

## بررسی مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP (مطالعه موردی: دشت شبستر - صوفیان)

شهرام روستایی - استاد ژئومورفولوژی دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
محمد حسین رضایی مقدم - استاد ژئومورفولوژی دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
جمشید یاراحمدی - استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران.  
سمیرا نجف‌وند\* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱      تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

### چکیده

فرونشست زمین یک مخاطره جهانی است که به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد که سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده است. در دهه اخیر فرونشست به عنوان یک مخاطره ژئومورفیک در بخش وسیعی از دشت‌های ایران از جمله دشت شبستر - صوفیان در حال وقوع است. لذا این تحقیق با هدف شناسایی مناطق مستعد فرونشست در دشت شبستر - صوفیان انجام شده است. در مرحله نخست با استفاده از آمار ۱۸ ساله ۲۳ چاه پیزومتری و نرم افزار ARC-GIS، نقشه افت سطح آب به روش درون‌یابی IDW تهیه شد. سپس عوامل مؤثر در فرونشست منطقه (شیب، طبقات ارتفاعی، واحدهای ژئومورفولوژی، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، افت سطح زیرزمینی) شناسایی شد و طبق نظرات کارشناسان در نرم افزار ARC-GIS وزن دهی شدند. محاسبات آن در نرم افزار Expert Choice انجام شد. سپس لایه های مذکور از طریق مدل AHP-Fuzzy در محیط نرم افزار ARC-GIS تعیین عضویت شده اند و با استفاده از هم‌پوشانی خطی فازی نقشه مناطق مستعد فرونشست دشت شبستر - صوفیان در پنج کلاس مستعد فرونشست بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و بسیار پایین تهیه شد. طبق نتایج مدل، مناطق جنوبی و غربی دشت شبستر - صوفیان مستعد فرونشست زیاد تا خیلی زیاد بوده است. این مناطق منطبق بر کاربریهای کشاورزی و مراتع بوده، روستاهای کوشک، یوسف‌آباد، سنگل‌آباد، آق‌کهریز، قم‌تپه، وایقان بر روی پهنه های پرخطر واقع شده و این مناطق را در وضعیت بحرانی قرار داده است.

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، روش AHP-Fuzzy، افت سطح آب زیرزمینی، دشت شبستر - صوفیان.

## مقدمه

در سال‌های اخیر، یکی از مخاطرات رایج شهری که در بسیاری از شهرهای جهان گسترش یافته است، فرورانش زمین است (چن<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۱۹). فرورانش زمین پدیده‌ای آرام و نامحسوس و یا نشست ناگهانی سطح زمین بر اثر جابجایی ذرات خاک است. بردار حرکتی فرورانش بیشتر قائم است و بردار جابه‌جایی افقی قابل‌اغماض است. مهم‌ترین علت فرورانش منطقه‌ای سطح زمین در حوضه‌ای رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک، متراکم شدن و فشردگی رسوبات در اثر برداشت بی‌رویه از منابع سفره‌های آب زیرزمینی است (ژو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). در سالیان گذشته، فعالیت‌های انسانی همچون تخلیه درازمدت آب، و نفت و گاز از منابع زیرزمینی و معدن کاری از عوامل اصلی به وجود آمدن فرورانش زمین در مناطق مختلف جهان بوده است. این پدیده شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است و امروزه به یکی از مسائل و مشکلات اساسی جوامع بشری به دلیل خسارات جبران‌ناپذیر نسبت به دیگر مخاطرات تبدیل شده است. شکل‌گیری این پدیده به صورت آرام در طی مدت‌زمان طولانی اتفاق می‌افتد و فاقد برگشت‌پذیری است. فرورانش به‌طور کلی ناشی از عواملی مانند انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی، بارگذاری، زهکشی و یا ارتعاش، تراکم هیدرولیکی، ناپایداری خاک‌ها در سطوح شیب‌دار، انقباض خاک‌های رسی، ذوب یخ لایه‌های منجمد در اعماق زمین و ... پدیدار می‌شود. فرورفتگی کیفی شکل زمین، پس‌روی آب دریا، ریزش سطح و جابجایی پوسته‌ای زمین از علائم آن است. علاوه بر این، فرورانش زمین در مناطق شهری می‌تواند باعث فروریختن فونداسیون، تخریب خط لوله زیرزمینی و آسیب جاده شود. این مخاطره، موجب تغییرات توپوگرافیکی سطح زمین نیز می‌شود که در اکثر اوقات آسیب‌های جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد. علل وقوع فرورانش زمین در نقاط مختلف دنیا به دلایل مختلفی رخ می‌دهد، از جمله، احیای مناطق ساحلی، توسعه فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وسازهای شهری در مناطق دلتایی و استخراج بی‌حد آب‌های زیرزمینی در جلگه‌ها، که جابجایی سطح زمین را به دنبال دارد. در سراسر جهان، دشت‌های ساحلی و مناطق دلتایی رودخانه‌ای بیشترین فرورانش زمین را دارند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). محرکان اصلی فرورانش به دو عامل انسانی و طبیعی تقسیم می‌شوند (پولیشبک فیلیپاک<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۰)، عوامل ناشی از فعالیت‌های انسانی شامل استخراج سیالات از لایه‌های زیرسطحی (مانند آب، نفت و گاز)، تغییر کاربری زمین (به‌عنوان مثال بارگذاری ناشی از ساختمان‌های ساخت بشر)، ساخت تأسیسات زیرزمینی و معدنکاری و فعالیت‌های طبیعی شامل گسل، حرکات زمین ساختی، تثبیت و فشردگی رسوبات، فروریزش لس، افزایش سطح آب دریا، اکسیداسیون و زهکشی خاک‌های آلی، فرسایش کارستی و فروافتادگی ناشی از پرمافست هستند (کروستو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). در این میان، عامل انسانی با ۷۶/۹۲ درصد از کل علل فرورانش در سراسر جهان و استخراج آب‌های زیرزمینی ۵۹/۷۵ درصد از دلایل اصلی فرورانش در سراسر جهان به شمار می‌روند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ اصلان و همکاران، ۲۰۱۹).

تقاضای روزافزون منابع آب زیرزمینی، به دلیل توسعه شهری و کشاورزی، محرک‌های اصلی فرورانش زمین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند (باقری گاو کش و همکاران، ۲۰۲۱). امروزه فرورانش زمین یک مخاطره جهانی ناشی از عامل انسانی و طبیعی است و بیشترین مقدار میانگین فرورانش سالانه در شرق چین، دشت مرنند در شمال غرب ایران، ساحل خلیج تگزاس در جنوب ایالات متحده، جاکارتای شمالی در اندونزی، منطقه شهری مکزیکوسیتی در مرکز مکزیک مشاهده شده است. بنابراین پیش‌بینی، تشخیص و کاهش فرورانش زمین در دشت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (هررا گارسیا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

1. Chen

2. Zhu

3. Pawluszczek-Filipiak

4. Crosetto

5. Herrera Garcia

بسته به نوع فرونشست، جابجایی عمودی زمین ممکن است با تغییر شکل افقی نیز همراه بوده که می‌تواند آسیب‌های قابل‌توجهی بر جای بگذارد این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها، خطوط انتقال نیرو، شبکه آب و فاضلاب، راه‌های دسترسی و دیگر سازه‌ها آسیب برساند، شبکه آبرسانی، گاز و فاضلاب را درهم بپیچد و به ترک خوردگی پی ساختمان‌ها، شکستگی و ترک در سازه‌های زیرساختی به آتش‌سوزی برخاسته از انفجار لوله‌های گاز بینجامد (اصلان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). فرونشست زمین پیامدهای ویرانگری برای زیرساخت‌های شهری و روستایی، خسارت به بزرگراه‌ها، شکستگی و شکاف در سازه‌ها، آتش‌سوزی در پی انفجار لوله‌های گاز دارد. از این رو، پدیده فرونشست رشته پیوستاری از برهم‌کنش‌های ناگوار هم‌افزاست، بدین معنا که کاهش بارش به همراه افزایش مصرف آب به کندن چاه‌های عمیق و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و آن نیز به فرونشست زمین می‌انجامد. زمانی که دولت‌های محلی و مردم در مورد خطرات و اثرات فرونشست زمین آگاهی نداشته باشند، شهرها و مناطق اطراف آن آسیب‌پذیرتر می‌شوند، که این عامل منجر به تصمیم‌گیری نادرست و در نتیجه بی‌اثر شدن اقدامات انجام‌شده می‌شود (حمدانی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، رشد پرشتاب و الگوی نامتعادل توزیع جمعیت، کشاورزی ناکار، برنامه‌های رشد محور ناسازگار با توسعه پایدار، خشک‌سالی‌های پی‌پی، شهرنشینی فزاینده و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، مدیریت ناکارای این منابع، طی چند دهه گذشته گستره و ژرفای بحران‌های زیست‌محیطی را به صورت پیوستاری درهم‌تنیده و رو به فزاینده‌ای درآورده که امنیت، ثبات و توسعه کشورهای بسیاری از جمله ایران را درگیر چالش‌های بنیادی کرده‌اند (کاواییان راد، ۱۴۰۰). اگر زمانی این پدیده تنها در برخی از استان‌ها مانند کرمان و یزد رخ می‌داد، اکنون استان‌های اصفهان، خراسان، تهران، آذربایجان شرقی و غیره نیز متحمل فرونشست هستند و این مشکل به‌طور روزافزون در استان‌های بیشتری خودنمایی می‌کند. در همه فرونشست‌هایی که در ایران رخ می‌دهد، استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، مهم‌ترین عامل ایجاد فرونشست است (پیری و همکاران، ۱۳۹۹).

دشت شبستر - صوفیان یکی از دشت‌های مهم استان آذربایجان شرقی است که به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین نیاز آبی منطقه خصوصاً کشاورزی و همچنین کاهش نزولات جوی و خشک‌سالی‌ها در سال‌های گذشته، متوسط سطح تراز آب زیرزمینی آن در طول دوره آماری ۲۳ ساله (۱۳۶۶ تا ۱۳۸۸)، با افت ۸/۵۷ متری مواجه شده است. در اثر عوامل مذکور، فرونشست زمین حداکثر به اندازه ۵۰ سانتی‌متر در این دشت مشاهده شده است. تداوم افت سطح آب و فرونشست ناشی از آن می‌تواند خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی را در پی داشته باشد (زینالی، ۱۳۸۸). یافته‌های تحقیق دیگر مؤید حاکمیت میزان فرونشست با حداقل ۴ سانتی‌متر تا حداکثر ۲۳ سانتی‌متر در سال بوده است (عزتی، ۱۳۹۴). قسمت‌های جنوبی و مرکزی دشت بیشترین پتانسیل فرونشست را دارا هستند (طاهری و همکاران، ۱۳۹۶). لذا با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر با استفاده از روش AHP-Fuzzy به شناسایی مناطق مستعد فرونشست زمین در دشت شبستر - صوفیان پرداخته است.

