فرکانس واقعی رویداد و احتمال پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل است. در این پژوهش، منحنی واسنجی بر اساس ۱۰ عامل احتمالی رسم شد.

## ۴- تحلیل آماری و مصورسازی جامع

با توجه به شاخص‌های عددی، نتایج با نمودارهای چندبعدی واسنجی، توزیع وزن‌های WoE، نمودار مقایسه‌ای AUC‌های تصادفی و نقشه‌های پیش‌بینی، مصورسازی شدند. افزون بر این، اهمیت لایه‌ها بر اساس دامنه و میانگین وزن WoE تعیین و امکان تفسیر زمینه‌ای و فرآیندی مدل فراهم شد. با بهره‌گیری از این شیوه جامع، می‌توان اطمینان تصمیم‌گیرندگان در استفاده از نقشه‌های حساسیت برای برنامه‌ریزی و مدیریت خطر را به‌طور چشم‌گیری افزایش داد.



شکل ۳- ۲۱ لایه محیطی مؤثر بر آب زیرزمینی و وزن لایه‌ها، بدون اعمال انتخاب ویژگی.

Figure 3- Twenty-one groundwater-influencing Environmental Factors influencing groundwater and their corresponding weights, without applying feature selection.

جدول ۱- شاخص تاب‌آوری آب زیرزمینی.

Table 1-Groundwater Resilience Index.

Index Name	Formulation	Information
Calamity Resilience System (CRS)	$CRS = \frac{P(X_t \in U \text{ and } X_t + 1 \in S)}{P(X_t \in U)}$	<p><math>X_t</math> = Groundwater level time series</p> <p><math>U</math> = Years when groundwater levels are lower than the time series average.</p> <p><math>S</math> = Years when groundwater levels are higher than the time series average.</p> <p><math>C</math> = Groundwater level</p>

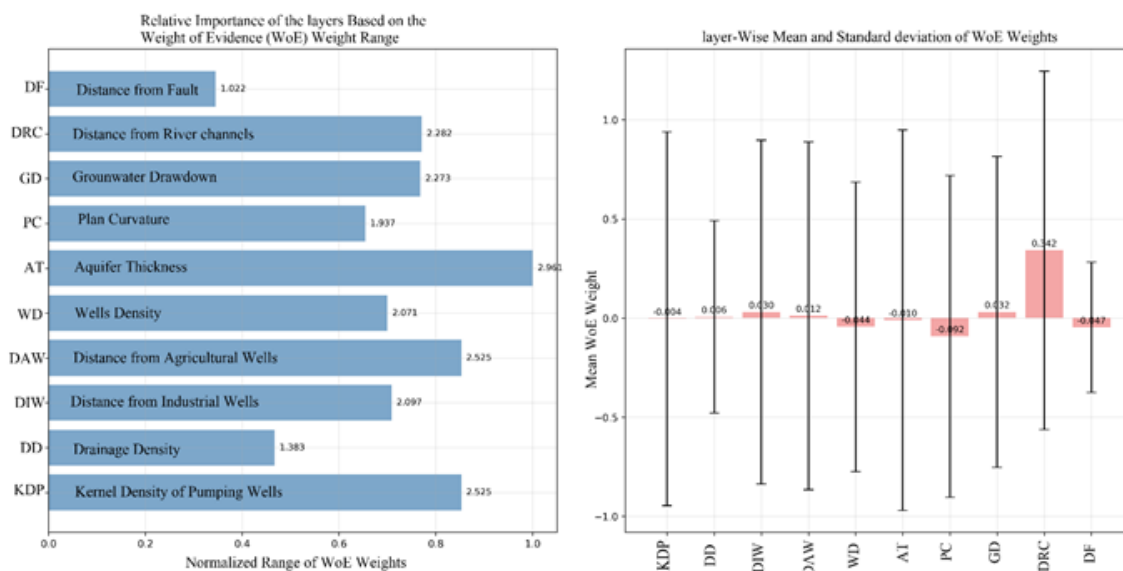
جدول ۲-تفسیر نمودار اهمیت نسبی وزن لایه‌های مؤثر در مدل‌سازی شاخص CRS.

Table 2-Interpretation of the relative importance of influential layers in CRS index modeling.

Layer name	Layer weight	Explanation
Distance from Fault	0.022	Despite low influence, statistically significant
Drainage density	1.383	Moderate impact, weaker than other variables
Plan curvature	1.937	Topography critically shapes pressure and geomorphology
Pumping well density	2.071	Human activity stresses groundwater resilience
Distance from industrial wells	2.097	Industry directly lowers groundwater levels
Mean groundwater draw down	2.273	Depletion layer drives aquifer dynamics and resilience
distance from River channels	2.282	Hydrology strongly linked to water resource resilience
Distance from agricultural wells	2.525	Agriculture directly and substantially affects resilience
Kernel density of pumping wells	2.525	Needs nonlinear models
Aquifer thickness	2.961	Dominant factor in regional resilience

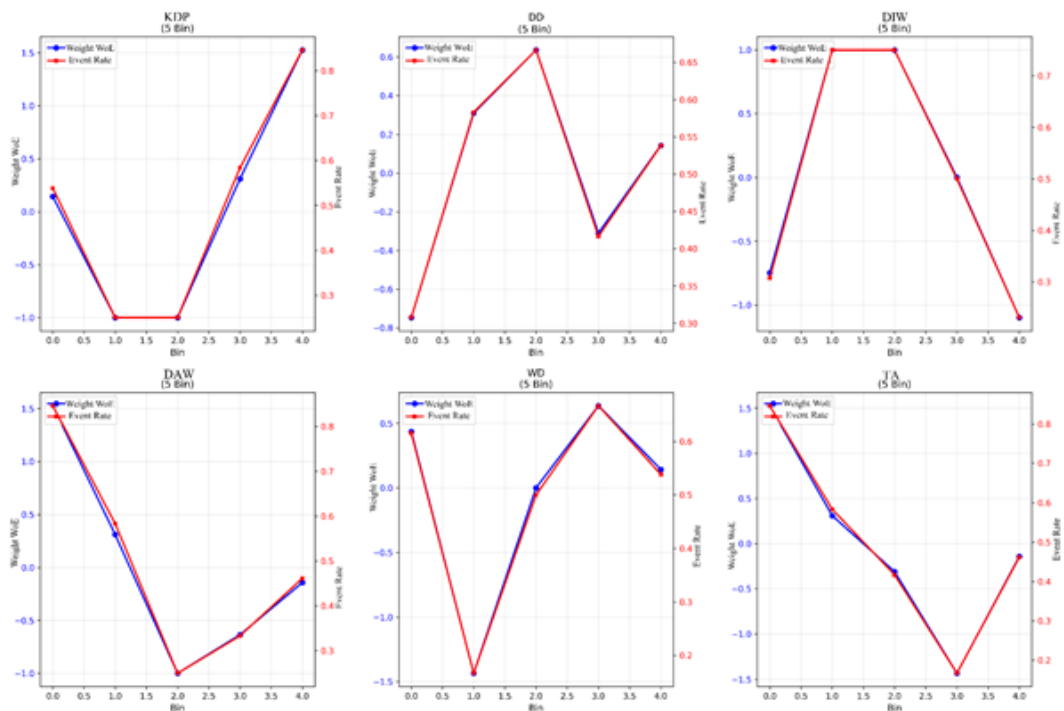
آبخوان با میانگین WoE نزدیک به صفر بود، اما وزن نهایی آن زیاد بود. به بیان دیگر در طبقه‌های خاص مثل طبقه صفر نقش WoE بسیار مثبت است و این طبقه‌ها در مناطق ح ساس ه ستند. نتایج این پژوهش با یافته‌های دیلون و همکاران (۲۰۲۰) هم‌راستا است.

با توجه به اثر خطای استاندارد و تفاوت میان وزن نهایی و میانگین WoE، نتایج کلی بیانگر آن است که مدل‌سازی شاخص بر اساس میانگین کلی نبوده و مدل‌سازی بر اساس روابط غیرخطی و طبقه محور بود (شکل ۴). این یافته با نتایج پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا است. به‌عنوان نمونه، لایه ضخامت



شکل ۴-نمودار تحلیل اهمیت نسبی لایه‌ها و خطای استاندارد.

Figure 4-Analysis chart of relative layers significance along with standard error.



شکل ۵- نمودار تحلیل روابط طبقه‌ای WoE برای لایه‌های مؤثر.

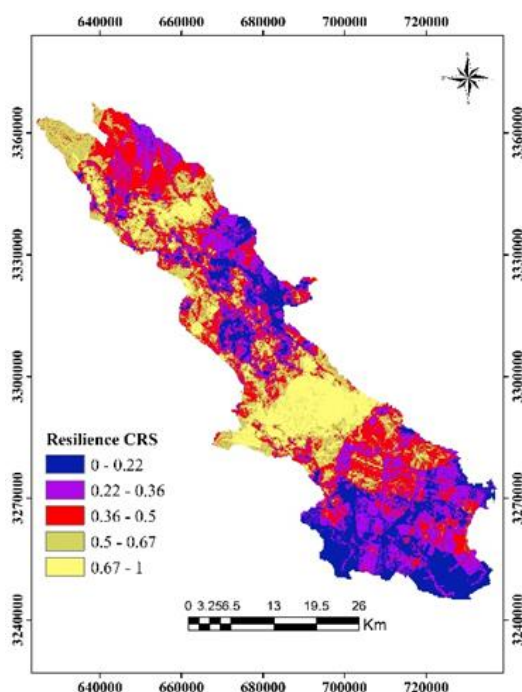
Figure 5-Analysis chart of Weight of Evidence (WoE) class relationships for the influential layers.

