



کاربرد تحلیل‌های مکانی GIS در مدل‌سازی پتانسیل وقوع فرونشست زمین مطالعه موردی: شهرستان تبریز

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

احمد نیکدل منور^{۱*}، بختیار فیضی‌زاده^۲

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشگاه تبریز

چکیده

امروزه، فرونشست یک خطر زمینی ناشی از فعالیت انسانی و طبیعی در سراسر جهان است و در بسیاری از کشورها نیاز به بررسی دقیق دارد (به عنوان مثال ایالات متحده آمریکا، انگلستان، استرالیا، چین، مصر، فرانسه، آلمان، هند، ایران، ایتالیا، ژاپن، مکزیک، لهستان، عربستان سعودی، سوئد و هلند). لازم به ذکر است که در بیش از ۱۵۰ کشور و منطقه در سراسر جهان رویدادهای فرونشست مشاهده شده است. امروزه، نواحی تحت تأثیر فرونشست از دیدگاه‌های مختلف مربوط به مسائل اجتماعی-اقتصادی، زیست‌محیطی و حفاظتی یک نگرانی بزرگ است. تحقیق حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و روش پژوهش توصیفی-تحلیلی هست. در این پژوهش از منابع اسنادی و کتابخانه‌ای و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. در پژوهش حاضر با ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره اقدام به پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع مخاطره فرونشست در محدوده شهرستان تبریز شد. بعد از بررسی پیشینه تحقیق و پژوهش‌های انجام شده، یازده عامل موثر در وقوع مخاطره فرونشست: بارندگی، شیب، تبخیر، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع رواناب، فاصله از گسل، تراکم شبکه زهکشی، فاصله از رودخانه، شاخص پوشش گیاهی و عمق آب‌های زیرزمینی مشخص و با استفاده از فرایند ANP وزن دهی شدند. بعد از استانداردسازی لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS همه شاخص با تابع Weighted Overlay تلفیق شد. باتوجه به بررسی نتایج حاصل شده، از مجموع آبادی‌های قرارگرفته شده در داخل منطقه مطالعه، ۲۰ درصد آبادی‌ها دارای پتانسیل فرونشست بسیار زیاد، ۳۶ درصد دارای پتانسیل خطر زیاد، ۱۸ درصد دارای پتانسیل خطر متوسط، ۱۴ درصد دارای پتانسیل خطر کم و ۱۲ درصد نیز در محدوده پتانسیل فرونشست خیلی کم قرار دارد. همچنین بررسی مکان‌گزینی شهرهای واقع شده در منطقه نیز نشان می‌دهد که بطور متوسط، شهرها در نواحی دارای پتانسیل وقوع متوسط تا بسیار زیاد وقوع فرونشست جای گرفته است.

کلمات کلیدی: فرونشست، فرایند تحلیل شبکه، سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره، GIS، تبریز.

۱-مقدمه

فرونشست زمین یک پدیده زمین‌شناسی است که موجب پایین رفتن آرام و افقی سطح زمین می‌شود (۱۰) به عبارت دیگر فرونشست زمین ته نشین شدن ملایم یا فرورفتن سریع بخش‌های مجزا از سطح زمین به دلیل تجمع رسوبات و در نتیجه حرکت زیرسطحی مواد زمین در نتیجه افزایش تنش است (۱۴و۵). امروزه، فرونشست یک خطر زمینی ناشی از فعالیت انسان و بصورت طبیعی در سراسر جهان است و در بسیاری از کشورها نیاز به بررسی دقیق دارد (به عنوان مثال ایالات متحده آمریکا، انگلستان، استرالیا، چین، مصر، فرانسه، آلمان، هند، ایران، ایتالیا، ژاپن، مکزیک، لهستان، عربستان سعودی، سوئد و هلند) (۱۳). لازم به ذکر است که در بیش از ۱۵۰ کشور و منطقه در سراسر جهان رویدادهای فرونشست مشاهده شده است (۴). نواحی تحت تأثیر فرونشست از دیدگاه‌های مختلف مربوط به مسائل اجتماعی-اقتصادی، زیست‌محیطی و حفاظتی یک نگرانی بزرگ است (۶) و (۲۶) به ویژه برای مناطق پرجمعیت دلتایی (۹) و (۲۱). خسارات شدید از جمله از دست دادن سطح زمین، ترک خوردگی ساختمان‌ها، شکستگی در خطوط زیرزمینی و حمل و نقل و افزایش خطر سیل ناشی از فرونشست زمین است (۷). فرونشست باعث ایجاد ترک و شکاف‌هایی در زمین، تغییر در الگوی جریان‌های زیرزمینی و سطحی، تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی، تغییر شکل سطح زمین، سیل‌خیزی منطقه برخی موارد دیگر می‌شود. بطوری‌که این تغییرات و عوامل خسارت جدی و جبران‌ناپذیری به مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی وارد می‌کند. این پدیده به ویژه آسیب‌های جدی به سیستم‌های آبیاری مزارع و تجهیزات آبرسانی و چاه‌ها وارد می‌آورد (۱۶). میزان بارندگی و تغذیه طبیعی در کشورهای خشک یا نیمه‌خشک مانند ایران نسبتاً کمتر از میانگین جهانی است که نشان‌دهنده اهمیت آب‌های زیرزمینی برای فعالیت‌های کشاورزی یا صنعتی است (۱۹). در ایران در طی سال‌های اخیر به دلیل بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی این پدیده بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۲۷). فرونشست زمین در ایران سابقه‌ای طولانی دارد. در گذشته تنها برخی از استان‌ها از جمله کرمان و یزد با این مسئله مواجه بودند ولی هم اکنون برخی بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی سبب شده تا بسیاری از دشت‌های ایران با مسئله فرونشست مواجه شوند (۱۱). در سال‌های اخیر در ایران با افزایش میزان فرونشست به پی ساختمان‌ها، باند فرودگاه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، خیابان‌ها، خطوط حمل و نقل ریلی و جاده‌ای، تاسیسات کشاورزی (تاسیسات منصوب در چاه‌های بهره‌برداری و شبکه آبیاری)، تغییر در مسیر و جهت حرکت رودخانه‌ها و کانال‌ها و حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی (با فشرده شدن و از بین رفتن تخلخل موجود در خاک) آسیب وارد شده است و نیز سبب تخریب در الگوی جریان هیدرولوژی، کج‌شدگی و انحراف دکل‌های برق و ... می‌شود. در این میان سازه‌هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب‌پذیری بیشتری دارند به عنوان نمونه خطوط راه‌آهن، سدهای خاکی، کانال‌ها، دکل‌های برق و مخابراتی

