



دوره ۳۰، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۱۷، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۳۴-۲۰
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMEJ.2018.117083

پژوهش‌های مهندسی آب و سازه‌های پژوهش و سازندگی

مدل‌سازی مکانی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته

حمیدرضا پورقاسمی*

(نویسنده‌ی مسئول)* استادیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

محسن محسنی ساروی

استاد تمام بازنشسته دانشکده‌ی منابع طبیعی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: بهمن ۹۶ تاریخ پذیرش: فروردین ۹۷

*Corresponding Email: (hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir)

چکیده

فرونشست یکی از مخاطرات زمین‌ریختی است که در سال‌های اخیر بیش‌تر اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک را فرا گرفته‌است. هدف اصلی این پژوهش مدل‌سازی مکانی و ارزیابی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته در دشت جیرفت، استان کرمان است. فرونشست‌های اتفاق افتاده در منطقه با بازدیدهای میدانی گسترده شناسایی، و نقشه‌ی پراکنش آن‌ها تهیه شد. برای بررسی ارتباط میان فرونشست‌ها و عوامل مؤثر درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراه، تراز آب‌های زیرزمینی، کاربری زمین، انحنای سطح، شاخص رطوبت، پستی‌وبلندی، و فاصله از گسل، از نظریه‌ی تابع اطمینان شهودی استفاده، و وزن طبقه‌های هر عامل مشخص شد. نتایج ارتباط میان فرونشست‌ها و عوامل مؤثر نشان داد که بیش‌تر فرونشست‌های منطقه در شیب‌های (۲-۰)٪، جهت‌های شیب مسطح و هموار، فاصله‌ی کم از آبراه (کم‌تر از ۵۰ متر)، فاصله‌ی زیاد از گسل (بیش‌تر از ۴۰۰۰ متر)، در سازندهای گروه سوم (گنبد‌های ریولیتی و ریوداسیتی و توف سبز تیره)، در زمین‌های بیشه‌زار و درختچه‌زارها، دامنه‌های محدب با رطوبت پستی‌وبلندی زیاد (بیش‌تر از ۱۲) و افزایش افت سطح آب زیرزمینی رخ داده‌است. نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل جمعی تعمیم‌یافته در نرم‌افزار آماری آر برای منطقه تهیه شد. نتایج ارزیابی مدل جمعی تعمیم‌یافته با استفاده از ۳۰٪ نقاط استفاده‌نشده در فرایند مدل‌سازی، و منحنی تشخیص عمل‌کرد نسبی نشان داد که دقت نقشه‌ی حساسیت فرونشست زمین تهیه‌شده با استفاده از مدل عمومی تجمیع یافته خیلی زیاد (۸۱/۲۰٪) است. بنابراین، این نقشه می‌تواند کمک مؤثری به مدیریت بهینه‌ی منابع آب و جلوگیری از بروز مجدد این پدیده در منطقه کند. نتایج رتبه‌بندی عوامل مؤثر به‌دست‌آمده از مدل جمعی تعمیم‌یافته نشان داد که عوامل طبقات ارتفاعی، تغییرات کاربری زمین و جهت شیب، به‌ترتیب در رتبه‌های بیش‌تر بودند.

واژه‌های کلیدی: تابع اطمینان شهودی، دشت جیرفت، فرونشست زمین، مدل‌سازی مکانی، مدل جمعی تعمیم‌یافته

Land-Subsidence Spatial Modeling Using Generalized Additive Model Data Mining Technique

Hamid Reza Pourghasemi *

(Corresponding Author)* Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
(hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir)

Mohsen Mohseni Saravi

Retired Professor, College of Natural Resources, Tehran University

Abstract

Land-subsidence phenomenon is one of the geomorphologic hazards known in arid and semi-arid areas in recent years. The main objective of the present study is to provide a land-subsidence spatial modeling and its assessment using the generalized additive model data mining technique in Jiroft Plain, Kerman Province. Land-subsidence inventory map was prepared for the study area using extensive field surveys. Evidential Belief Function was used to investigate relationships between land-subsidence and 10 effective factors including slope percentage, aspect, elevation, lithological units, distance from river, piezometric wells data, land use, plan curvature, topographic wetness index, and distance from fault, and the weight of each factor class was determined. Results of the relationships between land-subsidence and effective factors indicated that most of the subsidences of the region are occurred in low slopes (0-2%), flat and smooth aspects, small distance from a river (>50m), large distance from a fault (>4000 m), also in the third group lithological units (rhythetic dyke and rhyodity and dark green tuff), shrubby land use type, convex slopes with high topographic wetness index (>12), and receding in groundwater level. A land-subsidence susceptibility zonation map was created using the GAM in statistical R statistical software for the study area. Results of validation of generalized additive model evaluation using 30% of unused points in the modeling process, and the receiver operating characteristic (ROC) showed that the land-subsidence susceptibility map prepared by Generalized Additive Model had a high accuracy (81.20%). Therefore, the map might be helpful for optimizing management of water resources and preventing the re-occurrence of this phenomenon in the area. Results of ranking effective factors from the generalized additive model showed that elevation, land use, and aspect were in the highest orders in land-subsidence occurrences

Keywords: Evidential Belief Function, Generalized Additive Model, Jiroft Plain, Land-subsidence, Spatial modeling

مقدمه

در دهه‌های اخیر نیاز روبه‌رشدی به بررسی و تحلیل رفتارهای زمین و نظام پویای آن در سطح و زیر شکل گرفته‌است (کلوتینگ و همکاران ۲۰۰۰). فرونشست زمین که زلزله‌ی خاموش نامیده شده، نوعی خطر زمین‌شناسی است که می‌تواند بر اثر عوامل متنوعی مانند برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی و سیلاب‌ها رخ دهد (پارک و همکاران ۲۰۱۴). از آن‌جا که پدیده‌ی فرونشست^۱ زمین به‌آهستگی و به‌تدریج گسترش می‌یابد، خطرهای ناشی از آن مانند سیل و زلزله نیست که به‌یک‌باره آشکار شود، اما آثار و پی‌آمدهای مخرب آن در ابعاد مختلفی دیده می‌شود. به‌طور کلی عوامل مختلفی باعث وقوع فرونشست می‌شود، ولی در بسیاری مناطق برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی عامل اصلی است. براین اساس، امروزه فرونشست زمین بر اثر برداشت بیش‌ازحد از آبخوان‌ها، معضل و مخاطره‌ای است که جوامع ساکن در آن را در جهان تهدید می‌کند، و آسیب‌های جبران‌ناپذیری به مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی می‌زند. در مقیاس جهانی، خطر فرونشست زمین بر اثر افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰، هم‌زمان با صنعتی‌شدن و رشد شهرنشینی، به اوج خود رسید (والتمن ۱۹۸۹). فرونشست زمین خصوصاً در مناطق خشک و کم‌باران جهان (پانچکو و همکاران ۲۰۰۶)، و در بیش از ۱۵۰ شهر گزارش شده‌است (هیو و همکاران ۲۰۰۴). احتمال می‌رود که بیش از نیمی از ۶۰۰ دشت ایران در معرض فرونشست باشد، اما فقط در تعداد اندکی از آن‌ها پژوهش‌هایی انجام و منتشر شده است (شریفی‌کیا ۲۰۱۲). انگورانی و همکاران (۲۰۱۶) برای مدل‌سازی پویایی فرونشست دشت تهران از شبکه‌ی عصبی مصنوعی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقدار پیش‌بینی شده‌ی این روش با مقدار واقعی فرونشست زمین اندازه‌گیری شده در منطقه تطابق زیادی دارد. در پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داده‌شد که ۵۵٪ از شهر بوئین‌زهرا در پهنه‌ی خطر نسبتاً زیاد و خیلی زیاد قرار دارد (شادفر و همکاران ۲۰۱۶). کیم و همکاران (۲۰۰۹) در پیش‌بینی خطر فرونشست زمین با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و جی‌آی‌اس در شهر سمچوک کره، از نقاط فرونشست‌رخ‌داده‌ی زمین برای تأیید نتایج نقشه‌ی خطر فرونشست تهیه‌شده استفاده کردند. نتایج بیان‌گر دقت زیاد نقشه‌ی تهیه‌شده با استفاده از منحنی تشخیص عمل‌کرد نسبی با سطح زیرمنحنی ۹۶/۰۶٪ بود. در تحقیقی مشابه، لی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی فرونشست زمین را پیش‌بینی و مدل‌سازی مکانی کردند. نتایج ارزیابی این مدل نشان داد که مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی دقت بسیار زیاد (۹۴/۸۴٪) بود. در بررسی فرونشست زمین در چین، روش ماشین بردار پشتیبان با ۴ تابع کرنل متفاوت استفاده و ارزیابی شد (لی و همکاران ۲۰۱۳). نتایج مقایسه‌ی میان الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با توابع کرنل مختلف و روش‌های تک‌متغیره (نسبت فراوانی) و چندمتغیره (رگرسیون لجستیک) آماری، نشان‌دهنده‌ی

