



مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در دشت ورامین با استفاده از نرم‌افزار LiCSBAS و مدل جنگل تصادفی

محمد کاوه چلچله^۱، حمیدرضا ناصری^{۲*}، فرشاد علی‌جانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استاد، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ایمیل: h-nassery@sbu.ac.ir

۳- دانشیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر دشت ورامین با فرونشست زمین مواجه شده است. این پژوهش با هدف پیش‌بینی و بررسی تأثیر عوامل هیدروژئولوژیک بر فرونشست با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام شده است. بدین منظور نرخ فرونشست سال‌های ۱۴۰۳-۱۳۹۳ با استفاده از نرم‌افزار LiCSBAS و تصاویر ماهواره Sentinel-1 محاسبه شد. بیش‌ترین نرخ فرونشست ۱۰ سال، ۹۵۵/۱ میلی‌متر طی در بخش جنوبی دشت رخ داده است. عمق سنگ‌کف، افت سطح و عمق آب زیرزمینی، درصد رس، برداشت از چاه‌ها و فاصله از گسل و رودخانه به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند. نوآوری پژوهش، تلفیق هدفمند نتایج LiCSBAS با جنگل تصادفی به منظور پیش‌بینی فرونشست و کمی‌سازی اهمیت عوامل هیدروژئولوژیک است. ضریب تعیین ۰/۹۵ و اعتبارسنجی متقابل، بیان‌گر اعتبار بالای مدل است. نرخ فرونشست و اعتبار مدل با مطالعات گذشته هم‌خوانی دارد. شاخص جینی، عمق سنگ‌کف را با ۲۷/۵٪ کاهش ناخالصی، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار معرفی کرد. عمق سطح آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. برای ۱۰ سال آینده بیشینه فرونشست ۷۵۶/۶ میلی‌متر پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهد افت آب زیرزمینی تنهایی منجر به فرونشست نمی‌شود و عمق سنگ‌کف و نوع رسوبات نقش تعیین‌کننده دارند. کارایی رویکرد یکپارچه LiCSBAS و جنگل تصادفی در محاسبه، پیش‌بینی و شناسایی عوامل مؤثر بر فرونشست نیز تأیید شد.

کلمات کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، آب زیرزمینی، اهمیت متغیر، آبخوان، یادگیری ماشین.

فرونشست زمین یک مسئله جهانی است که توجه فوری و مداوم را می‌طلبد. فرونشست زمین یک پدیده زیست‌محیطی، به معنی نشست تدریجی و یا پایین رفتن ناگهانی سطح زمین به دلیل متراکم شدن مواد زیرسطحی است (Zhan et al., 2025). بر اساس تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، پدیده فرونشست زمین، شامل نشست رو به پایین سطح زمین با چند میلی‌متر تا چند متر جابجایی در جهت قائم و جابجایی افقی ناچیز است (Galloway and Burbey, 2011). کشور ایران با اقلیم خشک و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با کسری ذخیره مخزن آب زیرزمینی روبرو گردیده که موجب فرونشست در بسیاری از دشت‌ها شده است (Babae et al., 2020; Motagh et al., 2007, 2008; Razavi-Termeh et al., 2026). آبخوان ورامین در جنوب شرق تهران نیز از این قاعده مستثنی نیست و در سال‌های اخیر با افت سطح آب و پدیده فرونشست مواجه شده است (Ghahroudi Tali and Ghavitan, 2025). بنابراین، تعیین نرخ دقیق این پدیده و شناسایی عوامل کنترل‌کننده آن در این منطقه، گامی ضروری برای مدیریت این بحران به شمار می‌رود.

به‌منظور محاسبه نرخ فرونشست تاکنون تکنیک‌های متعددی مانند استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی، روش ژئودزی، دوربین‌های نقشه‌برداری، اسکن لیزری و لیدار برای پایش تغییرات سطح زمین ارائه شده است (Rather and Bukhari, 2025). به علت هزینه زیاد، زمان‌بر بودن و پوشش سطح محدود استفاده از این روش‌ها در گستره‌های وسیع مقرون‌به‌صرفه نیست (Ge et al., 2026; Hong et al., 2007). در مقابل، تداخل‌سنجی راداری^۱ مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای رادار روزنه مصنوعی^۲، به‌عنوان یک جایگزین کارآمد مطرح است. این تکنیک با قابلیت عملکرد در تمام شرایط جوی، پوشش گسترده و دقت میلی‌متری، یکی از دقیق‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌های پایش فرونشست در جهان شناخته می‌شود (Metternicht et al., 2005). همچنین با استفاده از تحلیل سری زمانی می‌توان دقت خروجی را تا میلی‌متر بهبود بخشید (Perissin, 2016). یکی از روش‌های متداول محاسبه فرونشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، روش زیرمجموعه خط‌مبنای کوچک^۳ (SBAS) است که با استفاده از تعداد زیادی تصویر SAR، اقدام به تولید تداخل‌نگارهای متعدد با خط‌مبنای مکانی و زمانی کوچک می‌کند. این روش در واقع ترکیبی از تداخل‌نگارهای تفاضلی چندنما^۴ است که امکان پایش سری‌زمانی جابجایی‌ها را با دقت بالا فراهم می‌آورد (Berardino et al., 2003). چندین بسته نرم‌افزار برای پردازش InSAR تولید شده که از نظر فنی پیچیده و استفاده از آن‌ها برای افراد غیرمتخصص ممکن است چالش برانگیز باشد. برای غلبه بر این چالش‌ها نرم‌افزار LiCSBAS معرفی شده که مشکل حجم بالای تصاویر را با کاهش رزولوشن مکانی به ۵۰ متر و انجام پیش‌پردازش‌های لازم روی تصاویر کاهش داده است.

مدیریت مؤثر فرونشست زمین، فراتر از تعیین نرخ آن، نیازمند شناسایی مناطق پرخطر و تحلیل عوامل مؤثر بر این پدیده است (Huning et al., 2024). نرخ و الگوی مکانی فرونشست تحت تأثیر عوامل متعدد و پیچیده‌ای از جمله ویژگی‌های هیدروژئولوژیک و فعالیت‌های انسانی قرار دارد (Teatini et al., 2011). اگرچه مدل‌های مبتنی بر فرآیند می‌توانند برای پیش‌بینی نرخ فرونشست مورد استفاده قرار گیرند، اما این مدل‌ها به



داده‌های گسترده و دانش دقیق از پارامترهای سیستم نیاز دارند که کاربرد آن‌ها را در مقیاس بزرگ با چالش مواجه می‌سازد (Kumar et al., 2022). از سوی دیگر، روش‌های آماری سنتی نیز در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین این متغیرهای پیچیده ناتوان است. در این راستا، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌ویژه رویکرد جنگل تصادفی، به دلیل توانایی در کشف روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرهای مستقل و وابسته، بدون نیاز به پیش‌فرض‌های سخت‌گیرانه، جایگزین مناسبی محسوب می‌شوند (Joshi et al., 2023). این الگوریتم علاوه بر دقت بالا در پیش‌بینی، قابلیت تعیین اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای مؤثر را نیز فراهم می‌کند که در درک مکانیسم‌های حاکم بر پدیده فرونشست بسیار ارزشمند است (Hasan et al., 2023). محبی تفرشی و همکاران (Mohebbi Tafreshi et al., 2021) در پژوهشی در دشت ورامین با استفاده از مدل‌سازی فضایی منطق فازی در محیط GIS به ارزیابی خطر فرونشست زمین پرداخته و ۱۴ عامل مؤثر از جمله ضخامت آبخوان، عمق سنگ کف و افت سطح آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج کلی نشان می‌دهد بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت ورامین بالاترین پتانسیل فرونشست را دارند. در این میان، ضخامت نسبتاً کم آبخوان در این نواحی، کاهش عمق سنگ کف و به‌ویژه افت شدید سطح آب زیرزمینی (طی ۲۰ سال) به عنوان مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده فرونشست شناسایی شده‌اند. در مطالعه‌ای در دشت اردبیل با هدف بررسی فرونشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، از مدل استنتاج فازی در GIS از پنج عامل (افت سطح آب، سازند زمین‌شناسی، ضخامت آبرفت، فاصله از گسل و شیب) استفاده کردند. نتایج نشان داد افت سطح آب مهم‌ترین عامل است و حدود ۵۰٪ منطقه در طبقات پرخطر قرار دارد. نهشته‌های کواترنری رسی، ضخامت زیاد آبرفت و نزدیکی به گسل نیز حساسیت به فرونشست را افزایش می‌دهند. مدل با داده‌های InSAR اعتبارسنجی و $AUC=0.7$ حاصل شد که بیان‌گر دقت قابل قبول آن است (Aalipour et al., 2022). در مطالعه‌ای با هدف تهیه نقشه پتانسیل فرونشست دشت ورامین، از روش‌های SAW⁵ و AHP⁶ و هفت پارامتر مؤثر در محیط ArcGIS استفاده شد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی با تصاویر ماهواره‌ای InSAR نشان داد که روش ترکیبی AHP با ضریب همبستگی ۰/۶۵ نسبت به روش SAW با ضریب ۰/۵۳ از دقت بالاتری برخوردار است. بر این اساس، مناطق مرکزی، شمال غرب و جنوب شرق دشت به عنوان مناطق مستعد فرونشست شناسایی شدند که نیازمند مدیریت منابع آب زیرزمینی است (Halataei et al., 2025).