دارد. در لایه فاصله از چاه‌های صنعتی نتایج بیانگر آن بود که مناطق نسبتاً نزدیک به این چاه‌ها در طبقه ۱ و ۲ بودند. این یافته با WoE بسیار مثبت (+۱) و نرخ رویداد حداکثر (۰/۷) مطابقت داشت. این نتایج نشان داد فعالیت‌های صنعتی استخراجی به شدت بر کاهش تاب‌آوری آب زیرزمینی در محیط پیرامونشان تأثیرگذارند. از این رو، این مناطق باید با اعمال محدودیت استخراج، پایش پیوسته و برنامه‌ریزی بر اساس ظرفیت تاب‌آوری به شیوه مناسب مدیریت شوند. در لایه فاصله از چاه‌های کشاورزی نتایج نشان داد نزدیک‌ترین مناطق به این چاه‌ها در طبقه صفر بودند. این یافته با WoE بسیار مثبت (+۱/۵) و نرخ رویداد حداکثر (۰/۸) مطابقت داشت و بیانگر آن بود که استخراج گسترده آب برای کشاورزی در این مناطق، به شدت بر کاهش تاب‌آوری آب زیرزمینی اثرگذار بوده است. از این رو، فشار شدید برداشت آب بر سامانه آب زیرزمینی در این مناطق، سبب کاهش شدید توانایی سامانه برای تحمل، تطبیق و بازیابی شده است. در لایه تراکم، مناطق با تراکم کم تا متوسط چاه‌های بهره‌برداری در طبقه ۱ بودند. این یافته با WoE بسیار

تحلیل اثر WoE و نرخ رویداد برای هر طبقه (Bin) در ۶ لایه مؤثر در شکل ۵ ارائه شده است. در لایه تراکم کرنل چاه‌های بهره‌برداری با افزایش طبقه از مرز ۱/۵ به ۴، نرخ رویداد نیز از ۰/۶۵ به ۲ افزایش یافت. این یافته بیانگر آن است که مناطق با تراکم چاه‌های بیشتر استخراج منابع آب نیز بیشتر است و در نتیجه تاب‌آوری کمتر است. در این مناطق، احتمال رخداد کاهش تاب‌آوری از حدود ۵۰٪ در مناطق کم تراکم به ۸۰٪ در مناطق پرتراکم افزایش یافت. در لایه تراکم آبراهه، مناطق طبقه ۲ در فاصله متوسطی از آبراهه‌ها بودند، و بیشترین کاهش تاب‌آوری آب زیرزمینی مربوط به این مناطق بود. این نتایج با WoE مثبت متوسط (+۰/۶) و نرخ رویداد حداکثر (۰/۶۵) مطابقت داشت. این رفتار و الگوی غیرخطی نشان داد نزدیکی به آبراهه الزاماً معادل بهبود تاب‌آوری نیست، بلکه مناطق میانی ممکن است تحت تأثیر فشار آب‌شناختی، تجمع آب یا الگوهای کاربری، در طبقه زمین‌های پرخطر، باشند و بیشترین خطر ناشی از کاهش تاب‌آوری مربوط به مناطق نامبرده است. در این پژوهش این یافته با الگوی کاربری کشاورزی متراکم و فشرده در دشت مرودشت همخوانی

ظرفیت ذخیره‌سازی کم و حساسیت بیشتر به تغییرات سطح آب، تاب‌آوری کافی را ندارند. نتایج این پژوهش با یافته‌های دیلون و همکاران (۲۰۲۰)، گامبولاتی و تیاتیینی (۲۰۱۵) و چن و همکاران (۲۰۲۱) هم‌راستا است. از این‌رو، در این مناطق می‌بایست محدودیت‌های سخت‌گیرانه در استخراج آب و برنامه‌ریزی کاربری زمین اعمال شود، حتی اگر این فعالیت‌ها در حال حاضر در آن‌ها کم باشد. نقشه نهایی پیش‌بینی شاخص تاب‌آوری آب زیرزمینی در شکل ۶ نشان‌داده شده است.

منفی (۱/۳-) و کمترین نرخ رویداد (۰/۲) مطابقت داشت. این مناطق با بیشترین تاب‌آوری آب زیرزمینی نماینده الگوی تعادل پایدار میان استخراج و تغذیه هستند و منابع آب در این مناطق بهینه باید بر اساس تنظیم تراکم چاه‌ها مدیریت شوند. نتایج این پژوهش با یافته‌های هوند و همکاران (۲۰۱۸) لایوگنا و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا است. در لایه ضخامت آبخوان نتایج نشان داد مناطق با کمترین ضخامت آبخوان در طبقه صفر بودند. این یافته با WoE بسیار مثبت (۱/۵+) و نرخ رویداد حداکثر (۰/۸) مطابقت داشت. این یافته بیانگر آن است که آبخوان‌های با ضخامت کم به دلیل



شکل ۶- نقشه پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل.

Figure 6-Predicted map generated by the model.

کاذب<sup>۱۶</sup> (FPR) در آستانه‌های مختلف، نشان می‌دهد. افزون بر این، خط مورب (خط شیب دار با شیب ۱)، نشان‌دهنده عملکرد تصادفی است (شکل ۷). هرچه منحنی مدل (آبی) از این خط دورتر باشد، عملکرد مدل بهتر است. در این پژوهش، عملکرد مدل وزن شواهد در تشخیص تاب‌آوری آب زیرزمینی

اعتبارسنجی مدل با ۳ روش بوت استرپ، تحلیل واسنجی و اعتبارسنجی متقاطع طبقه بندی شده انجام شد.

#### منحنی ROC<sup>۱۴</sup>

این منحنی عملکرد مدل طبقه‌بندی دودویی را با رسم نرخ مثبت واقعی<sup>۱۵</sup> (TPR) در مقابل نرخ مثبت

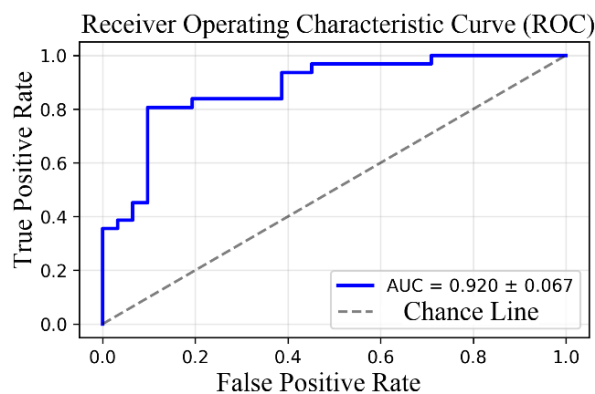
16- False Positive Rate

14- Receiver Operating Characteristic

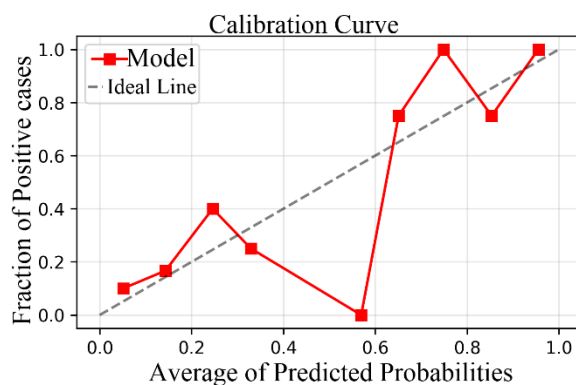
15- True Positive Rate

۰/۸ انحرافات مشاهده شد. به بیان دیگر در نقطه ۰/۶ پیش‌بینی و برآورد مدل کمتر از واقعیت بود و نقطه قرمز زیر خط ایده‌آل است (شکل ۸).

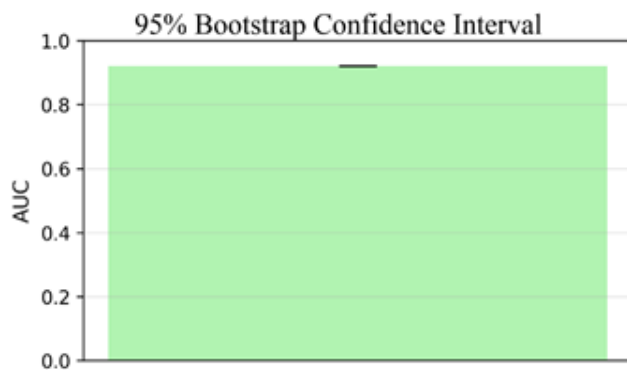
بسیار خوب ( $AUC=0.92$ ) بود. منحنی واسنجی، نشان‌دهنده تطابق میان احتمالات پیش‌بینی شده به وسیله مدل وزن شواهد و احتمالات واقعی مشاهده شده است. بر پایه این منحنی، در نقاط ۰/۲ و ۰/۶



شکل ۷- نتایج و منحنی ROC.  
Figure 7- Results and ROC curve.