دقت بیش‌تر مدل ماشین بردار پشتیبان بود. پارک و همکاران (۲۰۱۴) برای تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت فرونشست زمین در اطراف معادن زغال‌سنگ سمچوک کره، از روش‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، و ترکیب این مدل‌ها استفاده کردند. پس از تهیه‌ی نقشه‌ها، برای برآورد کردن میزان دقت هر مدل از منحنی تشخیص عمل‌کرد نسبی استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت مدل‌های ترکیبی از مدل‌هایی که به‌تنهایی استفاده می‌شوند بیش‌تر است. پرادهان و همکاران (۲۰۱۴) در پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین در دره‌ی کینتا، مالزی با استفاده از نظریه‌ی تابع اطمینان شهودی از مدل نسبت فراوانی برای ارتباط میان عوامل مؤثر و فرونشست‌های منطقه استفاده کردند. نتایج نشان داد که دقت مدل تابع اطمینان شهودی و نسبت فراوانی به‌ترتیب ۷۹/۴۵٪ و ۷۵/۳۰٪ است. بنابراین، مدل تابع اطمینان شهودی دقت بیش‌تری از نسبت فراوانی داشت. برای تعیین میزان ارتباط و تأثیرگذاری فرونشست زمین در وقوع سیل (وین و همکاران، ۲۰۱۶)، مدل‌های هیدرولیک (آب‌نگار) در مناطق شهری شانگ‌های (چین) به‌کار برده‌شد. نتایج نشان داد که فرونشست زمین ممکن است نامستقیم از ویژگی‌های سیل تأثیر بگیرد. شرسا و همکاران (۲۰۱۷) در ارزیابی خطر فرونشست زمین در کاتماندو، نیال نشان دادند که بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی منطقه به فرونشست زمین بسیار حساس است. در آن منطقه سالانه به‌طور متوسط، ۱/۶ میلی‌متر فرونشست زمین روی می‌دهد. در طبیعت مرز مشخصی برای طبقه‌های نوع خاک، انواع کاربری زمین و واحدهای سنگ‌شناسی وجود ندارد و تعیین مرز طبیعی برای عوامل پیوسته نظیر ارتفاع، شیب، فاصله از عناصر خطی، شاخص‌های پستی‌وبلندی، و عناصر تراکمی بسیار مشکل است. به‌همین دلیل، مدل‌های سنتی و آماری در برخورد با این متغیرهای ورودی معایبی دارند. تعیین زیادبودن درستی در ارزیابی پدیده‌های زمین‌شناسی بسیار مهم است، و ساده‌گرفتن متغیرهای اصلی پدیده‌های زمین، طبقه‌های آن‌ها، و تعاملات میان آن‌ها می‌تواند منجر به نتایج نادرست در نقشه‌ی نهایی شود. در بیش‌تر بررسی‌ها، قضاوت‌های کارشناسی نقش مهمی دارد، و روی کردهای تجربی گسترده‌ی برای ارزیابی‌های مختلف به‌کاررفته است. این مشکلات منجر به استفاده از روش‌های داده‌کاوی در مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک (زمین‌روش) شده است (توول ۱۹۹۶). این مدل‌ها نه‌تنها منجر به افزایش دقت در برخورد با مسائل پیچیده و نبود قطعیت می‌شوند، بلکه نظریه‌ها و روش‌های نوینی را در مسائل مختلف ایجاد می‌کنند و توسعه می‌دهند، از جمله در شناسایی مناطق حساس به فرونشست زمین با توجه به خسارات ناشی از فرونشست به تأسیسات زیربنایی، ساختمان‌ها و زمین‌های کشاورزی. شناخت این پدیده و عوامل مؤثر بر ایجاد آن مهم است، و می‌تواند نقش مؤثری در پیش‌بینی این پدیده و پیش‌گیری از خسارت‌های ناشی از آن داشته باشد. هدف از این تحقیق شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست در دشت جیرفت و ارتباط آن با میزان فرونشست‌ها، با استفاده از تابع اطمینان شهودی، و مدل‌سازی مکانی

1- land subsidence
2- samcheok

زمین از مجموع ۱۹۴ فرونشست شناسایی شده، ۷۰٪ (۱۳۶) برای مدل سازی و ۳۰٪ (۵۸) برای ارزیابی به طور تصادفی استفاده شد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۲؛ هونگ و همکاران ۲۰۱۶؛ یوسف و همکاران ۲۰۱۶؛ پورقاسمی و کرل ۲۰۱۶؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۷).

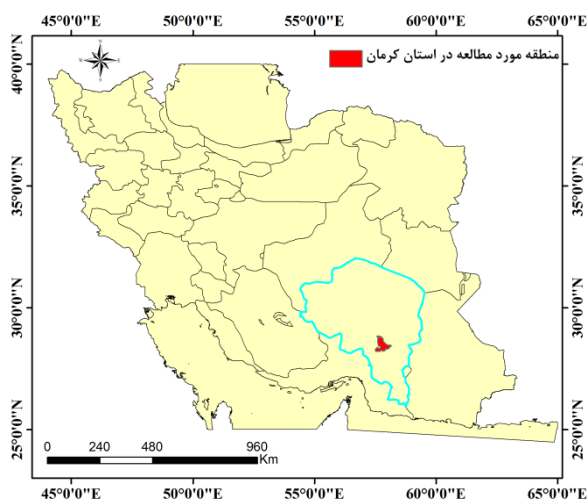
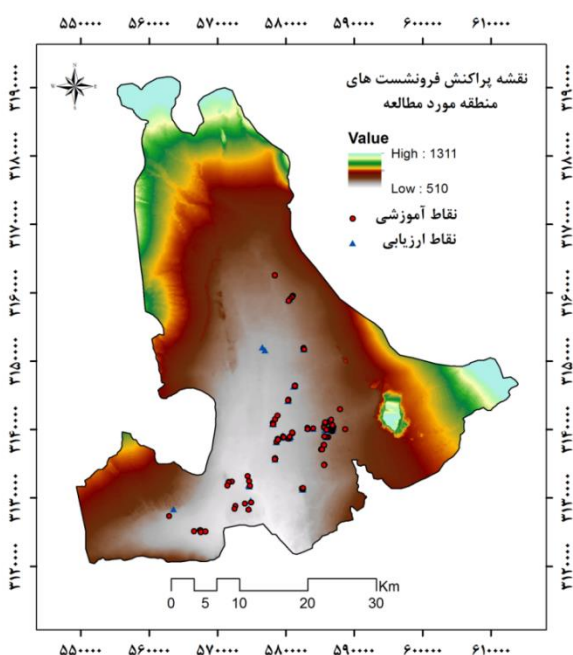
روش کار

روش تحقیق مدل سازی مکانی و ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از روش داده کاوی مدل جمعی تعمیم یافته در دشت جیرفت، استان کرمان در شکل ۲ آورده شده است.

