

ارزیابی و مدل‌سازی مکانی خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل LiCSBAS و الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: دشت مرودشت - خرامه)

محمد خواجه^۱، چوقی بایرام کمکی^{۱*}، محسن رضایی^۲، واحد بردی شیخ^۳ و لادن عبادی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۰)

چکیده

در آینده خطر فرونشست زمین به دلیل بحران کمبود منابع آبی و مدیریت نامناسب منابع آبی تشدید می‌شود. برای کاهش خطرات مرتبط با فرونشست زمین، لازم است مناطق مستعد خطر فرونشست شناسایی و ارزیابی شوند و اقدامات لازم انجام شود. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از روش تداخل سنجی راداری به نام LiCSBAS، خطر فرونشست زمین شناسایی و ارزیابی شد. سپس با استفاده از مدل جنگل تصادفی RF، رابطه مکانی بین رخداد خطر فرونشست زمین و عوامل مؤثر مانند ارتفاع سطح زمین، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، افت آب زیرزمینی، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحنا قوس مورد بررسی قرار گرفت. در انتها، بعد از کالیبراسیون الگوریتم جنگل تصادفی، نقشه حساسیت خطر فرونشست زمین تهیه شد. نتایج تحلیل سری زمانی تداخل سنجی LiCSBAS در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ نشان داد که مرکز دشت مرودشت - خرامه و نواحی کشاورزی مجاور به‌طور مداوم در حال فرونشست هستند و پهنه‌بندی نقشه سرعت میانگین تغییر شکل نشان‌دهنده نرخ فرونشست ۱۱/۶ سانتی‌متر در سال است. نتایج تعیین ارتباط مکانی بین رخداد فرونشست و عوامل مؤثر، تأییدکننده تأثیر مثبت فاصله از رودخانه، کاربری اراضی شهری و کشاورزی، عمق سنگ کف بستر (ضخامت آبخوان)، افت آب زیرزمینی و سازندهای آبرفتی و ریزدانه روی رخداد این پدیده است. همچنین نتایج مدل‌سازی فرونشست با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی نشان داد که عوامل عمق سنگ کف، افت آب زیرزمینی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی بیشترین تأثیر اهمیت را در پتانسیل رخداد فرونشست در منطقه مورد مطالعه دارند. همچنین بر اساس نتایج، حدود سه تا چهار درصد از مناطق در کلاس شدید و بسیار شدید خطر فرونشست زمین به‌ویژه در مرکز و حومه شهر مرودشت قرار دارند؛ بنابراین مدیریت و کنترل منابع آب و ایجاد برنامه مدون برای کاهش خطر فرونشست و همچنین حفظ تغذیه آبخوان در دشت مرودشت - خرامه امری ضروری است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی خطر، فرونشست، تکنیک LiCSBAS، دشت مرودشت - خرامه، مدل جنگل تصادفی

۱. گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۳. گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۴. گروه آموزشی نقشه‌برداری، دانشکده فنی مهندسی علی‌آباد، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: bkomaki@gmail.com, komaki@gau.ac.ir

مقدمه

فرونشست زمین در واقع نشست ملایم یا فرورفتگی سریع بخش‌های مختلف زمین است که ناشی از تجمع رسوبات و یا جابه‌جایی مواد در قسمت‌های زیرسطحی با افزایش تنش مؤثر ایجاد می‌شود (۴). فرونشست زمین یا زلزله خاموش، یک خطر زمین‌شناسی است (۳۰) که می‌تواند به دلیل فشردگی سیستم آبخوان ناشی از برداشت آب زیرزمینی (۱۵)، فشار ساخت و سازهای انسانی، بهره‌برداری از منابع طبیعی مانند نفت و گاز و حرکات ژئوتکنیکی در پوسته زمین رخ دهد (۸). به‌طور کلی عوامل مختلفی باعث وقوع فرونشست می‌شود، ولی در بسیاری مناطق برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی عامل اصلی است (۳۳).

آمارها نشان می‌دهند که هر ساله ۱۵۰ کشور و صدها شهر به میزان ۱۰ سانتی‌متر تحت‌تأثیر فرونشست زمین قرار می‌گیرند و این پدیده تا سال ۲۰۴۰ می‌تواند بر ۱۹ درصد جمعیت جهان تأثیرگذار باشد (۴۰). شرایط آب و هوایی خشک در اکثر مناطق داخلی ایران، وابستگی بیشتری را به منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و شهری ایجاد کرده که باعث افت تراز آب زیرزمینی شده است که یکی از نیروهای پیرشان در وقوع فرونشست زمین است.

بررسی و تجزیه و تحلیل دقیق نرخ، گستره و تغییرات تدریجی فرونشست نیز از اهمیت زیادی برخوردار است (۲۸). در حال حاضر روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری فرونشست زمین ارائه شده است که می‌توان به اختلاف تراز یابی دقیق (۱۵)، استفاده از ایستگاه‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی دائمی، لیدار (۲۱) و تداخل سنجی راداری (۶) اشاره کرد. تداخل سنجی راداری یکی از دقیق‌ترین و اقتصادی‌ترین تکنیک‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور است. این تکنیک میزان و دامنه فرونشست را روی کل منطقه مورد مطالعه ارزیابی می‌کند و از مزیت‌های دیگر آن امکان نظارت مستمر فرونشست (در صورت ارائه تصویر ماهواره‌ای جدید) است (۱۲ و ۴۲). روش تداخل سنجی راداری ابزار قدرتمندی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و تغییر شکل زمین است (۱۳).

تکنیک اندازه‌گیری جابه‌جایی به روش تداخل سنجی رادار دهانه ترکیبی (InSAR) در دهه ۱۹۶۰ توسعه داده شد (۵۰).

این فناوری دارای وضوح و نفوذ زیادی است که توسط عوامل اقلیمی و توپوگرافی محدود نمی‌شود. باین‌حال فرایند پایش برای سری‌های زمانی طولانی دارای مشکلات عدم پیوستگی زمانی و مکانی و اثر تأخیر تروپوسفری است. امروزه تکنیک Multi-Temporal InSAR (MT-InSAR) توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است که شامل روش‌های حداقل مربعات Permanent Scatterer InSAR (PS-InSAR) و Small Baseline Subset (SBAS-InSAR) است که روش SBAS-InSAR در مناطق طبیعی و دشت‌ها به دلیل وجود پراکنده سازهای توزیع شده (Distributed Scatter) به‌عنوان منبع اصلی اطلاعات و کمبود تراکم و چگالی هدف‌های راداری بیشتر کاربرد دارد (۲۹). دقت زیاد روش تداخل سنجی راداری باعث شده در بسیاری از مناطق از این روش استفاده کنند. برای نمونه دانگ و همکاران به تحلیل مکانی و زمانی فرونشست زمین شهر شانگهای با کمک SBAS-InSAR پرداختند که با استفاده از ۲۰ تصویر ALOS PALSAR در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰، نقشه نرخ تغییرات شکل زمین و استخراج سری زمانی تغییر شکل به‌دست آمد (۷). ژانگ و همکاران برای مطالعه فرونشست شهر ووهان چین با استفاده از روش راداری دیافراگم مصنوعی و الگوریتم InSAR-SBAS از تصاویر رادارست ۲ بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده کردند و نرخ فرونشستی را بین ۵۱/۵۶- تا ۲۷/۸ میلی‌متر در سال به‌دست آوردند (۴۸).

در ایران و در سال‌های گذشته، گزارش فرونشست بیشتر بر اساس گزارش‌های محلی، بالا زدگی لوله‌های چاه گزارش شده است و اولین بررسی‌های علمی مربوط به دشت رفسنجان است (۱۹) و پس‌از آن سایر دشت‌های ایران مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. از این مطالعات می‌توان به استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و برآورد فرونشست در محدوده آبخوان قزوین و ارتباط فرونشست‌ها در محدوده آبخوان با ضخامت لایه ریزدانه توسط فوتی و همکاران (۱۹)، بررسی سری زمانی فرونشست در کلانشهر کرج و ارتباط مؤثر کاهش بارندگی و برداشت آب زیرزمینی و بافت خاک ریزدانه در افزایش فرونشست زمین توسط

طبقه‌های و تعاملات میان آن‌ها می‌تواند منجر به نتایج نادرست در نقشه نهایی شود. در بیشتر بررسی‌ها، قضاوت‌های کارشناسی نقش مهمی دارد. این مشکلات منجر به استفاده از روش‌های داده‌کاوی در مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک شده است (۴۴). روش‌های داده‌کاوی علاوه بر افزایش دقت در برخورد با مسائل پیچیده و نبود قطعیت، باعث ایجاد نظریه‌ها و روش‌های نوین در مسائل مختلف می‌شود. هدف از پژوهش حاضر شناسایی و ارزیابی خطر فرونشست زمین با پردازش سری زمانی فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (مدل LicSBAS) و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست در دشت مرودشت - خرامه و ارتباط آن با میزان فرونشست با استفاده مدل نسبت فراوانی و مدل‌سازی مکانی با استفاده داده‌کاوی جنگل تصادفی و شناسایی عوامل مؤثر در رخداد پدیده فرونشست است.

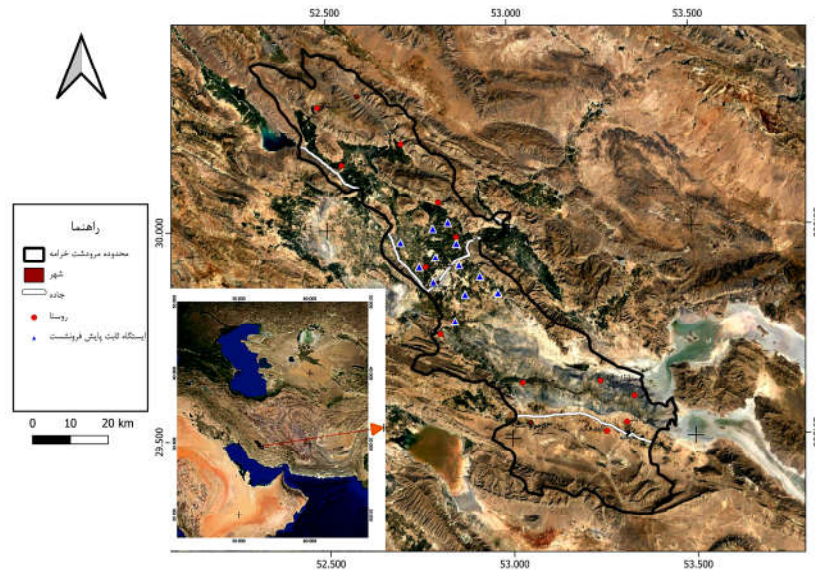
مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی مرودشت - خرامه جزء حوضه آبخیز دریاچه بختگان است (شکل ۱). این منطقه در محدوده جغرافیایی شرقی با طول جغرافیایی $15^{\circ} 52'$ تا $27^{\circ} 53'$ و شمالی با عرض جغرافیایی $19^{\circ} 29'$ تا $25^{\circ} 30'$ قرار دارد. شهر مهم این منطقه مرودشت است و فاصله آن از شهر شیراز که در شمال آن قرار دارد، حدود ۳۵ کیلومتر است. مساحت کل منطقه مورد مطالعه حدود ۳۹۲۶ کیلومترمربع است که ۲۱۰۲ کیلومترمربع آن به دشت و ۱۸۲۳ کیلومترمربع به ارتفاعات اختصاص دارد. بالاترین نقطه این منطقه در ارتفاعات جنوبی به ارتفاع ۲۲۰۲ متر از سطح دریا قرار دارد و کمترین نقطه آن در خروجی حوضه به ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریای آزاد است. روند ارتفاعات دشت مرودشت - خرامه شمال غربی و جنوب شرقی است. میانگین بارندگی ۲۸۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد است (۱۴). این محدوده مطالعاتی شامل حوضه آبخیز دو رودخانه اصلی کر و سیوند و رودخانه فرعی دائمی مائین است. با وجود ظرفیت فراوان منابع آب و شرایط آب‌وهوایی معتدل تا گرم باعث شده که این حوضه به‌عنوان یکی از

باروق و فتح اله زاده (۳۸) و برآورد فرونشست با نرم‌افزار GMTSAR و LiCSBAS و اثر مؤثر برداشت آب زیرزمینی و اقلیم بر فرونشست زمین توسط غلامی و همکاران (۱۷) اشاره کرد.

