

بررسی ارتباط فرورانش زمین و تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: شهر مشهد)

زهرا رنجبرباروق* - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی. مدرس دانشگاه فرهنگیان.
محمد فتح‌اله زاده - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۹ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

چکیده

فرورانش زمین عبارتست از حرکت عمودی و رو به پایین سطح زمین است که ممکن است به صورت ناگهانی و یا تدریجی رخ دهد و می‌تواند نتیجه فرایندهای طبیعی مانند عملکرد تکتونیک، تراکم پذیری زمین با توجه به جنس خاک و یا فعالیت‌های انسانی شامل بارگذاری سازه‌های سنگین، برداشت آبهای زیرزمینی و استخراج معادن و یا ناشی از اثرگذاری هردو عامل انسانی و طبیعی باشد. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در مناطق شرقی و مرکزی کشور به علت شرایط خاص آب و هوایی پدیده فرورانش زمین در این مناطق را به شدت افزایش داده است. شهر مشهد یکی از مناطقی است که با نرخ فرورانش بسیار بالا روبرو است که با توجه به اهمیت این شهر، بررسی و مشخص کردن علت این پدیده امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تکنیک سری زمانی SBAS در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ محدوده شهر مشهد از نظر رخداد فرورانش و برخاستگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری نشان داد در بازه زمانی مورد نظر بیشترین میزان جابجایی زمین بین ۷۷- میلی‌متر تا ۸+ میلی‌متر بوده است و مناطق دارای فرورانش در بخش‌های شمال شهر مشهد قرار گرفته‌اند که بین ۳۰ تا ۷۷ میلی‌متر فرورانش در سال را ثبت کرده‌اند. در ادامه برای تعیین علت رخداد فرورانش در این مناطق، به ارزیابی وضعیت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی مورد نظر پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد تراز ایستابی آب زیرزمینی این مناطق به طور مداوم در حال کاهش بوده و سطح آب در چاه‌های پیژومتری دچار افت قابل ملاحظه‌ای شده است. در کنار بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی، جهت بررسی فعالیت تکتونیکی منطقه به عنوان یکی دیگر از عوامل رخداد فرورانش زمین، تاریخچه زلزله‌ها و شبکه گسلی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی‌ها دلالت بر عدم رخداد زمین‌لرزه‌های مؤثر (بیشینه ۳٫۸ در مقیاس ریشتر) در منطقه و حوالی آن داشت. بنابراین کاهش تراز آب زیرزمینی به عنوان عامل اصلی رخداد فرورانش در شهر مشهد است که توقف و کنترل آن نیازمند جلوگیری از بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی و پایش تغییرات تراز آن است. همچنین در کنار آن می‌توان با تغذیه مصنوعی آبخوان‌های شهر مشهد شرایط را بهبود بخشید.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی، تراز آب‌های زیرزمینی، Sentinel-1، فرورانش، مشهد.

مقدمه

فرونشست زمین عبارتست از حرکت عمودی و رو به پایین سطح زمین که ممکن است به صورت ناگهانی و یا تدریجی رخ دهد و می‌تواند ناشی از فرایندهای طبیعی مانند عملکرد تکتونیک، تراکم پذیری زمین با توجه به جنس خاک و یا فعالیت‌های انسانی شامل بارگذاری سازه‌های سنگین، برداشت آبهای زیرزمینی و استخراج معادن و یا ناشی از اثرگذاری هر دو عامل انسانی و طبیعی باشد. طبق تعریف انستیتو زمین‌شناسی ایالت متحده آمریکا^۱، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش^۲ یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی اندکی باشد که در مقیاس بزرگ می‌تواند به صورت تدریجی و آنی رخ دهد (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۱۱). مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک، متراکم شدن و فشردگی رسوبات در اثر برداشت بی‌رویه از منابع سفره‌های زیرزمینی است (ژو و همکاران، ۲۰۱۵). چنانچه لایه‌های رسی آبدار بین لایه‌های ماسه‌ای قرار گرفته باشند، این پدیده به صورت گسترده‌تر و حادث‌تر مشاهده خواهد شد (لیو^۳ و همکاران، ۲۰۰۶). فرونشست زمین معمولاً با تأخیر زمانی پس از برداشت طولانی مدت منابع آب زیرزمینی رخ می‌دهد (اسکات^۴، ۱۹۷۹). مقدار فرونشست به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع تنش وارده بستگی دارد (سیگنا^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد فرونشست می‌شود. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر زمان‌بر است؛ بنابراین به دنبال کاهش سطح پیرومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد (پیتر^۶ و همکاران، ۲۰۱۷). در مناطقی که رسوبات ضخامت چندانی ندارد و برداشت آب زیرزمینی به صورت بی‌رویه ادامه دارد، خطواره‌ها و شکاف‌ها در سطح اراضی مخصوصاً اراضی کشاورزی مشاهده می‌شود (ژانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۸) و به نام پدیده شق شناخته شده است. پدیده‌ی فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی زیادی به خصوص در مراکز جمعیت و شهرها به دنبال داشته باشد (دهقانی، ۲۰۰۹).

در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً مهم‌ترین علت فرونشست سطح زمین، متراکم شدن سفره‌های آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه آب است (پاچکو^۸ و همکاران، ۲۰۰۶). این وضعیت در مناطقی که برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی که دارای لایه‌های ماسه‌ای و رسی نفوذناپذیر هستند، بحرانی‌تر و موجب فرونشست شدیدتری می‌گردد (لیو^۹ و همکاران، ۲۰۰۶). این پدیده در ایران و به خصوص در مناطق شرق و مرکز کشور که از خشکسالی رنج می‌برند و تأمین آب از طریق برداشت آب زیرزمینی به شدت افزایش یافته، به وضوح قابل مشاهده است. شهرهای مشهد، تهران، نیشابور، رفسنجان و کرمان از جمله مناطق با نرخ فرونشست بسیار بالا هستند که با توجه به مخاطرات و خسارات جانی و مالی احتمالی ناشی از فرونشست، ضرورت دارد مورد توجه بیشتری قرار گیرند.

فرونشست زمین یک مخاطره طبیعی جهانی است و روش‌های هندسی برای پایش گسترده و در سطح وسیع تغییر شکل زمین مناسب نیستند. تا چند سال پیش مطالعات فرونشست به مشاهدات میدانی و مدل‌سازی عددی محدود می‌شد ولی امروزه با گسترش تکنیک‌های سنجش از دور، از تصاویر راداری برای پایش تغییر شکل زمین به صورت گسترده استفاده می‌شود (گوکینگ و جینگکین^{۱۰}، ۲۰۰۸).