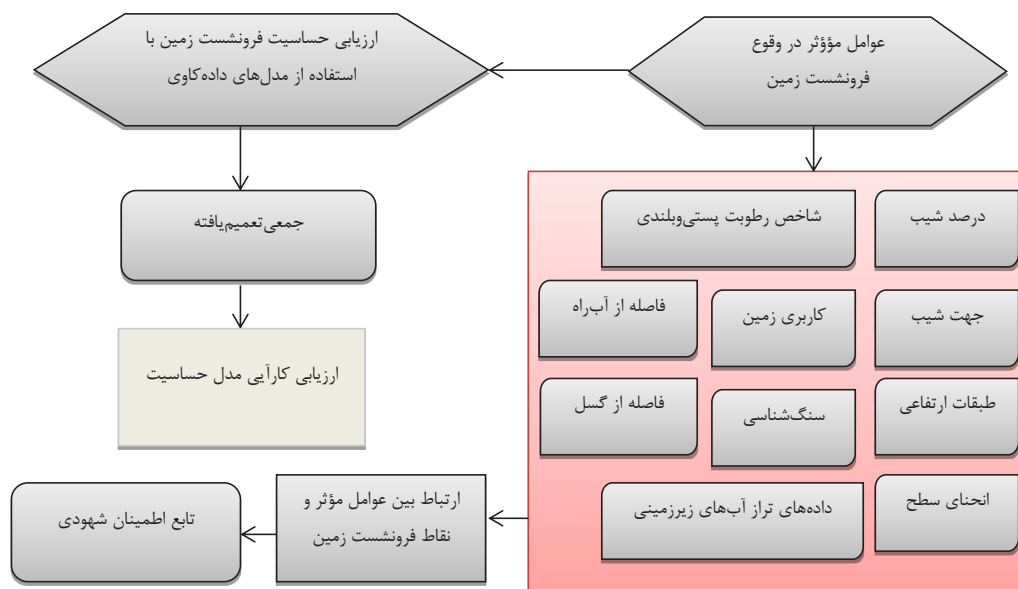
آن با استفاده از روش داده کاوی مدل جمعی تعمیم یافته است.

مواد و روش ها

مشخصات منطقه و تهیه نقشه‌ی پراکنش فرونشست های رخ داده
دشت جیرفت با مساحت ۴۹۴۳ کیلومترمربع میان طول های جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۲۹ درجه شمالی است (شکل ۱). در این پژوهش پهنه های حساس به فرونشست زمین در بازدیدهای گسترده ی میدانی با سامانه موقعیت یاب جهانی ثبت، و وارد نرم افزار آرک جی آی اس^۳ کرده، و نقشه ی پراکنش فرونشست ها تهیه شد. برای مدل سازی خطر فرونشست



شکل ۱- نقشه‌ی منطقه‌ی بررسی و پراکنش فرونشست های رخ داده در آن.



شکل ۲- نمودار جریانی مدل سازی مکانی فرونشست زمین در دشت جیرفت، استان کرمان.

$$(TWI = \ln(A/Tang\beta)) \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (2)$$

که در آن A مساحت حوزهی آبخیز، β شیب (درجه)، TWI شاخص رطوبت پستی و بلندی، λ_i وزن نقطه‌ی i ام، D_i فاصله‌ی نقطه‌ی i ام تا نقطه‌ی مجهول، و α معادل توان وزن دهی است.

بررسی ارتباط میان فرونشست‌ها و هر یک از عوامل مؤثر

برای بررسی ارتباط هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست زمین در دشت جیرفت و فرونشست‌های رخ داده، نقشه‌ی هر یک از عوامل مؤثر با نقشه‌ی پراکنش فرونشست‌ها در جی‌آی‌اس^۹ هم‌پوشانی داده شد و وزن هر طبقه از عوامل مؤثر بر فرونشست با استفاده از تابع اطمینان شهودی به دست آمد.

تابع اطمینان شهودی^۹

نظریه‌ی شواهد (واقعه) را دمپستر (۱۹۶۷) با نظریه‌ی حدود بالا و پایین احتمال پیشنهاد کرد. دمپستر در واقع نوعی نبود قطعیت را در بیان اندازه‌ی احتمال پیش‌آمدها مدل سازی کرد (دمپستر ۱۹۶۷)، پس از آن شیفر (۱۹۶۷) این نظریه را با نام نظریه‌ی شواهد، که ساختاری برای نمایش اطلاعات در نبود قطعیت پی‌ریزی کرد (شیفر ۱۹۶۷). مدل آماری تابع اطمینان شهودی

عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست زمین در منطقه‌ی بررسی

بر اساس منابع چاپ شده و داده‌های در دسترس از منطقه، ۱۰ عامل مؤثر درصد شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، واحدهای سنگ‌شناسی، فاصله از آبراه، تراز آب‌های زیرزمینی، کاربری زمین، انحناى سطح^۴، شاخص رطوبت پستی و بلندی^۵ و فاصله از گسل انتخاب شد. با استفاده از نقشه‌های پستی و بلندی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع^۶ با تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ متر تهیه، و عامل‌های ریخت‌سنجی درصد شیب، جهت شیب، انحناى سطح و طبقات ارتفاعی در نرم‌افزار آرک‌جی‌آی‌اس^۷ ۱۰.۲.۲ اندازه‌گیری شد. شاخص رطوبت پستی و بلندی بر اساس رابطه‌ی ۱ در نرم‌افزار ساگاجی‌آی‌اس از نقشه‌ی دی‌ام به دست آمد. نقشه‌ی کاربری زمین در منطقه از دفتر طرح و برنامه‌ریزی استانداری کرمان تهیه، و با استفاده از تصاویر گوگل ارث اصلاح و به‌روزرسانی شد. نقشه‌ی واحدهای سنگ‌شناسی منطقه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه و رقومی شد. نقشه‌های فاصله از آبراه و فاصله از گسل نیز به ترتیب از نقشه‌های پستی و بلندی و زمین‌شناسی منطقه تهیه شد. در این پژوهش برای بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی از آمار ۱۵ ساله‌ی چاه‌های مشاهده‌ای منطقه در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۵ (سازمان آب منطقه‌ی استان کرمان) تهیه شد و سپس نقشه‌ی تغییرات تراز سفره‌ی آب زیرزمینی با استفاده از روش میان‌یابی وزن فاصله‌ی معکوس (رابطه‌ی ۲) آماده شد.

- 3- ArcGIS
- 4-plan curvature
- 5- topographic wetness index (TWI)
- 6- digital elevation model (DEM)3
- 7-SAGA-GIS
- 8-GIS
- 9- evidential belief function (EBF)

که در آن $\mu_i = E(Y_i) \sim Y_i$ مجموعه‌یی از توزیع نمایی (مانند توزیع نرمال، دوجمله‌یی و پواسون)، X_i ردیف i ام ماتریس مدل برای اجزای مدل پارامتریک، f_i تابع هموار متغیر کمکی X_i و β ضریب ثابت مدل است (فنگ، ۲۰۰۸). برای مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین از بسته‌ی GRASP (لهمان و همکاران، ۲۰۰۲) در نرم‌افزار آر استفاده شد.