کاهش خطرات پدیده‌های طبیعی مانند فرونشست، زلزله، زمین‌لغزش و غیره با پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد و انجام راهکارهای عملیاتی امکان‌پذیر است و مطالعه جامع و تحلیل خطر این نوع پدیده‌ها با شناسایی عوامل مؤثر و مناطق پرخطر میسر می‌شود. بر همین اساس روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی خطر فرونشست زمین و شناسایی عوامل مؤثر ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر در مدل‌سازی مکانی و نقشه‌برداری برخی از خطرات طبیعی و انسان‌ساخت، تکنیک داده‌کاوی است. برای نمونه محمدی و همکاران با مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست با الگوریتم جنگل تصادفی با دقت قابل قبول ۸۶٪ درصد به این نتیجه رسیدند که متغیر سطح آب زیرزمینی، فاصله از گسل و افت آب زیرزمینی تأثیر بیشتری بر وقوع فرونشست دارد (۲۵). پور قاسمی و محسنی سراوی در پژوهشی با مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین با الگوریتم جنگل تصادفی به این نتیجه رسیدند که داده‌های چاه پیزومتری و ارتفاع، مهم‌ترین عامل در فرونشست زمین است (۳۴). قراچه‌ای و همکاران با تکنیک تداخل سنجی راداری و الگوریتم یادگیری ماشین به نقشه‌برداری حساسیت فرونشست زمین در مناطق نیمه‌خشک ایران با سه الگوریتم (RF, KNN, CART) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، الگوریتم جنگل تصادفی دقت بیشتری دارد و بیشتر مناطق فرونشست در زمین کشاورزی قرار دارد و دلیل اصلی فرونشست برداشت آب زیرزمینی نیست، بلکه فاصله از سدها و نزدیکی با طاقدیس‌ها و گسل‌ها و معادن مهم‌ترین عامل‌های فرونشست است (۱۶).

در طبیعت تعیین محدوده مشخصی برای طبقه‌بندی (خاک، کاربری زمین و...) و تعیین مرز طبیعی برای عوامل پیوسته (ارتفاع، شیب، فاصله از عناصر خطی و...) و عناصر تراکمی بسیار مشکل است. همچنین استفاده از مدل‌های سنتی و آماری به دلیل ساده گرفتن متغیرهای اصلی پدیده‌های زمینی در



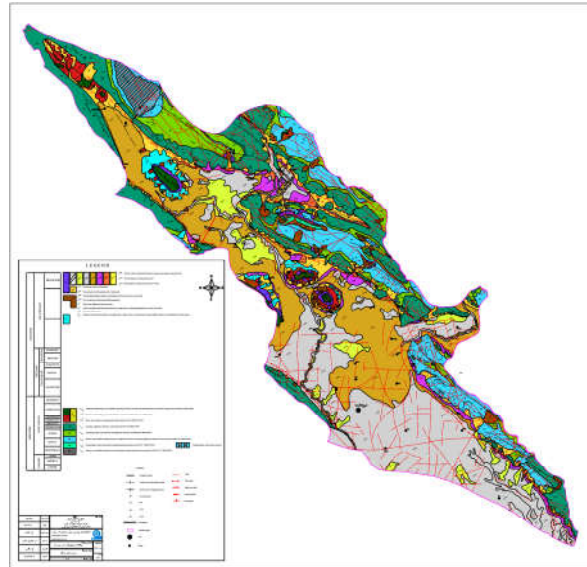
شکل ۱. محدوده دشت مروداشت - خرامه در تصویر گوگل ارث

اختلاف فاز بین دو تصویر در دو زمان مختلف را نمایش می‌دهد. تداخل نگار تصویری است که با دقت هندسی بین دو تصویر انطباق دارد و اختلاف فاز بین آن‌ها بیانگر اختلاف فاصله بین سنجنده و عارضه در دو زمان مختلف تصویربرداری است (۲۶). روش کلی مطالعه حاضر در شکل ۴ نمایش داده شده است. این مراحل شامل برآورد مقدار و نرخ فرونشست در دشت مروداشت - خرامه با استفاده از بسته نرم‌افزاری LiCSBAS تحت سیستم Ubuntu، طی سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۲۲ و در ادامه مقایسه بین مطالعات گذشته و داده ایستگاه GPS منطقه است. در مرحله بعدی ایجاد نقاط تصادفی در محدوده دشت مروداشت - خرامه در نرم‌افزار QGIS و برداشت نمونه‌های تصادفی از مقادیر جابه‌جایی زمین در کلاس‌های فاقد فرونشست، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است (۲۵). در نهایت برای شناسایی عوامل تأثیرگذار در فرونشست، ۷۰ درصد از این نمونه‌برداری‌ها برای آموزش مدل جنگل تصادفی و ۳۰ درصد آن به‌عنوان داده آزمایش به مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار R وارد شد. از طرفی با استفاده از مدل FR، ارتباط مکانی میان کلاس عوامل اثرگذار و وقوع پدیده فرونشست بررسی شد. در نهایت علاوه بر شناسایی عوامل تأثیرگذار در فرونشست منطقه، نقشه خطر فرونشست در منطقه با استفاده از مدل الگوریتم جنگل مدل‌سازی شد.

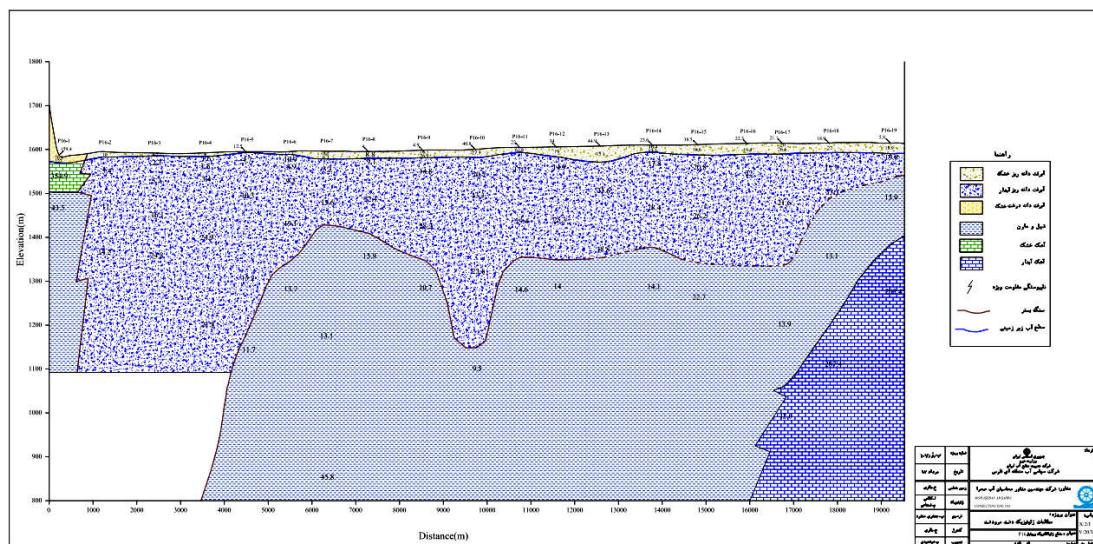
مناطق مهم کشاورزی در استان فارس و در نیمه جنوبی کشور مورد توجه قرار گیرد. بافت خاک در این نواحی لومی رسی است و کاربری فعلی این دشت‌ها کشاورزی است. دشت مروداشت یک دشت واقع در میان کوه‌ها است که توسط چندین طاق‌دیس به شکل هم‌روند با رشته‌کوه زاگرس احاطه شده است. این دشت شامل ارتفاعاتی متنوع از سنگ‌های مختلف از جمله آهکی، مارن و ماسه‌سنگ می‌شود که از دوره کرتاسه تا پالئوژن به وجود آمده‌اند. دشت مروداشت خود یک دشت آبرفتی و سیلابی است که بخش عمده آن از رسوبات ریزدانه هلوسن تشکیل شده است (شکل‌های ۲ و ۳) (۴۳).

پردازش تصاویر راداری

تکنیک رادار دیافراگم مصنوعی تداخل سنجی قابلیت اندازه‌گیری جابه‌جایی زمین در جهت خط دید ماهواره در مناطق گسترده را فراهم می‌کند و اختلاف‌های فاز ناشی از جابه‌جایی را بازیابی می‌کند و این روش‌های چندزمانه (InSAR) نتایج قوی‌تری ارائه می‌دهند، اما نیاز به حذف نویز و تخمین فاز اتمسفری دارند (۳۹). در این پژوهش، از رویکرد خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS) در قالب بسته نرم‌افزاری LicSBAS استفاده شده است. این روش نیاز به تداخل نگار پیوسته دارد که اطلاعاتی از



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی مرودشت (مرکز زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه جنوب کشور)



شکل ۳. مقطع ژئوالکتریک پروفیل P16 مربوط به مرکز دشت

cc (coherence) بر اساس فریم مشخص شده از وبسایت COMET-LiCS (<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>) دانلود می‌کند.

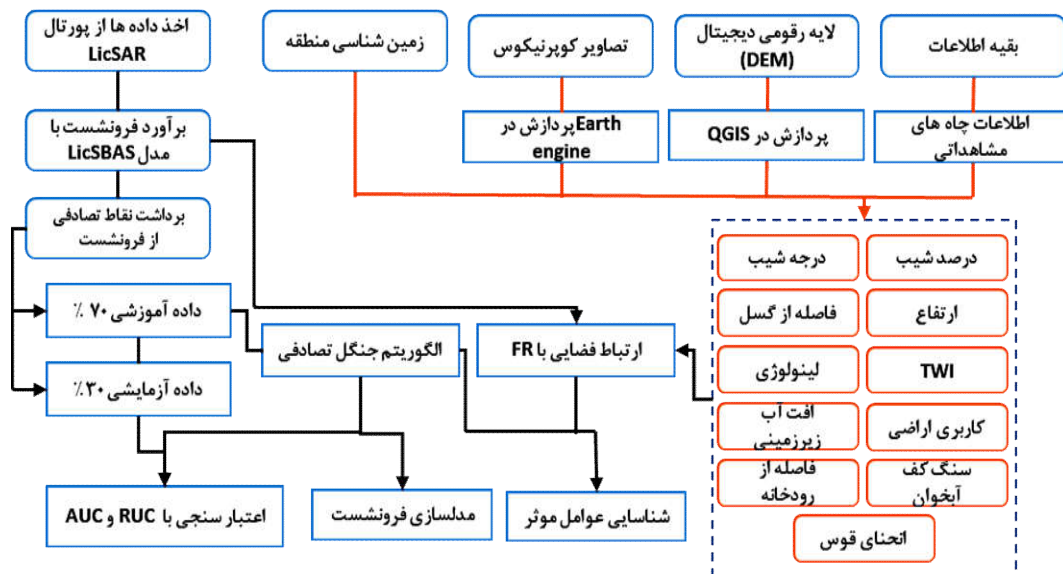
مرحله ۰-۲: تبدیل فرمت فایل: در این مرحله، فرمت فایل داده‌های LiCSAR از GeoTIFF به single-precision floating-point تبدیل می‌شود تا برای مراحل بعدی قابل استفاده باشد.

مرحله ۰-۳: اصلاح نویز تروپوسفری (اختیاری): این مرحله با استفاده از داده‌های

نرم‌افزار LiCSBAS

بسته نرم‌افزاری LiCSBAS یک ابزار بسیار کامل برای تحلیل داده‌های InSAR و مدل‌سازی جابه‌جایی زمین است. این بسته نرم‌افزار با استفاده از داده‌های محصولات LiCSAR تحلیل‌های متنوعی انجام می‌دهد. مراحل مختلف جریان پردازش LiCSBAS به شرح زیر است:

مرحله ۰-۱: دانلود محصولات LiCSAR: در این مرحله فایل‌های GeoTIFF unwrapped (unwrapped interferogram) و



شکل ۴. مراحل انجام کار در پژوهش حاضر

استفاده از مدل رقومی ارتفاعی رادار توپوگرافی شاتل (SRTM DEM 30 m) دوباره نمونه برداری (resampled) و کدگذاری (geocoded) می شوند.

مرحله ۱-۳: معکوس کردن پایه های کوچک: برای برآورد سرعت تغییرات قائم پیکسل ها در طول زمان، یک وارونگی SB از الگوریتم NSBAS، تداخل نگارها اولیه معکوس شده تا سری زمانی تغییرات قائم به دست آید.

مرحله ۱-۴: محاسبه انحراف معیار نرخ: در این مرحله، با بهره مندی از روش Bootstrap، انحراف معیار نرخ جابه جایی زمین محاسبه می شود.

مرحله ۱-۵: ماسک گذاری سری زمانی: به منظور شناسایی پیکسل های بد با استفاده از چندین شاخص نویز یک ماسک بر روی پیکسل ها اعمال می شود و سری زمانی با استفاده از ماسک های ایجاد شده مشخص می شود. در صورتی که هر یک از مقادیر شاخص های نویز برای هر پیکسل از آستانه مشخص شده بیشتر باشد، پیکسل ماسک می شود.

مرحله ۱-۶: فیلتر کردن سری زمانی: با استفاده از یک فیلتر زمانی - مکانی خطای باقی مانده تروپوسفریک، یونسفر و خطای مداری از سری زمانی تغییرات قائم برداشته می شود.