1. Land Subsidence

2. United States Geological Survey (USGS)

3. Collapse

4. Liu

5. Scott

6. Cigna

7. Peter

8. Zhang

9. Pacheco

10. Liu

1. Guoqing and Jingqin

اصول این تکنیک برای اولین بار توسط گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد (پاچکو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). تداخل سنجی با بهره‌گیری از تصاویر راداری با پنجره مصنوعی یا SAR^۲ روش دقیق مبتنی بر استفاده از حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه است که قادر است با دقت قابل توجهی در حد میلی‌متر تغییرات جابه‌جایی ارتفاعی در سطوح وسیع و در طی بازه‌های زمانی مختلف را اندازه‌گیری کند (دانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). این روش برای برآورد جابه‌جایی‌های قائم در مقیاس وسیع امکان‌پذیر است. اساس این روش به این صورت است که اگر دو تصویر راداری از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شود، اینترفروگرام یا تداخل‌نگار مربوط به ترکیب این دو تصویر تغییرات اندک سطح زمین در مقیاس میلی‌متر را نشان خواهد داد. به منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین، روش تداخل سنجی راداری با پنجره مصنوعی (InSAR^۴) در سال‌های اخیر به عنوان یکی از تکنیک‌های غیر ژئودتیک مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (پراتی^۵ و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به اهمیت موضوع مورد مطالعه در طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که در ادامه به بیان بخشی از آن‌ها خواهیم پرداخت:

(لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۹) در پژوهشی مکانیسم فرونشست شمال غرب دشت مشهد را مورد بررسی قرار دادند و علت اصلی این فرونشست را افت شدید سطح آب زیرزمینی در این ناحیه در طول ۴۰ سال گذشته بیان کردند. مقدار پایین آمدن سطح آب با توجه به جنس لایه خاک و اندازه‌ی دانه‌ها متفاوت است و نتایج حاکی از اثر نرخ بیشتر کاهش تراز آب بر فرونشست در مناطق با خاک ریزدانه است که به خاطر پدیده‌ی تحکیم می‌باشد. (دولتی و همکاران، ۱۳۹۵) در پژوهشی به روند توسعه، اثرات و مکانیسم فرونشست زمین در دشت مشهد پرداختند و نشست سطح زمین را به عنوان یکی از پیامدهای منفی افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان مشهد معرفی کردند که آثار آن به صورت ایجاد ترک‌های بزرگ در زمین‌های کشاورزی و ساختمانها و بیرون‌زدگی لوله جدار چاهها در منطقه‌ی طوس، قابل مشاهده است. براساس این پژوهش، بررسی نتایج مطالعات مختلف صورت گرفته در زمینه‌ی فرونشست آبخوان مشهد در دوره زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد در بخش‌های شمال غربی (محدوده بین چناران و قوچان)، مرکزی (مشهد چناران) و شرقی - جنوب شرقی آبخوان فرونشست رخ داده است. بررسی شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان مشهد نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی و اینترفروپی رسوبات تشکیل دهنده آبخوان در محل بستر فعلی و قدیمی رودخانه کشف رود، مهم‌ترین عوامل فرونشست در دشت مشهد محسوب می‌شوند. در پژوهشی پیری و رحمانی (۱۳۹۵) به بررسی میزان فرونشست شمال دریاچه ارومیه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداختند. در این تحقیق از تصاویر Envisat در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۰ استفاده شد که نتایج حاصل از آن میزان حداکثر ۶ سانتی‌متر و حداقل ۳ سانتی‌متر فرونشست را در دشت تسوج در بازه زمانی یک ساله را نشان می‌دهد. تورانی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی فرونشست شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداختند. در این تحقیق تصاویر راداری Envisat مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیق بیانگر آن است که میزان فرونشست منطقه از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ حدود ۴/۸ سانتی‌متر بوده است که با توجه به اینکه نمودارهای تراز سطح آب و میزان بارندگی گرگان در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ روند نزولی داشته است، می‌توان گفت یکی از علل اصلی فرونشست رخ داده، ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی شهر گرگان است. (باتارای^۶ و همکاران، ۲۰۱۷) به بررسی و شناسایی پدیده‌ی فرونشست در روستای کاسماندو در نپال پرداختند. در این منطقه از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی برای شناسایی دگرشکلی و میزان نشست استفاده شد. در این پژوهش،

2. Pacheco

3. Synthetic Aperture Radar

4. Dong

5. Interferometric Synthetic Aperture Radar

6. Prati

1. Bhattarai

تصاویر راداری ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ برای پردازش اخذ شد. نتایج پردازش این تصاویر نشان داد که منطقه‌ی مورد نظر با سرعت متوسط ۸/۴ سانتی‌متر در سال در حال نشست است. (کالو^۱ و همکاران، ۲۰۱۷)، روی منطقه‌ی کنیا یکی از مراکز اقتصادی پیشرو در بخش کشاورزی و صنعت در ترکیه، در رابطه با استخراج بیش از اندازه‌ی آب تمرکز کرده‌اند. در این منطقه با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، فشرده‌سازی سفره آب‌های زیرزمینی و در نتیجه‌ی آن فرونشست اتفاق افتاده است که منجر به خسارت‌های اقتصادی فراوانی شده است. به منظور تحلیل الگوی مکانی و زمانی فرونشست از روش طول مبنای کوتاه استفاده شده است. بدین منظور داده‌های ماهواره‌های ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ مورد پردازش قرار گرفت. در این بازه زمانی از مشاهده‌ها و در محدوده‌ای به مساحت ۱۲۰۰ کیلومترمربع در منطقه‌ی مورد مطالعه، نقشه‌ی جابجایی زمین و سری زمانی مربوط به آن تهیه شد که جابجایی عمودی حدود ۱۰ سانتی‌متر را در این بازه‌ی زمانی نشان می‌دهد. نتایج پردازش تداخل سنجی تفاضلی در کنار داده‌های هوا شناسی، چینه شناسی و داده‌های پیژومتری و همچنین اطلاعات مربوط به تغییرات پوشش زمین امکان دستیابی به اطلاعات بیشتری را در رابطه با تاثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در کاهش منابع آب‌های زیرزمینی و فروریزش زمین می‌دهد. (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹) به پایش میزان فرونشست شهر ووهان چین با استفاده از تصاویر راداری پرداختند. در این تحقیق از روش SBAS-InSAR و تصاویر رادار ست بین سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده شده است. نتایج تحقیق بیانگر این است که بیش از ۴ منطقه دارای میزان فرونشست قابل توجهی است که این میزان بین ۲۷/۸ تا ۵۱/۵۶ میلی‌متر متغیر می‌باشد. (گورابی و همکاران، ۲۰۲۰) در پژوهشی با استفاده از سری تصاویر Sentinel-1 و روش PS به بررسی فرونشست در کلان شهر اصفهان در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد فرونشست سالانه‌ای بین ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در مدت ۵ سال رخ داده که از سمت جنوب به شمال و شمال شرق و شرق روند افزایشی دارد. (راطب و ابوتالیب^۲، ۲۰۲۰) به بررسی فرونشست زمین در دلتای نیل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و GPS پرداختند. از روش تداخل سنجی راداری و ۱۴۴ تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ استفاده کردند. نتایج نشان داد برخلاف نتایج مطالعات قبلی تغییر شکل‌های منطقه‌ای که عمدتاً توسط فرآیندهای طبیعی کنترل می‌شوند، نشان‌دهنده یک فرونشست محلی و کنترل انسانی غالب بر تغییر شکل زمین است و خواستار بازبینی مدل‌های مرتبط با افزایش سطح دریا در دلتای نیل شدند. با توجه به یافته‌های جدید، مقامات باید اقدامات لازم را برای کاهش فرونشست زمین از طریق اعمال سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری در دشت سیلابی دلتا و توسعه یک استراتژی مدیریت پایدار برای برداشت آب زیرزمینی انجام دهند. (حق‌شناس حقیقی و معتق^۳، ۲۰۲۱) به بررسی خطر فرونشست زمین در ایران براساس تحلیل مقیاس کشوری پرداختند. با استفاده از ۶۶ تصویر Sentinel-1 از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷، فرونشست زمین را در سراسر ایران بررسی کردند. برای اولین بار نقشه جامعی از فرونشست زمین در ایران و توزیع فضایی بزرگی آن را تشخیص دادند و در مرحله بعدی به تحلیل، سری زمانی تغییر شکل را به صورت کمی بیان کردند. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌ای از جاده‌ها و راه‌آهن‌ها در دو شهر پر جمعیت کشور، تهران و مشهد در معرض خطر فرونشست قرار دارند. (لیورا فراست^۳ و همکاران، ۲۰۲۱) به بررسی تغییر شکل سطح زمین در معدن نمک فرانسه با استفاده از تصاویر Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ و تکنیک تداخل سنجی راداری پرداختند و تصاویر SAR را با داده‌های تراز آب زیر زمینی ترکیب کردند. (بخاری^۴ و همکاران، ۲۰۲۳) به بررسی فرونشست زمین را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره Sentinel-1 پرداختند. نتایج نشان داد میزان فرونشست در شهر گوادر و