از آسیب پذیری زیادتری برخوردار هستند. پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود، به عنوان مثال، در این مناطق ممکن است سیلاب های عظیم و مخربی به وقوع بپیوندد در حالی که قبل از ایجاد فرونشست از هیچ سابقه ای از وقوع سیلاب برخوردار نبوده است (۲۰). گستردگی فرونشست زمین و متعاقب آن خسارات وارده به اکثر مناطق مسکونی و پرجمعیت ایران، این پدیده را به یکی از مهم ترین مخاطرات طبیعی پس از زلزله تبدیل کرده است (۲۵). در این میان شهرستان تبریز با توجه به افزایش جمعیت شهری و نیاز روزافزون به آب شرب و قرارگرفتن در بین شهرستان های صنعتی و کشاورزی ایران و همچنین به علت تنش آبی ایجاد شده در سال های اخیر این منطقه شاهد افزایش حفر چاه های عمیق و افت شدید سطح آب های زیرزمینی است. با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این پژوهش بررسی و ارزیابی پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست در سطح شهرستان تبریز می باشد. با توجه به اهمیت موضوع مطالعات بسیاری در زمینه خطر فرونشست زمین و عوامل موثر بر وقوع این پدیده در ایران و سطح استان آذربایجان شرقی صورت گرفته است. پورمراد و همکاران (۱۸) در مقاله ای با عنوان "پیش بینی و تشخیص پتانسیل فرونشست زمین با ادغام AHP و روش های برنامه نویسی: مطالعه موردی جنوب شرق ایران" به بررسی پتانسیل وقوع خطر فرونشست و تعیین مکان های بالقوه وقوع این پدیده در جنوب غرب ایران در استان خوزستان پرداخته اند. در این مقاله از روش های تحلیل سلسله مراتبی و ترکیب سلسله مراتبی با فازی و تابع Evalfis در محیط متلب استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده بیشترین خطرات فرونشست در مناطقی بوده است که دارای سنگ شناسی تبخیری بوده و کمترین فاصله را از آبراه ها و گسل هایی با شیب ۲۰ تا ۷۰ درجه دارند. حجازی و همکاران (۸) در پژوهشی با عنوان "آشکارسازی و تعیین میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در محدوده دشت هریس" اقدام به تعیین محدوده تحت تاثیر پدیده فرونشست و برآورد میزان فرونشست پرداخته اند. با توجه به نتایج بدست آمده در فیلتر Goldstein به ترتیب میزان فرونشست در منطقه مورد نظر تا سال ۲۰۱۹ در حدود ۹ سانتی متر و میزان بالآآمدگی ۸٫۵ سانتی متر و در فیلتر Adaptive مقدار فرونشست ۹٫۵ سانتی متر و بالآآمدگی ۸ سانتی متر است. همچنین میزان فرونشست با مقایسه با عوامل لیتولوژی و زمین شناسی مشخص شد که میزان فرونشست در رسوبات سست و منفصل بیش از سایر سازندها بود و در مقایسه با کاربری ها نیز بیشترین فرونشست در مراتع اتفاق افتاده است. صراطی و سجادی (۲۳) در تحقیقی با عنوان "بررسی اثرات ژئومورفولوژیکی فرونشست زمین و اثرات آن در اکوسیستم با استفاده از نرم افزار ArcGIS (مطالعه موردی: شهر تهران)" به بررسی اثرات ژئومورفولوژیکی فرونشست زمین و اثرات آن در اکوسیستم پرداخته اند. عوامل کاربری اراضی، فاصله از گسل، چاه های پیزومتری، سطح آب زیرزمینی و رودخانه های سطح شهر به عنوان عوامل مؤثر در فرونشست استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد برداشت بی رویه آب و همچنین با توجه به موقعیت شهر تهران و نزدیکی به گسل ها می تواند

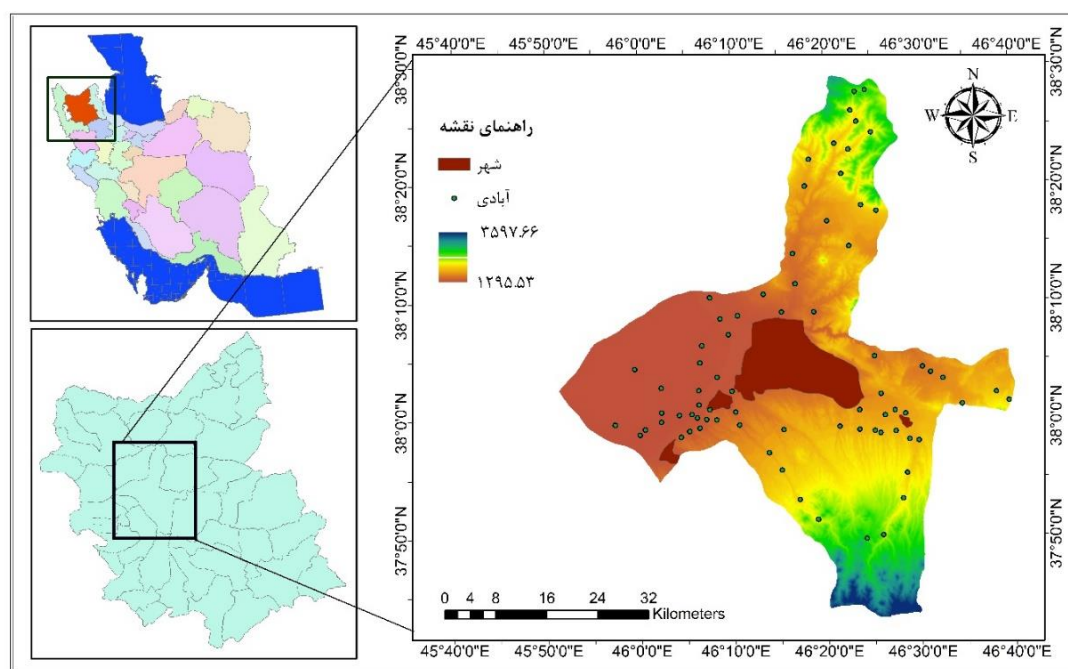
آسیب‌های جبران‌ناپذیری را وارد کند. خلیفی و همکاران (۱۲) در پژوهش خود با عنوان "ارائه چهارچوب عملی برای تعیین پتانسیل فرونشست زمین (مطالعه موردی: دشت اردبیل)"، چهارچوب جدیدی را برای تعیین پتانسیل فرونشست زمین ارائه داده‌اند و بطور عملی در دشت اردبیل پیاده کرده‌اند. در این چهارچوب هفت پارامتر مؤثر در فرونشست شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبرفت و گسل به صورت هفت لایه رستری تهیه شده و بعد از رتبه‌دهی و وزن‌دهی شاخص پتانسیل فرونشست محاسبه گردیده است که مقدار آن برای دشت اردبیل بین ۸۰ تا ۱۵۴ به دست آمد. همچنین قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی دشت دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی می‌باشد. شفیعی و همکاران (۲۲) در پژوهشی با عنوان "تحلیل فضایی فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی با استفاده از مدل GWR مطالعه موردی: آبخوان نورآباد ممسنی" به بررسی وضعیت فرونشست در منطقه مطالعه پرداخته‌اند. در این مقاله با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل A1 و نتایج تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که برداشت بی‌رویه از سطح ذخایر زیرزمینی موجب فرونشست بخش مرکزی منطقه شده و همچنین وجود قنوات متعدد در سطح آبخوان خسارت‌هایی را به مراکز مسکونی وارد کرده است. مختاری و همکاران (۱۵) در مقاله‌ای با عنوان "مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دشت تسوج)" با استفاده از نقاط فرونشست‌های ثبت شده و یازده شاخص محیطی مؤثر در وقوع فرونشست (ارتفاع، شیب، جهت، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، سطح آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی) به مدل‌سازی خطر وقوع این پدیده در بستر الگوریتم جنگل تصادفی پرداخته‌اند. مطابق نتایج حاصل شده به ترتیب ۱۸ و ۱۱ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر از نظر وقوع فرونشست قرار گرفته که حاکی از شرایط خطرناک منطقه است. آل‌شیخ و همکاران (۱) در پژوهشی با عنوان "بررسی فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری آبخوان مروودشت" به بررسی رابطه بین میزان فرونشست و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در آبخوان مروودشت پرداخته است. نتایج نشان داد میانگین افت سالیانه آب زیرزمینی برابر با ۱۱ سانتیمتر می‌باشد. در این دشت با مقایسه نقشه افت سطح آب زیرزمینی و نقشه جابجایی سطح زمین مشخص می‌شود در نواحی که افت سطح آب زیرزمینی بیشتر بوده است بیشترین میزان جابجایی نیز رخ داده است و تقریباً به ازای هر ۱۱ سانتی متر افت تراز آب زیرزمینی یک سانتی‌متر زمین در این منطقه دچار نشست می‌شود. ندیری و همکاران (۱۷) در مقاله‌ای با عنوان "ارایه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک" به بررسی پتانسیل وقوع فرونشست در دشت شبستر پرداخته‌اند. در این پژوهش، هفت عامل هیدروژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست، شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل شده از روش