(Generic Atmospheric Correction Online Service) GACOS

یک تصحیح تروپوسفر را برای داده های باز شده اعمال می کند. داده های GACOS باید از قبل با درخواست در وب GACOS (<http://ceg-research.ncl.ac.uk/v2/gacos/>) آماده شود.

مرحله ۰-۴: ماسک گذاری ناحیه های هم پوشانی کم در تداخل نگارهای عرضی (اختیاری): در این مرحله، نواحی هم پوشانی کم در تداخل نگارها (انسجام (coherence) ۰/۱) مشخص شده و ماسک گذاری می شوند و در ادامه داده ها به صورت اتوماتیک با Snaphu واپیچش می شوند.

مرحله ۰-۵: برش یک ناحیه مستطیلی مشخص (اختیاری): در صورت نیاز، یک ناحیه مستطیلی مشخص از داده ها برش می شود. مرحله ۱-۱: بررسی کیفیت و شناسایی تداخل نگارهای بد: در این مرحله، کیفیت تداخل نگارها بررسی می شود و تداخل نگارهای بد شناسایی می شوند. آستانه انسجام و پوشش داده های واپیچشی به ترتیب ۰/۰۶ و کمتر از ۰/۵ انتخاب شد.

مرحله ۱-۲: بررسی بسته شدن حلقه و شناسایی تداخل نگارهای بد: در این مرحله، بسته شدن حلقه (مشکلات مرتبط با مراحل باریچجانی) بررسی می شود و تداخل نگارهای بد شناسایی می شوند. همچنین تداخل نگارهای واپیچش شده با

روش درون‌یابی وزنی فاصله معکوس (رابطه ۲) در نرم‌افزار QGIS، نقشه افت سطح آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۸۲ الی ۱۴۰۰ تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی مربوط به دشت مرودشت - خرامه از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد.

$$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan\beta}\right) \quad (1)$$

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

در اینجا A مساحت حوزه، β درجه شیب و TWI شاخص رطوبت توپوگرافی است. λ_i نقطه، D_i فاصله بین نقطه i و نقاط ناشناخته و α معادل قدرت توزین اساست (۳۴).

در این مطالعه برای تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین، اندازه تمام پیکسل‌های لایه‌های رستری به علت همسان‌سازی پیکسل‌ها با نقشه‌های فرونشست استخراجی مدل LicSBAS به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر \times ۳۰ متر تبدیل شده است.

بررسی رابطه مکانی بین عوامل مؤثر و رخداد فرونشست زمین
در این مطالعه به منظور بررسی ارتباط مکانی بین مکان‌های فرونشست زمین و عوامل مؤثر در آن، نقشه هر یک از عوامل اثرگذار با نقشه فرونشست در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 هم‌پوشانی شد و در نهایت پس از محاسبه درصد فرونشست برای مکان و طبقات هر عامل، مقدار وزنی (frequency ratio model) FR برای هر طبقه از هر عامل با استفاده از رابطه ۳ استخراج شد (۳۲ و ۳۶):

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad (3)$$

در اینجا A تعداد پیکسل‌های فرونشست زمین، B تعداد کل پیکسل‌های تحت اثر فرونشست است. C تعداد پیکسل در کلاس هر عامل و D تعداد کل پیکسل‌های منطقه مطالعاتی است.

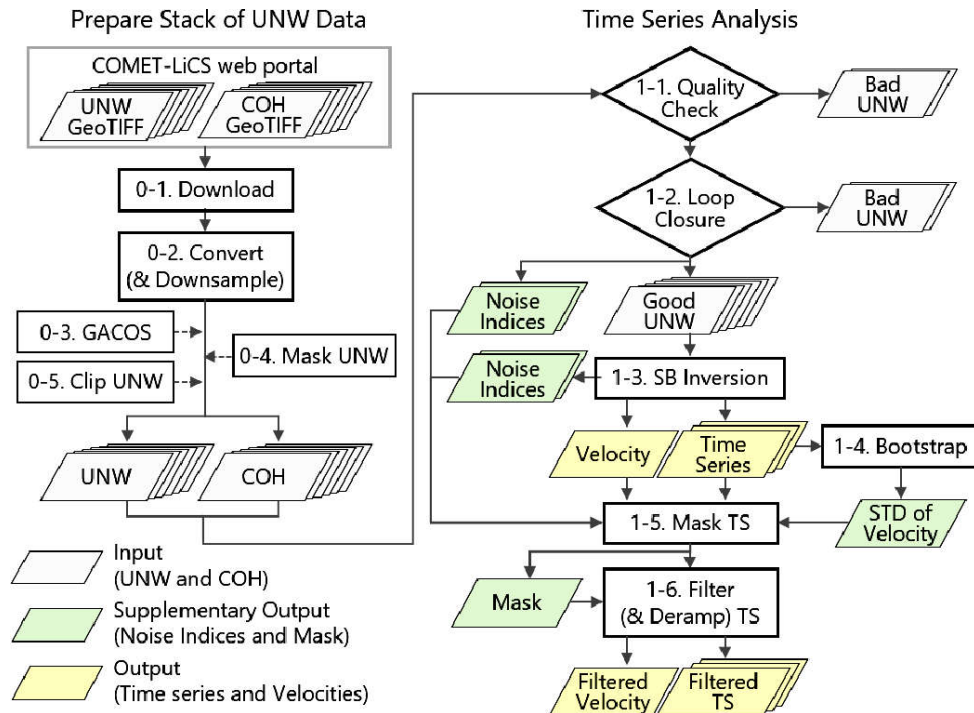
الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest (RF) Model)

الگوریتم جنگل تصادفی (RF) یکی از الگوریتم‌های پرطرفدار و گسترده در یادگیری ماشین است که با موفقیت در بسیاری از مسائل واقعی مورد استفاده قرار گرفته است (۹).

این جریان پردازش LiCSBAS به تحلیل دقیق جابه‌جایی زمین از داده‌های InSAR و مدل‌سازی خطر فرونشست مناطق مختلف کمک می‌کند و از آن در مطالعات زمین‌شناسی و محیط‌زیستی استفاده می‌شود. شکل ۵ چارت مراحل روش LiCSBAS است (۲۴).

عوامل مؤثر و فرونشست زمین

بر اساس بررسی مطالعات مختلف (۱۰، ۱۶، ۴۲ و ۴۹) و همچنین در دسترس بودن داده‌ها و اطلاعات موردنیاز، ۱۱ عامل برای مدل‌سازی فرونشست انتخاب شد. این عوامل عبارت‌اند از درصد شیب، درجه جغرافیایی شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، افت تراز آب زیرزمینی، کاربری اراضی و انحنای سطح و شاخص رطوبت توپوگرافی و نقشه سنگ کف (شکل ۶). از مدل ارتفاعی رقومی با دقت مکانی ۱۰ متری تهیه‌شده از سایت EARTH DATA (<https://search.asf.alaska.edu>) برای تهیه لایه اطلاعاتی درصد شیب، زاویه شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی (رابطه ۳) و انحنای سطح در نرم‌افزار QGIS استفاده شد. برای به‌دست آوردن نقشه کاربری اراضی از خدمات شامل نقشه پوشش زمین استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای کوپرنیکوس، سنجنده PROBA نسخه سه است. نقشه‌های پوشش زمین دارای توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متری و دارای ۲۲ کلاس کاربری است. برای محاسبه کاربری اراضی برای منطقه مدنظر در سال ۲۰۲۰ از وب‌سایت Google Earth Engine استفاده شد. بر طبق مطالعات Tsendbazar و همکاران در سال ۲۰۲۱، دقت سراسری نقشه‌های پوشش استخراج‌شده بیش از ۸۰ درصد و با استفاده از ۲۸ هزار نقشه زمینی اعتبارسنجی شده است (۴۵). لایه اطلاعاتی فاصله از گسل و رودخانه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی در نرم‌افزار QGIS ساخته شد. در این مطالعه اطلاعات مربوط به چاه‌های مشاهداتی، سطح آب زیرزمینی و نقاط سنگ کف از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان فارس تهیه شد. پس از انجام مراحل پیش‌پردازش، با استفاده از



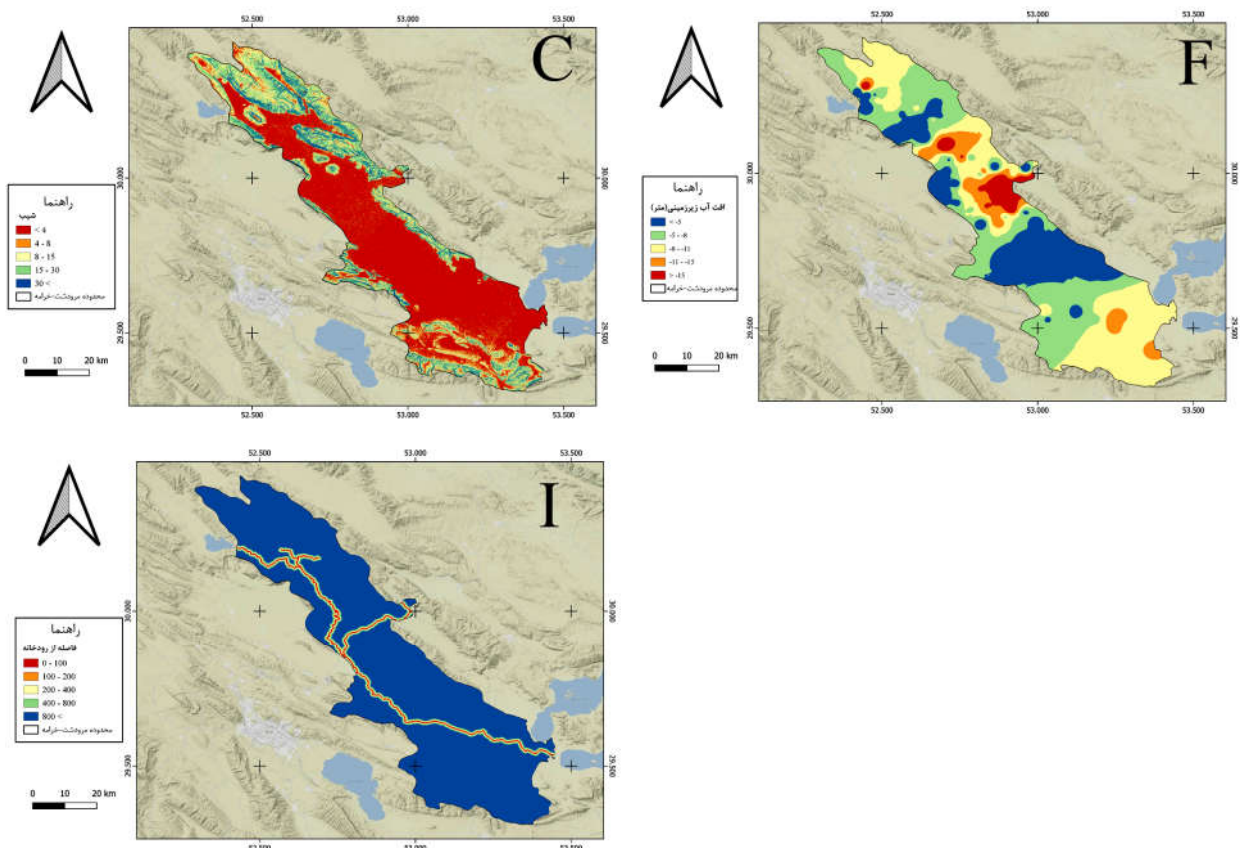
شکل ۵. گردش کار LiCSBAS شامل تهیه فازهای اینترفرومتریک بدون پیچش (UNW) و داده‌های همبستگی (COH) (مراحل ۱-۰ تا ۵-۰) و تحلیل سری‌های زمانی که شامل مراحل ۱-۱ تا ۶-۱ می‌شود. مراحل اختیاری شامل تصحیح‌های جوی، ماسک‌گذاری، و برش‌زنی با خطوط نقطه‌چین نشان داده شده‌اند. (۲۴)

ورودی در هنگام ساخت درخت در نظر گرفته می‌شود (۳۵). در الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از چندین درخت تصمیم، استحکام و حساسیت مدل را کاهش داده و قدرت و قابلیت اعتماد مدل را افزایش می‌دهد. استفاده از اعتبارسنجی متقابل داخلی با استفاده از نمونه‌های باقیمانده که در زیرمجموعه‌های انتخاب‌شده قرار نگرفته‌اند، به تخمین عملکرد مدل کمک می‌کند (۵).

