



مدل سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبریز دشت تسوج)

داوود مختاری^۱، حمید ابراهیمی^{۲*}، سعید سلمانی^۳

۱. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۲. دانشجو دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه شهید بهشتی

۳. دانش آموخته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۷ مهر ۱۳۹۶

پذیرش: ۸ مهر ۱۳۹۸

دسترسی اینترنتی: ۲۵ مهر ۱۳۹۸

واژه های کلیدی:

فرونشست زمین

سطح آب زیرزمینی

الگوریتم جنگل تصادفی

دشت تسوج

چکیده

وقوع پدیده فرونشست زمین و خطرات احتمالی آن در حوزه آبریز دشت تسوج استان آذربایجان شرقی به علت بروز بحران آب و دوره خشکسالی موجود در منطقه طی سالیان اخیر افزایش چشمگیری داشته است. به منظور برنامه ریزی برای کاهش خطرات ناشی از فرونشست زمین، شناسایی مناطق پرخطر و مستعد وقوع این پدیده ضروری است. در این مطالعه به مدل سازی خطر وقوع فرونشست زمین در بستر الگوریتم جنگل تصادفی با بهره گیری از نقاط فرونشست های ثبت شده و یازده متغیر محیطی مؤثر بر وقوع فرونشست (ارتفاع، شیب، جهت، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، سنگ شناسی، کاربری اراضی، سطح آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی) پرداخته شده است. قابلیت پیش بینی و صحت نتایج مدل با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و مساحت سطح زیر این منحنی (AUC) مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی نتایج مدل نشان دهنده دقت بسیار مناسب مدل ۰/۸۶ است. بر اساس نتایج حاصل از مدل با روش میانگین کاهشی دقت، متغیرهای سطح آب زیرزمینی، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی تأثیر بیشتری بر پتانسیل وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه داشته اند. همچنین مطابق نتایج حاصل به ترتیب ۱۸ و ۱۱ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر از نظر وقوع فرونشست قرار گرفته که حاکی از شرایط خطرناک منطقه است. استفاده از نتایج حاصل از این تحقیق توسط مدیران و برنامه ریزان نقش مؤثری در کاهش خطرات ناشی از فرونشست زمین خواهد داشت، همچنین ارائه و اجرای راهکارهای عملیاتی را تسهیل می کند.

*hamdebrahimi@gmail.com: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

مقدمه

پدیده فرونشست زمین که به صورت تدریجی و یا ناگهانی رخ می‌دهد در طی سالیان اخیر به طور گسترده‌ای در مناطق مختلف دنیا و تحت تأثیر عوامل مختلف طبیعی و یا انسانی به وقوع پیوسته است (۱۵ و ۲۵). وقوع فرونشست در مناطق مختلف دنیا منجر به بروز خسارات جدی به ساختارهای انسان‌ساخت و طبیعی شده است (۲۳، ۳۶ و ۴۶). در دوره بیست‌ساله اخیر، وقوع فرونشست و همچنین فروچاله‌ها به عنوان یکی از نگرانی‌های جدی در برخی از مناطق کشور ایران مطرح گشته‌اند (۴۷). کاهش سطح آب‌های زیرزمینی همواره به عنوان یکی از علل اصلی وقوع و گسترش پدیده فرونشست زمین در مناطق مختلف مطرح گشته است (۲۲ و ۲۴). دشت تسوج در طی سالیان اخیر به طور جدی با بحران خشک‌سالی و کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است (۹). همچنین به نظر می‌رسد که در آینده نیز با توجه به تغییرات اقلیمی و با فرض ادامه یافتن شرایط موجود در بهره‌برداری از منابع آبی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه به صورت چشمگیری ادامه خواهد یافت (۳). در واقع تغییرات الگوی کشاورزی، کاهش بارندگی و بروز خشک‌سالی‌های پیوسته منجر به استفاده بدون برنامه و غیراصولی از منابع آب زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در حوزه آبریز دشت تسوج شده و شرایط را برای وقوع و گسترش فرونشست زمین فراهم آورده است. با توجه به اهمیت، گستردگی وقوع و خطرات اقتصادی ناشی از وقوع فرونشست زمین، بررسی جنبه‌های مختلف این پدیده ضروری به نظر می‌رسد. از این رو محققین مختلفی در سراسر دنیا به بررسی جنبه‌های مختلف این موضوع پرداخته‌اند، عمده این مطالعات شامل؛ پایش پدیده فرونشست (۱۱ و ۴۶)، نحوه شکل‌گیری و مکانیسم ایجاد (۲۰ و ۲۱) بوده و همچنین محققین مختلفی به روش‌های مختلف مدل‌سازی و ارزیابی خطر وقوع فرونشست زمین پرداخته‌اند (۱، ۸، ۲۹ و ۴۰). به طور کلی کاهش خطرات ناشی از وقوع پدیده فرونشست زمین با پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد و اعمال

راهکارهای عملیاتی امکان‌پذیر خواهد بود. علاوه بر این مطالعه جامع و تحلیل خطر وقوع فرونشست زمین با بررسی عوامل مؤثر و شناسایی مناطق پرخطر میسر می‌گردد. تاکنون تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از میان آن‌ها می‌توان مدل‌های؛ مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی (۱)، روش‌های فازی مینا (۸ و ۱۷)، پردازش تصاویر راداری (۳۲)، شبکه عصبی مصنوعی (۲۷)، تکنیک وزن واقعه (۳۴) و تصمیم‌گیری چند معیاره (۳۷) را ذکر کرد. علیرغم وجود تحقیقات متعدد در زمینه مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین، تاکنون در این تحقیقات از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده نشده است. الگوریتم جنگل تصادفی دارای قابلیت استفاده در مسائل مرتبط با طبقه‌بندی، رگرسیون و آموزش نظارت‌نشده است (۳۰). این روش تاکنون در زمینه‌های مختلفی از تحلیل‌های مکانی از جمله؛ پردازش و طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و هوایی (۶ و ۳۵)، مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع (۱۲ و ۳۹)، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش (۱۶ و ۴۸)، پتانسیل سنجی و ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (۴۳) استفاده شده و همواره عملکرد بسیار مناسبی داشته است. نظر به اهمیت موضوع، در این پژوهش با استفاده از مدل جنگل تصادفی ارتباط بین پتانسیل وقوع فرونشست زمین با هریک از عوامل مؤثر بر آن تخمین زده شده و نقشه خطر وقوع فرونشست در محدوده آبخوان حوزه آبریز دشت تسوج بر اساس متغیرهای محیطی مختلف و فرونشست‌های موجود در منطقه تولید می‌گردد. همچنین نقشه ایجاد شده به عنوان ابزاری کارآمد در شناسایی و نمایش وضعیت منطقه از نظر خطر وقوع فرونشست زمین برای برنامه‌ریزان و مدیران مطرح گشته و امکان طرح‌ریزی و اجرای برنامه‌های پیشگیری مناسب را میسر می‌نماید.