شکل ۸- منحنی واسنجی مدل.  
Figure 8- Calibration curve of the model.



شکل ۹- نمودار فاصله اطمینان مدل.  
Figure 9- Confidence interval chart of the model.

این عامل‌ها در طبقات خاصی است. به بیان دیگر تاب‌آوری آب زیرزمینی نباید بر اساس میانگین کلی سنجه‌ها بررسی شود، بلکه باید بر اساس شناسایی مناطق بحرانی و با در نظر گرفتن ترکیب شرایط خاصی از عامل‌های فیزیکی و انسانی بررسی شود. نتایج اعتبارسنجی مساحت زیر منحنی نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب مدل وزن شواهد در پیش‌بینی شاخص تاب‌آوری بود ( $AUC=0/92$ ). به بیان دیگر عملکرد بسیار خوب این مدل در تشخیص مناطق پرخطر در شرایط آموزش-آزمون تصادفی بود. نتایج تحلیل وزن شواهد بر اساس طبقه‌ها نشان داد روابط غیرخطی است و به عنوان مثال در لایه فاصله از چاه‌های صنعتی اندازه‌های متوسط فاصله بیشترین وزن شواهد را کسب کردند که این موضوع بیانگر تعامل پیچیده میان استخراج آب و توسعه صنعتی است و در تراکم چاه‌های بهره‌برداری در طبقه ۱، وزن شواهد به شدت منفی بود. از این رو، می‌توان گفت تراکم متعادل در چاه‌ها نقش حفاظتی دارد. در مجموع، بر اساس نتایج این پژوهش هم یک مدل دقیق برای ارزیابی تاب‌آوری آب زیرزمینی ارائه شد و هم با روش‌های مختلف اعتبارسنجی، عملکرد آن افزایش یافت. شایان ذکر است بر اساس عملکرد بسیار خوب مدل وزن‌دهی شواهد در شناسایی مناطق کم‌تاب‌آور، باید توجه داشت به دلیل ماهیت آماری-مکانی آن، با محدودیت‌هایی در تعمیم‌پذیری پویا و واکنش به تغییرات شرایط اقلیمی یا مدیریتی جدید روبرو است. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از روش‌های یادگیری ماشین با قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده مانند جنگل تصادفی یا شیب بوستینگ همراه با WoE استفاده شود تا هم بتوان تفسیرپذیری نتایج را حفظ کرد و هم انعطاف‌پذیری آن را افزایش داد. افزون بر این پیشنهاد می‌شود از داده‌های ماهواره‌ای گریس برای درصد تغییرات پویای ذخیره کل آب در چارچوب مدل‌سازی ترکیبی فضای-زمانی استفاده شود تا بتوان واکنش سامانه آب‌های زیرزمینی به تنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را به‌روزرسانی کرد. با چنین رویکردهای ترکیبی می‌توان ضمن افزایش دقت پیش‌بینی، بستر

در نمودار فاصله اطمینان بوت‌استرپ، فاصله اطمینان ۹۵٪ برای AUC نشان‌دهنده عملکرد معنی‌دار مدل در مقایسه با یک حالت تصادفی است. این عملکرد در نمونه‌های مختلف (بوت‌استرپ) ثابت است (شکل ۹). در مجموع می‌توان نتیجه گرفت عملکرد مدل وزن شواهد با استفاده از اعتبارسنجی CRS، در تعیین تاب‌آوری آب زیرزمینی بسیار خوب بود. عملکرد این مدل هم از دیدگاه تفکیک‌پذیری (AUC) و هم از دیدگاه واسنجی (تطابق احتمالات) قابل قبول بود و می‌توان از آن به عنوان یک ابزار قدرتمند در پژوهش‌های زمین‌شناسی و منابع آب زیرزمینی بهره برد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش با استفاده از مدل وزن شواهد شاخص تاب‌آوری آب زیرزمینی در محدوده دشت مرودشت-خرامه با ۶۲ چاه مشاهده‌ای بررسی شد. در نقشه پیش‌بینی شاخص تاب‌آوری CRS اندازه‌های کمی طبقه‌بندی‌شده در منطقه پژوهشی به ۵ طبقه کمی تقسیم شد. اندازه‌های توصیفی این طبقات به ترتیب شامل تاب‌آوری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد بود (شکل ۶). تحلیل جامع وزن عامل‌های مؤثر در شاخص تاب‌آوری آب زیرزمینی (CRS) بر پایه روش Weight of Evidence (WoE) نشان داد که نقش ضخامت آبخوان با بیشترین ضریب اهمیت ( $2/961$ )، در تعریف الگوی فضایی تاب‌آوری در منطقه پژوهش‌شده مهم و تعیین‌کننده است. این یافته بیانگر آن است که آبخوان‌های با ضخامت کم به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی کمتر و حساسیت بیشتر به تغییرات سطح آب، احتمال فرونشست در آنها زیاد است و در تاب‌آوری ظرفیت بازگشت کمتری دارند. در این پژوهش، فاصله از آبراهه و تراکم چاه‌های کرنل نیز از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در مدل‌سازی شناخته شد و این موضوع بر نقش عامل‌های آب‌شناختی و انسانی در کاهش تاب‌آوری سامانه‌های آب زیرزمینی تأکید دارد. در این پژوهش نتایج مقایسه میانگین WoE لایه‌ها با وزن نهایی آنها در مدل CRS بیانگر رابطه غیرخطی و طبقه محور در مدل‌سازی تاب‌آوری بود. تراکم کرنل با بیشترین ضریب اهمیت و میانگین وزن شواهد نزدیک به صفر، بیانگر اثر

**دسترسی به داده‌ها**

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

**مشارکت نویسندگان**

نویسنده اول: روش کار، مفهوم‌سازی، تحلیل نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله  
نویسنده دوم و سوم: مفهوم‌سازی، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج

گسترش سامانه‌های پویا هشداردهنده زود هنگام را برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد.

**تضاد منافع نویسندگان**

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

**فهرست منابع**

- AbdelRahman MA. 2023. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 34(3): 767–808. <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>
- Alao JO, Bello AY, Lawal HA, Abdullahi D. 2024. Assessment of groundwater challenge and the sustainable management strategies. *Results in Earth Sciences*. 2: 100049. <https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100049>
- Alizadeh A, Keshavarz A. 2005. Status of agricultural water use in Iran. In *Water conservation, reuse, and recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop*. Washington DC, USA: National Academies Press. Vol. 4, pp. 94–105.
- Al-Ruzouq R, Shanableh A, Merabtene T, Siddique M, Khalil MA, Idris A, Almulla E. 2019. Potential groundwater zone mapping based on geo-hydrological considerations and multi-criteria spatial analysis: North UAE. *Catena*. 173: 511–524. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.037>
- Andualem TG, Demeke GG. 2019. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 24: 100610. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>
- Behboudian M, Kerachian R, Pourmoghim P. 2021. Evaluating the long-term resilience of water resources systems: Application of a generalized grade-based combination approach. *Science of the Total Environment*. 786: 147447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147447>
- Bhere S, Reddy MJ. 2022. Assessment of Reliability, Resilience, and Vulnerability (RRV) of terrestrial water storage using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) for Indian river basins. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 28: 100851. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100851>
- Carruthers G, Tinning G. 2003. Where, and how, do monitoring and sustainability indicators fit into environmental management systems? *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 43(3):307–323. <https://doi.org/10.1071/EA00177>
- Deshmukh MM, Elbeltagi A, Kouadri S. 2022. Climate change impact on groundwater resources in semi-arid regions. In *Climate Change Impact on Groundwater Resources: Human Health Risk Assessment in Arid and Semi-arid Regions*. Cham: Springer International Publishing. pp. 9–23. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-04707-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-04707-7_2)
- Dillon P, Fernández Escalante E, Megdal S. B, Massmann G. 2020. Managed aquifer recharge for water resilience. *Water*. 12(7): 1846. <https://doi.org/10.3390/w12071846>
- Edrisnia S, Pahlevanroy A, Moghadamnia A, Nazarisamani A, Miri A. 2017. Investigation of the role of structural elements on the water resource abundance in the Maharloo Karst region using RS and GIS. *Journal of Range and Watershed Management*. 70(2): 263–275. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.202612.982>
- Feng S, Kang S, Huo Z, Chen S, Mao X. 2008. Neural networks to simulate regional ground water levels affected by human activities. *Groundwater*. 46(1): 80–90. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00366.x>
- Fooladi M, Golmohammadi MH, Safavi HR, Singh VP. 2021. Application of meteorological drought for assessing watershed health using fuzzy-based reliability, resilience, and