برای پیاده‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی، دو پارامتر فرا پارامتر باید تنظیم شوند. n_{tree} : که تعداد درخت‌های تصمیم در جنگل را نشان می‌دهد و m_{try} که تعداد متغیرهای پیش‌بین در هر گره درخت را نشان می‌دهد. مقادیر تنظیم‌شده برای n_{tree} و m_{try} می‌توانند با استفاده از روش‌هایی مانند اعتبارسنجی متقابل با ده برابر تقسیم داده‌ها شناسایی شوند. در این مورد، مدل RF در محیط R با استفاده از بسته randomForest پیاده‌سازی شده است (۲).

الگوریتم جنگل تصادفی توسعه‌ای از رگرسیون درختی و طبقه‌بندی است که برای اولین بار توسط بیرمن (۲۰۰۱) توسعه یافت. هدف اصلی الگوریتم جنگل تصادفی، تولید تعداد زیادی از درخت‌های تصمیم روی زیرمجموعه‌های تصادفی مختلفی از مجموعه داده‌های آموزش است (۱۰). در این مدل درختان تصادفی بردار ورودی را گرفته، آن را با هر درخت در جنگل دسته‌بندی کرده و خروجی آن برچسب‌های کلاس با اکثریت آرا است (۵).

در الگوریتم جنگل تصادفی، هر درخت تصمیم به‌طور مستقل با استفاده از روش نمونه‌برداری با جایگزینی (bootstrap) ایجاد می‌شود، به این صورت که نمونه‌ها با جایگزینی از مجموعه داده‌های آموزش انتخاب می‌شوند. این کار به کاهش شباهت‌های ممکن بین درخت‌های تصمیم کمک می‌کند. همچنین برای هر درخت، تنها یک زیرمجموعه تصادفی از متغیرهای



شکل ۶. نقشه متغیرهای محیطی اثرگذار در فرونشست، نقشه‌های ارتفاع (A)، رطوبت توپوگرافی (B)، شیب (C)، عمق سنگ‌بستر (D)، زمین‌شناسی (E)، نقشه افت آب زیرزمینی (F)، کاربری اراضی (G)، جهت شیب (H)، فاصله از رودخانه (I)، فاصله از گسل (J)، انحنای سطح (K) (ادامه)

ارزیابی عملکرد مدل

ارزیابی و اعتبارسنجی عملکرد مدل‌ها به‌عنوان مراحل کلیدی در مطالعات ارزیابی خطر طبیعی معروف هستند و همچنین برای مقایسه مدل‌های مختلف از نظر توانایی پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱، ۱۰، ۳۴، ۳۷). در این مطالعه، منحنی ویژگی عملکرد گیرنده (ROC= Receiver Operating Characteristic) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. منحنی ROC بر اساس رابطه بین نرخ مثبت واقعی (حساسیت) و نرخ مثبت غلط (ویژگی-۱) در آستانه‌های تفسیر مختلف تولید می‌شود. منحنی ROC به‌عنوان یک روش مؤثر و ساده برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی و تشخیصی مدل‌ها، در مطالعات ارزیابی خطر محیطی با موفقیت استفاده شده است.

مساحت زیر منحنی (AUC) ROC که یک مقدار عددی در بازه ۰/۵ تا ۱ را نشان می‌دهد، می‌تواند به‌عنوان یک شاخص عملکرد مدل استفاده شود. مقدار ۰/۵ عملکرد تصادفی را نشان می‌دهد، در حالی که سایر مقادیر AUC می‌توانند در ارزیابی عملکرد به شکل زیر دسته‌بندی شوند: ضعیف (۰/۵-۰/۶)، متوسط (۰/۶-۰/۷)، خوب (۰/۷-۰/۸)، بسیار خوب (۰/۸-۰/۹) و عملکرد عالی (۰/۹-۱). مقدار AUC تنها دقت پیش‌بینی را ارائه می‌دهد و اطلاعات کافی در مورد کیفیت عملکرد فراهم نمی‌کند؛ بنابراین شاخص‌های آماری مانند دقت (ACC= Accuracy) و ضریب کاپا نیز برای برآورد قابلیت پیش‌بینی مدل RF محاسبه شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی خطر فرونشست در دشت مروودشت - خرامه

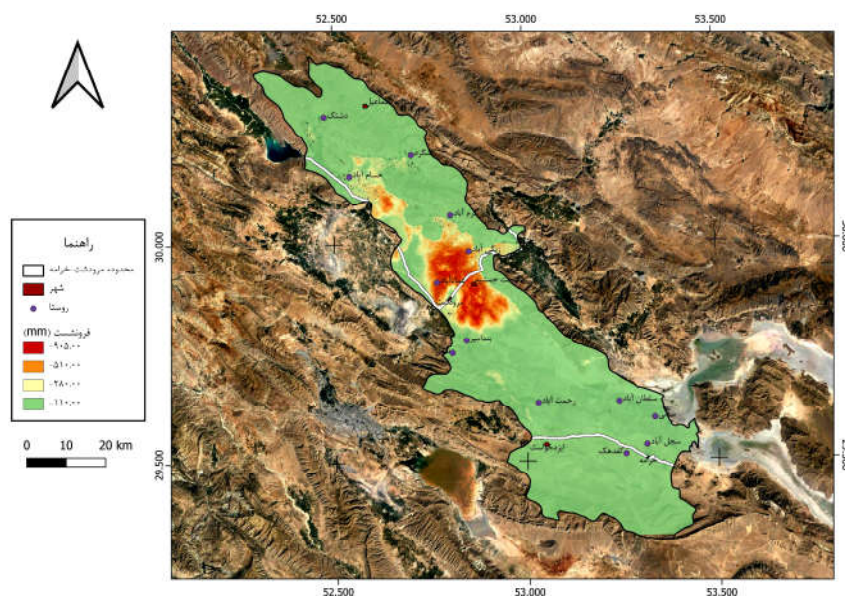
در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار LiCSBAS تحت سیستم عامل اوبونتو پردازش سری زمانی داده‌های سنتینل ۱ با استفاده از ۱۸۵ تصویر ماهواره سنتینل ۱ و در نتیجه ۸۳۰ زوج تصویر صورت پذیرفت. بازه زمانی مورد مطالعه از ابتدای سال ۲۰۱۵ تا ابتدای ماه مه سال ۲۰۲۲ انتخاب شد. نتایج پردازش بیانگر آن است که در محدوده دشت مروودشت - خرامه بیشترین میزان فرونشست تجمعی معادل ۹۰۵/۹ میلی متر در پیکسل اتفاق افتاده است. در ادامه برای طبقه‌بندی شدت فرونشست با استفاده از الگوریتم natural break algorithm در نرم‌افزار QGIS فرونشست منطقه در کلاس‌های کم، متوسط، شدید و خیلی شدید تقسیم‌بندی شد (۲۰). شهر و روستاهایی که در معرض بیشترین خطر فرونشست زمین قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: شهر مروودشت، تخت جمشید و روستاهای عماد آباد، زنگی آباد (کلاس خطر فرونشست شدید و خیلی شدید)، گرم‌آباد و حسام آباد (کلاس متوسط و شدید) و روستاهای اشگرد و بند امیر با کلاس متوسط در رده بعدی خطر فرونشست قرار دارند. بررسی شکل ۷ نشان می‌دهد که بیشتر مناطق در معرض فرونشست در مرکز دشت مروودشت - خرامه و نواحی شمال غربی است که تمرکز زمین‌های کشاورزی و بهره‌برداری از آب زیرزمینی در این مناطق بیشتر است (۳۱). در نواحی جنوب شرقی میزان فرونشست خیلی کم نشان داده شده است. بررسی نقشه پراکنش چاه‌های بهره‌برداری در شکل ۸ و همچنین نقشه افت تراز آب زیرزمینی (شکل ۶) با نقشه فرونشست در دشت مروودشت - خرامه نشان می‌دهد که تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در مرکز و شمال غرب دشت مروودشت - خرامه بیشتر است که در این محدوده‌ها بیشترین افت تراز آب زیرزمینی اتفاق افتاده است و برآیند کلی بررسی‌ها، گویای تطابق پراکنش چاه‌های بهره‌برداری و افت تراز آب زیرزمینی با فرونشست زمین در این دشت است.

مقایسه نتایج فرونشست

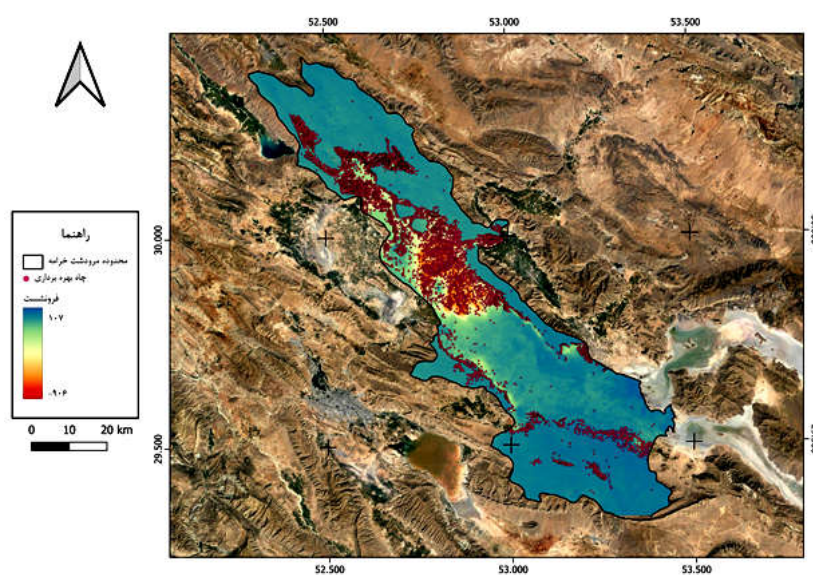
در سال ۱۳۹۷ سازمان نقشه‌برداری با پردازش داده‌های راداری (۲۰۱۵-۲۰۱۸) اطلس فرونشست مروودشت را ارائه داد. همچنین در سال ۱۴۰۰ دفتر مخاطرات زمین‌شناسی و مهندسی به رفتارسنجی نرخ فرونشست دشت مروودشت با تصاویر راداری و شبکه GPS پرداخت. نتایج آن‌ها همپوشانی مکان‌های فرونشست با مطالعه حاضر را نشان داد و نرخ فرونشست سالانه طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ توسط سازمان نقشه‌برداری به مقدار بیشینه ۴۲ سانتی‌متر در سال برآورد شده است (۴۳). مطالعه دفتر مخاطرات زمین‌شناسی و مهندسی بیشینه نرخ فرونشست سالانه را طی سال ۲۰۱۵ الی ۲۰۲۰ به روش شبکه GPS ۱۴/۷ سانتی‌متر در سال و با استفاده از شبکه راداری ۱۶/۹ سانتی‌متر در سال برآورد کرد. در مطالعه حاضر نرخ فرونشست سالانه، ۱۱/۶ سانتی‌متر در سال برآورد شد که علت مغایرت را می‌توان به طول دوره هفت‌ساله و همچنین تعداد تصاویر سنتینل ۱ بالاتر (۱۸۵ تصویر) نسبت به مطالعات سازمان نقشه‌برداری (دوره سه‌ساله و ۶۵ تصویر سنتینل ۱) و دفتر مخاطرات زمین‌شناسی و مهندسی (دوره ۵ ساله و ۱۲ تصویر سنتینل ۱) و همچنین نوع الگوریتم‌ها، نرم‌افزار و تنظیمات مربوط به نرم‌افزارهای پردازشگر دانست.