با این حال اغلب مطالعات پیشین در دشت ورامین صرفاً به محاسبه نرخ فرونشست اکتفا کرده و به تحلیل کمی عوامل کنترل‌کننده آن نپرداخته‌اند. نقش پارامترهای ساختاری کلیدی مانند عمق سنگ کف که نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیسم فرونشست دارد، در مدل‌سازی‌های قبلی به‌طور سیستماتیک لحاظ نشده است. علی‌رغم کاربرد گسترده الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مطالعات فرونشست، تلفیق هدفمند داده‌های سنجش از دور (LiCSBAS) با الگوریتم جنگل تصادفی برای کمی‌سازی اهمیت هر یک از عوامل زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیک در آبخوان ورامین تاکنون انجام نشده است. هدف این پژوهش تعیین نرخ فرونشست با LiCSBAS و پیش‌بینی الگوی مکانی و تعیین اهمیت عوامل مؤثر با جنگل تصادفی است. لازم به ذکر است که نوآوری این پژوهش نه صرفاً در کاربرد الگوریتم جنگل تصادفی، بلکه در تلفیق سیستماتیک داده‌های راداری با



پارامترهای ساختاری (عمق سنگ کف) و هیدروژئولوژیک در قالب یک رویکرد یکپارچه و کمی‌سازی اهمیت هر عامل است که برای اولین بار در دشت ورامین انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

دشت ورامین با مساحت ۹۷۰ کیلومتر مربع بخشی از حوضه دریاچه نمک است که در جنوب شرق شهر تهران واقع شده است (شکل ۱). آب‌وهوای منطقه با میانگین بارندگی سالانه ۱۵۰ میلی‌متر جز مناطق خشک محسوب می‌شود. کاربری اراضی غالب در منطقه زراعی و مسکونی است. رودخانه جاجرود که اصلی‌ترین منبع آب سطحی دشت است، حوضه‌های دماوند و لواسانات را زهکشی می‌کند و از شمال شرق وارد دشت می‌شود. سد ماملو در ورودی حوضه آبریز ساخته شده است. از نظر ساختار زمین‌شناسی این دشت در پهنه ایران مرکزی جای دارد. رخنمون‌های زمین‌شناسی در منطقه از قدیم به جدید شامل سازندهای کرج، قرمز فوقانی، هزاردره، کهریزک و آبرفت‌های کنونی است (شکل ۱). سنگ کف در مرکز دشت نزدیک شهر پیشوا بالا آمده و یک تاقدیس را تشکیل داده است. در نتیجه آبخوان را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم کرده است. بخش شمالی آبخوان عمیق و رسوبات دانه‌درشت اما بخش جنوبی آبخوان کم‌عمق و رسوبات ریزدانه است.

از دیدگاه هیدروژئولوژی دشت ورامین دارای سه نوع آبخوان آزاد، تحت فشار و معلق بوده است. آبخوان شمال دشت از نوع آزاد و دانه‌درشت و در مرکز و جنوب آن از نوع محبوس بوده است ضمن این که آبخوان‌های معلق بسیاری در بخش شمالی به‌طور پراکنده وجود دارند. در سال‌های اخیر به دلیل بهره‌برداری بیش‌ازحد مجاز از آب زیرزمینی و افت سطح پی‌زومتری، آبخوان محبوس از تحت فشار به رفتار آزاد تغییر حالت داده است. جهت جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب است. سطح ایستابی در شمال منطقه در بیش‌ترین عمق قرار دارد و به تدریج به سمت جنوب مقدار عمق آن کم می‌شود. آب نفوذی از جریان‌های سطحی و آب برگشتی کشاورزی منبع اصلی تغذیه آبخوان و برداشت از چاه‌های بهره‌برداری مهم‌ترین منبع تخلیه آبخوان است.

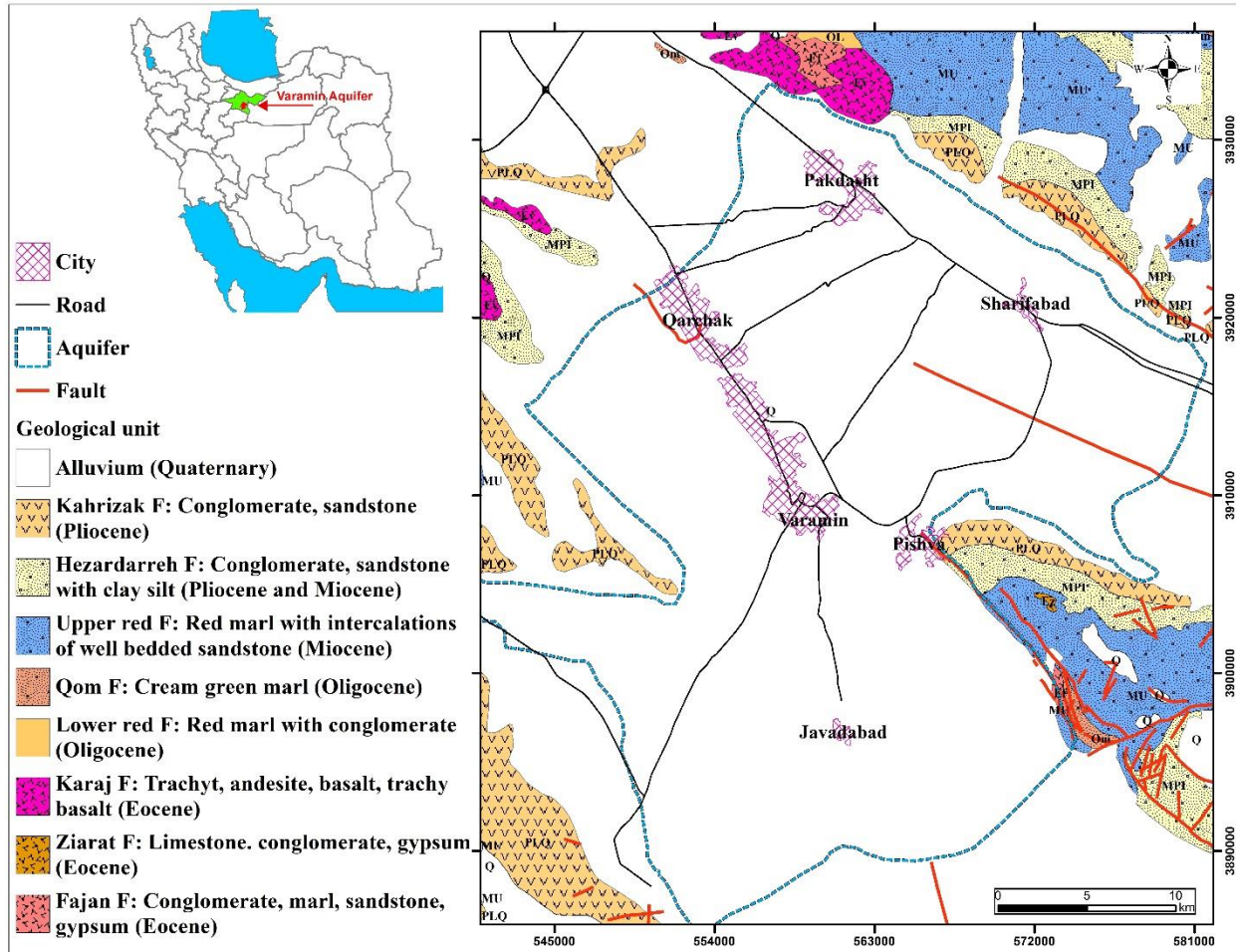


Fig. 1- Location and geology map of the Varamin aquifer (Haddadan and Mohammadian, 2006)
 شکل ۱- نقشه موقعیت و زمین شناسی آبخوان ورامین (Haddadan and Mohammadian, 2006)

۲-۲ روش شناسی

در این پژوهش، به منظور محاسبه نرخ فرونشست زمین در دشت ورامین، از تکنیک تداخل سنجی (InSAR) و رویکرد خط‌مبنای کوتاه (SBAS) در قالب نرم‌افزار LiCSBAS استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای SENTINEL-1، قابلیت اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین با دقت میلی‌متر و پوشش وسیع را فراهم می‌کند (Raucoules et al., 2003). نرم‌افزار LiCSBAS با کاهش وضوح مکانی به ۵۰ متر و انجام پیش‌پردازش‌های لازم، مشکل حجم بالای تصاویر را کاهش داده و امکان تحلیل سری‌های زمانی را فراهم می‌سازد (Morishita et al., 2020).