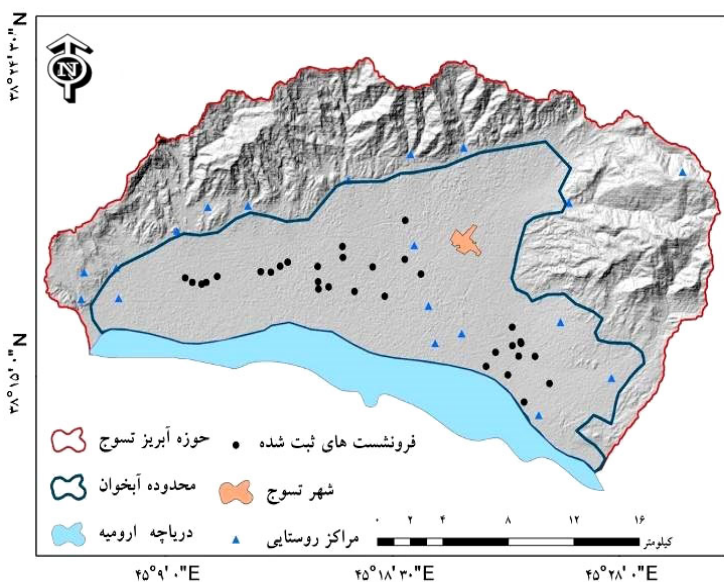
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در موقعیت جغرافیایی ۱۸° ۴۵' تا ۳۲' ۴۵° طول شرقی

متوسط سالانه منطقه ۹/۲ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. مهم‌ترین رودخانه‌های منطقه، رودخانه فصلی تسوج چای، با روند شمال شرق و جنوب غرب و انگشتجان و امستجان هر دو با روند شمال-جنوب می‌باشند (۷). تنوع سازند در این منطقه زیاد و هر سه گروه سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی به موجود بوده، همچنین گسل‌های تسوج، قزلجه و انگشتجان از مهم‌ترین گسل‌های منطقه می‌باشند (۱۰). شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، محدوده دشت آبخوان تسوج و موقعیت فرونشست‌های ثبت‌شده در منطقه را نشان می‌دهد.

و ۲۰' ۳۸° تا ۲۴' ۳۸° عرض شمالی در ۱۰ کیلومتری مرکز استان آذربایجان شرقی و در شمال دریاچه ارومیه واقع شده است. این منطقه شامل ده زیر حوزه بوده که مشرف به شهر تسوج و روستاهای انگشتجان و امستجان است. منطقه مطالعاتی از شمال به خط‌الرأس ارتفاعات میشوداغ، از شرق به کوه علمدار، از غرب به روستای امستجان و چهرگان و از جنوب به دشت حاشیه دریاچه ارومیه محدود می‌گردد (۲). منطقه از نظر اقلیم‌شناسی و بر اساس تقسیم‌بندی آمبرژه، جزء مناطق نیمه‌خشک و سرد است. بارش متوسط سالانه برای دوره شاخص ۱۰ ساله در مناطق مرتفع بیش از ۳۵۹ میلی‌متر و برای دشت در حدود ۲۷۸ میلی‌متر است و درجه حرارت