مقایسه نتایج پایش ایستگاه‌های GPS و مدل LicSBAS

در دشت مروودشت - خرامه ایستگاه نیمه ثابت پایش فرونشست طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ دایر شده است؛ اما به علت اینکه تمرکز ایستگاه‌ها در مرکز دشت (شکل ۱) و برداشت‌ها به صورت مستمر و منظم انجام نگرفته و دارای فاصله زمانی طولانی‌مدت است، اطلاعات تهیه‌شده قابلیت همپوشانی با داده‌های به دست آمده از مدل LiCSBAS را نداشته است؛ اما با توجه به رسم نمودارهای شکل ۹ و مقایسه داده‌های مقادیر فرونشست در آخرین برداشت، دیده



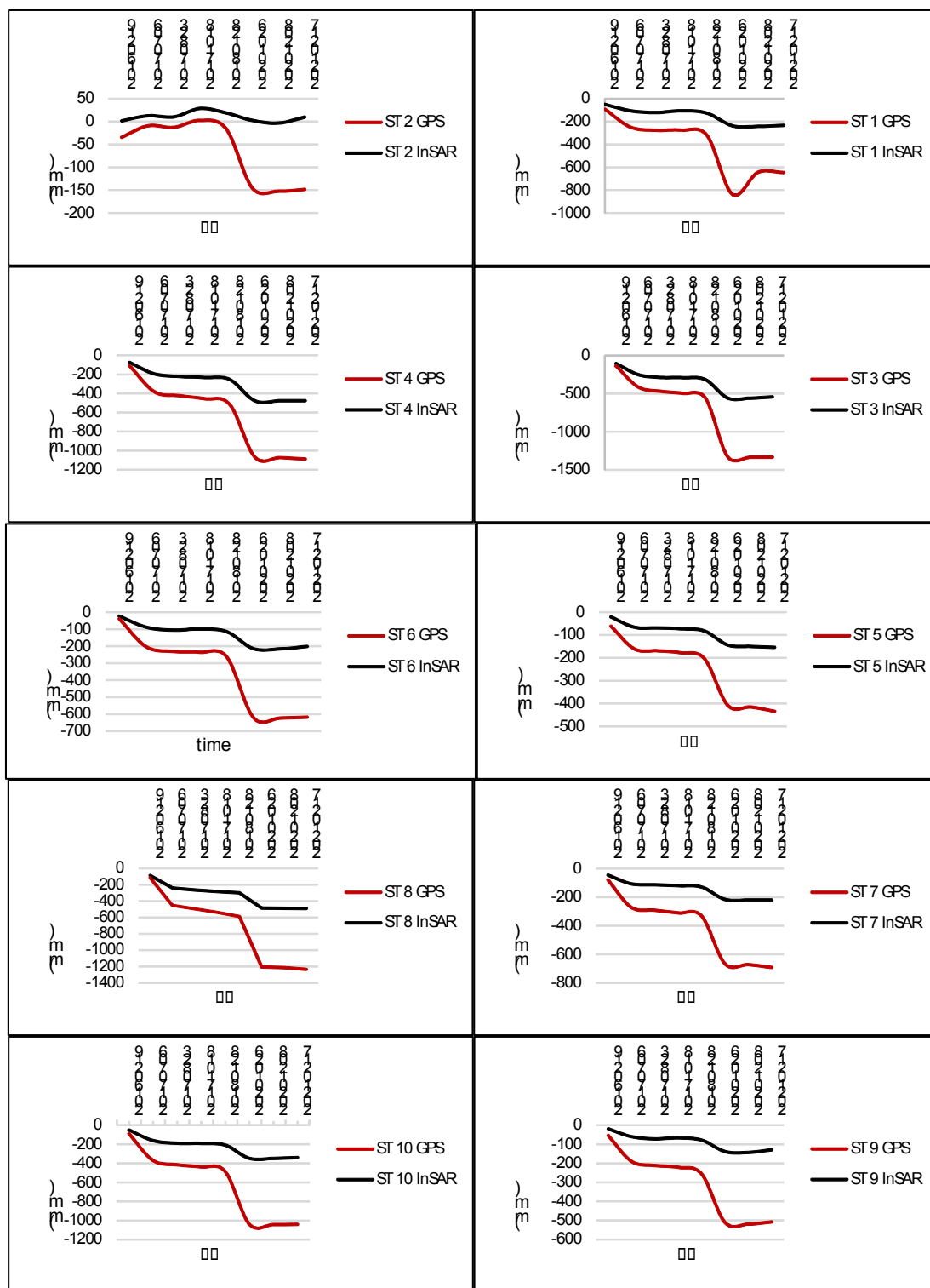
شکل ۷. متوسط نرخ فروروشست زمین در بازه سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ برحسب میلی متر بر سال (mm/y)



شکل ۸. نقشه پراکنش چاه‌های بهره‌برداری در دشت مروذشت - خرامه

تداخل‌نگاشت‌ها نسبت داد؛ زیرا آن را نمی‌توان به‌عنوان نماینده یک نقطه از منطقه نسبت داد (۱۸). بررسی همبستگی بین برداشت GPS و مدل LiCSBAS با شاخص R^2 بررسی شد که به‌جز ایستگاه شماره ۲، بقیه ایستگاه در سطح بیش از ۰/۹ درصد دارای ارتباط و همبستگی خطی هستند.

می‌شود که مقادیر فروروشست‌ها دارای روندی مشابه است. دلیل اختلافات مربوط به اندازه‌گیری فروروشست با دستگاه GPS و تداخل سنجی راداری را می‌توان به خطای اتمسفر باقیمانده در تداخل‌نگاشت‌ها، اثرات مداری و خطای توپوگرافی نسبت داد. همچنین مقدار قابل‌توجهی از اختلافات مربوط را به بزرگ‌بودن پیکسل مکانی در



ایستگاه‌ها	ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5	ST 6	ST 7	ST 8	ST 9	ST 10
R ²	۰/۸۹	۰/۳۴	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶

ST=مخفف ایستگاه

شکل ۹. مقایسه بین نتایج حاصل از سری زمانی تداخل سنجی راداری و GPS

بررسی ارتباط مکانی بین عوامل تأثیرگذار و رخداد

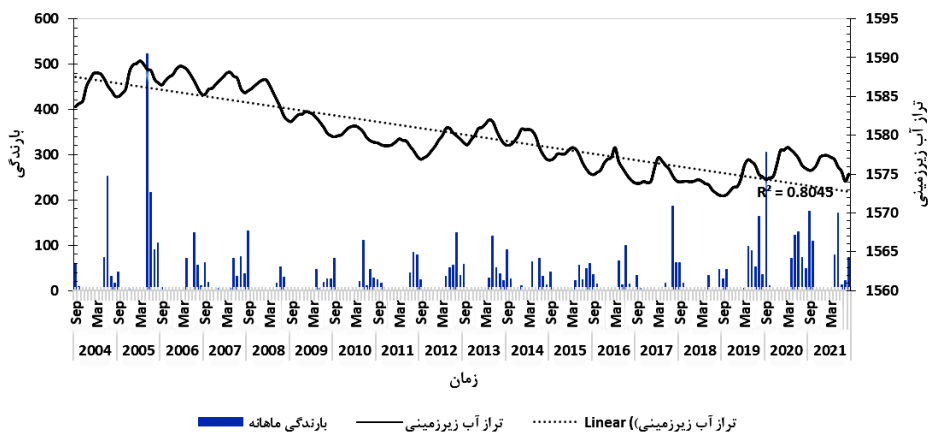
فرونشست با مدل نسبت فراوانی (Frequency Ratio)

نتایج بررسی ارتباط مکانی عوامل تأثیرگذار و رخداد فرونشست با استفاده از مدل نسبت فراوانی (FR) در جدول ۱ ارائه شده است. باتوجه به جدول ۱، بیشترین میزان FR در رابطه با ارتفاع به مقدار $1/68$ و در کلاس $1700 >$ متر رخ داده است. بر این اساس ارتفاع تأثیر خاصی بر رخداد فرونشست ندارد (۱۶ و ۳۰). بررسی نتایج ارتباط عامل انحنای سطح نشان‌دهنده FR به میزان $1/03$ است که در کلاس $0/05$ الی $-0/05$ (تخت) رخ داده است. البته در کلاس بیشتر از $0/05$ (محدب) این پدیده به میزان FR $1/02$ رخ داده است. نتایج بررسی ارتباط TWI با رخداد فرونشست، نشان‌دهنده FR به مقدار $1/45$ در کلاس $18 <$ است. در حالت کلی TWI نشان‌دهنده تجمع آب در یک نقطه در حوضه آبخیز است که نشان‌دهنده رطوبت مکانی است. نتایج این بخش با نتایج قراچه‌ای و همکاران (۱۶) مبنی بر افزایش TWI و احتمال افزایش رخداد فرونشست همخوانی دارد. بررسی ارتباط فاصله از رودخانه و رخداد فرونشست، نشان‌دهنده بیشترین میزان FR به مقدار $2/78$ در کلاس $100-0$ متر است و این نشان‌دهنده این است که هرچه فاصله از رودخانه کمتر باشد، میزان احتمال رخداد فرونشست بیشتر است. در دشت مروذشت - خرامه دو رودخانه اصلی به نام کر و سیوند وجود دارد که هر دو رودخانه در محدوده فرونشست جریان دارند. علت تأثیر مثبت فاصله رودخانه در افزایش نرخ فرونشست را می‌توان به رژیم رودخانه در سال‌های گذشته نسبت داد که خشکسالی به نسبت کمتر روی میزان دبی آن تأثیرگذار بود و باعث به وجود آمدن زمین‌های کشاورزی در اطراف رودخانه و در مرکز دشت شده است و طی سال‌های اخیر و افزایش شدت خشکسالی‌ها، میزان بهره‌برداری از آن کمتر و بهره‌برداری‌ها روی چاه‌های کشاورزی متمرکز شده است (۱۴). در مورد احتمال رخداد فرونشست و کاربری اراضی نتایج نشان داد، بیشترین میزان FR در مناطق جنگل سوزنی‌برگ (۵/۳۳)، سطوح آب‌های دائمی (۵/۳۳) و مناطق شهری (۳/۶۶) و کشاورزی (۳/۵۳) رخ داده است.

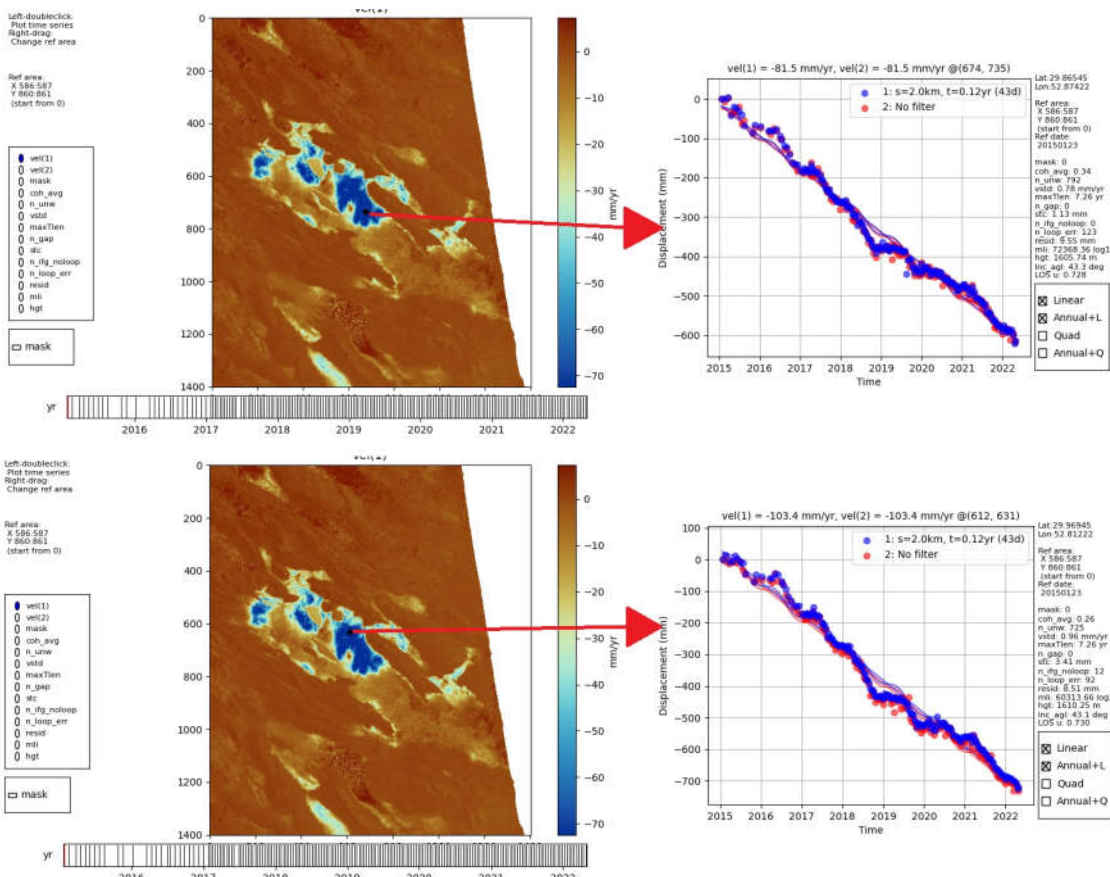
بررسی و مقایسه کلی تخمین فرونشست به روش InSAR و GPS نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۲۰۱۸، روند کلی رخ داد فرونشست ثابت و با شیب کمی همراه بوده است. در ادامه از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۰ این روند افزایشی شده است و بعد از سال ۲۰۲۰، این روند دوباره کاهش یافته است. دلیل این رویداد را می‌توان با ترسیم و بررسی هیدروگراف دشت مروذشت - خرامه (شکل ۱۰) در بازه سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۲۰ نشان داد که طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰، روند افت تراز آب زیرزمینی کاهش یافته که نشان از بارندگی بیشتر نسبت به سال‌های قبل است و گواه آن است که با کاهش نرخ افت تراز آب زیرزمینی در این منطقه، میزان فرونشست زمین کاهش داشته است (۴۳).

