



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پژوهش‌های آب‌نخرداری

شاپا: ۲۹۸۱-۲۰۳۸



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

شناسایی مناطق مستعد به خطر فرونشست و عامل‌های مؤثر بر آن با استفاده از مدل‌های GLM و Cforest در دشت کردی شیرازی

راضیه صیحانی‌پرشکوه^۱، حمید غلامی^{۲*}، یحیی اسماعیل‌پور^۳، علیرضا کمالی^۴، مریم زارع‌رشکوئیه^۵

۱- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیز (حفاظت آب و خاک) گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و

منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴- کارشناس اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۵- کارشناس شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

در طول چند دهه گذشته، فرونشست به یک معضل بزرگ در مقیاس جهانی تبدیل شده است. با توجه به افزایش این پدیده در کشور، پیش‌بینی و مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین و شناسایی مناطق مستعد فرونشست برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی آن ضروری است. با توجه به تهدیدها و آثار ویران‌گر فرونشست زمین بر منابع آب و خاک، مدیریت این پدیده و جلوگیری از گسترش آن موضوع مهمی در توسعه پایدار کشور به‌شمار می‌آید. بررسی فرونشست برای به‌دست آوردن بینش، شناسایی شکاف‌های پژوهشی، بهبود روش‌شناسی، و اطمینان از اینکه نتایج پژوهش‌های جدید به پایگاه دانش موجود کمک می‌کند، ضروری است. در این راستا، دشت کردی شیرازی به‌دلیل وجود ذخیره‌گاه جنگلی مورکردی، تنوع زیستی و همچنین جایگاه کشاورزی در آن، اهمیت زیادی دارد و با توجه به اینکه فرونشست در این منطقه در حال گسترش است، شناسایی مناطق مستعد خطر فرونشست برای مقابله با این پدیده و کاهش خسارت‌های ناشی از آن ضروری است.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: hgholami@hormozgan.ac.ir

استناد: صیحانی‌پرشکوه، ر.، غلامی، ح.، اسماعیل‌پور، ی.، کمالی، ع.ر.، زارع‌رشکوئیه، م. ۱۴۰۴. شناسایی مناطق مستعد به خطر فرونشست و عامل‌های مؤثر بر آن با استفاده از مدل‌های GLM و Cforest در دشت کردی شیرازی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۸(۳): ۴۰-۵۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.367937.1608

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۴۸، پاییز ۱۴۰۴، صفحه‌های ۴۰ تا ۵۶.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل مکانی برای خطر فرونشست با استفاده از مدل یادگیری ماشین GLM در منطقه مطالعه شده بود. از این رو، در این پژوهش، برای اولین بار یک مدل یادگیری ماشین برای شناسایی مناطق مستعد به خطر فرونشست زمین در دشت کردی شیرازی به کار گرفته شد. همچنین، سهم و اهمیت نسبی عامل های گوناگون مهارکننده فرونشست با استفاده از مدل یادگیری ماشین Cforest به شکل کمی تعیین شد.

مواد و روش ها

در این پژوهش برای تهیه نقشه خطر فرونشست زمین در منطقه مطالعه شده، ابتدا پایگاه داده های مربوط به عامل های مهارکننده این پدیده تهیه شد. در این راستا، نقشه موجود از فرونشست در منطقه با انجام بازدید های میدانی و جمع آوری داده های مربوط به بودن یا نبودن فرونشست در محیط ArcGIS تهیه شد. بعد از شناسایی مهم ترین عامل های مهارکننده فرونشست، رابطه میان متغیر های مؤثر و نقاط فرونشست و بدون آن با مدل یادگیری ماشین GLM بررسی شد. خروجی مدل پیش بینی در پنج طبقه خطر فرونشست (۰ تا ۱) شامل خطر خیلی کم (۰/۲-)، کم (۰/۴-۰/۲)، متوسط (۰/۶-۰/۴)، زیاد (۰/۸-۰/۶) و خیلی زیاد (۱-۰/۸) طبقه بندی شد و به شکل نقشه خطر فرونشست ارائه شد. مدل یادگیری ماشین Cforest یکی از بهترین مدل ها برای تعیین اهمیت متغیر های مهارکننده مخاطرات گوناگون به ویژه فرونشست است. اندازه کارایی این مدل در مقایسه با دیگر مدل ها بیشتر و خطای آن کمتر است. از این رو، از مدل Cforest برای تعیین اهمیت نسبی هر یک از عامل های مؤثر و مهارکننده این پدیده استفاده شد.

نتایج و بحث

عملکرد مدل GLM در پیش بینی خطر فرونشست با استفاده از مساحت زیر منحنی راک، ارزیابی شد. مساحت زیر منحنی راک عدد ۰/۹۹ به دست آمد. این داده بیانگر عملکرد عالی مدل GLM در شناسایی نقاط فرونشست بود. بر اساس نتایج این مدل ۲۱۸۰ و ۴۴۱ هکتار از کل مساحت در طبقه های حساسیت فرونشست خیلی کم و کم بودند. از سوی دیگر، ۴۰۲، ۴۴۷ و ۱۱۱۳ هکتار از کل مساحت به ترتیب در طبقه های حساسیت فرونشست متوسط، زیاد و خیلی زیاد بودند. همچنین، ۲۴/۳٪ از کل منطقه مطالعه شده بسیار حساس به خطر فرونشست بودند. بخش های مرکزی منطقه با کاربری های کشاورزی و باغی و جنگل که در مجاورت زمین های زراعی و باغی بودند، آبخوان مشترک داشتند و خطر فرونشست زمین ها خیلی زیاد و زیاد بود. همچنین، بر پایه نتایج اهمیت نسبی متغیر ها، سه متغیر اصلی شامل کاربری زمین، سطح آب زیرزمینی و افت آب زیرزمینی، از مهم ترین متغیر های مهارکننده خطر فرونشست در منطقه مطالعه شده بودند. نتایج بررسی متغیر های مهارکننده خطر فرونشست زمین برای اولین بار نشان داد که این پدیده می تواند تهدیدی جدی برای زمین های جنگلی به ویژه جنگل های مناطق خشک و نیمه خشک باشد.

نتیجه گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج به دست آمده حساسیت به خطر فرونشست زمین در بخش های مرکزی منطقه (کاربری های کشاورزی و باغی و کاربری جنگل در مجاورت زمین های زراعی و باغی)، خیلی زیاد و زیاد بود. نتایج بررسی متغیر های مهارکننده خطر فرونشست در منطقه مطالعه شده نشان داد دلیل افزایش بهره برداری از آب های زیرزمینی، توسعه فعالیت های زراعی و باغی در دشت کردی شیرازی بود. از این رو، به منظور کاهش اثرات منفی فرونشست زمین، پیشنهاد می شود از انجام فعالیت هایی که سبب افزایش بهره برداری منابع آب زیرزمینی شده اند، جلوگیری شود. همچنین پیشنهاد می شود فعالیت های آبخیزداری (بخش سیلاب) در بالادست منطقه مطالعه شده به منظور تغذیه آبخوان منطقه انجام شود.