الگوریتم ژنتیک بیانگر وجود پتانسیل خطر فرونشست در قسمت های جنوبی و مرکزی دشت بیشتر از سایر مناطق است. امیراحمدی و همکاران (۲) در مقاله ای با عنوان "تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS" به تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS پرداختند. جهت بررسی تغییرات به وجود آمده در حجم آبی آبخوان و میزان افت آب های زیرزمینی در کل دشت از داده های آماری چاه های مشاهده ای استفاده و با بهره گیری از نرم افزار ArcGIS نقشه های ایزوپیر و پهنه افت در منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید. با تلفیق لایه های بارش، شیب، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی خاک، پوشش گیاهی و عوامل انسانی در محیط GIS نقشه پیش بینی مناطق افت آب های زیرزمینی در آینده به روش کوکریجینگ نقطه ای تهیه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین احتمال فرونشست دشت اردبیل در آینده به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی در قسمت جنوب شرق و غرب اتفاق خواهد افتاد. بررسی مطالعات انجام شده در ایران و سراسر جهان در زمینه پدیده فرونشست بیانگر گسترش حجم وقوع فرونشست به ویژه تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی و وقوع خشکسالی های پیایی در افزایش فرونشست، ضرورت پرداختن هرچه بیشتر محققان و متخصصان این حوزه است. همچنین نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته توجه بیش از پیش مسئولین و کارشناسان حوزه شهری و دیگر حوضه های مرتبط با این پدیده را جهت پیش گیری و جلوگیری از خطرات و خسارات احتمالی اقتصادی و زیست محیطی را می طلبد.

۲- مواد و روش

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

شهرستان تبریز یکی از شهرستان های استان آذربایجان شرقی است که در مرکز این استان واقع شده است. مرکز این شهرستان، شهر تبریز است که مرکز اداری و سیاسی استان است. شهرستان تبریز طبق آخرین تقسیمات کشوری از ۳ بخش، ۴ شهر، ۷ دهستان و ۶۹ روستا تشکیل شده است. جمعیت شهرستان تبریز در سال ۱۳۹۵ خورشیدی بالغ بر ۱'۷۷۳'۰۳۲ نفر بوده که از این تعداد ۱'۶۴۹'۲۵۸ نفر ساکن ۴ شهر تبریز، سردرود، خسروشاه و باسمنج و ۱۲۳'۷۷۴ نفر نیز ساکن روستاهای شهرستان بوده است. وسعت شهرستان تبریز به طور تقریبی ۱۷۸۱ کیلومتر مربع است. این شهرستان در ۴۶ و ۲۵ طول شرقی و ۳۸ و ۲ عرض شمالی از نصف النهار گرینویچ واقع شده است و ارتفاع تقریبی آن از سطح دریا ۱۲۸۶ تا ۲۱۰۰ متر متغیر می باشد. شهرستان تبریز از دو ناحیه ی کوهستانی و دشت تشکیل شده است. ارتفاع از سطح دریا در دشت ۱۳۱۰ و در مناطق کوهستانی تا ۲۱۰۰ متر بالغ می گردد (شکل ۱).

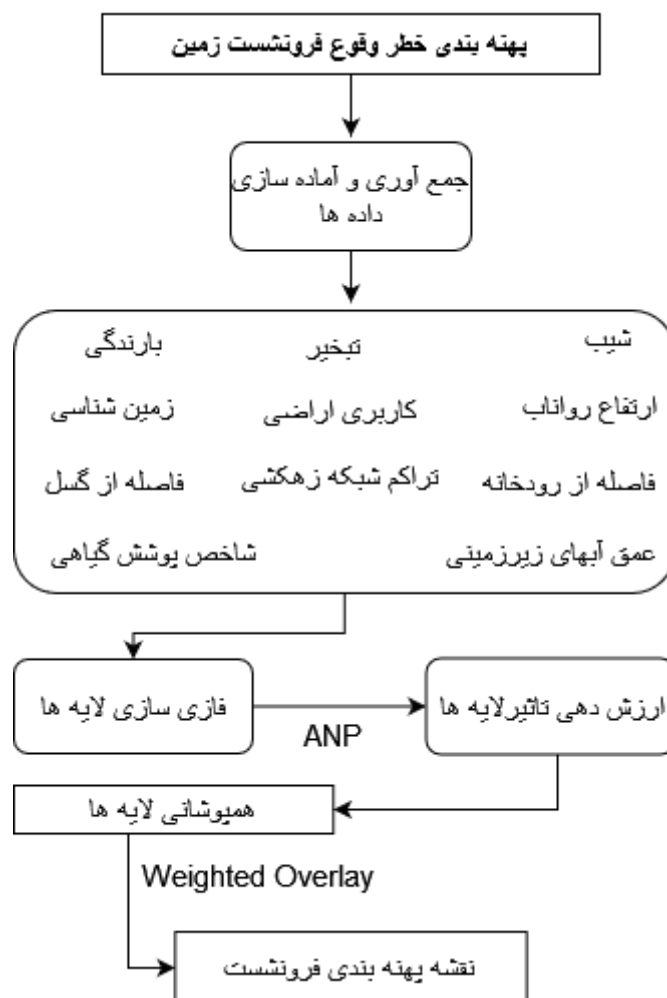


شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Geographical location of the study area