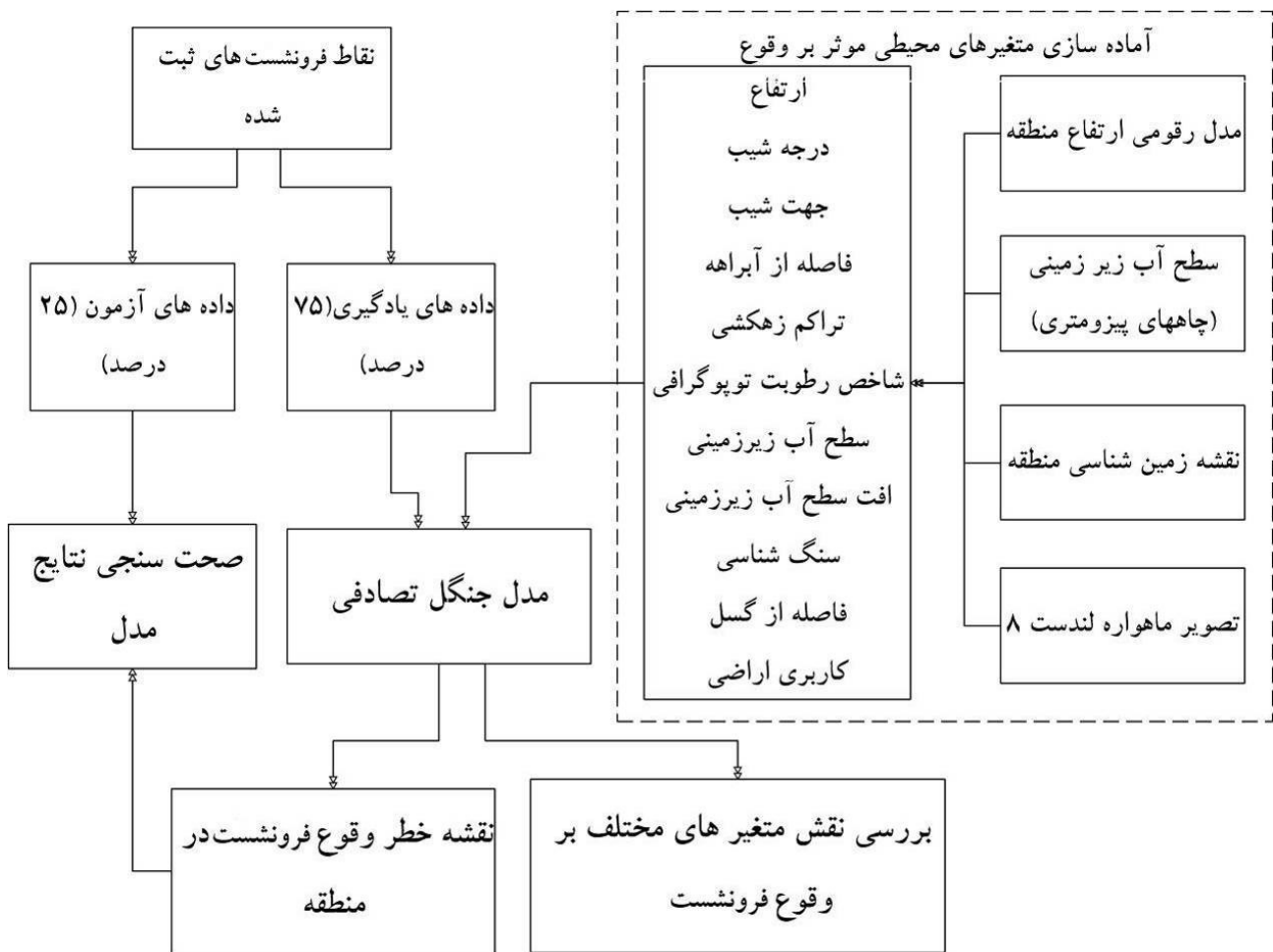


شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

دستگاه GPS دستی ثبت گردیده است). اجرای مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار R، اعتبار سنجی مدل با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی ROC (Receiver Operating Characteristics) و بررسی نقش متغیرهای محیطی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، است. مراحل کلی این پژوهش در شکل نمایش داده شده است.

روش تحقیق

پژوهش حاضر در پنج مرحله کلی به انجام رسیده است که شامل؛ آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مربوط به متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع فرونشست زمین، تهیه نقاط وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه (طی بازدید میدانی از محدوده آبخوان حوزه آبریز دشت تسوج، ۳۳ مورد فرونشست شناسایی و موقعیت مکانی این فرونشست‌ها با استفاده از

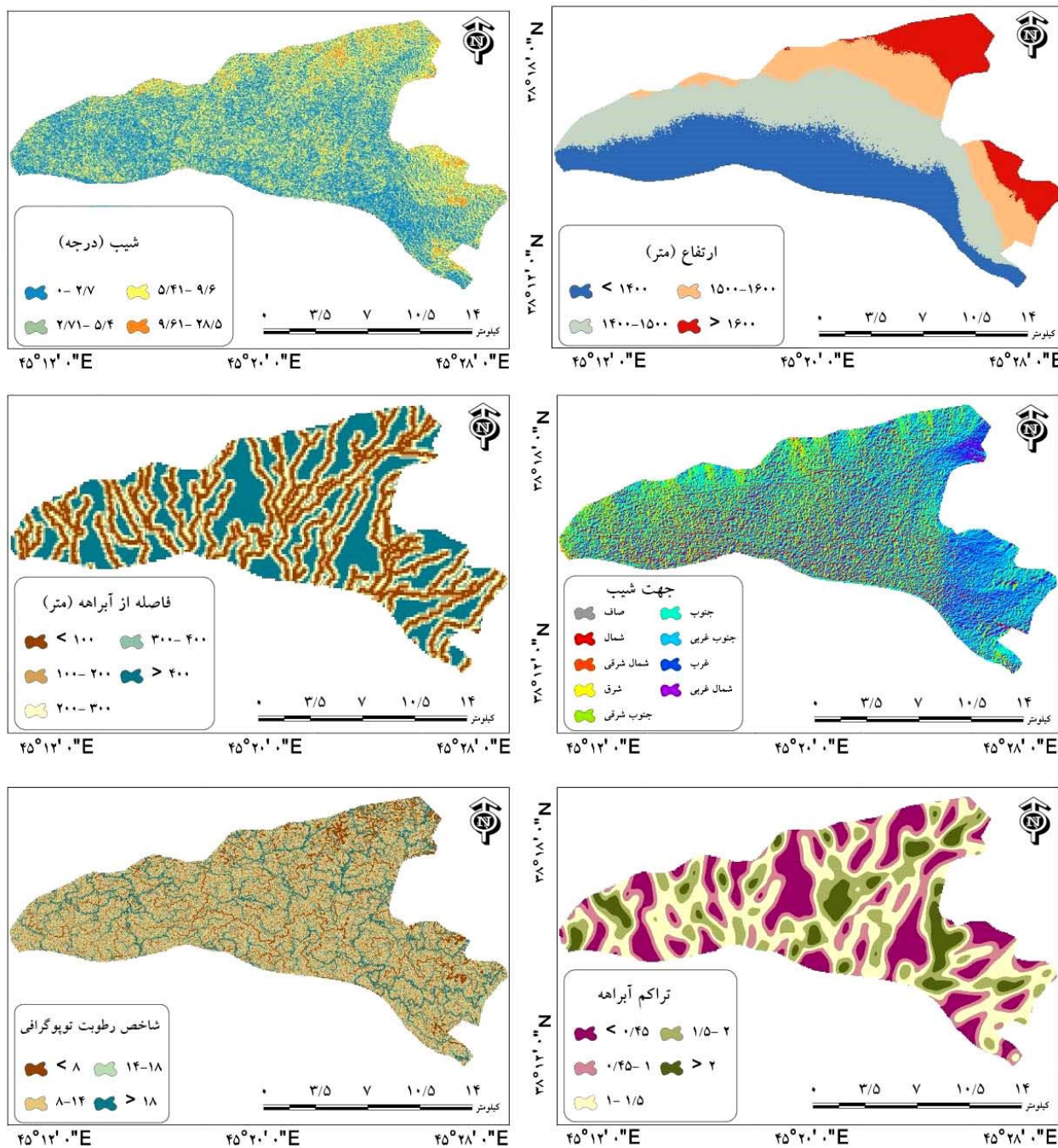


شکل ۲. مراحل و روند کلی تحقیق

آماده سازی لایه های اطلاعاتی مکانی

لایه های اطلاعاتی ارتفاعی، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، سنگ شناسی، کاربری اراضی، سطح آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی با توجه به مطالعات صورت گرفته در ایران (۱، ۵ و ۸) و جهان (۱۷، ۲۸، ۲۹، ۳۴ و ۴۰) و همچنین امکان دسترسی به این لایه ها به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع فرورانشت زمین شناسایی شده و در نتیجه به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شدند. داده های مورد استفاده در این

