دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

شبیه‌سازی مکانی و تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی

سحر عبداللهی[۱]، حمیدرضا پورقاسمی[۲]، غلامعباس قنبریان[۱] و روجا صفائیان[۱]

۱- بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۲- بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، (نویسنده مسوول: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir)
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۰۵
صفحه: ۱۳۳ تا ۱۴۴

چکیده

هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی مکانی و تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی در شهرستان‌های جیرفت و عنبرآباد است. بدین منظور ابتدا موقعیت فرونشست‌های زمین با استفاده از بازدیدهای گسترده میدانی مشخص و پس از آن نقشه پراکنش فرونشست زمین منطقه مورد مطالعه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه گردید. سپس هر یک از عوامل موثر بر وقوع فرونشست زمین از قبیل درصد و جهت شیب، طبقات ارتفاعی، انحنای نیم‌رخ، انحنای سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، واحدهای سنگ‌شناسی، داده‌های پیزومتری، کاربری اراضی و شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) در محیط GIS تهیه و بعد از آن با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR) وزن طبقات مربوط به هر عامل مشخص شد. نهایتاً نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی برای منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. نتایج ارزیابی مدل با استفاده از ۳۰ درصد نقاط استفاده‌نشده در فرآیند شبیه‌سازی و بر اساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) نشان داد، نقشه حساسیت فرونشست زمین تهیه‌شده با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی صحت بالایی (۰/۸۵۹) دارد. بنابراین نقشه پهنه‌بندی مذکور می‌تواند نقش به‌سزایی در تعیین مناطق بحرانی از نظر بهره‌برداری آب و تخریب سفره‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: بیشینه آنتروپی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، فرونشست زمین، نسبت فراوانی

مقدمه

زمین و سطح آن در معرض انواع مختلف نیروهای داخلی و خارجی قرار دارد، نیروهایی که به‌وسیله حرکات پیچیده زمین و نیروی گرانش تولید می‌شوند. بیش‌تر تغییرات فیزیکی سطح زمین نتیجه پدیده‌های طبیعی هستند که برخی از آن‌ها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم توسط فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شوند (۳۶). مخاطرات طبیعی نظیر زلزله، سیل، رانش و فرونشست زمین همواره تهدیدی برای ساکنین یک سرزمین بوده است. در این میان فرونشست زمین نسبت به سایر خطرات طبیعی و انسانی سابقه کم‌تری داشته است. فرونشست زمین به فروریزش ناگهانی یا تدریجی روبه‌پایین سطح زمین اطلاق می‌شود که می‌تواند دارای بردار اندک جابجایی افقی باشد (۳۵). فرونشست زمین اثرات سوء بر زندگی اجتماعی، اقتصادی، ساخت و ساز شهری و محیط زیست دارا است (۱۱). عوامل مختلفی در بروز این پدیده نقش دارند که مهم‌ترین آن‌ها شامل سیلاب‌ها، زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی و برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد (۱۷). در این پژوهش، شهرستان‌های عنبرآباد و جیرفت به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده‌اند. با توجه به افزایش جمعیت و خشک‌سالی‌های پی‌درپی، سطح آب زیرزمینی در مناطق مذکور با بیلان منفی روبه‌رو بوده است و همین عامل به‌همراه عوامل دیگر مانند خصوصیات زمین‌شناسی سبب ایجاد حفره‌ها، درز و شکاف‌های متعددی در قسمت‌های مختلف منطقه شده است و با ایجاد خسارات به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی و غیرمسکونی و هم‌چنین قطع خطوط ارتباطی راه‌ها توجه عموم را به‌خود جلب نموده است. با توجه به این‌که مناطق ذکر شده به لحاظ اقلیمی جزء مناطق گرم و خشک محسوب می‌شوند و تنها منبع تامین‌کننده‌ی آب در این مناطق آب‌های زیرزمینی می‌باشد، با ادامه‌ی روند خشک‌سالی‌ها و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی پدیده‌ی فرونشست زمین در حال گسترش است و به‌طور پیوسته بر وسعت آن افزوده می‌شود. نظر به این‌که حدود ۸۰ درصد فعالیت‌های ساکنین مناطق عنبرآباد و جیرفت به بخش کشاورزی اختصاص دارد، لذا آسیب‌های وارد شده از سوی این عامل مخرب به زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی و اثرات نامطلوب آن بر زندگی ساکنین بالاخص کشاورزان و پیامدهای اقتصادی ناشی از آن، بیان‌گر اهمیت بالای بررسی پدیده فرونشست زمین در مناطق ذکر شده است. در ایران فرونشست زمین سابقه‌ای نسبتاً طولانی (بیش از چند دهه) دارد (۳۲).

روش‌های گوناگونی جهت بررسی و فرآیند شبیه‌سازی پدیده‌ها در جهان صورت گرفته است. یکی از روش‌های کاربردی و قابل‌توجه در این زمینه که طی سالیان اخیر به‌صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است مدل درخت تصمیم‌گیری است که پیش‌بینی را در قالب یک‌سری قوانین تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد، در حالی‌که در روش شبکه عصبی مصنوعی، تنها نتایج پیش‌بینی بیان می‌شود و چگونگی محاسبات آن درون شبکه به‌صورت جعبه سیاه باقی می‌ماند. هم‌چنین در درخت تصمیم‌گیری برخلاف شبکه‌های عصبی لزومی ندارد داده‌ها به‌صورت عددی باشند (۳). لوبیس و همکاران (۱۲) در پژوهشی در کشور اندونزی جهت بررسی فرونشست زمین از روش InSAR[1] استفاده کردند. طبق نتایج

1- Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

به‌دست آمده، میزان فرونشست سالانه حدود ۸ سانتی‌متر در سال تخمین زده شد و هم‌چنین شدت فرونشست بیش‌تر در مناطق ساحلی و مناطق دشتی رخ داده بود (۱۲). روش دیگر جهت مدل‌سازی فرونشست زمین استفاده از شبکه عصبی مصنوعی یکی از الگوریتم‌های هوش محاسباتی است که جهت بررسی حساسیت فرونشست زمین در اطراف معادن زغال‌سنگ در کشور کره جنوبی توسط لی و همکاران (۱۰) استفاده گردید. عوامل موثر به‌کار برده شده در این پژوهش عبارت از عمق معادن زغال‌سنگ، عمق آب‌های زیرزمینی، فاصله از چاله، جنس توده سنگ، فاصله از گسل، زمین‌شناسی و کاربری اراضی است. نتایج نشان داد نقشه تهیه‌شده دارای دقتی در حدود ۹۵/۹۸ درصد بوده است، ضمن آن‌که فاصله از گسل، به‌عنوان موثرترین عامل در تحقیق مذکور شناسایی گردید. به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور و اطلاعات ماهواره‌ای یکی دیگر از روش‌های نوین در پایش پدیده فرونشست زمین است و تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR)[1] تاکنون یکی از کم‌هزینه‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های سنجش از دور برای شناسایی و نمایش جابجایی‌های به‌وجود آمده در سطح زمین می‌باشد (۳۲). هم‌چنین استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی است که از سه لایه‌ی ورودی، خروجی و پردازش تشکیل شده است (۴۱). در پژوهشی دیگر، به‌منظور بررسی فرونشست زمین در کشور چین، لی و همکاران (۱۱) روش ماشین بردار پشتیبان با ۴ تابع کرنل متفاوت را مورد استفاده و ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از مقایسه میان الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با توابع کرنل مختلف و روش‌های تک‌متغیره و چندمتغیره آماری، نشان‌دهنده‌ی دقت بالاتر مدل ماشین بردار پشتیبان بود.