ارزیابی مدل‌سازی مکانی و پهنه‌بندی فرونشست زمین

با توجه به این که برای ارزیابی مدل‌ها نمی‌توان از داده‌های به‌کارگرفته‌شده در مدل‌سازی استفاده کرد، از ۳۰٪ (۵۸) فرونشست‌های تصادفی انتخاب‌شده استفاده شد. منحنی آر.اوس^{۱۱} مشخصه‌ی عمل کرد نسبی هر مدل، و سطح زیرمنحنی بیان‌گر دقت مدل است، دل‌خواه‌ترین مدل، بیش‌ترین سطح زیرمنحنی را دارد، و مقادیر (آیوسی^{۱۲}) از ۰/۵ تا یک متغیر است (پرادهان و همکاران ۲۰۱۴). به‌طور کلی اگر مقادیر آیوسی ۱-۰/۹، ۰/۹-۰/۸، ۰/۸-۰/۷، ۰/۷-۰/۶ و ۰/۶-۰/۵ به‌ترتیب بیان‌گر ارزیابی تخمین عالی، خیلی خوب، خوب، متوسط و ضعیف است (پورقاسمی و روسی ۲۰۱۶). برای کشیدن منحنی آر.اوس از نرم‌افزار اسپ‌اس^{۱۳} نسخه‌ی ۱۷ استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی رابطه‌ی میان عوامل مؤثر و وقوع فرونشست‌ها با استفاده از مدل ای‌بی‌اف

نتایج به‌دست‌آمده از ارتباط مکانی هر یک از عوامل مؤثر و فرونشست‌های رخ داده در منطقه با استفاده از نظریه‌ی تابع اطمینان شهودی در جدول ۱ و مشخصات زمین‌شناسی منطقه در جدول ۲ آورده شده‌است.

براساس قانون دمپستر در تعمیم مدل احتمالاتی حد بالا و پایین بیزین برآورد شده‌است (دمپستر ۱۹۶۷). فرضیه‌ی تابع اطمینان شهودی شامل درجه‌ی اطمینان (Bel)، درجه‌ی نبوداطمینان (Dis)، درجه‌ی نبود قطعیت (Unc) و درجه‌ی منطقی (Pls) معرفی می‌شود (کارانزا و هاله ۲۰۰۲؛ آلتووانی و همکاران ۲۰۱۴). به‌طور کلی Bel و Pls به‌ترتیب حد بالا و پایین احتمالات است (دمپستر ۱۹۶۷). براین اساس اختلاف میان Bel و Pls، درجه‌ی نبودقطعیت (Unc) است که شک گزاره را اثبات می‌کند، حال آن که Dis که بیان‌گر درجه‌ی نبوداطمینان است، بر اساس رابطه‌ی (۱-Pls) یا (۱-Unc-Bel) محاسبه می‌شود، بنابراین مجموع Bel، Dis و Unc برابر با ۱ محاسبه می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۲؛ کارانزا و همکاران، ۲۰۰۵). جزئیات مدل در تحقیقات کارانزا و هاله (۲۰۰۲)، پارک (۲۰۱۱) و آلتووانی و همکاران (۲۰۱۴) به تفصیل آورده شده‌است.

مدل جمعی تعمیم‌یافته^{۱۰}

مدل جمعی تعمیم‌یافته تحلیلی ناپارامتریک است که بسط مدل‌های خطی تعمیم‌یافته است، و خود نیز از مدل‌های خطی توسعه‌یافته است (هستی و تیشیرانی ۱۹۹۰). در مدل جمعی تعمیم‌یافته برخلاف مدل رگرسیون خطی اجازه داده می‌شود که داده‌ها شکل منحنی پاسخ را تعیین کنند (هستی و تیشیرانی ۱۹۹۰). به‌طور کلی مدل مدل جمعی تعمیم‌یافته به‌صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود (هستی و تیشیرانی ۱۹۹۰):

$$g(\mu_i) = X_i\beta + \sum_{j=1}^m f_j(x_{ij}) \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

10-generalized additive model (GAM)

11-ROC

12- area under curve(AUC)

13- SPSS

14-EBF

جدول ۱- همبستگی مکانی میان نقاط فرونشست و عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست‌ها با استفاده از تئوری تابع اطمینان شهودی.

تعداد فرونشست	تعداد نقطه (پیکسل)	Pls	Unc	Dis	Bel	طبقه	عامل مؤثر
۱۳۴	۱۷۱۱۶۰۳۸	۰/۹۶	۰/۰۹۴	۰/۰۳۶	۰/۸۷۰	۰-۲	
۱	۲۵۰۹۷۷۳	۰/۵۰	۰/۴۵۸	۰/۴۹۸	۰/۰۴۴	۲-۵	درصد شیب
۱	۱۲۹۴۰۷۰۳	۰/۵۳	۰/۴۷۷	۰/۴۶۷	۰/۰۸۶	۵ <	
۱۱۲	۱۲۱۹۷۴۳۰	۰/۹۱	۰/۴۹۶	۰/۰۹۰	۰/۴۱۴	هموار (Flat)	
۵	۷۸۵۱۷۷	۰/۷۹	۰/۵۰۰	۰/۲۱۳	۰/۲۸۷	شمال	جهت شیب
۳	۲۸۲۵۸۹۵	۰/۷۶	۰/۷۱۲	۰/۲۴۱	۰/۰۴۸	شرق	
۳	۱۷۹۶۸۲۵	۰/۷۷	۰/۶۹۷	۰/۲۲۸	۰/۰۷۵	جنوب	
۱۳	۳۳۱۵۱۸۷	۰/۷۷	۰/۵۹۵	۰/۲۲۹	۰/۱۷۷	غرب	
۱۹	۲۰۴۰۸۲۶	۰/۷۸	۰/۵۱۳	۰/۲۲۲	۰/۲۶۵	کم‌تر از ۵۵۰	طبقات ارتفاعی (متر)
۱۰۸	۴۲۸۹۵۶۷	۰/۹۴	۰/۲۲۳	۰/۰۶۰	۰/۷۱۷	۵۵۰-۶۰۰	
۹	۱۴۵۹۰۱۲۱	۰/۲۸	۰/۲۶۴	۰/۷۱۸	۰/۰۱۸	بیش‌تر از ۶۰۰	
۲۲	۴۵۹۷۴۷۱	۰/۶۹	۰/۳۷۲	۰/۳۱۲	۰/۳۱۶	مقعر	انحنای سطح (plan curvature)
۵۷	۱۱۷۱۰۸۶۹	۰/۵۸	۰/۳۵۹	۰/۴۲۰	۰/۲۲۱	هموار	
۴۷	۴۶۱۲۱۷۴	۰/۷۳	۰/۲۷۰	۰/۲۶۷	۰/۴۶۳	محدب	
۱۸	۵۲۲۸۲۹۹	۰/۶۳	۰/۴۹۰	۰/۳۶۷	۰/۱۴۳	کم‌تر از ۸	شاخص رطوبت
۶۴	۱۲۱۷۸۸۸۵	۰/۶۰	۰/۳۷۹	۰/۴۰۲	۰/۲۱۸	۸-۱۲	پستی‌وبلندی
۵۴	۳۵۱۳۳۳۰	۰/۷۷	۰/۱۳۱	۰/۲۳۰	۰/۶۳۹	بیش‌تر از ۱۲	
۳۰	۳۷۷۱۷۶۶	۰/۷۶	۰/۴۶۲	۰/۲۲۷	۰/۳۰۱	۰-۵۰	فاصله از شبکه‌ی آبراه (متر)
۲۷	۵۵۱۲۴۴۲	۰/۷۳	۰/۵۴۳	۰/۲۷۲	۰/۱۸۵	۵۰-۱۵۰	
۲۸	۴۰۹۲۳۲۹	۰/۷۵	۰/۴۹۵	۰/۲۴۷	۰/۲۵۹	۱۵۰-۲۵۰	
۵۱	۷۵۴۳۹۷۷	۰/۷۶	۰/۵۰۰	۰/۲۴۴	۰/۲۵۶	بیش‌تر از ۲۵۰	
۱۴	۱۵۶۲۷۴	۰/۸۷۴	۰/۲۵۲	۰/۱۲۶	۰/۶۲۱	بیشه‌زار و درختچه‌زار	کاربری زمین
۳۴	۹۵۵۵۶۶۷	۰/۸۰۷	۰/۷۸۲	۰/۱۹۳	۰/۰۲۵	مرتع	
۰	۱۸۵۸۴۳۴	۰/۸۴۷	۰/۸۴۷	۰/۱۵۳	۰	اراضی لخت	
۰	۱۴۶۸۸۴۰	۰/۸۵۰	۰/۸۵۰	۰/۱۵۰	۰	بستر رودخانه	
۶۵	۶۶۵۳۴۲۳	۰/۸۹۳	۰/۸۲۵	۰/۱۰۷	۰/۰۶۸	زراعت آبی و باغات	
۱۳	۳۳۹۹۷۴	۰/۸۷۲	۰/۶۰۶	۰/۱۲۸	۰/۲۶۵	مناطق مسکونی	
۲	۶۶۲۱۲۷	۰/۸۵۸	۰/۸۳۷	۰/۱۴۲	۰/۰۲۱	پهنه‌های ماسه‌ای	
۸	۱۷۴۹۴۶	۰/۸۶۷	۰/۵۵۰	۰/۱۳۳	۰/۳۱۷	دق‌های رسی	
۰	۵۰۸۲۹	۰/۸۶۰	۰/۸۶۰	۰/۱۴۰	۰	اراضی شور و نم‌زار	
۱۳۶	۲۰۹۲۰۵۱۴	۰/۸۶۰	۰/۸۶۰	۰/۱۴۰	۰	اراضی شور و نم‌زار	
۲۶	۵۹۶۰۴۴۴	۰/۷۷	۰/۶۳۸	۰/۲۲۶	۰/۱۳۶	۰-۱۰۰۰	فاصله از گسل (متر)
۳۶	۴۶۱۲۶۰۳	۰/۸۱	۰/۵۶۸	۰/۱۸۸	۰/۲۴۴	۱۰۰۰-۲۰۰۰	
۱۹	۳۶۲۳۰۵۴	۰/۷۹	۰/۶۲۸	۰/۲۰۸	۰/۱۶۴	۲۰۰۰-۳۰۰۰	
۱۰	۲۴۵۴۴۳۷	۰/۷۹	۰/۶۶۳	۰/۲۱۰	۰/۱۲۷	۳۰۰۰-۴۰۰۰	
۴۵	۴۲۶۹۹۷۶	۰/۸۳	۰/۵۰۳	۰/۱۶۸	۰/۳۲۹	بیش‌تر از ۴۰۰۰	
۹	۳۲۴۳۵۳۱	۰/۷۱	۰/۵۵۷	۰/۲۸۶	۰/۱۵۷	کم‌تر از ۱۳	تراز آب زیرزمینی (متر)
۹۰	۱۱۱۰۱۳۹۷	۰/۸۱	۰/۳۵۵	۰/۱۸۶	۰/۴۵۸	۱۳-۲۰	
۳۷	۵۴۳۸۷۵۸	۰/۷۵	۰/۳۶۱	۰/۲۵۴	۰/۳۸۵	۲۰-۲۹	
۰	۱۱۳۶۸۲۸	۰/۷۳	۰/۷۲۷	۰/۲۷۳	۰	بیش‌تر از ۲۹	
۰	۲۲۴۳۳۸	۰/۸۵	۰/۸۴۷	۰/۱۵۳	۰	گروه ۱	واحد سنگ‌شناسی
۱۳۲	۱۹۸۹۱۰۹۹	۰/۹۱	۰/۴۷۸	۰/۰۹۰	۰/۴۳۱	گروه ۲	
۴	۴۵۷۱۲۶	۰/۸۵	۰/۲۸۱	۰/۱۵۰	۰/۵۶۹	گروه ۳	
۰	۸۶۰۲	۰/۸۵	۰/۸۴۹	۰/۱۵۱	۰	گروه ۴	
۰	۱۷۱	۰/۸۵	۰/۸۴۹	۰/۱۵۱	۰	گروه ۵	
۰	۳۳۳۲۴۳	۰/۸۵	۰/۸۴۶	۰/۱۵۴	۰	گروه ۶	
۰	۵۹۳۵	۰/۸۵	۰/۸۴۹	۰/۱۵۱	۰	گروه ۷	