2. Calo

3. Rateb & Abotalib

4. Liora Furst

1. Bokhari

بلوچستان (پاکستان) در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ برابر با ۹۲ میلی‌متر در سال می‌باشد. (لیو^۱ و همکاران، ۲۰۲۳) به ارزیابی فرونشست زمین در دلتای رودخانه مروارید غربی چین با استفاده از روش InSAR و تصاویر Sentinel-1 بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ پرداختند. نتایج نشان داد فرونشست زمین در نواحی با کاربری آبی‌پروری، کاربری شهری و کشاورزی رخ داده است.

شهر مشهد به عنوان دومین شهر پرجمعیت کشور و موقعیت ژئوپولیتیک، به عنوان مهمترین شهر در شرق کشور است که در سال‌های اخیر به دلیل رشد جمعیت و توسعه محدوده شهر، تغییر شرایط اقلیمی و افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی با خطر فرونشست روبرو شده است که جهت کنترل و مقابله با این مخاطره نیاز است علت و روند رخداد فرونشست در این شهر مورد پایش قرار گیرد. با توجه به اهمیت این موضوع در این پژوهش به بررسی وضعیت رخداد فرونشست شهر مشهد با استفاده از تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ می‌پردازیم سپس در ادامه ارتباط مناطق دارای فرونشست شهر مشهد با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی و عملکرد تکتونیک در منطقه را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

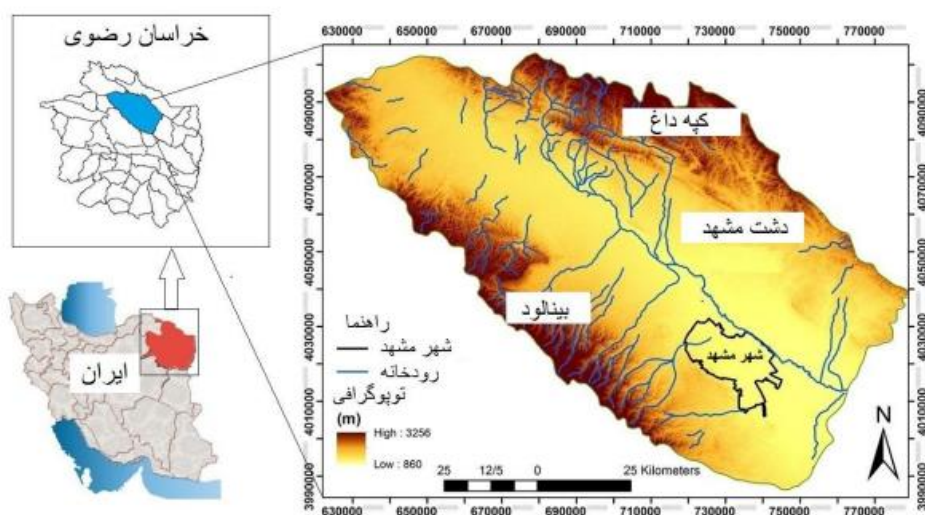
داده‌ها و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد در شمال شرق ایران بین رشته کوه‌های بینالود و هزارمسجد با روند شمال غرب-جنوب شرق بین طول‌های جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی قرار گرفته است. وسعت آن ۲۸۰ کیلومترمربع و اقلیم آن خشک و نیمه‌خشک است. مطابق طرح جامع تأمین آب کلان‌شهر مشهد و گزارش شرکت آب و فاضلاب مشهد نیاز آبی سالانه‌ی شهر در سال ۱۳۹۰ در حدود ۲۲۳ میلیون مترمکعب است که بنابر پیش‌بینی انجام شده، در سال ۱۴۰۰ به ۲۸۷ میلیون مترمکعب و در سال ۱۴۲۰ به حدود ۳۹۶ میلیون مترمکعب خواهد رسید (خرمی و همکاران، ۱۳۹۸). رشد جمعیت شهر مشهد با نرخ فراتر از میانگین کشور که ناشی از جاذبه‌های مهاجرت‌پذیری شهر مشهد است، عامل اصلی افزایش روزافزون تقاضای آب شهری است. براساس این گزارش در سال ۱۳۹۴، حدود ۳۶ درصد نیاز آبی شهر توسط چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی که در درون و بیرون محدوده شهری واقع‌اند، تأمین می‌شود. مقدار عمده‌ی بارش در دشت مشهد در فصل‌های بهار و زمستان اتفاق می‌افتد ولی سفره آب زیرزمینی در فصول بارندگی به قدر کافی تغذیه نمی‌شود که این امر با توجه به برداشت صورت گرفته از منابع آب زیرزمینی، منجر به کاهش سطح تراز آب و به تبع آن باعث رخداد فرونشست زمین می‌گردد (دهقانی، ۲۰۱۴). در حال حاضر از مهم‌ترین پیامدهای مخاطره‌آور فرونشست زمین در دشت مشهد، آسیب به خطوط لوله آب و گاز، تاسیسات شهری و ساختمان‌ها است که در ادامه و با گسترش آن موجب فروچاله‌ها و ترک در سطح زمین و محدوده شهری می‌شود.

خاک شناسی منطقه: شهر مشهد بر روی رسوبات و مخروط‌افکنه حاصل از کشف‌رود و چند رودخانه فصلی و دائمی مانند وکیل‌آباد، طرقله و طرقله قرار دارد (بهینافر، ۲۰۱۰). ضخامت آبرفت در میانه دشت نسبت به سایر نقاط بیشتر است ولی در حاشیه ارتفاعات جنوبی و شمالی ضخامت آبرفت کمتر و سنگ کف بالاتر است. مخروط‌افکنه مشهد با شیب ملایمی از ارتفاعات اطراف به طرف مرکز و خط‌القدر دشت کشیده می‌شود و دارای ضخامتی متفاوتی در نقاط مختلف است و از چند متر در کناره‌ها تا بیش از ۲۵۰ متر در مرکز دشت گزارش شده است (لشکری‌پور، ۲۰۰۵). محدوده شهر مشهد را می‌توان به دو قسمت غربی و شرقی تقسیم نمود که عمده‌ی قسمت شرقی را خاک‌های ریزدانه تشیکل داده که با حرکت از شمال غرب به سمت جنوب شرق، دانه‌بندی خاک ریزدانه‌تر می‌گردد. در مجموع با افزایش عمق دانه‌بندی

خاک در اغلب قسمت‌های محدوده شهر ریزدانه‌تر می‌شود (موسوی، ۲۰۱۰). در محدوده مرکزی شهر، خاک غالب در سطح، سیلت رس و ماسه‌دار می‌باشد که به سمت پایین درصد ماسه افزایش می‌یابد. همچنین، محدوده‌ی شرقی و شمال شرقی شهر مشهد در سطح پوشیده از خاک ریزدانه است که به طرف عمق درصد سیلت آن افزایش یافته است. (خرمی و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱: نقشه موقعیت محدوده شهر مشهد به منظور انجام پردازش و پایش فروروشست