- vulnerability. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 66: 102616. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102616>
- Fu G, Crosbie RS, Barron O, Charles SP, Dawes W, Shi X, Li C. 2019. Attributing variations of temporal and spatial groundwater recharge: A statistical analysis of climatic and non-climatic factors. *Journal of Hydrology*. 568: 816–834. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.022>
- Gambolati G. 2005. Anthropogenic land subsidence. In *Encyclopedia of Geophysics*. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa164b>
- Gillespie-Marthaler L, Nelson K, Baroud H, Abkowitz M. 2019. Selecting indicators for assessing community sustainable resilience. *Risk Analysis*. 39(11): 2479–2498. <https://doi.org/10.1111/risa.13344>
- Gogu RC, Dassargues A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*. 39(6): 549–559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- Gorelick SM, Zheng C. 2015. Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*. 51(5): 3031–3051. <https://doi.org/10.1002/2014WR016825>
- Granata F, Di Nunno F. 2025. Pathways for hydrological resilience: Strategies for adaptation in a changing climate. *Earth Systems and Environment*. pp. 1–29. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00567-x>
- Guo W, Yu L, Huang L, Wang B, Wang H. 2024. A framework for analyzing the most relevant indicators of ecohydrology in a changing environment. *Journal of Water and Climate Change*. 15(11): 5397–5417. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.122>
- Haile MM. 2022. Approaches for delineating groundwater recharge potential zone using fuzzy logic model. *Geofluids*. 2022: 3637230. <https://doi.org/10.1155/2022/3637230>
- Hoa NT, Vinh NQ. 2018. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 143(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012066>
- Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*. 18(1): 14–20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>
- Holling CS. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 4: 1–23.
- Hund SV, Allen DM, Morillas L, Johnson MS. 2018. Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase socio-hydrological resilience to seasonal drought. *Journal of Hydrology*. 563: 1119–1134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.069>
- Javadinejad S, Hannah D, Krause S, Naseri M, Dara R, Jafary F. 2020. Building socio-hydrological resilience “improving capacity for building a socio-hydrological system resilience”. *Safety in Extreme Environments*. 2(3): 205–218. <https://doi.org/10.1007/s42797-020-00024-8>
- Jones L. 2019. Resilience isn't the same for all: Comparing subjective and objective approaches to resilience measurement. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 10(1): e552. <https://doi.org/10.1002/wcc.552>
- Karni E. 2007. Foundations of Bayesian theory. *Journal of Economic Theory*. 132(1): 167–188.
- Khatri N, Tyagi S. 2015. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Frontiers in Life Science*. 8(1): 23–39. <https://doi.org/10.1080/21553769.2014.933716>
- Khoshtinat S, Aminnejad B, Hassanzadeh Y, Ahmadi H. 2019. Application of GIS-based models of weights of evidence, weighting factor, and statistical index in spatial modeling of groundwater. *Journal of Hydroinformatics*. 21(5): 745–760. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.127>
- Kumar N, Sinha J, Madramootoo CA, Goyal MK. 2020. Quantifying groundwater sensitivity and resilience over peninsular India. *Hydrological Processes*. 34(26): 5327–5339. <https://doi.org/10.1002/hyp.13945>
- La Vigna F. 2022. Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities. *Hydrogeology Journal*. 30(6): 1657–1683. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02517-1>
- Lin YC, Kuo ED, Chi WJ. 2021. Analysis of meteorological drought resilience and risk assessment of groundwater using signal analysis method. *Water Resources Management*. 35(1): 179–197. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02718-x>
- Li Y, Lence BJ. 2007. Estimating resilience for water resources systems. *Water Resources Research*. 43(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005636>
- Majid SI, Kumar M, Kumar P, Verma NK. 2023. GIS-based flood susceptibility mapping of Srinagar district, India using weights-of-evidence (WofE), frequency ratio (FR) and fuzzy gamma operator (FGO). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 51(12): 2421–2446. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01776-z>
- Mao Z, Todd M. 2013. Statistical modeling of frequency response function estimation for

- uncertainty quantification. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 38(2): 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.01.021>
- Moghadam NT, Malekmohammadi B. 2025. Assessment of drought change trends and watershed health using a reliability-resilience-vulnerability framework in mountainous watersheds. *Current Research in Environmental Sustainability*. 9: 100285. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2025.100285>
- Moghaddasi P, Kerachian R, Sharghi S. 2022. A stakeholder-based framework for improving the resilience of groundwater resources in arid regions. *Journal of Hydrology*. 609: 127737. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127737>
- Moshir Panahi D, Kalantari Z, Ghajarnia N, Seifollahi-Aghmiuni S, Destouni G. 2020. Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific Reports*. 10(1): 7450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64089-y>
- Nair AS, Indu J. 2021. Assessment of groundwater sustainability and identifying factors inducing groundwater depletion in India. *Geophysical Research Letters*. 48(3): e2020GL087255. <https://doi.org/10.1029/2020GL087255>
- Narany TS, Sefie A, Aris AZ. 2018. The long-term impacts of anthropogenic and natural processes on groundwater deterioration in a multilayered aquifer. *Science of The Total Environment*. 630: 931–942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.190>
- Newton B, Spence C. 2023. JAMES BUTTLE REVIEW: A resilience framework for physical hydrology. *Hydrological Processes*. 37(7): e14926. <https://doi.org/10.1002/hyp.14926>
- Noori R, Maghrebi M, Jessen S, Bateni SM, Heggy E, Javadi S, AghaKouchak A. 2023. Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*. 14(1): 6674. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2>
- Peterson GD. 2002. Estimating resilience across landscapes. *Conservation Ecology*. 6(1): 17. <https://doi.org/10.5751/ES-00375-060117>
- Qi M, Feng ML, Sun T, Yang W. 2016. Resilience changes in watershed systems: A new perspective to quantify long-term hydrological shifts under perturbations. *Journal of Hydrology*. 539: 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.039>
- Rhode MM. 2023. Doctoral dissertation, State University of New York College of Environmental Science and Forestry. 531 pp. <https://experts.esf.edu/esploro/outputs/doctoral/Groundwater-for-Ecosystems-Reliance-Resilience-and/99945582504826>
- Riaz MT, Riaz MT, Rehman A, Bindajam AA, Mallick J, Abdo HG. 2024. An integrated approach of support vector machine (SVM) and weight of evidence (WOE) techniques to map groundwater potential and assess water quality. *Scientific Reports*. 14: 22345. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76607-3>
- Richey AS, Thomas BF, Lo MH, Famiglietti JS, Swenson S, Rodell M. 2015. Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. *Water Resources Research*. 51(7): 5198–5216. <https://doi.org/10.1002/2015WR017351>
- Roos T, Myllymaki P, Tirri H. 2002. A statistical modeling approach to location estimation. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 1(1): 59–69. <https://doi.org/10.1109/TMC.2002.1011059>
- Safari M, Doulati Ardejani F, Maghsoudy S. 2023. A comparative and coupled study of the application of Dempster-Shafer, fuzzy overlay and FAHP methods for groundwater potential mapping in a fractured medium of a mine site. *Earth Science Informatics*. 16(2): 1741–1764. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01006-7>
- Saito L, Christian B, Diffley J, Richter H, Rohde MM, Morrison SA. 2021. Managing groundwater to ensure ecosystem function. *Groundwater*. 59(3): 322–333. <https://doi.org/10.1111/gwat.13089>
- Scanlon BR, Fakhreddine S, Rateb A, de Graaf I, Famiglietti J, Gleeson T, Zheng C. 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth and Environment*. 4(2): 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>
- Sharifi A, Yamagata Y. 2018. Resilience-oriented urban planning. In *Resilience-oriented urban planning: theoretical and empirical insights*, Cham: Springer International Publishing. pp. 3–27. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75798-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75798-8_1)
- Shivakoti BR, Villholth KG, Pavelic P, Ross A. 2019. Strategic use of groundwater-based solutions for drought risk reduction and climate resilience in Asia and beyond. Contributing paper to Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2019). Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Shrestha S, Kafle R, Pandey VP. 2017. Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu Valley, Nepal. *Science of The Total Environment*. 575: 779–790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.141>