واژگان کلیدی

اهمیت نسبی، پیش بینی، کردی شیرازی، مدل سازی مکانی، یادگیری ماشین

مقدمه

فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین است که بردار جابجایی افقی آن اندک است (بیت و جکسون ۱۹۸۰). به دلیل ماهیت تدریجی فرونشست زمین، این پدیده را زلزله خاموش نیز می‌نامند. اثرات منفی آن در یک دوره بلندمدت ظاهر می‌شود و خطرات قابل توجهی به همراه دارد. با این حال، فرونشست زمین یک تهدید جدی در سراسر جهان است (سان و همکاران ۲۰۲۳). فرونشست، یک پدیده پیچیده زمین‌شناسی است که تحت تأثیر عامل‌های مختلفی مانند فرآیندهای طبیعی، فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب و هوایی است. محققان با استفاده از نتایج بررسی‌ها می‌توانند به درک جامعی از دانش، نظریه‌ها و یافته‌های موجود در رابطه با فرونشست دست یابند (ساهو و راوات ۲۰۲۳). برداشت نامناسب آب زیرزمینی و عامل‌های زمین شناسی و گسل‌ها در رخداد فرونشست بسیار مؤثرند (تزامپوگلو و لوپاساکیس ۲۰۱۷). بسیاری از فرونشست‌های زمین در سطح دنیا به دلایل مختلفی مانند استخراج معادن، انحلال سنگ آهک، استخراج آب‌های زیرزمینی، گاز طبیعی و زلزله رخ داده است (فیاشی و همکاران ۲۰۱۷). در سرتاسر جهان، بیشترین فرونشست در مناطقی با بیشترین تقاضای آب و تراکم چاه‌های آب زیرزمینی رخ داده است (جین و همکاران ۲۰۱۹). در گذشته بیش از ۱۵۰ ناحیه در جهان شامل مکزیک، تایلند، چین، ایتالیا، ژاپن و آمریکا از این پدیده زیان دیده‌اند (ژو و اساکي ۲۰۰۳). اثرات فرونشست زمین به چهار دسته شامل زیرساخت (ترک خوردگی جاده‌ها و ساخت و سازها، شکستن خطوط لوله انرژی زیرزمینی و غیره)، اقتصادی (افزایش هزینه نگهداری زیرساخت‌ها، کاهش زمین، تأسیسات و ساختمان‌های متروکه)، زیست محیطی (انحراف رودها و سامانه‌های زهکشی، سیل پایپی سواحل و کاهش کیفیت محیط زیست)، و اجتماعی (بدتر شدن وضعیت زندگی و اختلال در فعالیت‌های اجتماعی) تقسیم می‌شود (حسیبوان و همکاران ۲۰۲۳). به طور کلی انجام یک پژوهش موفق در

زمینه فرونشست زمین با ادغام چندین عامل مرتبط زیست محیطی همراه است (لی و پارک ۲۰۱۲). بنابراین، یک پایگاه داده‌های جغرافیایی در مدل‌سازی فرونشست زمین باید انواع مختلفی از اطلاعات موضوعی مانند عامل‌های زمین‌آب‌شناختی را در بر گیرد (پارک و همکاران ۲۰۱۲). با شناسایی مناطق آسیب‌پذیر، اجرای اقدامات کاهشی و ترویج شیوه‌های مدیریت پایدار زمین، می‌توان اثرات نامطلوب فرونشست زمین را به حداقل رساند و از پایداری بلندمدت و تاب‌آوری مناطق آسیب‌دیده اطمینان پیدا کرد (ساهو و راوات ۲۰۲۳). کشور ایران با داشتن اقلیم خشک و نیمه‌خشک از یک سو و فشار بر منابع آب زیرزمینی برای توسعه کشاورزی از سوی دیگر، در شرایط پرشماری دچار فرونشست زمین شده است. عامل‌های ترکیبی چهار برابر شدن جمعیت کشور ایران در شش دهه گذشته، صنعتی شدن سریع و کشاورزی گسترده سبب فشار زیادی بر منابع آبی ایران شده است. برای برآورده ساختن تقاضاهای فزاینده، استخراج ناپایدار آب‌های زیرزمینی به یک موضوع عادی تبدیل شده است که منجر به یک مسیر دردرساز و از بین رفتن منابع می‌شود (مدنی و همکاران ۲۰۱۶). رخداد این پدیده در دشت‌های استان‌های مختلف کشور (مانند استان فارس، هرمزگان، خراسان، همدان، کرمان، چهارمحال بختیاری...) گزارش شده است. اکثر مناطق فرونشست در دشت‌های ممنوعه و ممنوعه بحرانی از نظر وضعیت سطح آب زیرزمینی رخ داده است (امیغی و عربی ۲۰۲۳). پژوهش‌های پرشماری در زمینه فرونشست در سطح دنیا انجام شده است. شیرانی و همکاران (۲۰۲۱) فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان را با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد دقت مکانی و کیفیت داده‌های راداری سنجنده پالسر در پردازش با روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مناسب‌تر بود. در پژوهشی کیائو و همکاران (۲۰۲۴)، نقش فرونشست مناطق ساحلی را با استفاده از روش تداخل‌سنجی

مواد و روش ها

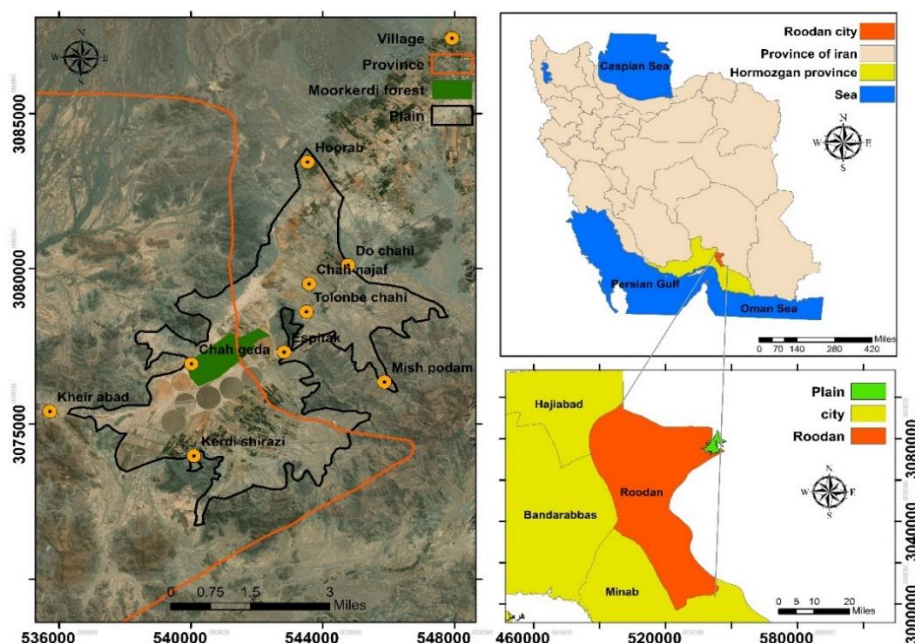
معرفی منطقه مطالعه شده

دشت کردی شیرازی در بخش رود از توابع شهرستان رودان و در درون آبخیز نازدشت در شمال شرقی استان هرمزگان با مساحت ۴۵۸۳/۸۷۲ هکتار و میان ۵۷°۲۱'۰۶" تا ۵۷°۲۹'۰۶" طول شرقی و ۴۶°۰۹'۰۹" تا ۲۷°۵۲'۴۲" عرض شمالی است. این دشت یکی از دشت های حاصلخیز برای کشاورزی در استان هرمزگان است. این دشت ممنوعه و بدون چشمه و رود دائمی است و بهره برداری از منابع آبی متکی بر آبخوان آزاد و آبرفتی کردی شیرازی است. در سال های گذشته توسعه کشاورزی سبب برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی شده است. همچنین، خشک سالی های کنونی و پایین رفتن سطح ایستابی نیز این وضعیت را تشدید کرده است. آثار فرونشست در منطقه آشکار و قابل مشاهده است. اقلیم منطقه مطالعه شده بر اساس روش آمبرژه و دومارتن به ترتیب بیابانی گرم شدید و خشک بیابانی گرم است. میانگین بارندگی سالانه ۱۹۲/۲ میلی متر و میانگین دمای سالانه ۲۵/۵ درجه سانتی گراد است. اندازه میانگین رطوبت نسبی بر اساس ایستگاه همدید کهنوج ۳۹٪ است و بیشترین رطوبت نسبی منطقه مطالعه شده مربوط به آذر، دی و بهمن ماه و کمترین آن مربوط به فروردین، اردیبهشت و خرداد ماه است. میانگین سالانه سرعت باد در این ایستگاه حدود ۶/۱ نات است. از دیدگاه زمینشناسی دشت کردی شیرازی در بخش غربی زون مکران است و بخشی از مجموعه بچگان به شمار می آید و بخشی از یک توالی گسترده سنگ های دگرگونی با منشأ رسوبی یا آذرین است. تشکیلات و واحدهای موجود در منطقه مطالعه شده، از قدیم به جدید شامل سنگ ها و رخساره های رسوبی متعلق به پالئوزوئیک تا کواترنر است. وضعیت گونه جنگلی منطقه از دیدگاه بوم گردی و طبیعت گردی یک ذخیره گاه جنگلی حفاظت شده با نام مورکردی است که از اواسط بهمن ماه تا اواسط فروردین ماه پذیرای گردشگران بومی و دیگر گردشگران است. ذخیره گاه جنگلی مورکردی در دشت کردی شیرازی شامل