داده‌های تحقیق

هدف از این پژوهش پایش تغییرات سطح زمین و تعیین مناطق دارای فروروشست و برخاستگی و نرخ این تغییرات در محدوده مورد نظر و در نهایت صحت‌سنجی و بررسی علل و عوامل موثر در رخداد و یا تشدید آن می‌باشد. یکی از عواملی که معمولاً در رخداد فروروشست زمین بخصوص در مناطقی با ویژگی‌های اقلیمی خشک بسیار موثر است، افت سطح آب‌های زیرزمینی در نتیجه رخداد خشکسالی و کاهش دبی تغذیه آبخوانها در کنار برداشت غیراصولی از این منابع می‌باشد. در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و زمین‌شناسی شهر مشهد پس از تعیین مناطق دارای فروروشست توسط پردازش تصاویر راداری، با استفاده از بررسی روند تغییرات سطح تراز آب در چاه‌های پیژومتری و همچنین تکتونیک، دخالت این عوامل در رخداد فروروشست در منطقه بررسی می‌شود. برای این منظور ابتدا سری تصاویر راداری Sentinel-1 با اختلاف زمانی و مکانی مناسب (حداکثر ۱۵۰ متر) شامل ۳۸ تصویر (جدول ۱) در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ با جهت برداشت Ascending و همچنین مدل رقومی ارتفاعی (Dem) با دقت ۱۲.۵ متر مربوط به سنجنده ALOS PALSAR از سایت سازمان فضایی اروپا (Vertex) تهیه شد. پس از تعیین مناطق دارای فروروشست جهت بررسی علت رخداد فروروشست از داده‌های آماری مربوط به روند تغییرات تراز چاه‌های پیژومتری منطقه برای بررسی تاثیر تغییرات تراز آب زیرزمینی در فروروشست محدوده مورد مطالعه از شرکت مدیریت منابع آب کشور تهیه و همچنین اطلاعات زمین لرزه‌های رخداد جهت بررسی میزان فعالیت تکتونیکی منطقه از مرکز لرزه‌نگاری کشور تهیه شد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده

ردیف	Polarization	تاریخ	ردیف	Polarization	تاریخ
۱	VV	2014/10/27	۲۰	VV	2018/06/08

۲	VV	2014/12/14	۲۱	VV	2018/08/31
۳	VV	2015/01/07	۲۲	VV	2018/10/18
۴	VV	2015/04/24	۲۳	VV	2018/12/05
۵	VV	2015/07/18	۲۴	VV	2019/01/10
۶	VV	2015/09/04	۲۵	VV	2019/03/11
۷	VV	2015/10/08	۲۶	VV	2019/05/22
۸	VV	2015/11/15	۲۷	VV	2019/07/21
۹	VV	2016/02/19	۲۸	VV	2019/08/02
۱۰	VV	2016/05/25	۲۹	VV	2019/09/07
۱۱	VV	2016/08/22	۳۰	VV	2019/10/12
۱۲	VV	2016/10/16	۳۱	VV	2019/12/24
۱۳	VV	2016/12/03	۳۲	VV	2020/03/29
۱۴	VV	2017/04/31	۳۳	VV	2020/06/09
۱۵	VV	2017/08/12	۳۴	VV	2020/08/08
۱۶	VV	2017/12/11	۳۵	VV	2020/10/19
۱۷	VV	2018/01/03	۳۶	VV	2020/12/10
۱۸	VV	2018/03/28	۳۷	VV	2021/01/23
۱۹	VV	2018/04/21	۳۸	VV	2021/02/12

روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارزیابی تغییرات سطح زمین شامل فرونشست و برخاستگی از روش تداخل‌سنجی راداری و تکنیک SBAS در پردازش سری تصاویر و توسط افزونه SARscape_5.2.1 در محیط نرم افزار ENVI-5.3.1 استفاده شد. در روش تداخل‌سنجی راداری، تصاویر مختلف راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق و تصویری به نام تداخل‌نگار^۱ را تولید می‌کنند. تداخل‌نگار تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر در دو زمان مختلف به دست آمده که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند (دنیل^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). لازم به ذکر است که ثبت هندسی دو تصویر طی دو مرحله به صورت تقریبی و دقیق انجام می‌شود (هانسن^۳، ۲۰۰۱). یک تداخل‌نگار حاوی اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان مختلف تصویربرداری است. به کمک مقدار اختلاف فاز تصاویر می‌توان متغیرهای مختلف از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین تا کسری از سانتی‌متر و اطلاعات توپوگرافی سطح زمین را با دقت ۱۰ متر استخراج کرد. اما با توجه به اینکه هر تداخل‌نگار شامل منطقه بزرگی با همبستگی پایین است، بنابراین نتایج آن قابل اعتماد نیست و به همین دلیل روش تداخل‌سنجی راداری به تنهایی نمی‌تواند تغییرات صورت گرفته را نشان دهد. در این راستا برای حل مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها روش سری زمانی SBAS است (ژائو^۴، ۲۰۱۳). در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا و همچنین خط مبنای زمانی^۵ آنها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌سنجی نگاره‌هایی تشکیل می‌شود که کیفیت مناسبی داشته

1. Interferogram

2. Daniel

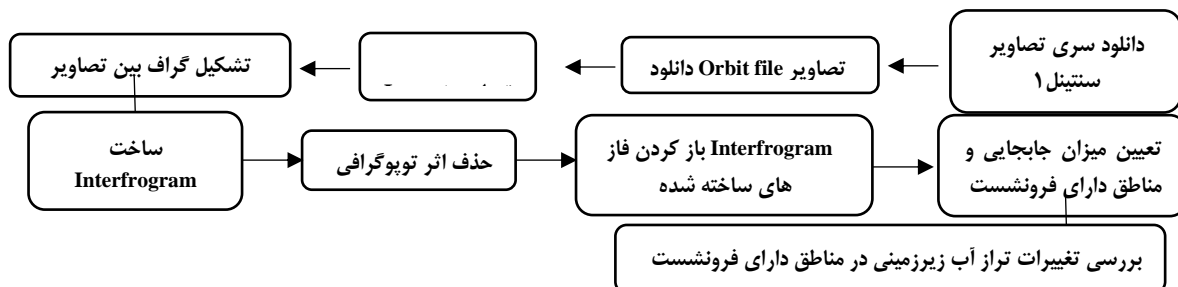
3. Hanssen

4. Zhou

5. Temporal Baseline

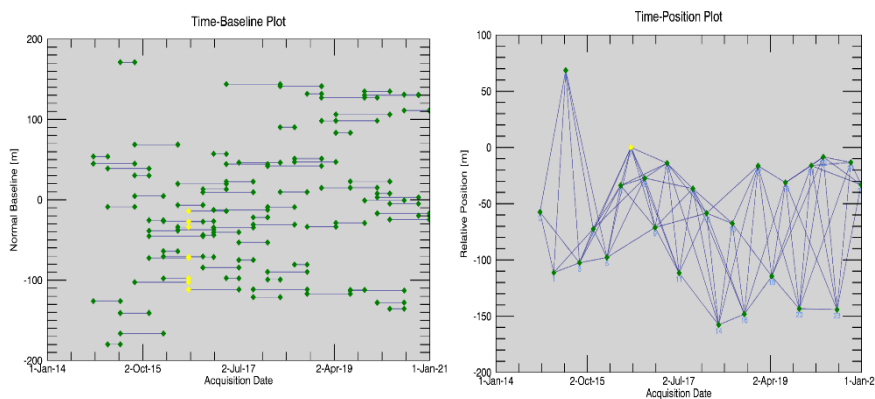
باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود (دونگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول (۲) فلوجارت تحقیق