اوزدمیر (۱۶) به‌منظور ارزیابی پراکنش فرونشست زمین در ترکیه روش وزنی و GIS[2] را مورد استفاده قرار داد. در پژوهش ایشان، ارتباط عوامل زمین‌شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژی و کاربری اراضی با فرونشست‌های ایجادشده، بررسی گردید. نتایج نشان داد میزان فرونشست‌ها در نواحی با ضخامت کم‌تر از ۵۰ متر، دوره‌ی زمین‌شناسی نئوژن با سازند Insuya شامل خاک‌های آهکی و رسی-آهکی، فاصله‌ی ۳۰۰۰-۲۰۰۰ متر از آبراهه و فاصله‌ی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر از گسل ارتباط مستقیم داشت. بنابراین طبق نتایج به‌دست آمده با شناسایی عوامل مذکور و کنترل آن‌ها، می‌توان میزان خطرات ناشی از فرونشست زمین را کاهش داد. برای تعیین میزان ارتباط و تاثیرگذاری فرونشست زمین در وقوع سیل، مدل‌های هیدرولیک در مناطق شهری شانگ‌های (چین) توسط یین و همکاران (۴۰) به‌کار برده شد. نتایج نشان داد فرونشست زمین می‌تواند به‌طور غیرمستقیم تحت تاثیر ویژگی‌های سیل قرار گیرد.

به‌طور کلی قرارگرفتن دوسوم از سطح کشور در رده اقلیم گرم و خشک، خشک‌سالی‌های اخیر و کاهش نزولات جوی و به‌تبع آن افزایش بهره‌برداری از سطح آبخوان‌ها به‌ویژه در بخش کشاورزی، زیرساخت مناسبی را برای بروز پدیده نشست زمین فراهم آورده است.

استان کرمان یکی از مناطق مهم کشور از نظر کشاورزی است که همواره در بخش‌های مختلف خود مانند رفسنجان، سیرجان، زرند، جیرفت و عنبرآباد پدیده‌ی فرونشست زمین را تجربه کرده است (۲). بنابراین هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی مکانی فرونشست زمین با، تهیه نقشه و پیش‌بینی خطر فرونشست استفاده از الگوریتم بیشینه آنتروپی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. تحقیقات انجام‌شده در خارج از کشور و به‌ویژه در داخل کشور نشان داده که مدل ماکزیمم انتروپی در مدل‌سازی فرونشست زمین استفاده‌نشده و هم‌چنین تاکنون هیچ تحقیق مرتبطی با شبیه‌سازی فرونشست زمین در داخل کشور مشاهده نگردیده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

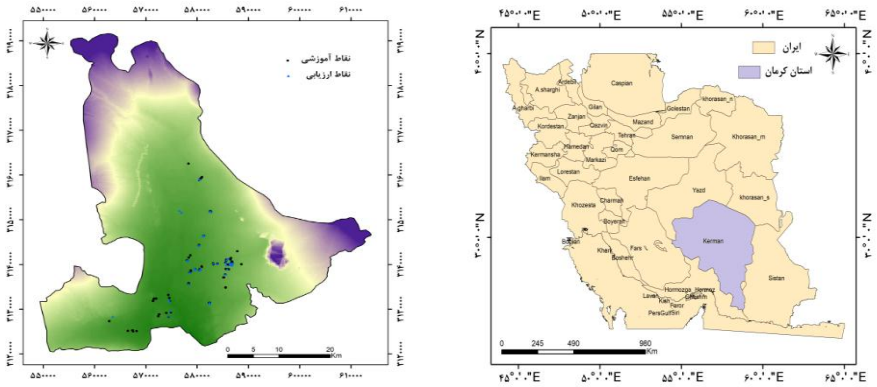
شهرستان‌های عنبرآباد و جیرفت به فاصله‌ی ۲۹ کیلومتری نسبت به هم و بین طول‌های جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۱۷ دقیقه‌ی شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۲۹ درجه‌ی شمالی واقع شده‌اند (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه از شرق، شمال و شمال شرقی به‌وسیله‌ی کوه‌های مرتفع جبال‌بارز، از شمال غرب به‌وسیله‌ی کوه‌های ساردوئیه و از جنوب به تپه‌های بلند محدود و از طریق تنگه بهادرآباد در انتهای جنوبی به دشت رودبار متصل می‌شود. وسعت حوزه آبخیز دو منطقه ۴۹۴۳ کیلومتر مربع است که ۱۷۵۹ کیلومتر مربع آن را دشت و۳۱۸۴ کیلومتر مربع مابقی را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد. حداکثر دمای منطقه مورد مطالعه ۵۰-۴۵ درجه در تابستان و ۵-۲ درجه در زمستان و با متوسط بارندگی ۱۷۰ میلی‌متر در سال می‌باشد و در مجموع دارای ۱۰۷۰۸۵ هکتار اراضی کشاورزی است (۲).

روش پژوهش

در اولین گام اقدام به مطالعه و بازدیدهای گسترده صحرائی از بخش‌های مختلف منطقه اعم از زمین‌های کشاورزی، نخلستان‌ها، باغات و مناطق مسکونی و سایر نقاط دارای عارضه‌ی فرونشست زمین گردید و با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS)[3]، ۱۹۴ محل وقوع فرونشست زمین شناسایی شد. نقشه پراکنش فرونشست‌های منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. سپس عوامل درصد شیب، شکل شیب، جهت شیب، کلاسه‌های ارتفاعی، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، داده‌های پیزومتری، کاربری اراضی، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)[4] و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)[5] تهیه گردیدند. نقشه‌های عوامل فاصله از روی نقشه‌های پایه توپوگرافی، زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای (لندست ۸ در سال ۲۰۱۶) موجود تهیه شد. در این پژوهش به‌منظور تعیین ارتباط میان طبقات هر عامل در وقوع فرونشست‌ها از مدل نسبت فراوانی و در نهایت به‌منظور تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین از مدل بیشینه آنتروپی استفاده گردید (شکل ۲).

1- Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR)
2- Geographic Information System (GIS)
3- Global Positioning System (GPS)
4- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
5- Topographic Wetness Index (TWI)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان کرمان و ایران
Figure 1. Location of the study area in Kerman province and Iran



شکل ۲- نمودار جریانی مراحل تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین
Figure 2. Flowchart of land-subsidence susceptibility mapping steps

عوامل موثر بر وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه

نقشه درصد شیب منطقه مورد مطالعه، به ۴ طبقه کم‌تر از ۲، ۸-۲، ۱۵- ۸ و بیش‌تر از ۱۵ درصد با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی (Natural Breaks) طبقه‌بندی گردید. جهت شیب تاثیر به‌سزایی روی فرونشست زمین داشته، به‌طوری‌که با حفظ رطوبت و مقدار پوشش گیاهی می‌تواند اثر مستقیمی روی حفاظت خاک و متعاقباً کاهش فرونشست زمین داشته باشد (۲۵). نقشه جهت شیب در ۸ طبقه شمال (۰- ۲۲/۵° و ۳۳۷/۵- ۳۶۰°)، شمال شرقی (۲۲/۵- ۶۷/۵°)، جنوب (۶۷/۵- ۱۱۲/۵°)، جنوب شرقی (۱۱۲/۵- ۱۵۷/۵°)، جنوب (۱۵۷/۵- ۲۰۲/۵°) جنوب غربی (۲۰۲/۵- ۲۴۷/۵°)، غرب (۲۴۷/۵- ۲۹۲/۵°) و شمال غربی (۲۹۲/۵- ۳۳۷/۵°) و

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

یک طبقه هموار (۱-) طبقه‌بندی گردید. نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی (Natural Breaks) در ۵ طبقه کم‌تر از ۶۰۴/۶، ۶۰۴/۶- ۶۹۲/۱۵، ۶۹۲/۱۵- ۷۹۲/۱۹، ۷۹۲/۱۹- ۹۲۳/۵۱ و بیش‌تر از ۹۲۳/۵۱ متر طبقه‌بندی گردید. انحنای نیم‌رخ، یک ویژگی ثانویه ژئومرفولوژی بوده که جهت افزایش یا کاهش، میزان رسوب (عدد مثبت) و میزان فرسایش (عدد منفی) می‌باشد (۳۷). نقشه انحنای نیم‌رخ در سه طبقه کم‌تر از ۰/۰۱- (محدب)، ۰/۰۱ — ۰/۰۱- (هموار) و بزرگ‌تر از ۰/۰۱ (مقعر) طبقه‌بندی گردید. تاثیر انحنای سطح روی فرآیندهای فرسایشی شیب، همگرایی یا واگرایی جریان آب موثر است (۲۲، ۲۴). بنابراین نقشه مذکور در سه طبقه کم‌تر از ۰/۰۱- (مقعر)، ۰/۰۱ — ۰/۰۱- (هموار) و بزرگ‌تر از ۰/۰۱ (محدب) طبقه‌بندی گردید. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) یکی از متغیرهای ثانویه توپوگرافی است که درجه تجمع آب را در یک مکان خاص، مشخص می‌کند (۱۸). نقشه TWI منطقه مورد مطالعه در سه کلاس کم‌تر از ۲، ۸-۲ و بیش‌تر از ۸ طبقه‌بندی گردید. شاخص رطوبت توپوگرافی از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید (۲۶):

$$\mathrm{TWI} = \ln \frac{\alpha}{\tan \beta} \qquad (۱)$$

α مساحت منطقه و $\tan\beta$ زاویه شیب منطقه به درجه می‌باشد

نقشه فاصله از آبراهه در ۵ طبقه با فواصل ۰- ۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۳۰۰، ۳۰۰-۴۰۰ و بیش‌تر از ۴۰۰ متر طبقه‌بندی گردید. به‌منظور بررسی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و اثرات واحدهای سنگ‌شناسی بر پدیده فرونشست زمین، نقشه زمین‌شناسی منطقه جیرفت و عنبرآباد (شیت‌های حنا، محمدآباد و سبزواران) در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه گردید.

بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌منظور آبیاری مزارع و باغات منجر به کاهش تراز آب شده که نقش به‌سزایی در تسریع تشکیل فروچاله‌ها دارد (۳۴). آمار ۱۵ ساله چاه‌های پیزومتری منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۸۰- ۱۳۹۵ از سازمان آب منطقه‌ای جنوب کرمان تهیه و سپس تجزیه و تحلیل‌های لازم روی داده‌های مذکور اعمال و نقشه تراز سفره آب زیرزمینی با استفاده از روش میان‌یابی وزن فاصله معکوس (IDW)[1] تهیه گردید (۷).

به‌طور کلی، تعداد و اندازه فروچاله‌ها، کاربری اراضی منطقه را تحت تاثیر قرار می‌دهد (۱۶). نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از دفتر طرح و برنامه‌ریزی استانداری کرمان برای سال ۱۳۹۵ آماده شد. نقشه شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و توسط رابطه ۲ تهیه و در ۵ طبقه کوچک‌تر یا مساوی صفر (آب، برف و یخ)، ۰- ۰/۰۵ (خاک لخت)، ۰/۱- ۰/۰۵ (پوشش گیاهی تنک)، ۰/۵- ۰/۱ (پوشش گیاهی متراکم) و بیش‌تر از ۰/۵ (پوشش جنگلی) طبقه‌بندی شد (۲۰).

NDVI=(Band5-Band4)/(Band5+Band4) (رابطه ۲)

که در آن: باند ۴ مادون قرمز و باند ۵ مادون قرمز نزدیک است.

مدل نسبت فراوانی (FR)[2]

نسبت فراوانی، ارتباط کمی میان فرونشست زمین و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را مشخص می‌نماید. در تعیین نرخ نسبت فراوانی، نسبت فرونشست زمین در هر کلاس از فاکتورهای تأثیرگذار نسبت به کل فرونشست‌ها به‌دست می‌آید و نسبت سطح هر کلاس نسبت به کل مساحت منطقه نیز محاسبه می‌شود. در نهایت، با تقسیم نرخ رخداد فرونشست‌ها در هر کلاس بر نرخ مساحت هر کلاس نسبت به کل منطقه مورد مطالعه، نسبت فراوانی کلاس‌های هر فاکتور محاسبه می‌شود. مراحل محاسبه نسبت فراوانی برای هر کلاس از فاکتورهای مؤثر در فرونشست از رابطه ۳ به‌دست می‌آید (۳۳).

$$\mathrm{FR} = \frac{\frac{A}{B}}{\frac{C}{D}} = \frac{E}{\mathrm{F}} \qquad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن: A (تعداد فرونشست در هر طبقه)، B (تعداد کل فرونشست‌ها در منطقه مورد مطالعه)، C (تعداد پیکسل‌های کلاس موردنظر)، D (تعداد کل پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه)، E (درصد رخداد فرونشست در کلاس موردنظر) و F (درصد نسبی مساحت کلاس موردنظر) می‌باشد.

