

مقدمه

فرونشست زمین یک پدیده محیط‌زیستی و زمین‌شناسی در سطح جهان است که معمولاً با تغییر در محیط طبیعی و دخالت‌های انسان در آن تشدید می‌شود [۴]. به‌طور کلی فرونشست شامل تخریب و نشست آهسته و یا ناگهانی خاک است. فرونشست اثرات زمین‌شناسی، محیط‌زیستی، هیدرولوژی و اقتصادی به همراه دارد. با توجه به اینکه عواملی که فرونشست زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد بسیار پیچیده است، وقوع و گسترش این پدیده در زمان و مکان متفاوت است [۱۳]. عوامل مؤثر بر فرونشست از دو دیدگاه مشخصات طبیعی و مهندسی تشریح می‌شود. از دیدگاه طبیعی عواملی مانند گسل، زلزله، خصوصیات خاک و ساختار رودخانه‌ها و از دیدگاه خصوصیات مهندسی، احداث جاده، فعالیت‌های معدن، وضعیت بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی و افزایش وزن بر سطح زمین بررسی می‌شود [۱۳]. یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر فرونشست زمین برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی بیان شده است [۹]. امروزه فرونشست زمین به عنوان یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی مطرح شده و در بسیاری از مناطق دنیا گزارش شده است، به طوری که تا پایان سال ۲۰۱۸ بیش از ۱۵۰ کشور در سراسر دنیا فرونشست را ثبت نموده‌اند [۱۲]. با توجه به اهمیت موضوع و خطرات ناشی از فرونشست زمین مطالعات زیادی در سرتاسر دنیا در این زمینه انجام شده است. به عنوان مثال ژوو و همکاران [۲۵] در چین فرونشست‌های قبل از سال ۲۰۰۵ را بررسی کرده و برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی را مهمترین عامل مؤثر معرفی نمودند. کین و همکاران [۲۴] نیز فرونشست‌های رخ داده در قسمت‌هایی از چین را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که برداشت آب زیرزمینی مهمترین عامل محرک فرونشست زمین است. لی و همکاران در دشت پکن چین [۱۲] خطر فرونشست زمین را بررسی کردند. نتایج نشان داد دقت مدل ERT از دیگر مدل‌های استفاده شده بیشتر است. اوریتز زامورا و اورتگا گوئرو در مکزیکوسیتی [۱۷] فرونشست‌ها را بررسی نموده و تخلیه بیش از حد منابع آب زیرزمینی را به عنوان مهمترین عامل مؤثر در وقوع فرونشست معرفی کردند. آنویات و همکاران در تایلند [۳] میزان فرونشست‌ها را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های راداری بررسی نمودند. نتایج نشان داد استفاده از این روش دقت قابل‌قبولی برای تعیین محدوده‌های فرونشست دارد. محمدی و همکاران در دشت سمنان [۱۴] نقشه حساسیت فرونشست را با استفاده از دو مدل وزن واقعه و ماشین بردار پشتیبان تهیه نمودند.

ارزیابی حساسیت‌پذیری فرونشست زمین
در دشت سمنانمجید محمدی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

DOI: 10.22034/17.63.84

چکیده

دشت سمنان بسیار مساعد وقوع فرونشست بوده و خشکسالی در سال‌های اخیر نیز منجر به افزایش آن شده است. هدف این پژوهش ارزیابی حساسیت‌پذیری دشت سمنان نسبت به فرونشست زمین با استفاده از مدل نسبت فراوانی است. ابتدا موقعیت فرونشست‌ها با استفاده از تصاویر لندست و کار میدانی مشخص شد. بعد از طبقه‌بندی نقشه عوامل مؤثر وزن هر نقشه با استفاده از مدل نسبت فراوانی محاسبه شد. بیشترین وزن مربوط به تراز آب کمتر از ۴۱ متر، شیب کمتر از ۲ درجه، شاخص رطوبت توپوگرافی بیشتر از ۱۲، کاربری کشاورزی، انحناء سطح ۰/۰۱- تا ۰/۰۱، انحناء نیمرخ ۰/۰۱- تا ۰/۰۱، فاصله کمتر از ۱۲۶۰ متر جاده، فاصله کمتر از ۷۰۰۰ متر گسل، سازندهای کوتاه‌تر و فاصله کمتر از ۲۰۰ متر آبراهه بود. در نهایت با جمع کردن وزن‌ها، نقشه نهایی حساسیت‌پذیری فرونشست زمین تهیه شد. سطح زیر منحنی برای مدل نسبت فراوانی ۰/۷۶ به دست آمد که نشان می‌دهد این مدل برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان مناسب است. نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست زمین تهیه شده در این پژوهش می‌تواند یک ابزار مفید و کاربردی برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران محلی برای برنامه‌ریزی سرزمین، مدیریت منابع و کاهش خطرات طبیعی باشد.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، دشت سمنان، فرونشست زمین، مدل نسبت فراوانی

^۱ نویسنده مسئول و دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، ایران.
majid.mohammady@semnan.ac.ir

نتایج نشان داد هر دو مدل دقت خوبی داشته ولی دقت ماشین بردار پشتیبان بالاتر است.

کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک به دلیل تخریب بیشتر منابع و به‌ویژه بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی بیشتر در معرض فرونشست قرار دارند. ایران از جمله کشورهایی است که در ۳۰۰ دشت آن فرونشست گزارش شده و امروزه به عنوان یک خطر طبیعی مهم مطرح است. در استان سمنان نیز به دلیل اقلیم خشک و عدم وجود آب سطحی کافی، آب زیرزمینی مهمترین منبع تهیه آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی است. این امر موجب برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش فرونشست در استان سمنان شده است [۱۴].

تاکنون روش‌های مختلفی به منظور تحلیل حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در مناطق مختلف دنیا استفاده شده است ولی به دلیل تفاوت شرایط هر منطقه نمی‌توان مدلی را برای تمام مناطق به عنوان مدل مناسب ارائه کرد. در این پژوهش از روش نسبت فراوانی^۱ به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان استفاده شد. مهمترین مزیت این مدل سادگی محاسبه وزن‌ها و وارد کردن آن در محیط GIS است. با وجود سادگی اجرای مدل، کارایی آن در بسیاری از تحقیقات تأیید شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت سمنان بین عرض‌های ۱۸' ۳۵° تا ۴۳' ۳۵° شمالی و طول‌های ۴' ۵۳° تا ۴۱' ۵۳° شرقی در شمال شهرستان سمنان قرار گرفته و مساحتی در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع دارد (شکل ۱). ارتفاع کمینه و بیشینه دشت سمنان به ترتیب ۸۷۰ و ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بوده و شهرهای سمنان و سرخه در آن واقع شده است. بارش سالانه منطقه حدود ۱۲۰ میلی‌متر بوده و به دلیل کمبود بارش و شدت تبخیر بخش زیادی از آب از منابع آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. کاربری اراضی منطقه شامل زمین‌های کشاورزی، مرتع، مسکونی و اراضی بایر است [۱۴].

تهیه داده‌های مورد نیاز

در وقوع فرونشست عوامل مختلفی نقش دارند که میزان اهمیت هر یک از عوامل در مناطق مختلف متفاوت است. البته موجودیت داده‌ها در یک منطقه نیز از مهمترین عوامل تعیین‌کننده در انتخاب یا عدم انتخاب یک عامل است. در این پژوهش عوامل مؤثر با توجه به موجودیت داده‌ها و توجه به مرور منابع و به‌ویژه تحقیقات انجام شده در کشور انتخاب شد. ابتدا با استفاده از نقاط و خطوط ارتفاعی نقشه‌های توپوگرافی، نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه شد. نقشه‌های درجه شیب، جهت شیب، انحناء سطح^۲، انحناء

نیمرخ^۳ و شاخص رطوبت توپوگرافی^۴ (TWI) با استفاده از نقشه DEM و در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و SAGA-GIS تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی از سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه و نقشه گسل نیز با استفاده از آن تهیه شد. نقشه شبکه آبراهه‌ها و جاده‌ها رقومی شده و فاصله از این عوارض تعیین شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و با استفاده از روش ترکیبی تهیه شد. همچنین سطح آب چاه‌های دشت سمنان از شرکت آب منطقه‌ای استان سمنان تهیه و در محیط ArcGIS10.3 میان‌یابی شد. نقشه پراکنش فرونشست‌ها، با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و پیمایش زمینی تهیه شد (شکل ۱). نکته‌ای که باید به آن توجه شود شباهت فرونشست و شکاف‌های حاصل از آن به برخی رخساره‌های فرسایشی و به‌ویژه فرسایش آبکنندی است. شیب ورودی به شکاف‌ها، وجود یا عدم وجود حفره‌ها و علائم ورود آب به شکاف‌ها در تشخیص فرونشست از رخساره‌های فرسایشی کمک می‌کند. شکل ۲ نمونه‌ای از فرونشست و شکاف‌های ناشی از آن را در دشت سمنان نشان می‌دهد. در شکل ۳ نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر ارائه شده است. تعیین آستانه و طبقه‌بندی نقشه‌ها بر اساس شکستگی طبیعی منحنی که نشان‌دهنده پراکنش پیکسل‌ها است، انجام شد.