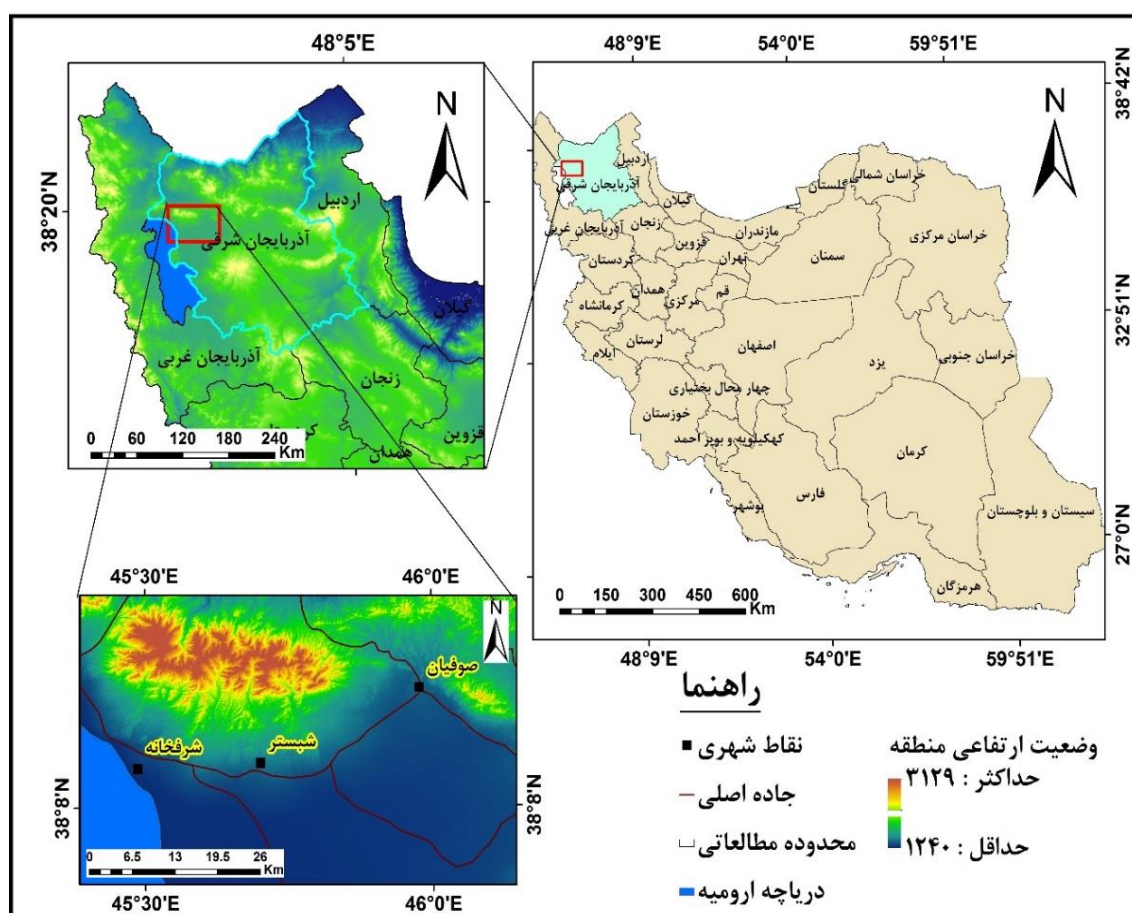
### معرفی منطقه مورد بررسی

دشت شبستر - صوفیان در استان آذربایجان شرقی با مختصات جغرافیایی ۷°-۴۱'-۴۵ تا ۲۳'-۱۴'-۴۶ و عرض‌های شمالی ۳۸°-۵'-۳۸ تا ۳۸°-۳۷'-۴۹، عرض شمالی واقع گردیده است. از جهت شمال به حوضه زیلبرچای مرنند، از غرب به دشت تسوج، از شرق به تبریز و از جنوب به دریاچه ارومیه و پهنه‌های نمکی - رسی محدود می‌شود. کوهستان میشو در شمال آن مشخص‌کننده حدود طبیعی این دشت از حوضه زیلبرچای است و ارتفاع این دشت بین ۱۲۴۰ تا ۳۱۲۹ متر متغیر است. این محدوده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار گرفته است که بخشی از پهنه زمین‌ساخت البرز غربی -

1. Aslan

2. Hamdani

آذربایجان است. قدیمی‌ترین واحد چینه‌شناسی در آن مربوط به پرکامبرین (سازند کهر) است و فازهای کوهزایی مختلفی از جمله کاتانگانی، ساردیک، تاکونیک، کالدونین، هرسینین، کیمیرین، لارامید، پیرنه، استیرین و پاسادین در تکوین منطقه نقش داشته‌اند. عمده‌ترین عناصر ساختاری گسل‌ها و درزها هستند. شاخص‌ترین عارضه ژئومورفولوژیکی منطقه، دریاچه ارومیه است. میزان ارتفاع محدوده از ۱۲۴۰ متر در واحد دشت تا ۳۱۲۹ متر در واحد کوهستان متغیر است. آب‌وهوای این منطقه به‌طور کلی سرد و خشک است، ولی به علت تنوع توپوگرافیکی، از اقلیم‌های متفاوتی برخوردار است (سلطانی سیستی، ۱۳۸۴). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

### روش تحقیق

این تحقیق مبتنی بر روش‌های ابزاری و کتابخانه‌ای است. داده‌های اصلی پژوهش شامل؛ اطلاعات مربوط به چاه‌های آب در حوضه مورد مطالعه، پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژی است. اطلاعات مربوط به چاه‌های پیزومتری و هیدرولوژی از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت شده و همچنین اطلاعات اقلیمی از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران مربوط به منطقه، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نقشه رقومی ارتفاعی زمین DEM به دقت ۳۰ متر از سنجنده SRTM بوده است. به منظور تعیین مناطق مستعد فرونشست زمین در دشت شبستر- صوفیان از ۷ عامل، شیب، طبقات ارتفاعی، واحدهای ژئومورفولوژی، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، افت سطح آب زیرزمینی استفاده شده

است. برای این منظور از نرم افزار ARC-GIS اقدام به تهیه لایه های اطلاعاتی شده است. در مرحله بعد، با توجه به پارامترهای مورد نظر، مناطق مستعد فرونشست زمین برای منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تحقق این هدف، از مدل تلفیقی AHP-FUZZY به عنوان رایج ترین روش ارزیابی های محیطی طی دو دهه اخیر، استفاده شده است (ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). به رغم محبوبیت عام، روش AHP به دلیل ناتوانی در ترکیب ابهام ذاتی و نبود صراحت مربوط به نگاشت ادراک های تصمیم گیرندگان با اعداد دقیق، مورد نقد است (دنگ<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹). منطق فازی که در برابر منطق کلاسیک مطرح شد، ابزاری توانمند برای حل مسائل مربوط به سامانه های پیچیده ای به شمار می آید که در آن ها مشکل و یا مسائلی وابسته به استدلال، تصمیم گیری و استنباط بشری است (کوره پزان دزفولی، ۱۳۹۴). پدیده های واقعی تنها سیاه یا تنها سفید نیستند، بلکه تاندازه ای خاکستری هستند. پدیده های واقعی همواره فازی، مبهم و غیردقیق هستند (آذر و همکار، ۱۳۹۵). نظریه مجموعه های فازی، یک نظریه ریاضی طراحی شده برای مدل کردن ابهام فرایندهای وابسته به دانش بشری انسان است (لین<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). تصمیم گیرنده می تواند آزادانه دامنه مقادیر مورد نظر را انتخاب کند. قضاوت مردد کارشناس را می توان با عدد فازی بیان کرد. بنابراین، فازی ای اچ پی دامنه ای از مقادیر را برای بیان عدم قطعیت تصمیم گیرندگان، به کار می گیرد (لی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). در این روش برای مقایسه زوجی گزینه ها، از اعداد فازی و برای دست آوردن وزن ها و برتری ها از روش میانگین هندسی استفاده می شود. چراکه به این روش به سادگی به حالت فازی قابل تعمیم است و همچنین جواب یگانه ای برای ماتریس مقایسات زوجی تعیین می کند. در این روش شخص تصمیم گیرنده می تواند مقایسات زوجی المان های هر سطح را در قالب اعداد فازی ذوزنقه ای بیان کند. برای تهیه ماتریس مقایسات زوجی از نظرات کارشناسان منابع طبیعی و زمین شناسی استفاده شد. در ادامه به تعریف این مدل ترکیبی پرداخته شده است.

### فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

یکی از معروف ترین و کاربردی ترین روش های تصمیم گیری چندمعیاره، فرایند تحلیل سلسله مراتبی است. این روش توسط توماس ساعتی در دهه ۱۹۷۰ میلادی ابداع شد. تحلیل سلسله مراتبی یک روش نیمه کیفی در مطالعه مخاطرات است که شامل یک ماتریس وزن دهی بر مبنای مقایسات زوجی بین عوامل بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را مشخص می کند. از مزایای این روش این است که اعمال نظر کارشناسی توسط افراد را تا حد زیادی آسان تر کرده و احتمال خطا را کاهش می دهد. همچنین در این روش می توان تعداد زیادی از عوامل را دخالت داد و با استفاده از نظر کارشناسی وزن هر عامل را به دست آورد. این روش همچنین دارای مبنای نظری قوی است و بر اصول بدیهی بنا شده است (قدسی پور، ۱۳۸۸). در روش AHP، ابتدا به منظور تعیین ارجحیت عوامل مختلف و تبدیل آن ها به مقادیر کمی از قضاوت های شفاهی (در این مرحله پرسشنامه ای در اختیار صاحب نظران و متخصصانی که به نوعی با حوزه مورد مطالعه آشنایی داشتند قرار گرفت، پس از جمع آوری پرسشنامه به همراه ماتریس مقایسات زوجی و مشخص نمودن میزان ارجحیت هر یک از افراد، اطلاعات مربوطه استخراج و اولین پردازش اطلاعات توسط نرم افزار Expert Choice انجام شد. بدین منظور ابتدا سازگاری مقایسات تعیین و بعد از قابل قبول بودن اولویت های به دست آمده، معدل نظرات ارائه شده به روش میانگین هندسی محاسبه و ضرایب هر یک از ماتریس های مقایسات زوجی تعیین گردید) بر مبنای مقایسات زوجی استفاده می شود، به طوری که تصمیم گیرنده ارجحیت یک عامل را نسبت به علل دیگر به صورت جدول ۱ در نظر گرفته و این قضاوت ها را به مقادیر کمی بین ۱ الی ۹ تبدیل می نماید (قدسی پور، ۱۳۸۸). سپس نتایج این مقایسات، برای محاسبه شاخص سازگاری

1. Zhang

2. Deng

3. Lin

4. Lee

به نرم‌افزار Expert Choice وارد می‌شود. اگر شاخص محاسبه‌شده کمتر از ۱/۰ باشد نتایج قابل قبول بوده و در غیر این صورت باید دوباره در وزن دهی تجدیدنظر شود.

جدول ۱: طبقه‌بندی ارجحیت مقادیر وزن‌ها بر اساس قضاوت کارشناسی

مقدار عددی وزن‌ها	توصیف زبانی ارجحیت طبقات
۹	کاملاً مهم یا کاملاً مطلوب‌تر
۷	اهمیت خیلی قوی
۵	اهمیت یا مطلوبیت قوی
۳	کمی مطلوب‌تر یا کمی مهم‌تر
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۲، ۴، ۶، ۸	اولویت بین فواصل

### روش ترکیبی AHP-Fuzzy

در سال‌های اخیر ترکیبی از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فازی که به AHP-Fuzzy معروف می‌باشد مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، قضاوت‌های منطقی‌تری در رابطه با اولویت‌بندی معیارها و وزن دهی آن‌ها صورت می‌پذیرد. در حالت فازی معمولاً تصمیم‌گیران قضاوت‌های راحت‌تری را بایان قضاوت‌های بازه‌ای به‌جای بیان قضاوت‌های ثابت به سبب ماهیت فرآیند دودویی فازی انجام می‌دهند. بر اساس نظریه فازی عضویت اعضا در مجموعه به‌طور کامل نبوده و هر عضوی دارای درجه عضویت از صفر تا یک می‌باشد. به همین دلیل عددهای داده‌شده نه صفر است نه یک، یعنی در واقع در منطق فازی قطعیت موجود در منطق بولین (یا صفر یا یک) وجود ندارد و هر لایه در مقیاس بین صفر و یک درجه‌بندی می‌شود (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۴).

مراحل اجرای مدل در این تحقیق شامل چهار مرحله زیر بوده است :

۱. **تعیین پارامترهای مورد استفاده:** تعیین پارامترهای مورد استفاده جهت شناسایی مناطق مستعد فرونشست بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و وضعیت محیطی دشت شبستر - صوفیان بوده است.

۲. **فازی سازی لایه‌های اطلاعاتی:** پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، با توجه به ارزشی که هر لایه جهت توسعه فرونشست دارد، لایه‌ها در نرم‌افزار Arc-GIS فازی سازی شده‌اند.

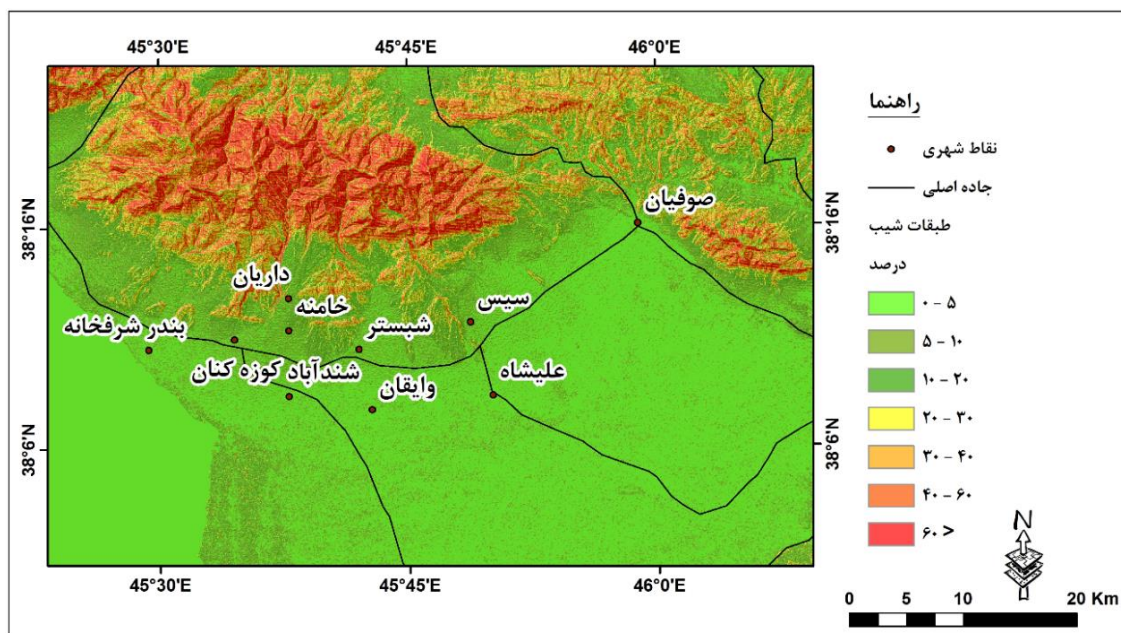
۳. **وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی:** با توجه به اینکه ارزش و اهمیت لایه‌ها یکسان نیست، پس از فازی سازی لایه‌ها، با استفاده از مدل AHP به لایه‌ها وزن داده‌شده است و سپس وزن به‌دست‌آمده بر روی هر یک از لایه‌ها اعمال شده است.