مدل بیشینه انتروپی (ME)[3]

پهنه‌بندی خطر بلایای طبیعی و انسانی به‌روش‌های گوناگونی صورت می‌گیرد، از جمله‌ی آن مدل بیشینه آنتروپی است که برای نخستین‌بار توسط ویلسون در سال ۱۹۷۰- ۱۹۶۷ ارائه گردید و سپس این مدل توسط سینور در سال ۱۹۷۹ مورد تجدیدنظر و اصلاح قرار گرفت (۲۳). روش آنتروپی که در ایران و جهان در موضوعات مختلف علوم ریاضی، اقتصاد و کامپیوتر استفاده شده است در علم ژئومورفولوژی تاکنون کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته است (۱۵). آنتروپی یک مفهوم اساسی در علوم فیزیک، علوم اجتماعی و تئوری اطلاعات است، به‌گونه‌ای که نشان‌دهنده‌ی مقدار عدم اطمینان درجه توزیع نامتعادل پدیده‌های موجود از محتوای مورد انتظار اطلاعاتی می‌باشد (۱۴). آنتروپی مقدار بی‌نظمی در یک سیستم را (کیفیت) اندازه‌گیری می‌کند (۱۳). مدل آنتروپی براساس روش بهینه‌سازی کلاسیک برای استخراج تابع توزیع احتمال پایه‌گذاری شده است. اطلاعات مورد نیاز برای به‌دست‌آوردن یک تابع توزیع عمدتا در دوره‌هایی از محدودیت‌ها بر اساس داده‌های موجود، تجربه، روابط کارکردی یا از هر منبع دیگری به‌دست می‌آیند و هنگامی‌که محدودیت‌ها مشخص باشند توزیع به‌طور منحصربه‌فرد تعیین می‌شود، به‌عبارت دیگر برای یک مجموعه از محدودیت‌ها می‌تواند یک توزیع منحصر به‌فرد وجود داشته باشد (۱). نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود (۴۲).

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} p_{i,j} \ln p_{i,j} \qquad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن: H_i ضریب رخداد فرونشست، W_j وزن نهایی تمام عوامل و $r_{i,j}$ وزن هر یک از طبقه‌های هر عامل می‌باشد.

1- Inverse Distance Weight (IDW) 2- Frequency Ratio (FR) 3- Maximum Entropy

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

اعتبارسنجی مدل

ارزیابی صحت نقشه‌های خطر و حساسیت فرونشست زمین با استفاده از نقشه‌ی پراکنش فرونشست‌ها امکان‌پذیر نیست، لذا برای حل این مشکل دو سوم نقاط فرونشستی برای شبیه‌سازی و یک سوم باقی‌مانده جهت ارزیابی صحت مدل‌ها استفاده می‌شود (۹). بنابراین با استفاده از نرم‌افزار ModEco[1] و ۷۰ درصد نقاط فرونشستی (۱۳۶ نقطه)، نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین برای مدل بیشینه آنتروپی تهیه گردید. هم‌چنین جهت ایجاد منحنی ROC[2] از ۳۰ درصد نقاط فرونشستی (۵۸ نقطه) و نرم‌افزار SPSS[3] استفاده شد. نهایتاً با استفاده از منحنی ROC و تخمین سطح زیرمنحنی (AUC)[4] که روش مفیدی جهت پیش‌بینی سیستم‌هاست، میزان صحت مدل به‌صورت کمی برآورد گردید. مقادیر سطح زیرمنحنی (۱-۰/۵)، پیش‌بینی مدل‌ها را در تخمین وقوع یا عدم وقوع رخداد فرونشست ارزیابی می‌کند، به‌طوری‌که هرچه سطح زیر منحنی به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد مدل ایده‌آل‌تر است و عدم صحت پیش‌بینی برای مدل زمانی است که این مقدار ۰/۵ باشد (۲۳).

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر به‌منظور ارتباط بین نقاط فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه با کلاس هریک از عوامل موثر بر وقوع فرونشست از مدل نسبت فراوانی استفاده شد (جدول ۱).

نتایج بررسی عامل شیب نشان داد که بیش‌تر فرونشست‌های منطقه در کلاس شیب کم‌تر از ۲ درصد (طبقه اول) رخ داده است که با نظرات (۳۹،۳۸،۲۵) مطابقت دارد. شایان ذکر است با افزایش درصد شیب منطقه مورد مطالعه، تعداد فرونشست زمین کاهش می‌یابد. بنابراین فاکتور درصد شیب ارتباط معکوس با تشکیل فروچاله‌ها داشته و نشست زمین بیش‌تر در شیب‌های ملایم و کم رخ می‌دهد (۳۸). نتایج بررسی جهت شیب نشان می‌دهد که بیش‌تر فرونشست‌های اتفاق افتاده در جهت‌های شمال‌غرب و غرب می‌باشد. جهت دامنه از نظر جذب نور آفتاب عامل اصلی در میزان رطوبت، تحول خاک و استقرار پوشش گیاهی است و به‌طور کلی دامنه‌های رو به شمال نسبت به دامنه‌های جنوبی از رطوبت بیش‌تری برخوردار هستند (۵).

1- Modeling Ecological
2- Receiver Operating Characteristic (ROC)
3- Statistical package for social science (SPSS)
4- Area Under Curve (AUC)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

جدول ۱- نسبت فراوانی عوامل موثر بر وقوع فرونشست زمین در شهرستان‌های عنبرآباد و جیرفت

Table 1. Frequency ration of effective factors on land-subsidence occurrence

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد فرونشست	نسبت فراوانی
درصد شیب	۲ >	۱۴۱۳۳۷۴۹	۱۳۰	۱/۰۶
	۲-۸	۵۹۲۷۹۶۹	۶	۰/۶۷
	۸ -۱۵	۴۵۷۰۱۹	۰	۱/۶۰
	۱۵ <	۴۰۱۷۷۷	۰	۱/۴۰
جهت شیب	هموار	۱۵۹۲۴۲۷	۶	۰/۵۸
	شمال	۷۵۷۱۱۰	۶	۱/۲۲
	شمال‌شرق	۱۰۰۶۳۲۷	۳	۰/۴۶
	شرق	۲۶۸۶۰۳۷	۱۰	۰/۵۷
	جنوب‌شرق	۳۶۶۳۷۸۳	۲	۰/۰۸
	جنوب	۲۹۷۹۰۰۰	۱	۰/۰۵
	جنوب‌غرب	۴۱۷۱۷۵۴	۲۷	۱
	غرب	۳۱۴۵۳۰۱	۶۲	۳/۰۳
	شمال‌غرب	۹۱۸۷۷۵	۱۹	۳/۱۸
ارتفاع (متر)	۶۰۴/۶ >	۶۵۹۷۶۹۶	۱۲۹	۳/۰۱
	۶۰۴/۶ – ۶۹۲/۱۵	۶۵۲۹۷۸۵	۷	۰/۱۶
	۶۹۲/۱۵ – ۷۹۲/۱۹	۴۲۹۰۳۵۲	۰	۰
	۷۹۲/۱۹ – ۹۲۳/۵۱	۲۵۸۶۳۶۰	۰	۰
	۹۲۳/۵۱ <	۹۱۶۳۲۱	۰	۰
انحنای نیم‌رخ	-۰/۰۱ >	۱۷۴۹۴۸۵	۶	۰/۵۳
	-۰/۰۱ – ۰/۰۱	۱۷۳۸۵۶۹۶	۱۲۵	۱/۱۱
	۰/۰۱ <	۱۷۸۵۳۳۳	۵	۰/۴۳
انحنای سطح	-۰/۰۱ >	۱۹۷۴۹۸۱۶	۶	۰/۴۷
	-۰/۰۱ – ۰/۰۱	۱۶۹۰۸۲۳۱	۱۲۴	۱/۱۳
	۰/۰۱ <	۲۰۳۷۳۰۲	۶	۰/۴۵
شاخص رطوبت توپوگرافی	۲ >	۵۲۱۴۷۴۶	۲۰	۰/۵۹
	۲ – ۸	۱۲۱۸۰۱۸۱	۶۴	۰/۸۱
	۸ - ۱۲	۳۵۲۵۵۸۸	۵۲	۲/۲۷
زمین‌شناسی	Qt2,QLc,Qfp,Qal,Qt1,Qc	۲۲۲۹۹۶	۰	۰
	Ef, QLm, JK, Ewf	۱۹۸۹۷۸۱۱	۱۳۱	۱/۰۱
	Erh, Eqt	۴۵۵۷۸۴	۵	۱/۶۹
	Da, Pzla1	۷۲۶۰	۰	۰
	OMm, DCsg, OM1	۱۷۱	۰	۰
	G, gh, gd, gb	۳۳۱۹۰۱	۰	۰
	Ng2, Et1, Ev, Ngb, Es	۴۵۹۳	۰	۰
فاصله از آبراهه (متر)	۰ -۱۰۰	۶۶۶۳۸۷۴	۴۶	۱/۰۶
	۱۰۰ -۲۰۰	۴۸۲۶۷۲۹	۲۱	۰/۶۷
	۲۰۰ -۳۰۰	۳۳۵۶۴۵۰	۳۵	۱/۶۰
	۳۰۰ -۴۰۰	۲۱۹۹۷۰۴	۲۰	۱/۴۰
	۴۰۰ <	۳۸۷۳۷۵۹	۱۴	۰/۵۶
تغییرات تراز آب زیرزمینی (متر)	۰ – ۱۳/۰۸	۲۵۹۷۸۸۶	۱۱	۰/۶۵
	۱۳/۰۸ – ۱۹/۶۲	۹۸۸۳۷۰۲	۸۳	۱/۲۹
	۱۹/۶۲ – ۲۸/۴۳	۶۹۴۵۵۶۵	۴۱	۰/۹۱
	۲۸/۴۳ – ۶۴/۴	۱۴۹۳۳۶۲	۱	۰/۱۰