۲-۲- روش تحقیق

تحقیق حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و روش پژوهش توصیفی _تحلیلی است. در این پژوهش از منابع اسنادی و کتابخانه‌ای و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی در این پژوهش از نرم‌افزارهای ArcGIS و SAGA GIS و Super decision استفاده شده است. بعد از بررسی پیشینه تحقیق و پژوهش‌های انجام شده، یازده عامل موثر در وقوع مخاطره فرونشست: بارندگی، شیب، تبخیر، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع رواناب، فاصله از گسل، تراکم شبکه زهکشی، فاصله از رودخانه، شاخص پوشش گیاهی و عمق آب‌های زیرزمینی مشخص و اقدام به تهیه و آماده‌سازی لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS شد. در مرحله بعد شاخص‌ها فازی سازی و استانداردسازی شدند و با استفاده از فرایند تحلیل شبکه ANP وزن‌های معیارها بدست آمد و در نهایت با استفاده از تابع Weighted Overlay لایه‌ها باهم تلفیق شد. در (شکل ۲) فرایند کلی تحقیق نشان داده شده است.



شکل (۲): چارچوب کلی روش تحقیق

Figure (2): Framework of research method

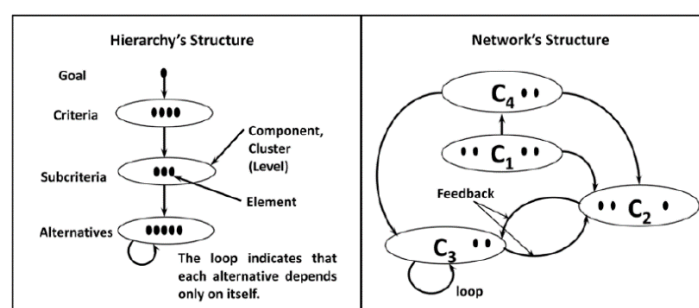
۳-۲- سیستم های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDA)

تحلیل تصمیم گیری چندمعیاره یکی از اساسی ترین عملیات پشتیبانی تصمیم گیری در GIS می باشد. قابلیت های MCDA زمانی که با GIS ادغام می شود، MCDA مبتنی بر GIS را تشکیل می دهد که یکی از روش های مفید برای برنامه ریزی فضایی و مدیریت می باشد. GIS-MCDA می تواند به عنوان فرایندی به منظور تبدیل و ترکیب داده های جغرافیایی و ترجیحات تصمیم گیران و به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز برای تصمیم گیری تعریف گردد. این فرایند متشکل از روش هایی است که شامل استفاده از داده های جغرافیایی و همچنین ترجیحات

تصمیم‌گیران و به کار بردن این داده‌ها و اولویت‌ها می‌باشد. این روش‌ها به ابزارهای مفیدی در علوم مدیریتی و تحقیقات کاربردی تبدیل شده است. MCDA مجموعه‌ای غنی از روش‌ها و الگوریتم‌ها را به منظور رفع مشکلات تصمیم‌گیری و همچنین طراحی، ارزیابی و اولویت بندی تصمیم‌گیری‌های جایگزین ارائه می‌دهد و امکان استفاده از قابلیت‌های توام GIS و MCDA را به منظور پیشرفت تحقیقات تئوری و کاربردی فراهم می‌کند (۳).

۲-۴- فرایند تحلیل شبکه (ANP)

روش ANP تعمیمی از روش AHP است که روابط پیچیده میان اجزا و بازخوردهای آنها را نیز می‌پذیرد (شکل ۳). گام نخست در روش ANP تعیین روابط بین عوامل می‌باشد. معیارهای مختلف با توجه به وابستگی‌های موجود بین آنها دو به دو با هم مقایسه می‌شوند. به این منظور برای مخاطره مورد مطالعه پرسشنامه‌ای طراحی شد و در اختیار کارشناسان مربوطه قرار گرفت (جدول ۴). انجام مقایسات زوجی توسط نرم‌افزار سوپر دسیژن صورت گرفته است. پس از انجام مقایسات زوجی برای تمامی ماتریس‌ها و تعیین مقادیر بردار ویژه برای هر ماتریس، ضریب سازگاری نیز تعیین می‌گردد که برای تمامی مقایسات باید مقداری کمتر از ۰/۱ داشته باشد.



شکل (۳): مقایسه روش تحلیل سلسله مراتبی AHP و فرایند تحلیل شبکه ANP ساعتی و وارگاس (۲۴)

Figure (3): Comparison of (AHP) Analytical Hierarchy Process and (ANP) Network Analysis Process

جدول (۴): مقیاس ۹ کمیته ساعتی برای مقایسه دودوئی معیارها (۲۸)

Table (4): Saaty 9 quantitative scale of binary comparison of criteria

امتیاز	تعریف	توضیح
۱	اهمیت مساوی	در تحقق هدف دو معیار اهمیت مساوی دارند.
۳	اهمیت اندکی بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که برای تحقق هدف اهمیت ۱ بیشتر از ۳ است.
۵	اهمیت بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که برای تحقق هدف اهمیت ۱ خیلی بیشتر از ۳ است.
۷	اهمیت خیلی بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت ۱ خیلی بیشتر از ۳ است.
۹	اهمیت مطلق	اهمیت خیلی بیشتر ۱ نسبت به ۳ به طور قطعی به اثبات رسیده است.
۲، ۴، ۶، ۸		حالت‌های میانه.

پس از انجام مقایسات زوجی و وزن دهی به معیارها با استفاده از مقیاس ۹ کمیتی ساعتی، بردار اهمیت داخلی که نشانگر اهمیت نسبی عناصر یا خوشه ها است از رابطه ۱ بدست می آید (۲۹).

$$AW = \lambda_{\max}^W \quad [1]$$

که در آن A ماتریس مقایسه دودویی معیارها، W بردار ویژه (ضریب اهمیت) و $\lambda_{\max}$ بزرگ ترین مقدار ویژه عددی است.