فرایند پردازش در LiCSBAS شامل دو مرحله اصلی ۰ (آماده‌سازی داده‌ها) و مرحله ۱ است. در مرحله اول، محصولات آماده LiCSAR شامل تداخل‌نگارهای باز شده^۷ و نقشه‌های همدوسی^۸ از پایگاه COMET-LiCS دانلود شده و پس از تغییر فرمت، منطقه مورد مطالعه برش داده شد. سپس با استفاده از داده‌های سامانه تصحیح اتمسفری GACOS، اثرات تروپوسفری از تصاویر حذف گردید. در مرحله دوم، داده‌های نامناسب بر



اساس معیارهایی مانند هم‌دوسی ۰/۴ و شناسایی خطاهای فازی^۹ حذف شدند. سپس با روش NSBAS، سری زمانی جابه‌جایی و نقشه نرخ فرونشست محاسبه گردید. در نهایت، فیلتر مکانی-زمانی برای کاهش نویز اعمال شد. از مجموع ۱۶۱۳ تداخل‌نگار اولیه در بازه زمانی مهر ۱۳۹۳ تا مهر ۱۴۰۳، پس از اعمال معیارهای کیفی، تعداد ۲۴۷ اپوک زمانی معتبر برای استخراج سری زمانی فرونشست مورد استفاده قرار گرفت. تمامی مراحل در محیط برنامه‌نویسی پایتون (آناکوندا) و سیستم‌عامل اوبونتو اجرا شد. خروجی نهایی این مرحله، نقشه رستری نرخ فرونشست بود که به عنوان متغیر وابسته در مدل جنگل تصادفی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳ آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مکانی

مقدار فرونشست به‌عنوان متغیر خروجی از نرم‌افزار LiCSBAS به‌صورت فایل رستری استخراج شد. انتخاب پارامترهای ورودی بر اساس مرور منابع علمی و با تمرکز بر مکانیسم‌های اصلی مؤثر در پدیده فرونشست زمین صورت گرفت. از آنجا که فرونشست در منطقه مورد مطالعه عمدتاً ناشی از تراکم لایه‌های ریزدانه آبخوان در اثر افت سطح آب زیرزمینی است، متغیرهای مرتبط با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی (افت سطح آب، عمق آب زیرزمینی، و برداشت از چاه‌ها) و زمین‌شناسی (درصد رس، عمق سنگ کف، و فاصله از گسل) که به‌طور مستقیم بر پتانسیل تراکم پذیری آبخوان و تغییرات تنش مؤثر تأثیر می‌گذارند، در اولویت قرار گرفتند. فاصله از آبراهه‌های اصلی نیز به‌عنوان عاملی نماینده برای تغذیه آبخوان که سهم بزرگی از بیلان را دارد، در نظر گرفته شد. افت و عمق آب زیرزمینی براساس داده‌های پیزومتری برای بازه ۱۰ ساله مهر ۱۳۹۳ تا مهر ۱۴۰۳ تهیه و بعد از اصلاح با استفاده از روش کریجینگ^{۱۰} درون‌یابی شدند. تراز سنگ کف بر اساس داده‌های ژئوفیزیک و چاه‌های اکتشافی حفر شده در آبخوان ورامین به دست آمد. درصد رس بر اساس لاگ چاه‌ها محاسبه و درون‌یابی شد. به‌منظور در نظر گرفتن مقدار برداشت و آب بازگشتی از چاه‌های بهره‌بردار، مقدار برداشت از این چاه‌ها با استفاده از روش درون‌یابی کرنل^{۱۱} با فاصله ۱۵۰۰ متر درون‌یابی شدند. همچنین فاصله از گسل و شبکه آبراهه‌ای بر اساس فاصله اقلیدسی به دست آمدند. در نهایت براساس ویژگی‌های رستر فرونشست همه‌ی داده‌ها از نظر اندازه و موقعیت سلول‌ها هم مرجع شدند (شکل‌های ۲ تا ۵).

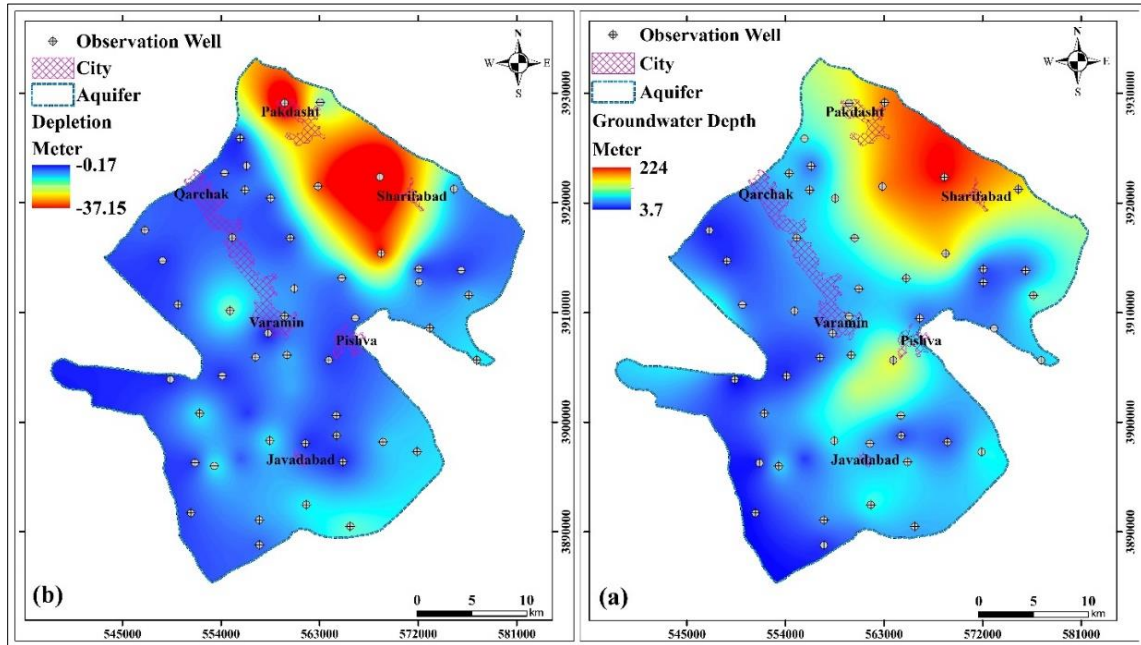


Fig. 2- (a): Groundwater iso-depth map for September 2024 and (b): Groundwater iso-depletion map (October 2014 to October 2024)

شکل ۲- (a): نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی مهرماه ۱۴۰۳ و (b): نقشه هم‌افت آب زیرزمینی (مهر ۱۳۹۳ تا مهر ۱۴۰۳)

