

بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آبهای زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان شهر کرج)

زهرا رنجبر باروق - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی.
محمد فتح اله زاده* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

چکیده

فرونشست زمین عبارتست از پایین رفتن تدریجی یا ناگهانی سطح زمین که در اثر عوامل مختلفی از قبیل فعالیت‌های تکتونیکی، استخراج معادن، میادین نفت و گاز و برداشت بی رویه آب زیرزمینی بوقوع می‌پیوندد و از جمله مسائلی است که در سالهای اخیر دشت‌های کشور را در معرض مخاطره قرار داده است. در کلان شهر کرج نیز روند رو به رشد جمعیت و مهاجرت در سالهای اخیر بر افزایش تقاضا و حجم برداشت آب از سفره‌های آب زیرزمینی افزوده و رخداد فرونشست زمین در برخی مناطق شهری مانند مهرشهر، کمالشهر و محمدشهر گزارش شده است. یکی از روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده از دورسنجی راداری است. اصول این تکنیک برای اولین بار به وسیله گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد. در این پژوهش با استفاده از تداخل‌سنجی راداری و روش SBAS در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ محدوده کلان‌شهر کرج توسط ۲۵ تصویر Sentinel-1 از نظر رخداد فرونشست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز سری زمانی تصاویر راداری در این دوره زمانی نشان داد در کلان‌شهر کرج مقدار تغییرات سطح زمین بین ۱۴۵- تا ۱۵+ میلی‌متر بوده است و بیشترین فرونشست در بخش شمال غربی منطقه مورد مطالعه یعنی مهرشهر رخ داده است که مقدار آن بین ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر بوده است. برای تعیین علت این رخداد، منطقه مهرشهر از نظر تغییرات سطح تراز آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد تغییرات تراز آب زیرزمینی در منطقه روند متناظری با رخداد فرونشست در منطقه مهرشهر دارد. برای بررسی علل و عوامل روند کاهشی سطح تراز آب‌های زیرزمینی نیز بارش منطقه طی ۷ سال گذشته مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان از کاهش بارش میانگین در این دوره زمانی دارد که می‌تواند در کنار برداشت آب زیرزمینی آثار نامطلوبی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی برجای گذارد و با توجه به خصوصیات بافت خاک منطقه که عمدتاً ریزدانه است در نهایت موجب رخداد فرونشست شود.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی، تراز آب‌های زیرزمینی، سری زمانی، فرونشست، کلان‌شهر کرج.

مقدمه

پوسته جامد زمین طی تاریخ زمین‌شناسی ثابت نبوده بلکه تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی به طور دائم در حال تغییر شکل است. این تغییرات ارتفاعی به صورت فرونشست و بالا آمدگی به میزان قابل توجهی باعث افزایش روند مخاطرات محیطی شده که اثر این مخاطرات باعث خسارات شدید به محیط طبیعی و عوارض انسانی می‌شود (زارع کمالی و همکاران، ۱۳۹۶).

بر پایه 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 و در مقیاس بزرگ به صورت تدریجی و آنی رخ می‌دهد (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۱۱). مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه خشک، متراکم شدن و فشردگی رسوبات در اثر برداشت بی‌رویه از منابع سفره‌های آب 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، ۲۰۱۴). 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 آب پیژومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد (پیتر^۶ و همکاران، ۲۰۱۷). فرونشست ناشی از افت سطح سیال عمدتاً در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه‌های شن و ماسه قرار دارد صورت می‌گیرد (صالحی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳). در چنین شرایطی تراکم غیرالاستیک ناشی از افزایش تنش مؤثر در خاک رخ می‌دهد و چینش دانه‌های خاک به هم خورده و ضخامت لایه عمودی کم می‌شود (داودی‌جم^۸ و همکاران، ۲۰۱۵). 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 که به نام پدیده شق شناخته شده است (ژانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج حاصل از فرونشست زمین ممکن است سبب ضرر اقتصادی چشمگیر و خسارت گسترده‌ای در ساختمان‌ها، جاده‌ها و زیرساخت‌ها شود (علی‌پور، ۲۰۰۸. چاترجی، ۲۰۱۵). نشست زمین یک مشکل خطرناک جهانی است و روش‌های هندسی برای پایش گسترده و جدی تغییر شکل زمین مناسب نیستند. پیش از این مطالعات فرونشست به مشاهدات میدانی و مدل‌سازی عددی محدود می‌شد ولی امروزه تصاویر راداری برای پایش تغییرات شکل زمین به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (گوکینگ و جینگکین^{۱۰}، ۲۰۰۸).

امروزه رخداد فرونشست زمین در بسیاری از شهرهای مهم جهان و از جمله شهر کرج و در بسیاری از نقاط مانند: مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایران، ایتالیا، هلند، ونزوئلا، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، فلسطین، لهستان و سوئد اتفاق افتاده است (لشکری‌پور و همکاران، ۲۰۱۴؛ هو، ۲۰۰۶؛ هو و همکاران، ۲۰۰۴).

1. United States Geological Survey (USGS)

2. Collapse

3. Liu

4. Scott

5. Cigna

6. Peter

7. Salehi

8. Davoodijam

9. Zhang

10. Guoqing and Jingqin

چندسالی است فرونشست در استان البرز به مرز هشدار رسیده و این پدیده یکی از بحران‌های اصلی استان به شمار می‌رود؛ بحرانی که تا کنون جدی گرفته نشده است. مهم‌ترین دلیل فرونشست در استان البرز استفاده بیش از حد و نادرست از منابع آبی زیرزمینی و مرگ آبخوان‌هاست. بیش از ۷۰ درصد آب آشامیدنی استان البرز از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود که این مساله تاثیر زیادی در فرونشست منطقه دارد. دشت‌های کرج و اشتهارد از جمله مناطق استان البرز هستند که طبق مطالعات سازمان نقشه‌برداری کشور سالانه بین ۲۴ تا ۳۰ سانتی‌متر فرونشست دارند.

یکی از روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده از دورسنجی راداری است. اصول این تکنیک برای اولین بار به وسیله گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد (پارچکو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). تداخل‌سنجی با بهره‌گیری از تصاویر راداری با پنجره مصنوعی یا SAR^۲ روش دقیقی مبتنی بر استفاده از حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه است و قادر است با دقت قابل توجهی در حد میلی‌متر تغییرات جابه‌جایی ارتفاعی در سطوح وسیع و در طی بازه‌های زمانی مختلف را اندازه‌گیری نماید (دانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). 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 تداخل‌سنجی راداری با پنجره مصنوعی (InSAR^۴) در سال‌های اخیر به عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودیتیک 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 تشریح پاره‌ای از آن‌ها خواهیم پرداخت؛ از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهش معتق^۶ و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ENVISAT با روش طول باز کوتاه، فرونشست دشت مهیار جنوبی اصفهان را ۸/۶ سانتی‌متر در سال محاسبه کردند. در پژوهشی دیگر افضلی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضل راداری، آسیب‌پذیری زیر ساخت‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان را مورد ارزیابی دادند.