کم و زمین های هموار رخ می دهد. نتایج جهت شیب نشان داد که بیشترین وزن فرونشست ها (Bel= .4۱۴) در جهت های هموار و پس از آن در جهت شمالی (۰/۲۸۷) رخ داده است، که با نظرات ازدمیر (۲۰۱۵) همخوانی دارد. فرونشست در جهت های جنوبی و شرقی کم تر بوده است.

نتایج بررسی درصد شیب نشان داد که بیشترین وزن فرونشست های رخ داده در منطقه در شیب های ۲-۰ (۰/۸۷) مشاهده شد، و با افزایش شیب از وقوع فرونشست ها کاسته شد. این یافته با نتایج کیم و همکاران (۲۰۰۹)، و بیلمیز (۲۰۰۷) کاملاً مطابقت دارد. به طور کلی فرونشست زمین عمدتاً در شیب های

جدول ۲- مشخصات سنگ شناسی منطقه.

گروه	سازند	توضیح
۱	Qt2	پادگانه های آب رفتی جوان
	QLc	اساساً کنگولومرای (جوش سنگ) نیمه تکامل یافته با قطعات خوب گرد شده
	Qfp	نهشته های دشت سیلابی، ماسه، سیلت (لای) ماسه ای، لای رسی، زمین های شخم خورده
	Qal	نهشته های بستر نهرهای سیلابی و رودخانه ای
	Qt1	پادگانه های قدیمی، نهشته های رودخانه ای فانگولومرای (جوش سنگ مخروط افکنه ای)
۲	Qc	کفه ی رسی
	Ef	رسوب ها از نوع فیلیش، توالی منظمی از ماسه سنگ، شیل (پلمه سنگ)، جوش سنگی ریزدانه، ماسه سنگ آهکی نومولیت کوییزین دار، سنگ آهک ماسه ای نومولیتی، مخلوط با پومیس (سنگ پا) های ریزدانه ی شیشه ای آواری، توف سبز
	QLm	رسوب های اندازه ی رس و لای (هر دو نهشته های رودخانه ای و بارانی)
	JK	عمدتاً از سنگ آهک کالپیونلادار ریززیستی، خاکستری روشن، خوب لایه بندی شده، نازک در آب های عمیق، به طور جزئی حاوی سنگ آهک آهک رسی، پلمه سنگ و ماسه سنگ آهکی
	Ewf	فیلیش های طوفانی آئوسن
۳	Erh	گنبد های ریولیتی و ریوداسیتی
	EQt	توف سبز تیره
۴	Da	مرمرهای دولومیتی و کلسیتی ضخیم، تناوبی از آمفیبولت و مرمر در زیر
	Pzla1	انواع مختلفی از آمفیبولت به طور جزئی متاگبرو و مرمر
۵	OMm	سنگ آهک ماری (آهک رسی) و آهک رس
	DCsg	عمدتاً از سنگ های سبز با ساختار بالشی نسبتاً خوب حفظ شده، به طور جزئی شیبست سبز، شیبست مسکوویتی، کوارتزیت و مرمر
	OM1	سنگ آهک ریفی
۶	g	گدازه
	gd	گدازه ی داسیتی
	gb	گدازه ی بازالتی
۷	Es	ماسه سنگ آهکی زرد و خاکستری، جوش سنگ، آهک رس گچ دار
	Et1	سنگ آهک نومولیت دار
	Ng2	جوش سنگ بخشی سخت شده
	Ngb	ماسه سنگ، جوش سنگ و آهک رس گچ دار

سنگ آهک ماسه ای اینومولیتی، مخلوط با سنگ پاهای ریزدانه ی شیشه ای آواری، توف سبز، QLM: رسوب های اندازه رس و لای (هر دو نهشته های رودخانه ای و بارانی)، JK: سنگ آهک کالپیونلادار ریززیستی، خاکستری روشن، خوب لایه بندی شده، نازک در آب های عمیق، به طور جزئی حاوی سنگ آهک آهک رسی، پلمه سنگ و ماسه سنگ آهکی، Ewf: فیلیش های طوفانی آئوسن) با وزن (۰/۴۳۱) است، که این دو گروه بیشترین تأثیر را بر وقوع فرونشست زمین در دشت جیرفت داشت. در دیگر گروه ها وزن حاصل از درجه ی اطمینان صفر بود. نتایج کاربری زمین نشان داد