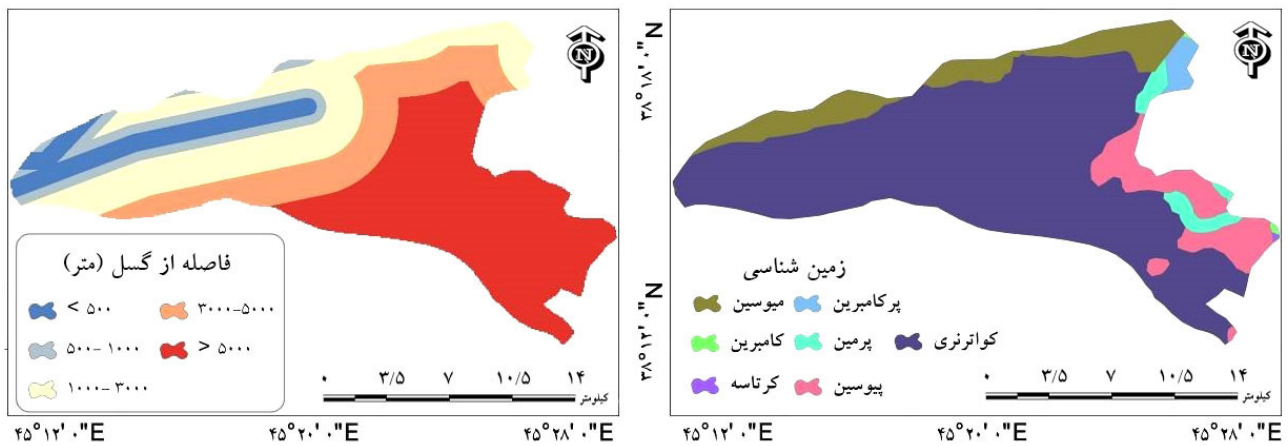
پژوهش از منابع اطلاعاتی متفاوتی جمع آوری و مورد استفاده قرار گرفته اند. مدل رقومی ارتفاع سنجنده استر (ASTER Global DEM) با قدرت تفکیک ۲۸ متر برای تهیه عوامل ارتفاعی، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی استفاده شده و همچنین لایه شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index) (۳۱) با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه و با بهره گیری از نرم افزار متن باز SAGA-GIS تهیه شده و در نمایش داده شده اند.



شکل ۱. نقشه ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی

و فاصله از گسل از آن استخراج گردید (شکل ۴).

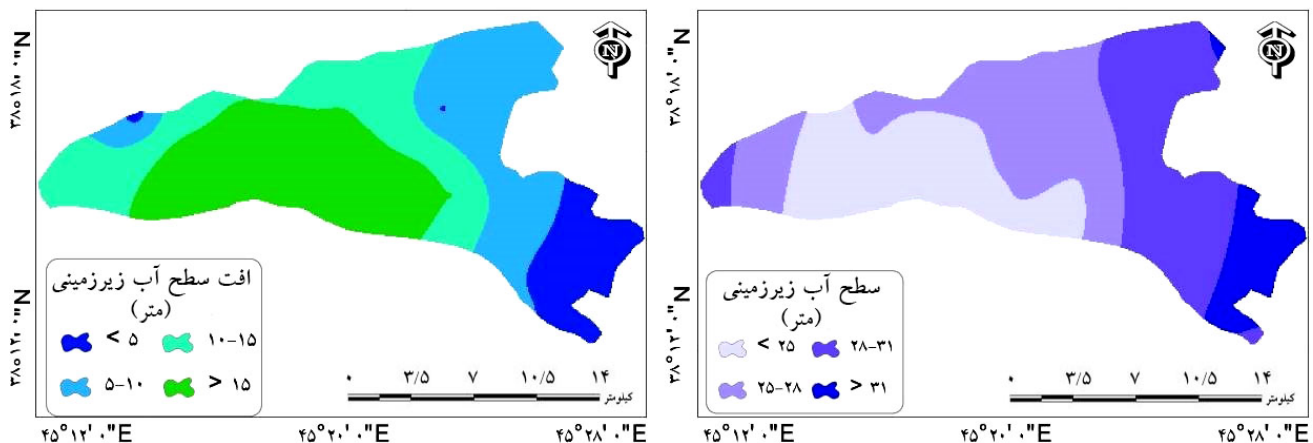
نقشه زمین‌شناسی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 زمین مرجع شده، سپس رقومی شده و لایه‌های طبقات زمین‌شناسی



شکل ۴. نقشه زمین شناسی و فاصله از گسل

سطح آب زیرزمینی (بازه ۲۱ ساله از سال ۱۳۷۳-۱۳۹۴) با بهره‌گیری از روش درون‌یابی کریجینگ تهیه گردید (شکل ۵).

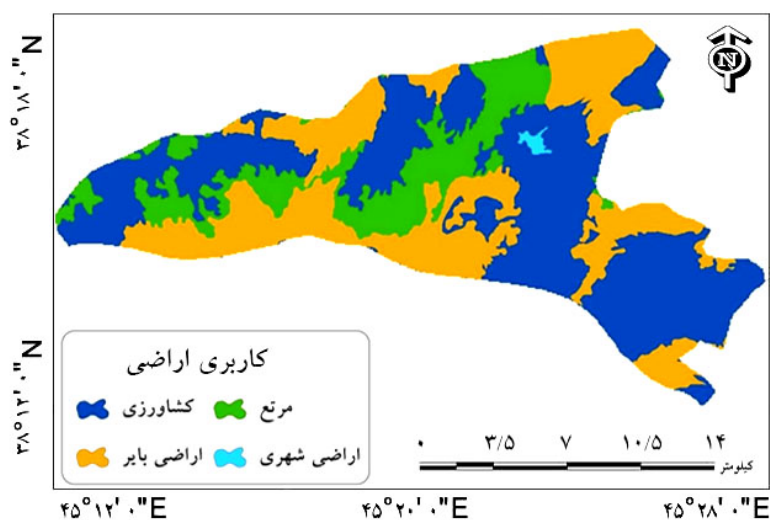
موقعیت جغرافیایی و سطح آب چاه‌های پیژومتری دشت تسوج از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ شده و سپس نقشه‌های مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی و افت



شکل ۵. نقشه سطح آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی

تصحیح رادیومتریک صورت گرفت و در نهایت با استفاده از نقاط کنترل زمینی و روش طبقه‌بندی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (Multi-Layer Perceptron Neural Network) (۴۵) نقشه کاربری اراضی در ۴ کلاس تولید گردید (شکل).

تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI در تاریخ ۱۳۹۴/۵/۱۷ مربوط به گذر ۱۶۹ و ردیف ۳۳ از طریق سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه گردید. به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه، ابتدا عملیات پیش‌پردازشی تصحیح اتمسفری به روش چاوز اعمال گردید و سپس



شکل ۶. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان یک روش غیر پارامتریک یادگیری ماشینی متعلق به خانواده روش های دسته جمعی (Ensemble) است. این الگوریتم نوع توسعه یافته ای از مدل طبقه بندی و رگرسیون درختی (Classification and regression trees) است و توسط بیرمن ارائه شده است (۱۴). مدل جنگل تصادفی مبتنی بر روش ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم ایجاد شده و سپس نتایج تمام درختان برای پیش بینی ترکیب می شوند (۱۸). استفاده از چندین درخت تصمیم گیری بی ثباتی و حساسیت مدل شده را کاهش داده و منجر به افزایش قدرت پیش بینی مدل خواهد شد (۳۸ و ۴۳).

هریک از درختان توسط روش نمونه برداری بوت استرپ ایجاد شده و در ساخت هر درخت به طور تصادفی تعدادی از متغیرهای ورودی برای جلوگیری و کاهش تطابق میان درخت های تصمیم شرکت می کنند. استفاده از این روش برای رویاندن درخت های تصمیم دارای مزیت هایی همچون؛ عدم نیاز به کالیبراسیون اضافی و مجدد مدل، کاهش ناسازگاری و مغایرت ها در نتایج مدل و در نهایت افزایش قابلیت پیش بینی است (۴۲).

اعتبار سنجی مدل

به منظور ارزیابی دقت نتایج مدل از منحنی تشخیص عملکرد نسبی راک (ROC) و مساحت سطح زیر این منحنی (Area Under the ROC Curves) AUC استفاده شده است. این منحنی به عنوان یک روش کارآمد در شناسایی میزان دقت احتمالی و پیش بینی سیستم ها مطرح شده که میزان دقت را به صورت کمی و کیفی برآورد می کند (۲۶). منحنی ROC بر اساس تقسیم نسبت بین حساسیت (Sensitivity) بر ۱- ویژگی (1- Specificity) محاسبه می شود، در واقع مقدار AUC بیانگر احتمال این است که یک پیکسل انتخاب شده به طور تصادفی دارای پیش بینی صحیحی باشد، از این رو با افزایش میزان AUC صحت نتایج مدل نیز افزایش می یابد. به طور کلی مقادیر AUC بین ۰/۷ تا ۰/۸ بیانگر یک مدل خوب، بین ۰/۸ تا ۰/۹ مدل بسیار خوب و مقادیر بیش از ۰/۹، بیانگر پیش بینی عالی مدل است (۴۱).

بررسی نقش متغیرها

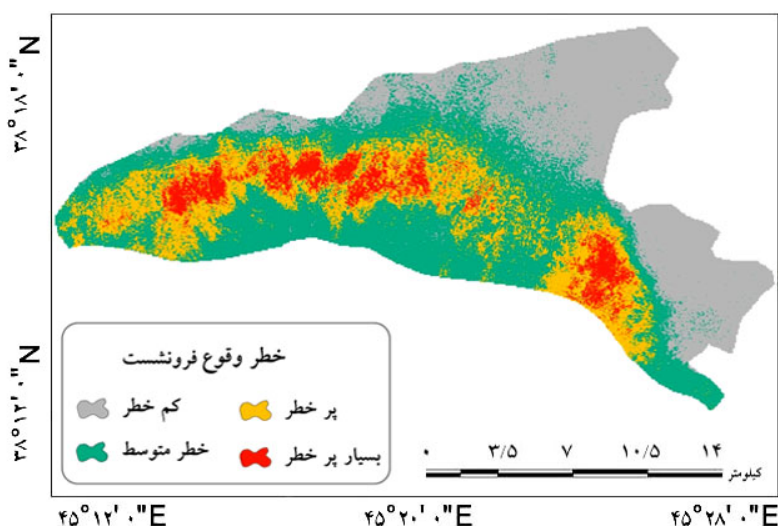
مدل جنگل تصادفی به دو روش میانگین کاهش دقت (Mean Decrease in Accuracy) و میانگین کاهش ضریب جینی (Mean Decrease in Gini Coefficient) اهمیت متغیرها را مورد بررسی قرار می دهد. استفاده از این دو روش در ارزیابی

استفاده شده است. در مدل‌سازی با مدل جنگل تصادفی تعریف دو پارامتر؛ تعداد متغیرهای مورد استفاده در فرآیند ساخت درخت‌های تصمیم در هر گره (m_{try}) و تعداد درختان مدنظر در جنگل برای اجرای مدل (n_{tree}) ضروری بوده و به‌عنوان یک مرحله مهم و اساسی برای کاهش خطای کلی مدل مطرح می‌گردد. در این مطالعه مقدار n_{tree} های مختلف از ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ به‌منظور دستیابی به بالاترین مقدار AUC مورد آزمون قرار گرفت و مقدار ۱۰۰۰ به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید. همچنین با استفاده از عملگر tuneRF در بسته randomForest مقدار ۳ برای m_{try} در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست به روش جنگل تصادفی با استفاده از تابع شکست طبیعی در چهار کلاس؛ کم خطر (۰-۰/۳۷)، خطر متوسط (۰/۳۷-۰/۶۲)، پرخطر (۰/۶۲-۰/۸۱) و بسیار پرخطر (۰/۸۱-۰/۹۹) طبقه‌بندی گردید (شکل ۷). با توجه به بررسی‌های صورت گرفته ۳۸ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به کلاس کم خطر، ۳۳ درصد به خطر متوسط، ۱۸ درصد به پرخطر و در نهایت ۱۱ درصد از مساحت منطقه به کلاس بسیار پرخطر اختصاص یافته است.