باتارای^۷ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی رابطه و شناسایی پدیده‌ی فرونشست در روستای کاسماندو در نپال پرداختند. در این پژوهش از روش تداخل‌سنجی راداری و با استفاده از تصاویر راداری ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و به روش تفاضلی برای شناسایی دگرشکلی و میزان نشست زمین استفاده شد. نتایج پردازش این تصاویر نشان داد که منطقه‌ی مورد نظر با سرعت متوسط ۸/۴ سانتی‌متر در سال در حال فرونشست است. کالو^۸ 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 سفره‌ی آب‌های زیرزمینی و در نتیجه‌ی آن فرونشست اتفاق افتاده است که منجر به خسارت‌های اقتصادی فراوانی شده است. بدین منظور داده‌های ماهواره‌ی 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 بازه زمانی نشان می‌دهد. نتایج پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی در کنار داده‌های هواشناسی، چینه‌شناسی و داده‌های پیژومتری و همچنین اطلاعات مربوط به تغییرات پوشش زمین امکان

1. Pacheco

2. Synthetic Aperture Radar

3. Dong

4. Interferometric Synthetic Aperture Radar

5. Prati

6. Moatag

7. Bhattarai

8. Calo

دستیابی به اطلاعات بیشتری را در رابطه با تاثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در کاهش منابع آبهای زیرزمینی و فروریزش زمین می‌دهد. نادری و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از یک مدل جدید (GARDLIF) مناطق فرونشست احتمالی در آبخوان دشت سلماس را شناسایی کردند. 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 RADARSAT 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. راطب و ابوتالیب^۱ (۲۰۲۰) به بررسی فرونشست زمین در دلتای نیل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و GPS پرداختند. در این تحقیق از روش تداخل‌سنجی راداری و تعداد ۱۴۴ تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ استفاده کردند که 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 سیل مرتبط با افزایش سطح دریا در دلتای نیل شدند. (گورابی و همکاران، ۲۰۲۰) در پژوهشی با استفاده از سری تصاویر Sentinel-1 و روش PS به بررسی فرونشست در کلان شهر اصفهان در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد فرونشست سالانه‌ای بین ۵ تا ۱۰۰ در مدت ۵ سال رخ داده که از سمت جنوب به شمال و شمال شرق و شرق روند افزایشی دارد. حق‌شناس حقیقی و معتق^۲ (۲۰۲۱) به بررسی خطر فرونشست زمین در ایران براساس تحلیل مقیاس کشوری پرداختند. در این تحقیق با استفاده از ۶۶ تصویر Sentinel-1 از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷، فرونشست زمین در سراسر ایران بررسی شد و برای اولین بار نقشه جامعی از فرونشست زمین در ایران و توزیع فضایی بزرگی آن را تشخیص دادند و به تحلیل سری زمانی تغییر شکل بصورت کمی پرداختند. نتایج نشان داد بخشهایی از جاده‌ها و راه‌آهن 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 تداخل‌سنجی راداری پرداختند و تصاویر SAR را با داده‌های تراز آب زیرزمینی ترکیب کردند. هدف از پژوهش حاضر، شناسایی فرونشست زمین توسط سری زمانی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از سری تصاویر راداری Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ و بررسی ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در کلان‌شهر کرج می‌باشد.

داده‌ها و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

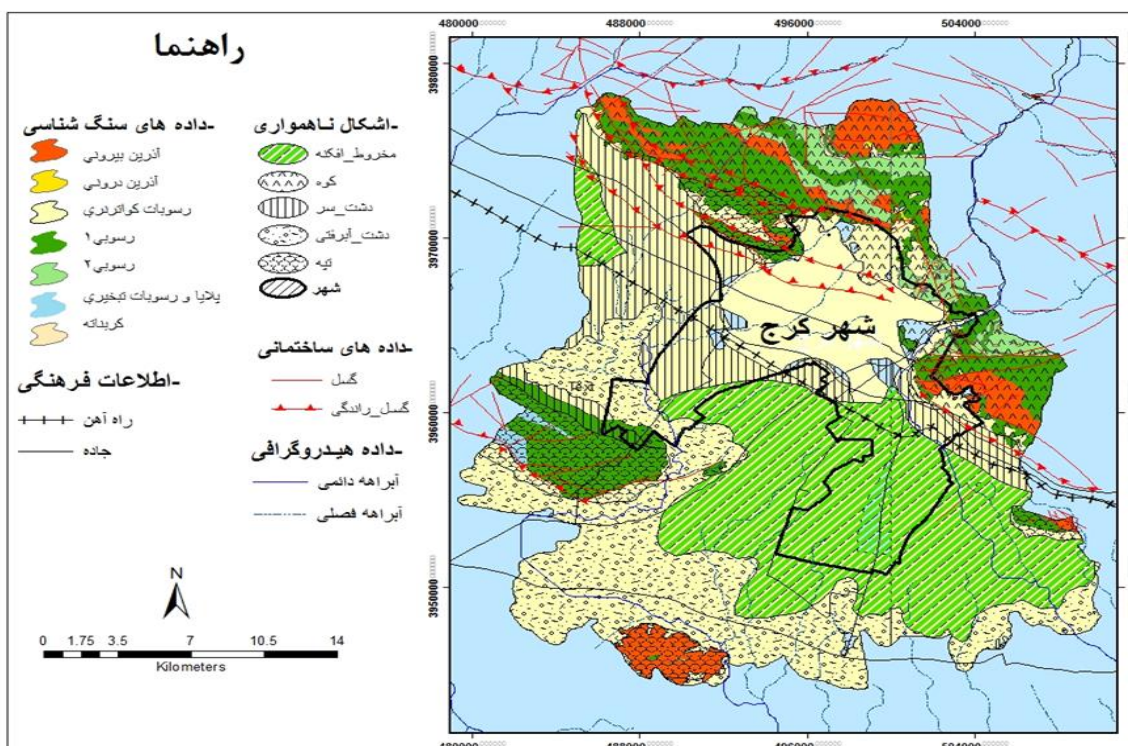
کرج یکی از کلان‌شهرهای ایران و همچنین مرکز استان البرز است که در دامنه‌های جنوبی البرز میانی و شمال غرب شهر تهران با وسعتی حدود ۶۵۶ کیلومتر مربع بین ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی واقع شده است و از نظر ژئومورفولوژی به واحدهای کوهستان، تپه، دشت‌سر و مخروط افکنه تقسیم می‌شود. بخش کوهستانی منطقه بیشتر در مناطق شمالی، شمال شرقی و شرق محدوده و بخش‌های کوچکتر و کم ارتفاع‌تری در قسمت غرب (ارتفاعات حلقه در) و جنوب، دامنه‌های شمالی کوه آق‌داغ واقع شده است (شکل ۱). واحد دشت‌سر نیز ادامه لایه سنگ اصلی کوهستان است که به شکل سطح مقعری در قاعده ارتفاعات ظاهر می‌شود و قسمت‌های عمده‌ای از مناطق شهری کرج بر روی لندفرم دشت‌سر گسترش یافته است. واحد مخروط افکنه نیز توسط رودخانه کرج و بعد از خروج از کوهستان، مخروط افکنه کرج (مخروط افکنه قدیمی که شهر کرج روی آن قرار گرفته