راداری و یادگیری ماشین تفسیر کردند و از ۹ ویژگی بالقوه شامل تغییرات طبیعی زمین تا فعالیت های انسانی برای مدل سازی VLM استفاده کردند. این ویژگی ها برای آموزش مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF) استفاده شد. سو و همکاران (۲۰۲۴)، افزایش قابلیت های پیش بینی فرونشست زمین را با استفاده از یادگیری ماشین و تحلیل ارزش SHAP با داده های تداخل سنجی راداری سنتینل ۱، بررسی کردند و به این منظور از شبکه های عصبی و اندازه های SHAP برای پیش بینی فرونشست زمین استفاده کردند. رحمانی و همکاران (۲۰۲۴)، از یک مدل یادگیری عمیق قابل تفسیر برای رسم خطر فرونشست استفاده کردند. آنها برای تفسیرپذیری خروجی مدل یادگیری عمیق (DL)، به منظور رسم حساسیت زمین به خطر فرونشست از روش های مختلف استفاده کردند. با بررسی نتایج پژوهش های پیشین محققان می توانند شکاف های دانش و زمینه هایی را که نیاز به بررسی بیشتر دارند را شناسایی کنند. همچنین محققان قادر خواهند بود تا روش ها و مدل های به کار گرفته شده در پژوهش های پیشین را ارزیابی کنند. افزون بر این، می توان با شناسایی هرگونه محدودیت یا چالشی که محققان پیشین با آن مواجه بودند، امکان بهبود و نوآوری در پژوهش های آتی را فراهم کرد. از سوی دیگر، برای پژوهشگران فرصتی فراهم می شود تا روندها و الگوهای پژوهش های نوظهور فرونشست را در طول زمان تجزیه و تحلیل کنند (ساهو و راوات، ۲۰۲۳). این پژوهش در دشت کردی شیرازی در آبخیز نازدشت با یک ذخیره گاه جنگلی از گونه های بومی کنار و کهور اجرا شد. هدف این پژوهش، شناسایی عامل های مهارکننده خطر فرونشست و تهیه نقشه آن با داده های اندک خطر فرونشست بود. در این راستا، از مدل GLM به دلیل قابلیت زیاد در مدل سازی پدیده های مکانی استفاده شد. یکی از نوآوری های مهم در این پژوهش، تولید و تهیه پایگاه داده با قدرت تفکیک پذیری زیاد (با مدل طبقات ارتفاعی ۱۰ متر) در منطقه ای با داده های اندک، بود.

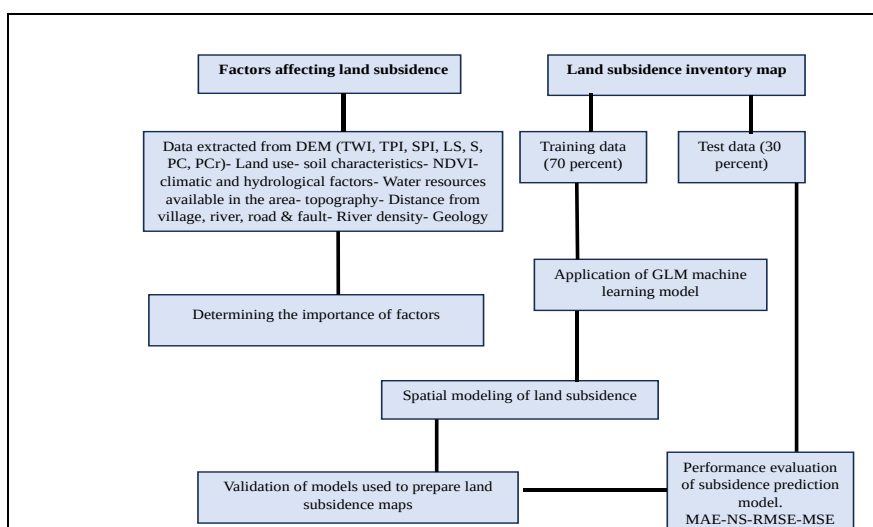
موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده در استان هرمزگان و ایران و روندنمای پژوهش به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

گونه‌های درختی کهور ایرانی و کنار است. در سال‌های گذشته آثار فرونشست زمین در درون جنگل و زمین‌های کشاورزی پیرامون آن مشاهده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده در استان هرمزگان و ایران.

Figure 1- Geographical location of the study area in the Hormozgan Province and Iran.



شکل ۲- روندنمای پژوهش.

Figure 2- Research flowchart.

داده‌های لازم

داده‌های تهیه‌شده شامل: ۱- گروه داده‌های به‌دست آمده از نقشه DEM (شامل شاخص رطوبت پستی‌بلندی، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص طول شیب، نقشه شیب، نقشه انحناء، نقشه انحنای سطح، نقشه انحناء نیم‌رخ)، ۲- داده‌های به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای (شامل شاخص NDVI)، ۳- داده‌های اقلیمی ۴- داده‌های منابع آب موجود در منطقه (شامل فاصله از چاه‌های بهره‌برداری، سطح آب زیرزمینی، افت سالانه آب زیرزمینی)، ۵- نقشه‌ها و داده‌های به‌دست آمده از نقشه‌ها (شامل زمین‌شناسی، کاربری زمین و پوشش گیاهی، آبراهه‌ها، فاصله از رود، تراکم رود، فاصله از آبادی و مناطق مسکونی، فاصله از جاده‌ها و راه‌ها، فاصله از گسل) بودند.

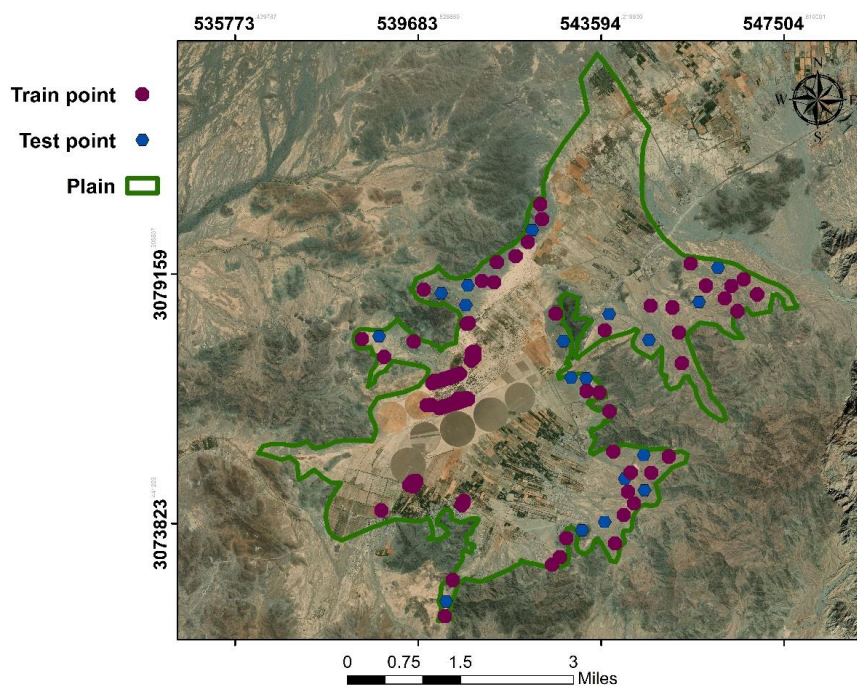
جدول ۱-تهیه پایگاه داده برای منطقه مطالعه‌شده.