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد فرونشست	نسبت فراوانی
کاربری اراضی	درختچه‌زار و بیشه‌زار (SH)	۱۵۵۲۹۷	۱۵	۱۴/۸۶
	مراتع (R)	۹۵۵۴۶۹۱	۳۲	۰/۵۲
	اراضی بدون پوشش گیاهی (BL)	۹۵۵۴۶۹۱	۰	۰
	بستر رودخانه (RB)	۱۸۵۷۴۵۷	۰	۰
	زراعات آبی و باغات (IF)	۶۶۵۲۴۴۶	۶۳	۱/۴۶
	مناطق مسکونی (Urb)	۳۳۸۹۹۷	۱۵	۶/۸۱
	پهنه‌های ماسه‌ای (SS)	۶۶۱۱۵۰	۵	۱/۱۶
	دق‌های رسی (TK)	۱۷۳۹۶۹	۶	۵/۳۱
	اراضی‌شور و نمک‌زار (SL)	۵۸۶۴۷	۰	۰
پوشش گیاهی (NDVI)	۰ >	۸۲۱۲	۰	۰
	۰ – ۰/۰۵	۶۸۴۹۹۷۹	۰	۰
	۰/۰۵ – ۰/۱	۸۸۸۷۳۹۶	۹۰	۱/۵۶
	۰/۱ – ۰/۵	۵۱۷۳۵۵۷	۴۶	۱/۳۷
	/۵ <	۱۳۶۶	۰	۰

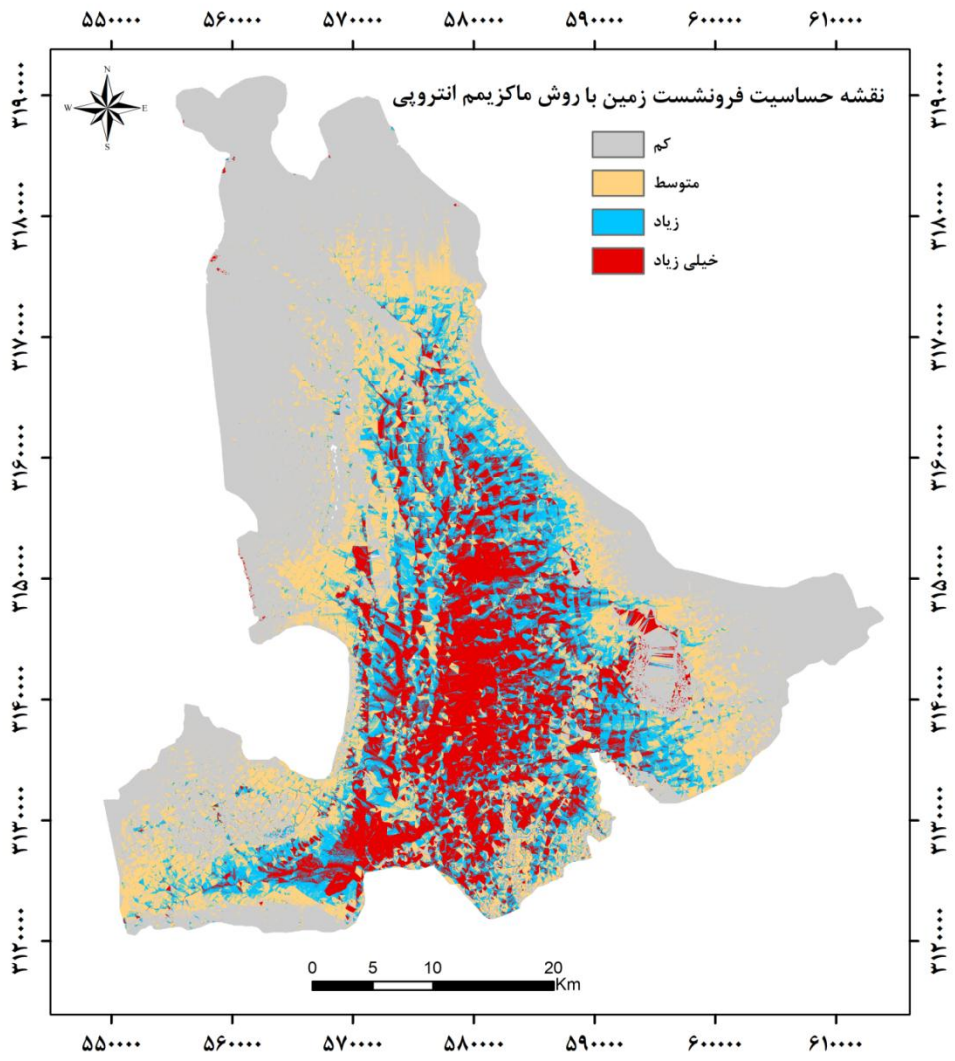
لذا این انتظار می‌رود که میزان پوشش گیاهی و نفوذ آب در این بخش‌ها بیش‌تر و فرونشست زمین نسبت به سایر بخش‌ها کم‌تر باشد، اما در واقعیت خلاف آن‌چه که تصور می‌شود در جهت‌های شمال‌غرب و غرب بیش‌ترین میزان وقوع فرونشست را در منطقه مورد مطالعه شاهد هستیم که می‌توان دلیل آن را فعال‌بودن دیگر عوامل موثر بر وقوع فرونشست زمین مانند واحدهای سنگ‌شناسی منطقه که توانایی ناچیزی در میزان نفوذ آب دارد ذکر نمود. بررسی نتایج طبقات ارتفاعی نشان می‌دهد که کلاس ارتفاعی کم‌تر از ۶۰۴/۶ و ۶۹۲/۱۵-۶۰۴/۶ به‌ترتیب ۹۵ و ۵ درصد از فرونشست‌ها را به‌خود اختصاص داده و دارای بیش‌ترین وزن می‌باشد که با افزایش ارتفاع، میزان فرونشست زمین کاهش