- Singha K, Navarre-Sitchler A. 2022. The importance of groundwater in critical zone science. *Groundwater*. 60(1): 27–34.
- Soltani E, Soltani A, Alimaghani M, Dehghani AA. 2023. Water conservation in cropping systems through the reduction of soil evaporation: a case study of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 16(3): 198. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11296-2>
- Sun D, Gu J, Chen J, Xia X, Chen Z. 2022. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of urban water supply system resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Natural Hazards*. 114(1): 101–126. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05381-0>
- Sweya LN, Wilkinson S, Kassenga G, Lugomela G. 2021. Development of a tool for measuring resilience of water supply systems in Tanzania: Technical dimension. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 147(2): 04020107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001317](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001317)
- Theodoridou PG, Varouchakis EA, Karatzas GP. 2017. Spatial analysis of groundwater levels using fuzzy logic and geostatistical tools. *Journal of Hydrology*, 555: 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.027>
- Tzampoglou P, Iliia I, Karalis K, Tsangaratos P, Zhao X, Chen W. 2023. Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal. *Water*. 15(6): 1094. <https://doi.org/10.3390/w15061094>
- Vaezi A, Jones S, Asgary A. 2023. Integrating resilience into risk matrices: A practical approach to risk assessment with empirical analysis. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*. 13(4): 252-272. <https://doi.org/10.54560/jracr.v13i4.411>
- Vu TD, Ni CF, Li WC, Truong MH, Hsu SM. 2021. Predictions of groundwater vulnerability and sustainability by an integrated index-overlay method and physical-based numerical model. *Journal of Hydrology*. 596: 126082. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126082>
- Wang H, Herrmann M, Schroeter SA, Zerfaß C, Lehmann R, Lehmann K, Küsel K. 2025. Groundwater microbiomes balance resilience and vulnerability to hydroclimatic extremes. *Communications Earth and Environment*. 6(1): 683. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02680-9>
- Wei D, Deng X, Zhang X, Deng Y, Mahadevan S. 2013. Identifying influential nodes in weighted networks based on evidence theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 392(10): 2564–2575. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.01.054>
- Zeng P, Sun F, Liu Y, Che Y. 2020. Future river basin health assessment through reliability-resilience-vulnerability: Thresholds of multiple dryness conditions. *Science of The Total Environment*. 741: 140395. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140395>
- Zhang Q, Ning Z, Ding X, Wu J, Wang Z, Tsangaratos P, Liu J, Chen W. 2024. Hybrid integration of bagging and decision tree algorithms for landslide susceptibility mapping. *Water*. 16(5): 657. <https://doi.org/10.3390/w16050657>
- Zoghi M, Amiri MJ. 2025. Detecting the resilience, resistance, and elasticity concepts in the anthropocene epoch in complex urban ecosystems (Hyrcanian forests in Gorgan City-Iran). *Tropical Ecology*. pp. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42965-025-00375-y>



## Forecasting the Resilience of the Marvdasht Plain Watershed Using a Combined WoE-Based Framework

Saeed Alizadeh<sup>1</sup>, Reza Ghazavi<sup>2\*</sup>, Ebrahim Omidvar<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate in Watershed Sciences and Engineering, Department of Nature Engineering, University of Kashan

2- Professor in Watershed Sciences and Engineering, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan

3- Associate Professor in Watershed Sciences and Engineering, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

In the coming century, with the intensification of droughts and increasing human activities on groundwater resources, assessing the resilience of aquifer system as an important indicator of water resource sustainability is of particular importance. Therefore, to measure the ability of an aquifer to return to its desired state after hydrological pressures, a quantitative index (CRS) was used as a criterion. The Marvdasht Plain, with 148,000 ha of irrigated farmland and 22,000 hectares of rainfed farmland, is the agricultural hub of Fars Province. However, due to excessive extraction of groundwater resources, various challenges have occurred, such as falling groundwater levels, subsidence, and numerous cracks, and the risk of subsidence is also evident in the ancient areas of Persepolis and Naqsh-e Rostam. Therefore, this study was conducted with a comprehensive approach combining the Weight of Evidence (WoE) model, advanced feature selection techniques, and validation methods, with the aim of predicting groundwater resilience in the Marvdasht plain watershed, and a practical and reliable map of the spatial distribution of groundwater resilience in this plain was produced for management decisions.

#### Materials and Methods

In this study, 21 environmental, hydrogeological, and climatic variables were initially identified as factors determining groundwater status and prepared in the form of raster layers. Then, using a multi-step approach, features based on dispersion, correlation, collinearity, and mutual information were selected. In this study, 10 of the most effective factors (including kernel density of exploitation wells, stream density, distance from agricultural wells, distance from fault, surface curvature, distance from industrial wells, average drop, aquifer thickness, distance from main stream, production well density) were selected for final modeling.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** ghazavi@kashanu.ac.ir

**Citation:** Alizadeh, S., Ghazavi, R., Omidvar, E. 2026. Forecasting the Resilience of the Marvdasht Plain Watershed Using a Combined WoE-Based Framework Watershed Management Research. 39(2): 116-137.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2025.371489.1647

**Received:** 22 November 2025, **Received in revised form:** 11 December 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 116-137.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



The relationships between the CRS index and these factors were determined using the evidence synthesis method and calculating WoE weights. By summing the WoE weights, the final resilience map was generated and then classified into five classes based on the quantile classification method. Model validation was performed using three methods: random cross-validation, the bootstrap method (1,000 replicates), and calibration analysis.

### **Results and Discussion**

The model validation findings showed that the model's performance in predicting the groundwater resilience index (CRS) was very good (AUC = 0.920) and its statistical stability was reliable. In the studied watershed, groundwater resilience was identified with different classes and appropriate accuracy. The final map, was classified into five classes based on the quantile classification method: very low (0 - 0.223), low (0.223 - 0.367), medium (0.367 - 0.503), high (0.503 - 0.669), and very high (0.669 - 1.000). These classes reflected the inherent variability of the data. Because based on the empirical distribution of normalized index sizes, which were calculated from the combination of WoE weights of the effective factors, each class comprised approximately 20% of the studied area. In this study, low resilience index values in most of the area (mean = 0.48) indicated very low resilience of the aquifer system to hydrological pressures. Consequently, zones identified with the lowest resilience should be prioritized for critical management interventions, such as reducing groundwater withdrawals, implementing artificial recharge projects, and establishing intensive monitoring networks.

### **Conclusion and Suggestions**

Based on the results of this research, it is possible to identify the critical areas with the lowest resilience. Therefore, it is recommended that, based on the results obtained, areas that are in the very low resilience category should be given top priority in management planning, such as reducing unauthorized withdrawals, implementing artificial recharge schemes, establishing technical-legal protection and monitoring areas, and that strict monitoring be carried out in them. Also, it is suggested that this modeling framework be used as a generalizable scientific basis for assessing groundwater resilience in other critical plains in the country.

**Keywords:** Bootstrap, groundwater, modeling, resilience index, water resources management

**Article Type:** Research Article

### **Conflicts of Interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### **Data Availability Statement**

All information and results are provided in the article.

### **Authors' Contribution**

Author 1: Methodology, Conceptualization, Software analysis, Writing the original draft of the article

Author 2 and 3: Conceptualization, Supervision, Manuscript editing and revision, Results review

نام‌های داورانی که در این شماره با نشریه همکاری کردند:  
(به ترتیب حروف الفبا)

چوبین، بهرام  
حسینعلی‌زاده، محسن  
حقی‌آبی، امیرحمزه  
خلیلی، داور  
دسترنج، علی  
دستورانی، محمدتقی  
زارع، محمد  
سپه‌وند، علیرضا  
سلیمان‌پور، سید مسعود  
سیلاخوری، اسماعیل  
صوفی، مجید  
عرفانی‌فرد، سید یوسف  
قهاری، غلامرضا  
کاویان، عطاالله  
کله‌هوایی، مهین  
مصطفی‌زاده، رئوف  
ملکیان، آرش  
نوروزی، علی‌اکبر  
نوروزی‌خطیری، خدیجه



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

## شیوه‌نامه نگارش مقاله برای نشریه علمی پژوهش‌های آبخیزداری

عنوان مقاله (حداکثر ۲۰ کلمه با قلم بی-نازنین ۱۵ پرننگ و کلمات انگلیسی احتمالی در عنوان، با قلم Times New Roman 14 Bold)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول\*<sup>۱</sup>، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم<sup>۲</sup>، ... (بی-نازنین ۱۱ پرننگ)

- ۱- مرتبه علمی نگارنده اول، نام گروه آموزشی، نام دانشکده، نام دانشگاه یا سازمان، نام شهر، نام کشور (قلم بی-نازنین ۱۱)
- ۲- مرتبه علمی نگارنده دوم، نام گروه آموزشی، نام دانشکده، نام دانشگاه یا سازمان، نام شهر، نام کشور (قلم بی-نازنین ۱۱)

**نکته مهم:** در مورد جایگاه (ترتیب) نویسندگان و همچنین سمت سازمانی نویسنده‌ها آن است که جایگاه و عنوان‌های نوشته شده در مقاله با جایگاه و عنوان‌هایی که نویسنده مسئول در تارنمای نشریه هنگام ثبت نام درج می‌کند، باید دقیقاً یکسان باشند.

**درج کد آرکید همه نویسندگان که در تارنمای نشریه در هنگام ارسال مقاله دریافت شده است در دایره سبز رنگ کنار نام**

**نویسندگان، الزامی است.** (روش وارد کردن کد آرکید: روی دایره نماد کد آرکید (دایره سبز رنگ) کلیک سمت راست کنید از کادر باز شده [Edit Hyperlink](#) را انتخاب کرده و مجدداً در کادر باز شده در بخش Address: کد آرکید را برای هر نویسنده به جای اعداد صفر بنویسید و سپس گزینه ok را انتخاب کنید. در بخش انگلیسی هم این کد را در کنار نام هر نویسنده باید نوشته شود).