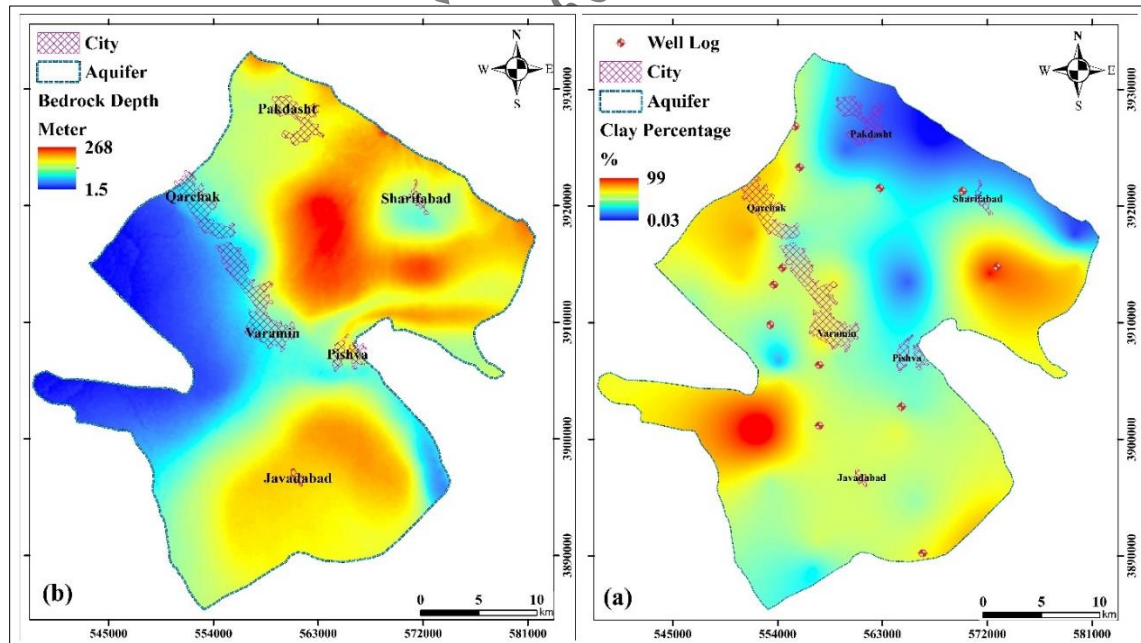


Fig. 3- (a): iso-Clay percentage map and (b): iso-Bedrock depth map

شکل ۳- (a): نقشه هم‌درصد رس و (b): نقشه هم‌عمق سنگ کف

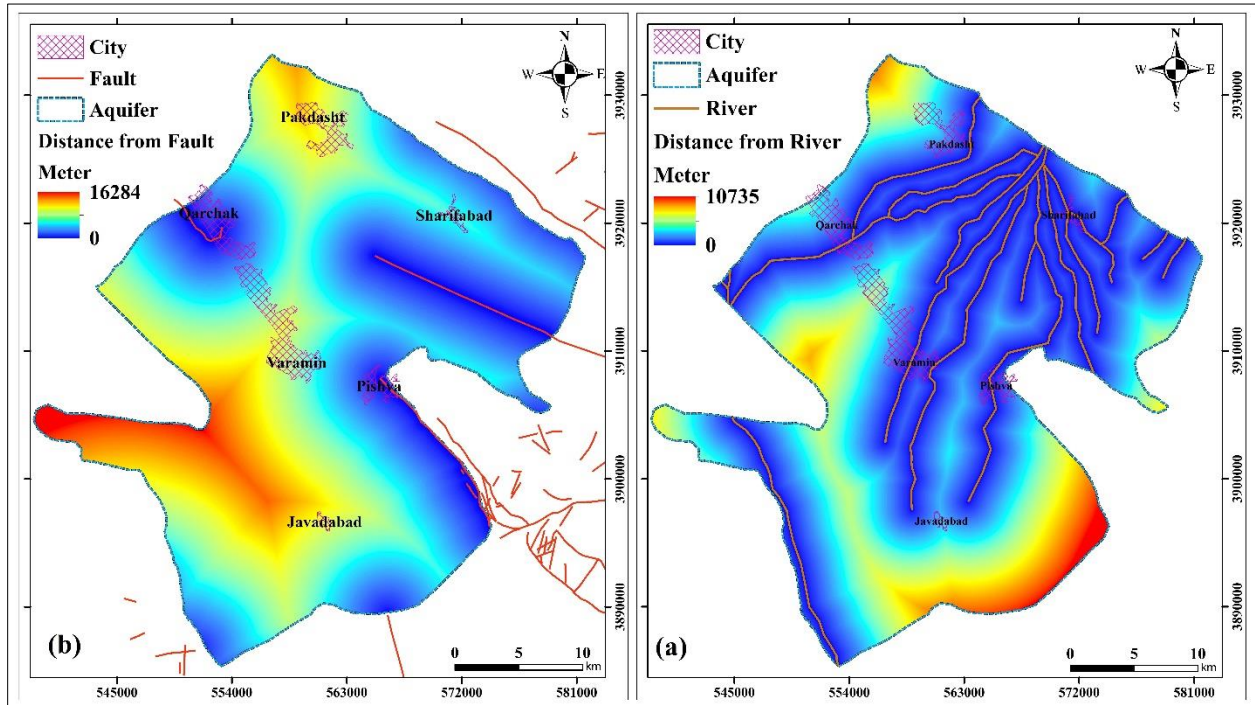


Fig. 4- (a): Iso-distance map from the river and (b): Iso-distance map from the fault
شکل ۴- (a): نقشه هم فاصله از رودخانه و (b): نقشه هم فاصله از گسل

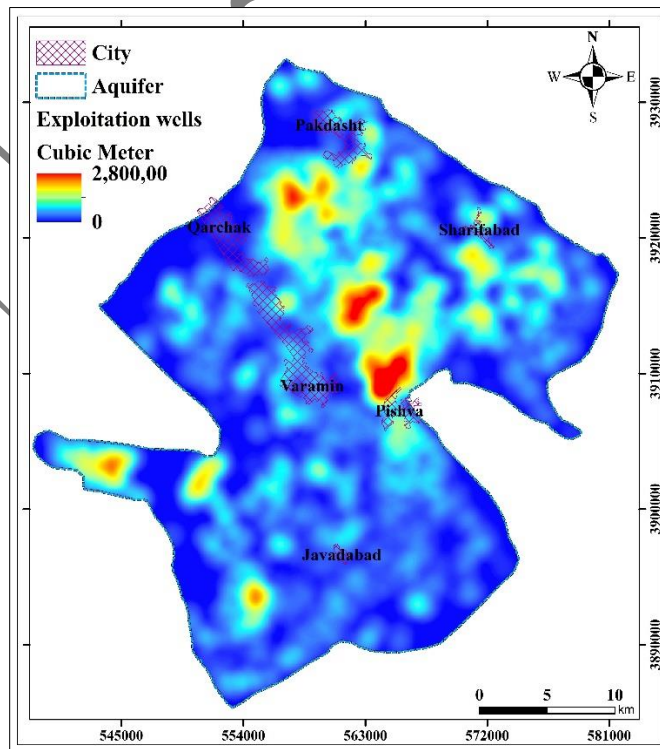


Fig. 5- Production well extraction map

شکل ۵- نقشه برداشت از چاه‌های بهره‌بردار

۴-۲ الگوریتم جنگل تصادفی

در مدل جنگل تصادفی داده‌ها به نسبت ۷۰ به ۳۰ به بخش‌های آموزش و آزمون تقسیم و از روش نمونه‌برداری Bootstrap برای افزایش تنوع درختان استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل و اطمینان از تعمیم‌پذیری نتایج، روش اعتبارسنجی متقابل k-fold به کار گرفته شد. در نهایت، اهمیت متغیرهای مؤثر با استفاده از معیار کاهش ناخالصی جینی محاسبه شد تا سهم هر عامل در پیش‌بینی پدیده فرونشست مشخص شود. خلاصه‌ی داده‌های مورد استفاده و روش شناسی به صورت روندما تهیه شد. در بخش اول و دوم روندما مراحل محاسبه فرونشست و در بخش سوم مراحل تهیه مدل آب زیرزمینی نشان داده شده است (شکل ۶).

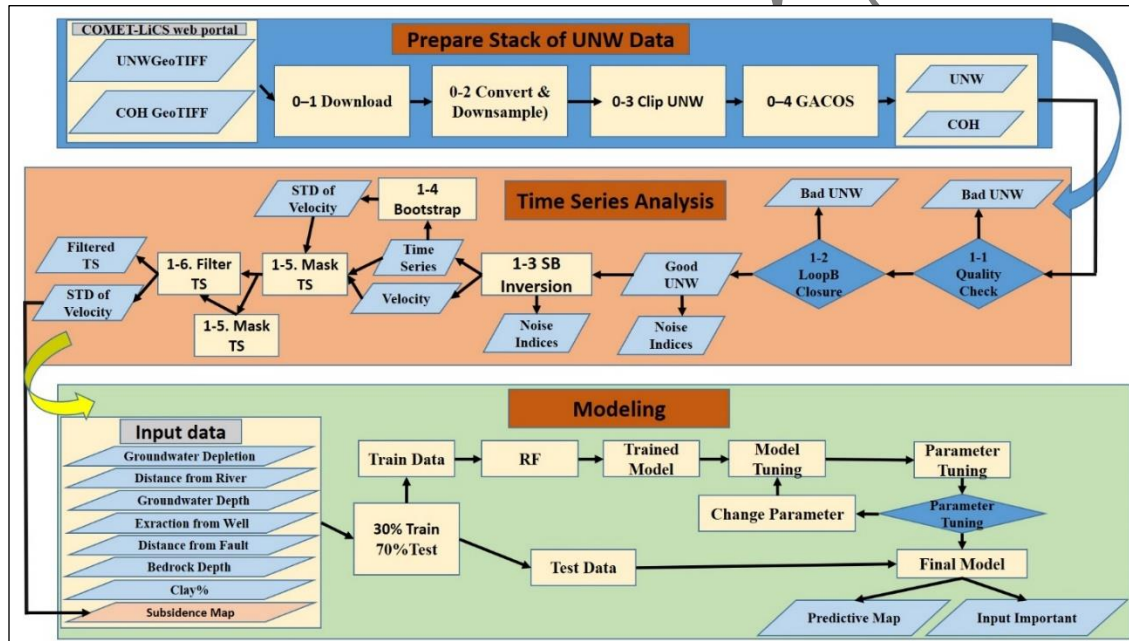


Fig. 6- Flowchart of the steps for calculating subsidence with LiCSBAS software and implementing random forest

شکل ۶- روندما مراحل محاسبه فرونشست با نرم‌افزار LiCSBAS و اجرای جنگل تصادفی

۳- نتایج و بحث

۳-۱ نتایج



نقشه فرونشست توسط نرم افزار LiCSBAS برای دوره ۱۰ ساله مهر ۱۳۹۳ تا مهرماه ۱۴۰۳ به دست آمد. حداکثر نرخ فرونشست ۹۵۵/۱ میلی متر با میانگین ۱۹۳/۵ میلی متر و انحراف معیار ۲۲۸/۶ است. بیشترین نرخ فرونشست را جنوب آبخوان در مجاورت شهر جوادآباد دارا است. در شمال شهرهای قرچک، ورامین و پیشوا تا شرق آبخوان یک پهنه فرونشست محدب با نرخ فرونشست کمتر وجود دارد. در غرب شهر پاکدشت نیز گستره کوچک فرونشست با نرخ بالا وجود دارد. در شمال، غرب و جنوب غربی آبخوان هیچ گونه فرونشستی مشاهده نمی شود (شکل ۷). بر اساس تحلیل مساحتی، ۲۱/۶ درصد از منطقه فاقد فرونشست است و درصد باقیمانده درجات مختلفی از فرونشست را تجربه کرده اند. از این مساحت، ۴۰ درصد نرخ فرونشست کمتر از ۲۰۰ میلی متر، ۱۹/۲ درصد نرخ بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی متر، ۱۰/۱ درصد نرخ بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی متر و ۹/۱ درصد فرونشست بیش از ۶۰۰ میلی متر داشته اند که عمدتاً در بخش های جنوبی آبخوان، اطراف شهر جوادآباد متمرکز است.