اهمیت متغیرها در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (۱۸ و ۳۸). به‌طورکلی استفاده از میانگین کاهش دقت در مقایسه با شاخص اهمیت جینی در تعیین اولویت و میزان اهمیت متغیرها بهتر و مناسب‌تر است (۳۳). از این رو در این مطالعه از این روش استفاده شده است. در روش میانگین کاهش دقت، مقادیر صحیح پارامترهای مختلف با مقادیر تصادفی تولید شده برای هر درخت توسط مدل جایگزین شده و اثر این تغییر بر روی نتایج مدل مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی که این جایگزینی اثر خاصی بر روی خطای مدل نداشته باشد اهمیت آن متغیر کم و در صورت افزایش میزان خطای مدل، متغیر مورد نظر اهمیت و نقش زیادی داشته و در نتیجه دارای تأثیرگذاری بالایی خواهد بود.

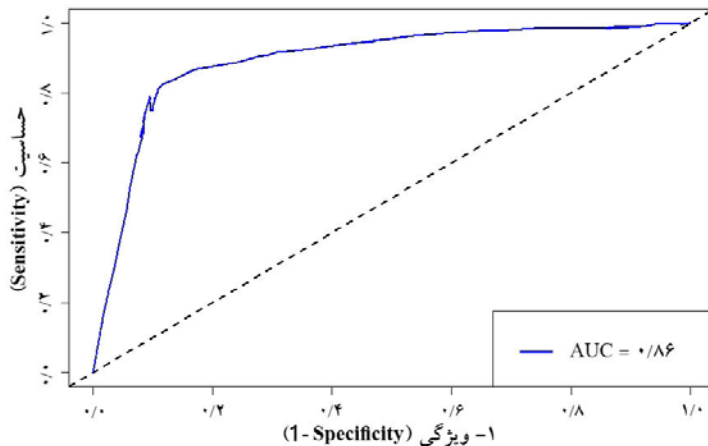
نتایج

به‌منظور اجرای مدل جنگل تصادفی از نرم‌افزار R و بسته randomForest استفاده شد. در این پژوهش از ۳۳ فرونشست ثبت شده و ۱۱ متغیر محیطی به‌منظور مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین در محدوده دشت تسوج



بوده () و با توجه به طبقه‌بندی مقادیر AUC، مدل اجروده دارای قابلیت پیش‌بینی بسیار مناسبی است.

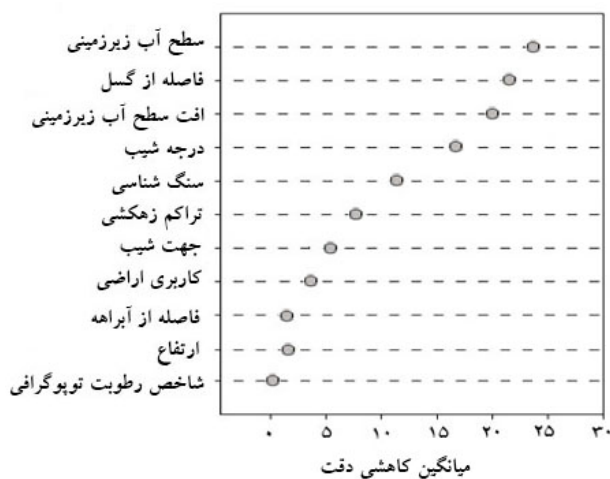
نتایج صحت سنجی مدل با استفاده از مساحت سطح زیر منحنی ROC (AUC) نشان می‌دهد که دقت مدل برابر با ۰/۸۶



شکل ۸. منحنی راک ROC و مساحت سطح زیر منحنی مربوط به صحت سنجی مدل

سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، جهت شیب، کاربری اراضی و فاصله از آبراهه به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار می‌گیرند. در نهایت عوامل ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافی کمترین تأثیر را بر وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند.

اهمیت متغیرهای استفاده‌شده در ساخت مدل بر اساس میانگین کاهش دقت در شکل ۹ نمایش داده‌شده است. بر اساس نتایج مدل، عوامل سطح آب زیرزمینی، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی تأثیر بیشتری بر پتانسیل خطر وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. عوامل درجه شیب،



شکل ۹. اهمیت متغیرها بر اساس میانگین کاهش دقت

بحث و نتیجه گیری

کاهش خطرات ناشی از وقوع فرونشست زمین نیازمند شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست و همچنین تعیین میزان اثرگذاری عوامل مختلف بر وقوع این پدیده است (۳۶). به طور کلی و در مقایسه با تکنیک‌های مبتنی بر نظرات کارشناسان و روش‌های آماری، الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های جهان واقعی عملکرد و دقت بسیار مناسب‌تری دارند (۴۱)، از این رو در این مطالعه با بهره‌گیری از مدل جنگل تصادفی به تحلیل و مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست و نقش عوامل مؤثر بر آن در محدوده آبخوان حوزه آبریز دشت تسوج پرداخته شده است. در این مطالعه تعداد ۳۳ مورد فرونشست ثبت شده و یازده متغیر محیطی (ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، سطح آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی) برای مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست با الگوریتم جنگل تصادفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ارزیابی دقت مدل با استفاده از منحنی ROC و مساحت سطح زیر این منحنی نشان‌دهنده دقت بسیار مناسب مدل ($AUC=0/86$) و در نتیجه قابلیت پیش‌بینی و مدل‌سازی بسیار مناسب مدل جنگل تصادفی در مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه است. کارایی مدل جنگل تصادفی در بخش‌های مختلفی از مدل‌سازی پدیده‌ها و مخاطرات محیطی توسط محققین مختلفی گزارش داده شده است (۱۲، ۱۶، ۴۳ و ۴۸). بررسی و ارزیابی نقش متغیرهای محیطی با استفاده از روش میانگین کاهشی دقت نشان می‌دهد که عوامل سطح آب زیرزمینی، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی دارای بالاترین میزان تأثیر و عوامل ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافی کمترین تأثیر را بر خطر وقوع فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. اهمیت متغیرهای سطح آب زیرزمینی، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی بر وقوع پدیده فرونشست زمین در مطالعات مختلفی از جمله مطالعات؛ امیر احمدی و همکاران (۱)، رهنما و میراثی (۴)، شادفر و