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

چکیده مبسوط باید به روشنی ارائه‌گر محتویات مقاله، بدون استفاده از علائم اختصاری، شکل، جدول و پاورقی بوده و به تفکیک دارای ساختاری به صورت مقدمه و هدف، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها و واژگان کلیدی باشد. تعداد کلمه‌ها در چکیده مبسوط بدون احتساب عنوان مقاله و واژه‌های کلیدی، بایستی دارای کمینه ۶۰۰ و بیشینه ۹۰۰ کلمه باشد. برای فونت قسمت چکیده مبسوط، کلمات فارسی با قلم بی-نازنین ۱۲ و کلمات انگلیسی با قلم Times New Roman 11 استفاده شود. تعداد کلمات در هر قسمت از چکیده مبسوط، حتی المقدور، بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ کلمه باشد.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، نشانی الکترونیکی نویسنده مسئول (قلم Times New Roman 11)

استناد: نام‌خانوادگی نویسنده اول، حرف اول نام نویسنده اول، نام‌خانوادگی نویسنده دوم، حرف اول نام نویسنده دوم، ... سال انتشار به عدد. عنوان کامل مقاله. پژوهش‌های آبخیزداری، (۹): ۴۴-۴۹.

شناسه دیجیتال: (قلم Times New Roman 11)

تاریخ دریافت: ۴۴/۴۴/۴۴، تاریخ بازنگری: ۴۴/۴۴/۴۴، تاریخ پذیرش: ۴۴/۴۴/۴۴، تاریخ انتشار: ۴۴/۴۴/۴۴

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۴۴، دوره ۴۴، شماره ۴، شماره پیاپی ۴۴، نام فصل، سال انتشار، صفحه‌های ۴۴ تا ۴۴.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

© نویسندگان



**مواد و روش‌ها**

مواد و روش‌ها، در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کلمه)

**نتایج و بحث**

نتایج و بحث، در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کلمه)

**نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

نتیجه‌گیری و پیشنهادات در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کلمه)

**واژگان کلیدی**

به ترتیب حروف الفبای فارسی و انگلیسی، با کمینه ۴ و بیشینه ۶ کلمه، در انتهای چکیده مبسوط آورده شود. (قلم بی- نازنین ۱۱ پررنگ)

**مقدمه (قلم بی- نازنین ۱۲ پررنگ)**

در این الگوی تهیه شده، نمونه روش تهیه مقاله برای «مجله علمی پژوهش‌های آبخیزداری» آمده است و قسمت‌ها و بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها که در تهیه یک مقاله به کار می‌روند شرح داده شده است. برای سهولت کار، کلیه شیوه‌های مورد نیاز برای بخش‌های مختلف، از پیش تعریف شده و تنها کافی است که نویسنده، مقاله خود را با این شیوه‌نامه تطبیق و متن خود را در آن قرار دهد.

بخش‌های اصلی مقاله ارسالی به این نشریه بایستی به ترتیب دارای: عنوان فارسی، چکیده مبسوط فارسی، واژه‌گان کلیدی فارسی، مقدمه، مواد و روش‌ها (منطقه مطالعه‌شده و روش پژوهش)، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات، سپاس‌گزاری (اختیاری)، تضاد منافع نویسندگان، دسترسی به داده‌ها، مشارکت نویسندگان، منابع، عنوان انگلیسی، چکیده مبسوط انگلیسی و واژگان کلیدی انگلیسی باشد.

مقاله با استفاده از نرم‌افزار MS Word 2010 نسخه ۲۰۱۰ یا بالاتر در فرمت DOCX و بیشینه ۱۴ صفحه تهیه شود.

متن مقاله باید در صفحات A4 با قلم نازنین ۱۲ معمولی برای کلمات فارسی و قلم Times New Roman 11 برای کلمات انگلیسی تایپ شود. بایستی فاصله متن از بالا در صفحه اول و صفحه عنوان انگلیسی ۵۰ میلی‌متر و در سایر صفحات ۳۰ میلی‌متر

باشد. در کلیه صفحات فاصله از پایین ۳۰ میلی‌متر و از چپ و راست نیز ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. متن مقاله به صورت دو ستونی با فاصله ۸ میلی‌متر بین دو ستون تایپ شود. فاصله سطرها باید تک فاصله‌ای (Single) باشد. هیچ پاراگرافی، نیاز به تورفتگی ندارد. عنوان‌های هر بخش از ابتدای ستون و بدون رها نمودن فاصله تایپ شود. عنوان فارسی هر بخش باید با قلم بی- نازنین پررنگ ۱۲ و عنوان انگلیسی با قلم Times New Roman 11 به صورت Bold تایپ شود. عنوان‌های فرعی فارسی با قلم بی-نازنین پررنگ ۱۱ و زیرعنوان انگلیسی با قلم Times New Roman 10 به صورت Bold نوشته شوند. در این نشریه از عدد و شماره‌گذاری، برای مشخص کردن ترتیب عنوان‌ها استفاده نمی‌شود. تا حد امکان، از به کار بردن کلمات انگلیسی در متن مقاله اجتناب شود و معادل فارسی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

برای کلماتی که جدا شدن بخش‌های آن‌ها نیاز به یک فاصله کامل ندارد، از نیم‌فاصله استفاده شود.

در عنوان مقاله و تمام بخش‌های مقاله، به جای استفاده از واژه "حوزه آبخیز" یا "حوزه آبریز" و موارد مشابه، از واژه فارسی "آبخیز" استفاده شود. همچنین به جای استفاده از "ی" در انتهای کلماتی که به "ه" ختم می‌شود از "ء" استفاده شود. مانند: (نادرست: منطقه‌ی درست: منطقه).

مطالب مربوط به واژه‌نامه، توضیحات جانبی مختصر، معادل لاتین اسامی و اصطلاحات و بیان کامل واژه‌های مخفف بایستی به صورت

### سپاس‌گزاری

نویسنده (نویسندگان) می‌توانند (در صورت تمایل) در این قسمت از سازمان‌ها، دانشگاه‌ها، و یا افرادی که در انجام این پژوهش او (ایشان) را یاری کرده‌اند سپاس‌گزاری و قدردانی کنند.  
(وجود این بخش، اختیاری است).

### تضاد منافع نویسندگان

در صورتی که تضاد منافع در خصوص مقاله وجود دارد در این بخش قید شود، در غیر این صورت، عبارت زیر درج شود:

**نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.**

(وجود این بخش، الزامی است).

### دسترسی به داده‌ها

در این بخش، شیوه دسترسی به داده‌ها و گداهای استفاده شده، و یا نقشه‌ها و نتایج تولید شده در پژوهش ذکر می‌شود. اگر داده‌ها و اطلاعات در متن مقاله ارائه شده است، ذکر شود که همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. اگر غیر از این، موارد اطلاعاتی قابل ارائه است؛ عبارت زیر درج شود: داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.  
(وجود این بخش، الزامی است).

### مشارکت نویسندگان

در این بخش شیوه مشارکت نویسندگان در انجام پژوهش ارائه می‌شود. برای درج این بخش، از شیوه زیر به‌عنوان نمونه می‌توان استفاده کرد. شایان ذکر است می‌توان بخش‌هایی از انجام کار، برای افراد مشارکت‌کننده در مقاله مشترک باشد.

**نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله، نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج**

زیرنویس<sup>۱</sup> و شماره‌دار و به‌صورت شماره‌گذاری پیوسته در پاورقی آورده شوند. در پاورقی، بایستی حروف فارسی با قلم بی-نازنین ۱۰ و حروف لاتین با قلم Times New Roman 9 تایپ شوند.

شیوه (Style) های مورد نیاز برای کلیه قسمت‌های مقاله، در این مقاله تعریف شده‌اند و مؤلفان می‌توانند پس از انتقال محتوای آن به این فایل با استفاده از Styles در منوی Home به‌سرعت فایل مقاله خود را با شیوه مورد نظر تطبیق دهند. این کار با استفاده از ابزارهای Copy | Past و Format Painter نیز در این مقاله به سادگی انجام پذیر است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

موقعیت جغرافیایی و دیگر مطالب برای معرفی منطقه پژوهش در این بخش آورده می‌شود. ارائه نقشه، در قالب موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده، در این بخش، توصیه می‌شود.

#### روش پژوهش

در این قسمت، روش پژوهش، به‌صورت دقیق و روشن، آورده می‌شود.

#### نتایج و بحث

در این بخش نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش، با تأکید بر یافته‌های جدید، همراه با بحث‌های مرتبط، آورده می‌شوند. در این قسمت از جدول‌ها، شکل‌ها، نمودارها نیز استفاده و بحث در مورد آن‌ها انجام می‌شود.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری درباره نتایج به‌دست آمده و تفسیر و جمع‌بندی یافته‌ها با تأکید بر مقایسه با پژوهش‌های مشابه، و تحلیل علمی نتایج به‌دست آمده و دادن پیشنهادها کاربردی، در این قسمت آورده می‌شود.

1-Footnote

فقط جدول ها و شکل های کوچک مانند جدول ۱، که پهنایی متناسب با پهنای مطالب متن داشته باشند در داخل ستون قرار می گیرند.

جدول ۱- عنوان جدول (بی-نازنین ۱۱ پرننگ).

Table 1- (Times New Roman 10 Bold)

Model components	Factor	Index
Driving Force	D <sub>1</sub>	People
Response	R <sub>3</sub>	Cultural actions
Pressure	P <sub>5</sub>	Rainfall
State	S <sub>1</sub>	Drop rate

اگر پهنای شکل یا جدولی متناسب با پهنای مطالب متن نباشد (مانند شکل ۱ یا جدول ۲)، باید آن را به صورت تک ستونه آورد.