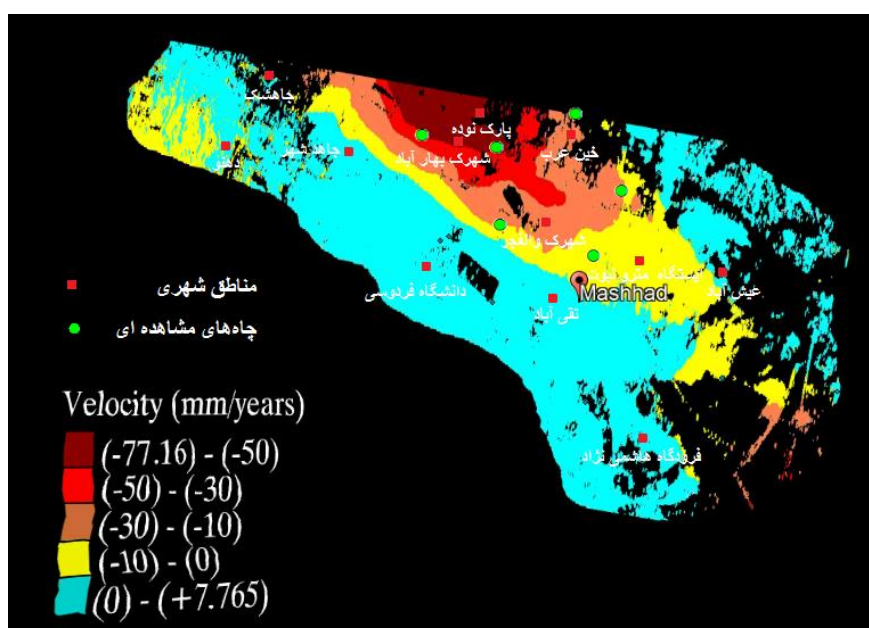


تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش پس از تهیه سری تصاویر راداری با اختلاف مکانی و زمانی مناسب (شکل ۲) شامل ۳۸ تصویر، با استفاده از روش سری زمانی SBAS تغییرات سطح زمین در محدوده مورد مطالعه طی بازه زمانی ۷ ساله (۲۷/۱۰/۲۰۱۴ تا ۲۱/۰۲/۲۰۲۱) توسط افزونه SARscape_5.2.1 در محیط نرم افزار ENVI-5.3.1 محاسبه شد (شکل ۳). پس از تهیه نقشه نهایی تغییرات سطح، بخش‌هایی از منطقه که دارای مقادیر قابل توجه فرونشست بودند به عنوان مناطق هدف برای بررسی بیشتر مورد توجه قرار گرفتند و در این راستا داده‌های چاه‌های پیژومتری منطقه که در محدوده‌های فرونشست قرار دارند همچنین داده‌های زلزله‌های رخ داده در منطقه جهت بررسی مداخله تکتونیک در رخداد فرونشست مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.



شکل ۲: شبکه گراف ترسیم شده برای تشکیل تداخل‌نگارها براساس اختلاف مکانی و زمانی



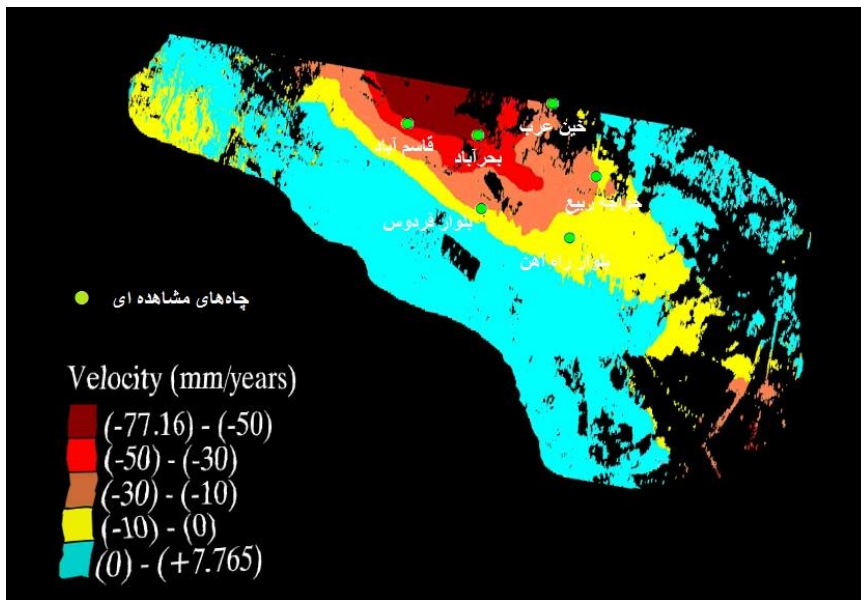
شکل ۳: نقشه سرعت جابجایی سطح زمین در منطقه مورد مطالعه از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بر حسب میلی‌متر

نتایج

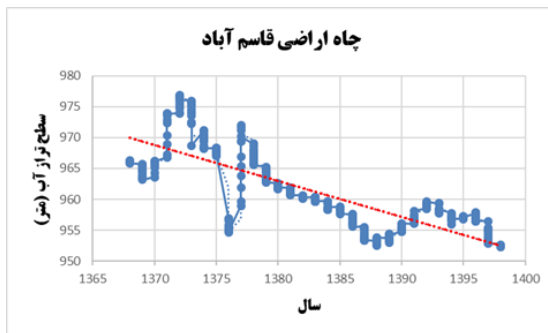
همانطور که در خروجی نهایی مدل (شکل ۳) مشخص است در بازه ۷ ساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ میزان جابجایی زمین بین $-77,16$ میلی‌متر تا $+7,76$ میلی‌متر بوده است که بیشترین مقدار فرونشست مربوط به شمال شهر مشهد است که براساس مناطق شهری، حوالی پارک نوده دارای بیشترین میزان فرونشست (-50 تا -77 میلی‌متر)، شهرک بهارآباد دارای میزان فرونشست -30 تا -50 میلی‌متر، خین عرب دارای میزان فرونشست -10 تا -30 میلی‌متر و شهرک وalfجر، ایستگاه مترو نبوت دارای میزان فرونشست 0 تا -10 میلی‌متر در راستای عمودی داشته است. از سوی دیگر نواحی مرکزی شهر مشهد، حوالی دانشگاه فردوسی مشهد، فرودگاه هاشمی‌نژاد، دهنو، جاهدشهر، جاهشک و عیش‌آباد دارای میزان بالآمدگی بین 0 تا $+7,77$ میلی‌متر برخاستگی در بازه ۷ ساله می‌باشند.

به منظور بررسی علت فرونشست در منطقه مورد مطالعه، با توجه به پیشینه‌ی پژوهش که افت سطح آب زیرزمینی به عنوان عامل اصلی فرونشست دشت مشهد بیان شده بود، داده‌های تعدادی از چاه‌های پیزومتری که در مناطق دارای فرونشست واقع شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفت. جهت همبستگی و ارتباط فرونشست با تغییرات سطح آب چاه‌های

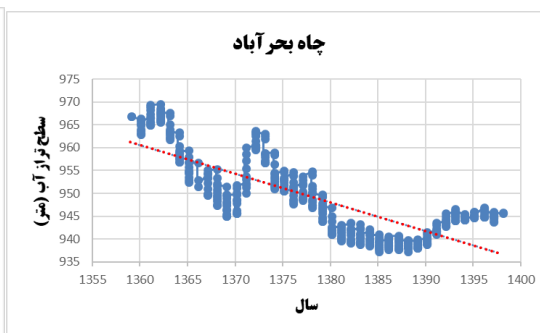
پیزومتری، ابتدا تمام چاه‌های واقع در مناطق دارای فرونشست، مشخص (شکل ۴) و سپس نمودار تغییرات تراز سطح آب در این چاه‌ها از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۸ رسم و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵ الف، ب، ج، د، ه).