Table 1- Database preparation for the studied area.

data type	Variable	Spatial accuracy and scale	Source of supply
Data extracted from DEM	Topographic Humidity Index (TWI)	10 meters	The writers
	Topographic Position Index (TPI)		
	Waterway Strength Index (SPI)		
	Slope Length Index (LS)		
	Slope Map (S)		
	Curvature map		
	Plan Curvature Map (PC)		
Data extracted from satellite images	NDVI index	10 meters	Download from the site www.EarthExplorer.usgs.gov
	precipitation	10 meters	Download from the site www.worldclim.org
Climate data			
Water resources available in the area	Distance from pumping wells	10 meters	The writers
	Groundwater level		
	groundwater drawdown		
	Distance from the river		
Data extracted from maps	River density	10 meters	The writers
	Distance from settlements and residential areas		
	Distance from roads and paths		
	Distance from the fault		
	Geology	1/250000	Geological Organization
	land use	1/25000	Natural Resources and Watershed Organization
	Vegetation	1/100000	

نقشه نقاط فرونشست زمین

تهیه نقشه نقاط فرونشست یکی از گام‌های مهم در مدل‌سازی مکانی فرونشست است. از این‌رو، تمام پهنه منطقه بازدید و پایش شد. همچنین، تمام نقاطی که فرونشست داشتند و یا در حال شروع رخداد فرونشست بودند با GPS برداشت شدند. سپس، این نقاط به‌عنوان نقاط موجودی وارد GIS شدند. به‌منظور ساخت مدل‌های پیش‌بینی خطر فرونشست، باید رابطه‌ای میان متغیرها و موجودی فرونشست ایجاد می‌شد. از این‌رو، نقشه نقاط فرونشست، به‌وسیله بازدیدهای میدانی از ۴۵۷ نقطه (شامل نقاط با فرونشست و بدون فرونشست) در سطح آبخیز نازدشت که دشت کردی شیرازی در آن است، تهیه شد. سپس، ۷۰٪ نقاط (۳۲۰ نقطه) در مرحله آموزش و ۳۰٪ آنها (۱۳۷ نقطه) در مرحله ارزیابی و آزمایش مدل استفاده شد.



شکل ۳- نقشه نقاط فرونشست زمین.

Figure 3- Map of subsidence inventory.



شکل ۴- نمونه‌هایی از فرونشست مشاهده شده در منطقه مطالعه شده.

Figure 4- Examples of LS observed in the studied area.

Y : بردار مشاهده $N \times 1$ ، ϵ : بردار $N \times 1$ خطاها، X : ماتریس $N \times M$ ، θ : بردار $M \times 1$ متغیرهایی است که مشاهده‌های Y را بیان می‌کنند، است. با یک اندازه‌گیری بیشینه احتمال مبتنی بر فرض گوسیانیته، θ با استفاده از رابطه ۲ برآورد می‌شود (گوریز و همکاران ۲۰۲۲).

$$\hat{\theta} = (X^T C_{\epsilon}^{-1} X)^{-1} X^T C_{\epsilon}^{-1} y \quad (2)$$

C_{ϵ} : ماتریس کوواریانس خطا است.

ارزیابی عملکرد مدل پیش‌بینی فرونشست

به‌منظور ارزیابی عملکرد دقت مدل GLM در پیش‌بینی خطر فرونشست زمین از AUC^۲ یا مساحت زیر منحنی راک^۳ استفاده شد. منحنی راک^۴ یک نمودار گرافیکی و یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی است که می‌تواند مبنایی برای مقایسه و بررسی عملکرد هر مدل طبقه‌بندی باشد. این منحنی نشان می‌دهد که یک مدل طبقه‌بندی چقدر می‌تواند به‌طور مؤثر میان طبقه‌های مختلف تمایز ایجاد کند. یعنی مساحت زیر منحنی راک، یک معیار عددی میان صفر تا یک است که عملکرد کلی یک مدل را ارزیابی می‌کند و نشان‌دهنده دقت و توانایی تفکیک‌پذیری مدل است. منحنی راک با رسم نسبت نرخ مثبت صحیح TPR^۵ برابر نرخ مثبت کاذب FPR^۶ ایجاد می‌شود. در این منحنی TPR روی محور عمودی به‌عنوان حساسیت^۷ و نشان‌دهنده نسبت موردهای مثبت است که به‌درستی شناسایی شده‌اند و FPR به‌عنوان احتمال دریافت خطای کاذب روی محور افقی به‌عنوان ویژگی^۸ است. هر چه منحنی راک بالاتر از خط نیم‌ساز باشد در این ناحیه نقاطی هستند که اندازه حساسیت یا نرخ مثبت صحیح آن‌ها نسبت به نرخ مثبت کاذب بیشتر است و عملکرد روش به‌کارگرفته شده مناسب‌تر

مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)^۱

GLM یک مدل توسعه‌یافته از وایازی خطی است که به‌وسیله آن می‌توان مجموعه داده‌های خطی و غیرخطی را برای تجزیه و تحلیل وایازی مدیریت کرد. GLM یک مدل ساده است که به‌طور گسترده برای اهداف پیش‌بینی در زمینه‌های زیست محیطی استفاده می‌شود (مالیک و همکاران ۲۰۲۳). در این مدل از وایازی چندمتغیره برای توضیح متغیرهای شرطی به‌عنوان تابعی از وجود یا نبودن متغیرهای فرونشست زمین استفاده می‌شود (مطلق و همکاران ۲۰۲۳). این مدل برای تهیه یک چهارچوب وایازی برای توزیع‌های ناپهنجار ارائه‌شده است (پین ۲۰۱۲). این مدل از سه بخش شامل (۱) توزیع احتمال برای متغیرهای پاسخ، (۲) پیش‌بینی‌کننده خطی و (۳) تابع ارتباطی برای برقراری ارتباط میان پیش‌بینی‌کننده خطی و میانگین توزیع عملکرد، تشکیل‌شده است (نیکیتا ۲۰۱۴). متغیرها در مدل GLM ممکن است پیوسته، گسسته و یا ترکیبی از هر دو باشند. GLM یک نوع وایازی لجستیک را برای طبقه‌بندی اهداف باینری و وایازی خطی در راستای اهداف پیوسته، پیاده‌سازی می‌کند. طبقه‌بندی GLM از مرزهای اعتماد برای احتمالات پیش‌بینی پشتیبانی می‌کند. GLM یک مدل سنج‌های از بسط مدل‌های خطی است. در مدل خطی تعمیم‌یافته فرمول ارائه می‌شود. سپس، رابطه میان متغیرهای تبیینی و پاسخ به‌وسیله سنج برآوردشده وایازی به اضافه فاصله‌های اطمینان سنجش می‌شود. مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برای شرایطی که مشاهده‌ها به‌شکل بهنجار توزیع‌نیافته بودند و زمانی که دیگر روش‌های مدل وایازی مناسب نبودند، ابداع شدند. عملکرد این مدل در میان روش‌های مدل‌سازی خوب است. برای یک سطح مشاهده منفرد، GLM به‌شکل رابطه ۱ است (فریستون و همکاران ۲۰۰۲).

$$y = X\theta + \epsilon \quad (1)$$

2 Area Under the Curve

3 Receiver Operating Characteristics

4 ROC Curve

5 True Positive Rate

6 False Positive Rate

7 Sensitivity

8 Specificity

1 Generalized Linear Models

بستگی دارد. درخت تصمیم روش کارآمدی برای انواع مختلفی از وظایف یادگیری ماشین به‌شمار می‌آید (هاستی و همکاران ۲۰۰۹).

نتایج و بحث

نقشه خطر فرونشست با استفاده از مدل GLM

نقشه پیش‌بینی خطر فرونشست زمین در منطقه مطالعه‌شده با استفاده از مدل GLM تهیه شد و در پنج طبقه خطر فرونشست (۰ تا ۱) شامل خطر خیلی کم (۰-۰/۲)، کم (۰/۲-۰/۴)، متوسط (۰/۴-۰/۶) و زیاد (۰/۶-۰/۸) و خیلی زیاد (۰/۸-۱) طبقه‌بندی شد و به‌شکل نقشه خطر فرونشست ارائه شد.