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

پیدا کرده است. بنابراین نتایج به‌دست آمده با تحقیقات (۱۶، ۲۵) کاملاً مطابقت دارد. بررسی واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داد که بیش‌ترین فرونشست زمین به‌ترتیب در سازندهای (Erh: گنبدهای ریوداسیتی و ریولیتی و EQt: توف سبز تیره) و (Ef: رسوبات از نوع فلیش، توالی منظمی از ماسه سنگ، شیل، کنگلومرای ریزدانه، ماسه سنگ آهکی نومولیت کوئیزین‌دار، سنگ آهک ماسه‌ای نومولیتی، مخلوط با پومیس‌های ریزدانه شیشه‌ای آواری، توف سبز، QLm: رسوبات سایز رس و سیلت (هر دو نهشته‌های رودخانه‌ای و بارانی)، JK: عمدتاً از سنگ آهک کالپیونلادار ریززیستی، خاکستری روشن، خوب لایه‌بندی‌شده، نازک در آب‌های عمیق، به‌طور جزئی حاوی سنگ آهک مارنی، شیل و ماسه سنگ آهکی Ewf: فیلیش‌های طوفانی آئوسن) رخداده است که دلیل این امر در سازندهای نوع اول (Ef, QLm, JK, Ewf) وجود ترکیبات آهکی با مقاومت کم و هم‌چنین رسوبات ریزدانه با نفوذپذیری پایین مانند سیلت و رس می‌باشد. به‌طور کلی فرونشست زمین در سازندهای آهکی به‌دلیل داشتن تخلل بالا پس از افت آب زیرزمینی رخ می‌دهد (۱۶). هم‌چنین دلیل فرونشست زمین در سازندهای نوع دوم (Erh, EQt) وجود سنگ‌های آذرین است که این سنگ‌ها تشکیلاتی غیرقابل نفوذ بوده و از لحاظ تغذیه و ذخیره آب‌های زیرزمینی تاثیر چندانی ندارند (۲). بررسی عامل کاربری اراضی نشان داد که بیش‌تر فرونشست‌های اتفاق افتاده به‌ترتیب در سه کاربری بیشه‌زار و درختچه‌زار، مناطق مسکونی و دق‌های رسی رخ داده است. در مورد کاربری بیشه‌زار و درختچه‌زار علی‌رغم وجود پوشش گیاهی علت این پدیده را می‌توان افت شدید آب زیرزمینی در این نمونه کاربری ذکر نمود. در کاربری مناطق مسکونی فشردگی و نشست زمین به‌علت تحمیل بارهای سنگین (سدها و ساختمان‌ها یا ساخت و سازها) روی می‌دهد که با نتایج به‌دست آمده توسط (۳۰) مطابقت دارد. هم‌چنین پدیده فرونشست زمین در دق‌های رسی را سخت و غیرقابل نفوذبودن این نوع کاربری و جلوگیری از تغذیه آبخوان‌ها می‌توان ذکر نمود. بررسی عامل فاصله از رودخانه نشان می‌دهد که بیش‌ترین فرونشست‌های منطقه در فاصله ۳۰۰-۲۰۰ متری یعنی در طبقه متوسط فاصله از آبراهه اتفاق افتاده است که با نتایج مطالعات (۱۶، ۲۵، ۳۸) مطابقت دارد. شدت فرونشست زمین در فواصل متوسط از رودخانه بیش‌تر از سایر فواصل دور و نزدیک است که دلیل آن انجام فعالیت‌های کشاورزی و عملیات ساخت و ساز انسانی در این بخش‌ها می‌باشد. بررسی عامل انحنای سطح و انحنای نیم‌رخ نشان می‌دهد که در بین سه کلاس مقعر، هموار و محدب بیش‌ترین میزان فرونشست زمین در کلاس هموار (Flat) رخ داده است. به‌طور کلی هر چه‌قدر منطقه هموارتر و دارای شیب کم‌تر باشد انتظار وقوع این پدیده (فرونشست) بیش‌تر خواهد بود. به‌طور کلی نتایج انحنای سطح و نیم‌رخ هم‌راستا با نتایج به‌دست آمده از تحلیل درصد شیب منطقه و میزان تاثیر آن بر وقوع پدیده فرونشست بوده است. بررسی نتایج عامل TWI حاکی از آن است که به‌طور منظم با افزایش مقدار TWI، فرونشست زمین نیز افزایش یافته است که با نتایج مطالعات انجام‌شده توسط (۲۴،۳۸) مبنی‌بر این‌که تشکیل فروچاله‌ها با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی به‌طور کلی افزایش می‌یابد کاملاً مطابقت دارد. علاوه‌بر آن با افزایش TWI، میزان رواناب نیز افزایش‌یافته (۱۶) در نتیجه میزان نفوذپذیری خاک کاهش‌یافته، بنابراین پدیده فرونشست زمین افزایش می‌یابد. بررسی نتایج چاه‌های پیزومتری نشان داد که تقریباً با افزایش افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست زمین نیز افزایش می‌یابد که با مطالعات انجام‌شده توسط (۳۱،۲۸) مطابقت دارد. اما با یک استثنا میان دو کلاس اول (۱۳/۰۸-۰) و دوم (۱۹/۶۲-۱۳/۰۸) برخلاف آن‌چه که انتظار می‌رود با افزایش سطح آبخوان فرونشست زمین افزایش یافته است که دلیل این امر را می‌توان فعال بودن سایر عوامل موثر بر فرونشست زمین در این بخش‌ها دانست. نتایج حاصل از NDVI نشان می‌دهد که با افزایش پوشش گیاهی، میزان فرونشست زمین کاهش می‌یابد که با مطالعات (۲۵،۳۸) و هم‌چنین دیدگاه (Yilmaz، ۲۰۱۳) مبنی‌بر این‌که ارتباط معکوس میان افزایش و تراکم بالای پوشش گیاهی با فرونشست زمین وجود دارد و افزایش پوشش گیاهی باعث کاهش جریان آب و افزایش نفوذ گردیده، کاملاً مطابقت دارد (۳۹).

