



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

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

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 به‌دلیل 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

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.

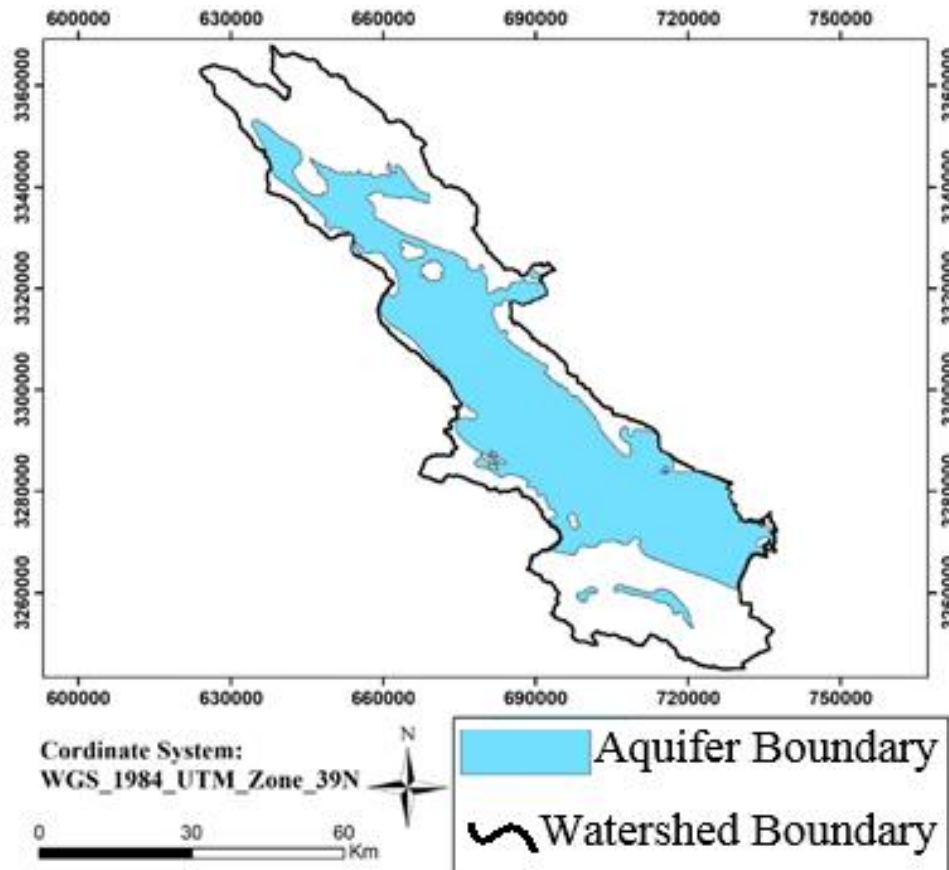
در این پژوهش با روش کدنویسی پیچیده در زبان پایتون، وزن شواهد ( $WoE$ ) برای پیش‌بینی شاخص عملکرد تاب‌آوری آب زیرزمینی مدل‌سازی شد. هدف این پژوهش، ساخت یک مدل حرفه‌ای از وزن شواهد بود که بر اساس شاخص تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی ( $CRS$ )، تاب‌آوری مکانی آب‌های زیرزمینی در منطقه دشت مرودشت پیش‌بینی شد و اعتبار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