بر پایه نتایج این پژوهش، طبقه‌های خطر فرونشست متوسط تا خیلی زیاد در منطقه مطالعه‌شده مربوط به بخش‌های مرکزی آبخیز بود. این یافته نشان‌دهنده حساسیت زیاد زمین‌های کشاورزی، باغی و جنگل به خطر فرونشست بود. همچنین، حساسیت بخش‌های شرقی و غربی منطقه به خطر فرونشست خیلی کم بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این مدل ۲۱۸۰ و ۴۴۱ هکتار از کل مساحت در طبقه‌های حساسیت فرونشست بسیار کم و کم بودند. در حالی که ۴۰۲، ۴۴۷ و ۱۱۱۳ هکتار از کل مساحت به‌ترتیب در طبقه‌های حساسیت فرونشست متوسط، زیاد و بسیار زیاد بودند. همچنین، حساسیت ۲۴/۳٪ از کل منطقه مطالعه‌شده به خطر فرونشست بسیار زیاد بود.

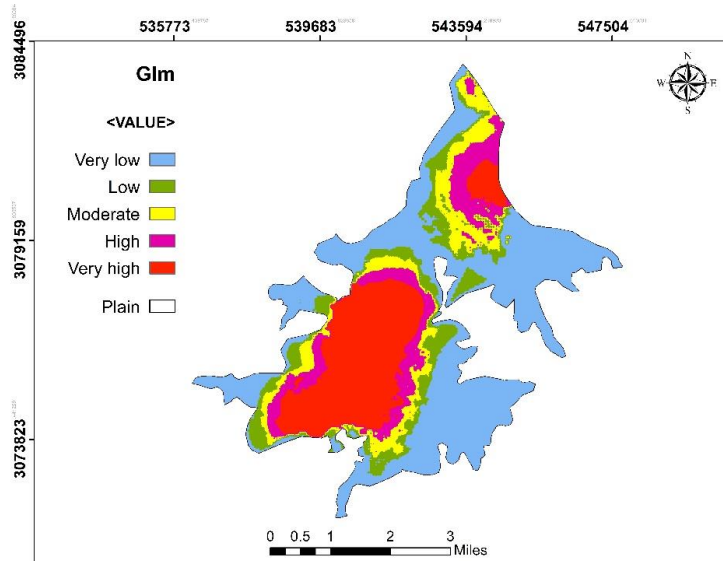
است. از سوی دیگر، نتایج روش برای استفاده مد نظر مطمئن‌تر خواهد بود. هنگامی که منحنی راک روی خط نیم‌ساز باشد، عملکرد روش به‌کارگرفته شده مناسب نیست و نتایج این روش مطمئن نخواهد بود. هنگامی که منحنی راک زیر خط نیم‌ساز باشد، عملکرد روش بسیار نامناسب است و نتایج این روش مطمئن نخواهد بود. به‌طور کلی، عملکرد یک مدل با داشتن AUC نزدیک به ۱ در شناسایی و تفکیک پذیری طبقه‌ها عالی است. در حالی که AUC نزدیک به صفر نشان‌دهنده عملکرد ضعیف و ناتوان بودن مدل در تفکیک طبقه‌ها است. اگر اندازه AUC برابر با ۰/۵ باشد، یعنی مدل هیچ‌گونه قابلیت جداسازی میان طبقه‌ها را ندارد و عملکرد آن به‌طور تصادفی است.

تعیین سهم عامل‌ها با استفاده از مدل جنگل تصادفی شرطی^۹

مدل Cforest یک نسخه به‌روز شده از مدل جنگل تصادفی است. این مدل مجموعه‌ای از درختان مختلف است (هورتن و همکاران ۲۰۰۶). در این مدل، درخت بر اساس نمونه‌ای از بوت استرپ ساخته می‌شود (شیا ۲۰۰۹). افزون بر این، در این مدل از Ctree به جای درختان طبقه‌بندی و وایازی (CART) استفاده می‌شود. در طول زمان برازش Ctree، توزیع شرطی میان ویژگی‌های پاسخ و پیش‌بینی اندازه‌گیری شده است (عرب‌عامری ب ۲۰۲۱). مدل Cforest یک روش یادگیری ترکیبی برای دسته‌بندی و وایازی است که بر اساس ساختاری متشکل از شمار بسیاری درخت تصمیم، روی زمان آموزش و خروجی طبقه‌ها (طبقه‌بندی) یا برای پیش‌بینی‌های هر درخت به‌شکل مجزا، کار می‌کند. جنگل‌های تصادفی برای درختان تصمیم که در مجموعه آموزشی دچار بیش‌برازش می‌شوند، مناسب هستند.

عملکرد جنگل تصادفی معمولاً بهتر از درخت تصمیم است، اما این بهبود عملکرد تا حدی به نوع داده هم

^۹ Conditional Random Forests (Cforest)



شکل ۵- نقشه خطر فرونشست زمین پیش‌بینی شده با استفاده از مدل GLM.
Figure 5- Land subsidence hazard map predicted by the GLM model.

راک در جدول ۲ نشان داده شده است. عدد ۰/۹۹ بیانگر عملکرد عالی مدل در شناسایی نقاط فرونشست بود.

کارایی مدل پیش‌بینی خطر فرونشست GLM عملکرد مدل GLM برای پیش‌بینی خطر فرونشست با استفاده از مساحت زیر منحنی ROC ارزیابی شد. اندازه عددی AUC و یا همان مساحت زیر منحنی

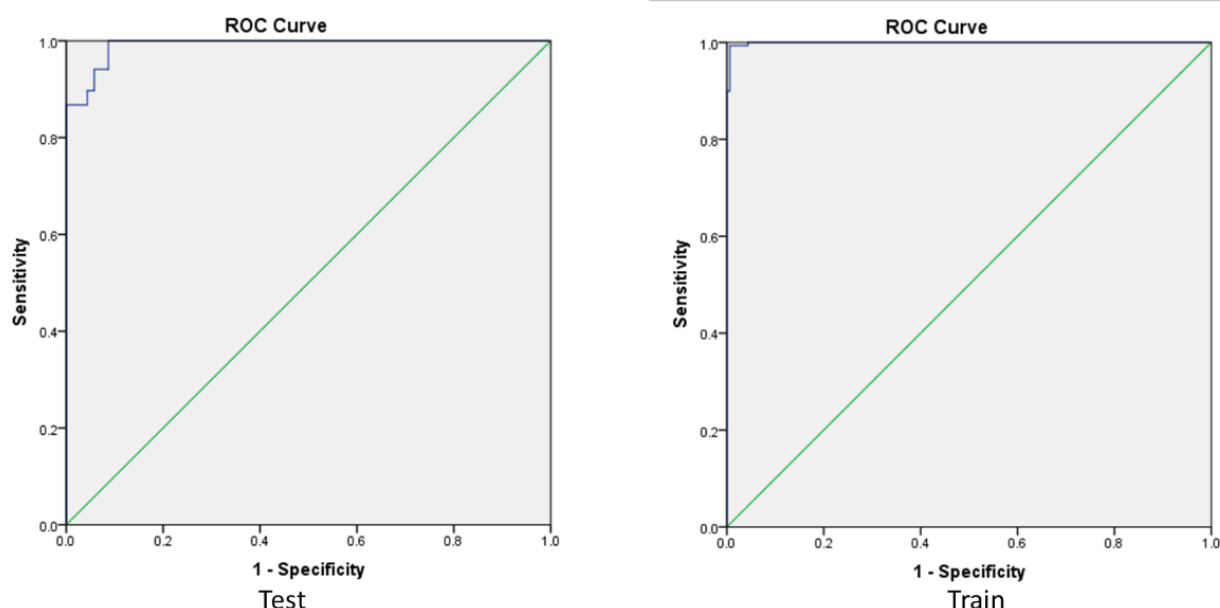
جدول ۲- نتایج مساحت زیر منحنی.

Table 2- Results of the Area Under the Curve.