برای محاسبه ضریب اهمیت معیارها (W)، چهار روش عمده زیر توسط ساعتی معرفی می گردد:

۱- روش حداقل مربعات ۲- روش حداقل مربعات لگاریتمی

۳- روش بردار ویژه ۴- روش های تقریبی

از روش های فوق روش بردار ویژه بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

در روش بردار ویژه، ماتریس ترجیحات را در نظر گرفته و بردار ویژه و مقدار ویژه آن را از رابطه (۲) بدست می آوریم:

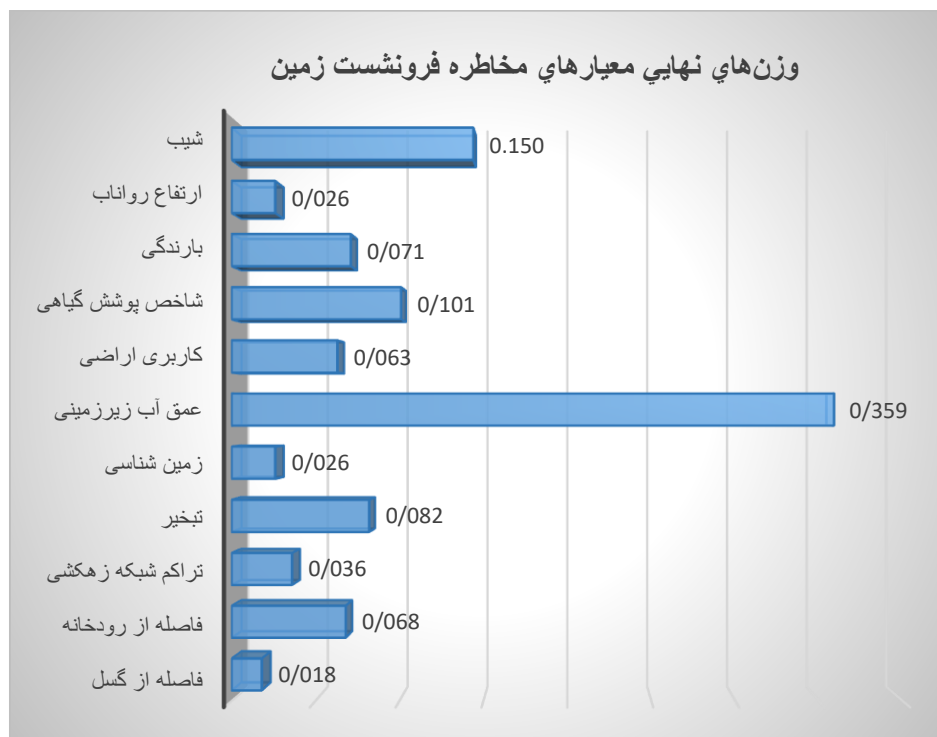
$$\begin{aligned} a_{11} W_1 + a_{12} W_2 + \dots + a_{1n} W_n &= \lambda \cdot W_1 \\ a_{21} W_1 + a_{22} W_2 + \dots + a_{2n} W_n &= \lambda \cdot W_2 \\ &\vdots \\ a_{n1} W_1 + a_{n2} W_2 + \dots + a_{nn} W_n &= \lambda \cdot W_n \end{aligned} \quad [2]$$

که در آن a_{ij} ترجیح عنصر i بر j است و W_i وزن عنصر i و λ مقدار ثابتی است که مقدار ویژه ماتریس به حساب می آید. در (شکل ۵) وزن نهایی معیارهای استفاده شده نشان داده شده است.

۵-۲- اعتبارسنجی مقایسات زوجی

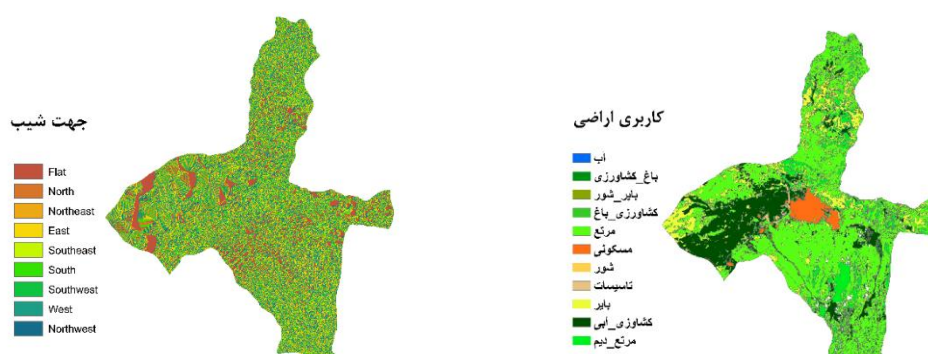
به منظور اعتبارسنجی مقایسات زوجی، ضریب سازگاری (CR) ماتریس محاسبه می شود. ضریب سازگاری باید مقداری کمتر از ۰/۱ داشته باشد. به منظور محاسبه ضریب سازگاری، (۳۰) از روابط زیر بهره برده است. بدین منظور ابتدا باید شاخص سازگاری از رابطه (۳) محاسبه گردد.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad [3]$$