همکاران (۵)، بیلی و همکاران (۱۳)، پردهان و همکاران (۴۰) و رگمی و همکاران (۴۴) نیز مشاهده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بیش از ۸۵ درصد فرونشست‌های ثبت شده در مناطقی با ارتفاع بین ۱۰۳۵ تا ۱۰۹۰ متر رخ داده‌اند، در این زمینه تعدادی از محققین بر این باورند که وقوع فرونشست در یک حوزه آبریز همواره در ارتفاعی مشخص رخ می‌دهد (۵ و ۱۹). همچنین بیشتر فرونشست‌های ثبت شده در مناطق با شیب بین ۱ تا ۹ درجه هستند، در حالی که تعداد بسیار اندکی از فرونشست‌ها در مناطق با شیب بیشتر از ۱۰ درجه وجود دارند. به طور کلی وقوع فرونشست در شیب‌های شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوب و جنوب غربی محتمل‌تر است که این موضوع در تحقیقات پردهان و همکاران (۴۰) نیز مشاهده شده است. نقشه خطرپذیری وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که ۱۸ درصد از منطقه در پهنه‌های پرخطر و ۱۱ درصد از منطقه در پهنه‌های بسیار پرخطر قرار دارند که نشان‌دهنده وضعیت بحرانی منطقه است. به طور کلی در این منطقه استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، تغییرات اقلیمی، خشک‌سالی و احداث چاه‌های کشاورزی جدید که سبب عدم تغذیه کافی آبخوان و عدم جبران مازاد برداشت آب زیرزمینی شده، منجر به بروز مشکلات مختلفی گردیده و شرایط را برای افزایش تعداد وقوع و همچنین گسترش فرونشست زمین فراهم آورده است؛ بنابراین تغذیه آبخوان و حفظ تراز آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از راهکارهای عملیاتی برای کنترل پدیده فرونشست در محدوده آبخوان حوزه آبریز تسوج مطرح می‌گردد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای مناسب برای برنامه‌ریزان و مدیران در طرح‌ریزی و اجرای برنامه‌های مختلف برای کاهش خطرات مرتبط با وقوع فرونشست زمین و انجام عملیات پیشگیری از وقوع مورد استفاده قرار گیرد. نگارندگان بر این باورند که در تحقیقات آینده، استفاده و مقایسه نتایج روش‌های دیگر یادگیری ماشینی از جمله روش‌های؛ ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی تلفیقی و حداکثر بی‌نظمی در مدل‌سازی خطر

توسعه مدل‌های هوش مصنوعی مرکب در برآورد قابلیت انتقال آبخوان، مطالعه موردی: دشت تسوج. تحقیقات منابع آب ایران، ۹(۱): ۱-۱۴.

۱۰. ندیری، ع.، ا. اصغری مقدم، ه. عبقری، ع. کلاتنری اسکویی، ع. حسین پور و ا. حبیب زاده. ۱۳۹۳. مدل منطق فازی در تخمین قابلیت انتقال آبخوان‌ها مطالعه موردی: دشت تسوج. نشریه دانش آب‌وخاک، ۲۴(۱): ۲۰۹-۲۲۳.

11. Al-Halbouni D, Holohan EP, Saberi L, Alrshdan H, Sawarieh A, Closson D, Walter TR, Dahm T. 2017. Sinkholes, subsidence and subrosion on the eastern shore of the Dead Sea as revealed by a close-range photogrammetric survey. *Geomorphology*, 285: 305-324.
12. Arpaci A, Malowerschnig B, Sass O, Vacik H. 2014. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Applied Geography*, 53: 258-270.
13. Billi A, Valle A, Brilli M, Faccenna C, Funicello R. 2007. Fracture-controlled fluid circulation and dissolutional weathering in sinkhole-prone carbonate rocks from central Italy. *Journal of Structural Geology*, 29(3): 385-395.
14. Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.
15. Caramanna G, Ciotoli G, Nisio S. 2008. A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. *Natural Hazards*, 45(2): 145-172.
16. Chen W, Xie X, Wang J, Pradhan B, Hong H, Bui DT, Duan Z, Ma J. 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, 151: 147-160.
17. Choi J-K, Kim K-D, Lee S, Won J-S. 2010. Application of a fuzzy operator to susceptibility estimations of coal mine subsidence in Taebaek City, Korea. *Environmental Earth Sciences*, 59(5): 1009-1022.
18. Cutler DR, Edwards Jr TC, Beard KH, Cutler A, Hess KT, Gibson J, Lawler JJ. 2007. Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88(11): 2783-2792.
19. Day M. 1983. Doline morphology and development in Barbados. *Annals of the Association of American Geographers*, 73(2): 206-219.
20. De Waele J, Gutiérrez F, Parise M, Plan L. 2011. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology*, 134(1-2): 1-8.
21. Deverel SJ, Rojstaczer S. 1996. Subsidence of agricultural lands in the Sacramento-San Joaquin Delta, California: Role of aqueous and gaseous carbon fluxes. *Water Resources Research*, 32(8): 2359-2367.

وقوع فرونشست زمین و همچنین پایش و بررسی جامع وضعیت فرونشست‌های منطقه با بهره‌گیری از آنالیز سری‌های زمانی تصاویر راداری به‌عنوان تحقیقاتی ارزشمند مطرح خواهند شد.