۴. **تلفیق و ترکیب لایه‌های اطلاعاتی:** پس از اعمال وزن لایه‌ها، لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از عملگر گامای فازی باهم ترکیب‌شده و در نهایت نقشه نهایی مناطق مستعد فرونشست زمین در دشت شبستر - صوفیان در ۵ کلاس تهیه‌شده است.

### تهیه لایه‌های اطلاعاتی

در تحقیق حاضر به‌منظور شناسایی مناطق مستعد فرونشست زمین، از معیارهای شیب، ارتفاع، واحدهای ژئومورفولوژی، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی و افت منابع آب استفاده‌شده که بر مبنای نظر کارشناسان و بر اساس ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه انتخاب‌شده است، در ادامه به تشریح هر کدام معیارهای مورد استفاده پرداخته‌شده است:

**شیب:** شیب حوضه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های محلی و منطقه‌ای است که زمان جریان سطحی و تمرکز آب در رودخانه را کنترل می‌کند، همچنین، شیب یک حوضه بر میزان آبدهی، میزان آب سطحی، رطوبت خاک و نگهداری آب، شدت نفوذ، تغذیه آبخوان و حرکت آب‌های زیرزمینی و مقدار آب زیرزمینی در حوضه تأثیر می‌گذارد (نایاک<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). هر چه شیب زمین بیشتر باشد، به دلیل پتانسیل رواناب بیشتر، میزان نفوذ کمتر خواهد بود (ذغیبی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). تخلیه در شیب‌های تند کمتر از شیب‌های ملایم است. اصولاً حوضه‌های با شیب تند اغلب دارای جریان‌های سیلابی هستند، در مناطقی که شیب زیاد دارند، سرعت آب افزایش می‌یابد و در نتیجه با انحلال لایه‌های سطحی، به‌ویژه در لایه‌های تبخیری، احتمال فرورانش افزایش می‌یابد (پور مراد و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین تمرکز فعالیت‌های کشاورزی و میزان بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی نیز در این مناطق بیش‌تر است، بنابراین مناطق کم شیب تر پتانسیل بالایی جهت فرورانش دارند (عالی پور اردی و همکاران، ۱۳۹۶). به دلیل وجود کوه‌های میشو، شیب از جنوب به شمال منطقه افزایش می‌یابد. شیب‌های (۵-۱۰٪) برای ذخیره آب‌های زیرزمینی خوب در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۲ نقشه طبقات شیب منطقه مورد مطالعه نشان داده است که بر اساس آن، حدود ۶۴ درصد منطقه را طبقات با شیب کمتر از ۱۰ درصد در بر گرفته است که عمدتاً شامل مناطق جنوبی منطقه می‌شود.



شکل ۲: نقشه طبقات شیب منطقه مورد مطالعه

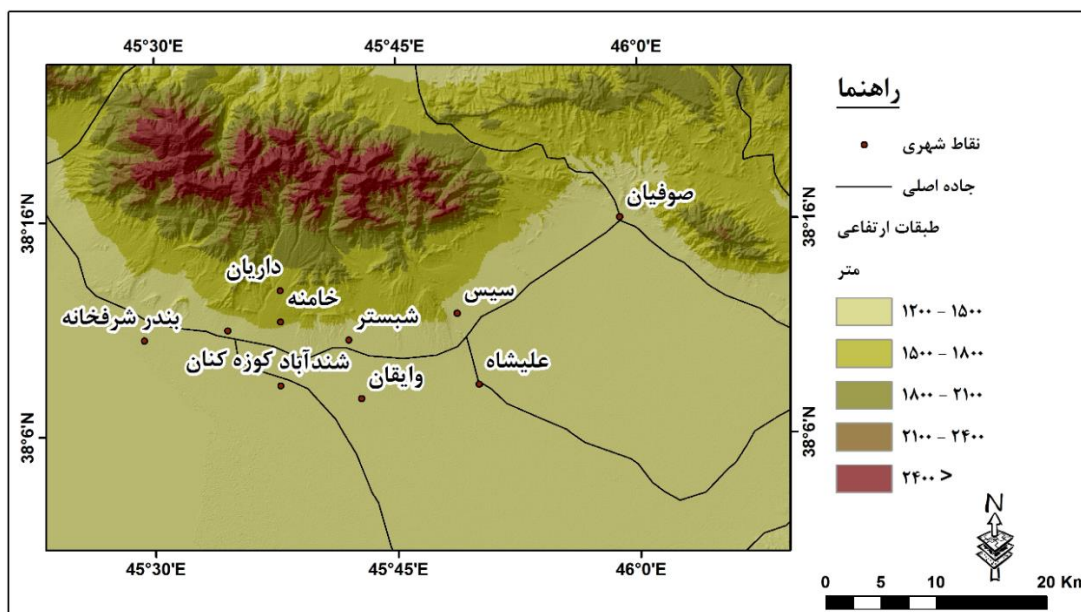
**ارتفاع:** ارتفاع نیز از عوامل مؤثر در وقوع مخاطره فرورانش است. به‌طور معمول، مناطق دارای ارتفاع کم، به دلیل میزان بارش کم‌تر و همچنین تراکم زیاد اراضی کشاورزی و فعالیت‌های انسانی، پتانسیل فرورانش بیش‌تری دارند. نواحی مرتفع به دلیل وجود سنگ‌بستر مقاوم‌تر، مستعد فرورانش خیلی کمی هستند (آلوگایل و همکاران، ۲۰۲۱). در این مطالعه، جهت بررسی وضعیت ارتفاعی منطقه، از لایه ارتفاعی رقومی (DEM) ۱۲/۵ متر ایجاد شد. پنج طبقه ارتفاعی برای مدل‌سازی تعریف شد (شکل ۳). بر اساس نتایج حاصله، بخش زیادی از منطقه در طبقه ارتفاعی ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ متری قرار دارد

1. Nayak

2. Zghibi



به طوری که این طبقه با ۱۷۸۹ کیلومتر مربع وسعت، حدود ۶۰/۵ درصد از منطقه را شامل می‌شود. مناطق جنوبی منطقه دارای ارتفاع کم‌تری هستند، این مناطق شامل واحدهای مخروطه افکنه و دشت و پهنه آبی است.



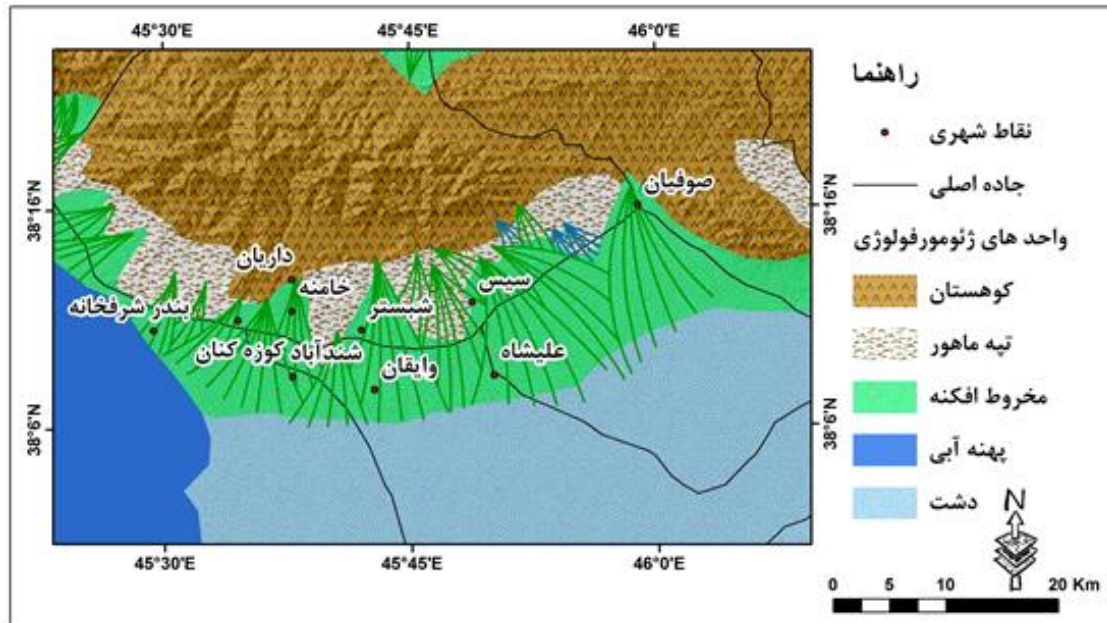
شکل ۳: نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه

### واحدهای ژئومورفولوژی

ژئومورفولوژی یک منطقه منعکس‌کننده اشکال مختلف زمین است که شامل توصیف، انواع و فرآیندهای فیزیکی آن‌ها می‌شود که به ارزیابی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی و ارزیابی مناطق احتمالی آب زیرزمینی کمک می‌کند (ذغیبی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). عوارض ژئومورفیک منطقه مورد مطالعه به پنج واحد طبقه‌بندی شدند که شامل: کوهستان و تپه‌ماهور، مخروط افکنه، پهنه آبی، دشت رسوبی است. واحدهای ژئومورفولوژی، تعیین‌کننده نوع فعالیت‌های انسانی در منطقه است، بنابراین این واحدها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها جهت شناسایی مناطق مستعد وقوع فرورانشست محسوب می‌شود. پتانسیل وقوع فرورانشست در واحدهای مختلف ژئومورفولوژی متفاوت است، به همین دلیل از این پارامتر به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر استفاده شده است. به‌طور معمول واحدهای دشت و مخروطه افکنه نسبت به واحد کوهستان، پتانسیل بیش‌تری جهت وقوع فرورانشست دارد. در واقع با توجه به اینکه بخش زیادی از اراضی کشاورزی و همچنین ساخت‌وسازها در واحدهای دشت و مخروطه افکنه صورت می‌گیرد، بنابراین این واحدها پتانسیل فرورانشست بالایی دارند (جوادی، ۱۴۰۰) (شکل ۴).