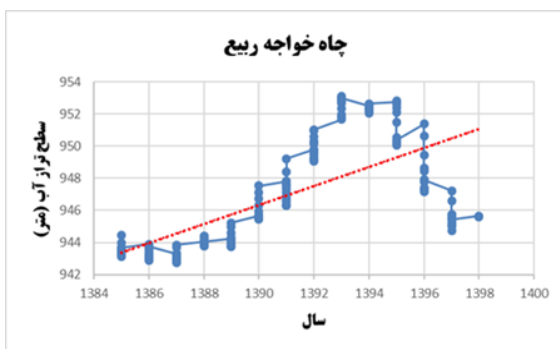
شکل ۴: موقعیت چاه‌های پیزومتری شناسایی شده در منطقه فرونشست



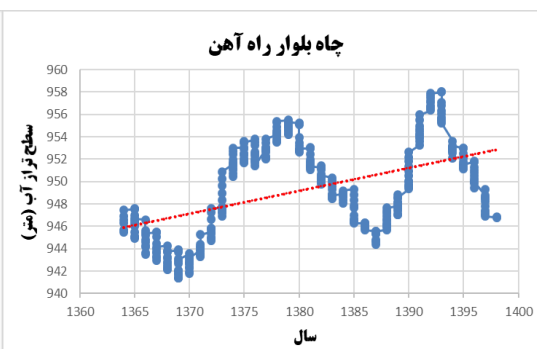
شکل ۵-ب



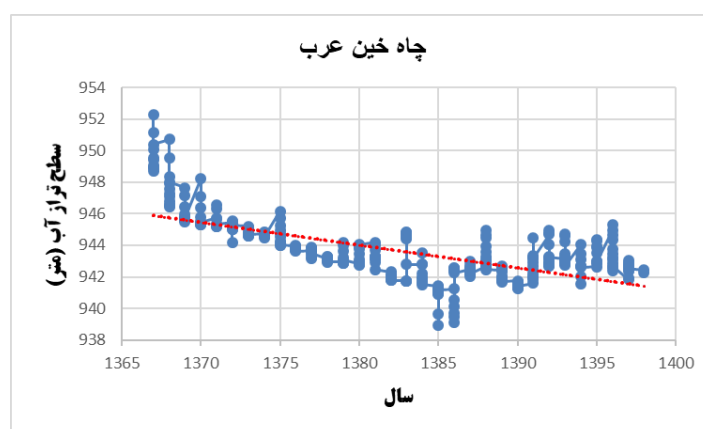
شکل ۵-الف



شکل ۵-د



شکل ۵-ج

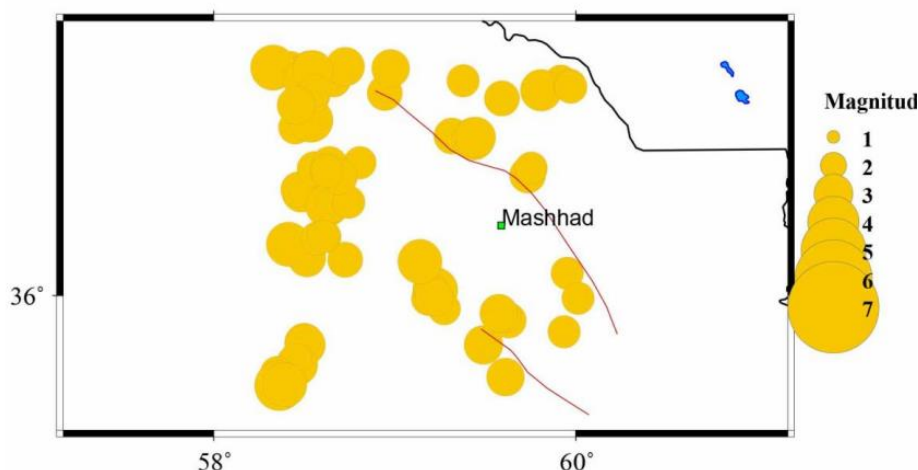


شکل ۵-۵

شکل ۵: نمودار تغییرات تراز آب بیزومتری مشهد در بازه زمانی سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۸ بر حسب متر

همانطور که در نمودار تغییرات سطح تراز آب در چاه‌های بیزومترهای اراضی قاسم‌آباد، بحرآباد، خین‌عرب، خواجه‌ربیع و راه‌آهن مشاهده می‌شود، روند تغییرات در بازه زمانی مورد نظر کاهشی است. بررسی‌ها نشان داد در چاه‌های خواجه‌ربیع و راه‌آهن که در مرکز شهر مشهد واقع شده‌اند، در یک دوره زمانی موارد بالآمدگی تراز آب نیز رخ داده است که دلیل بالآمدگی آب در گمانه‌ها، تغذیه از فاضلاب شهری، خاموش شدن چاه‌های بهره‌برداری داخل شهر و یا انتقال آب از خارج حوضه به منظور تأمین آب شرب شهر مشهد می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود در آینده و با گسترش شبکه جمع‌آوری فاضلاب در این مناطق و حذف این منابع تغذیه آبخوان، کاهش تراز آب و در نتیجه فرونشست زمین، این بخش از شهر را نیز فرا بگیرد (گزارش سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۹۶).

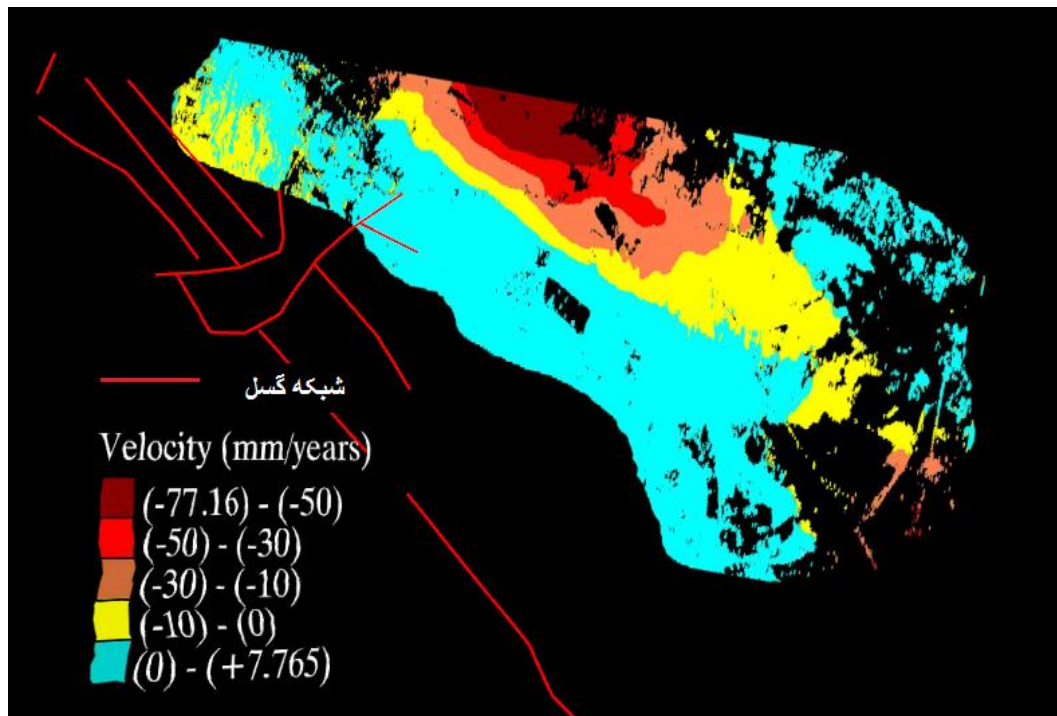
در ادامه به منظور بررسی تأثیرگذاری فعالیت تکتونیکی منطقه بر روی رخداد فرونشست زمین در منطقه، شبکه گسلی و زمین‌لرزه‌های به وقوع پیوسته در محدوده شهر مشهد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (۶).