روش تغییر ستون از دو به یک یا برعکس در نسخه های مختلف ورد متفاوت است. به عنوان مثال در ورد ۲۰۱۶ روش کار انتخاب نوار Layout به صورت زیر می باشد:

Layout | Columns | More Columns

بعد از طی این مسیر با توجه به هدف، حالت دو ستونه یا تک ستونه انتخاب می شود و از فهرست کشویی Apply to گزینه This point forward را انتخاب می کنیم.

برای اجرای صفحه بندی مطلوب می توانید از سطرهای اضافه که قبل یا بعد از شکل ها، جدول ها یا منابع درج می کنید، بهره ببرید.

از آنجا که این مجله به صورت کاملاً رنگی منتشر می شود، لازم است که به منظور متمایز نمودن دیاگرام ها از رنگ های مختلف استفاده شود و از روش های متمایزسازی مختص تصاویر سیاه و سفید (مانند استفاده از ضخامت خطوط مختلف، نمادها و یا استفاده از خطوط ممتد، نقطه چین و خط چین) پرهیز شود.

### روش ارجاع در متن

روش این نشریه بر اساس توصیه های شورای ویراستاران علمی (سی ای ۳) در وبگاه

نویسنده سوم: مفهوم سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل های آماری (وجود این بخش، الزامی است).

### روابط ریاضی

روابط باید به ترتیب و در جدولی مشابه جدول زیر از ابتدا تا انتها شماره گذاری شوند.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k} \quad (1)$$

شماره معادلات باید در انتهای سمت راست هر ستون و در امتداد خط حاوی معادلات و در پرانتز قید گردد. توضیحات تمام متغیرها، سنجها و نمادهای جدید در روابط، چنانچه پیش از آن توضیح داده نشده اند، باید بدون فاصله بعد از رابطه بیان شوند. نکته دیگر اینکه از درج فرمول به فرمت تصویر اجتناب شود و از روابط فرمول نویسی در نگارش آنها استفاده کنید تا افت کیفیت در نسخه نهایی نداشته باشیم.

### سیستم واحدها

سیستم واحد قابل قبول، سیستم بین المللی (SI) بوده و در مواقع ضروری، باید معادل آن در سیستم آحاد دیگر در داخل پرانتز به کار رود.

### توضیحات در مورد جدول ها و شکل ها و نمودارها

جدول ها و شکل ها باید به ترتیبی که در متن به آنها اشاره شده است شماره گذاری و جا داده شوند. عنوان جدول ها در بالای آنها، و عنوان شکل ها در زیر آنها به دو زبان فارسی و انگلیسی وسط چین نوشته شود. عنوان انگلیسی در زیر عنوان فارسی قرار گیرد. همه نوشتار روی شکل ها، نمودارها و داخل جدول ها باید به انگلیسی باشد. قلم فارسی عنوان جدول ها و شکل ها بی-نازنین پرننگ<sup>۲</sup> ۱۱ و قلم انگلیسی آنها Times New Roman 10 Bold انتخاب شده و قلم انگلیسی همه نوشتار روی شکل ها، نمودارها و داخل جدول ها Times New Roman 10 باشند.

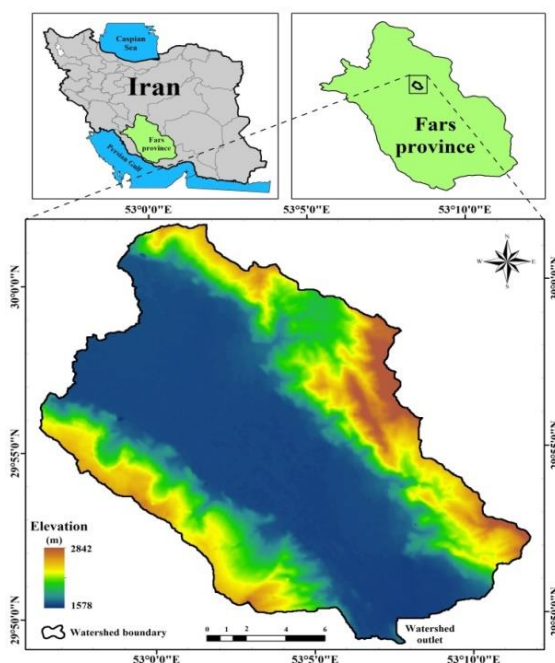
خط چهارچوب اطراف نمودارها برداشته شود و در جدول ها تنها خط های افقی بالا و پایین ردیف اول و خط افقی پایین ردیف آخر آورده شوند.

اگر منبع استفاده شده در پایان جمله آورده می‌شود، نام نویسنده و تاریخ باید درون دو کمان ( ) نوشته شود. مانند: (احمدی ۲۰۲۲)، و (برادفورد و همکاران ۲۰۲۳).

فهرست منابع در پایان مقاله به ترتیب حروف الفبا آورده شود، و هیچ منبعی در زیرنویس آورده نشود.

مربوطه<sup>۴</sup>، در ویراست هفتم کتاب مرجع آنان به نام روش و قالب علمی: دست‌ورکار سی‌اس‌ای برای نویسندگان، ویراستاران و ناشران (۲۰۰۶) و با انتخاب روش نام سال سی‌اس‌ای است.

همه منابع (اعم از فارسی و انگلیسی) مورد استفاده در متن مقاله باید با نام نویسنده (گان)، به زبان فارسی، و با ذکر تاریخ منبع مورد استفاده (بر حسب سال میلادی)، در داخل علامت دو کمان ( ) نوشته شوند. مانند: کوثر (۲۰۱۹)، و یا تامسون و همکاران (۲۰۲۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مطالعه‌شده.

Figure 1- Geographical location of the study area.

مثال: هاگیهارا و اینو (۲۰۲۱) دریافتند که ...  
۳. کار انجام شده بیش از دو نویسنده: نام نویسنده اصلی، سپس عبارت "و همکاران" و بعد تاریخ را بنویسید.

مثال: (هاگیهارا و همکاران ۲۰۲۳)

۴. بیش از دو کار انجام شده یک نویسنده: نام نویسنده و سپس تاریخ‌ها را به ترتیب زمانی بیاورید. برای جدا کردن تاریخ‌ها یک ویرگول و یک فاصله بگذارید:

۱. ارجاع به منبع را با آوردن نام (های) نویسنده (گان) و پس از آن سال انتشار نوشته انجام دهید. در هر ارجاع برای جدا کردن نام و تاریخ از دو کمان ( ) استفاده کنید. پس از نام یک فاصله خالی بگذارید، اما ویرگول نگذارید: تازه‌ترین پژوهش بر شدت بارندگی در این منطقه (سیبویون ۲۰۱۹) نشان می‌دهد که ..

۲. اگر نام نویسنده بخشی از جمله است، تنها تاریخ را در دو کمان ( ) بگذارید:

سال از حروف الفبا (الف، ب، و مانند آن‌ها) استفاده کنید. این ترتیب را هنگام فهرست کردن آن‌ها در بخش منابع نیز حفظ کنید.  
مثال: راش (۲۰۲۰ الف، ۲۰۲۰ ب) پذیرفت که ...

مثال: وایل (۱۹۹۹، ۲۰۱۰، ۲۰۲۲) مدل‌های مختلف برآورد سیلاب را شرح داده است.  
۵. بیش از دو کار انجام شده یک نویسنده در یک سال: برای تمایز میان منابع چاپ شده از یک نویسنده در یک

جدول ۲- عنوان جدول (قلم بی-نازنین ۱۱ پررنگ).

Table 2- (Times New Roman 10 Bold)

Component	Number of items	Calculated Cronbach's alpha
Driving force (D)	5	0.845
Pressure (P)	6	0.720
Response (R)	7	0.913

نشریه، شماره انتشار در داخل دو کمان (،) یک نشانه دونقطه (:،) و صفحه‌های مقاله آورده می‌شود. برای نوشتن شماره صفحه، همه شماره‌ها را بیاورید: (۱۰۴۵-۱۰۳۷، ۱۰۳۷، نه ۴۵-۱۰۳۷). برای فاصله میان دو شماره صفحه از فاصله متوسط (خط ان) - به جای خط تیره - استفاده کنید (نادرست: ۲۳۵-۲۵۰، درست: ۲۵۰-۲۳۵).

۳. در انتهای منابعی که نسخه اصلی آن فارسی است باید در داخل پرانتز کلمه *In Persian* آورده شود.

۴. فهرست منابع را شماره‌گذاری نکنید.

۵. عنوان نشریات و مجلات علمی را به شکل کامل بیاورید. حرف اول عنوان هر نشریه یا مجله باید بزرگ باشد و بقیه حروف کوچک باشد.

#### مثال‌های لازم برای نگارش فهرست منابع

Berengena J, Gavilan P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly adjective semiarid environment. *Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2):147-163.

Naderi N, MohseniSaravi M, Malekian A, Ghasemian D. 2011. Analytical Hierarchy Process technique for deciding watersheds. *Journal of Environment and Development*, 4(2): 41-50. (In Persian).