1. Rateb & Abotalib

2. Haghshenas Haghghi & Motagh

3. Liora Furst

است) را بوجود آورده است و در گذر زمان، رودخانه کرج با رسوب‌گذاری و تراکم مواد رسوبی در سطح مخروط افکنه، باعث بالا آمدن سطح مخروط و تسهیل جابه‌جایی کانال‌ها به طرف جنوب‌شرق شده و مخروط‌افکنه بزرگ و کنونی کرج در اثر جابه‌جایی مکرر کانال‌ها بوجود آمده است. واحد دشت آبرفتی از جمله لندفرم‌های رودخانه‌ای است که در نتیجه رسوب‌گذاری آبرفت‌های حمل شده توسط رودخانه بوجود آمده است. این واحد در قسمت جنوبی و جنوب‌غربی محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۱۳۲۵ متر و به ترتیب بیشترین و کمترین ارتفاع آن ۲۵۵۵ و ۱۱۲۸ متر می‌باشد. رودخانه کرج از ارتفاعات شمال تهران سرچشمه گرفته و پس از عبور از دره‌های عمیق کوهستانی، از شمال شرق وارد شهر کرج شده و با امتداد به سمت جنوب‌شرق وارد دشت شهریار می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی و نقشه ژئومورفولوژی محدوده کلان‌شهر کرج

از نظر آب و هوایی کرج تحت تأثیر ارتفاعات البرز و دره چالوس و رودخانه کرج قرار دارد که موجب خنک و مرطوب‌تر شدن این منطقه نسبت به تهران می‌گردد و این تمایز تقریباً در تمام طول سال مشاهده می‌شود. علت اختلاف دمای کرج نسبت به تهران بخصوص در شب‌ها به سبب نزدیکی کرج به ارتفاعات شمالی و سرد شدن شبانه این دامنه‌ها و وزش نسیم کوه به دشت می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده بر روی آمار بلند مدت ایستگاه هواشناسی کرج، کلان‌شهر کرج با بارندگی سالانه ۲۴۷ میلی‌متر دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان نسبتاً سرد و تابستان معتدل می‌باشد (رنجبر باروق، ۱۳۹۸). جمعیت استان البرز طبق اعلام مرکز ملی آمار ایران در سال ۲۰۱۶ برابر با ۵،۵۹۵،۴۹۲ نفر بوده است که از این جهت و علیرغم جدا شدن فردیس از مناطق دوازده‌گانه شهری کرج و معرفی آن به عنوان شهرستان مستقل کماکان پس از شهرهای تهران، مشهد به عنوان سومین شهر پرجمعیت ایران به‌شمار می‌رود. کرج پس از تهران بزرگ‌ترین شهر مهاجرپذیر ایران است. این شهر در میان کلان‌شهرهای ایران با رشد جمعیت سالانه ۱۴/۳ درصد بالاترین رشد جمعیت را دارد که از این جهت بررسی مخاطرات پیش روی این شهر بسیار حائز اهمیت است.

داده‌های تحقیق

هدف از این پژوهش شناسایی مناطق دارای فرونشست و برخاستگی و نرخ این تغییرات در محدوده مورد نظر و در نهایت بررسی علل و عوامل موثر در رخداد و یا تشدید آن می‌باشد. برای این منظور ابتدا سری تصاویر راداری Sentinel-1 با اختلاف زمانی و مکانی مناسب (حداکثر ۱۵۰ متر) شامل ۲۵ تصویر (جدول ۱) در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ با جهت برداشت Ascending با توجه به اینکه در این جهت پوشش مناسبی نسبت به منطقه مورد مطالعه داشتند انتخاب شد. همچنین Dem 30 متر مربوط به سنجنده Aster برای حذف اثر توپوگرافی از اینترفروگرام‌های ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. یکی از عواملی که معمولاً در رخداد فرونشست 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 کنار داده‌های راداری، اطلاعات مربوط به روند تغییرات تراز چاه‌های پیزومترهای منطقه و همچنین میانگین بارش ماهانه منطقه برای مقایسه و بررسی علل فرونشست در محدوده مورد مطالعه به ترتیب از شرکت مدیریت منابع آب کشور و سازمان هواشناسی کشور تهیه شد.

جدول (۱): مشخصات تصاویر مورد استفاده

ردیف	Polarization	تاریخ	ردیف	Polarization	تاریخ
۱	VV	2014/10/19	۱۴	VV	2018/01/19
۲	VV	2015/01/23	۱۵	VV	2018/04/25
۳	VV	2015/04/17	۱۶	VV	2018/07/30
۴	VV	2015/07/22	۱۷	VV	2018/10/22
۵	VV	2015/10/02	۱۸	VV	2019/01/26
۶	VV	2016/01/06	۱۹	VV	2019/04/20
۷	VV	2016/03/18	۲۰	VV	2019/07/25
۸	VV	2016/07/04	۲۱	VV	2019/10/05
۹	VV	2016/10/20	۲۲	VV	2020/04/02
۱۰	VV	2017/01/24	۲۳	VV	2020/06/25
۱۱	VV	2017/04/18	۲۴	VV	2020/11/04
۱۲	VV	2017/07/23	۲۵	VV	2021/01/03
۱۳	VV	2017/10/15			

روش‌ها

در این تحقیق به منظور ارزیابی تغییرات سطح زمین شامل فرونشست و برخاستگی از روش تداخل‌سنجی و تکنیک SBAS در پردازش سری تصاویر راداری و توسط افزونه SARscape_5.2.1 در محیط نرم‌افزار 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 شده و تصویری به نام تداخل‌نگار (اینترفروگرام) را تولید می‌کنند. تداخل‌نگار تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر در دو زمان مختلف به دست آمده است که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند (دنیل^۱ 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