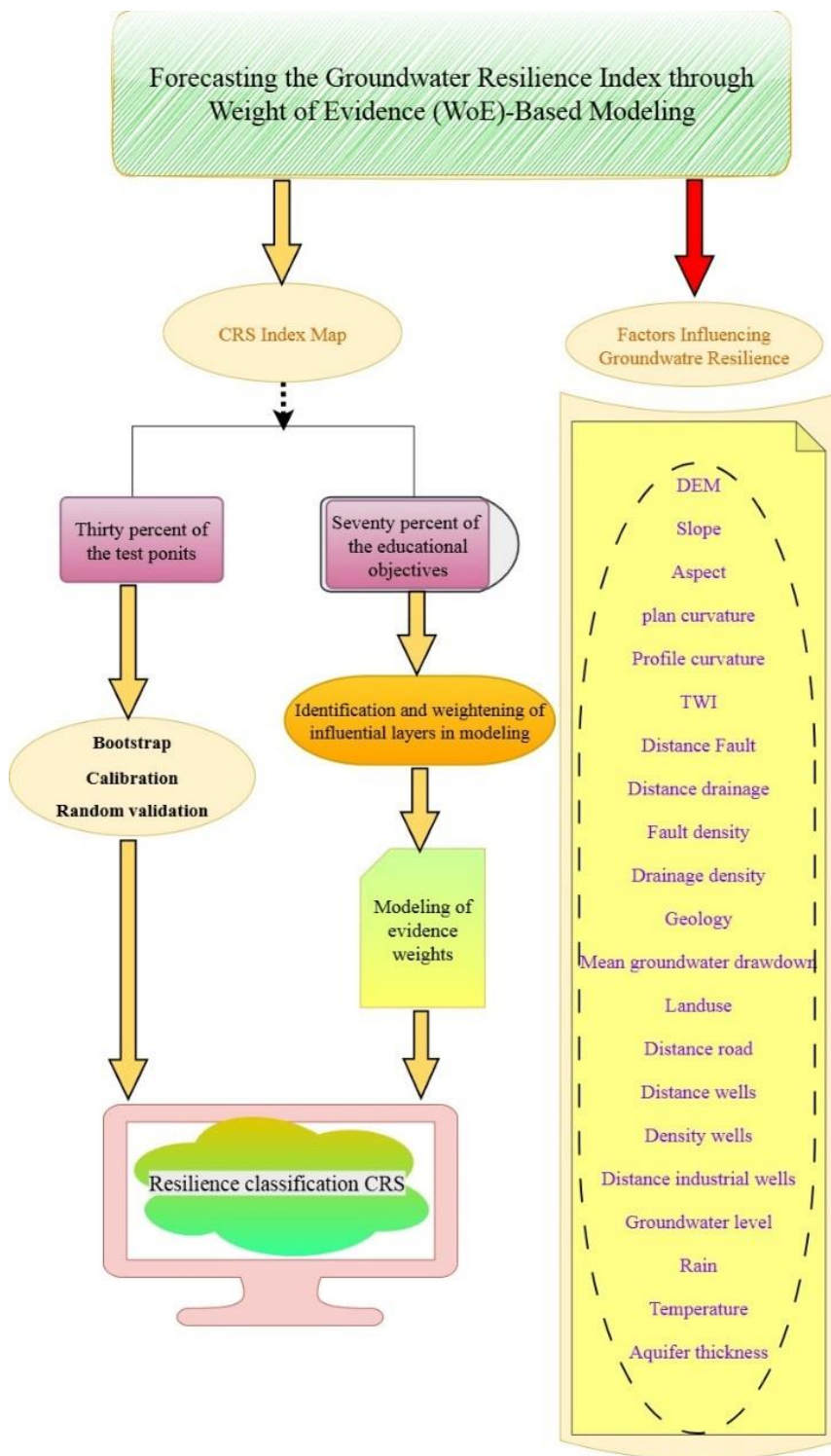
### داده‌های لازم

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  
 مرودشت 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 به‌ترتیب 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