هم‌چنین نتایج حاصل از مدل بیشینه آنتروپی در شکل ۳ و جدول ۲ ارائه شده است. به‌منظور طبقه‌بندی نقشه حساسیت فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه از روش شکستگی‌های طبیعی استفاده گردید (۱۹) و نقشه نهایی به چهار طبقه حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]



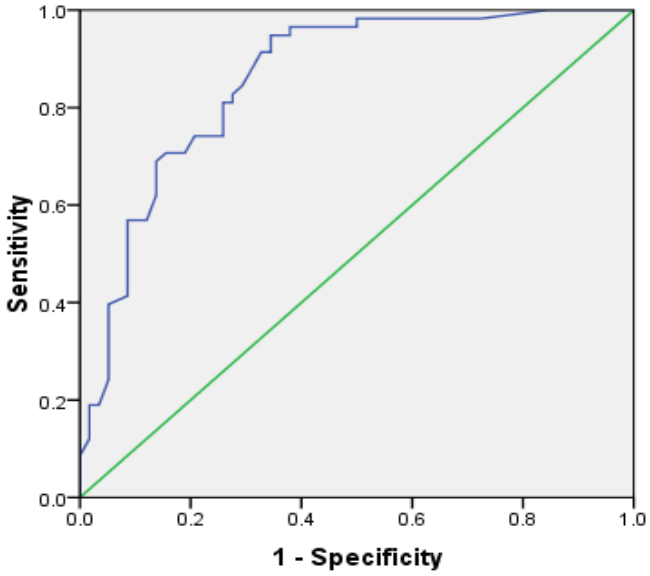
شکل ۳- نقشه حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی
Figure 3. Land-subsidence susceptibility mapping using maximum entropy model

جدول ۲- طبقات حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش بیشینه آنتروپی
Table 2. Classes of land-subsidence susceptibility using maximum entropy method

گروه	طبقه	تعداد پیکسل	درصد پیکسل (مساحت)
۱	کم	۲۳۰۱۷۵۱	۴۴/۰۳
۲	متوسط	۱۱۳۲۳۶۲	۲۱/۶۶
۳	زیاد	۹۴۲۴۶۱	۱۸/۰۳
۴	خیلی زیاد	۸۵۰۷۸۰	۱۶/۲۸

نتایج ارزیابی نقشه حساسیت فرونشست زمین در شکل ۴ و جدول ۳ ارائه شده است. نتایج حاصل از ارزیابی مدل بیشینه آنتروپی با استفاده از نمودار ROC در جدول ۲ میزان صحت مدل را ۰/۸۵۹ نشان داد. بنابراین این مدل از بین طبقات مختلف صحت (عالی (۱- ۰/۹)، خیلی خوب (۰/۹- ۰/۸)، متوسط (۰/۸- ۰/۷)، ضعیف (۰/۷- ۰/۶) در طبقه‌ی خیلی خوب قرار می‌گیرد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]



شکل ۴- نمودار ROC مدل بیشینه آنتروپی
Figure 4. Recivier operating characteristics curve of maximum entropy model

جدول ۳- صحت مدل بیشینه آنتروپی در برآورد خطر فرونشست زمین
Table 3. Validity of maximum entropy model in assesment land subsidence

مدل	مساحت	خطای استاندارد	سطح معنی‌داری	اطمینان همبستگی ۹۵٪	
				حد بالا	حد پایین
بیشینه آنتروپی	۰/۸۵۹	۰/۰۳۵	۰/۰۰۰	۰/۹۲۷	۰/۷۹۰

مدل بیشینه آنتروپی مدلی عمومی است که امکان بررسی روابط میان یک متغیر وابسته و چندمتغیر مستقل را در زمینه‌های مطالعاتی مختلف به کاربران می‌دهد (۲۷). آنتروپی یک مدل غیرخطی است واز نظر انتخاب فاکتورها، محدودیتی ندارد لذا می‌توان بیش‌ترین انتخاب فاکتور را داشت. آنتروپی مدلی ناپارامتریک است و در مورد توزیع متغیرها نیازی به پیش‌فرض ندارد (۲۱). استفاده از این مدل در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش نتایج و عملکرد قابل قبولی داشته است (۴). هم‌چنین مقایسه میان مدل بیشینه آنتروپی و مدل RF[1] در پژوهش مربوط به پتانسیل آب‌های زیرزمینی (۲۷) عملکرد پیش‌بینی بهتر مدل ME را نسبت به مدل RF نشان داد. مدل ME بر خلاف الگوریتم های دیگر یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)[2]، می‌تواند اطلاعات مفید را برای تفسیرها فراهم کند (۲۷). هم‌چنین طبق نظر (۲۹) مدل ME در مقایسه با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از محاسبات ساده‌تری برخوردار بوده بنابراین سادگی، کارایی و دقت مطلوب این مدل باعث گسترش و استفاده از آن در علوم مختلف از قبیل سیل‌خیزی (۸)، فرسایش خندقی (۲۲) و مدل‌سازی رواناب (۱) شده است. بنابراین با توجه به آسیب‌های حاصل از پدیده‌ی فرونشست زمین از ابعاد گوناگون انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی که برای یک منطقه ایجاد می‌شود استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی مفید جهت مدل‌سازی این عارضه‌ی مخرب کمک شایانی در جهت پیش‌گیری از خطرات فرونشست زمین محسوب می‌شود. بنابراین نتایج شبیه‌سازی مکانی فرونشست‌ها و نقشه‌ی حساسیت تهیه شده و هم‌چنین عامل برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات چاه‌های پیزومتری می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های آمایش سرزمین و مدیریت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه داشته باشد و این نتیجه نیز بر اساس مدل بیشینه انتروپی در تعیین مهم‌ترین عامل موثر نیز تایید گردید.

1- Random Forest (RF)
2- Artificial Neural Network (ANNs)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