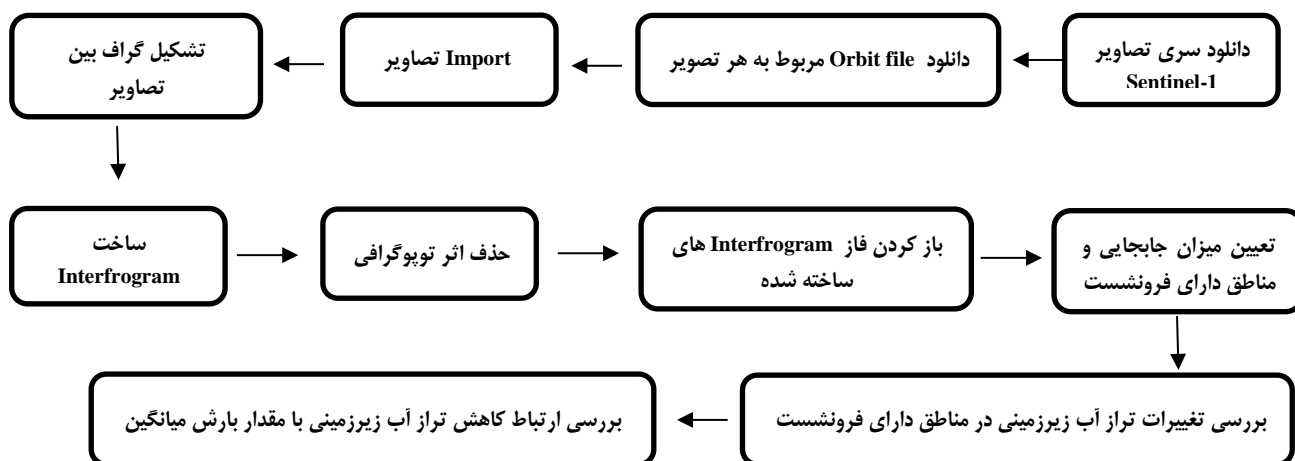
1. Interferogram

2. Daniel

3. Hanssen

دو زمان مختلف تصویربرداری است، می‌باشد. به کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان متغیرهای مختلفی 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 و تکنیک کمترین مربعات (SBAS) است (ژائو^۲، ۲۰۱۳). در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرد که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا و همچنین خط مبنای زمانی^۳ آنها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌سنجی نگاره‌هایی تشکیل می‌شود که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود (دونگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۴) (جدول ۲).

جدول ۲: فلوجارت تحقیق



نتایج

تجزیه و تحلیل داده‌ها

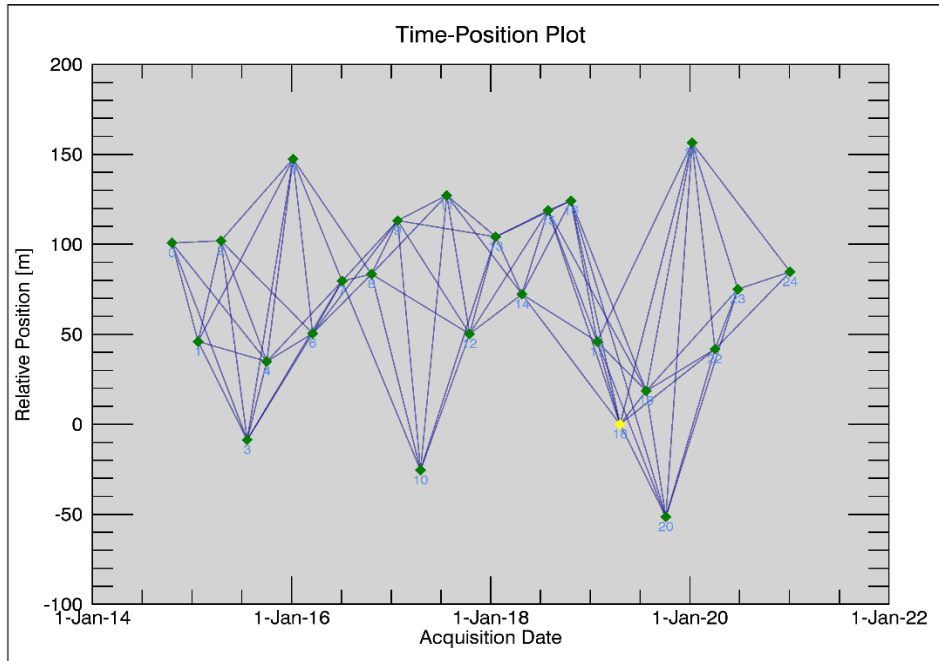
پس از تهیه سری تصاویر راداری با اختلاف مکانی و زمانی مناسب و تشکیل گراف مکانی و زمانی بین تصاویر (شکل ۲ و ۳) شامل ۲۵ تصویر، با استفاده از روش سری زمانی SBAS میزان تغییرات سطح زمین در محدوده مطالعاتی طی بازه زمانی ۷ ساله (۲۰۱۴/۱۰/۱۹ تا ۲۰۲۱/۰۱/۰۳) محاسبه شد (شکل ۵). پس از تهیه نقشه نهایی تغییرات سطح زمین، 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 تجزیه و تحلیل شدند.