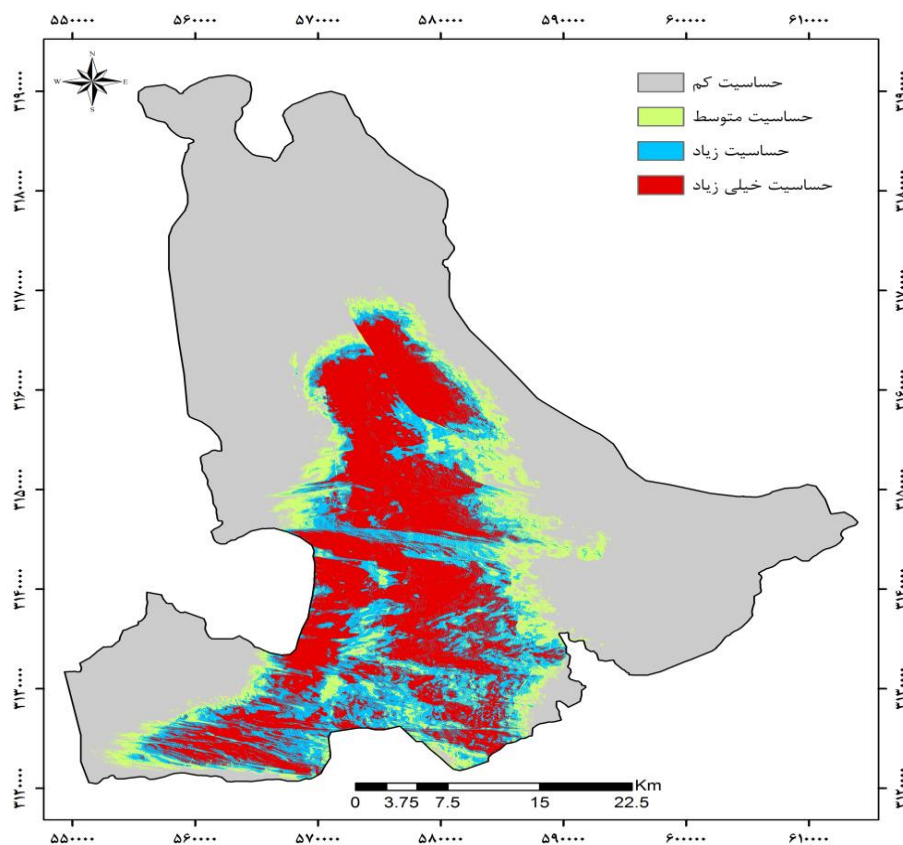
نتایج طبقات ارتفاعی نشان داد که بیشترین وزن فرونشست ها (۰/۷۱) مربوط به ارتفاع (۶۰۰-۵۵۰) متری است و در ارتفاع های بالاتر میزان وقوع فرونشست کم تر است، و این با نتایج (پارک و همکاران، ۲۰۱۴) همخوانی دارد. بررسی نتایج حاصل از واحدهای سنگ شناسی منطقه نشان داد که بیشترین وزن حاصل از درجه ی اطمینان یعنی ۰/۵۶۹ مربوط به سازندهای گروه ۳ Erh: گنبد های ریوداسیتی و ریولیتی و EQt: توف سبز تیره) و پس از آن گروه ۲ Ef: رسوب ها از نوع فیلیش، توالی منظمی از ماسه سنگ، پلمه سنگ، جوش سنگ ریزدانه، ماسه سنگ آهکی نومولیت کوییزین دار،

وقوع فرونشست در منطقه نشان داد که بیش‌ترین وزن فرونشست‌ها (۰/۳۲) در طبقه‌ی بیش‌تر از ۴۰۰۰ متر رخ داده‌است، بنابراین، می‌توان گفت که فرونشست‌های منطقه بر اثر نیروی زلزله نبوده است.

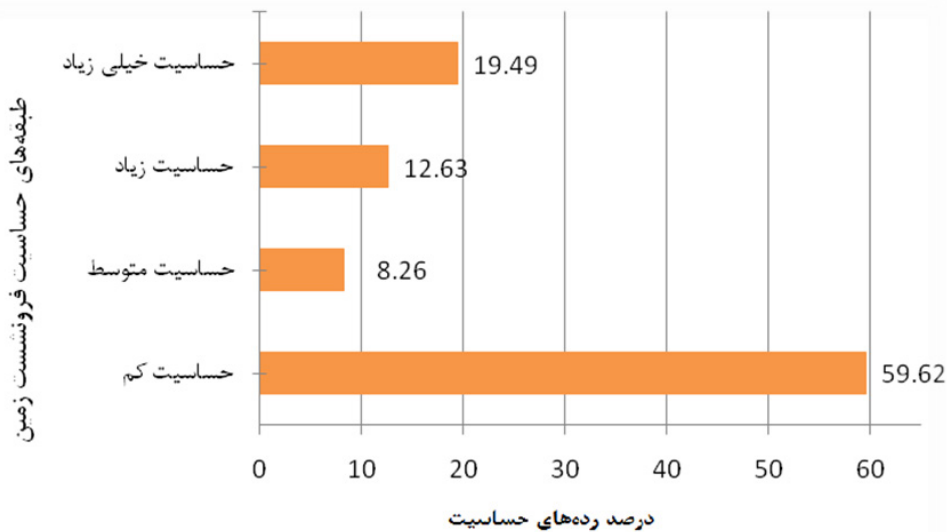
تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت فرونشست زمین با مدل جمعی تعمیم‌یافته پس از آماده‌سازی عوامل مؤثر و شناسایی مناطق فرونشست در منطقه، ارتباط مکانی هر یک از لایه‌ها و نقاط فرونشست بررسی و در قالب پرونده‌ی اکسل وارد نرم‌افزار آر شد. پس از تعیین خروجی مدل در قالب TXT، در نرم‌افزار اسپ‌اس‌اس فراخوانی شد، و به نرم‌افزار آرک‌جی‌آی‌اس منتقل شد، و نقشه‌ی مدل شده در سطح پیکسل به پیکسل برای کل منطقه آماده شد. نقشه‌ی نهایی توان فرونشست زمین در نرم‌افزار آرک‌جی‌آی‌اس تهیه، و براساس شکستگی‌های طبیعی^{۱۴} (کوماک ۲۰۰۶) به ۴ طبقه‌ی حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۳).

از طرف دیگر درصد مساحت فرونشست‌های رخ داده در طبقات حساسیت منطقه با استفاده از مدل عمومی تجمیع یافته در شکل ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که ۳۲/۱۲٪ از منطقه در طبقه‌ی حساسیت زیاد و خیلی‌زیاد است. مدل جمعی تعمیم‌یافته‌ی نهایی (شکل ۵) نشان داد که از میان ۱۰ عامل به‌کارگرفته شده در مدل، طبقه‌های ارتفاعی، کاربری زمین، جهت شیب، فاصله از گسل و فاصله از آبراه به‌ترتیب اهمیت و تأثیر بیش‌تری بر رخداد فرونشست زمین دارند. ضریب تبیین مدل جمعی تعمیم‌یافته برای عامل‌های عمل‌کردی ۰/۶۹ بود (جدول ۳). مهم‌ترین مرحله در تفسیر مدل جمعی تعمیم‌یافته، توصیف منحنی پاسخ جزئی پیش‌بینی‌کننده است (پورقاسمی و روسی ۲۰۱۶).