شکل ۶: نقشه میزان بزرگی زلزله‌های رخ داد از تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۲۸ تا ۲۰۱۸/۰۵/۲۴ (مرکز لرزه‌نگاری کشوری)

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد تمامی زلزله‌های رخ داده در بازه زمانی مذکور کمتر از ۳٫۸ ریشتر می‌باشند که نشان از فعالیت کم تکتونیکی در منطقه دارد. بنابراین ساختار تکتونیکی تأثیر بسیار ناچیزی بر یافته‌های پژوهش در خصوص

پدیده فرونشست در محدوده مورد مطالعه داشته است. در کنار داده‌های آماری رخداد زلزله در منطقه شبکه گسلی فعال در محدوده شهر مشهد نیز شناسایی و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷).



شکل ۷: نقشه انطباق میان نرخ فرونشست و گسل‌های منطقه

همانطور که در شکل مشخص است گسل‌های اصلی منطقه در ناحیه غربی و جنوب غربی محدوده شهر قرار گرفته‌اند و این ناحیه طبق نتایج بدست آمده از تداخل سنجی راداری، دارای برخاستگی است که علت آن می‌تواند نتیجه عملکرد همین گسل‌ها باشد. از طرفی در ناحیه شمالی شهر مشهد که بیشترین فرونشست در آن رخ داده است هیچ گسل فعال و اصلی دیده نمی‌شود بنابراین می‌توان با اطمینان بالایی دخالت تکتونیک در رخداد فرونشست این منطقه را رد کرد و علت اصلی آن را کاهش تراز آب زیرزمینی در این ناحیه از شهر در نتیجه برداشت آب زیرزمینی دانست.

اعتبارسنجی یافته‌های سنجش از دوری فرآیندی ضروری است که یکی از روش‌های صحت‌سنجی آن از طریق پیمایش میدانی صورت می‌گیرد. در این پژوهش به منظور تعیین اعتبار یافته‌های مدل و همچنین جمع‌آوری شواهد مکانی، اقدام به پیمایش منطقه خین‌عرب در محدوده دارای فرونشست شد. نتایج زمینی نشان دهنده ایجاد ترک در ساختمانهای مسکونی و تأسیسات و شکل‌گیری شکاف در سطح زمین در محدوده مورد نظر است (شکل ۸).



شکل ۸: ترک در دیوار سازه مسکونی واقع در حریم شمالی شهر مشهد در منطقه خین عرب

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرونشست زمین به عنوان یکی از پدیده‌های مخرب ژئومورفولوژیکی در محدوده شهر مشهد مورد ارزیابی و اندازه‌گیری قرار گرفت و نرخ آن در بازه زمانی ۷ ساله تعیین گردید. نتایج تحقیق نشان داد در محدوده شهر مشهد از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بیشینه‌ی نرخ فرونشست برابر با ۷۷ میلی‌متر و مربوط به شمال شهر مشهد و مناطق پارک نوده، شهرک بهارآباد، خین عرب، شهرک والفجر و ایستگاه مترو نبوت بوده است. لازم به ذکر است فرونشست در حال پیشروی به سمت مرکز شهر است که می‌تواند در آینده نزدیک تبعات جبران‌ناپذیری به دنبال داشته باشد. به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری و تفسیر نتایج و بررسی علت احتمالی فرونشست شهر مشهد، روند تغییرات سطح تراز آب در چاه‌های پیژومتری در مناطق دارای فرونشست مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن افت شدید سطح آب در سال‌های گذشته را نشان می‌دهد که این موضوع تأییدی بر تاثیر کاهش تراز آبهای زیرزمینی بر فرونشست در این منطقه است. در ادامه جهت بررسی تاثیر فعالیت تکتونیکی در رخداد فرونشست، تاریخچه زلزله‌ها و شبکه گسلی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی‌ها دلالت بر عدم رخداد زمین‌لرزه‌های مؤثر (بیشینه ۳٫۸ در مقیاس ریشتر) در منطقه و حوالی آن داشت، همچنین در محدوده دارای فرونشست هیچ شبکه گسلی فعالی مشاهده نمی‌شود. لذا فرض و احتمال نقش‌آفرینی تکتونیک در رخداد فرونشست منطقه بسیار ناچیز است.

با توجه به روند افزایش جمعیت و توسعه شهر مشهد، تغییر شرایط استفاده از شبکه جمع‌آوری فاضلاب و گسترش این شبکه، تغییر شرایط اقلیمی و تغییر وضعیت برداشت آب‌های زیرزمینی، پایش دائمی وضعیت سطح آب زیرزمینی به عنوان عامل اصلی فرونشست در شمال شهر مشهد جهت جلوگیری از گسترش فرونشست و آسیب‌های جبران‌ناپذیر آینده برای شهر امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی مدیریت منابع آب و جلوگیری از توسعه کشاورزی و صنایع آب بر در حاشیه شهر جهت کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی منطقه می‌تواند روند گسترش فرونشست در شهر را کاهش و متوقف کند.

منابع

- افضل‌ی، ع.، شریفی کیا، م. و شایان، س.، ۱۳۹۲، ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و سکونت‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان، فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال اول شماره اول، صص ۷۳-۶۱.