1. Small Base Line

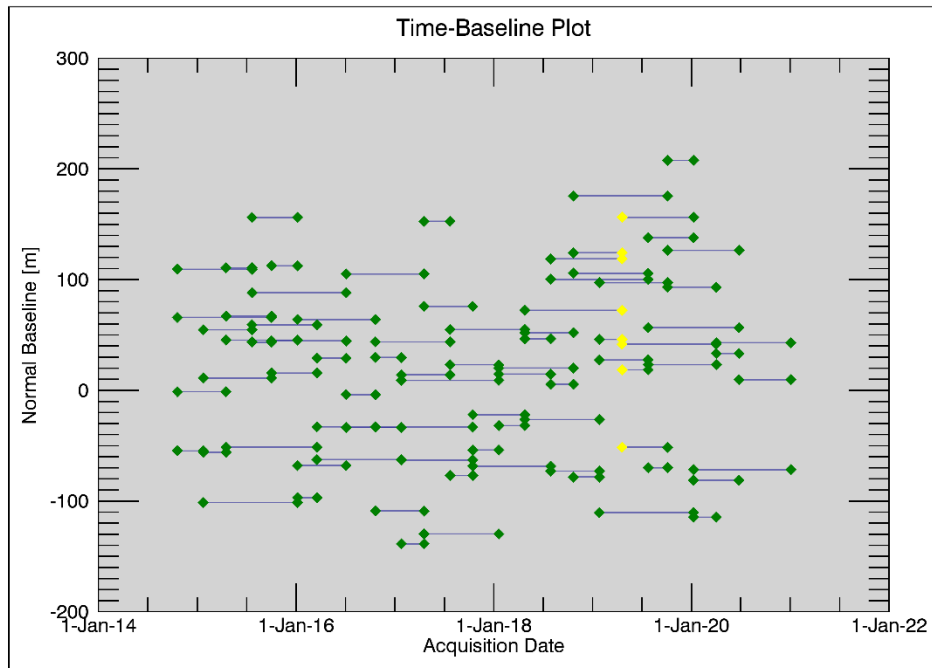
2. Zhou

3. Temporal Baseline

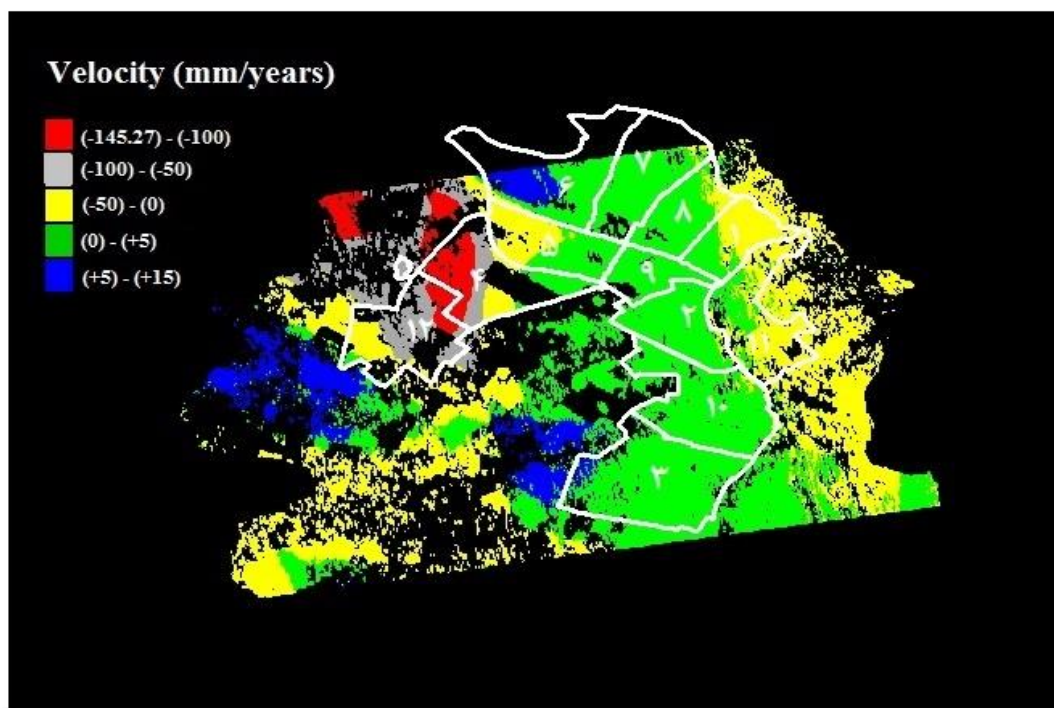
4. Dong



شکل ۲: شبکه گراف ترسیم شده برای تشکیل تداخل‌نگارها براساس اختلاف مکانی بین تصاویر slave و تصویر master

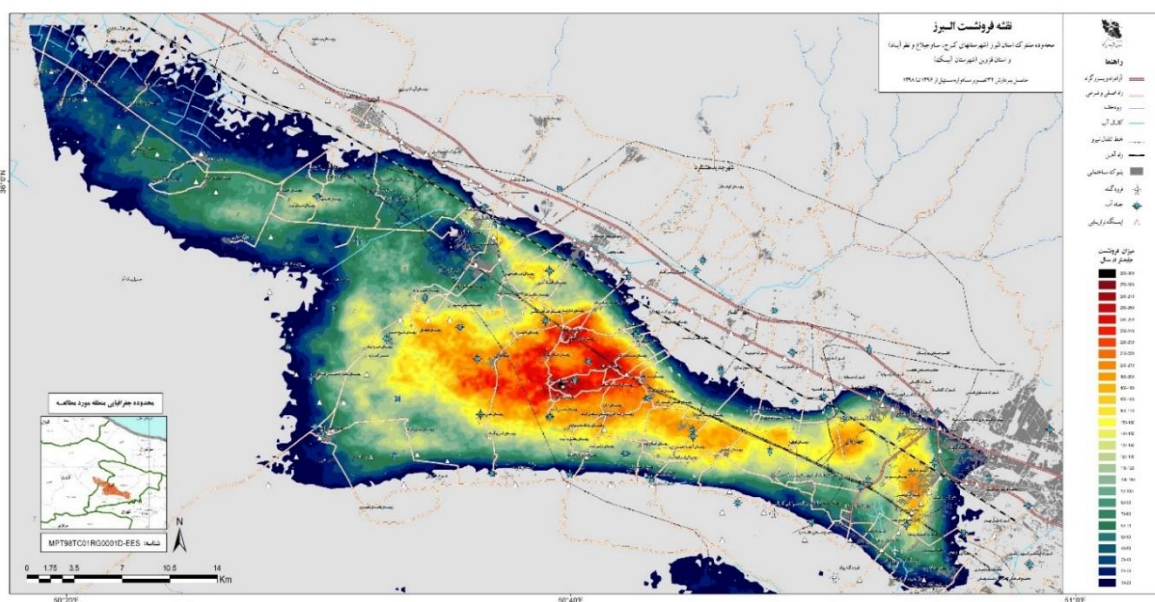


شکل ۳: شبکه گراف ترسیم شده برای تشکیل تداخل‌نگارها براساس اختلاف زمانی بین تصاویر slave و تصویر master



شکل (۴-الف): نقشه سرعت میانگین جابجایی سطح زمین منطقه مورد مطالعه از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بر حسب میلی‌متر در سال

همانطور که در خروجی نهایی مدل (شکل ۴-الف) مشخص است در بازه ۷ ساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بیشترین میزان جابجایی زمین بین $-145,27$ تا $+15$ میلی‌متر در سال بوده است که با توجه به مطالعات انجام شده پیشین توسط سازمان نقشه برداری کشور (۱۳۹۷) در استان البرز که فرونشست سالانه را تا 300 میلی‌متر را هم برآورد کرده است^۱. بنابراین فرونشست $145,27$ میلی‌متر در سال برای بخش‌هایی از کلان‌شهر کرج دور از واقعیت نیست (شکل ۴-ب).



شکل (۴-ب): نقشه فرونشست استان البرز تهیه شده توسط سازمان نقشه برداری کشور

¹ <https://waterhouse.ir/news/2171/29>

در کلان‌شهر کرج مناطق ۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ میزان بالآمدگی بین ۰ تا ۵+ میلی‌متر و قسمتی از منطقه ۶ بالآمدگی ۵+ تا ۱۵+ میلی‌متر را داشته است. از سوی دیگر بیشترین میزان فرونشست در بخش شمال‌غربی منطقه مورد مطالعه یعنی مناطق ۴ و ۱۲ (مهرشهر) می‌باشد که بین ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر فرونشست را ثبت کرده است (شکل ۵-الف). همچنین نیمه شرقی منطقه ۵ کلان‌شهر کرج، بالآمدگی ۰ تا ۵+ میلی‌متر و نیمه غربی آن فرونشست ۰ تا ۵۰ میلی‌متر را داشته است. برای تعیین عوامل اصلی رخداد فرونشست در منطقه مهرشهر، محدوده از نظر بهره‌برداری از معادن، کاربری زمین از نظر ساخت بنا و سازه‌های عظیم، فعالیت تکتونیکی و در نهایت تغییرات سطح تراز آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. طبق اطلاعات بدست آمده از سازمان زمین‌شناسی و وزارت صمت در محدوده شهر کرج هیچ معدنی در حال بهره‌برداری نیست بنابراین می‌توان دخالت حفاری‌های ناشی از بهره‌برداری از معادن در رخداد فرونشست منطقه را منتفی دانست. همچنین بررسی میدانی منطقه مهرشهر نیز مشخص کرد هیچ سازه و ساختمان بلندمرتبه‌ای در این محدوده وجود ندارد که نیروی ناشی از وزن آن بتواند در رخداد فرونشست زمین موثر باشد (شکل ۵-ب).