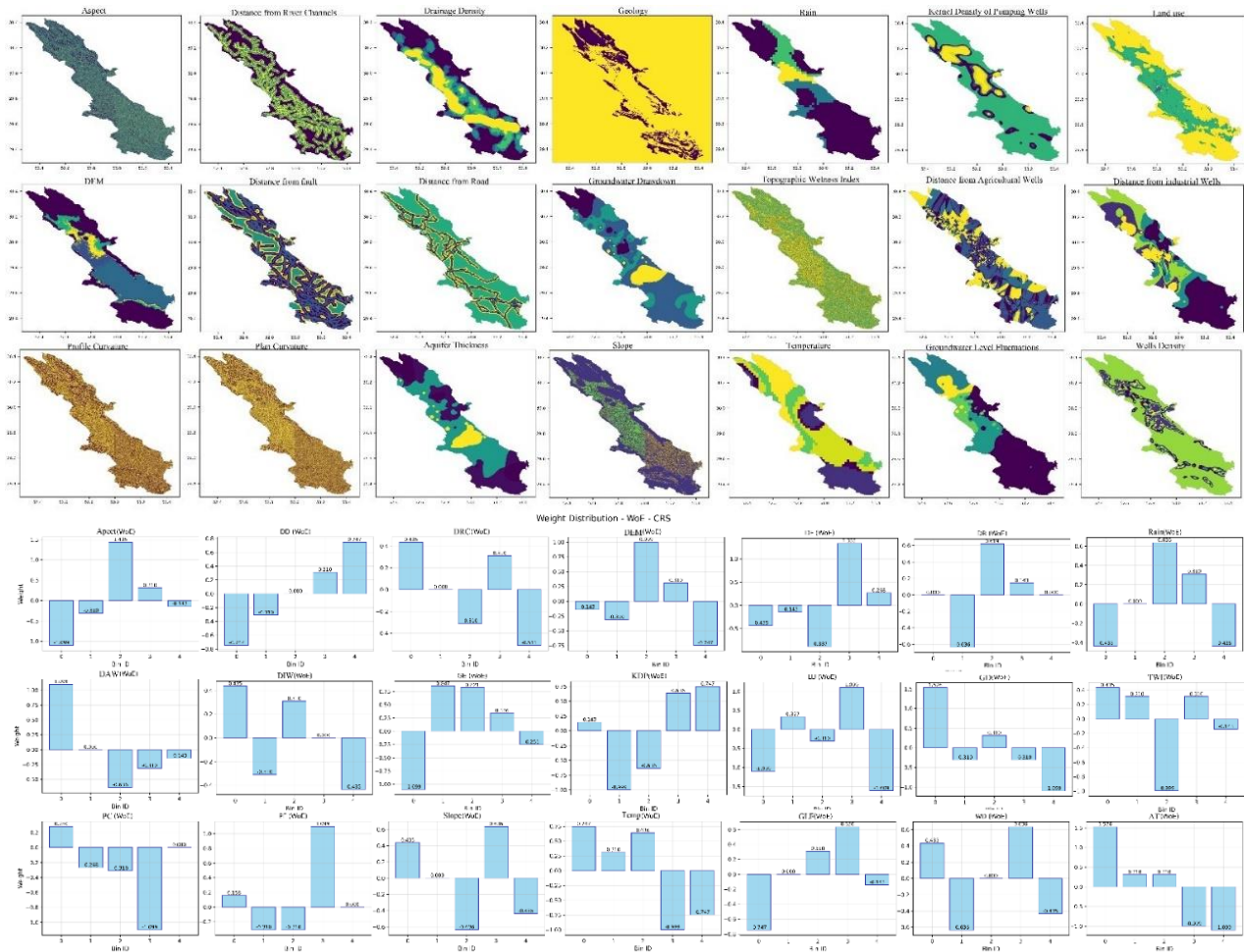
برای سنجش پایداری آماری مدل، از روش بوت‌استرپ با ۱۰۰۰ تکرار استفاده شد و در هر تکرار، یک نمونه تصادفی با جایگذاری از داده‌های آموزشی استخراج شد و مدل مجدداً آموزش و ارزیابی شد و سپس با فاصله اطمینان ۰/۹۵، AUC محاسبه شد.

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  <math>U</math> = Years when groundwater levels are lower than the time series average.  <math>S</math> = Years when groundwater levels are higher than the time series average.  <math>C</math> = Groundwater level</p>