بررسی سری زمانی فرونشست

نمودار شکل ۱۱ سری زمانی فرونشست در دو نقطه به صورت تصادفی را در مناطق تحت فرونشست در دشت مروذشت - خرامه با استفاده از نرم‌افزار LiCSBAS نشان می‌دهد. بررسی نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد که الگوی رخ داد فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵ الی ۲۰۲۲ به صورت خطی است. بررسی جزئی‌تر نمودار سری زمانی در هر دو نقطه بیانگر نوسانات ماهانه یا فصلی است. کاهش روند فرونشست زمین مربوط به ماه‌ها یا فصل‌های همراه با بارندگی است که تغذیه آبخوان محتمل‌تر و افزایش روند فرونشست مربوط به ماه‌های خشک (کاهش بارندگی) و زمان بهره‌برداری از آب زیرزمینی است. عموماً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر یک پدیده تدریجی و وابسته به زمان است؛ بنابراین به دنبال کاهش تراز آب زیرزمینی، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد. تعیین تأخیر زمانی بین افت سطح آب و فرونشست به راحتی امکان‌پذیر نیست. همچنین این فاز تأخیر در هر نقطه‌ای متفاوت از نقطه دیگر عمل کرده و به عوامل مختلفی بستگی دارد؛ بنابراین این احتمال وجود دارد که فرونشست حاضر، متأثر از شرایط هیدرولیکی قبل از این بازه باشد که طبق بررسی‌های انجام شده، نقشه پتانسیل فرونشست با الگوی تغییرات سطح آب در سال‌های قبل همخوانی دارد (۲۲) که می‌تواند با تأخیر ۲ تا ۴ ماهه همراه باشد (۳).



شکل ۱۰. هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دشت مرو دشت خرامه از سال ۲۰۰۴ الی ۲۰۲۲



شکل ۱۱. نمودار سری زمانی فرونشست مربوط به دو نقطه در محدوده فرونشست

زمین نشان می‌دهد که در کلاس فاصله ۴۰۰۰-۶۰۰۰ متر از گسل، میزان فرونشست رخدادی (FR) به مقدار ۱/۳۲ می‌رسد. این نتیجه نشان می‌دهد که در این منطقه، موقعیت مکانی گسل و نیروی گسل در رخداد فرونشست تأثیر بسیار کمی دارند.

بررسی احتمال رخداد فرونشست و عامل جهت شیب نشان‌دهنده بیشترین رخداد فرونشست در شیب‌های شمالی غربی (۱/۲۰) و غربی (۱/۱۵) است. نتایج اثر عامل فاصله از گسل در احتمال رخداد فرونشست

جدول ۱. همبستگی مکانی بین مکان فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل FR

نسبت فراوانی	کلاس	عامل اثرگذار	نسبت فراوانی	کلاس	عامل اثرگذار
۰/۱۶	۰ - ۵۰۰		۱/۶۸	۱۵۵۰ - ۱۷۰۰	
۰/۴۵	۵۰۰ - ۲۰۰۰		۰/۱۱	۱۷۰۰ - ۱۹۰۰	
۱/۰۱	۲۰۰۰ - ۴۰۰۰	فاصله تا گسل	۰/۰۷	۱۹۰۰ - ۲۱۰۰	ارتفاع
۱/۳۲	۴۰۰۰ - ۶۰۰۰		۰/۰۱	۲۱۰۰ - ۲۵۰۰	
۱/۱۴	۶۰۰۰ <		۰/۰۱	۲۵۰۰ <	
۱/۴۳	۵ >		۰/۹۴	-۰/۰۵ >	
۰/۷۸	۵ - ۸		۱/۰۳	-۰/۰۵ - ۰/۰۵	انحنای قوس
۰/۵۳	۸ - ۱۱	افت آب زیرزمینی	۱/۰۲	۰/۰۵ <	
۱/۸۹	۱۱ - ۱۵		۰/۸۹	۹ >	
۲/۵۷	۱۵ <		۰/۸۷	۹ - ۱۱	
۰/۲۲	Kbgp		۱/۰۸	۱۱ - ۱۴	شاخص رطوبت
۰	Kda-fa		۱/۳۴	۱۴ - ۱۸	توپوگرافی
۱/۰۵	Qft2		۱/۴۵	۱۸ <	
۰/۰۷	JKkqp		۲/۷۸	۰ - ۱۰۰	
۰	Lake		۲/۷۳	۱۰۰ - ۲۰۰	
۰/۱۸	Ktb		۲/۶۳	۲۰۰ - ۴۰۰	فاصله تا رودخانه
۰/۰۹	Ksv		۲/۳۶	۴۰۰ - ۸۰۰	
۰	Kkz		۰/۸۵	۸۰۰ <	
۱/۶۶	Kgu	لیتولوژی	۰/۰۴	بوته‌ای	
۰/۳۲	Plbk		۰/۲۹	گیاهان علفی	
۰	Eja		۵۳/۳	اراضی کشاورزی	
۰	PeEsa		۳/۶۶	مناطق شهری مسکونی	
۰	pC-Ch		۰/۱۴	زمین لخت	کاربری اراضی
۰	MPlfqp		۵/۳۳	آب‌های دائمی	
۰	MuPlaj		۰	مناطق مرطوب با گیاهان آبی	
۰	OMr		۵/۳۳	جنگل همیشه‌بهار سوزنی‌برگ	
			۲/۳۰	جنگل طبیعی	

جدول ۱. همبستگی مکانی بین مکان فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل FR (ادامه)

نسبت فراوانی	کلاس	عامل اثرگذار	نسبت فراوانی	کلاس	عامل اثرگذار
۰/۹۳	۱۶۰ >				
۰/۹۱	۱۶۰ - ۲۰۰		۰	صاف	
۰/۴۹	۲۰۰ - ۲۸۰	عمق سنگ‌بستر	۰/۸۷	شمالی	
۲/۶۴	۲۸۰ - ۳۴۰		۰/۸۱	شمال شرقی	
۳/۹۳	۳۴۰ <		۰/۹۵	شرق	

۱/۵۳	۴ >		۱/۱۷	جنوب شرقی	جهت
۱/۲۵	۴-۷		۱/۰۳	جنوب	
۰/۳۶	۸-۱۵	درصد شیب	۰/۹۲	جنوب غربی	
۰/۱۲	۱۵ - ۳۰		۱/۱۵	غرب	
۰/۱۲	۳۰ <		۱/۲۰	شمال غربی	

غیر الاستیک در خاک می‌شود و آرایش دانه‌های خاک به هم خورده و آرایش جدید باعث کاهش حجم و ضخامت عمودی لایه‌ها و در نهایت فرونشست زمین می‌شود (۱۵).

نتایج بررسی اثر زمین‌شناسی و احتمال رخداد فرونشست نشان‌دهنده FR به مقدار ۱/۶۶ در کلاس kgu و مقدار ۱/۵ در کلاس QFT2 است. Kgu مربوط به سازند گورپی است که بیشتر مربوط به سنگ مارن و مارن خاکستری است. QFT2 مربوط به رسوبات و تراس آبرفتی ناشی حمل رودخانه است. نتایج مربوط به ارتباط اثر عمق سنگ کف بستر آبخوان و رخداد فرونشست نشان می‌دهد که میزان FR (۳/۹۳) در کلاس بیش از ۳۴۰ متر است که نشان‌دهنده افزایش عمق سنگ‌بستر و افزایش رخداد فرونشست است. دشت مرودشت یک دشت آبرفتی میان کوهی است که ضخامت رسوبات از حواشی دشت به سمت مرکز افزایش می‌یابد. مقدار فرونشست نیز به تبعیت از شکل دشت، ضخامت رسوبات و افزایش رسوبات ریزدانه در مرکز دشت، از حاشیه به سمت مرکز دشت، افزایش را نشان می‌دهد (۴۳).

در پایان نتایج ارتباط درصد شیب با رخداد پدیده فرونشست، نشان‌دهنده FR در شیب کمتر از چهار درصد است و هرچه شیب کمتر باشد، احتمال رخداد فرونشست بیشتر است (۱۶ و ۲۳).

همچنین به دلیل اینکه گسل‌های مرکزی دشت به صورت موازی بر منطقه تحت فرونشست قرار دارد، احتمال اثرگذاری فعالیت گسل‌های مرکز دشت بر فرونشست را نمی‌توان نادیده گرفت. باتوجه به اینکه کاهش سطح آب زیرزمینی در رخداد فرونشست تأثیر بسیار زیادی دارد، نتایج بررسی ارتباط بین افت آب زیرزمینی و رخداد فرونشست زمین در این منطقه نشان می‌دهد که در کلاس افت بیشتر از ۱۵ متر، مقدار FR به ۲/۵۷ می‌رسد و نشان می‌دهد که افزایش افت آب زیرزمینی تأثیر قابل توجهی در افزایش رخداد فرونشست دارد. مقایسه نقشه افت تراز آب زیرزمینی در شکل (F-۶) با نقشه فرونشست (شکل ۷) نشان می‌دهد، انطباق معنی‌داری بین فرونشست و افت تراز آب زیرزمینی وجود دارد؛ بدین صورت که در مرکز دشت بیشترین افت تراز آب زیرزمینی و فرونشست دیده می‌شود. همچنین بررسی پروفیل P16 مربوط به مرکز دشت (شکل ۳) نشان می‌دهد که نواحی تحت فرونشست در محدوده آبخوان، دارای آبرفت دانه‌ریز آبدار و روی سنگ بستر حاوی شیل و مارن است و یکی از پارامترهای اثرگذار بر روی فرونشست، ضخامت لایه ریزدانه است (۴) که در اثر زهکشی آب در لایه‌های ریزدانه و در اثر افت فشار هیدرولیکی، تنش مؤثر افزایش یافته و سبب افزایش تراکم

فرونشست با استفاده از منحنی ROC و AUC (شکل ۱۳) ارزیابی شد. نتایج ارزیابی مدل با مقدار AUC ۰/۹۱ (بدون فرونشست)، مقدار ۰/۹۷ (خیلی شدید)، ۰/۸۹ (متوسط)، ۰/۸۵ (کم) و ۰/۹۳ (شدید) نشان‌دهنده قابلیت پیش‌بینی عالی برای مدل‌سازی فرونشست است. مطالعات متعددی از جمله (۲۷، ۳۲، ۳۴ و ۳۶) کارایی زیاد مدل‌سازی توسط الگوریتم جنگل را تأیید کرده‌اند؛ زیرا این الگوریتم به دلیل عدم حساسیت به نویز و داده‌های پرت قابلیت زیادی در تحلیل داده‌های ورودی با ماهیت مختلف و شناسایی لایه پراهمیت را داراست. نتایج بررسی نقشه مدل‌سازی خطر فرونشست دشت مروودشت - خرامه نشان می‌دهد که شهر تخت جمشید، شهر مروودشت و روستاهای زنگی‌آباد، عماد آباد، بند امیر، گرم‌آباد، اشگرد و حسام آباد در محدوده فرونشست شدید و بسیار شدید قرار دارند.

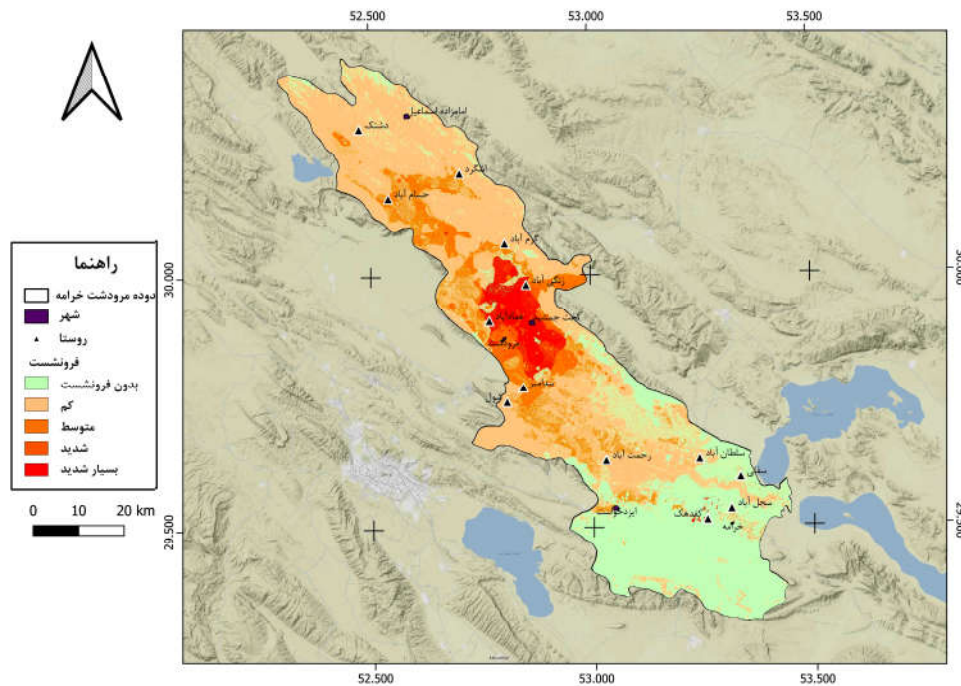
ارزیابی عوامل مؤثر با استفاده از تکنیک داده‌کاوی به روش جنگل تصادفی

در این مطالعه به بررسی و شناخت عامل مؤثر بر فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی پرداخته شد. به‌طور کلی استفاده از شاخص میانگین کاهش دقت در برابر شاخص اهمیت جینی در شناسایی اولویت و میزان اهمیت متغیرها بهتر و مناسب‌تر است (۳۴). باتوجه به شکل ۱۴ و بر اساس شاخص میانگین کاهش دقت، عامل عمق سنگ کف بستر آبخوان و افت آب زیرزمینی یکی از عوامل مؤثر و تأثیرگذار در رخداد فرونشست بودند. عامل افت آب زیرزمینی در افزایش احتمال رخداد فرونشست در مناطق و ادبیات مختلف شناخته شده است. عامل عمق سنگ‌بستر نیز در ارتباط با آب زیرزمینی است؛ بدین‌صورت که هر جا عمق سنگ بستر افزایش داشته باشد، ضخامت آبخوان افزایش پیدا می‌کند. اهمیت متغیرهای افت آب زیرزمینی در رخداد فرونشست زیاد است (۱۱، ۳۶، ۴۱ و ۴۶). باتوجه به نتایج در شکل ۱۴، عامل‌های کاربری زمین، زمین‌شناسی و فاصله از گسل در رده بعدی قرار می‌گیرند. عامل‌های ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، TWI و درجه شیب به ترتیب به سمت کمترین تأثیر در ایجاد فرونشست شناخته شده‌اند.