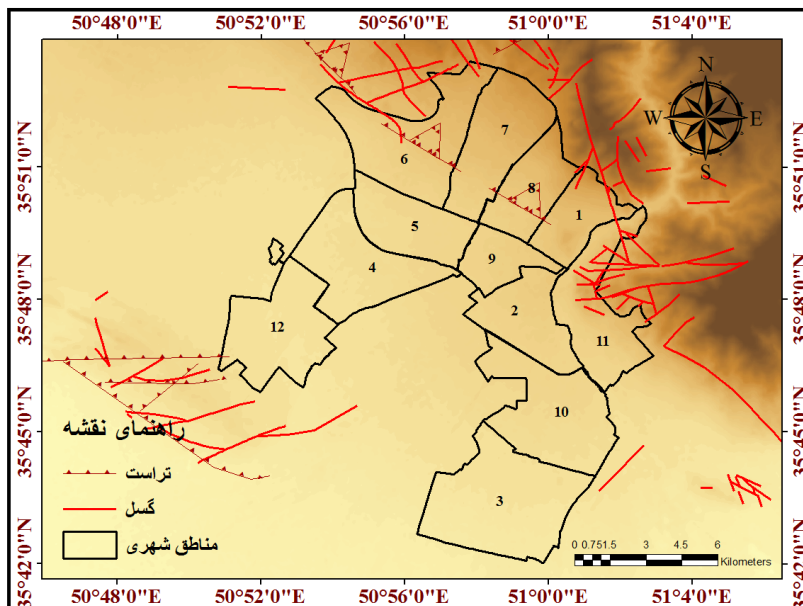


شکل (۵-الف): آثار فرونشست در اطراف منطقه مهرشهر (آرشیو)



شکل (۵): عدم وجود سازه و ساختمان بلند مرتبه و عظیم در مهرشهر که وزن آن موجب فرونشست شود

برای بررسی فعالیت تکتونیک در رخداد فرونشست منطقه، شبکه گسل و تراست‌های فعال موجود در محدوده مورد مطالعه شناسایی و مشخص شد (شکل ۶).



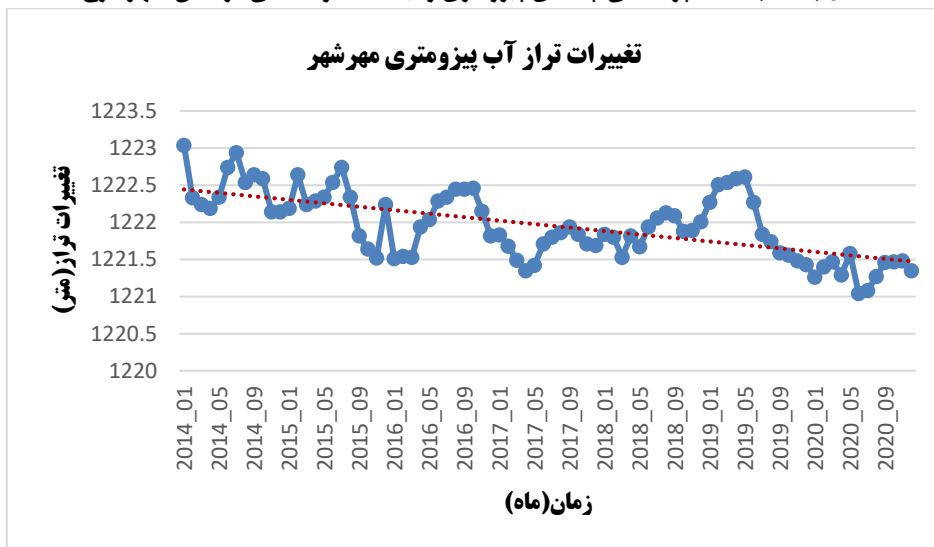
شکل (۶): پراکندگی شبکه گسل در منطقه مورد مطالعه

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تراکم خطوط گسل منطقه در بخش‌های کوهستانی و شمال غرب و شمال و جنوب غرب شهر کرج متمرکز است بطوریکه در هیچکدام از مناطق ۱۲ گانه شهری به جز ۶ و ۸، خطوط اصلی گسل و تراست دیده نمی‌شود براین اساس می‌توان استنباط کرد که در محدوده شهر کرج و بخصوص منطقه ۴ و ۱۲ (مهرشهر) تکتونیک چندان فعال نیست.

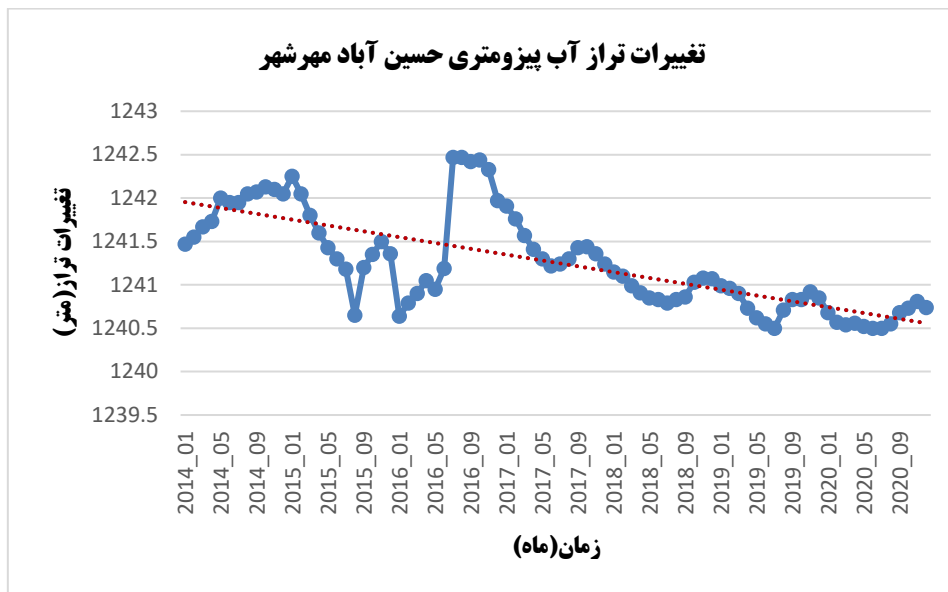
از دیگر عوامل موثر در رخداد فرونشست، کاهش سطح تراز آبهای زیرزمینی در نتیجه بهره برداری نامتوازن از منابع آب زیرزمینی است که چنانچه مقدار برداشت از آبخوان بیش از تغذیه آن باشد بیان آبخوان منفی و کاهش تراز آب در آبخوان می‌شود که نتیجه آن فرونشست زمین است. برای بررسی وضعیت تراز آب زیرزمینی در منطقه مهرشهر، تغییرات تراز آب چاه‌های پیزومتری مهرشهر، حسین‌آباد مهرشهر گلشهر و حافظیه که دارای آمار اندازه‌گیری کامل و دقیقی بودند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (شکل ۷ الف-ب-ج-د-ه).