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست

برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان از مدل نسبت فراوانی استفاده شد. این مدل با وجود سادگی محاسبات در بسیاری از تحقیقات استفاده شده و کارایی آن تأیید شده است. نسبت فراوانی یک ارزیابی آماری بوده که به خوبی ارتباط متغیر وابسته و متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر) را نشان می‌دهد [۲]. برای محاسبه وزن هر طبقه نقشه از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$FR = \frac{Ac/Acf}{Pc/Pcf} = \frac{Cp}{CFp} \quad (1)$$

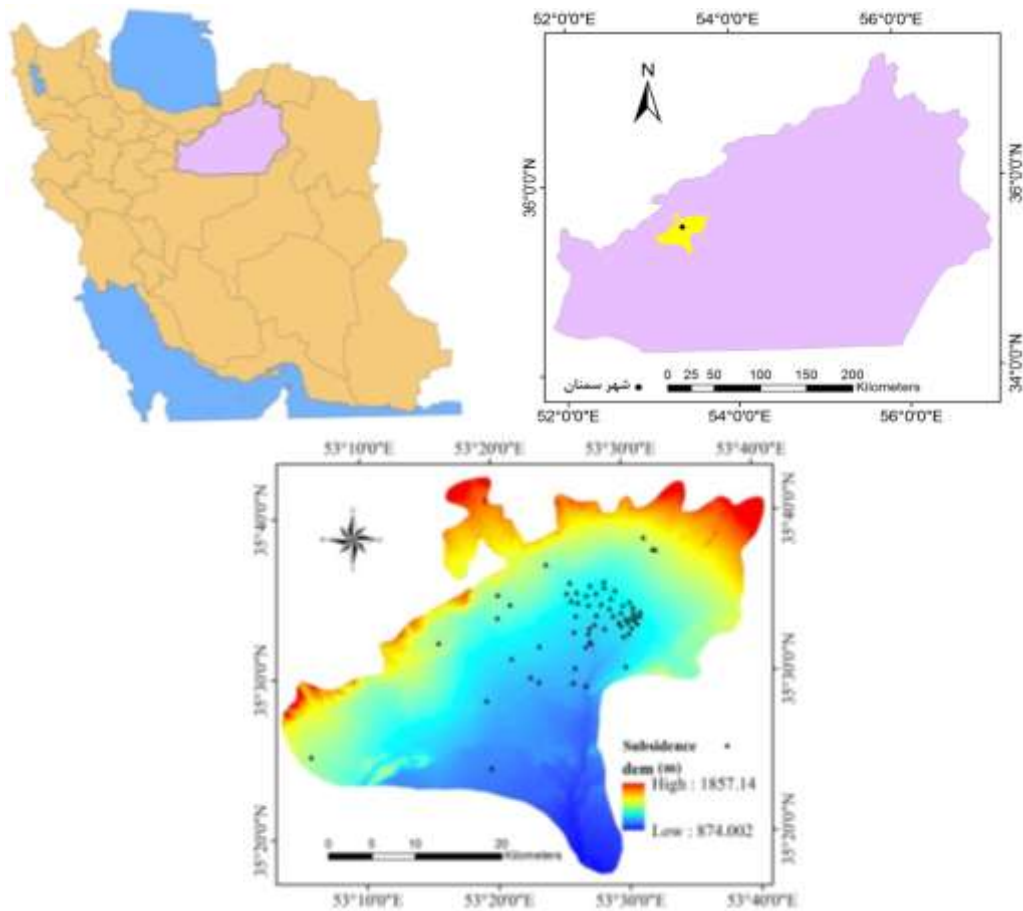
در این رابطه Ac تعداد فرونشست‌های رخ داده در یک طبقه، Acf تعداد کل فرونشست‌های منطقه، Pc مساحت طبقه مورد نظر و Pcf مساحت کل منطقه است. به عبارت ساده‌تر Cp نسبت فرونشست‌های رخ داده در یک طبقه و Cfp نسبت مساحت آن طبقه است [۲]. در نهایت پس از محاسبه وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر طبق رابطه ۱، همه نقشه‌ها با هم تلفیق شده و وزن نهایی در هر پیکسل به دست می‌آید [۱۵].