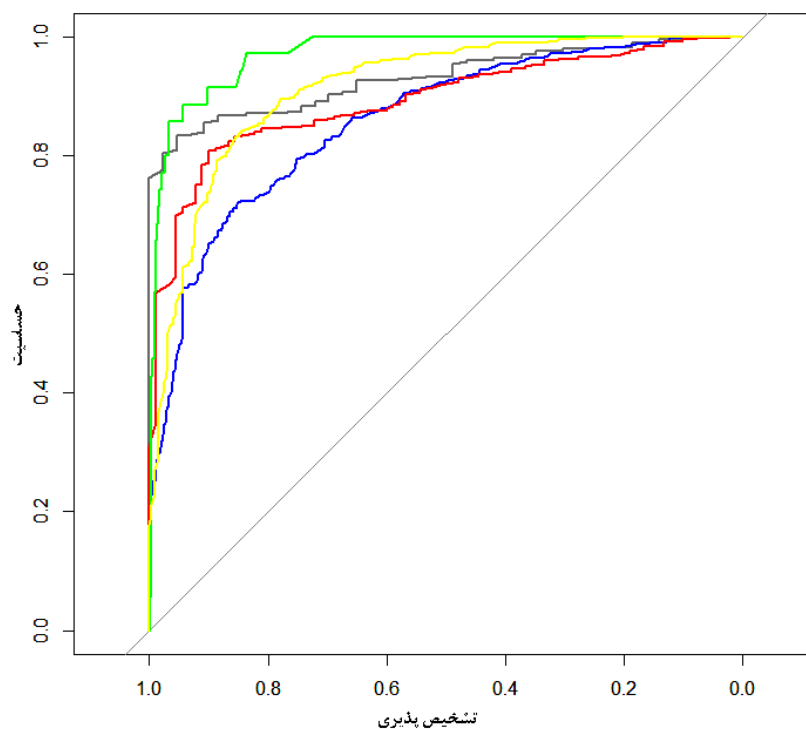
آماده‌سازی نقشه حساسیت فرونشست زمین با استفاده از مدل جنگل تصادفی

به منظور اجرای مدل جنگل تصادفی از نرم‌افزار R و بسته Random forest استفاده شد. نقشه نهایی فرونشست به دست آمده از مدل LiCSBAS توسط تابع شکست طبیعی به کلاس‌های فاقد فرونشست (بیش از صفر)، کم (۰ - ۱۱۰)، متوسط (۲۸۰ - ۱۱۰)، زیاد (۵۱۰ - ۱۱۰) و خیلی زیاد (۹۰۵ - ۵۱۰) تقسیم‌بندی شد (شکل ۷). در ادامه ۲۰۰۰ نقطه به صورت تصادفی در نرم‌افزار QGIS از نقشه طبقه‌بندی شده استخراج شد و سپس نقاط مستخرج به همراه ۱۱ متغیر محیطی به منظور مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست در دشت مروودشت - خرامه استفاده شد. در مدل‌سازی با مدل جنگل تصادفی، تعریف دو پارامتر درخت‌های تصمیم در هر گره m_{try} و تعداد درختان مدنظر در جنگل برای اجرای مدل (n_{tree}) مهم و برای کاهش خطای کلی مدل مطرح است. در این مدل مقدار n_{tree} مختلف از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ به منظور دستیابی به بیشترین مقدار AUC مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار ۴۰۰ به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. همچنین با استفاده از عملگر tuneRF در بسته randomforest (Package)، مقدار ۳ به عنوان m_{try} انتخاب شد.

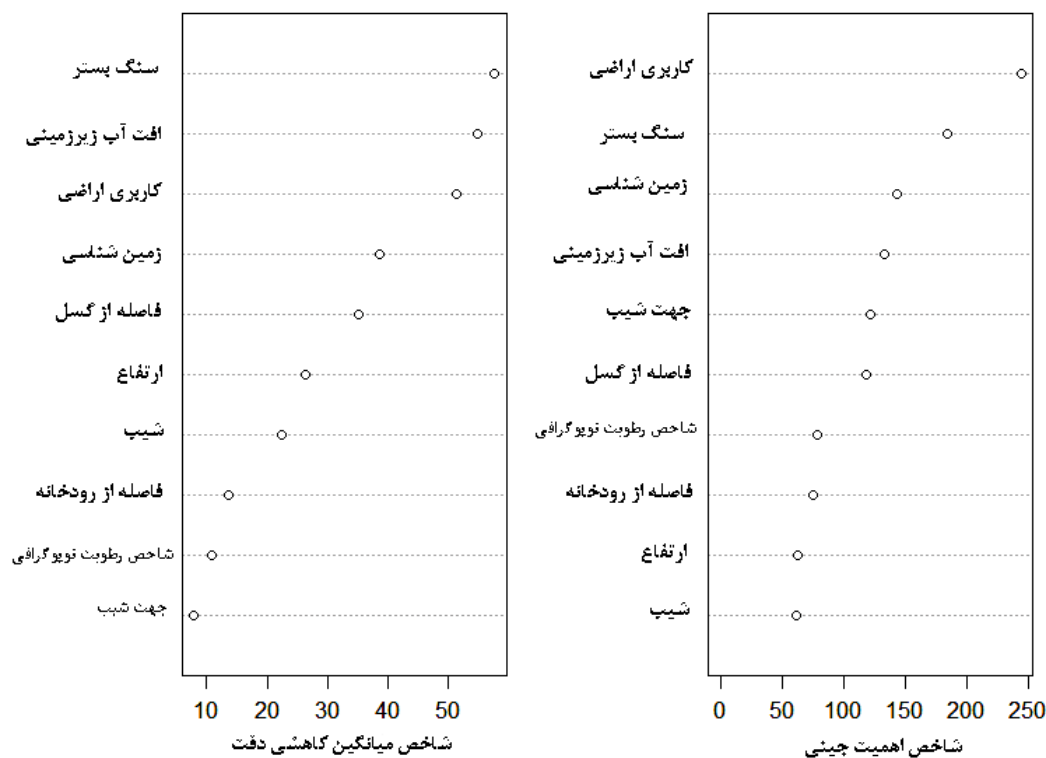
درصد مساحت سطح طبقات حساسیت منطقه به فرونشست در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که ۵۱ درصد از منطقه در ناحیه کلاس کم قرار دارد و در بقیه مناطق کلاس‌های مساحت بدون فرونشست، متوسط، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۳۳، ۹، ۳ و ۴ درصد است. در ارزیابی مدل ضریب کاپا مقدار ۰/۵۱ درصد را نشان داد که نشان‌دهنده نتیجه تقریباً قابل‌قبولی است. بر اساس (۴۷) ضریب کاپا بین ۰/۲ - ۰/۱، ۰/۴ - ۰/۲۱، ۰/۶۰ - ۰/۴۱، ۰/۸۰ - ۰/۶۱ و ۰/۹۹ - ۰/۸۱ به ترتیب نشان از توافق اندک، منصفانه، متوسط، قابل توجه و عالی دارد. مقدار ضریب کاپا بین ۱ - تا ۱ است و هر چه به سمت ۱ مثبت نزدیک‌تر باشد نتیجه توافق و نتیجه قابل‌قبول‌تری است. در این مطالعه میزان دقت کلی مدل میزان ۷۲ درصد نشان داده شده که نشان‌دهنده یک مدل خوب است. در ادامه پهنه‌بندی نقشه حساسیت



شکل ۱۲. نقشه حساسیت به فرونشست دشت مرودشت - خرامه استخراج شده از الگوریتم جنگل تصادفی



شکل ۱۳. منحنی ROC مدل جنگل تصادفی رنگ زرد مربوط به منحنی فاقد فرونشست، رنگ آبی مربوط به خطر فرونشست کم، رنگ قرمز مربوط به خطر فرونشست متوسط، رنگ خاکستری مربوط به خطر فرونشست شدید و رنگ زرد مربوط به خطر فرونشست خیلی شدید است.



شکل ۱۴. اهمیت متغیرها بر اساس شاخص میانگین کاهشی دقت و شاخص اهمیت جینی

می‌دهد که محدوده فرونشست با مناطق کشاورزی و مناطقی که دارای ضخامت رسوبات ریزدانه بیشتری هستند، انطباق دارد. بررسی تأثیر عوامل مؤثر با استفاده از مدل FR نشان می‌دهد که کاهش آب زیرزمینی، عمق سنگ‌بستر، مناطق با شیب کم و کاربری کشاورزی و انسان‌ساخت منجر به افزایش فرونشست زمین می‌شود. بررسی و مدل‌سازی فرونشست در دشت مرودشت - خرامه با استفاده از مدل RF نشان می‌دهد که عمق سنگ کف آبخوان، کاهش آب زیرزمینی، کاربری اراضی و نوع سازند زمین شناسی منطقه در رخداد فرونشست در این دشت تأثیرگذار هستند.

برایند کلی این مطالعه نشان می‌دهد، در دشت مرودشت - خرامه افت تراز آب زیرزمینی و همچنین وجود لایه ریزدانه در آبخوان آبرفتی باعث کاهش فضای خالی و تحکیم رسوبات در آبخوان این دشت شده که باعث ایجاد پدیده فرونشست شده است. باتوجه به مطالعه شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس در این منطقه، مجموعه اقداماتی از قبیل استفاده بیش از حد از منابع

نتیجه‌گیری کلی

فرونشست زمین یک پدیده مشکل‌ساز زیست‌محیطی، هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی است که در بیشتر دشتهای ایران رخ می‌دهد. این پدیده تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های سنتینل ۱ و نرم‌افزار LiCSBAS، مقدار فرونشست در دشت مرودشت - خرامه محاسبه شد. سپس با بررسی مطالعات مختلف و در دسترس بودن داده‌های اطلاعاتی، ۱۱ عامل مؤثر بر فرونشست دشت مرودشت - خرامه انتخاب شدند. در انتها، با استفاده از شاخص نسبت فراوانی و مدل جنگل تصادفی، عوامل مؤثر شناسایی شدند و نقشه حساسیت به فرونشست دشت مرودشت - خرامه باتوجه به اثرگذاری این عوامل توسط مدل جنگل تصادفی تهیه شد. ارزیابی خطر فرونشست در این دشت نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست تا ۹۰۵ میلی‌متر طی هفت سال در مرکز دشت وجود دارد و نرخ فرونشست در این دشت ۱۱/۶ سانتی‌متر در سال است. بررسی پروفیل آبخوان نشان

برنامه‌ریزان و مدیران برای کاهش خطرات بلایای طبیعی مانند فرونشست و ایجاد عملیات پیشگیرانه مورداستفاده قرار گیرد. در پایان، توصیه می‌شود که در آینده با مقایسه نتایج روش‌های مختلف یادگیری ماشین و توسعه مدل‌های کارآمدتر با در نظر گرفتن فاکتورهای بیشتر، به منظور شناسایی و تحلیل خطرات چندجانبه در دشت مرودشت - خرامه اقدام شود.