پروفسوری نشده، عبیر قاضی استناد

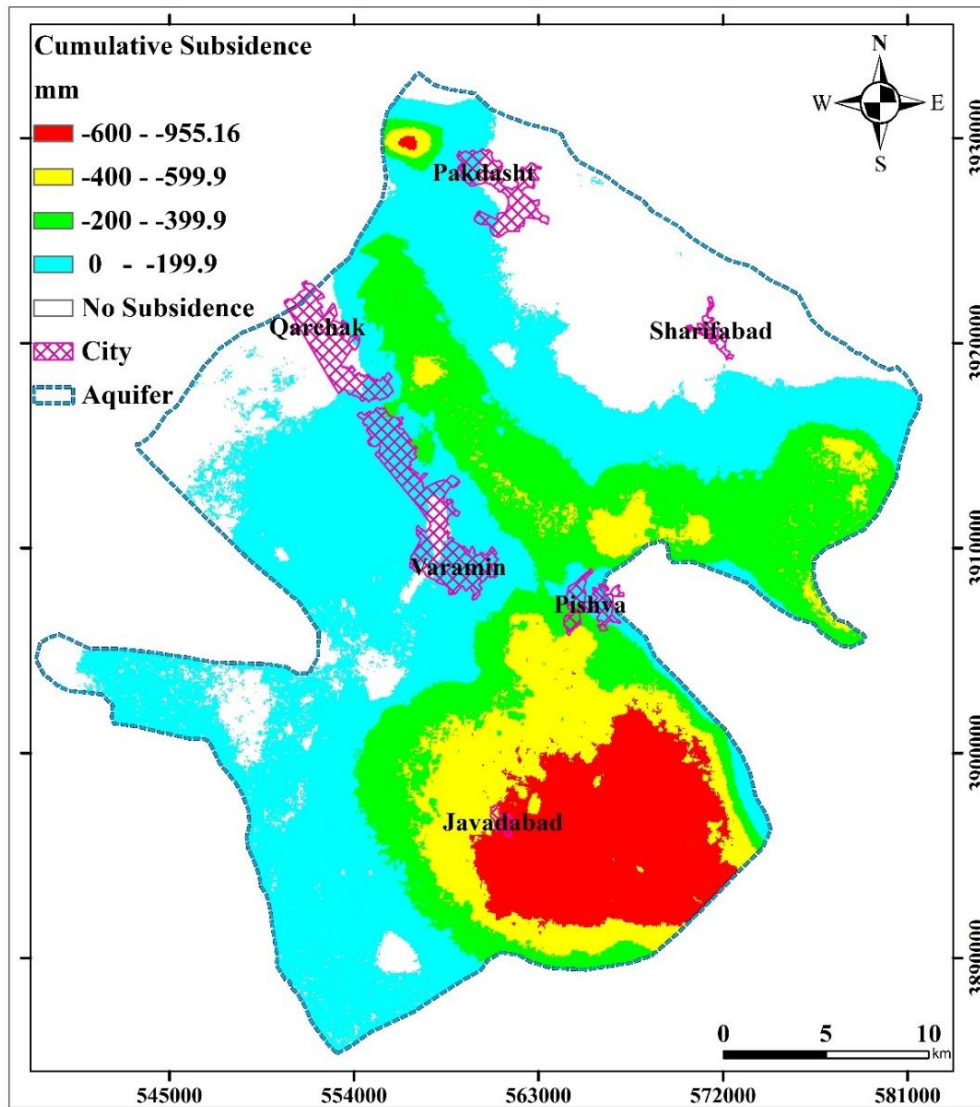


Fig. 7- Map of the cumulative amount of subsidence in the Varamin aquifer during the period from October 2014 to October 2024

شکل ۷- نقشه مقدار تجمیعی فرونشست در آبخوان ورامین در بازه زمانی مهرماه ۱۳۹۳ تا مهرماه ۱۴۰۳
 به منظور اجرای مدل جنگل تصادفی از بسته جنگل تصادفی کتابخانه scikit-learn 1.6.0 در زبان برنامه نویسی Python 3.13.1 استفاده شد.
 ۷۰ درصد داده های ورودی (۲۸۳۵۹۳ پیکسل) برای آموزش و ۳۰ درصد (۱۲۱۵۴۱ پیکسل) برای آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. تعداد بهینه درخت های تصمیم^{۱۲} در این پژوهش برابر با ۳۰۰ و بیشترین عمق درخت^{۱۳} برابر ۱۰ به دست آمد. با ادامه داشتن افت سطح آب زیرزمینی با روند ۱۰ سال گذشته (مهر ۱۳۹۳ تا مهر ۱۴۰۰)، در آینده فرونشستی با حداکثر مقدار ۷۵۴/۶ میلی متر در منطقه مورد مطالعه پیش بینی می شود. برای جنوب آبخوان بیشترین نرخ فرونشست پیش بینی شده است. یک ناحیه محدب شکل از شرق منطقه تا شمال شهر قرچک با نرخ کم نیز مشاهده شده است. در سایر بخش های آبخوان فرونشستی رخ نخواهد داد (شکل ۸).

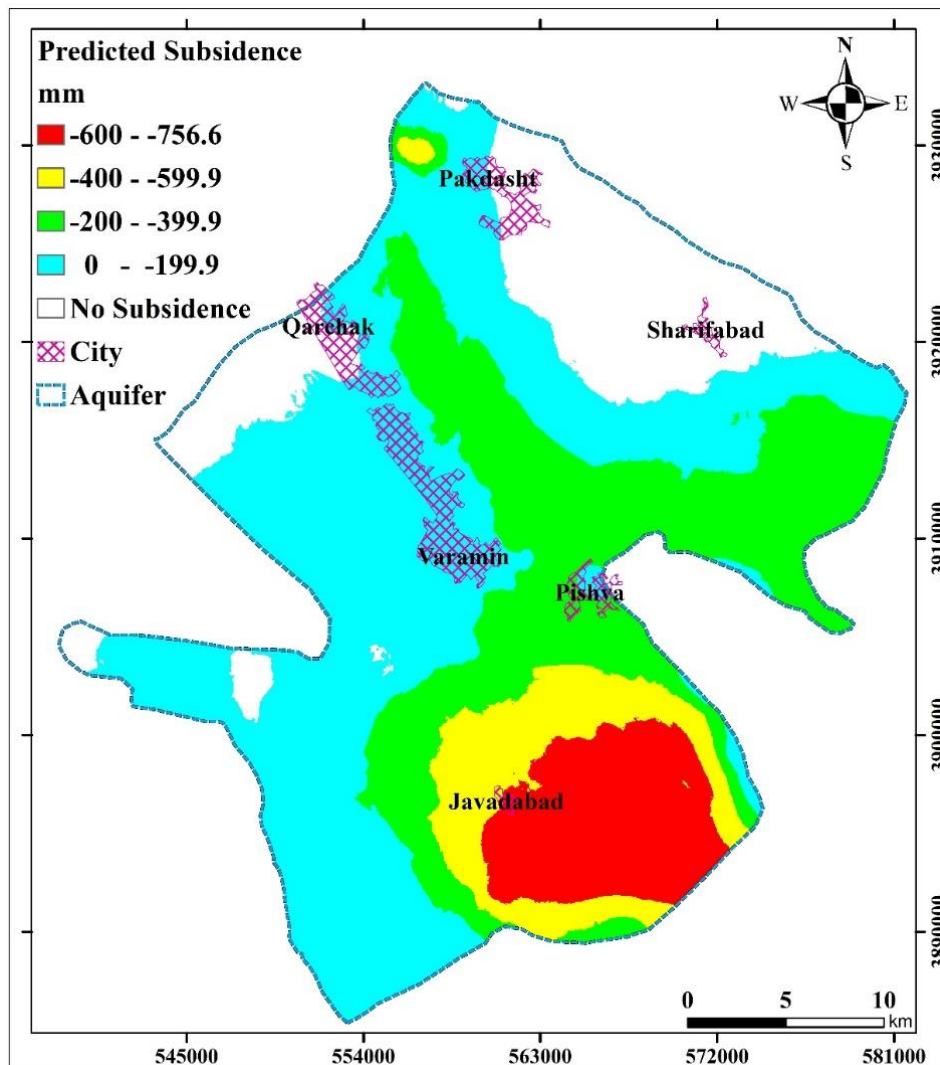


Fig. 8- Map of the cumulative amount of predicted subsidence based on the random forest model
 شکل ۸- نقشه مقدار تجمیعی فرونشست پیش‌بینی شده براساس مدل جنگل تصادفی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی مکانی فرونشست، با توجه به تعداد بالای پیکسل‌ها (بیش از ۸۰۰ هزار پیکسل) و به‌منظور نمایش بهتر و جلوگیری از شلوغی نمودار، نمونه‌ای تصادفی شامل ۲٪ از پیکسل‌های معتبر انتخاب و نمودار پراکندگی مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده برای این نمونه ترسیم شد. توزیع نقاط در اطراف خط ۱:۱ (خط قرمز) نشان‌دهنده همبستگی قابل توجه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی است. اگرچه پراکندگی جزئی در برخی نواحی به‌ویژه در دامنه فرونشست‌های شدید (نزدیک به ۱۰۰۰- میلی‌متر) مشاهده می‌شود، اما تمرکز اصلی نقاط در امتداد خط ۱:۱ و تقارن نسبی آن‌ها در دو سوی این خط، بیان‌گر نبود آریبی سیستماتیک و دقت مناسب

مدل در برآورد نرخ فرونشست است (شکل ۹). این الگوی توزیع، همراه با شاخص‌های عددی اعتبارسنجی مانند ضریب تعیین 0.95 و ریشه میانگین مربعات خطای $50/9$ میلی‌متر، توانایی بالای مدل در شناسایی الگوی مکانی فرونشست و پیش‌بینی مقادیر آن را تأیید می‌کند.