ارزیابی نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست

به‌منظور ارزیابی نقشه تهیه شده، در ابتدا حدود ۳۰ درصد از فرونشست‌ها در تهیه نقشه حساسیت استاده نشده و برای ارزیابی

3. profile curvature
4. topographic wetness index

1. Frequency Ratio
2. plan curvature



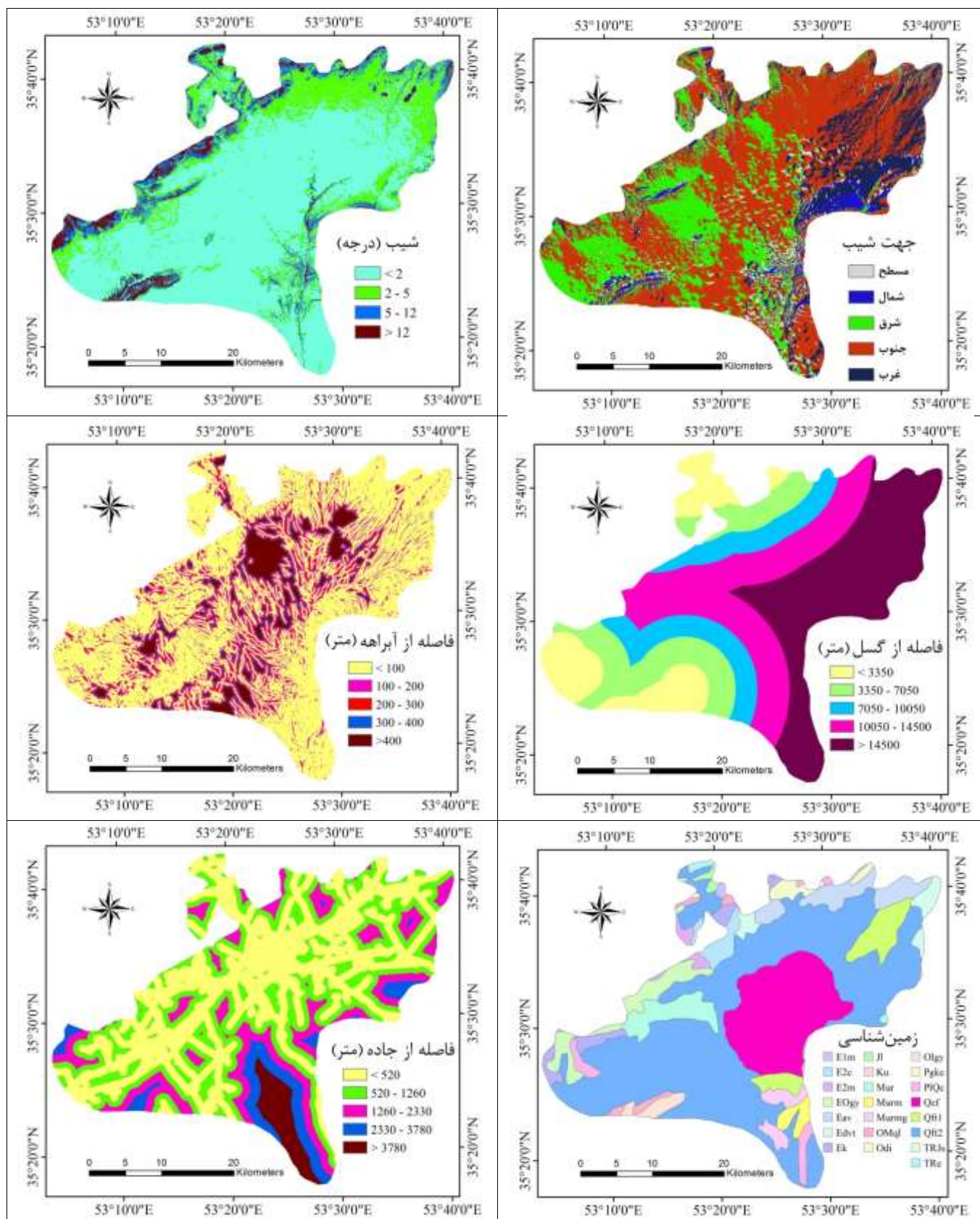
شکل ۱- موقعیت مکانی دشت سمنان در کشور
Fig 1. Location of Semnan plain in country



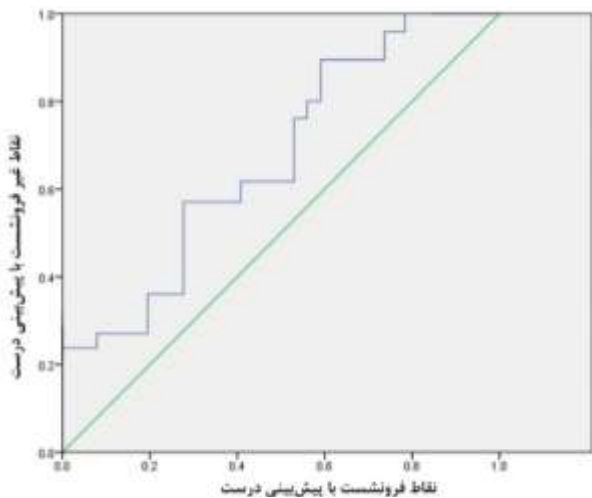
شکل ۲- نمونه‌ای از فرونشست‌های دشت سمنان
Fig 2. Examples of the subsidence in Semnan plain

باشد بیانگر دقت بالاتر مدل است و مقدار آن از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. میزان سطح زیرمنحنی به صورت عالی (۰/۹-۱)، خیلی خوب (۰/۹-۰/۸)، خوب (۰/۸-۰/۷)، متوسط (۰/۷-۰/۶) و ضعیف (۰/۶-۰/۵) طبقه‌بندی می‌شود [۲۶].