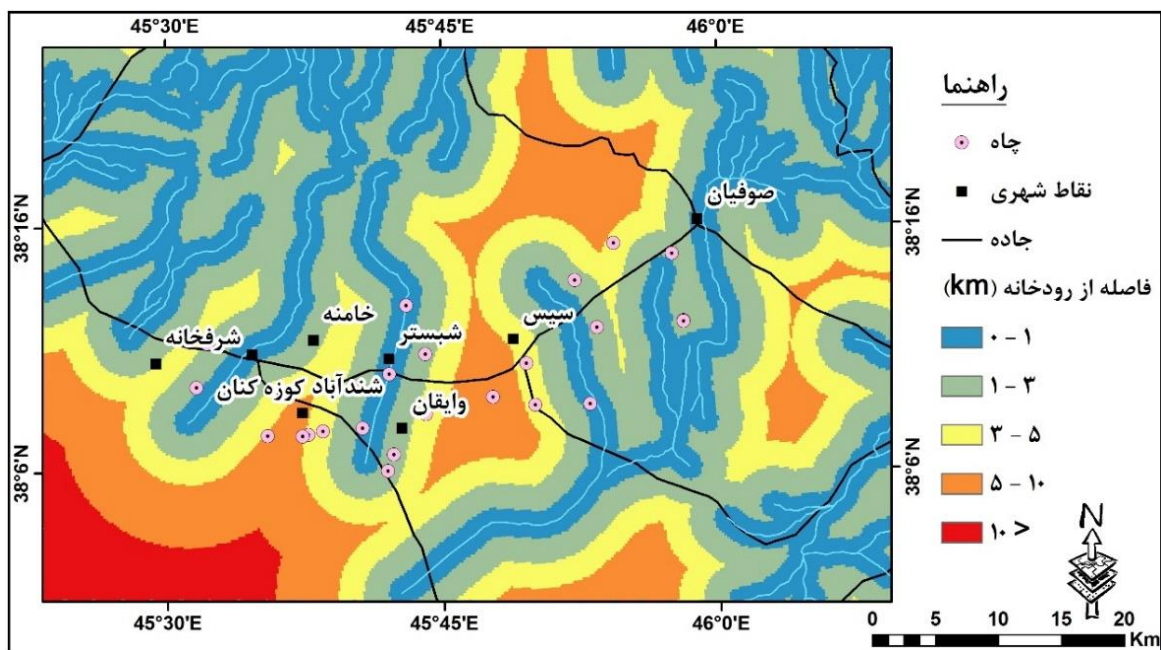
<sup>۱</sup>. Zghibi





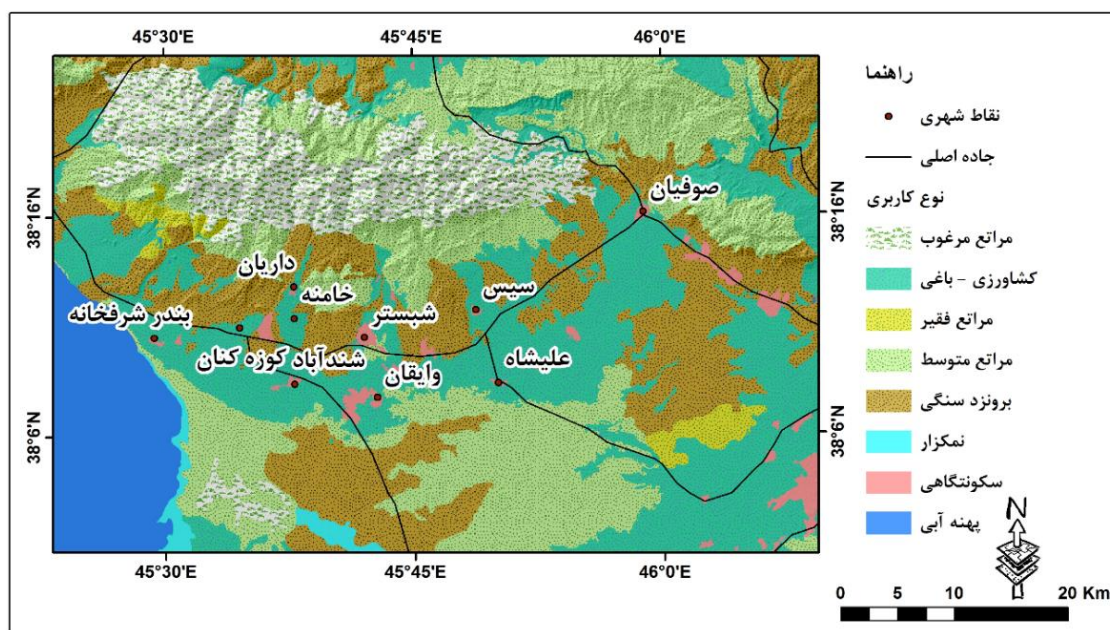
شکل ۴: نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

فاصله از رودخانه: از دیگر عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست، فاصله از رودخانه است. به طور معمول مناطق نزدیک به رودخانه نسبت به مناطق دورتر، کمتر با افت منابع آب زیرزمینی مواجه هستند و همین مسئله سبب شده است که مناطق نزدیک به رودخانه دارای پتانسیل فرونشست کمتری باشند (شایان و همکاران، ۱۳۹۵). برای تولید لایه فاصله تا رودخانه، شبکه رودخانه و جریان نشان داده شده در نقشه توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در ArcGIS 10.7 استخراج شد. نقشه فاصله از رودخانه‌ها با پنج طبقه با استفاده از روش‌های فاصله اقلیدسی ایجاد شد (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه فاصله از رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه

**کاربری اراضی:** کاربری زمین و پوشش زمین تأثیر عمده‌ای بر توسعه آب‌های زیرزمینی دارد. زمین‌های کشاورزی معمولاً به دلیل وجود فضاهای منفذی در خاک، اجازه نفوذ بیشتری را می‌دهند، که آب را در ریشه‌ها به دام می‌اندازد و نگه می‌دارد و با شل شدن سنگ و خاک، مسیری را برای نفوذ آب به سطح ایجاد می‌کند. برعکس، زمین‌های شهری و بایر به دلیل از دست دادن سطح نفوذپذیر و افزایش پتانسیل رواناب، نفوذ را کاهش می‌دهند. از این رو، مناطق کشاورزی و پهنه‌های آبی به‌عنوان مکان‌های مناسبی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند، درحالی‌که سکونتگاه‌ها و زمین‌های بایر پتانسیل تغذیه ضعیفی از آب زیرزمینی دارند (ذغیبی و همکاران، ۲۰۲۰). بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه را مراتع (۵۱٫۶٪؛ ۱۸۱۹ کیلومتر مربع) و پس‌از آن زمین‌های کشاورزی (۶۹٫۴۲٪؛ ۳۰۴٫۰۶ کیلومتر مربع)، سکونتگاه‌های روستایی/شهری (۱٫۶٪؛ ۳۷٫۸۹ کیلومتر مربع) و پهنه آبی (۷٫۳٪؛ ۴۷ کیلومتر مربع) است. در نتیجه نوع کاربری اراضی از عوامل انسانی مهم در تشدید وقوع فرونشست است. در واقع، بهره‌برداری‌های انسان یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست محسوب می‌شود، به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت‌وسازها، مستعد وقوع فرونشست هستند. بررسی نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بیانگر این است که مناطق میانی و جنوبی محدوده به دلیل تراکم بالای اراضی کشاورزی و نواحی سکونتگاهی، مستعد وقوع مخاطره فرونشست هستند. در شکل ۶، نقشه طبقات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



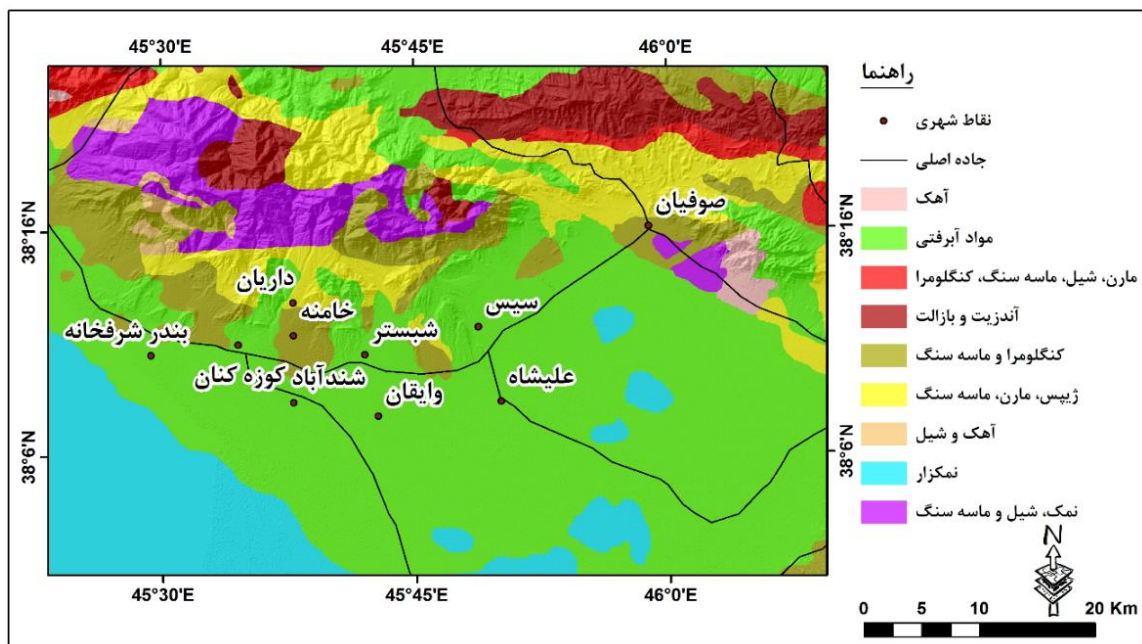
شکل ۶: نقشه کاربری اراضی و سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

**سنگ‌شناسی:** مهم‌ترین عامل در ایجاد فرونشست، پایداری اجزای تشکیل‌دهنده سطح حوضه در برابر فرسایش است (لانگی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). استحکام سازندها به نوع، و ترکیب کانی‌های تشکیل‌دهنده، نحوه تبلور، میزان منافذ، چینه‌بندی، نحوه فرسایش، بین لایه‌ای و ... بستگی دارد (سمرارو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). سنگ‌شناسی یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده وقوع فرونشست و میزان حساسیت آن است. از آنجایی که سازندهای رسی و سیلتی میزان فرونشست را افزایش

<sup>1</sup>. Lange

<sup>2</sup>. Semeraro

می‌دهند، ژئوپس و سنگ‌های کربناته به دلیل انحلال ناشی از وجود آب قرار می‌گیرند که سرعت فرونشست را نیز افزایش می‌دهد (آلوگایل<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از نظر نوع سنگ‌شناسی دارای تنوع زیادی است، میزان تخلخل و نفوذپذیری جریان روانابها و تغذیه آبخوان متفاوت بوده، بنابراین نقش این پارامتر در پتانسیل فرونشست زمین در این منطقه نیز متفاوت خواهد بود. بر اساس نقشه واحدهای سنگ‌شناسی منطقه، مناطق جنوبی منطقه به دلیل قرار گرفتن بر روی رسوبات آبرفتی، دارای پتانسیل فرونشست بالاتری است. در شکل ۷ نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

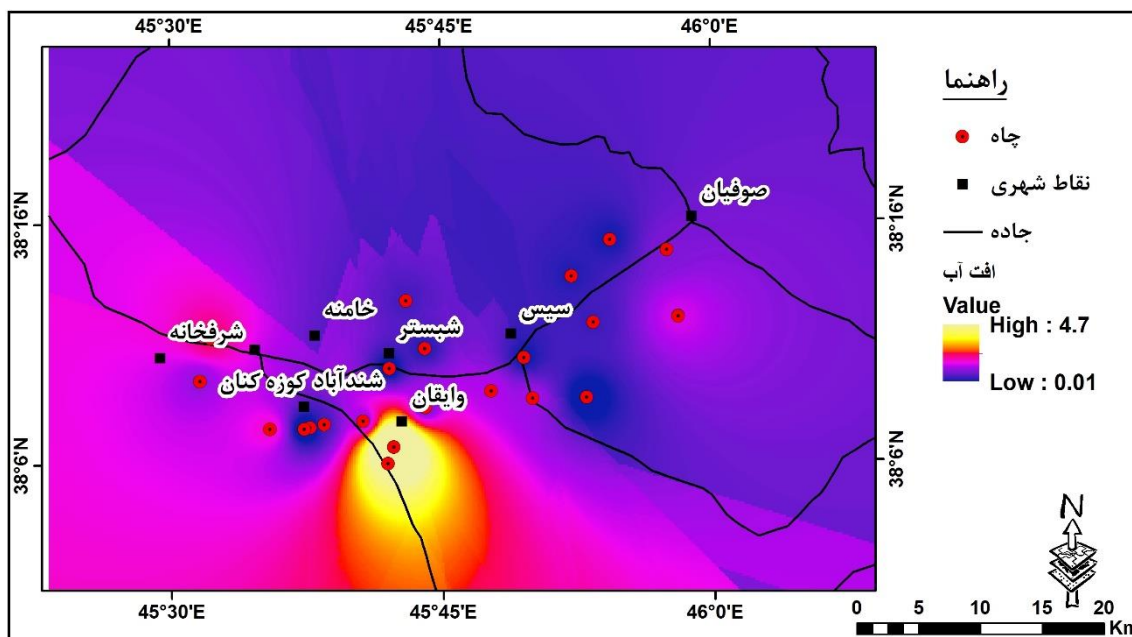


شکل ۷: نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

**افت منابع آب زیرزمینی:** برای بررسی اثر برداشت آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین، از داده‌های به دست آمده از ۲۳ حلقه چاه پیژومتریک برای دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ که توسط اداره مدیریت منابع آب ایران ارائه شده است، استفاده شد. نقشه افت آب‌های زیرزمینی تولید شده بر اساس افت ۱۸ ساله سفره آبخوان، با درون‌یابی بر اساس روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) تولید شد (شکل ۸). بر اساس نتایج حاصله، میانگین افت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۴/۷ متر در سال بوده است که از نظر پراکنش مکانی، مناطق میانی و جنوبی منطقه دارای بالاترین میزان افت بوده‌اند.