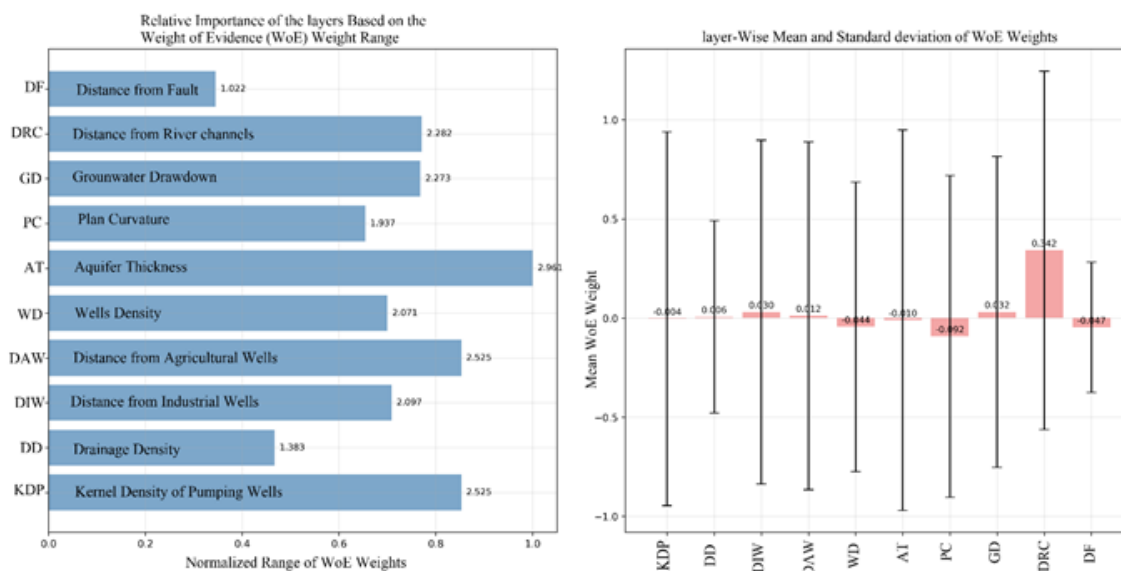
جدول ۲-تفسیر نمودار اهمیت نسبی وزن لایه‌های مؤثر در مدل‌سازی شاخص CRS.

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

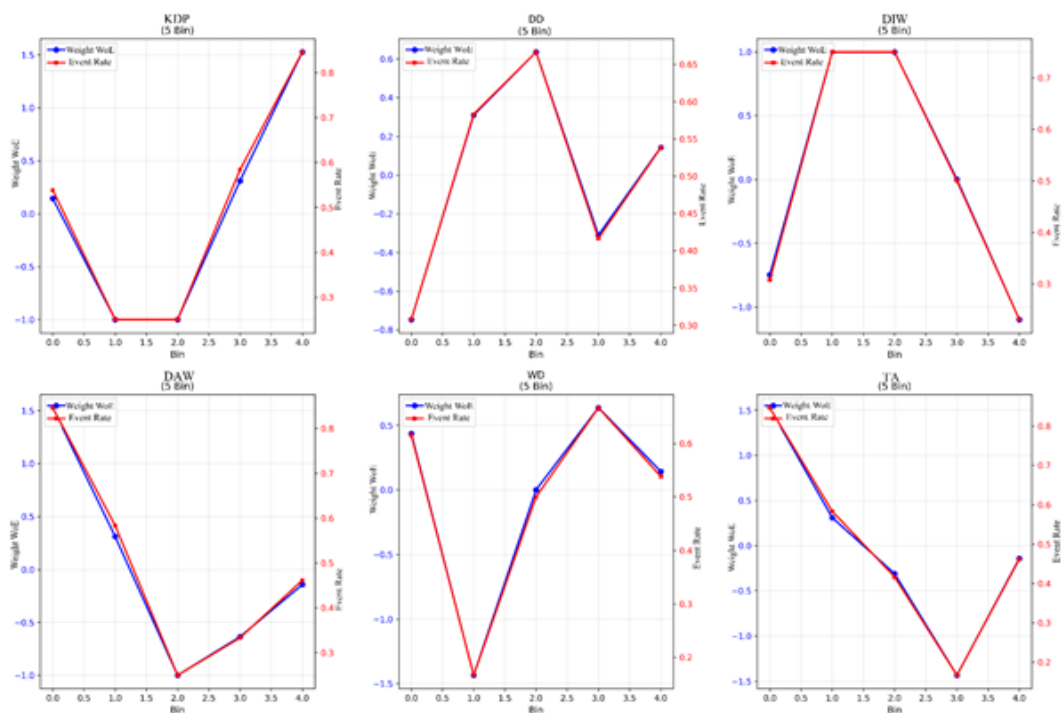
آبخوان با میانگین WoE نزدیک به صفر بود، اما وزن نهایی آن زیاد بود. به بیان دیگر در طبقه‌های خاص مثل طبقه صفر نقش WoE بسیار مثبت است و این طبقه‌ها در مناطق ح ساس ه ستند. نتایج این پژوهش با یافته‌های دیلون و همکاران (۲۰۲۰) هم‌راستا است.