Subramanya K. 1994. *Engineering Hydrology*. Tata McGraw-Hill Education.

Castejon M, Romero-Munoz F, Garcia L. 1987. Phenology and control of *Orobancha cornea* in sunflower with glyphosate. In: Weber HC, Forstreuter W, Editors. *Parasitic flowering plants*. Marburg, F.R.G., pp. 121-126.

۶. کارهایی که یک سازمان به جای نویسنده منتشر کرده است: نام سازمان یا گروه را پیش از تاریخ چاپ بنویسید. مثال: اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به‌تازگی منتشر شده است (خدمات ملی آمار کشاورزی ۲۰۲۱).

اگر نام این سازمان‌ها بسیار طولانی است، یا باید بارها در نوشتار به آن‌ها ارجاع دهید، می‌توانید کوتاه‌شده نام اصلی آن‌ها را بنویسید:

مثال: اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به‌تازگی منتشر شده است (یو اس دی ای ۲۰۰۰).

در فهرست منابع نیز نخست واژه کوتاه‌شده و سپس نام کامل را بیاورید.

مثال:

USDA-National Agricultural Statistics Service. 2000.

#### فهرست منابع

همه منابع مورد استفاده در متن مقاله (فارسی و انگلیسی) باید با الفبای انگلیسی و با دستورکار نشریه آورده شود و قلم آن Times New Roman 10 و هر منبع در صورت داشتن شناسه دیجیتال یا DOI؛ **حتماً لازم است این‌گد نیز به‌طور کامل، نوشته شود.**

۱. پس از نام‌خانوادگی، تنها حرف اول نام کوچک نویسنده می‌آید و این حرف‌ها با نقطه یا فاصله از هم جدا نمی‌شود. حرف اول تنها در اولین واژه عنوان مقاله با حروف بزرگ نوشته می‌شود.

۲. پس از نام نویسنده، سال انتشار می‌آید. سپس یک نقطه، عنوان مقاله، نام مجله، یک نقطه، شماره مجلد

USDA–National Agricultural Statistics Service. 2000. Published estimates data base (PEDB) [Online]. Available at <http://www.nass.usda.gov:81/ipedb/> (accessed 15 May 2001; verified 24 Aug. 2001. USDA–NASS, Washington, DC. USA.

Ghorbani M. 2012. The role of social networks in operation mechanisms of rangeland (Case Study: Taleghan area). Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 430 p. (In Persian).

Niknahad Gharemakher H, Aghtabye A, Akbarlou M. 2018. Effects of grazing exclusive on some soil properties, erodibility and carbon sequestration (Case study: Bozdaghin rangelands, North Khorasan, Iran). Iranian Journal of Range and Desert Research. 24(4):708–718. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114058>. (In Persian).

Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 430 p. (In Persian).



## Title (Font: Times New Roman 14 Bold)

**Author<sup>1\*</sup>, Author<sup>2</sup>, Author<sup>3</sup> (Font: Times New Roman 10 Bold)**

- 1- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)
- 2- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)
- 3- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)

## Extended Abstract (Font: Times New Roman 12 Bold)

### Introduction and Goal (Font: Times New Roman 11 Bold)

The extended abstract must include the title, author(s), introduction and objective, materials and methods, results and discussion, conclusion and suggestions. The extended abstract should be typed with single spacing using size 11 Times New Roman font. Extended abstract should summarize the contents of the paper and contain a minimum of 700 and maximum of 1000 words (With a logical balance between different sections of the abstract). Figures or Tables should not be included in the extended abstract. The total number of words should be about 200-250 words in the Introduction and objective section.

### Materials and Methods (Font: Times New Roman 11 Bold)

The methodology must be clearly stated and described in sufficient detail or with sufficient references. The total number of words should be about 200 to 250 words in this section.

### Results and Discussion (Font: Times New Roman 11 Bold)

The findings and arguments of the work should be explicitly described. Note that no Tables, images and figures should be provided in the results and discussion section. The total number of words should be about 200 to 250 words in this section.

### Conclusion and Suggestions (Font: Times New Roman 11 Bold)

Conclusions should include (1) the principles and generalizations inferred from the results, (2) any exceptions to, or problems with these principles and generalizations, (3) theoretical and/or practical implications of the work, and (5) conclusions drawn and recommendations. This section should contain about 200-250 words.

**Keywords: The authors should provide four to six keywords that are consistent with those in Persian (Font: Times New Roman 10 Bold)**

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Author's E-mail:** ??????

**Citation:** ?????, ?, ?????, ?, ?????, ?. Year ????. Title paper. Watershed Management Research. ??(?): ??-??.

**DOI:** ????????????????

**Received:** ????????, **Received in revised form:** ????????, **Accepted:** ????????,

**Published online:** ????????

Watershed Management Research, Vol. ??, No. ?, Ser. No. ???, Season ????, pp. ??-??.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center ©Author(s)



**Article Type:** Research Article

**Acknowledgement**

We would like to express our sincere gratitude to the University of XXXXX for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

**Conflicts of Interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article. **If there is a conflict of interest, please state it in this section.**

**Data Availability Statement**

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author. **/OR/** We have no permission to release data and codes.

**Authors' Contribution**

(For Example) Author 1: Writing - original draft preparation

(For Example) Author 2: Resources, Software, Manuscript editing

(For Example) Author 3: Formal analysis and investigation

(For Example) Author 4: Visualization, Supervision

(For Example) Author 5: Conceptualization, methodology

# **Watershed Management Research Journal**

**Founder:** Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Fars  
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center  
**ISSN: 2981-2038 Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026**

**Director in Chief:** A. Moradi - Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars  
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research,  
Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

**Editor in Chief:** A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research  
Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

## **Editorial Board :**

M.T. Dastorani- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural  
Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

S.Y. Eerfanifard- Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of  
Geography, Tehran University

A.H. Haghiabi- Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University Ataollah Kaviani-  
Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural and Natural Resources  
University

D. Khalili - Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University,  
Shiraz, Iran A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research  
Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research  
Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural  
Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran M. Soufi- Emeritus  
Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars  
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research,  
Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

M. Zare- Professor of Earth Sciences Department, College of Sciences, Shiraz University

**Executive Manager:** S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed  
Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education  
Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

**Language Editor and Editorial Office:** M. Enayati - M.Sc. Expert, Soil Conservation and  
Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research  
and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO),  
Shiraz, Iran

**Statistics Consultant:** L. Jowkar- Emeritus Fellow, Fars Agricultural and Natural Resources  
Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization  
(AREEO), Shiraz, Iran

**Page Layout Expert:** P. Haghighi - M.Sc. Expert, Soil Conservation and Watershed Management  
Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center,  
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

**Address:** Office of the Journal of Watershed Management Research, Fars Agricultural and Natural  
Resources Research and Education Center, Janbazan Ave. Modarres Blvd. Shiraz, I.R. Iran

**Postal code:** 71558-63511

**POB:** 71555-617

**Phone:** +987137204959

**Website:** <http://wmrj@areeo.ir>

**Email:** [wmrj@areeo.ac.ir](mailto:wmrj@areeo.ac.ir)



# Watershed Management Research

# 151

ISSN: 2981-2038

Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026

- **Climate Change Prediction under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Scenarios in the Bakhtegan-Maharloo Watershed**  
Seyyed Nasrallah Hosseini, Baharak Motamedvaziri, Hadi Kiadaliri, Hasan Ahmadi ..... 1
- **Application of Machine Learning Algorithms in Analyzing the Effect of Fire on Soil Water Repellency in Tushan Watershed, Golestan Province**  
Kohzad Heidary, Ali Najafi Nejad, Ali Mohammadian Behbahani, Majid Ownegh, Louis.W. Dekker ..... 20
- **Spatio-Temporal Variability of the Effect of Pressure, State, and Response Indices on the Future Health of Iran's Watersheds**  
Seyed Hamidreza Sadeghi, Ali Nasiri Khiavi, Reza Chamani, Negin Behnia, Vahid Moosavi, Hamid Noori, Padideh Sadat Sadeghi, Mohammad Hossein Shoushtari, Abdolvahed Khaledi Darvishan, Mehdi Vafakhah, Hamidreza Moradi Rekabdarkolaei..... 44
- **Comparative Analysis of Three Remote Sensing Models for Estimating Actual Evapotranspiration in the areas flood water spreading of Garbaygan Fasa**  
Ali Jafari, Hamid Hosseinimarandi, Mojtaba Pakparvar, Amir Eslami ..... 63
- **Prediction and Modeling of Soil Erosion Rates Using Machine Learning Algorithms in Maraveh Tappeh and Kalaleh Counties, Golestan Province**  
Abdolhossein Boali, Narges Kariminejad, Morteza Akbari, Maryam Yaghoobi, Mohsen Farahi..... 80
- **Predicting the Spatial Pattern of Flood Susceptibility Using Support Vector Machine Model in the Sirwan Watershed**  
Aref Bahmani, Hiran Abghari, Omid Rahmati ..... 96
- **Forecasting the Resilience of the Marvdasht Plain Watershed Using a Combined WoE-Based Framework**  
Saeed Alizadeh, Reza Ghazavi, Ebrahim Omidvar ..... 116