- پیری، ح.، رحمانی، الف.، ۱۳۹۵، بررسی میزان فرونشست شمال دریاچه ارومیه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری اینترفرومتری InSAR، (مطالعه موردی: دشت تسوج)، کنفرانس بین‌المللی پیامدهای جغرافیایی و اثرات زیست محیطی شرایط دریاچه ارومیه.
- تورانی، م.، آق‌آتابای، م.، روستایی، م.، ۱۳۹۷، مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۸، شماره ۲۷، صص ۱۱۷-۱۲۸.
- خرمی، م.، ۱۳۹۶، تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشگاه فردوسی مشهد.
- رنجبرباروق، ز. فتح‌اله‌زاده، م.، ۱۴۰۱، بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آبهای زیرزمینی (مطالعه موردی: کالن شهر کرج)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دهم، شماره ۴، صص ۱۳۸-۱۵۵.
- روزبان، ع.، ۱۳۹۵، بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با بکارگیری تصاویر سنجنده جدید Sentinel-1، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری - گرایش سنجش از دور، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- زارع کمالی، م.، الحسینی المدرسی، ع. و نقدی، ک.، ۱۳۹۶. مقایسه میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم SBAS در باندهای راداری X و C (مطالعه موردی: اراضی تهران)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال هشتم، شماره ۳، صص ۱۰۴-۱۲۰.
- دولتی، ج.، لشکری پور، غ. ر.، حافظی مقدس، ن.، صالحی متعهد، ف.، ۱۳۹۵، بررسی روند توسعه، اثرات و مکانیسم فرونشست زمین در دشت مشهد، همایش تخصصی پدیده فرونشست زمین در ایران، تهران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی. ۱۳۹۹. بررسی فرونشست زمین در دشت مشهد.
- شریفی کیا، م.، ۱۳۹۱، تعیین میزان فرونشست زمین به کمک تداخل‌سنجی راداری در دشت نوق و بهرمان، آمایش و فضا، دوره شانزدهم، شماره ۳، صص ۵۶-۷۷.
- صفاری، ا.، جعفری، ف.، توکل، م.، ۱۳۹۵، پایش و فرونشست زمین و ارتباط آن با آب زیرزمینی مطالعه موردی دشت شهریار و کرج، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، صص ۹۳-۸۲.
- لشکری پور، غ.، غفوری، م.، صالحی، ر.، ۱۳۸۹. فرونشست دشت مهیار جنوبی و تاثیر شکاف‌های ناشی از آن بر مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی، پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط زیست، اسالمشهر، دانشگاه آزاد اسلامشهر.
- موسوی حرمی، ر.، محبوبی، ا.، برنر، ر.، خانه باد، م.، ۱۳۸۱. نقش تکتونیک در رسوبگذاری و مورفولوژی رودخانه کشف رود واقع در شمال شرق ایران، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره (۱). ۶۸-۵۳.
- یمانی، م.، نجفی، ا. و عابدینی، م.، ۱۳۸۸، ارتباط فرونشست زمین و افت آب زیرزمینیدشت قره بلاغ فسا، فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا دوره ۱، صص ۲۷-۹.
- Afzali A, Sharifi-Kia M, And Shayan S.(2013). Assessment of Infrastructure and Settlement Vulnerability from Land Subsidence in Damghan Plain, Iranian Journal of Applied Geomorphology.; 1(1) .
- Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M. A. & Walter, T. R. (2008). InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. 2008 Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas, track 414, 1-5.
- Akbari, V., Motagh, M., (2012), Improved Ground Subsidence Monitoring Using Small Baseline SAR Interferograms and a Weighted Least Squares Inversion Algorithm, IEEE Geoscience and Remote Sensing, 9(3): 37-441

- Bates, R. L., and Jackson, J. A., (1980). "Glossary of Geology." American.Scott, R.F. (1979). *Subsidence-revaluation and prediction of subsidence*. Saxema, S.K., Process Conference, ASCE, Gainsville, USA.
- Behniafar, .A. Eshraghi .A ,Ghanbarzadeh .H .(2010). *Investigation of effective factors in subsidence of Mashhad plain and its geomorphic consequences*.
- Bhattarai, R., Alifu, H., Maitiniyazi, A. & Kondoh, A. (2017). *Detection of land subsidence in Kathmandu valley, Nepal, using DInSAR technique*, Land, 6(2), 39-54.
- Bokhari, R., & et al. (2023). *Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data*. Heliyon, 9.
- Cigna, F., Bateson, L.B., Jordan, C.J., & Dashwood, C. (2014). *Simulating SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: Nationwide feasibility assessment to monitor the landmass of Great Britain with SAR imagery*. Remote Sensing of Environment, 152, 441–466.
- Chatterjee R S, Shailaja Thapa K B, Singh G,Varunakumar E, Raju V R (2015) *Detecting,mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques*. Journal of Earth System Science 124(6):1359-1376.
- Calo, F., Notti, D., Galve, J.P.,Abdikan, S., Gorum, T., Pepe, A. & Balik, F. (2017). *DInSAR based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya plain, Turkey*, Remote sensing, 9(1), 83-98.
- Dehghani, M., Valadan Zouj, M. J., Saatchi, S., Biggs, J., Parsons, B., Wright, T., (2009), *Radar Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence*, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37(1):147-156. doi:10.1007/s12524-009-0006-x.
- Davoodijam, M., Motagh, M., & Momeni, M. (2015). *Land subsidence in Mahyar Plain, Central Iran, investigated using Envisat SAR Data*. Proceedings the 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). Springer.
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M. (2018). *Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China*. Remote Sensing of Environment, 205,180–198.
- Goorabi, A., Karimi, M.,Yamani, M., Perissin, D. (2020). *Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations*, Journal of Arid Environments, Vol: 181, pp:104-238.
- Guoqing Y, Jingqin M (2008) *D-InSAR technique for land subsidence monitoring*. Earth Science Frontiers 15(4):239-243.
- Hooper A J (2007) *Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. Journal of Geophysical Research 112:1-21
- Haghshenas Haghghi, M., Motagh, M., (2021) *Land Subsidence Hazard In IRAN Revealed By Country-Scale Analysis Of Sentinel-1 INSAR*.
- Liu, C.W., Lin, W.S., & Cheng, L.H. (2006). *Estimation of land subsidence caused by loss of smectiteinterlayer water in shallow aquifer systems*. Hydrogeology, 14(4), 508-525.
- Liu, Z., & et al. (2023) *Land subsidence modeling and assessment in the West Pearl River Delta from combined InSAR time series, land use and geological data*. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 18.
- Liora Furst.S.,Doucet,S., Vernant,P., Champollion,C., and Carne,J.,(2021), *Monitoring surface deformation of deep salt mining in Vauvert (France), combining InSAR and leveling data for multi-source inversion*, Solid Earth, 12, 15–34.

- Motagh .M, Arabi .S ,Zschau .J levelling.(2007). , *Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, leveling and GPS*, *Geophysical Journal International*, 168(2).518-526.
- Moatag M, Davoodi J, Momeni M. Hashemi M.(2012) *Discovery and representation of subsidence of Mahyar plain of Isfahan by interferometry*, *Extended Scientific-Engineering Survey and Spatial Information*. 3(2).
- Mousavi, S.M., Shamsai, A., Naggar, M.H.Z., Khamsehchian, M., (2010), *A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3): 452-464.
- Pacheco, J., J. Arzate, E., Rojas, M., Arroyo, V., & Yutsis G. Ochoa. 2006. *Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data*. *Engineering Geology*, 84(40636): 143-160.
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., Ochoa, G.(2015). *Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México*. 84(3): 143-160
- Peter, H., Jaggi, A., Fernandez, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., & Femenias, P. (2017). *Sentinel-1A – First precise orbit determination results*. *Advances in Space Research*, 60(5), 879–892.
- Prati, C., Ferretti, A., & Perissin, D. (2010). *Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations*. *Geodynamics*, 49 (3–4), 161-170.
- Rateb, A., Abotalib, Z., (2020) *Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel1 satellites and GPS between 2015 and 2019*, *Science of the Total Environment* 729:1-10.
- Salehi, R., Ghafouri, M., Lashkaripour, G.R., & Dehghani, M. (2013). *Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry*. *Irrigation and Water Engineering*, 3(11), 47-57 (In Farsi).
- Scott, R.F. (1979). "Subsidence-a review in evaluation and prediction of subsidence." S.K. Saxema, ed., *Proc., Conf. ASCE, Gainesville*, 1-25
- Torabi-Hikmabad.(2014). *Evaluation of rising water level and its problems in the center of Mashhad*, Ferdowsi university of mashhad.
- USGS (United States Geological Survey), *Research and Review Information Located, Assess on September 2011*:<http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165>.
- Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). *Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China*. *Engineering Geology*, 193,243–255.
- Zhang, Y., Wang, Z., Xue, Y., Wu, J., & Yu, J. (2018). *Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area, China*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 745-760.