منابع

1. Agrawal, D., J.K. Singh and A. Kumar. 2005. Maximum Entropy-based Conditional Probability Distribution Runoff Model. Biosystems Engineering, 90: 103-113.
2. Azarbagh, H. 2014. Evaluation of the amount of soil restoration in the formation and development of gaps in Jiroft plain. Master's dissertation, Islamic Azad University Zahedan, Faculty of Sciences, 87 pp (In Persian).
3. Berry, M.J. and G.S. Linoff. 2004. Data mining techniques. 2nd Edition. John Wiley and Sons.
4. Chen, W., H.R. Pourghasemi and S.A. Nagibi. 2017. A comparative study of landslide susceptibility maps produced using support vector machine with different kernel functions and entropy data mining models in China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1-18.
5. Elmizadeh, H. 2011. Morphological analysis and gradient in relation to erosion (Case study: Basin Nechi). Geographic Information Magazine, 80: 79-83 (In Persian).
6. Ercanoglu, M. and C. Gokceoglu. 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide prone area (North of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environmental Geollogy, 41: 720-730.
7. Jahani, S. and M. Delbrie. 2009. Estimation estimation of the maximum 24-hour rainfall in Golestan province. Water Engineering Magazine, 13-22 (In Persian).
8. Khosravi, K., H.R. Pourghasemi, K. Chapi and M. Bahri. 2016. Flash flood susceptibility analysis and its mapping using different bivariate models in Iran: a comparison between Shannon's entropy, statistical index, and weighting factor models. Environ Moint Assess, 188: 1-21.
9. Komac, M. 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine sloveni. Geomorphology, 74: 17-28.
10. Lee, S., I. Park and T.K. Choi. 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. Environmental Management, 49: 347-358.
11. Li, Z., H. Zhou and Y. Xu. 2013. Research on prediction model of support vector machine based land subsidence caused by foundation pit dewatering. Advanced Materials Research, 105-108.
12. Lubis, A., T. Sato, N. Tomiyama, N. Isezaki and T. Yamanokuchi. 2011. Ground subsidence in Semarang-Indonesia investigated by ALOS-PALSAR satellite SAR interferometry. Journal of Asian Earth Sciences, 40: 1079-1088.
13. Minasny, B., A. Mcbratney and S. Blanes. 2008. Quantitative models for pedogenesis-a review. Geoderma, 144: 140-157.
14. Moghimi, A. and S. Negahban. 2012. Investigation of erosion in the watershed of Shahr Fadami River using entropy model. Journal of Natural Geography Researches, 33: 1-16 (In Persian).
15. Mohammad Khan, S.H, A. Wisey and K. Bagheri. 2014. Landslide hazard potential using entropy model, case study (Shirpanah mountainous area in southwest of Kermanshah province). Geographic Quarterly of Territory, 44: 89-103 (In Persian).
16. Ozdemir, A. 2016. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapinar (Konya, Turkey). Geomorphology, 245: 40-50.
17. Park, I., J. Lee and S. Lee. 2014. Insemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. Center European Journal of Geosciences, 6: 207-218.
18. Pourghasemi, H.R. and M. Beheshtirad. 2015. Assessment of a data-driven evidential belief function model and GIS for groundwater potential mapping in the Koohrang Watershed, Iran. Geocarto International, 30: 662-685.
19. Pourghasemi, H.R. and N. Kerle. 2016. Random forests and evidential belief function- based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. Environmental Earth Sciences, 75: 1-17.
20. Pourghasemi, H.R., H.R. Moradi and S.M. Fatemi Aghda, C. Gokceoglu and B. Pradhan. 2014. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). Arabian Journal of Geosciences, 7: 1857-1878.
21. Pourghasemi, H.R., M. Mohammady and B. Pradhan. 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. Catena, 97: 71-84.
22. Pourghasemi, H.R., S. Yousefi, A. Kornejady and A. Cerdi. 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. Science of the Total Environment, 609: 764-775.
23. Pourhasemi, H.R., H.R. Moradi, M. Mohammadi, R. Mostafazadeh and A.S. Golijerandeh. 2013. Landslide hazard zonation using the Bayesian theory. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences, 62: 109-121 (In Persian).
24. Pradhan, B. 2011. Manifestation of an advanced fuzzy logic model coupled with geoinformation techniques coupled with geoinformation techniques for landslide susceptibility analysis. Environmental and Ecological Statistics, 18: 471-493.
25. Pradhan, B., M.H. Abokharima, N.M. Jebur and M. Shafapour Tehrany. 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. Natural Hazards, 73: 1019-1042.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

26. Rahmati, O. and H.R. Pourghasemi. 2017. Identification of critical flood prone areas in data-scarce and ungauged regions: A comparison of three data mining models. Water Resour Manage, 31: 1473-1487.
27. Rahmati, O., H.R. Pourghasemi and A.M. Melesse. 2016. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. Catena, 137: 360-372.
28. Rahnama, H. and S. Mirasi. 2016. Analysis and Evaluation of Parameters Effecting on Earth Survival. Journal of Civil Engineering, 1: 45-53 (In Persian).
29. Rodriguez-Galiano, V. and M. Chica-Olmo. 2012. Land cover change analysis of a Mediterranean area in Spain using different sources of data: multi-seasonal Landsat images, land surface temperature, digital terrain models and texture. Applied Geography, 35: 208-218.
30. Saffari, A., F. Jafari and S.M. Tavakolisabour. 2016. Monitoring its land subsidence and its relation to groundwater extraction, Case study: Karaj-Shahriar Plain. Quantitative Geomorphology Researches, 2: 82-93 (In Persian).
31. Shadfar, S., A. Nasiri, S. Chitgar and A.S. Ahmadi. 2015. The zoning of the risk of land subsidence using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, the study area (Boeinzahra City). Geographical Quarterly of the Territory, Scientific-Research, 48: 101-116 (In Persian).
32. Sharificia, M. 2012. Determination of the magnitude and extent of ground subsidence by the radar interferometry (D-InSAR) method in the Nough-Bahraman plain. Planning and Approach Space, 3: 56-77 (In Persian).
33. Soleimani, K., J. Zandi and M. 2013. Habibnejad Roshan. Evaluation of the efficiency of frequency ratio methods, bivariate statistics in the preparation of a landslide sensitivity map (case study: Mazandaran Vazrood watershed). Engineering geology and environment, 94: 41-50 (In Persian).
34. Tihansky, A.B. 1999. Sinkholes, West-Central Florida, 121-141.
35. USGS (United States Geological Survey). 2011. Research and review information located, Assess on September http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165.
36. Ustun, A., E. Tusat. S. Yalvac. I. Ozkan. Y. Eren and A. Odemir. 2015. Land subsidence in Konya closed basin and its spatio-temporal detection by GPS and DINSAR. Environmental Earth Sciences, 73: 6691-6703.
37. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey. Ph.D Thesis, Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 pp.
38. Yilmaz, I. 2007. GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: A case study from Sivas basin (Turkey). Engineering Geology, 90: 89-103.
39. Yilmaz, I. 2013. Marschalko M, Bednarik, M. An assessment on the use of bivariate, multivariate and soft computing techniques for collapse susceptibility in GIS environ. Journal of Earth System Science, 122: 371-388.
40. Yin, J., D. Yu and R. Wilby. 2016. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding; Acase study of downtown Shanghai, China. Science of the Total Environment, 544: 744-753.
41. Zare, M., H.R. Pourghasemi, M. Vafakhah and B. Pradhan. 2013. Landslide susceptibility mapping at Vaz watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multi-layer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. Arabian Journal of Geoscience, 6: 2873-2888.
42. Zongji, Y., J. Qiao and X. Zhang. 2010. Regional landslide zonation based on entropy method in three gorges area, China. Seventh International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discorery, (FSKD 2010).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]

Spatial Simulation and Land-Subsidence Susceptibility Mapping Using Maximum Entropy Model

Sahar Abdollahi[1], Hamid Reza Pourghasemi[2], Gholamabbas Ghanbarian[1] and Roja Safaeian[1]

1- Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University
2- Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University,
(Corresponding Author: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir)
Received: February 6, 2018 Accepted: August 27, 2018

Abstract

The aim of this research is spatial Simulation and land subsidence susceptibility mapping using maximum entropy model in Jiroft and Anbarabad Townships. At first, land subsidence locations were recognized using extensive field surveys and subsequently the land subsidence distribution map was made in the geographic information system. Then, each of effective factors on land subsidence occurred in study area such as: percent slope, aspect direction, altitude classes, profile curvature, plan curvature, topographic wetness index (TWI), distance of drainage, litology units, pizometric data, land use, and normalized difference vegetation index (NDVI) digitized in GIS environment. Then, using frequency ratio (FR) method, the weight of the classess of each factor and was determined. Finally, land subsidence susceptibility map in the study area was prepared using the model maximum entropy. The results of validation of model using 30% of the unused points in the modeling process and according receiver operating characteristic (ROC) showed that the map of land subsidence susceptibility obtained from the maximum entropy had the high accuracy of ARC value of 0.859 (85.9%). Therefore, the zoning map can play a significant role in water resource management and identification of critical areas according to extracting groundwater table in the study area.

Keywords: Frequency ratio, GIS, Land subsidence, Maximum entropy

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1398.10.20.12.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.10.20.133]