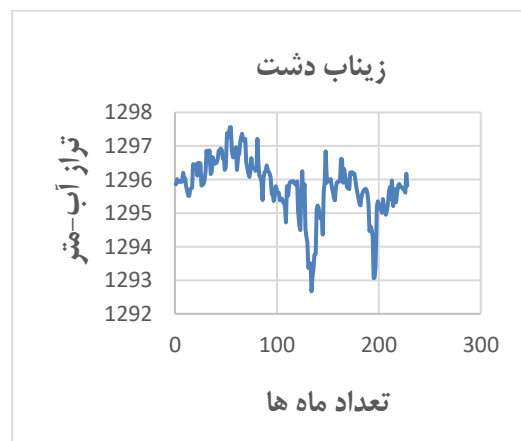
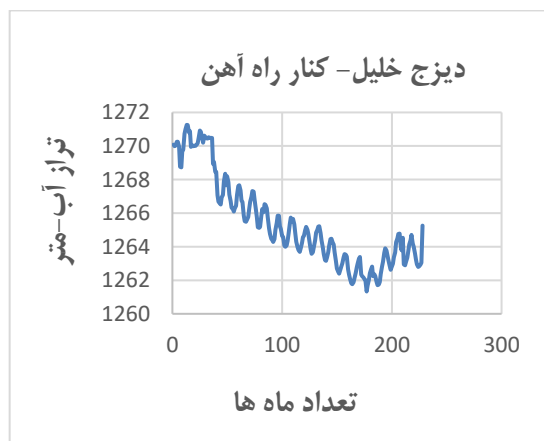
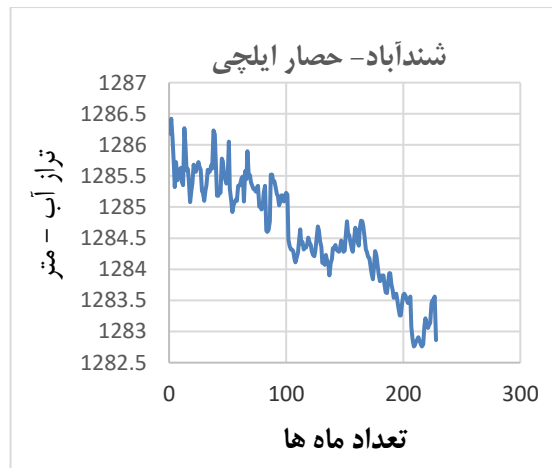
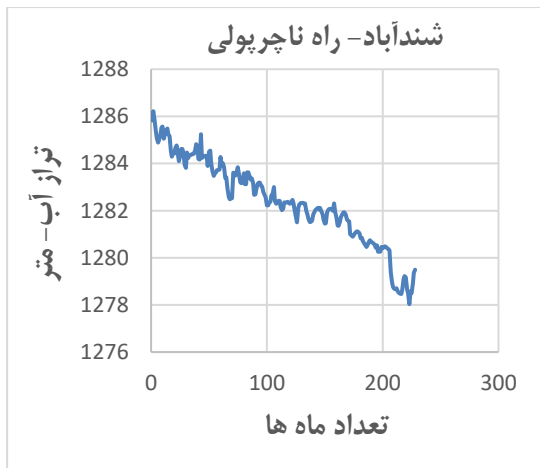
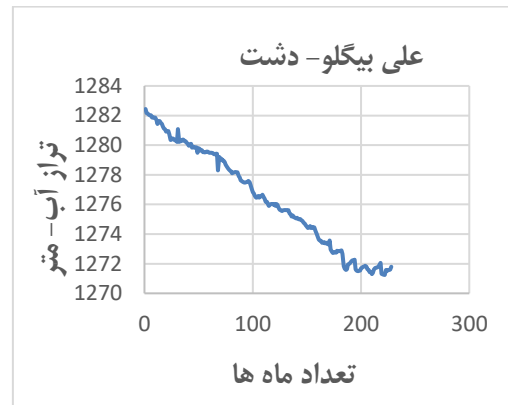
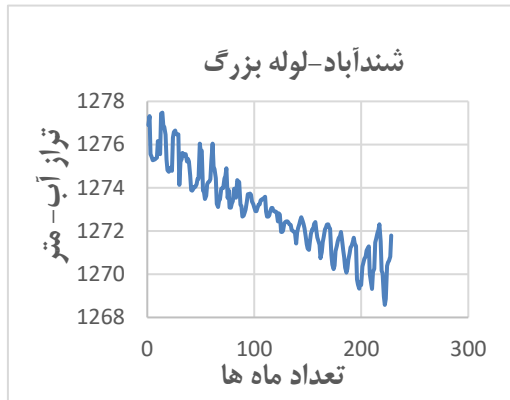
<sup>۱</sup>. Alogayell

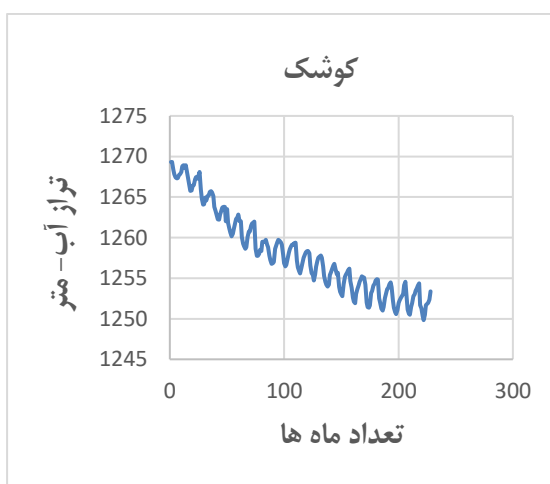
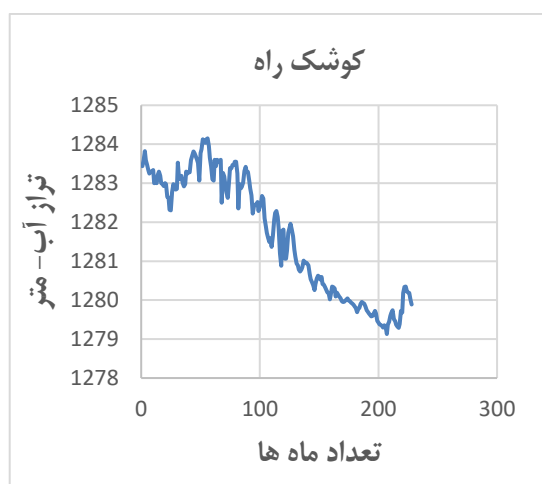
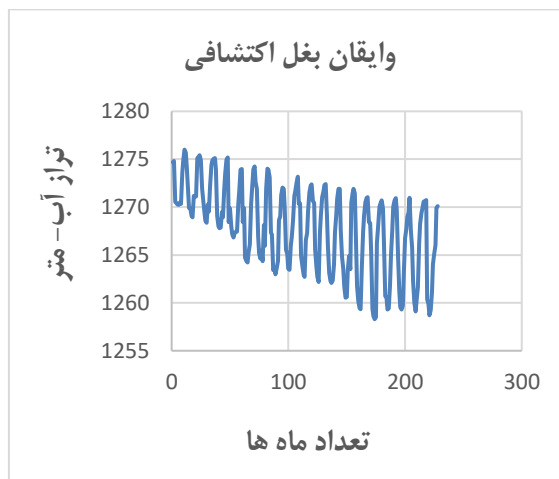
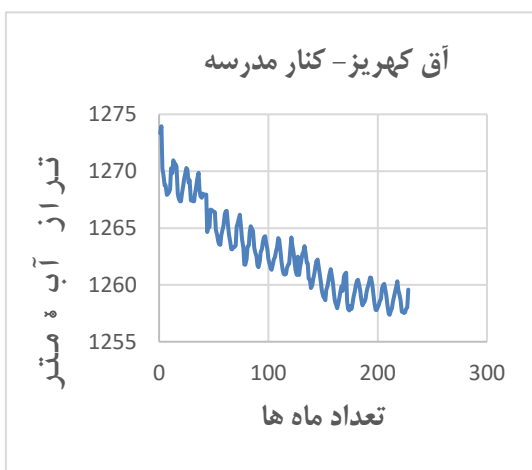
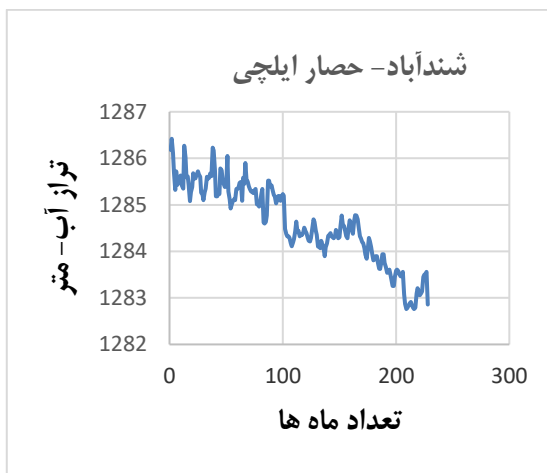
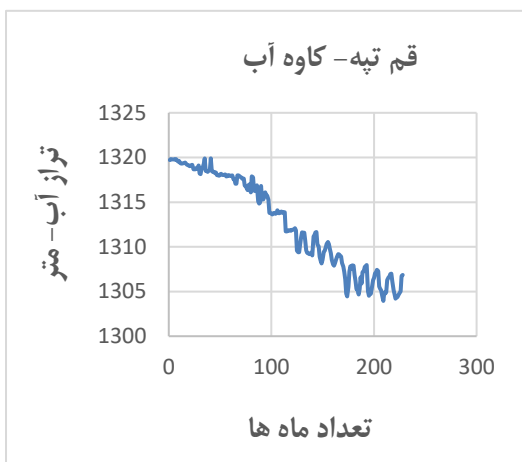


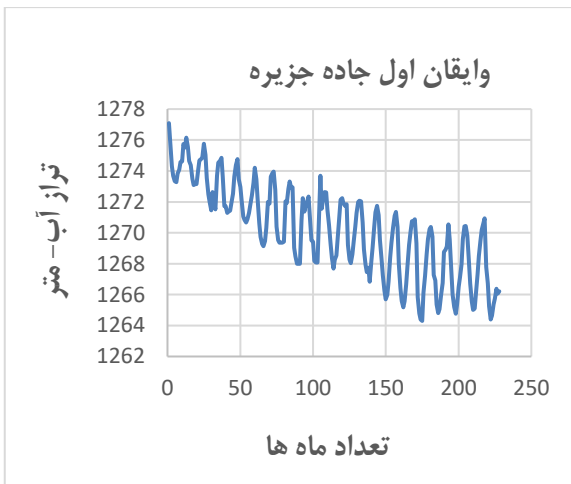
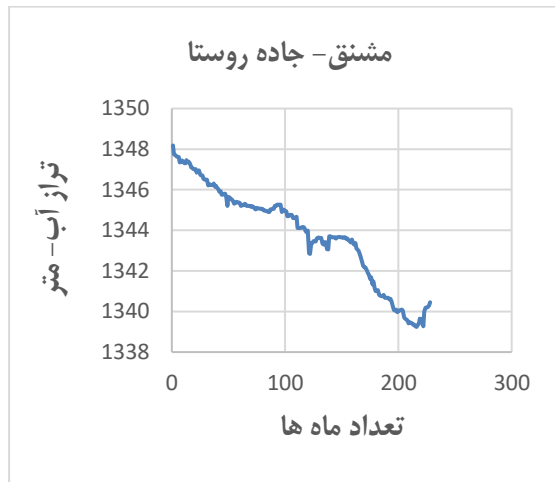
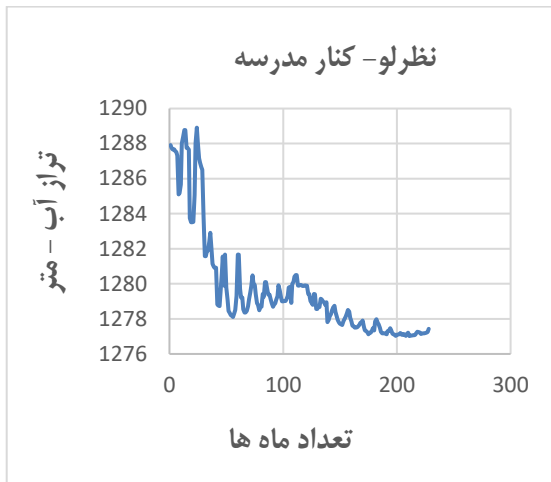


شکل ۸: نقشه افت منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

همچنین برای بررسی تغییرات زمانی نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی، از داده‌های ماهانه سطح آب در ۲۳ چاه مشاهداتی که دارای داده‌های کامل بوده در بازه زمانی ۱۸ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸) استفاده شده است. شکل ۹، هیدروگراف مربوط به تغییرات سری زمانی سطح آب در ۲۳ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت شبستر- صوفیان را نشان می‌دهد. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرارگرفته در آبخوان شبستر- صوفیان نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان می‌دهد. روند نزولی هیدروگراف‌ها نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. با توجه به اینکه حدود ۹۰ درصد از منابع آب زیرزمینی دشت شبستر به مصارف آب کشاورزی و به ترتیب ۸ و ۲ درصد دیگر آن، به بخش‌های شرب و صنعت اختصاص داده شده است (حسین زاد و همکاران، ۱۳۹۸)، و تا سال ۲۰۲۰ بیشترین افزایش باغات (۱۳/۴ درصد) و اراضی کشاورزی (۲/۷) در محدوده رو ستاهای شهر ستان شبستر بوده است (محرمی و همکاران، ۱۳۹۵). این امر منجر به افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان عامل اصلی افت شدید سطح آب زیرزمینی خواهد شد که تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی نیز این وضعیت را تشدید خواهد کرد. همبستگی بالا بین شاخص بارندگی و ارتفاع سطح آب سفره زیرزمینی حاکی از آن بوده است که خشکسالی عامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی در دشت شبستر می‌باشد ولی به تنهایی عامل بحران نیست بلکه عوامل دیگری همچون اضافه برداشت‌ها از سطح آب زیرزمینی نیز در کاهش این منبع مهم نقش زیادی دارد (حسین زاد و همکاران، ۱۳۹۸).