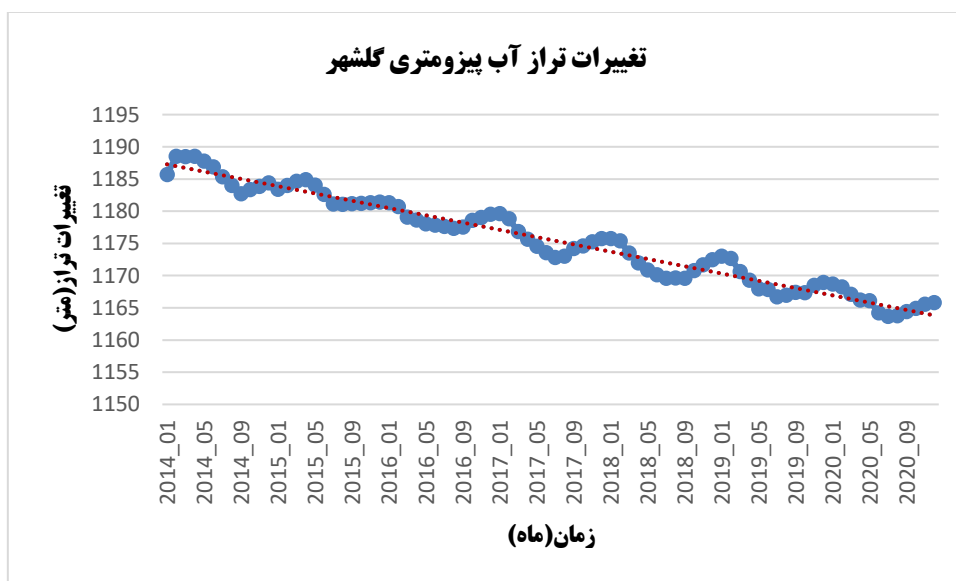
شکل (۷ الف): نقشه پراکندگی چاه‌های پیزومتری و ایستگاه هواشناسی در کلان شهر کرج



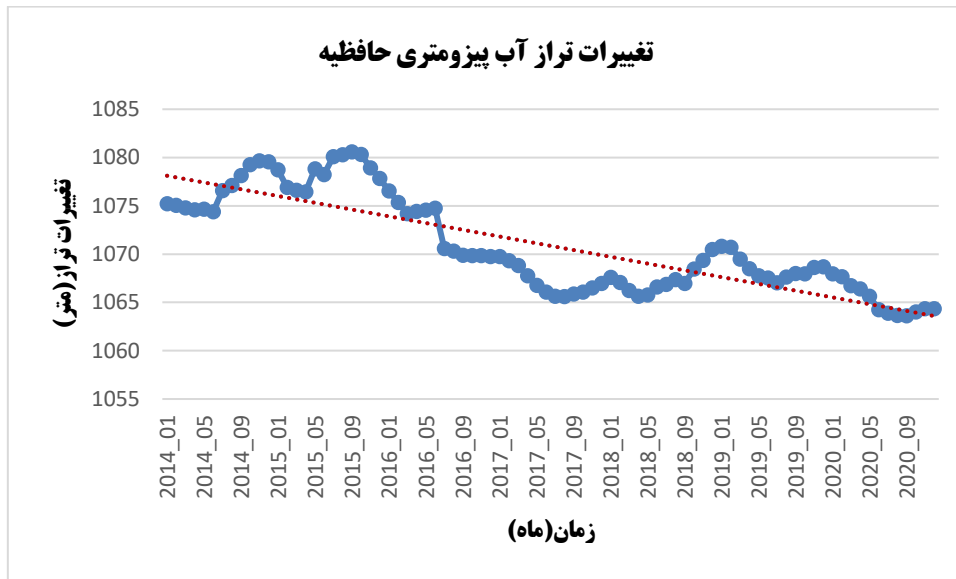
شکل (۷ ب): نمودار تغییرات تراز آب پیزومتری مهر شهر در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ بر حسب متر



شکل (۷ج): نمودار تغییرات تراز آب پیزومتری حسین آباد مهرشهر در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ بر حسب متر

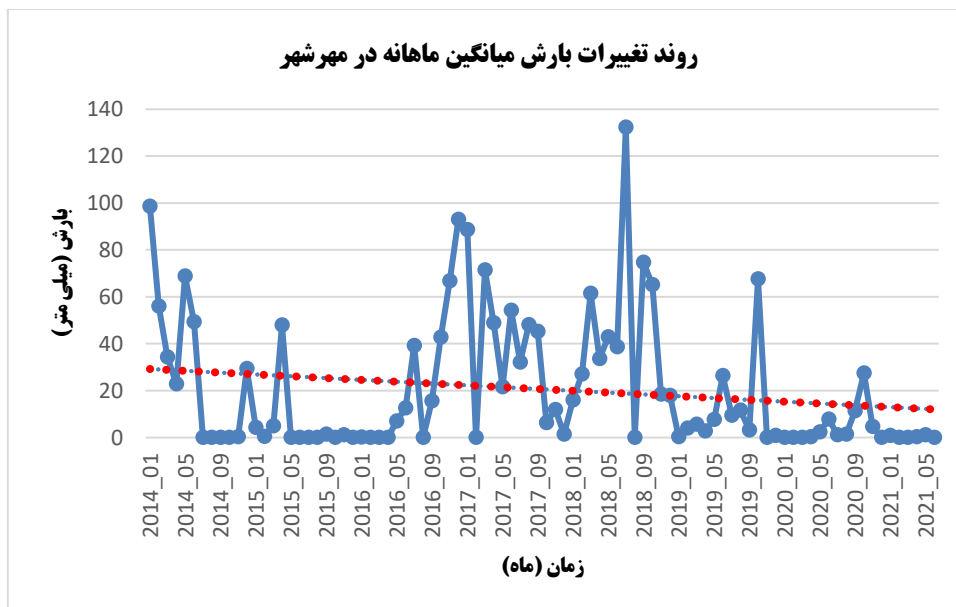


شکل (۷د): نمودار تغییرات تراز آب پیزومتری گلشهر در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ بر حسب متر



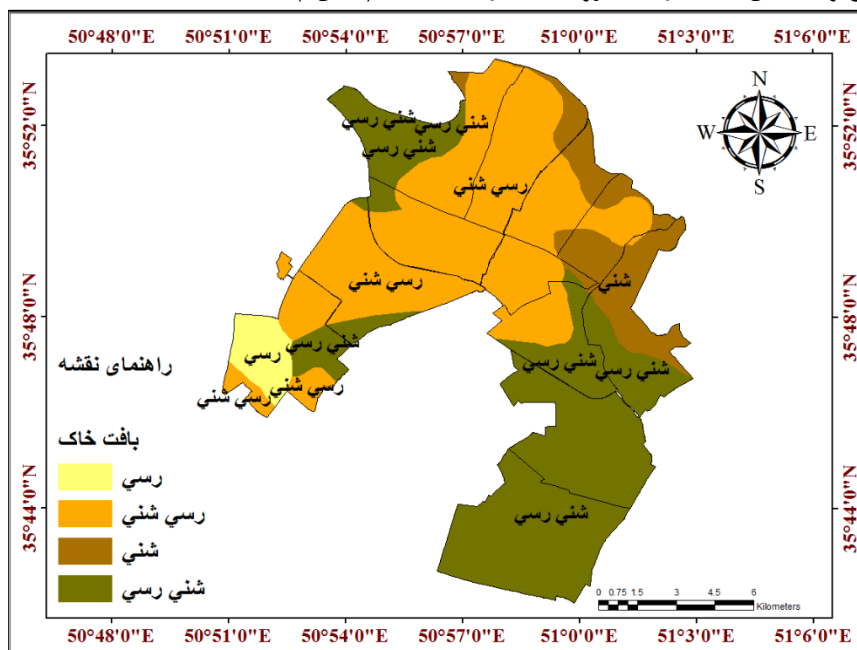
شکل (۷): نمودار تغییرات تراز آب پیزومتري حافظيه در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ بر حسب متر