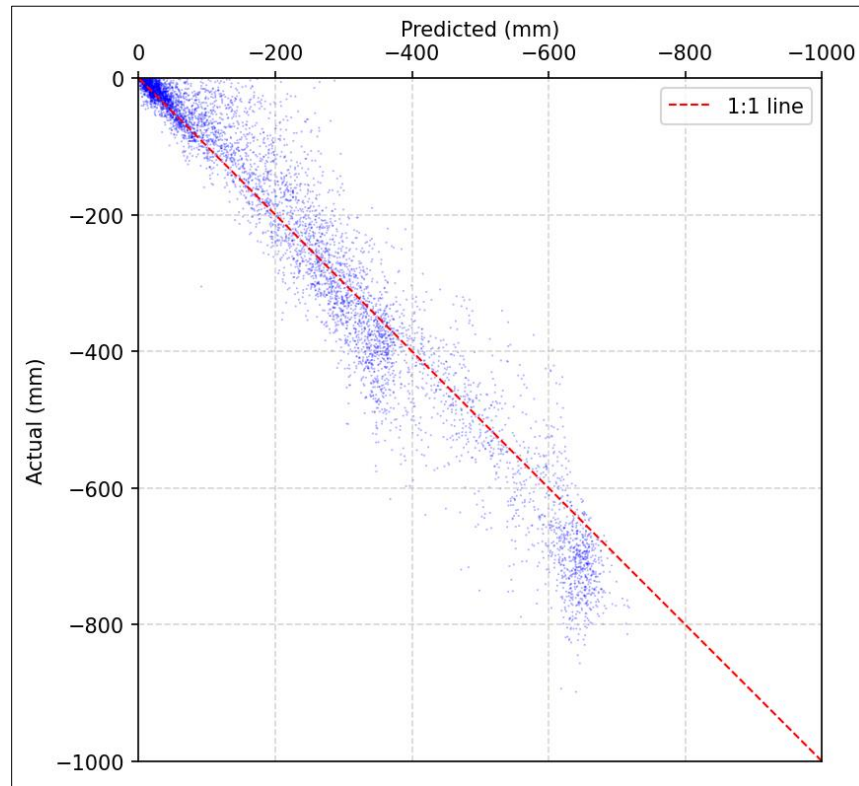


Fig. 9- Scatter plot of observed versus predicted subsidence values by Random Forest model
 شکل ۹- نمودار پراکندگی مقادیر فرونشست مشاهده‌ای در برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل جنگل تصادفی

بر اساس نمودارهای اعتبارسنجی متقابل و اعداد ارائه‌شده، مدل پیش‌بینی فرونشست از دقت و پایایی بسیار بالایی برخوردار است. ضریب تعیین (R^2) برابر 0.95 نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در تبیین تغییرات فرونشست است. میانگین قدر مطلق خطا (MAE) معادل $32/76$ میلی‌متر و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل $50/9$ میلی‌متر، بیان‌گر دقت قابل‌قبول مدل در پیش‌بینی مقادیر فرونشست است. همچنین واریانس توضیح‌داده‌شده (Explained Variance) برابر 0.95 و امتیاز OOB معادل 0.95 بیان‌گر عدم بیش‌برازش و پایداری مدل می‌باشد. نزدیکی بسیار زیاد نمرات داده‌های آزمون نشان‌دهنده عدم بیش‌برازش و توانایی عمومی‌سازی مناسب مدل است. ثبات مقادیر در تمام مراحل اعتبارسنجی، پایداری مدل در برابر تغییرات جزئی در داده‌ها را تأیید می‌کند (شکل ۱۰). این میزان ضریب تعیین (0.95) با نتایج پژوهش‌های مشابه در سایر مناطق جهان که از الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی فرونشست استفاده کرده‌اند، همخوانی دارد. برای نمونه، رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2019) در مدل‌سازی خطر فرونشست در دشت همدان با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، سطح زیر منحنی (AUC) معادل $93/8$

درصد برای داده‌های اعتبارسنجی گزارش کردند که بیان‌گر دقت بسیار بالای این مدل در پیش‌بینی نواحی مستعد فرونشست است. همچنین ژو و همکاران (Zhou et al., 2021) در پیش‌بینی فرونشست زمین در طول خط راه‌آهن تیانجین-بائودینگ در چین نشان دادند که مدل ترکیبی موجک-جنگل تصادفی از دقت پیش‌بینی بالایی برخوردار است و ضریب تعیین حاصل از مدل‌سازی آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر قابل‌قیاس می‌باشد. این هم‌خوانی نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم جنگل تصادفی در مدل‌سازی پدیده فرونشست و قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج به مناطق مختلف با شرایط هیدروژئولوژیک متفاوت است.

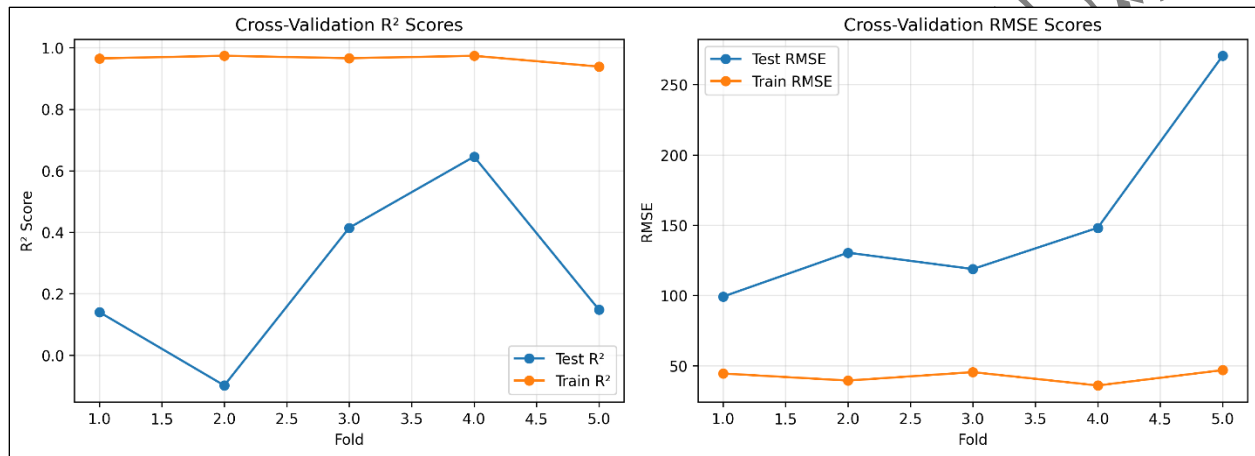


Fig. 10- Plot of coefficient of determination and root mean square error for training and test data
شکل ۱۰- نمودار ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا برای داده‌های آموزشی و آزمون

به‌منظور بررسی نقش متغیرهای ورودی در مدل جنگل تصادفی، از شاخص کاهش ناخالصی جینی استفاده شد (شکل ۱۱). بر این اساس، عمق سنگ‌کف با ۲۷/۵ درصد سهم در کاهش ناخالصی، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده فرونشست در آبخوان ورامین شناسایی شد. پس از آن، عمق آب زیرزمینی با ۲۱ درصد و افت سطح آب زیرزمینی با ۱۴/۱ درصد به‌عنوان دومین و سومین متغیر تأثیرگذار قرار دارند. سایر متغیرها شامل درصد رس (۱۲/۸ درصد)، فاصله از گسل (۱۰/۴ درصد)، فاصله از آبراهه (۹/۲ درصد) و برداشت از چاه‌های بهره‌برداری (۴/۹ درصد) در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که اگرچه افت آب زیرزمینی پیش‌نیاز اصلی فرونشست است، اما ویژگی‌های زمین‌شناسی مانند عمق سنگ‌کف نقش تعیین‌کننده شدت و توزیع مکانی آن را تحت کنترل دارند.

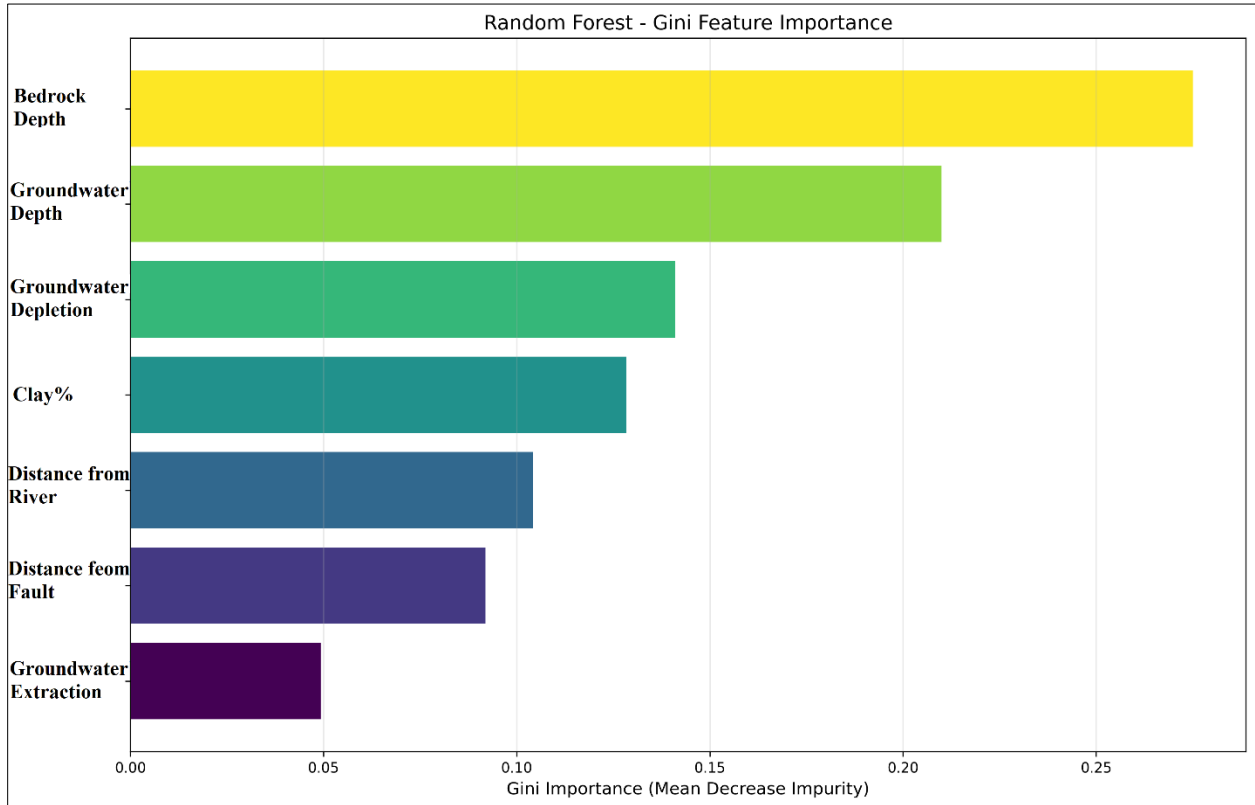


Fig. 11- Percentage chart of the role of model inputs in reducing impurities in the random forest model
 شکل ۱۱- نمودار درصد نقش ورودی‌های مدل در کاهش ناخالصی‌های مدل جنگل تصادفی