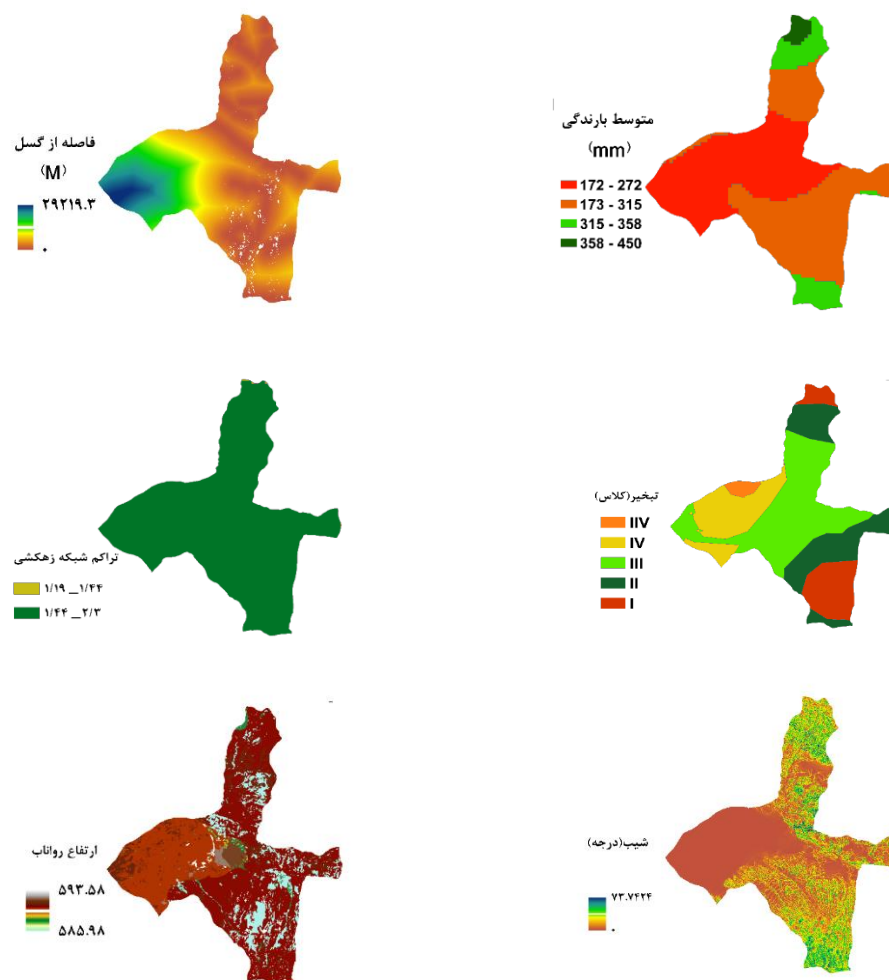
شکل (۵): وزن نهایی معیارها

Figure (5): The final weight of the criteria

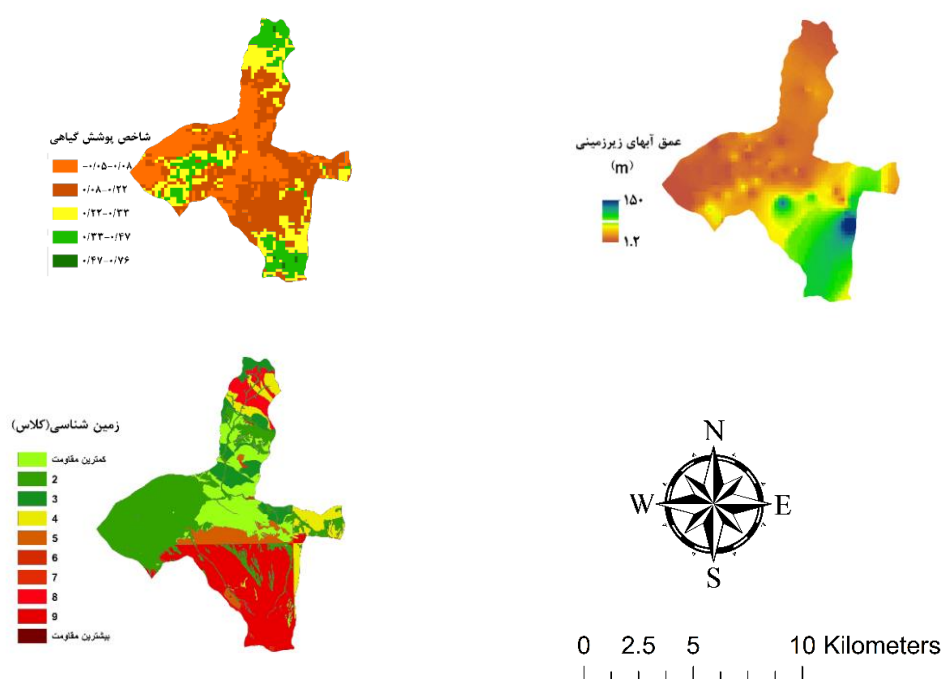


شکل (۶): نقشه معیارها

Figure (6): Criteria map



ادامه شکل (۶): نقشه معیارها
 Con. Figure (6): Criteria map

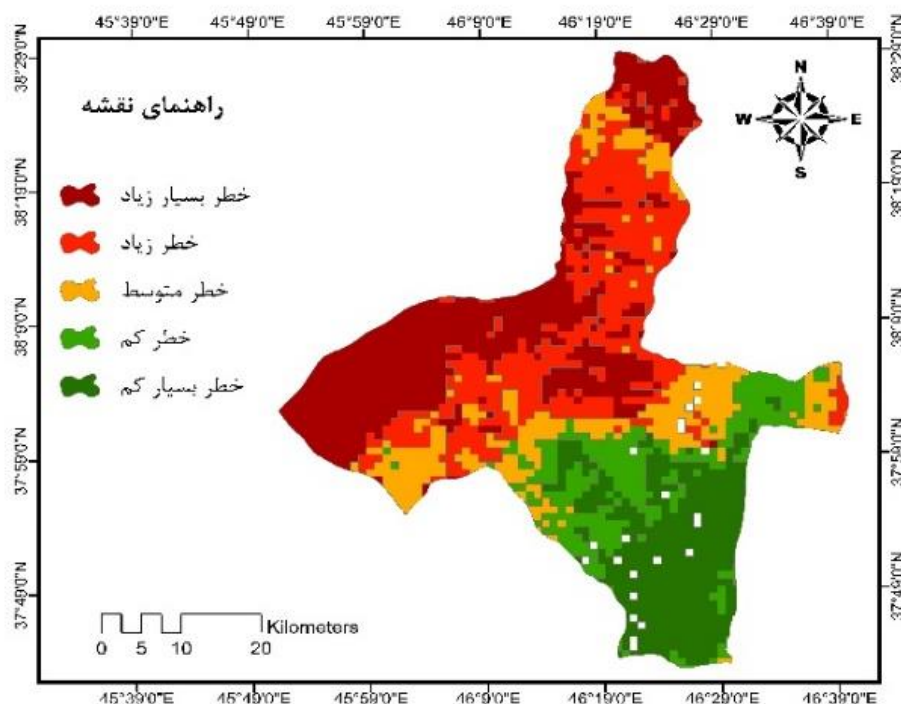


ادامه شکل (۶): نقشه معیارها

Figure (6): Criteria map

۳- بحث و یافته‌ها

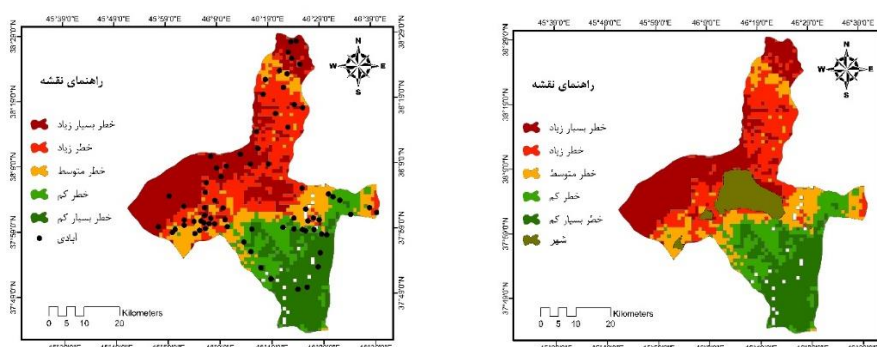
برای تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی فرونشست، پس از بدست آوردن وزن‌های معیارها از طریق روش ANP، نقشه معیارها در محیط نرم‌افزار ArcGIS فراخوانی و با استفاده از توابع فازی تمام لایه‌ها فازی‌سازی و استانداردسازی شد و به روش Weighted overlay با یکدیگر تلفیق شد (شکل ۷). باتوجه به کمی بودن مقادیر نقشه نهایی پهنه‌بندی بین صفر و یک، برای درک بهتر در پنج سطح کیفی خطر بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مرکز و نواحی شمالی و شرقی شهرستان تبریز جزء مناطق مستعد فرونشست در سطح خطر متوسط تا خیلی زیاد است. بطوریکه شهرهای موجود در این محدوده در مناطق دارای خطر متوسط تا بسیار زیاد گسترش یافته است. با استناد به وقوع خشکسالی‌های اخیر در کشور ایران این شهرستان نیز از این نظر مثبتی نبوده است. بطوریکه طبق مشاهدات میدانی و بررسی تصاویر ماهواره ای حاکی از افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در این محدوده است. وقوع چندین فرونشست در مرکز شهر تبریز و مناطق اطراف در طی سال‌های اخیر خطر وقوع این پدیده را بیش از پیش نمایان می‌سازد.



شکل (۷): نقشه پهنه بندی خطر وقوع فرونشست
Figure (7): Landslide risk zoning map

باتوجه به بررسی نتایج حاصل شده از مجموع آبادی های قرار گرفته در داخل منطقه مطالعه، ۲۰ درصد آبادی ها دارای پتانسیل فرونشست بسیار زیاد، ۳۶ درصد دارای پتانسیل خطر زیاد، ۱۸ درصد دارای پتانسیل خطر متوسط، ۱۴ درصد دارای پتانسیل خطر کم و ۱۲ درصد نیز در محدوده پتانسیل فرونشست خیلی کم قرار دارد. همچنین بررسی مکان گزینی شهرهای واقع شده در منطقه نیز نشان می دهد که بطور متوسط، شهرها در نواحی دارای پتانسیل وقوع متوسط تا بسیار زیاد خطر وقوع فرونشست جای گرفته است (شکل ۸). بررسی نقشه کاربری اراضی نشان از مکان گزینی نامناسب واحدهای صنعتی و تاسیسات در محدوده مورد مطالعه می باشد. بطوری که محدوده های قرارگیری این صنایع با خطر پتانسیل وقوع فرونشست بالا مواجه است. مصرف بالای آب اکثر واحدها می تواند دلیلی بر اثبات نتایج قابل استناد خروجی این موضوع باشد. علاوه بر این با توجه به موقعیت قرارگیری واحدهای صنعتی در حاشیه شهرها فعالیت این واحدها باعث ایجاد آلودگی های زیست محیطی و کاهش کیفیت هوای مناطق شهری و روستایی نزدیک این مناطق شده است. ادامه این روند باعث کاهش کیفیت خاک محدوده و تخریب محیط شده و سبب بروز مشکلاتی از قبیل مهاجرت، کاهش کیفیت خاک و نابودی