آب زیرزمینی، تغییرات اقلیمی، خشکسالی و ایجاد چاه‌های آبیاری جدید، منجر به عدم تعادل بین برداشت و جبران آب زیرزمینی شده است. این عوامل به وقوع فرونشست در منطقه پیوسته و گسترش آن را تسریع کرده‌اند. به همین دلیل، حفظ تعادل و تغذیه منابع آبخوان و حفظ تراز آب زیرزمینی به عنوان یک راهکار عملیاتی بسیار دارای اهمیت است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان یک راهنمای مناسب برای

منابع مورد استفاده

1. Abedi Gheshlaghi, H., B. Feizizadeh and T. Blaschke. 2020. GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *Journal of Environmental Planning and Management* 63(3): 481-499. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726>
2. Andy, L. and W. Matthew. 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2: 18-22.
3. Arjmand Sharif, M. and H. Jafari. 2021. Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method. *Water and Soil* 35(4): 489-504. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.70672.1058>
4. Bagheri-Gavkosh, M., S.M. Hosseini, B. Ataie-Ashtiani, Y. Sohani, H. Ebrahimian, F. Morovat and S. Ashrafi. 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778: 146193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>
5. Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*. Statistics Department University of California Berkeley, CA 94720(45): 5-32.
6. Burgmann, R., P. A. Rosen and E. J. Fielding. 2000. Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 28: 169-209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
7. Dong, S., S. Samsonov, H. Yin, S. Ye, and Y. Cao. 2014. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental Earth Sciences* 72(3): 677-691. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2990-y>
8. Du, Z., L. Ge, A.H.M. Ng, Q. Zhu, X. Yang and L. Li. 2018. Correlating the subsidence pattern and land use in Bandung, Indonesia with both Sentinel-1/2 and ALOS-2 satellite images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 67: 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.001>
9. Ebrahimi, H. and M. Azadbakht. 2019. Downscaling MODIS land surface temperature over a heterogeneous area: An investigation of machine learning techniques, feature selection, and impacts of mixed pixels. *Computers and Geosciences* 124: 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.01.004>
10. Ebrahimi, H., B. Feizizadeh, S. Salmani and H. Azadi. 2020. A comparative study of land subsidence susceptibility mapping of Tasuj plane, Iran, using boosted regression tree, random forest and classification and regression tree methods. *Environmental Earth Sciences* 79(10): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08953-0>
11. Elmahdy, S. I., M. M. Mohamed, T. A. Ali, J. E. D. Abdalla and M. Abouleish. 2022. Land subsidence and sinkholes susceptibility mapping and analysis using random forest and frequency ratio models in Al Ain, UAE. *Geocarto International* 37(1): 315-331. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1716398>
12. Ezquerro, P., G. Herrera, M. Marchamalo, R. Tomás, M. Béjar-Pizarro and R. Martínez. 2014. A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrology* 519(PA): 1192-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.040>
13. Fárová, K., J. Jelének, V. Kopačková-Strnadová and P. Kycl. 2019. Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: A case study of a massive Dobkovičky landslide, Czech Republic. *Remote Sensing* 11(22): 2670. <https://doi.org/10.3390/rs11222670>
14. Fars Regional Water Authority. 2016. Update of the water resources balance in the study areas of the Tashk-Bakhtegan Lake Basin and the Maharlou Basin, up to the year 2010-2011.
15. Galloway, D. L. and T. J. Burbey. 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal* 19(8): 1459-1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>

16. Gharechae, H., A. N. Samani, S. K. Sigaroodi, A. Baloochiyan, M. S. Moosavi, J. A. Hubbart, J. A. S. M. M. Sadeghi. 2023. Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and Machine Learning Models in a Semiarid Region of Iran. *Land* 12(4): 843. <https://doi.org/10.3390/land12040843>
17. Ghorbani, Z., A. Khosravi, Y. Maghsoudi, F. F. Mojtahedi, E. Javadnia and A. Nazari. 2022. Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. *Scientific Reports*, 12(1): 13998. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17438-y>
18. Haghghatmehr, P., M. J. Valadanouzj, R. Tajik, S. Jabari, M. R. Sahebi, R. Eslami, M. Ganjiyan and M. Dehghani. 2012. Time Series Analysis of Hashtgerd Subsidence Using Radar Interferometry and Global Positioning System. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 22(85): 105–114. <https://doi.org/10.22071/gsj.2012.54026>
19. Janbaz Fotamy, M., M. Kholghi, A. Abdeh Kolahchi and M. Roostaei. 2020. Land Subsidence Assessment due to Groundwater Exploration by using Differential Radar Interferometry Technique, Case Study: Qazvin province. *Iran-Water Resources Research* 16(3): 133-147. https://www.iwrr.ir/article_115261.html
20. Jenks, G. F., F. C. Caspall. 1971. Error on Choroplethic Maps: Definition, Measurement, Reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 61(2): 217–244. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
21. Khan, S. D., Z. Huang and A. Karacay. 2014. Study of ground subsidence in northwest Harris county using GPS, LiDAR, and InSAR techniques. *Natural Hazards* 73(3): 1143–1173. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1067-x>
22. Khosravani, Z., M. Akhavan Ghalibaf, M. Dehghani, V. Derhami and M. Bolca. 2022. Modeling of land subsidence in Abarkouh plain using Synthetic aperture radar method and artificial intelligence. *Journal of Range and Watershed Management* 75(3): 429–448. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2022.340930.1652>
23. Landis, J. R. and G. G. Koch. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33(1): 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
24. Li, S., W. Xu and Z. Li. 2022. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics* 13(2): 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>
25. Mohammady, M., H. R. Pourghasemi and M. Amiri. 2019. Land subsidence susceptibility assessment using random forest machine learning algorithm. *Environmental Earth Sciences* 78(16): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8518-3>
26. Morishita, Y., M. Lazecky, T. J. Wright, J. R. Weiss, J. R. Elliott and A. Hooper. 2020. LiCSBAS: An open-source insar time series analysis package integrated with the LiCSAR automated sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing* 12(3): 424. <https://doi.org/10.3390/rs12030424>
27. Naghibi, S. A., H. R. Pourghasemi and B. Dixon. 2016. GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(1): 1–27. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5049-6>
28. Orhan, O. 2021. Monitoring of land subsidence due to excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08962-x>
29. Parang, Soran. 2018. InSAR in Earth Science Research. tehran satalite.
30. Park, I., J. Lee and L. Saro. 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Central European Journal of Geosciences* 6(2): 207–218. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0175-y>
31. Plain, B., C. Zhou, H. Gong, B. Chen, J. Li, M. Gao and F. Zhu. 2017. InSAR Time-Series Analysis of Land Subsidence under Different Land Use Types in the Eastern. *Remote Sensing* 9(4):380. <https://doi.org/10.3390/rs9040380>
32. Pourghasemi, H. R. and N. Kerle. 2016. Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences* 75(3): 185. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4950-1>
33. Pourghasemi, H. R. and M. Mohseni Saravi. 2017. Land-Subsidence Spatial Modeling Using Generalized Additive Model Data Mining Technique. *Watershed Management Research Journal* 30(4): 20–34. <https://doi.org/10.22092/wmej.2018.117083>
34. Pourghasemi, H. R. and M. Mohseni Saravi. 2019. Land-Subsidence Spatial Modeling Using the Random Forest Data-Mining Technique. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences* 147–159. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815226-3.00006-5>
35. Prasad, A. M., L. R. Iverson and A. Liaw. 2006. Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems* 9(2): 181–199. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0054-1>
36. Rahmati, O., A. Golkarian, T. Biggs, S. Keesstra, F. Mohammadi and I. N. Daliakopoulos. 2019. Land subsidence hazard modeling: Machine learning to identify predictors and the role of human activities. *Journal of Environmental Management* 236: 466–480. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.020>
37. Rahmati, O., A. Haghizadeh, H. R. Pourghasemi and F. Noormohamadi, F. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards* 82(2): 1231–

1258. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2239-7>
38. Ranjbar Barough, Z. and M. fathallahzadeh. 2022. Investigation of land subsidence, using time series of radar images and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj metropolis). *Quantitative Geomorphological Research* 10(4): 138–155. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.313426.1313>
39. Raucoules, D., C. Maisons, C. Carnec, S. Le Mouelic, C. King and S. Hosford. 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment* 88(4): 468–478. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.005>
40. Sadjadi, S. J. 2022. Review on current status and challenging issues of land subsidence in Iran. *Journal of Future Sustainability* 2(1): 33–38. <https://doi.org/10.5267/j.jfs.2022.9.001>
41. Suganthi, S. and L. Elango. 2020. Estimation of groundwater abstraction induced land subsidence by SBAS technique. *Journal of Earth System Science*, 129(1): 46. <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1298-z>
42. Sui, L., F. Ma and N. Chen. 2020. Mining subsidence prediction by combining support vector machine regression and interferometric synthetic aperture radar data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9(6): 390. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060390>
43. Tajik, R. and M. Roostaei. 2021. Monitoring of Marvdasht plain subsidence rate using GPS network and radar images.
44. Toll, D. G. 1996. Artificial intelligence applications in geotechnical engineering. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1: 1-11.
45. Tsendbazar, N. E., A. Tarko, L. Linlin, M. Herold, M. Lesiv, S. Fritz, M. Victor. 2020. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Version 3 Globe 2015-2019. Validation Report; Zenodo, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3938974>
46. Ye, S., Y. Xue, J. Wu, X. Yan and J. Yu. 2016. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal* 24(3): 685–693. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1356-9>
47. Zhang, K., X. Wu, R. Niu, K. Yang and L. Zhao. 2017. The assessment of landslide susceptibility mapping using random forest and decision tree methods in the Three Gorges Reservoir area, China. *Environmental Earth Sciences* 76(11): 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6731-5>
48. Zhang, Y., Y. Liu, M. Jin, Y. Jing, Y. Liu, Y. Liu, W. Sun, J. Wei and Y. Chen. 2019. Monitoring land subsidence in wuhan city (China) using the SBAS-INSAR method with radarsat-2 imagery data. *Sensors* 19(3): 743. <https://doi.org/10.3390/s19030743>
49. Zhou, G., H. Yan, K. Chen and R. Zhang. 2016. Spatial analysis for susceptibility of second-time karst sinkholes: A case study of Jili Village in Guangxi, China. *Computers and Geosciences*, 89: 144–160. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.001>
50. Zhou, L., Y. Zhao, Z. Zhu, C. Ren, F. Yang, L. Huang and X. Li. 2022. Spatial and Temporal Evolution of Surface Subsidence in Tianjin from 2015 to 2020 Based on SBAS-InSAR Technology. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science* 5(1): 60-72.

Assessment and Spatial Modeling of Land Subsidence Hazard Using the LiCSBAS Model and Random Forest Algorithm (Case Study: Marvdasht Kharameh Plain)

M. Khajeh¹, C. B. Komaki^{1*}, M. Rezaei², V. Sheikh³ and L. Ebadi⁴

(Received: October 2-2023 ; Accepted: April 8-2024)

Abstract

In the future, the risk of land subsidence due to water resources shortage crisis and improper water resources management will become more and more dangerous. It is necessary to assess and identify areas susceptible to subsidence risk and take necessary actions to reduce risks related to land subsidence. In this study, first, the risk of land subsidence was identified and evaluated using a radar interferometry method called LiCSBAS. Then, the spatial relationship between the occurrence of land subsidence hazard and effective factors such as ground elevation, slope, slope aspect, lithology, land use, groundwater decline, distance from rivers, distance from faults, topographic moisture index, and arc curvature was investigated using the random forest (RF) model. In the end, the land subsidence hazard sensitivity map was prepared after calibrating the random forest algorithm. The analysis of LiCSBAS interferometric time series data from 2015 to 2022 showed that the center of the Marvdasht-Kharameh plain and adjacent agricultural areas are continuously subsiding and the mean deformation rate map showed a subsidence rate of 11.6 centimeters per year. The results of determining the spatial relationship between subsidence occurrence and effective factors confirmed the positive impact of distance from rivers, urban and agricultural land uses, depth of bedrock (aquifer thickness), groundwater decline, and alluvial and fine-grained formations on this phenomenon. Also, the results of subsidence modeling using the random forest algorithm showed that factors such as bedrock depth, groundwater decline, land use, and geology have the greatest impact on the potential for subsidence occurrence in the study area. Also, based on the results, about 3 to 4 percent of the areas are in the very high and extremely high-risk classes of land subsidence, especially in the center and suburbs of Mervdasht. Therefore, water resources management and control and developing a systematic program to reduce subsidence risk and aquifer recharge conservation in Merudasht-Kharameh Plain is essential.

Keywords: Risk assessment, Subsidence, LiCSBAS technique, Marvdasht-Kharameh plain, Random forest model

1- Department of Arid Regions Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2- Department of Geology, Faculty of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran.

3- Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

4- Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University (GU), Golsetan, Iran.

*: Corresponding author, Email: komaki@gau.ac.ir, bkomaki@gmail.com