۲-۳ بحث

نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین نرخ فرونشست طی مهر ۱۳۹۳ تا مهر ۱۳۹۴ برابر با ۹۵/۵ سانتی‌متر در سال بوده است. این بیشینه در جنوب گستره و اطراف شهر جوادآباد رخ داده است. همچنین یک گستره محدب‌شکل با نرخ فرونشست کمتر از شهر قرچک شروع شده و با گذر از شمال شهرهای ورامین و پیشوا تا مرز شرقی گستره ادامه یافته است. در سایر نواحی دشت، فرونشستی مشاهده نشده است. این الگوی فضایی مشابه تمام پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ است و طی بیش از دو دهه تغییری نکرده است (شکل ۷) با این تفاوت که نرخ فرونشست در سایر پژوهش‌ها متفاوت ارائه شده است: بیش از ۵۰ سانتی‌متر در سال (دوره ۱۳۸۲) (Motagh et al., 2008) و حدود ۲۰-۲۵ سانتی‌متر در سال (دوره ۱۳۹۶-۱۳۸۲) (Haghighi and Motagh, 2019). جدیدترین مطالعه که مانند این پژوهش از روش LiCSBAS استفاده کرده است، نرخ ۹/۵ سانتی‌متر در سال را برای دوره ۱۴۰۲-۱۳۹۳ تأیید کرده است (Haghsheenas Haghighi and Motagh, 2024). این کاهش قابل توجه نرخ را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد. برتری روش LiCSBAS شامل دسترسی به تصاویر با بازه زمانی ۱۲ روزه، تصحیح



دقیق اتمسفری با مدل GACOS و فیلتراسیون پیشرفته نوین همچنین کاهش مقدار افت سطح آب زیرزمینی به علت از کاهش برداشت ناشی از طرح تعادل بخشی یا کاهش ظرفیت آبدهی آبخوان است. هر روشی محدودیت‌های خودش را دارد و روش LiCSBAS هم از این قاعده مستثنا نیست. مهم‌ترین محدودیت این روش، از دست رفتن سیگنال رادار در زمین‌های کشاورزی گستره جنوب دشت (به‌ویژه اطراف شهر جوادآباد) است؛ این مشکل ذاتی و شناخته‌شده‌ی تمام روش‌های تداخل‌سنجی راداری است.

مدل جنگل تصادفی با به‌کارگیری هفت متغیر هیدروژئولوژیکی و ساختاری (شامل عمق سنگ‌کف، ضخامت آب‌رفت، عمق سطح آب زیرزمینی، افت سطح آب زیرزمینی، درصد رس، فاصله از گسل و فاصله از رودخانه) توانست الگوی فضایی فرونشست دشت ورامین را با دقت بسیار بالایی پیش‌بینی کند. این مدل با ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۵، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۵۰/۹ میلی‌متر و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) معادل ۳۲/۷ میلی‌متر، عملکرد مطلوبی در برآورد نرخ فرونشست از خود نشان داد. با توجه به دامنه تغییرات فرونشست در منطقه (صفر تا ۹۵۵ میلی‌متر)، این خطا نشان‌دهنده دقت نسبی حدود ۹۵٪ است. نقشه پیش‌بینی‌شده توسط مدل، به‌خوبی توانست الگوی فرونشست در جنوب دشت را بازتولید کند. به‌منظور جلوگیری از بیش‌برازش و ارزیابی عدم قطعیت، از روش اعتبارسنجی متقابل k-fold و بوت‌استرپ استفاده شد. نتایج پایدار و نزدیک به هم (با انحراف معیار اهمیت متغیرها کمتر از ۳ درصد) نشان‌دهنده نبود بیش‌برازش معنی‌دار و تعمیم‌پذیری مناسب مدل است.

نتایج اهمیت متغیرها نشان داد که عمق سنگ‌کف با ۲۷/۵ درصد مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده الگوی فضایی فرونشست در دشت ورامین است. فرونشست شدیدتر در نواحی با عمق سنگ‌کف بیشتر رخ می‌دهد؛ زیرا در این مناطق حجم آب‌رفت قابل‌تراکم بسیار زیاد، امکان افت بیش‌تر و ضخامت روباره بیشتر نیز وزن بیشتری به لایه‌های زیرین وارد می‌کند و تنش مؤثر را افزایش می‌دهد. عامل مهم بعدی، عمق سطح آب زیرزمینی است؛ هرچه سطح آب عمیق‌تر باشد، وزن روباره بیشتر می‌شود و فرونشست ناشی از افت سطح آب تشدید می‌گردد. در مقابل، افت سطح آب زیرزمینی و درصد رس اهمیت کمتری داشتند؛ زیرا در شمال گستره که بیش‌ترین افت سطح آب را دارد، فرونشست مشاهده نشده است. همچنین در غرب گستره مورد مطالعه با وجود داشتن بیش‌ترین درصد رس به علت کم بودن میزان افت، عمق و افت آب زیرزمینی، میزان فرونشست کم است. متغیرهای فاصله از گسل و رودخانه نیز نقش مکمل و موضعی در تشدید فرونشست ایفا می‌کنند. تأثیر کم چاه‌های بهره‌برداری را می‌توان به نقش گسل پیشوا مرتبط دانست، بدین صورت که با توجه به قرار داشتن ارتفاعات در شمال گستره و سهم بالای نفوذ آب سطحی در تغذیه آبخوان، با کاهش بارش در سال‌های اخیر نقش گسل در کاهش جریان آب زیرزمینی به سمت جنوب گستره پررنگ‌تر شده است. همچنین بیش‌ترین برداشت از آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ای با رسوبات دانه‌درشت قرار دارد. به همین دلیل علی‌رغم قرار داشتن بیش‌تر برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در شمال گسل، بیش‌ترین افت در جنوب گسل رخ داده است.



نتایج حاصل از اولویت‌بندی عوامل مؤثر در این پژوهش با یافته‌های سایر محققان هم‌خوانی قابل توجهی دارد. برای نمونه، پژوهش‌های پیشین در دشت‌های ایران از جمله مطالعات معتق و همکاران (Motagh et al., 2008) حق‌شناسی حقیقی و معتق (Haghshenas Haghghi and Motagh, 2024) نیز نقش کلیدی عمق سنگ‌کف و ویژگی‌های رسوبی آبخوان را در تشدید فرونشست تأیید کرده‌اند. اهمیت بالای عمق آب زیرزمینی و افت سطح آن در پژوهش حاضر نیز با نتایج تیاتینی و همکاران (Teatini et al., 2011) همسو است که افت سطح آب را پیش‌نیاز ضروری اما نه کافی برای وقوع فرونشست معرفی کرده‌اند. علاوه بر این، نقش فاصله از گسل و رودخانه به‌عنوان عوامل مکمل در پژوهش‌های هانگ و همکاران (Hung et al., 2010) و جوشی و همکاران (Joshi et al., 2023) نیز مورد تأکید قرار گرفته که با نتایج این مطالعه در مورد اهمیت ساختارهای زمین‌شناسی و منابع تغذیه هماهنگی دارد. این تطابق، اعتبار مدل ارائه‌شده و تعمیم‌پذیری یافته‌های آن را در شرایط مشابه زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی تقویت می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

مدیریت رخداد و پیامدهای پدیده فرونشست نیازمند شناخت وضعیت موجود و عوامل تأثیرگذار بر آن و امکان پیش‌بینی نرخ فرونشست تحت شرایط مختلف مدیریتی و طبیعی است. این پژوهش با هدف تحلیل مکانی پدیده فرونشست و شناسایی عوامل کلیدی کنترل‌کننده آن در دشت ورامین انجام شد.

نتایج، وجود یک بخش وسیع با بیش‌ترین نرخ فرونشست (۹۵۵/۱ میلی‌متر در سال) را در جنوب منطقه مورد مطالعه نشان داد. فرونشست محذب شکل با نرخ کم‌تر از شمال شهر، شمال شهرهای ورامین و پیشوا تا مرز شرقی ادامه دارد. در سایر منطقه مورد مطالعه فرونشست رخ نداده است. مدل با ضریب تعیین ۰/۹۵، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۵۰/۹ میلی‌متر و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) معادل ۳۲/۷ میلی‌متر دقت بالایی نشان داد. عمق سنگ‌کف مهم‌ترین عامل و عمق آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به عنوان کم‌اهمیت‌ترین عامل شناسایی شد. دقت بالای مدل، امکان استفاده از این مدل برای پیش‌بینی در آینده را تأیید می‌کند. شناسایی عمق سنگ‌کف یا ضخامت آبرفت به عنوان مهم‌ترین عامل نشان دهنده اهمیت ضخامت آبرفت و توپوگرافی سنگ‌کف در این گستره است. در ادامه عمق آب زیرزمینی به عنوان عامل دوم، اهمیت روباره را نشان می‌دهد. علی‌رغم وقوع افت شدید سطح آب در بخش شمالی دشت، عدم رخداد فرونشست در این بخش، دلیل محکمی برای اهمیت کم‌تر این پارامتر در مقایسه با عمق سنگ‌کف در مدل ارائه می‌دهد.