زمین‌های کشاورزی و وقوع فرونشست‌های بزرگ‌تر در این مناطق و همچنین مشکلاتی از این قبیل می‌شود. کاربری‌های مسکونی واقع شده در منطقه مطالعه اکثراً با خطر فرونشست زمین مواجه هستند. نتایج طبقه‌بندی پارس‌های شهری و انطباق با نقشه فرونشست نشان می‌دهد بیشتر واحدهای مسکونی دارای پتانسیل متوسط تا بسیار زیاد وقوع فرونشست است. از علل وقوع این پدیده می‌توان به سست بودن بافت خاک منطقه و کاهش بارش‌های سالانه اشاره کرد که باعث وقوع خشکسالی‌های طولانی مدت و کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی شده است. طبق بررسی‌های میدانی و اسنادی صورت گرفته شده آثار مخرب ناشی از وقوع این پدیده در واحدهای مسکونی مناطق مختلف شهری بخصوص شهر تبریز قابل مشاهده است که باعث ایجاد خسارات اقتصادی و زیست محیطی فراوانی در این مناطق گردیده است. با ادامه این روند مناطق یاد شده در دراز مدت خالی از سکنه شده و فاقد شرایط لازم جهت سکونت می‌شود.



شکل (۸): الف) نقشه همپوشانی نقشه فرونشست با لایه آبادی ب) نقشه همپوشانی نقشه فرونشست با لایه شهر

Figure (8): a) Map of overlay of subsidence map with Village layer b) Map of overlay of subsidence map with city layer

۴- نتیجه‌گیری

سیستم اطلاعات جغرافیایی دارای قابلیت‌های زیادی در مطالعه و بررسی تغییرات مکانی و پدیده‌های محیطی می‌باشد. قابلیت‌های MCDA زمانی که با GIS ادغام می‌شود، MCDA مبتنی بر GIS را تشکیل می‌دهد که یکی از روش‌های مفید برای برنامه‌ریزی فضایی و مدیریت می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره اقدام به پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع پدیده فرونشست در شهرستان تبریز شد. با توجه به اهمیت محدوده مورد مطالعه از جهت جمعیت بالای شهری و روستایی و وجود صنایع و زیرساخت‌ها و همچنین روند روبه رشد تراکم جمعیتی، این منطقه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در این مقاله با بررسی کارهای صورت گرفته در مناطق مختلف داخلی و خارجی یازده

شاخص بارندگی، شیب، تبخیر، زمین شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع رواناب، فاصله از گسل، تراکم شبکه زهکشی، فاصله از رودخانه، شاخص پوشش گیاهی و عمق آب های زیرزمینی به عنوان عوامل موثر در وقوع این مخاطره انتخاب شد. طبق نظر کارشناسان و متخصصان این امر و همچنین مستندات موجود شاخص افت آب های زیرزمینی مهم ترین عامل در وقوع فرونشست در این منطقه است. نتایج حاصل شده نشان از وجود پتانسیل بالای وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه است که وقوع چندین فرونشست در سطح شهرها و نواحی روستایی در طی سال های اخیر خطر وقوع این پدیده را نگران کننده کرده است. بررسی کاربری های مسکونی و واحدهای صنعتی نشان می دهد که اکثر این کاربری ها در مناطق با خطر وقوع فرونشست متوسط تا بسیار زیاد قرار دارند. بررسی شواهد و مشاهدات میدانی بیانگر نتایج قابل قبول این پژوهش می باشد و با کارهای قبلی صورت گرفته در این حوضه همخوانی دارد.