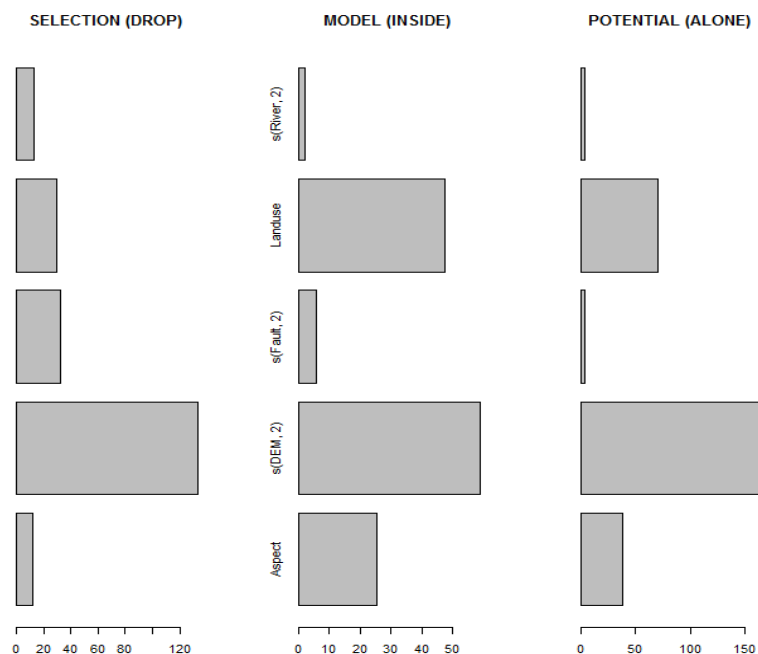
که بیش‌تر فرونشست‌های اتفاق افتاده به‌ترتیب در زمین‌های بیشه‌زار و درختچه‌زار (۰/۶۲)، دق‌های رسی (۰/۳۱) و مناطق مسکونی (۰/۲۶) بود. تأثیر شاخص رطوبت پستی‌وبلندی بر فرونشست‌های رخ داده در منطقه نشان داد که بیش‌ترین وزن (۰/۶۳) فرونشست‌ها مربوط به طبقه‌ی بیش از ۱۲ است. به‌طور کلی شاخص رطوبت پستی‌وبلندی، بیان‌گر میزان تجمع آب در یک نقطه یا یک بخش از حوزه‌ی آبخیز است و تغییرات مکانی رطوبت را نشان می‌دهد (مور و همکاران ۱۹۹۱؛ نفسلی‌اغلو و همکاران ۲۰۰۸). ارتباط فرونشست زمین و فاصله از آبراه نشان داد که بیش‌ترین وزن (۰/۳۰) فرونشست‌ها در فاصله‌ی کم‌تر از ۵۰ متر از آبراه دیده‌شده است، از آن‌جا که دشت جیرفت اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد، و روان‌آب بارندگی در آن بسیار کم است و اغلب فرونشست‌ها هم در زمین‌های خشک رخ می‌دهد، فرونشست‌ها در این منطقه در فاصله‌ی کمی از آبراه به وفور مشاهده شد. بررسی نتایج انحنای سطح نشان داد که بیش‌ترین وزن فرونشست‌ها در میان سه طبقه‌ی کم‌تر از ۰/۰۱ - (مقعر)، ۰/۰۱ - ۰/۰۱ - (هموار) و بزرگ‌تر از ۰/۰۱ (محدب) مربوط به طبقه‌ی دامنه‌های محدب (۰/۴۶) است. به‌طور کلی توزیع فرونشست‌ها از افت‌وخیزهای سفره‌ی آب زیرزمینی تأثیر می‌گیرد. یکی از دلایل فرونشست و ترک‌خوردگی زمین مربوط به بازتاب طبیعی آن در برابر بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی است (ازدمیر ۲۰۱۵). بررسی نتایج تغییرات تراز آب زیرزمینی نشان داد که بیش‌ترین وزن رخداد فرونشست‌ها (۰/۴۵) در طبقه‌ی ۲۰-۱۳ متر مشاهده شد. ممکن است که هرچه تراز آب زیرزمینی کم‌تر باشد، احتمال روی‌دادن آن بیش‌تر است. پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی هم‌بستگی میان گسل و فرونشست زمین شده‌است (هک ۱۹۶۵؛ سانتو و همکاران ۲۰۱۱؛ بیلی و همکاران ۲۰۰۷؛ کرمانا و همکاران ۲۰۰۸). نتایج بررسی فاصله از گسل بر



شکل ۳- نقشه‌ی توان فرورانشست زمین با استفاده از شبیه جمعی تعمیم یافته.



شکل ۴- درصد مساحت رخدادهای فرورانشست زمین در دشت جیرفت با استفاده از شبیه جمعی تعمیم یافته.



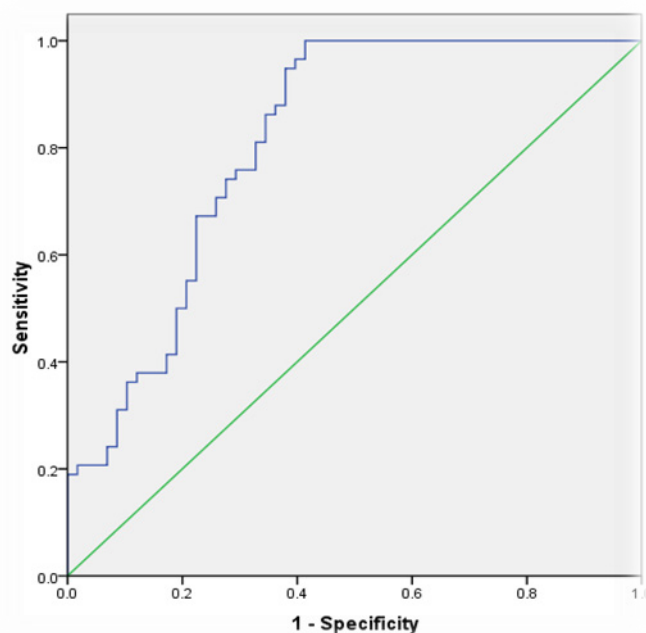
شکل ۵- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست زمین در دشت جیرفت.

جدول ۳- عمل کرد عامل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی جمعی تعمیم‌یافته.

عامل	r^2	RSME	rRMSE
مقدار	۰/۶۹۶	۰/۳۰۹	۶۱/۷۱

مدل جمعی تعمیم‌یافته مشابه بودن آن با روش‌های ماشین یادگیری و امکان تفسیر آسان این الگوریتم است (فنگ ۲۰۰۸؛ گویتز و همکاران ۲۰۱۱؛ پتچکو و همکاران ۲۰۱۴؛ پورقاسمی و روسی ۲۰۱۶). این مدل توانایی زیادی در تجزیه و تحلیل داده‌ها و مشخص کردن رابطه‌ی غیرخطی میان متغیرهای مختلف دارد (هنسپچ و همکاران ۲۰۱۱).

در نهایت نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت فرونشست زمین در دشت جیرفت با استفاده از منحنی آراوسی و سطح زیرمنحنی آن ارزیابی شد (شکل ۶ و جدول ۴). نتایج ارزیابی مدل بیان‌گر مساحت زیرمنحنی ۰/۸۱۲ یا دقت ۸۱/۲۰٪ برای مدل‌سازی فرونشست زمین است. بنابراین دقت نقشه‌ی حساسیت تهیه‌شده با استفاده از مدل خیلی خوب است. از مهم‌ترین ویژگی‌های



شکل ۶- منحنی آرو.سی عمومی تجمیع یافته در مدل سازی حساسیت فرونشست زمین در دشت جیرفت.

جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل عمومی تجمیع یافته بر اساس تخمین سطح زیرمنحنی.

سطح اطمینان ۹۵ درصد		معناداری	خطای معیار	مساحت زیرمنحنی	شبهه عمومی تجمیع یافته
رده ی بالا	رده ی پایین				
۰/۸۹۲	۰/۷۳۳	.	۰/۰۴۱	۰/۸۱۲	GAM

نتیجه گیری

سازندهای گروه سوم (گنبدهای ریولیتی و ریوداسیتی و توف سبز تیره)، در زمین های بیشه زار و درختچه زار، دامنه های محدب با رطوبت پستی و بلندی زیاد (بیش تر از ۱۲) و افزایش افت سطح آب زیرزمینی کم تر بیش تر است. بیش ترین درصد حساسیت فرونشست های منطقه (۵۹/۶۲٪) در طبقه ی حساسیت کم بود. بنابراین، بر اساس نتایج مدل سازی مکانی فرونشست ها و نقشه ی حساسیت تهیه شده، و نیز با توجه به هم بستگی میان عوامل مؤثر با پهناهای فرونشست، می توان در پیش گیری از این روی داد خطرناک و برنامه ریزی برای مدیریت منابع آب به ویژه چاه های بدون پروانه و جلوگیری از برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی اقدام کرد.