نتایج این پژوهش نشان داد که از تصاویر ماهواره‌ای راداری و نرم‌افزار LiCSBAS می‌توان با صرف هزینه و وقت کم‌تری نرخ فرونشست در بخش وسیعی را به‌صورت یکپارچه محاسبه کرد. همچنین الگوریتم جنگل تصادفی به‌خوبی می‌تواند رابطه بین عوامل مؤثر بر فرونشست را شناسایی، مدل‌سازی و برای پیش‌بینی مورد استفاده قرار دهد. در نهایت می‌توان گفت که تصاویر ماهواره‌ای و روش LiCSBAS، ابزاری مناسب برای محاسبه یکپارچه نرخ فرونشست است. همچنین، الگوریتم جنگل تصادفی ابزار کارآمدی برای تحلیل عوامل مؤثر و پیش‌بینی این پدیده محسوب می‌شود. به‌منظور کاهش نرخ فرونشست باید افت سطح ایستابی متوقف شود. برای شناسایی بهتر مکانیسم فرونشست همچنین برای بررسی تأخیر فرونشست پیشنهاد می‌شود تا مدل‌سازی زمانی - مکانی نیز در آبخوان و رامین انجام شود. همچنین نقش عواملی مانند نوع کانی‌های رسی، درجه تحکیم یافتگی رسوبات و تاریخچه تنش مؤثر بررسی شود. این عوامل می‌توانند توضیح‌دهنده چرایی عدم تراکم پذیری در برخی مناطق باشند. توصیه می‌شود در گام بعدی، از الگوریتم‌های جنگل تصادفی ترکیب‌شده با روش‌های مکانی-زمانی مانند Geographic Random Forest یا Geographically Weighted Regression استفاده شود تا تأثیر موقعیت مکانی بر اهمیت متغیرها و نرخ فرونشست بهتر آشکار شود.

¹ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

² Synthetic Aperture Radar (SAR)

³ Small Baseline Subset (SBAS)

⁴ multi-look DInSAR

⁵ Simple Additive Weighting

⁶ Analytical Hierachy Process

⁷ Unwrapped Interferograms

⁸ Coherence Map

⁹ Phase Unwrapping Errors

¹⁰ Kriging

¹¹ Kernel Density

¹² n_estimators

¹³ max_depth

فهرست مراجع

- Aalipour M, Malekmohammadi B, Ghorbani Z (2022) Mapping land subsidence susceptibility due to groundwater decline using fuzzy pixel-based models. *Arabian Journal of Geosciences* 15(10):1014
- Babae S, Mousavi Z, Masoumi Z, Malekshah AH, Roostaei M, Aflaki M (2020) Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *International Journal of Remote Sensing* 41(12):4780–4798
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E (2003) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11):2375–2383
- Galloway DL, Burbey TJ (2011) Revisão: Subsidência regional associada à extração de água subterrânea. *Hydrogeology Journal* 19(8):1459–1486
- Ge Z, Wang Y, Wu W, Liu J, Ran W, Yuan P, Su Y, Xu J, Hu J, Zhu P, Zhang Y (2026) Preliminary application of Chinese high-resolution small SAR satellites in large-scale monitoring of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project. *Advances in Space Research* 77(3):3119–3140

- Ghahroudi Tali M, Ghavitan A (2025) Investigation of the Physical Hazards of Land Subsidence in the Varamin Plain. *Environmental Management Hazards* 12(3):199–214
- Haddadan M, and Mohammadian H (2006) Geological map of Varamin at 1:100000, Geological Survey of Iran
- Haghighi MH, Motagh M (2019) Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment* 221:534–550
- Haghsheenas Haghighi M, Motagh M (2024) Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances* 10(19):eadk3039
- Halataei M, Khamechian M, Amighpey M, Manafiazar A (2025) Investigating the land subsidence potential of the Varamin Plain using a Simple Additive Weighting method and optimizing the weighting of affecting factors on land subsidence by Analytical Hierarchy Process. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 17(4):97–114
- Hasan MF, Smith R, Vajedian S, Pommerenke R, Majumdar S (2023) Global land subsidence mapping reveals widespread loss of aquifer storage capacity. *Nature Communications* 14(1):6180
- Hong Y, Adler RF, Huffman G (2007) An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(6):1671–1680
- Hung WC, Hwang C, Chang CP, Yen JY, Liu CH, Yang WH (2010) Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan. *Environmental Earth Sciences* 59(7):1535–1548
- Huning LS, Love CA, Anjileli H, Vahedifard F, Zhao Y, Chaffe PL, Cooper K, Alborzi A, Pleitez E, Martinez A, others (2024) Global land subsidence: Impact of climate extremes and human activities. *Reviews of Geophysics* 62(4):e2023RG000817
- Joshi RC, Ryu D, Lane PN, Sheridan GJ (2023) Seasonal forecast of soil moisture over Mediterranean-climate forest catchments using a machine learning approach. *Journal of Hydrology* 619:129307
- Kumar H, Syed TH, Amelung F, Agrawal R, Venkatesh A (2022) Space-time evolution of land subsidence in the National Capital Region of India using ALOS-1 and Sentinel-1 SAR data: Evidence for groundwater overexploitation. *Journal of Hydrology* 605:127329
- Metternicht G, Hurni L, Gogu R (2005) Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment* 98(2–3):284–303.
- Mohebbi Tafreshi G, Nakhaei M, Lak R (2021) Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *GeoJournal* 86(3):1203–1223
- Morishita Y, Lazecky M, Wright TJ, Weiss JR, Elliott JR, Hooper A (2020) LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing* 12(3):424
- Motagh M, Djamour Y, Walter TR, Wetzel HU, Zschau J, Arabi S (2007) Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International* 168(2):518–526
- Motagh M, Walter TR, Sharifi MA, Fielding E, Schenk A, Anderssohn J, Zschau J (2008) Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters* 35(16)
- Perissin D (2016) Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. In *Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications*. Springer, 176p
- Rahmati O, Falah F, Naghibi SA, Biggs T, Soltani M, Deo RC, Cerdà A, Mohammadi F, Tien Bui D (2019) Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms. *Science of The Total Environment* 672:239–252
- Rather AA, Bukhari SK (2025) Ground Deformation Pattern in Parts of Kashmir Himalaya Using Persistent Scatterer Interferometry: A case study of Srinagar City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 53(3):827–846
- Raucoules D, Maisons C, Carnec C, Le Mouelic S, King C, Hosford S (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
- Razavi-Termeh SV, Sadeghi-Niaraki A, Pirasteh S, Liu L, Bao S, Choi SM (2026) Optimizing spatial prediction of land subsidence through synergized non-parametric machine learning and swarm-based metaheuristic algorithms. *Environmental and Ecological Statistics*. <https://doi.org/10.1007/s10651-026-00704-x>

- Teatini P, Gambolati G, Ferronato M, Settari AT, Walters D (2011) Land uplift due to subsurface fluid injection. *Journal of Geodynamics* 51(1):1–16
- Zhan Y, Zhang Y, Zhang J, Xu J, Chen H, Liu G, Wan Z (2025) Risk assessment of land subsidence in Shanghai municipality based on AHP and EWM. *Scientific Reports* 15(1):7339
- Zhou C, Gong H, Chen B (2021) Prediction of land subsidence along Tianjin-Baoding high-speed railway using WT-RF method. *Remote Sensing for Natural Resources* 33(4):34–42

Spatial Modeling of Land Subsidence in Varamin Plain Using LiCSBAS Software and the Random Forest Model

Mohammad Kaveh Cholcheh¹, Hamid Reza Nassery^{2*}, Farshad Alijani³

- 1- Ph.D. Student, Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University Tehran, Tehran, Iran.
- 2- * Professor, Department of Mineral and and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University Tehran, Tehran, Iran. Email: h-nassery@sbu.ac.ir
- 3- Associate Professor, Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In recent years, the Varamin Plain has experienced land subsidence. In this study, the subsidence rate was obtained using LiCSBAS software and Sentinel-1 satellite images. The maximum subsidence rate of 955 mm over 10 years occurred in the southern part of the region. To predict and investigate the influence of geological factors on the subsidence rate, the Random Forest algorithm was employed. Bedrock depth, groundwater level decline, groundwater depth, clay percentage of the aquifer, extraction from exploitation wells, and distance from faults and rivers were selected as model inputs. The model's coefficient of determination of 0.95, its good learning performance, and the cross-validation method indicate the model's high validity. The prediction map showed a maximum subsidence of 754.6 mm, consistent with the calculated subsidence pattern for the next 10 years. The Gini coefficient index identified bedrock depth, with a 27.5% decrease in model impurity, as the most influential parameter. Groundwater depth and groundwater level decline were identified as the next important factors. Based on the findings, groundwater decline is a prerequisite for subsidence but does not necessarily lead to its occurrence. The role of other factors, such as bedrock depth and groundwater depth, is also significant. The results demonstrated the efficiency of LiCSBAS software and the Random Forest algorithm for calculating and predicting subsidence rates and identifying influencing factors.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Groundwater, Variable Importance, Aquifer, Machine Learning.

ویدئو استناری نشده، عبیر فاطمیل استناری