۵-منابع

- Al-Sheikh A.A., Chatersimab.Z, Vosoughi.B, Modiri.M, Pakdamnoom P. (2018). Investigation of land subsidence due to extraction of groundwater using radar interferometry technique of Marvdasht aquifer, *Journal of Engineering and Management Watershed*, Vol. 14, No. 1, 2022, pp. 114-125. [In Persian]
- Amir Ahmadi, A. Ma'ali Ahri, N. Ahmadi, T. (2013). Determining the possible subsidence areas of Ardabil plain using GIS, *Journal of Geography*, Vol. 17, No. 46, pp. 1-23. [In Persian]
- 3-FEIZIZADEH, B. & BLASCHKE, T. (2014). Uncertainty analysis of GIS-Multicriteria based landslide susceptibility mapping. *International Journal of Geographic Information Science*, 28 (3), pp. 610-638.
- Faunt, C.C., Sneed, M., Traum, J., Brandt, J.T., (2016). Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *J. Hydrol.* 24 (3), pp.675–684.
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* 19 (8), 1459–1486.
- Gambolati, G., Teatini, P., (2015). Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resour. Res.* 51 (6), pp.3922–3955.
- GH.M. Tafreshi, M. nakhaei, R.lak, (2019). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran, *GeoJournal*, Spatially Integrated Social Sciences and Humanities, DOI 10.1007/s10708-019-10129-8.
- Hejazi. MA, Rezaei Moghadam. MH, Valizadeh Kamran. V. Mousavi Kajaabad. N. (2021). Detection and determination of subsidence using radar interferometry (D-InSAR) in Harris plain, *Environmental Erosion Research*, 1: 12 (45). Spring 2020. pp. 206-183. [In Persian]
- Huang, B., Shu, L., Yang, Y.S., (2012). Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling. *Water Resour. Manag.* 26 (14), pp.4225–4239.
- Hu, B; Zhou, Ajun; Wang, J.; Chen, VZ and Dongqii Wang (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China, *Environ Earth Sci* (2009) 59:pp.269–276 .
- Haghighat Mehr, P. valdanzoj, M.J, Tajik, R. Jabbari, S. Sahebi, M.R. Islami, R. Ganjian, M. Ehghani M.D. (2012). Analysis of Hashtgerd subsidence time series using radar interferometry method and global reality system, *Journal of Earth Sciences*, Vo. 22, No. 85, pp. 105-114. [In Persian]
- Khalifi, P., Nadiri, A., Novinpour, A.A. and Gharakhani, M. (2021). Presenting a Practical Framework for Determining Landslide Potential (Case Study: Ardabil Plain), *Journal of Water and Soil Knowledge* / Vol. 31 No. 4 Pages 11 to 23 / year 2021. [In Persian]
- Liu, Y., Ma, T., Du, Y., (2017). Compaction of muddy sediment and its significance to groundwaterchemistry. *Procedia Earth Planetar. Sci.* 17, 392–395.

- Ma, T., Du, Y., Ma, R., Xiao, C., Liu, Y., (2018). Water-rock interactions and related ecoenvironmental effects in typical land subsidence zones of China. *Hydrogeol. J.* 26(5), pp.1339–1349.
- Mokhtari.D, Ebrahimi.H, Salmani.S (2019). Landslide risk modeling using stochastic forest algorithm (Case study: Tasuj plain catchment), remote sensing and GIS in natural resources, tenth year, Third Issue, Fall 98, pp. 93-105. [In Persian]
- Malek.S, Borna.R (2018). Investigation of Landslide Risks in the South of Tehran; Case Study: District 20 of Tehran, Fourth International Conference on New Findings in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment, Tehran, Association for Development and Extension Fundamental science and technology. [In Persian]
- Nadiri. A, Taheri. Z, Barzegari. Q, Didehban. Kh. (2017). Providing a framework for estimating aquifer subsidence potential using genetic algorithm, Iranian Water Resources Research, Vol. 14, No. 2, Summer 2018, pp. 174-185. [In Persian]
- Pourmorad.S, mohanty. A, Sangita dash.S, das. A, Moein. Z (2021). Prediction and Potential Detection of Land Subsidence by Integrating AHP and Programming Methods: Case Study of South Eastern Iran.researchsquare.DOI:https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-853378/v1pp.1-24.
- Sedighi M, Nankali HR, Arabi S, Tavakoli F (2010). Subsidence detection in Salmas area using InSAR and geodetic techniques. *Geospatial Eng. J* 1(4): pp.25–33.
- Shafiei, N. Goli Mokhtari, L. Amir Ahmadi, A and Zandi, R (2020). Investigation of aquifer subsidence in Nurabad plain using radar interferometry method, Quantitative Geomorphological Research, Year 8, Issue 4, Spring 1399, 111-93. [In Persian]
- Schmidt, C., 2015. Alarm over a sinking delta.
- Shafiei.N, Goli Mokhtari.L, Amirahamdi.Alf and Zandi.R (2020). Spatial analysis of land subsidence and groundwater loss using GWR model Case study: Noorabad Mamasani aquifer, *Scientific Journal of Geography and Planning*, Vol. 25, No. 76, Summer Season, 1400, pp. 159-171. [In Persian]
- Serati, P. and Sajjadi, S.A. (2021). Investigation of geomorphological effects of land subsidence and its effects on ecosystem using ArcGIS software (Case study: Tehran), Student Scientific Journal of Water, Soil and Air Conservation Student Scientific Association of University Tehran, 2(1), Spring 2020, 56-47. [In Persian]
- TL Saaty, LG Vargas – (2006). Springer, Decision making with the analytic network process.
- Ttafreshi, GH.M. Nakhaei, M. lak, R. (2019). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran, *GeoJournal*, Spatially Integrated Social Sciences and Humanities, pp.1203-1223, DOI 10.1007/s10708-019-10129-8.
- Xu, Y.S., Ma, L., Shen, S.L., Sun, W.J., (2012). Evaluation of land subsidence by considering underground structures that penetrate the aquifers of Shanghai, China. *Hydrogeol. J.* 20 (8), pp.1623–1634.

- Zamani.T, Karimi.H, Tavakoli.M, Ali Moradi.P, (2017). Factors affecting groundwater loss in Mehran plain.Ilam province. *Journal of Hydrogeology*. Year 2. No. 2.pp. 17-28. [In Persian]
- Zebardast, E. (2001). Application of hierarchical analysis process in urban and regional planning. *Journal of "Honar – ha – ye – Ziba-Memari-Va-Shahrsazi*. Issue 10, pp.13-21. [In Persian]
- Zebardast, E. (2009). Application of Network Analysis Process (ANP) in urban and regional planning. *Journal of "Honar – ha – ye – Ziba-Memari-Va-Shahrsazi*. No. 41, pp. 90-79. [In Persian]
- Zebardast, E. (2001). Application of hierarchical analysis process in urban and regional planning. *Journal of "Honar – ha – ye – Ziba-Memari-Va-Shahrsazi"*. Issue 10, pp.13-21. [In Persian]