کنار گذاشته شدند. برای ارزیابی دقت از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) که یک نمایش ترسیمی از موازنه بین میزان خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست استفاده شد [۱۶]. هر چه سطح زیر منحنی رسم شده مساحت بیشتری داشته

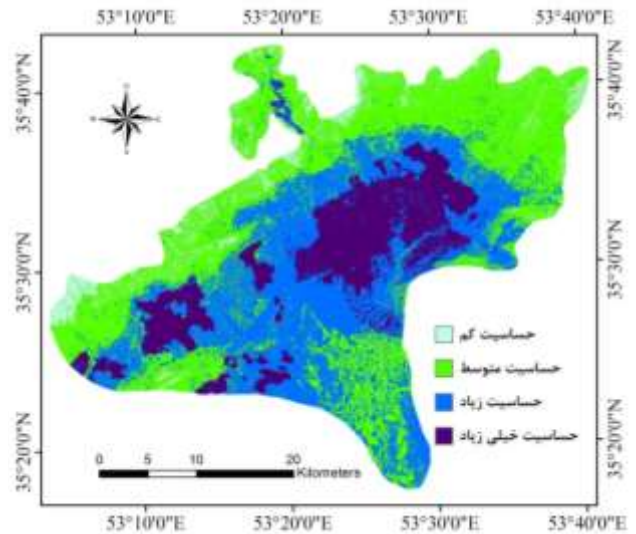


شکل ۳- نقشه‌های عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در دشت سمنان
 Fig 3. Conditioning factors of land subsidence in Semnan plain



شکل ۵- منحنی تشخیص عملکرد نسبی برای مدل نسبت فراوانی

Fig 5. ROC curve of Frequency Ratio model



شکل ۴- نقشه حساسیت فرونشست تهیه شده با مدل نسبت فراوانی

Fig 4. Land subsidence susceptibility provided using

Frequency Ratio model

یافته‌ها

نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست زمین

همانطور که بیان شد ابتدا برای طبقات هر نقشه از عوامل مؤثر نسبت فراوانی محاسبه شد. در نهایت با تلفیق نقشه‌های وزنی، نقشه وزنی نهایی به عنوان نقشه حساسیت‌پذیری به دست آمد. در مرحله بعد با استفاده از روش شکستگی طبیعی، نقشه به دست آمده به چهار طبقه مطابق شکل ۴ تقسیم شد [۱۴ و ۱۵].

برای بررسی میزان حساسیت کلی منطقه مساحت هر یک از طبقات خطر محاسبه شد. نتایج نشان داد مساحت طبقات حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم به ترتیب ۲۱۴، ۲۲۹، ۵۰۱ و ۶۲ کیلومتر مربع است. محاسبه درصد مساحت‌ها نشان می‌دهد که حدود ۱۸ درصد از منطقه دارای حساسیت خیلی زیاد است.

ارزیابی نقشه حساسیت فرونشست

برای ارزیابی دقت از منحنی ROC و محاسبه سطح زیر آن استفاده شد. میزان سطح زیر منحنی ۰/۷۶ به دست آمد که مدل را در طبقه خوب قرار می‌دهد (شکل ۵).

بررسی وزن مربوط به هر یک از طبقات عوامل مؤثر نیز انجام شد. نشان داد بیشترین وزن نسبت فراوانی مربوط به تراز آب زیرزمینی کمتر از ۴۱ متر، شیب کمتر از ۲ درجه، شاخص رطوبت توپوگرافی بیشتر از ۱۲، کاربری اراضی کشاورزی، انحناء سطح ۰/۰۱- تا ۰/۰۱، انحناء نیمرخ ۰/۰۰۱- تا ۰/۰۰۱، فاصله کمتر از ۱۲۶۰ متر تا جاده، فاصله کمتر از ۷۰۰۰ متر تا گسل، سازندهای کوتاه‌تر و فاصله کمتر از ۲۰۰ متر تا آبراهه بوده است.

بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مهمترین مخارات طبیعی در

سال‌های اخیر در سرتاسر جهان و از جمله ایران مطرح است. به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک در بسیاری از مناطق کشور بهره‌برداری بیش از حد از منابع و تخریب منابع آب زیرزمینی وقوع این پدیده را سرعت بخشیده است. نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست در دشت سمنان نشان می‌دهد بخش‌های زیادی از منطقه در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است که این امر لزوم توجه هر چه بیشتر به این پدیده را توجیه می‌کند. بررسی ارتباط فرونشست‌ها و تراز آب زیرزمینی نشان داد مناطقی که تراز آب آن‌ها کمتر از ۴۱ متر است بیشتر در معرض فرونشست قرار دارند. دشت سمنان دارای آب سطحی بسیار ناچیزی بوده و آب‌های زیرزمینی مهمترین منبع تامین آب برای کشاورزی، صنعت و شرب است. این امر موجب بهره‌برداری بیش از حد از این منابع و تشدید فرونشست زمین در منطقه است. بسیاری از چاه‌های بهره‌برداری در منطقه دارای عمق کم بوده و چاه‌های عمیق نیز هم‌زمان از تمام سفره‌ها بهره‌برداری می‌کنند و به همین دلیل مناطق با تراز آب کمتر، بیشتر در معرض تخریب و در نتیجه فرونشست هستند. بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب فشار بین خلل و فرجی که لایه‌های بالایی خاک را نگه‌داشته‌اند کاهش داده و موجب فرونشست می‌شود [۷]. محققین دیگری نیز بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی را به عنوان مهمترین عامل در وقوع فرونشست معرفی نموده‌اند [۹، ۱۸ و ۲۲]. یکی دیگر از عوامل مهم در وقوع فرونشست شیب زمین است به طوری‌که تقریباً تمام فرونشست‌ها در شیب کمتر از ۲ درجه اتفاق افتاده است. شیب زمین بر میزان نفوذ و به دنبال آن سرعت جریان سطحی تأثیرگذار است. همچنین بیشتر مناطق مسکونی و کشاورزی در مناطق مسطح واقع شده‌اند و این مناطق بیشترین بهره‌برداری از آب زیرزمینی را دارند [۱۴]. در بین کاربری‌های مختلف، کشاورزی بیشترین نقش را در وقوع فرونشست داشته است به طوری‌که بیشتر

فرونشست‌ها در کاربری کشاورزی رخ داده است. این موضوع هم‌افزایی تأثیر کاربری و برداشت بیش از حد آب را نشان می‌دهد. متأسفانه منبع اصلی تأمین آب کشاورزی در دشت سمنان منابع آب زیرزمینی بوده و برداشت بیش از حد از آن‌ها برای کشاورزی و وقوع فرونشست را به‌ویژه در سال‌های اخیر به شدت افزایش داده است. مقایسه مناطق با حساسیت خیلی زیاد و کاربری کشاورزی به وضوح تأثیر کشاورزی را نشان می‌دهد. برداشت بیش از حد آب در مناطق کشاورزی آبخوان را خالی کرده و فضای بین خاکدانه‌ها از بین رفته است. این موضوع باعث فشرده شدن خاکدانه‌ها و در نتیجه فرونشست می‌شود.

در مناطق مسکونی سمنان نیز منبع اصلی تأمین آب از منابع زیرزمینی بوده و چاه‌های عمیق وجود دارد. برداشت بیش از حد و همچنین عدم نفوذ آب به دلیل سطح غیرقابل نفوذ در مناطق مسکونی فرونشست را افزایش داده است. بررسی ارتباط جاده و فرونشست‌ها نشان می‌دهد ارتباط مستقیمی بین آن‌ها وجود دارد و تعداد فرونشست‌ها در اطراف جاده‌ها بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد هر گونه دستکاری در طبیعت و تغییر خصوصیات فیزیوگرافی، نفوذپذیری و ... وقوع فرونشست را تشدید می‌کند. جاده باعث تغییر خصوصیات فیزیوگرافی به دلیل خاکریزی و خاک‌برداری شده و همچنین به دلیل تردد وسایل نقلیه وزن بیشتری به منطقه تحمیل می‌کند. از جمله عوامل دیگری که در منطقه بر وقوع فرونشست تأثیر داشته است گسل‌های منطقه است. گسل‌ها معمولاً موجب حرکت صفحات و وقوع فرونشست می‌شود [۶]. البته برای تأثیر بیشتر گسل باید شرایط دیگر مانند فعالیت‌های معدنی، افت آب زیرزمینی و غیره فراهم باشد که در منطقه مورد مطالعه این شرایط فراهم بوده و باعث هم‌افزایی اثر عوامل مختلف شده است. محققان دیگری نیز بر نقش گسل بر تغییرات سطح زمین تأکید کرده‌اند. به عنوان مثال پنگ و همکاران [۱۹] گسل را به عنوان مهمترین عامل در وقوع فرونشست در بخش‌های از چین دانسته و معتقد هستند شکل ظاهری زمین نتیجه مستقیم فعالیت گسل‌های منطقه است. همچنین لی و همکاران [۱۱] نیز گسل را به عنوان مهمترین عامل مؤثر بر وقوع فرونشست معرفی نمودند. بررسی ارتباط سازندهای زمین‌شناسی و فرونشست نشان داد تمام فرونشست‌ها در سازندهای کواترنر و ریزدانه اتفاق افتاده است. این موضوع اهمیت خصوصیات زمین‌شناسی و جنس سازندها در وقوع فرونشست را نشان می‌دهد. خرسندی و عبدلی [۱۰] نیز به این موضوع اشاره کرده، وجود و انتقال ذرات ریز در آبخوان را به‌عنوان عامل مهمی در فرونشست‌های دشت همدان معرفی نمودند. همچنین لی و همکاران [۱۲] نیز بر نقش سازندهای کواترنر در وقوع فرونشست‌های پکن تأکید کرده‌اند. همان‌طور که بیان شد از روش نسبت فراوانی برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست زمین استفاده شد. این مدل با وجود سادگی در بسیار از مطالعات مربوط به مخاطرات طبیعی استفاده و دقت آن تأیید شده است. در این پژوهش نیز دقت آن بر