منابع مورد استفاده

۱. امیراحمدی، ا.، ن. معالی اهری و ط. احمدی. ۱۳۹۲. تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۷(۴۶): ۱-۲۳.
۲. حبیب‌زاده، ا.، ش. روستایی و م. ر. نیکجو. ۱۳۹۳. ارزیابی هیدرودینامیکی و ژئومورفولوژیکی نهشته‌های کواترنری تحلیل بحران آب‌های زیرزمینی شمال دریاچه ارومیه (مطالعه موردی دشت تسوج). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۳(۲): ۱-۱۵.
۳. رضایی بنفشه، م.، ط. جلالی عنصری، م. ضرغامی و ا. اصغری مقدم. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی حوزه آبریز تسوج به روش ریزمقیاس نمایی آماری. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱(۲): ۱۰۶-۱۱۶.
۴. رهنما، ح. و س. میراثی. ۱۳۹۵. تحلیل و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر فرونشست زمین. *عمران مدرس*، ۱۶(۱): ۴۵-۵۳.
۵. شادفر، ص.، ا. نصیری، س. چیتگر و ع. احمدی. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، ناحیه مورد مطالعه (شهر بوئین‌زهره). *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*، ۱۲(۴۸): ۱۰۱-۱۱۶.
۶. قاسمی، ا.، ا. فلاح و ش. شتایی جویباری. ۱۳۹۵. ارزیابی چهار الگوریتم پیش‌بینی سطح تاج‌پوشش جنگل‌های مانگرو با استفاده از تصاویر دوربین هوایی. *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۷(۲): ۱-۱۵.
۷. قندی، ا. و ا. اصغری مقدم. ۱۳۸۴. بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی دشت تسوج. *نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران - تهران - انجمن زمین‌شناسی ایران*، دانشگاه تربیت‌معلم. ۷ تا ۹ شهریورماه، ۱-۶.
۸. ملکی، ا. و پ. رضایی. ۱۳۹۵. پیش‌بینی مکان‌های در معرض خطر فرونشست دشت کرمانشاه با استفاده از مدل فازی. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۰(۱): ۲۳۵-۲۵۱.
۹. ندیری، ع.، ا. اصغری مقدم، ه. عبقری و ا. فیجانی. ۱۳۹۲.

22. Galloway DL, Jones DR, Ingebritsen SE. 1999. Land subsidence in the United States, vol 1182. US Geological Survey, 177 p.
23. Galve JP, Gutiérrez F, Remondo J, Bonachea J, Lucha P, Cendrero A. 2009. Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*, 111(3-4): 160-172.
24. Gao Y, Alexander E, Barnes RJ. 2005. Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environmental Geology*, 47(8): 1083-1098.
25. Gutiérrez F, Parise M, De Waele J, Jourde H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138: 61-88.
26. Hosmer Jr DW, Lemeshow S, Sturdivant RX. 2013. Applied logistic regression, vol 398. John Wiley & Sons, 528 p.
27. Kim K-D, Lee S, Oh H-J. 2009. Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS. *Environmental Geology*, 58(1): 61-70.
28. Lamelas M, Marinoni O, Hoppe A, De La Riva J. 2008. Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain). *Environmental Geology*, 54(5): 963-977.
29. Lee S, Park I, Choi J-K. 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network. *Environmental Management*, 49(2): 347-358.
30. Liaw A, Wiener M. 2002. Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3): 18-22.
31. Moore ID, Grayson R, Ladson A. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1): 3-30.
32. Motagh M, Djamour Y, Walter TR, Wetzel H-U, Zschau J, Arabi S. 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2): 518-526.
33. Nicodemus KK. 2011. Letter to the editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures. *Briefings in bioinformatics*, 12(4): 369-373.
34. Oh H-J, Lee S. 2010. Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. *Engineering Geology*, 115(1-2): 36-48.
35. Pal M. 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1): 217-222.
36. Park I, Lee J, Saro L. 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Open Geosciences*, 6(2): 207-218.
37. Perrin J, Cartannaz C, Noury G, Vanoudheusden E. 2015. A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis. *Engineering Geology*, 197: 296-305.
38. Pourghasemi HR, Kerle N. 2016. Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(3): 185.
39. Pourtaghi ZS, Pourghasemi HR, Aretano R, Semeraro T. 2016. Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological Indicators*, 64: 72-84.
40. Pradhan B. 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51: 350-365.
41. Pradhan B, Abokharima MH, Jebur MN, Tehrany MS. 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural Hazards*, 73(2): 1019-1042.
42. Prasad AM, Iverson LR, Liaw A. 2006. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9(2): 181-199.
43. Rahmati O, Pourghasemi HR, Melesse AM. 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.
44. Regmi AD, Yoshida K, Nagata H, Pradhan AMS, Pradhan B, Pourghasemi HR. 2013. The relationship between geology and rock weathering on the rock instability along Mugling–Narayanghat road corridor, Central Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 66(2): 501-532.
45. Shao Y, Lunetta RS. 2012. Comparison of support vector machine, neural network, and CART algorithms for the land-cover classification using limited training data points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 70: 78-87.
46. Sharma P, Jones CE, Dudas J, Bawden GW, Deverel S. 2016. Monitoring of subsidence with UAVSAR on Sherman Island in California's Sacramento–San Joaquin Delta. *Remote Sensing of Environment*, 181: 218-236.
47. Taheri K, Gutiérrez F, Mohseni H, Raeisi E, Taheri M. 2015. Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude–frequency relationships: A case study in Hamadan province, Iran. *Geomorphology*, 234: 64-79.
48. Trigila A, Iadanza C, Esposito C, Scarascia-Mugnozza G. 2015. Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 249: 119-136.



Land subsidence susceptibility modeling using random forest approach (Case study: Tasuj plane catchment)

D. Mokhtari ¹, H. Ebrahimi ^{2*}, S. Salmani ³

1. Prof. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University

2. PhD Student of Remote Sensing and Geographical Information System, Shahid Beheshti University

3. MSc. Graduated of Remote Sensing and Geographical Information System, University of Tabriz

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 October 2017

Accepted 30 September 2019

Available online 17 October 2019

Keywords:

Land subsidence

Groundwater level

Random forest algorithm

Tasuj plane

ABSTRACT

Land subsidence occurrence in the Tasuj plane might become more frequent and hazardous in the near future due to its relationship with the water crisis and drought periods. In order to mitigate the damage caused by land subsidence, it is necessary to determine the susceptible or prone areas. The purpose of this study is to produce land subsidence susceptibility map based on the random forest approach to land subsidence occurrence data and eleven environmental variables that have significant influence on land subsidence occurrences (altitude, slope, aspect, distance to drainage line, drainage density, distance from the fault, topographic wetness index, land cover, lithology, groundwater level and decline in groundwater level) were used as inputs of the random forest model. The random forest approach was applied to produce the land subsidence susceptibility map. The performance of the model was assessed using the receiver operating characteristics (ROC) curve and the area under the curve (AUC). The model results indicate the accuracy of 0.86. Based on the result of the mean decrease accuracy method, the most important conditioning factors were groundwater level, distance from the fault, and a decline in groundwater level, respectively. According to the result, about 18% and 11% of the study area was located within high to very high susceptibility classes. The result of this study can be used by stakeholders and local authorities to mitigate related hazards of land subsidence occurrences in the study area.

* Corresponding author e-mail address: hamdebrahimi@gmail.com