Data	Area	Std. Error ^a	Asymptotic Sig. ^b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
Test	0.999	0.001	0.000	0.998	1.000
Train	0.991	0.005	0.000	0.982	1.000

a. Under the nonparametric assumption

b. Null hypothesis: true area = 0.5



شکل ۶- منحنی ROC.

Figure 6- ROC curve.

نتایج این پژوهش برای اولین بار نشان داد که خطر فرونشست تهدیدی جدی برای زمین‌های جنگلی به‌ویژه جنگل‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این منطقه، افزون بر وجود یک ذخیره‌گاه جنگلی با نام مورکردی که مساحتی حدود ۱۹۹/۷۸ هکتار از دشت را در بر می‌گیرد، کاربری غالب در منطقه زمین‌های کشاورزی و باغی بود. همچنین، مشاهده شد که رابطه میان خطر فرونشست و پوشش گیاهی مستقیم بود. به‌شکلی که اغلب نقاط فرونشست در سطح جنگل رخ داده است و با افزایش پوشش گیاهی خطر فرونشست زمین نیز افزایش یافته است. این یافته تأییدکننده نقش نوع کاربری زمین بر خطر فرونشست بود. بیشترین اندازه NDVI مربوط به کاربری‌های کشاورزی، زراعی و ذخیره‌گاه جنگلی بود. این یافته بیانگر بیشترین تخلیه آب زیرزمینی به‌وسیله چاه‌های بهره‌برداری در این کاربری‌ها بود. این موضوع تهدیدی جدی برای فرونشست زمین در منطقه است. همچنین، مسدود شدن یکی از آبراهه‌های اصلی تغذیه کننده دشت در گذشته باعث شده تا ورودی آبخوان به‌ویژه در دو دهه گذشته به دلیل افزایش خشک‌سالی

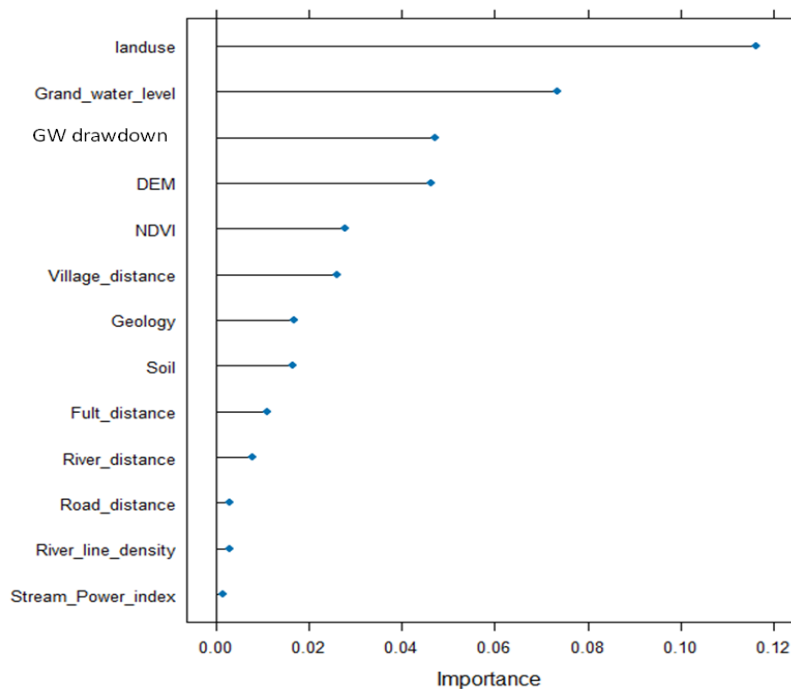
اهمیت نسبی متغیرهای مهارکننده خطر فرونشست

زمین با مدل Cforest

معیار انتخاب بهترین مدل در تعیین اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر خطر فرونشست زمین، اندازه‌های خطا و کارایی است. بر این اساس مدلی انتخاب می‌شود که خطای کمتری داشته باشد. در این پژوهش، برای تعیین اهمیت نسبی از مدل به‌روز شده جنگل تصادفی Cforest که یکی از بهترین مدل‌ها برای تعیین اهمیت متغیرهای مهارکننده مخاطره‌های مختلف به‌ویژه فرونشست است، استفاده شد. همچنین، دلیل دیگر استفاده این مدل اندازه کارایی بیشتر و خطای کمتری آن در مقایسه با دیگر مدل‌ها بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این مدل، سه متغیر کاربری زمین، سطح آب زیرزمینی و افت آب زیرزمینی به‌ترتیب مهم‌ترین متغیرها بودند. تراکم رود و شاخص SPI نیز کم اهمیت‌ترین متغیرهای مؤثر بر خطر فرونشست در منطقه مطالعه شده بودند.

بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه شده فرونشست در محدوده جنگل شده است. همچنین، نشانه‌هایی از رخداد این پدیده در محدوده زمین‌های کشاورزی و باغی مشاهده شد.

به‌شدت کاهش یابد. افزون بر این، تغییر کاربری زمین‌های مرتعی به کشاورزی و باغی منجر به افزایش است. از آنجایی که آبخوان ذخیره‌گاه جنگلی با دیگر کاربری‌های منطقه مشترک بود و شکل شیب آبخوان باعث شده بود که سطح آب زیرزمینی در محدوده جنگل به‌شدت کاهش یابد و سرانجام منجر به رخداد



شکل ۷- اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر خطر فرونشست با استفاده از مدل Cforest.

Figure 7- The relative importance of variables affecting subsidence risk using the Cforest model.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

لازم و ضروری است. در این راستا، این پژوهش با هدف بررسی و تعیین نقاط مستعد به خطر فرونشست و شناسایی عامل‌های مؤثر بر این پدیده در دشت کردی شیرازی انجام شد تا نتایج آن در راستای کاهش پیامدهای این پدیده به‌وسیله بخش‌های مرتبط بهره‌برداری شود. ابتدا پایگاه داده از متغیرهای مؤثر بر خطر فرونشست زمین به‌منظور تهیه نقشه در منطقه مطالعه شده، تهیه شد. همچنین، نقشه موجودی فرونشست با بازدیدهای میدانی و جمع‌آوری داده‌های مربوط به بودن یا نبودن فرونشست در محیط آرکمپ تهیه شد. بعد از شناسایی مهم‌ترین عامل‌های مهارکننده فرونشست، رابطه میان متغیرهای مؤثر و

در سال‌های گذشته، خطر فرونشست زمین در دنیا و ایران به‌ویژه استان هرمزگان افزایش یافته است. آثار و پیامدهای این پدیده ویران‌گر در برخی از نقاط استان هرمزگان مانند دشت میناب به‌شدت قابل مشاهده است. از این‌رو، برای اینکه دیگر دشت‌های استان که منابع مهمی برای تولید غذا هستند به این مخاطره مبتلا نشوند و از آنجایی که در دو دهه گذشته آثار فرونشست زمین در دشت کردی شیرازی که یکی از دشت‌های مهم استان هرمزگان از دیدگاه کشاورزی و باغداری و یک ذخیره‌گاه جنگلی مورک‌کردی است، مشاهده شده است، توجه جدی مسئولان در راستای کاهش پیامدهای ویران‌گر این پدیده در این منطقه

نصب کنتورهای هوشمند، آب‌دهی خروجی از چاه‌های موجود پایش و محدود شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده از بازدید میدانی به‌وسیله گروه پژوهشگران این پژوهش مشخص شد که در زمین‌های مرتعی پیرامون جنگل مورکردی که یک ذخیره‌گاه حیاتی برای گونه‌های کهور ایرانی و کنار است، به‌وسیله برخی از سودجویان دخل و تصرف غیرقانونی انجام شده است و حتی در برخی نقاط زبانه‌هایی از زمین‌های کشاورزی با آب شرب به داخل ذخیره‌گاه جنگلی کشیده شده است که در شرایط تداوم این دخل و تصرف‌ها، خطر فرونشست در ذخیره‌گاه جنگلی در آینده نزدیک افزایش خواهد یافت و گونه‌های چندین ساله و بعضاً چند صد ساله از بین خواهند رفت.