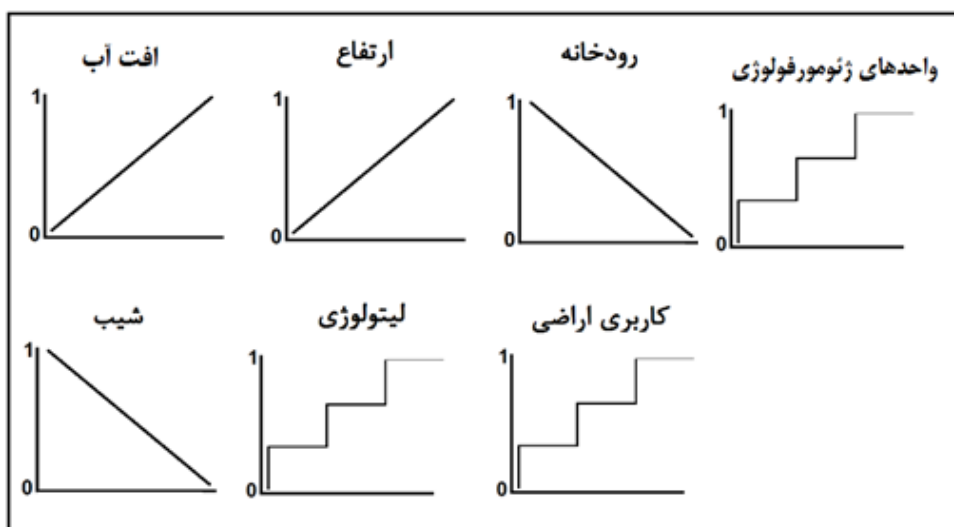
شکل ۹: نمودارهای سری زمانی چاه‌های مشاهداتی دارای افت آب و فرونشست در محدوده مطالعاتی

### بحث و یافته‌ها

#### فازی سازی لایه‌های اطلاعاتی

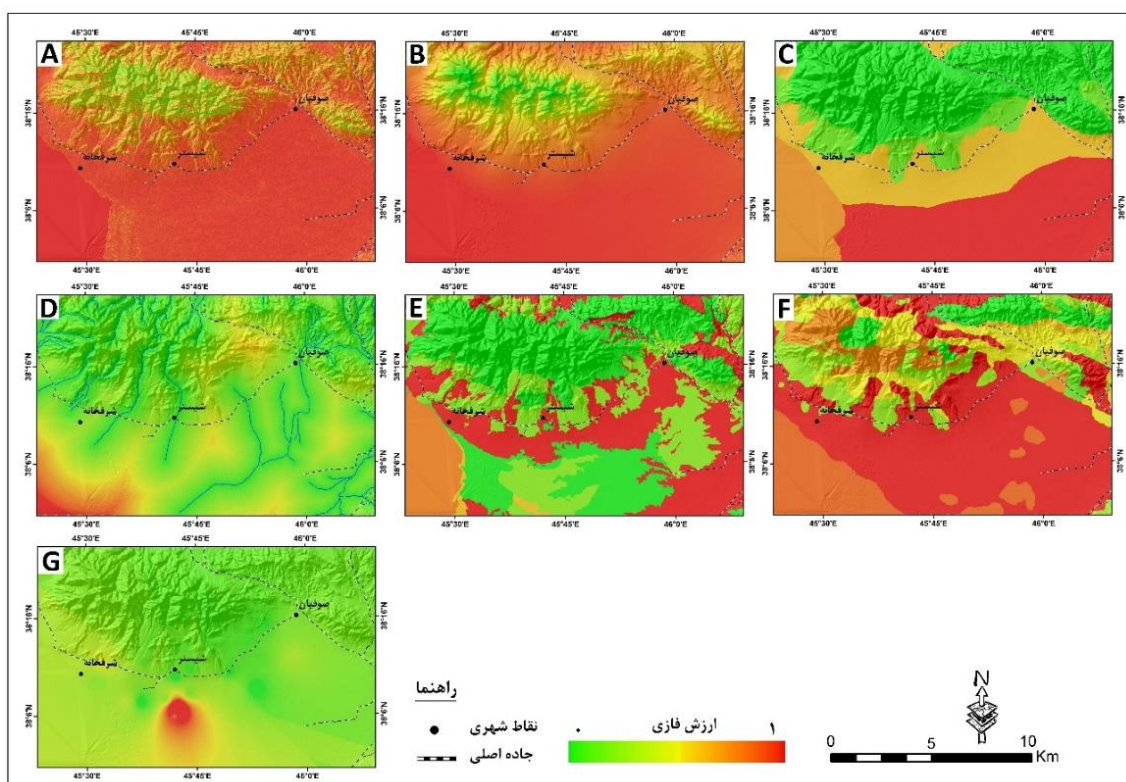
در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست، ابتدا لایه‌های تهیه‌شده، فازی سازی شده است. مزیت فازی سازی داده‌ها به دلیل تدریجی بودن مرز تغییر ویژگی لایه‌های منطقه است که با طبیعت همخوانی بیشتری دارد. فازی سازی لایه‌ها در نرم‌افزار Arc-GIS صورت گرفته است. به منظور فازی سازی لایه‌ها، به مناطقی که مستعد وقوع فرونشست هستند، ارزش نزدیک به یک و به مناطقی که پتانسیل کمتری جهت وقوع فرونشست دارند، ارزش نزدیک به صفر داده شده است. در این پژوهش توابع عضویت فازی لایه‌ها به صورت زیر تعریف شده است (۱۰).





شکل ۱۰: تابع عضویت فازی لایه‌های اطلاعاتی

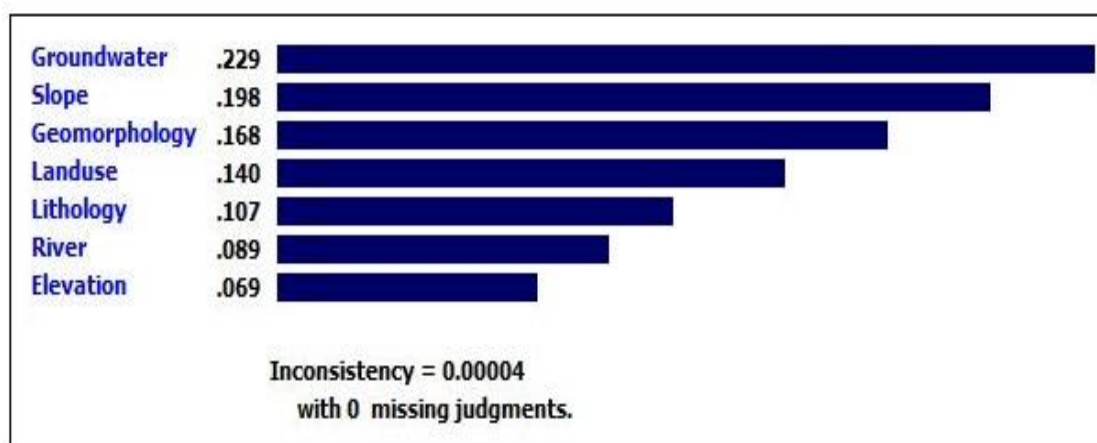
برای این منظور، به مناطق کم شیب، کم ارتفاع، واحد دشت، مناطق دور از رودخانه، اراضی کشاورزی، مواد آبرفتی و همچنین مناطق دارای بیشترین میزان افت آب، ارزش نزدیک به یک داده شده است. همچنین به مناطق دارای شیب و ارتفاع زیاد، واحد کوهستان، مناطق نزدیک به رودخانه، مراتع مرغوب، مناطق دارای سنگ‌شناسی آندزیتی و بازالتی و مناطق دارای افت آب زیرزمینی کم، ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: نقشه فازی سازی شده لایه‌های اطلاعاتی (A) شیب (B) ارتفاع (C) واحدهای ژئومورفولوژی (D) فاصله از رودخانه (E) کاربری اراضی (F) سنگ‌شناسی (G) افت آب زیرزمینی

### وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی

پس از شناسایی و آماده‌سازی کلیه معیارها و عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، در این مرحله لازم است نقشه‌های فاکتور هریک از لایه‌ها آماده شود. آماده‌سازی نقشه‌های فاکتور مشتمل بر دو مرحله پردازش و وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی می‌باشد. برای این منظور از روش معمول پردازش داده‌ای موجود در GIS مانند تبدیل ساختار برداری به ساختار رستری، ترکیب چندلایه به صورت یک لایه، تهیه نقشه آنالیز و طبقه‌بندی مجدد و ... استفاده می‌شود. از آنجایی که معیارهای مختلف ماتریس تصمیم در شناسایی مناطق مستعد فرونشست از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند، دانستن ضریب اهمیت یا وزن هر یک از این معیارها در تصمیم‌گیری و ارزیابی ضروری است (عطایی، ۱۳۸۰). وزن هر معیار بیانگر میزان ارزش هر معیار نسبت به سایر معیارها می‌باشد که مجموع این وزن‌ها باید ۱ باشد. در این پژوهش اولویت‌دهی از طریق پرسش‌نامه و دیدگاه‌های کارشناسان امر صورت گرفته و مقدار آن با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice محاسبه گردید (شکل ۱۲). در منطقه مورد مطالعه، عامل افت سطح آب‌های زیرزمینی و سپس شیب زمین مؤثرترین عامل تأثیرگذار در وقوع فرونشست شناخته شده‌اند.



شکل ۱۲: وزن لایه‌های اطلاعاتی بر اساس مدل AHP

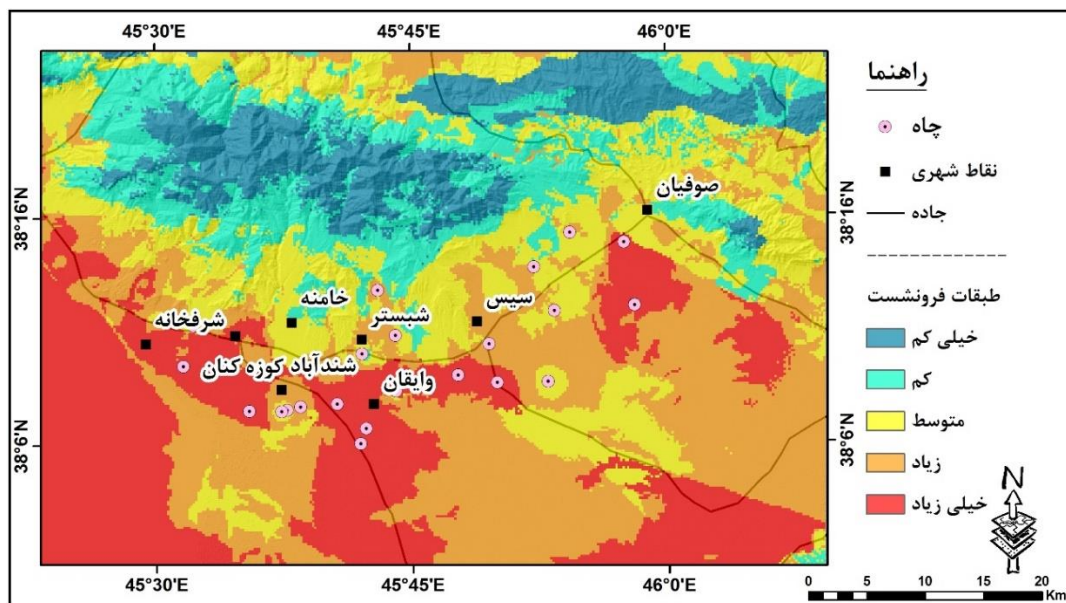
### تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