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.

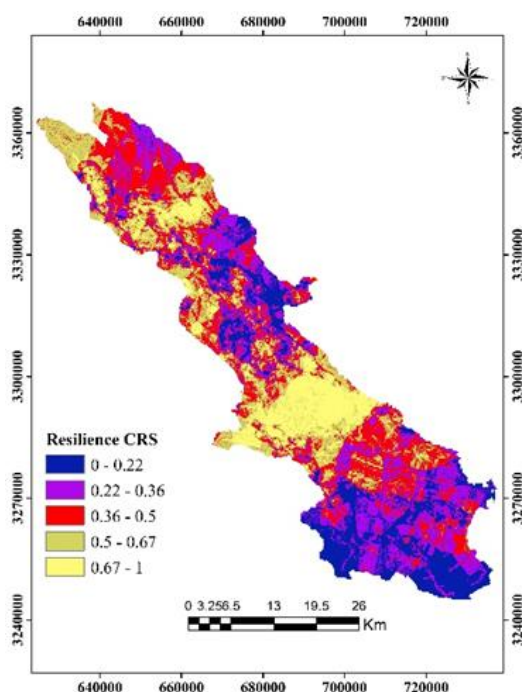
Figure 5-Analysis chart of Weight of Evidence (WoE) class relationships for the influential layers.

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

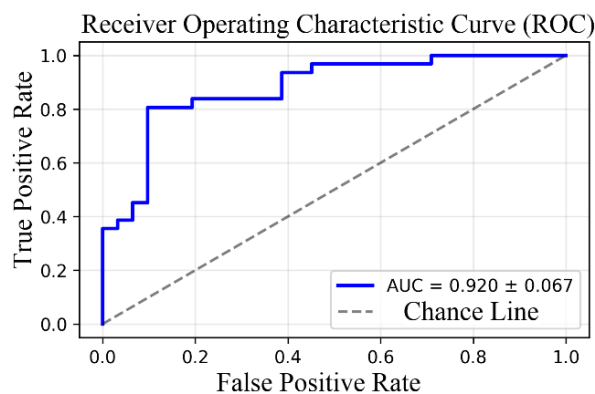
16- False Positive Rate

14- Receiver Operating Characteristic

15- True Positive Rate

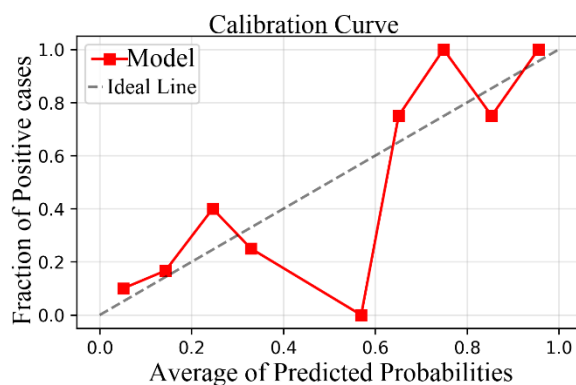
۰/۸ انحرافات مشاهده شد. به بیان دیگر در نقطه ۰/۶ پیش‌بینی و برآورد مدل کمتر از واقعیت بود و نقطه قرمز زیر خط ایده‌آل است (شکل ۸).

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



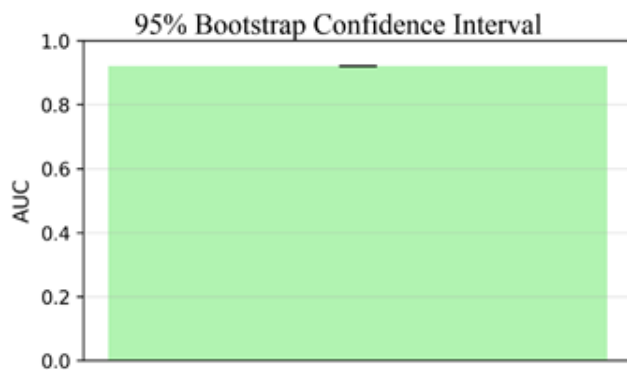
شکل ۷- نتایج و منحنی ROC.

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) قابل‌قبول 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.ijdrr.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, Alimagham 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