نکته مهم و تأثیرگذار بر افزایش خطر فرونشست منطقه مطالعه شده، انحراف و مسدود شدن یکی از شاخه‌های اصلی رود تغذیه‌کننده دشت کردی شیرازی در مجاورت روستای زیارت‌علی که از حدود پنج دهه پیش تا کنون است. دلیل آن نجات زمین‌های کشاورزی و حفاظت از مناطق مسکونی و روستاهای این منطقه در برابر سیلاب به‌وسیله سیل‌بند و برای تغییر مسیر سیلاب است. به این دلیل در دو دهه گذشته با انحراف این رود، از آبخوان دشت کردی شیرازی در خشک‌سالی به‌شدت بهره‌برداری شده و جریان ورودی به آن به‌شدت کاهش یافته است و در نتیجه موجب افت شدید آبخوان شده است. این موضوع یکی از دلایل اصلی افزایش فرونشست در منطقه مطالعه شده بود. از این رو، به دلیل نابودی کامل این رود و نبودن امکان احیاء دوباره آن در محدوده روستای زیارت‌علی، پیشنهاد می‌شود در بالادست روستای زیارت‌علی و آبخیز نازدشت، عملیات آبخیزداری (پخش سیلاب) به‌منظور تغذیه آبخوان کردی شیرازی انجام شود. همچنین، به دلیل وجود گونه‌های شورپسند خودرو در منطقه و ظرفیت زیاد برای استقرار این گونه‌ها، پیشنهاد می‌شود از گونه‌هایی مانند اشنان و دیگر گونه‌های بومی برای تثبیت و مهار فرونشست استفاده شود. از سوی دیگر، پیشنهاد می‌شود از تمرکز زه‌آب‌های کشاورزی در

نقاط بودن یا نبودن فرونشست به‌وسیله مدل یادگیری ماشین GLM بررسی شد. خروجی مدل پیش‌بینی در ۵ طبقه خطر فرونشست شامل خطر خیلی کم (۰/۲-۰)، کم (۰/۲-۰/۴)، متوسط (۰/۴-۰/۶)، زیاد (۰/۸-۰/۶) و خیلی زیاد (۰/۸-۱) طبقه‌بندی شد و به‌شکل نقشه خطر فرونشست ارائه شد. عملکرد مدل GLM برای پیش‌بینی خطر فرونشست با استفاده مساحت زیر منحنی ROC ارزیابی شد. اندازه عددی AUC و یا همان مساحت زیر منحنی راک عدد ۰/۹۹ به‌دست آمد که بیانگر عملکرد عالی مدل GLM در شناسایی نقاط فرونشست بود و مدل پیش‌بینی GLM مدلی با کارایی زیاد شناخته شد که می‌توان در راستای فعالیت‌های اجرایی به‌منظور کاهش پیامدهای منفی این مخاطره از آن بهره‌برداری کرد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این مدل، حساسیت به خطر فرونشست زمین در بخش‌های مرکزی منطقه (کاربری‌های کشاورزی و باغی و کاربری جنگل در مجاورت زمین‌های زراعی و باغی)، خیلی زیاد و زیاد بود. بر اساس نتایج اهمیت نسبی در منطقه مطالعه شده، مهم‌ترین متغیرهای مهارکننده خطر فرونشست زمین، سه متغیر اصلی شامل کاربری زمین، سطح آب زیرزمینی و افت آب زیرزمینی بودند. کاربری زمین به‌عنوان با اهمیت‌ترین متغیر معرفی شد و دلیل آن تخلیه آبخوان برای تقویت کاربری کشاورزی و باغی بود. از آنجایی که مدل پیش‌بینی GLM نشان داد که رخداد پدیده فرونشست در کاربری‌های کشاورزی و باغی (طبقه‌های خطر خیلی زیاد و زیاد) پیوسته است می‌توان به نقش مهم انسان به‌عنوان بهره‌بردار از منابع آب زیرزمینی در راستای افزایش سطح زیر کشت زمین‌های کشاورزی و باغی و افزایش خطر فرونشست زمین اشاره کرد. از این رو، پیشنهاد می‌شود بر بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی منطقه مطالعه شده نظارت بیشتری شود و از هر گونه ارائه جواز حفر و کف‌شکنی چاه‌های موجود خودداری شود. زیرا، در شرایط تداوم این موضوع این مخاطره افزایش و کیفیت آب زیرزمینی به‌شدت کاهش خواهد یافت. همچنین پیشنهاد می‌شود با

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندگان مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نرم‌افزار، پژوهش، تحلیل داده‌ها، نگارش
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، نگارش، نظارت، تحلیل، مفهوم‌سازی، مدیر طرح
نویسنده سوم: انجام پژوهش، نظارت
نویسنده چهارم: انجام پژوهش
نویسنده پنجم: انجام پژوهش

منطقه به‌ویژه در پیرامون جنگل مورکردی جلوگیری شود. زیرا، تمرکز آب باعث افزایش پدیده انحلال و در نتیجه افزایش پدیده فرونشست در منطقه مطالعه‌شده می‌شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از متغیرهای مهم دیگر (مانند شیب آبخوان، جهت جریان آب زیرزمینی و غیره) که بر فرونشست منطقه اثرگذارند در گام مدل‌سازی استفاده شود.

سیاس‌گذاری

از دانشگاه هرمزگان برای حمایت در اجرای این پژوهش تشکر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

فهرست منابع

- Amighpey M, Arabi S. 2023. Study of land subsidence status due to uncontrolled groundwater extraction in Iran using comprehensive subsidence map of the country. *Iranian Water Resources Research*. 19(5):145-156.
<https://doi.org/10.22034/iwrr.2023.186215>
- Arabameri A, Rezaie F, Pal SC, Cerda A, Saha A, Chakraborty R, Lee S. 2021. Modelling of piping collapses and gully headcut landforms: Evaluating topographic variables from different types of DEM. *Geoscience Frontiers*. 12(6): 101230.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101230>
- Bates RL, Jackson JA. 1980. *Glossary of Geology* (Second edition): Falls Church, Virginia. American Geological Institute. 749 p.
- Fiaschi S, Tessitore S, Boni R, Di Martire D, Achilli V, Borgstrom S, Calcaterra D. 2017. From ERS-1/2 to Sentinel-1: Two decades of subsidence monitored through A-DInSAR techniques in the Ravenna area (Italy). *GIScience and Remote Sensing*. 54(3): 305-328.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1269404>
- Friston KJ, Penny W, Phillips C, Kiebel S, Hinton G, Ashburner J. 2002. Classical and Bayesian inference in neuroimaging: theory. *Neuro Image*. 16(2): 465-483.
<https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1090>
- Gorritz JM, Martín-Clemente R, Puntonet CG, Ortiz A, Ramirez J, Suckling J. 2022. A hypothesis-driven method based on machine learning for neuroimaging data analysis. *Neurocomputing*. 510:159-171.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.001>
- Hasibuan HS, Tambunan RP, Rukmana D, Permana CT, Elizandri BN, Putra GAY, Ristya Y. 2023. Policymaking and the spatial characteristics of land subsidence in North Jakarta. *City and Environment Interactions*. Volume 18, April 2023, 100103.
<https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100103>
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman J, Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. 2009. *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction, Random forests*. Springer Series in Statistics. pp. 587-604.
- Hothorn T, Hornik K, Zeileis A. 2006. Unbiased recursive partitioning: A conditional inference framework. *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 15(3): 651-674.
<https://doi.org/10.1198/106186006X133933>
- Jeanne P, Farr Tom G, Rutqvist J, Vasco D. 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *Journal of Hydrology*. 569: 462-469.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>
- Lee S, Park I, Choi JK. 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility

- using an artificial neural network. *Environmental Management*. 49 (2): 347-358. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9766-5>
- Madani K, AghaKouchak A, Mirchi A. 2016. Iran's socio-economic drought: Challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*. 49(6): 997-1016. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286>
- Mallik S, Das S, Chakraborty A, Mishra U, Talukdar S, Bera S, Ramana GV. 2023. Prediction of non-carcinogenic health risk using Hybrid Monte Carlo-machine learning approach. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 29(3-4): 777-800. DOI:10.1080/10807039.2023.2188417
- Motlagh ZK, Derakhshani R, Sayadi MH. 2023. Groundwater vulnerability assessment in central Iran: Integration of GIS-based DRASTIC model and a machine learning approach. *Groundwater for Sustainable Development*. 23(1):101037. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101037>
- Nikita E. 2014. The use of generalized linear models and generalized estimating equations in bioarchaeological studies. *American Journal of Physical Anthropology*. 153(3):473-483. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22448>
- Park I, Choi J, Lee MJ, Lee S. 2012. Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers and Geosciences*. 48: 228-238. DOI:10.1016/j.cageo.2012.01.005
- Qiao X, Chu T, Krell E, Tissot P, Holland S, Ahmed M, Smilovsky D. 2024. Interpretation and attribution of coastal land subsidence: An InSAR and Machine Learning Perspective. *Institute of Electrical and Electronics Engineers. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 17: 4768-4783 <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3361391>
- Rahmani P, Gholami H, Golzari S. 2024. An interpretable deep learning model to map land subsidence hazard. *Environmental Science and Pollution Research*. pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32280-7>
- Sahu SR, Rawat KS. 2023. Analysis of land subsidence in coastal and urban areas by using various techniques-Literature Review. *Indonesian Journal of Geography*. 55(3): <https://doi.org/10.22146/ijg.83675>
- Shirani K, Pasandi M, Ebrahimi B. 2021. Assessment of land subsidence in the Najafabad Plain of Isfahan using differential radar interferometry (DInSAR) technique. *Journal of Water and Soil Science*. 25 (1): 105-127. <https://doi.org/10.47176/jwss.25.1.147214>
- Su H, Xu T, Xion X, Tian A. 2024. Enhancement of land subsidence prediction capabilities using machine learning and SHAP value analysis with Sentinel-1 InSAR Data. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3926697/v1>
- Sun M, Du Y, Liu Q, Feng G, Peng X, Liao C. 2023. Understanding the Spatial-Temporal Characteristics of Land Subsidence in Shenzhen under Rapid Urbanization Based on MT-InSAR. *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 16:4153-4166. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3264652>
- Tzampoglou P, Loupasakis C. 2017. Updated ground water piezometry data of the Amyntaio Sub-Basin and their effect to the manifestation of the Land Subsidence Phenomena. 11th International Hydrogeological Congress of Greece, Athens, Greece. pp. 4-6.
- Waltham AC. 1989. *Ground subsidence*. Chapman and Hall, New York. 202 p.
- Xia R. 2009. Comparison of random forests and Cforest: variable importance measures and prediction accuracies. *Utah State University, DigitalCommons@USU*. <https://doi.org/10.26076/74bd-59e1>



Identification of Areas Prone to Subsidence Risk and Factors affecting it Using GLM and Cforest Models in the Kerdi Shirazi Plain

Razieh Seihani Parashkouh^{1*}, Hamid Gholami², Yahya Esmaeilpour³ Alireza Kamali⁴ Maryam Zare Rashkoueh⁴

- 1- Ph.D. graduated in Watershed Science and Engineering (Water and Soil Protection), Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resource, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 2- Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 3- Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 4- Expert, Department of Natural Resources and Watershed Management of Hormozgan Province, Bandar Abbas, Iran
- 5- Expert, Department of Regional Water Company of Hormozgan Province, Bandar Abbas, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Over the past few decades, subsidence has become a major problem on a global scale. Given the increase in this phenomenon in the country, predicting and spatial modeling of land subsidence and identifying areas prone to subsidence are essential to reduce the negative effects of this environmental impacts. Given the threats and destructive effects of land subsidence on water and soil resources, managing this phenomenon and prevent its spread is a key issue in the sustainable development of the country. Subsidence studies is essential to gain insight, identify research gaps, improve methodology, and ensure that new research contributes to the existing knowledge base. In this regard, the Kerdi Shirazi Plain is of great importance due to the presence of the Mourkerdi Forest Reserve, its biodiversity, and its agricultural status, and given that subsidence is expanding in this region, identifying areas prone to subsidence risk is essential to combat this phenomenon and reduce the damages caused by it. The main objective of this study was to develop a spatial model for subsidence risk using GLM machine learning model in the studied area. Therefore, in this study, for the first time, a machine learning model is used to identify areas prone to land subsidence risk in the Kerdi Shirazi Plain. Also, the contribution and relative importance of various factors controlling subsidence were quantitatively determined using the Cforest machine model.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** hadesert64@gmail.com

Citation: Seihani Parashkouh, R., Gholami, H., Esmaeilpour, Y., Kamali, A.R., Zare Rashkoueh, M. 2025. Identification of Areas Prone to Subsidence Risk and Factors Affecting it Using GLM and Cforest Models in the Kerdi Shirazi Plain. Watershed Management Research. 38(3): 40-56.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.367937.1608

Received: 15 December 2024, **Received in revised form:** 24 January 2025, **Accepted:** 18 March 2025

Published online: 23 September 2025

Watershed Management Research, Vol. 38, No.3, Ser. No: 148, Autumn 2025, pp. 40-56.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Materials and Methods

In this study, to prepare a land subsidence risk map in the study area, a database related to the factors controlling this phenomenon was first prepared. In this regard, the existing map of subsidence in the area were prepared by conducting field visits and collection data related to the presence or absence of subsidence in the ArcGIS software. After identifying the most important factors controlling subsidence, the relationship between the effective variables and subsidence points with and without it was examined using the GLM machine learning model. The output of the prediction model (values 0 to 1) was classified into five subsidence risk classes including very low risk (0 - 0.2), low (0.2 - 0.4), moderate (0.4 - 0.6), high (0.6 - 0.8) and very high (0.8 - 1) and presented as a subsidence risk map. The Cforest machine models is the best model for determining the importance of variables controlling various hazards, especially subsidence. The efficiency of this model is higher and its less error is lower compared to other models. Therefore, the Cforest model was used to determine the relative importance of each of the effective and restraining factors of this phenomenon.

Results and Discussion

The performance of the GLM model in predicting subsidence risk was evaluated using the area under the AUC curve. The area under the ROC curve, was found to be 0.99. This data indicates the excellent performance of the GLM model in identifying subsidence points. Based on the results of this model, 2180 and 441 hectares of the total area were in the very low and low subsidence sensitivity classes. On the other hand, 402, 447 and 1113 hectares of the total area were in the moderate, high and very high subsidence sensitivity classes, respectively. Also, 24.3% of the total study area has a very high susceptibility to subsidence risk. The central parts of the region with agricultural, horticultural and forest uses adjacent to agricultural and horticultural lands, share a common aquifer, and the risk of land subsidence was very high. Also, according to the results of the relative importance of variables, three main variables, including land use, groundwater level, and groundwater drawdown were among the most important variables controlling subsidence risk in the study area. The results of this study of variables controlling the risk of land subsidence showed for the first time that this phenomenon can be a serious threat to forest lands, especially forests in arid and semi-arid regions.

Conclusion and Suggestions

Based on the results obtained, the sensitivity to land subsidence risk in the central parts of the region (agricultural and horticultural uses and forest use in the vicinity of agricultural and horticultural lands) was very high and high. The results of the study of variables controlling the risk of subsidence in the studied area showed that the reason for the increase in groundwater exploitation was the development of agricultural and horticultural activities in the Kerdi Shirazi plain. Therefore, in order to reduce the negative effects of land subsidence, it is recommended to prevent activities that increase the exploitation of groundwater resources. It is also suggested that watershed management activities (flood spreading) be carried out upstream of the studied area in order to recharge the regional aquifer.

Keywords: Kerdi shirazi, machine learning, prediction, relative importance, spatial modeling

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors would like to thank the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Iran, for supporting this research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution

First Author: Software, research, data analysis, writing

Second Author: Data analysis, writing, supervision, analysis, conceptualization, project manager

Third Author: Conducting the research, supervision

Fourth Author: Conducting the research