پس از وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی، در محیط GIS بر روی شبکه مرجع محدوده مورد مطالعه تمامی فاکتورها از شکل برداری به رستری تبدیل شدند. در نهایت وزن به دست آمده از طریق مدل AHP وزن به دست آمده بر روی تمامی معیارها اعمال شد و نتیجه نهایی حاصل گردید. همچنین برای مدل فازی با استفاده از عملگر گامای فازی نقشه‌های فازی شده باهم تلفیق شدند. جهت تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر فازی ضرب و همچنین حساسیت خیلی کم فازی جمع، از عملگر فازی گاما استفاده شده است. این عملگر برحسب حاصل ضرب جبر فازی و حاصل جمع جبر فازی است که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$\mu = (\mu \text{ fuzzy sum})^{\gamma} \times (\mu \text{ fuzzy product})^{1-\gamma} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه،  $\gamma$  پارامتر انتخاب شده در محدوده صفر و یک است. وقتی  $\gamma$  برابر یک باشد ترکیب همان جمع جبری فازی خواهد بود، اما وقتی  $\gamma = 0$  باشد، ترکیب اصلی برابر با حاصل ضرب جبری فازی است. انتخاب درست و آگاهانه  $\gamma$  بین صفر و یک مقادیری را در خروجی به وجود می‌آورد که نشان‌دهنده سازگاری قابل‌انعطاف میان گرایش‌های کاهش و افزایشی دو عملگر جمع و ضرب فازی می‌باشد. نتایج به دست آمده از این عملگر نسبت به سایر عملگرها از دقت بیشتری

برخوردار می‌باشد (حیدری آقا گل و همکاران، ۱۳۹۴). برای عملگر گاما پس از تلفیق و ارزیابی هر کدام از معیارها از گامای ۰/۷ استفاده گردیده است. پس از همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی، نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع فرونشست در پنج طبقه تهیه شده است (شکل ۱۳). بر اساس نقشه تهیه شده، مناطق جنوبی و غربی منطقه مورد مطالعه به دلیل ارتفاع و شیب کم، افت زیاد منابع آب زمینی، نوع کاربری و سنگ‌شناسی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع مخاطره فرونشست دارد.



شکل ۱۳: نقشه پهنه‌بندی فرونشست در محدوده مورد مطالعه به روش AHP-FUZZY

بنابر نتایج حاصل از مطالعه، از بین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، عامل افت آب‌های زیرزمینی، شیب، و سنگ‌شناسی منطقه به ترتیب مهم‌ترین عوامل ایجاد فرونشست در منطقه می‌باشند. مناطقی که دارای افت آب بیشتر بوده، مستعد فرونشست بالاتری هستند. بخش زیادی از مساحت منطقه را طبقات با شیب کمتر از ۵ درصد دربر گرفته است به طوری که این طبقات با مجموع ۱۴۵۹ کیلومترمربع وسعت، حدود ۵۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را در بر گرفته که عمدتاً شامل مناطق جنوبی منطقه می‌شود. در مناطق با شیب کمتر، قابلیت نفوذ رواناب‌ها بیشتر خواهد بود، که این امر به لحاظ تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی اثر مثبتی محسوب می‌شود، از این‌رو فعالیت‌های استحصال آب نیز در این شیب‌ها بیشتر است و افت آب نیز فزونی خواهد یافت که فرونشست را در منطقه سبب می‌شود. طبقات با شیب بیش از ۴۰ درصد نیز با مجموع ۳۳۵ کیلومترمربع وسعت، حدود ۱۱/۳ درصد از مساحت منطقه را دربر گرفته که عمدتاً شامل مناطق شمالی منطقه است. شیب‌های بیش از ۴۰ درصد مستعد فرونشست نبوده‌اند. واحدهای ژئومورفولوژیکی مخروطه‌افکنه و دشت به ترتیب با ۶۱۹ و ۷۹۴ کیلومترمربع وسعت، ۲۰/۹ و ۲۶/۹ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شوند. مخروطه‌افکنه‌ها هم به علت حاصلخیزی و امکان دسترسی به منابع آب زیرزمینی و سطحی از لحاظ فعالیت‌های کشاورزی و سکونتگاه شهرهای مهم شبستر، صوفیان و شرفخانه و .. می‌باشد. مواد آبرفتی با ۱۴۹۰ کیلومترمربع وسعت، حدود ۵۰/۱ درصد از مساحت محدوده را شامل می‌شود، که نقش مؤثری در تغذیه منابع آب زیرزمینی دشت دارد، به همین خاطر، مستعد فرونشست خیلی زیاد و زیاد بوده است و تقریباً تمامی چاه‌های پیژومتری منطقه روی آن احداث شده است. طبقه نم‌کزار که شامل محدوده دریاچه ارومیه است با ۳۵۶ کیلومترمربع، ۱۲ درصد از منطقه را دربر گرفته نیز مستعد فرونشست خیلی بالا است. طبقه ژئیس، مارن و ماسه‌سنگ با ۳۳۸ کیلومترمربع وسعت، ۱۱/۴ درصد از منطقه و همچنین طبقه کنگلومرا و ماسه‌سنگ و طبقه آندزیت و بازالت به ترتیب با ۳۰۲ و ۱۹۲ کیلومترمربع وسعت، به ترتیب ۱۰/۲ و ۶/۵ درصد از مساحت منطقه را دربر گرفته‌اند که به

علت استحکام و نفوذپذیری پایین، چندان مستعد وقوع فرونشست نمی‌باشند. تأثیر عامل ارتفاع بر وقوع فرونشست به گونه‌ای است که با افزایش ارتفاع، دسترسی به منابع آب‌های سطحی بیشتر است و این عامل باعث می‌شود که دست‌اندازی به منابع آب‌های زیرزمینی از طریق حفر چاه کاهش بیابد. همچنین تمرکز مناطق مسکونی در دشت‌ها به مراتب بیشتر از مناطق مرتفع است و از طرفی جنس سازندهای زمین‌شناسی در مناطق مرتفع سخت‌تر و مقاوم‌تر است، به همین دلیل هر چه ارتفاع افزایش می‌یابد میزان فرونشست کاهش خواهد یافت (کیانی، ۱۳۹۵). نیمه جنوبی منطقه که منطبق بر واحد دشت و مخروطه‌افکنه است را طبقه ارتفاعی بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ متر دربرگرفته که به علت ارتفاع کمتر و نفوذپذیری بیشتر، امکان تغذیه آب زیرزمینی بیشتری داشته، از این رو مستعد فرونشست زیاد تا خیلی زیاد بوده‌اند. در نقاطی که ارتفاعی بالای ۱۵۰۰ متر که منطبق بر نواحی تپه ماهوری و کوهستانی شمال منطقه است احتمال وقوع فرونشست خیلی کم می‌باشد. زیرا نواحی مرتفع به دلیل وجود سنگ‌های بستری که در برابر هوا مقاوم هستند، کم است.

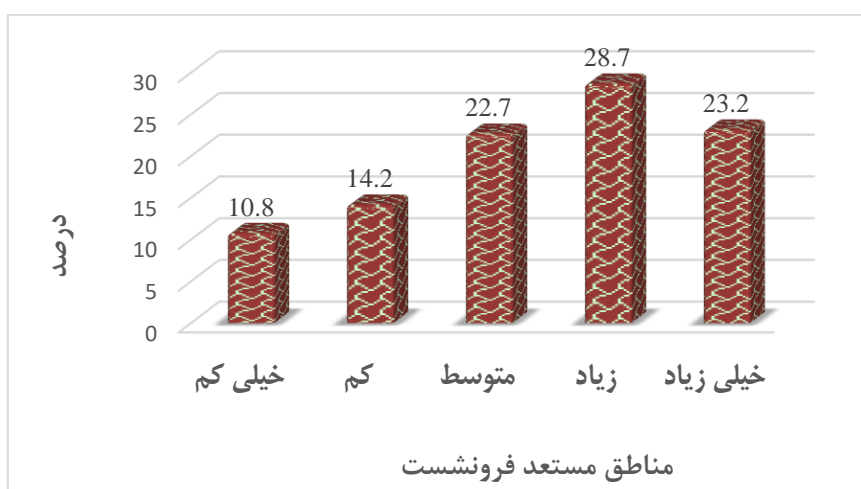
شبکه آبراهه‌های حوضه نشان می‌دهد که چگونه رواناب از سطح حوضه تخلیه می‌شود (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱). مناطق دور از رودخانه پتانسیل فرونشست بالاتری دارند. نوع پوشش زمین در هر منطقه‌ای متأثر از عوامل مختلف هیدرو اقلیمی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی منطقه است. منطقه مورد مطالعه از نظر نوع پوشش زمین نیز دارای تنوع زیادی دارد. بخش زیادی از مراتع و اراضی کشاورزی دربرگرفته است که همین خاطر مستعد فرونشست زیاد و خیلی زیاد بوده‌اند. بنابراین پتانسیل فرونشست در این منطقه نیز متفاوت خواهد بود.

در جدول ۲، نتایج مربوط به درصد و مساحت پهنه‌های دارای پتانسیل فرونشست منطقه از طریق مدل AHP-FUZZY ارائه شده است. مقدار ۲۸/۷ درصد و ۸۴۷/۸ کیلومترمربع از وسعت منطقه، دارای پتانسیل فرونشست بالا است. این پهنه بیشترین مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است. پهنه‌های با پتانسیل خیلی زیاد نیز ۶۸۵ کیلومتر و معادل ۲۳/۲ درصد را به خود اختصاص داده‌اند. دیگر پهنه‌ها پتانسیل فرونشستی متوسط تا خیلی کمی دارند.

جدول ۲: طبقات پهنه‌های مستعد فرونشست با روش AHP-FUZZY

درصد	مساحت (کیلومترمربع)	پهنه‌های مستعد فرونشست
۱۰/۸	۳۲۰/۷	خیلی کم
۱۴/۲	۴۲۰/۸	کم
۲۲/۷	۶۷۰/۹	متوسط
۲۸/۷	۸۴۷/۸	زیاد
۲۳/۲	۶۸۵	خیلی زیاد

مطابق نتایج حاصل به ترتیب ۲۸،۷ و ۲۳،۲ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد از نظر وقوع فرونشست قرار گرفته که حاکی از شرایط خطرناک منطقه است (شکل ۱۴). از آنجایی که عمده مصرف آب چاه‌ها در منطقه مربوط به فعالیت‌های کشاورزی است، پر کردن چاه‌های غیرمجاز، مقابله با اضافه برداشت چاه‌های مجاز، نصب کنتورهای هوشمند، تغییر در الگوی آبیاری باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی از الگوی سنتی به الگوی مدرن نظیر آبیاری قطره ای و بارانی و همچنین جلوگیری از حفر چاه‌های جدید در منطقه می‌تواند باعث کاهش میزان آب مصرفی شده و نتیجه آن کاهش استخراج آب از چاه‌ها است. این دو عامل باعث می‌شود که روند کاهشی سطح ایستابی کند شود که به طور مستقیم بر روی روند فرونشست منطقه تأثیرگذار است و می‌تواند از سرعت آن کم کند و حتی در بهترین حالت روند آن را متوقف کند.