اساس سطح زیرمنحنی ROC برابر با ۰/۷۶ به دست آمد. همان‌طور که در بخش ارزیابی نقشه حساسیت‌پذیری ارائه شد یک طبقه‌بندی استاندارد برای ارزیابی دقت وجود دارد. طبق این استاندارد دقت بین ۰/۸-۰/۷ طبقه خوب بوده و بر اساس آن دقت مدل نسبت فراوانی در این منطقه خوب ارزیابی می‌شود. دقت این مدل در مطالعات دیگری از جمله ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی [۵] مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش [۱، ۸ و ۲۳]، و آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب [۲۰ و ۲۱] نیز مورد تأیید قرار گرفته است. میزان سطح زیر منحنی برای مطالعات مذکور به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۷۸، ۰/۹، ۰/۸۶، ۰/۸۵ و ۰/۹ گزارش شده است. مساحت زیاد حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در منطقه اهمیت این پدیده را نشان می‌دهد. فرونشست می‌تواند خطرات دیگر مانند سیل‌خیزی را افزایش داده و یا به زیرساخت‌های موجود از جمله جاده و راه‌آهن خسارت وارد کند. فرونشست با ایجاد شکاف در سطح زمین ممکن است مسیر آب را تغییر داده و یا باعث تمرکز جریان‌های سطحی در یک منطقه شود که این موضوع می‌تواند افزایش سیل‌خیزی را به همراه داشته باشد. با توجه به این شرایط برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران باید در برنامه‌های توسعه‌ای به این موضوع توجه کرده و تا حد امکان از وقوع و تشدید آن جلوگیری کنند.

منابع

1. Alsabhan, A.H. Singh, K. Sharma, A. Alam, S. Pandey, D.D. Rahman, S.A.S. Khursheed, A. and Munshi, F.M. 2022. Landslide susceptibility assessment in the himalayan range based along kasauliparwanoo road corridor using weight of evidence, information value, and frequency ratio. *Journal of King Saud University – Science*. 34(2):101759.
2. Amponsah, P.O. Forson, E.D. Sungzie, P.S. and Akosuah Loh, Y.S. 2023. Groundwater prospectivity modeling over the Akatsi Districts in the Volta Region of Ghana using the frequency ratio technique. *Modeling Earth Systems and Environment*. 9:937-955.
3. Aobpaet, A. Cuenca, M.C. Hooper, A. and Trisirisatawong, I. 2013. InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*. 34: 2969-2982.
4. Arabameri, A. Pal, S.C. Rezaie, F. Chakraborty, R. Chowdhuri, I. Blaschke, T. and Ngo, P.T.T. 2021. Comparison of multi-criteria and artificial intelligence models for land-subsidence susceptibility zonation. *Journal of Environmental Management*. 284:112067.
5. Arshad, A. Zhang, Z. Zhang, W. and Dilawar, A. 2020. Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a gis-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of pakistan. *Geoscience Frontiers*. 11(5):1805-1819.