برای مدل سازی مکانی، ۷۰٪ از کل پهناهای فرونشست زمین، آن برای مدل سازی و ۳۰٪ دیگر برای ارزیابی مدل به کار گرفته شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که دقت مدل جمعی تعمیم یافته با سطح زیرمنحنی ۰/۸۱۲ خیلی خوب است، و نتایج اولویت بندی مدل نشان دهنده ی آن بود که در رخداد فرونشست در دشت جیرفت، اهمیت طبقه های ارتفاعی، تغییرات کاربری زمین و جهت شیب به ترتیب بیش تر از عامل های دیگر بود. نتایج نشان داد که بیش تر فرونشست های منطقه در شیب های کم (۰-۲ درصد)، جهت های شیب هموار، فاصله ی کم از آبراه (کم تر از ۵۰ متر)، فاصله ی زیاد از گسل (بیش تر از ۴۰۰۰ متر) است. احتمال وقوع فرونشست زمین در

منابع

- Althuwaynee OF. Pradhan B. Park HJ. Lee JH. 2014. A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena*. 114: 21–36.
- Angorani S. Memarian H. Shariat panahi M. Balourchi M. 2016. Modelling dynamic subsidence in the Tehran plain. *Earth Science*. 97(25): 211–227.
- Billi A. Valle A. Brilli M. Faccenna C. Funicello R. 2007. Fracture-controlled fluid circulation and dissolution weathering in sinkhole-prone carbonate rocks from central Italy. *Journal of Structural Geology*. 29: 385–395.
- Caramanna G. Ciotoli G. Nisio S. 2008. A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. *Natural Hazards*. 45 (2): 145–172.
- Carranza EJM. Hale M. 2002. Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Ore Geology Reviews*. 22: 117–132.
- Carranza EJM. Woldai T. Chikambwe EM. 2005. Application of data-driven evidential belief functions to prospectively mapping for aquamarine-bearing pegmatites, Lundazi District, Zambia. *Natural Resource Research*. 14: 47–63.
- Cloetingh Yu. Podlachikov Y. 2000. Perspectives on tectonic modeling. *Tectonophysics*. 320: 169–173.
- Dempster AP. 1967. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*. 38 (2): 325–339.
- Fang X. 2008. Generalized additive models with correlated data, ProQuest. ISBN: 0549950907, 9780549950905.
- Goetz JN. Guthrie RH. Brenning A. 2011. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology*. 129 (3-4): 376–386.
- Hack JT. 1965. Geomorphology of the Shenandoah Valley, Virginia and West Virginia, and origin of the residual ore deposits. U.S. Geology Survey Professional Paper 484p. From <http://pubs.usgs.gov/pp/0484/report.pdf> Accessed 20 September 2012.
- Hanspach J. Kuhn I. Pompe S. Klotz S. 2011. Predictive performance of plant species distribution models depends on species traits. *Perspectives in plant ecology. Evaluation and Systematic*: 12 (3): 219-225.
- Hashtie TJ. Tibshirani RJ. 1990. Nonparametric logistic and proportional odds regression. *Applied Statistics*: 36 (3): 260–276.
- Hong H. Pourghasemi HR. Pourtaghi ZS. 2016. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical. *Geomorphology*. 259: 105–118.
- Hu RL. Yue ZQ. Wang LC. Wang SJ. 2004. Review on current status and Challenging issues of and subsidence in China. *Engineering Geology*. 76 (1-2): 59–75.
- Kim KD. Lee S. Oh HJ. 2009. Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS. *Environmental Geology*. 58 (1): 61–70.
- Komac MA. 2006. Landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Sloveni. *Geomorphology*. 74 (1-4): 17–28.
- Lee S. Park I. Choi TK. 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. *Environmental Management*. 49: 347–358.

- Lehmann A. McC Overton J. Leathwick JR. 2002. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*. 157 (1-2): 189–207.
- Li Z. Zhou H. Xu Y. 2013. Research on prediction model of support vector machine based land subsidence caused by foundation pit dewatering. *Advanced Materials Research*. 671-674: 105–108.
- Moore ID. Grayson RB. Ladson AR. 1991. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*. 5: 3–30.
- Nefeslioglu HA. Duman. TY. Durmaz S. 2008. Landslide susceptibility mapping for part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey). *Geomorphology*. 94 (3-4): 401–418.
- Ozdemir A. 2015. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapinar (Konya, Turkey). *Geomorphology*. 245: 40–50.
- Pacheco J. Arzate J. Rojas E. Arroyo M. Yutsis V. Ochoa G. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence usind gravity data and finite element modelling in the Queretaro Valley. *Mexico Engineering Geology*. 84 (3-4): 186-197.
- Park I. Lee J. Lee S. 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Center European Journal of Geosciences*. 6 (2): 207–218.
- Petschko H. Brenning A. Bell R. Goetz J. Glade T. 2014. Assessing the quality of landslide susceptibility maps—case study lower Austria. *Natural Hazards Earth System Science*. 14 (1): 95–118.
- Pourghasemi HR. Kerle N. 2016. Random Forest-evidential belief function based landslide susceptibility assessment in western Mazandaran Province Iran. *Environmental Earth Sciences*. 75: 185, DOI: 10.1007/s12665-015-4950-1.
- Pourghasemi HR. Rossi M. 2017. Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods *Theoretical and Applied Climatology*. 130 (1-2): 609-633. DOI: 10.1007/s00704-016-1919-2.
- Pourghasemi HR. Pradhan B. Gokceoglu C. 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran, *Natural Hazards*. 63(2): 965–996.
- Pourghasemi HR. Yousefi S. Kornejady A. Cerda A. 2017 Applying different new ensemble data mining techniques for Gully erosion mapping with Geographical Information Systems. *Science of the Total Environment*. 609 (31): 764–775.
- Pradhan B. Abokharima MH. Jebur NM. Shafapour Tehrany M. 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural Hazards*. 73: 1019–1042.
- Santo A. Ascione A. Del Prete S. Crescenzo DiG. Santangelo N. 2011. Collapse sinkholes distribution in the carbonate massifs of central and southern Apennines. *Acta Carsologica*. 40: 95–112.
- Shadfar S. Nasiri E. Chitgar S. Ahmadi A. 2016. Mapping susceptibility subsidence using hierarchical analysis process (AHP) case study (Buin Zahra city). *Territory*. 48(12): 101–116.
- Shafer GA. 1976. *Mathematical theory of evidence*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Sharifikia 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).
- Shrestha PK. Shakya NM. Pandey VP. Birkinshaw SJ. Shrestha S. 2017. Model-based estimation of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 8 (2): 974-996 <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2017.1289985>.
- Toll DG. 1996. Artificial intelligence applications in geotechnical engineering. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 27 pp.
- Waltham AC. 1989. *Ground subsidence*. Blackie &

Son Limites.

Wang GY. You G. Shi B. Yu J. Li HY. Zong KH. 2008. Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, china. Engineering Geology. 104 (1-2): 109-118.

Yilmaz I. 2007. GIS based susceptibility mapping of karst depressions in gypsum: a case study from Sivas basin (Turkey). Engineering Geology. 90: 89-103.

Yin J. Yu D. Wilby R. 2016. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding; a case

study of downtown Shanghai, China. Science of the Total Environment. 544: 744-753.

Youssef AM. Pourghasemi HR. Pourtaghi Z. Al-Katheeri MM. 2016. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir region, Saudi Arabia. Landslides. 13: 839-856.