شکل ۱۳: نمودار درصد مناطق مستعد فرونشست محدوده مطالعاتی با روش AHP-FUZZY

### نتیجه‌گیری

فرونشست زمین یکی از خطرناک‌ترین مخاطرات محیطی در میان بلایای طبیعی و انسان‌ساز است که می‌تواند تأثیرات فاجعه‌باری بر مناطق مختلف از جمله شهری و کشاورزی داشته باشد. بسته به وضعیت محیطی و انسانی موجود در هر منطقه، حالات متفاوتی جهت وقوع فرونشست دارد. مطالعات پیشین در مورد فرونشست بیش‌تر بر مبنای داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی متفاوتی جهت وقوع فرونشست صورت گرفته و مناطق مستعد فرونشست شناسایی شده است و در بسیاری از تحقیقات نیز فقط به بررسی وضعیت آبخوان و میزان افت آن پرداخته شده است و همچنین اخیراً نیز تحقیقات مختلفی به منظور برآورد فرونشست صورت گرفته ولی این مطالعات بدون توجه به وضعیت آبخوانهای منطقه صورت گرفته است. تحقیق حاضر برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین علاوه بر بررسی وضعیت آبخوان منطقه، وضعیت مناطق مستعد فرونشست منطقه را با به‌کارگیری پارامترهای ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و انسانی و ارتباط این فرونشست با وضعیت منابع آب این آبخوان مورد ارزیابی قرار داده است. در این پژوهش مناطق مستعد فرونشست زمین در دشت شبستر-صوفیان با استفاده از مدل AHP-Fuzzy، به‌عنوان یکی از روشهای تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره صورت گرفت. با توجه به نقشه‌نمایی مناطق مستعد فرونشست، طبقات بسیار پرخطر و پرخطر به ترتیب ۲۳/۲ و ۲۸/۷ درصد از کل مساحت حوضه را شامل می‌شوند و به‌طور عمده این مناطق در واحد دشتی و مخروط افکنه‌ای واقع در قسمت جنوب و غرب حوضه مطالعاتی قرار دارند. مناطق بسیار کم‌خطر و کم‌خطر عمدتاً در مناطق پرشیب واحد کوهستان و یا در مناطق با شیب بسیار بالا قرار دارند. این مناطق منطبق بر کاربری‌های کشاورزی و مرتعی است. فعالیت‌های کشاورزی (به دلیل برداشت آب‌های زیرزمینی موردنیاز برای آبیاری)، مراتع و مناطق شهری پرمصرف‌ترین مناطق محسوب می‌شوند. افزایش مصرف آب می‌تواند عاملی برای کاهش سطح آب‌های زیرزمینی باشد که احتمال فرونشست را افزایش می‌دهد. طبق نتایج حاصل از مطالعه، از بین عوامل مؤثر در فرونشست منطقه، عامل افت آب زیرزمینی، شیب، و سنگ‌شناسی به ترتیب مهم‌ترین عوامل ایجاد فرونشست در منطقه می‌باشند. در مورد عامل شیب می‌توان گفت، اکثر پیکسل‌های پرخطر، در حوضه مورد مطالعه، در شیب‌های بین صفر تا ۵ درصد قرار دارد. در این مقدار شیب، مواد سطحی و اصولاً ریزدانه که مستعد برای فرونشست می‌باشند وجود دارند. در حالی که در مناطق با شیب بیشتر از ۵ درجه فرونشست کمتری را تجربه کرده‌اند یا به‌طور کلی فرونشستی در این شیب‌ها رخ نداده است. در نقاط با ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر، و دارای پوشش نم‌کاری و مواد آبرفتی و همچنین مناطق با کاربری کشاورزی فرونشست بالایی داشته است. مناطق نزدیک به رودخانه دارای پتانسیل فرونشست کمتری بوده‌اند. تقریباً بیش از نیمی از منطقه (۵۱ درصد) مورد مطالعه



مستعد وقوع فرونشست زیاد تا خیلی زیاد است، این به معنای وضعیت بحرانی در این دشت آبرفتی است. همچنین نتایج سری زمانی چاه‌های مشاهداتی منطقه از طریق ترسیم نقشه هم‌افت آب و هیدروگراف چاه‌ها نشان داد که طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸، روند تغییرات سطح آب این چاه‌ها رو به پایین بوده و دچار افت شدیدی شده است، این مسئله می‌تواند به طور عمده به موضوع استحصال آب زیرزمینی برای آب شرب، کشاورزی و احتمالاً سایر عوامل مؤثر همچون زمین‌شناسی و تکنیکی مرتبط باشد. در واقع استفاده از داده‌های چاه‌های پیژومتری به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از طریق مدل AHP-Fuzzy بوده است. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر بیانگر این است که دشت شبستر - صوفیان در طی سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی همراه بوده است.

## منابع

- احمدی، س، سودمند افشار، ر، ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهار دولی استان‌های همدان و کردستان به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از فن پراکنش گره‌های دائمی. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۳، صص ۲۳۳-۲۱۹.
- آذر، ع، فرجی، ح، ۱۳۹۵، علم مدیریت فازی، چاپ پنجم، مؤسسه کتاب مهربان نشر، ۱۳۹۵.
- پیری، ح، امیر احمدی، ا، ادب، ح، المدرسی، س، ۱۳۹۹. ارزیابی دوگانگی فرونشست و فرارفت با استفاده از داده‌های راداری و مدل‌سازی فرونشست، چهارمین همایش ملی و نخستین همایش بین‌المللی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش‌ازدور و GIS) در آمایش سرزمین. یزد.
- جوادی، س. ر.، ۱۴۰۰. برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان - بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS، رساله دکتری، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.
- حسین زاده، ج، سرباز، آ، قربانی، م، ع، ۱۳۹۸. تأثیر شاخص‌های بارندگی روی مصرف منابع آب زیرزمینی و الگوی کشت (مطالعه موردی: دشت شبستر از حوزه دریاچه ارومیه)، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۱، ج ۱۳، فروردین - اردیبهشت ۱۳۹۸، صص ۲۳۲-۲۴۲.
- حیدری آقا گل، م، خطیب، م، هیهات، م، منصوری، ه، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (منطقه مورد مطالعه: استان خراسان جنوبی)، فصلنامه زمین‌ساخت، سال اول، شماره ۴، دانشگاه بیرجند، زمستان ۱۳۹۴.
- خان بیگی، ع، ۱۳۹۴. تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت روانسر - سنجابی با استفاده از GIS و مدل AHP، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- رحیمی، و، و پورخباز، ح، و اقدر، ح، و محمدیاری، ف. ۱۳۹۴. مقایسه مدل‌های Fuzzy AHP باکلی و ANP در ارزیابی توان جنگلداری (مطالعه موردی: حاشیه شهر بهبهان). بوم‌شناسی کاربردی، ۴(۱۳)، ۱۵-۳۰.
- زینالی، ع، و علاف نجیب، م، حسن پور اقدم، م. ۱۳۸۸. فرونشست زمین در دشت شبستر - صوفیان به دلیل افت سطح آب زیرزمینی، دومین کنفرانس سراسری آب، بهبهان، صص ۳۴-۲۷.
- سلطانی سیسی، غ، ۱۳۸۴. وضعیت مورفوتکتونیک و تئوتکتونیک شهرستان شبستر، بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شایان، س، یمانی، م، یادگاری، م، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست در حوضه آبریز قره‌چای، مجله هیدروژئومورفولوژی، دوره ۳، شماره ۹، صص ۱۵۸-۱۳۹.
- طاهری، ز، ندیری، ع، برزگری، ق، فیضی زاده، ب، ۱۳۹۶. پیشبینی پتانسیل فرونشست آبخوان دشت شبستر با استفاده از برنامه ریزی بیان ژن، دومین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست شهر مشهد، مشهد.

- عالی پور اردی، م، محمدی، ب، جعفری، ح، ۱۳۹۶. پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، نشریه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری، سال یازدهم، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۶.
- عزتی، س، ۱۳۹۴. بررسی فرونشست زمین در اثر برداشت از آب‌های زیرزمینی به روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت شبستر- صوفیان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه تبریز.
- فرزین کیا، ر، امیر احمدی، ا، زنگنه اسدی، م، زندی، ر، ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوبین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای فازی. فضای جغرافیایی. ۱۴۰۰؛ ۲۱ (۷۴): ۷۱-۵۱.
- قدسی پور، ح، ۱۳۸۷. فرایند تحلیل سلسله مراتبی. دانشگاه امیرکبیر، تهران.
- کاویانی راد، م، ۱۴۰۰. بازتاب‌های اجتماعی- امنیتی ابربحران فرونشست در ایران، فصلنامه علمی- تخصصی افق، شورای انجمن‌های علمی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، سال سوم، زمستان ۱۴۰۰.
- کوره‌پزان دزفولی، ا، ۱۳۹۵. اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربرد آن در مدل‌سازی مسائل مهندسی آب، چاپ سوم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۲۱۲-۲۲۵، ۱۳۹۴.
- کیانی، ف، عابدینی، م، احمدزاده، غ، ۱۳۹۷. بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز.
- محرمی، م، رسولی، ع، رستم زاده، ه، ۱۳۹۵. مدل‌سازی تأثیرات پسروری دریاچه ارومیه بر روستاهای ساحل شرقی دریاچه ارومیه با پردازش شی‌گرای تصاویر ماهواره‌ای، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۳، صص ۹۸-۸۱. پاییز ۱۳۹۵.
- ملکی، ا، رضایی، پ، ۱۳۹۵. پیش‌بینی مکان‌های در معرض خطر فرونشست دشت کرمانشاه با استفاده از مدل فازی، برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۲۰، شماره ۱، صص ۲۵۱-۲۳۵، بهار ۱۳۹۵.
- ندیری، ع، طاهری، ز، برزگری، ق، دیده بان، خ، ۱۳۹۷. ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، تحقیقات منابع آب ایران، سال چهاردهم، شماره ۲، صص ۱۸۵-۱۷۴، تابستان ۱۳۹۷.

- Alogayell, H. M., Al-Alola, S. S., Alkadi, I. I., Mohamed, S. A., Ismail, I. Y., & El-Bukmi, F. (2021). Spatial modeling of ground subsidence susceptibility along Al-Shamal train pathway in Saudi Arabia. *Open Geosciences*, 13(1), 1158-1173.
- Arabameri, A., Yariyan, P., & Santosh, M. (2021). Land subsidence spatial modeling and assessment of the contribution of geo-environmental factors to land subsidence: comparison of different novel ensemble modeling approaches.
- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C., & Renard, F. (2019). Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing*, 11(1), 85.
- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C., & Renard, F. 2019. Investigating Subsidence in the Bursa Plain, Turkey, Using Ascending and Descending Sentinel-1 Satellite Data. *Remote Sensing*, 11(1), 85.
- Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 146193.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Gholamhaydari, H., Karimi, H., Entezari, M., & Raamesht, M. H. (2021). Investigating Effective Factors in the Evolution of Karstic Sinkholes in Gachsaran Formation Using



- the Fuzzy Model (Case Study: Maroon Plain, Kohgilooye and Boyer-Ahmad Province). Spatial Planning, 11(3), 45-72.*
- Hamdani, R. S., Hadi, S. P., Rudiarto, I., & Purnaweni, H. (2020). Do we care enough? revisiting land subsidence and coastal spatial planning policy in Semarang, Indonesia. In *E3S Web of Conferences (Vol. 202, p. 06005)*. EDP Sciences.
  - Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., ... & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science, 371(6524), 34-36.*
  - Lange, D., Kopp, H., Royer, J. Y., Henry, P., Çakir, Z., Petersen, F., ... & Géli, L. (2019). Interseismic strain build-up on the submarine North Anatolian Fault offshore Istanbul. *Nature communications, 10(1), 1-9.*
  - Nadiri, A. A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., & Dideban, K. (2018). Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of the Total Environment, 628, 1043-1057.*
  - Nayak, S. (2021). Land use and land cover change and their impact on temperature over central India. *Letters in Spatial and Resource Sciences, 1-12.*
  - Nhu, V. H., Shirzadi, A., Shahabi, H., Singh, S. K., Al-Ansari, N., Clague, J. J., ... & Ahmad, B. B. (2020). Shallow landslide susceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, naïve bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms. *International journal of environmental research and public health, 17(8), 2749.*
  - Orhan, O., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Yalvac, S., & Yakar, M. (2021). Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapınar region, Turkey: a multi-sensor InSAR time series study. *Sensors, 21(3), 774.*
  - Park, I., Choi, J., Lee, M. J., & Lee, S. (2012). Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers & Geosciences, 48, 228-238.*
  - Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2021). Monitoring mining-induced subsidence by integrating differential radar interferometry and persistent scatterer techniques. *European Journal of Remote Sensing, 54(sup1), 18-30.*
  - Putra, D. P. E., Setianto, A., Keokhampui, K., & Fukuoka, H. (2011). Land subsidence risk assessment in Karst region, case study: Rongkop, Gunung Kidul, Yogyakarta-Indonesia In *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie-Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ. Prof. Dr. Rafiq Azzam, 39-50.*
  - Semeraro, T., Mastroleo, G., Aretano, R., Facchinetti, G., Zurlini, G., & Petrosillo, I. (2016). GIS Fuzzy Expert System for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of environmental management, 168, 94-103.*
  - Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., & Li, Y. (2020). Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China. *Environmental Modelling & Software, 134, 104868.*
  - Wang, J., Yi, S., Li, M., Wang, L., & Song, C. (2018). Effects of sea level rise, land subsidence, bathymetric change and typhoon tracks on storm flooding in the coastal areas of Shanghai. *Science of the total environment, 621, 228-234.*
  - Zghibi, A., Mirchi, A., Msaddek, M. H., Merzougui, A., Zouhri, L., Taupin, J. D., ... & Tarhouni, J. (2020). Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid Mediterranean coastal aquifer. *Water, 12(9), 2525.*
  - Zhang, B., Zhang, L., Yang, H., Zhang, Z., & Tao, J. (2016). Subsidence prediction and susceptibility zonation for collapse above goaf with thick alluvial cover: A case study of

*the Yongcheng coalfield, Henan Province, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75(3), 1117-1132.*

- *Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. Engineering Geology, 19.*