17. Ortiz-Zamora, D. and Ortega-Guerrero, A. 2010. Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*. 46: 183–186.
18. Pacheco, J. Arzate, J. Rojas, E. Arroyo, M. Yutis, V. and Ochoa, G. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*. 84(3-4):143-160.
19. Peng, J.B. Sun, X.H. Wang, W. and Sun, G.C. 2016. Characteristics of land subsidence, earth fissures and related disaster chain effects with respect to urban hazards in Xi'an, China. *Environmental Earth Sciences*. 75:1190.
20. Saleh, A. Yuzir, A. and Sabtu, N. 2022. Flash flood susceptibility mapping of sungai pinang catchment using frequency ratio. *Sains Malaysiana*. 51(1):51–65.
21. Sarkar, D. and Mondal, P. 2020. Flood vulnerability mapping using frequency ratio (fr) model: a case study on kulik river basin, indobangladesh barind region. *Applied Water Science*. 10:17.
22. Sekkeravani, M.A. Bazrafshan, O. Pourghasemi, H.R. and Holisaz, A. 2022. Spatial modeling of land subsidence using machine learning models and statistical methods. *Environmental Science and Pollution Research*. 1-18.
23. Singh, P. Sur, U. Kumar Rai, P. and Singh, S.K. 2023. Landslide susceptibility prediction using frequency ratio model: a case study of Uttarakhand, Himalaya (India). *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 89: 600-612.
24. Qin, H. Andrews, C.B. Tian, F. Cao, G. Luo, Y. and Liu, J. 2018. Groundwater-pumping optimization for land-subsidence control in Beijing plain, China. *Hydrogeology Journal*. 26(4): 1061-1081.
25. Xue, YQ. Zhang, Y. Ye, S.J. Wu, J.C. and Li, Q.F. 2005. Land subsidence in China. *Environmental Geology*. 48(6): 713–720.
26. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, PhD Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 p.
6. Bouwer, H. 1977. Land subsidence and cracking due to ground water depletion. *Ground Water*. 15:358–364.
7. De Luna, R.M.R. Garnes, S.J.D.A. Cabral, J.J.D.S.P. and Santos, S.M.D. 2017. Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). *Nat Hazards*. 86:1363–1376.
8. Ding, Q. Chen, W. and Hong, H. 2017. Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*. 32(6):619–639.
9. Ghorbanzadeh, O. Roostamzadeh, H. Blaschke, T. Gholaminia, K. and Aryal, J. 2018. A new GIS-based data mining technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and k-fold cross-validation approach for land subsidence susceptibility mapping. *Natural Hazards*. 94(2):497-517.
10. Khorsandi, A. and Abdali, M. 2009. Sinkhole formation hazards, case study: Sinkholes hazard in Hamadan Plain and Lar Valley of Iran. *Proceeding of the 6th Euregeo Congress, Munich, Germany*. pp. 359–362.
11. Lee, S. Park, I. and Choi, J.K. 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. *Environmental Management*. 49:347–358.
12. Li, F. Liu, G. Tao, Q. and Zhai, M. 2023. Land subsidence prediction model based on its influencing factors and machine learning methods. *Natural Hazards*. 116:3015–3041.
13. Mohammady, M. Pourghasemi, and H.R. 2021. Accuracy Assessment of GLM and FDA Models for Land Subsidence Susceptibility Mapping in Semnan Plain. *Watershed Management Science & Engineering*. 15(54): 1-12. (In Persian)
14. Mohammady, M. Pourghasemi, H.R. and Amiri, M. 2019. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): a comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms. *Natural Hazards*. 99: 951- 971.
15. Mohammady, M. Pourghasemi, H.R. and Pradhan, B. 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*. 61:221–236.
16. Nefeslioglu, H.A. Duman, T.Y. and Durmaz, S. 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea Region of Turkey). *Geomorphology*. 94: 401-418.

Land Subsidence Susceptibility Assessment in Semnan plain

M. Mohammady¹

Received: 07-08-2023 Accepted: 23-10-2023

Abstract

Semnan plain is very susceptible to land subsidence and drought, in recent years has greatly increased the occurrence of subsidence. The aim of current research is land subsidence susceptibility assessment using frequency ratio model. At first locations of the land subsidence were specified using Landsat satellite images and field surveys. After classifying conditioning factors maps, the weight of each map was calculated using the frequency ration model. The highest weight was related to water level less than 41 meters, slope less than 2 degrees, topographic wetness index more than 12, agriculture land use type, plan curvature -0.01 to 0.01, profile curvature -0.001 to 0.001, distance less than 1260 meters of road, less than 7000 meters of faults, Quaternary formations and less than 200 meters of drainage network. Finally, by combining the weights, the final subsidence susceptibility map was prepared. The AUC for the frequency ratio model was 0.76 that showed this model is acceptable for land subsidence susceptibility mapping in the Semnan Plain. Land subsidence susceptibility maps produced in this research can be useful and functional tools for regional planners and policy makers for land use planning, resource management, and natural hazard mitigation.

Keywords: *Groundwater, Semnan plain, Land subsidence, Frequency ratio model*

1. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Iran.
Email : majid.mohammady@semnan.ac.ir