همانطور که در نمودار شکل‌های (۷، ج، د، ه) مشخص است روند تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در چاه‌های پیزومتري مهرشهر با تراز پایه ۱۲۳۵٫۷۴ متر، حسین‌آباد مهرشهر با تراز پایه ۱۲۵۵٫۱۵ متر، گلشهر با تراز پایه ۱۲۸۰٫۵ متر و حافظيه با تراز پایه ۱۲۵۱٫۷۵ متر که به عنوان نمونه انتخاب شده‌اند نزولی است به طوری که در ۷ سال اخير به ترتیب حدود ۱ ، ۱٫۵، ۳۱ و ۱۲ متر کاهش تراز در این ۴ ایستگاه اتفاق افتاده است. برای بررسی علل و عوامل این روند تغییرات بارش منطقه براساس آمار ایستگاه هواشناسی کرج طی ۷ سال گذشته بررسی شد که نشان از کاهش بارش میانگین حوضه در این دوره زمانی دارد بطوریکه میانگین بارش در این دوره زمانی نیز حدود ۵۰ میلی‌متر کاهش را نشان می‌دهد (شکل ۸) که می‌تواند در کنار برداشت آب زیرزمینی حتی با حفظ روند ثابت آثار نامطلوبی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی و در نهایت رخداد فرونشست برجای بگذارد.



شکل (۸): نمودار تغییرات بارش میانگین ماهانه در مهرشهر در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بر حسب میلی‌متر

در کنار افت سطح آب زیرزمینی و کاهش بارش میانگین در سال‌های گذشته بررسی ویژگی‌های خاک منطقه نیز نشان می‌دهد بافت خاک عمدتاً ریزدانه و شنی یا رسی و یا مخلوطی از این دو است که بسیار مستعد فرونشست می‌باشد که همین امر نیز می‌تواند عامل تشدید رخداد فرونشست در منطقه باشد (شکل ۹).



شکل (۹): نقشه بافت خاک در کلانشهر کرج

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی میزان فرونشست و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در کلان شهر کرج پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد در بازه ۷ ساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بیشترین میزان جابجایی زمین بین ۱۴۵٫۲۷- تا ۱۵+ میلی‌متر در سال بوده است. در کلان‌شهر کرج مناطق ۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ میزان بالآمدگی بین ۰ تا ۵+ میلی‌متر در سال و قسمتی از منطقه ۶ بالآمدگی ۵+ تا ۱۵+ میلی‌متر در سال را داشته است. از سوی دیگر بیشترین میزان فرونشست در بخش شمال غربی منطقه مورد مطالعه یعنی مناطق ۴ و ۱۲ (مهرشهر) می‌باشد که بین ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر در سال فرونشست را ثبت کرده است. همچنین نیمه شرقی منطقه ۵ کلان‌شهر کرج، بالآمدگی ۰ تا ۵+ میلی‌متر در سال و نیمه غربی آن فرونشستی بین ۰ تا ۵۰ میلی‌متر در سال را داشته است. برای تعیین عوامل اصلی این رخداد، منطقه مهرشهر به طور دقیق‌تری از نظر بهره‌برداری از معادن، فعالیت تکتونیکی، کاربری زمین از نظر ساخت بنا و سازه‌های عظیم و در نهایت تغییرات سطح تراز آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بررسی‌ها نشان داد تنها تغییرات تراز آب زیرزمینی در منطقه روند متناظری با رخداد فرونشست در منطقه مهرشهر دارد به طوری که در ۷ سال اخیر به طور میانگین حدود ۱ متر کاهش تراز آب اتفاق افتاده است. برای بررسی علل و عوامل این روند کاهشی، بارش منطقه نیز طی ۷ سال گذشته بررسی شد که نشان از کاهش بارش میانگین در این دوره زمانی دارد به طوری که میانگین بارش در این دوره زمانی نیز حدود ۵۰ میلی‌متر کاهش را نشان می‌دهد که می‌تواند در کنار برداشت آب زیرزمینی حتی با حفظ روند ثابت آثار نامطلوبی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی و در نهایت رخداد فرونشست برجای گذارد. در کنار افت سطح آب زیرزمینی و کاهش بارش میانگین در سال‌های گذشته بررسی ویژگی‌های خاک منطقه نیز نشان می‌دهد بافت خاک عمدتاً ریزدانه و شنی یا رسی و یا مخلوطی از این دو است که بسیار مستعد فرونشست می‌باشد که همین امر نیز می‌تواند عامل تشدید رخداد فرونشست در منطقه باشد. بنابراین با توجه به نتایج پژوهش حاضر و رابطه مستقیم میزان فرونشست در کلان‌شهر کرج با افت آب زیرزمینی، ضروری است

در بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی منطقه بخصوص در بخش کشاورزی نظارت بیشتری صورت گیرد، چرا که تداوم روند کنونی در استفاده از آب‌های زیرزمینی با توجه به خشکسالی‌های اخیر منجر به مخاطرات جبران‌ناپذیری ناشی از فرونشست در منطقه خواهد شد.

منابع

- افضل‌ی، ع.، شریفی کیا، م. و شایان، س.، ۱۳۹۲، ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت ها و سکونت‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان، فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال اول، شماره اول، صص ۷۳-۶۱.
- رنجبر باروق، ز. (۱۳۹۸)، تبیین نقش ژئومورفولوژی در آمایش کلان‌شهر کرج، رساله دکتری دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی.
- روزبان، ع.، ۱۳۹۵، بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری با بکارگیری تصاویر سنجنده جدید SENTINEL، 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.
- شریفی کیا، م.، ۱۳۹۱، تعیین میزان فرونشست زمین به کمک تداخل سنجی راداری در دشت نوق و بهرمان، آمایش و فضا، دوره شانزده، شماره ۳، صص ۷۷-۵۶.
- 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.
- 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. *Assessment of Infrastructure and Settlement Vulnerability from Land Subsidence in Damghan Plain, Iranian Journal of Applied Geomorphology*.2013; 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. https://doi.org/10.1109/USEREST.2008.4740370.*
- 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.*
- 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.*
- 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.
- 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, 104238.
- 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 smectite interlayer water in shallow aquifer systems. *Hydrogeology*, 14(4), 508-525.
- Liora Furst.S., Doucet, S., Vernant, P., Champollion, C., and Carme, J., 2020, Monitoring surface deformation of deep salt mining in Vauvert (France), combining InSAR and leveling data for multi-source inversion, *Solid Earth*, 12, 15–34.
- Moatag M, Davoodi J, Momeni M. Hashemi M. Discovery and representation of subsidence of Mahyar plain of Isfahan by interferometry, *Extended Scientific-Engineering Survey and Spatial Information*. 2012; 3(2).
- 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.
- 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.
- 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).
- 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. (2016). 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.
- <https://waterhouse.ir/news/2171/29>