

بررسی رابطه بین فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی در دشت کرج: مطالعه تطبیقی ترازیبی و

DInSAR

مجتبی شیرینی^۱، غلامرضا لشکری پور^{۲*}، ناصر حافظی مقدس^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

چکیده

فرونشست زمین پدیده‌ای است که در اثر تعامل بین جریان آب زیرزمینی و تغییر شکل خاک رخ می‌دهد. مطالعه حاضر به بررسی تناقض بین فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی در دشت کرج می‌پردازد. با بررسی هیدروژئولوژی دشت و اندازه‌گیری فرونشست زمین با روش‌های ترازیبی و DInSAR در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳، مشخص شد که نرخ فرونشست در محدوده‌ای هلالی شکل از شمال غربی تا محمد شهر با ۱۵۸ میلی‌متر در سال، به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر نقاط است. این تناقض با توجه به کمترین افت آب زیرزمینی در این پهنه، ابهاماتی را در رابطه مستقیم و همیشگی بین فرونشست و افت آب زیرزمینی ایجاد می‌کند. بررسی سه فرضیه شامل حفاری پیرومترهای مرکز دشت در یک آبخوان معلق کم عمق و قرارگیری آبخوان اصلی در لایه دوم، نوسانات سالیانه تراز آب زیرزمینی به علت تزریق فاضلاب به آبخوان و شسته شدن ذرات منفصل بر اثر دبی ورودی و خروجی بالا نشان داد، احتمال اینکه آبخوان لایه دوم نقش اصلی را در فرونشست زمین ایفا کند، بیشتر از بقیه فرضیه‌ها است. مطابقت نتایج حاصل از ترازیبی با روش‌های تداخل‌سنجی راداری، همبستگی قابل قبولی را نشان می‌دهد. همبستگی معنی‌دار منفی ۶۶ تا ۸۸ درصدی نشان می‌دهد که حداکثر تحکیم خاک بعد از دو سال رخ می‌دهد. به طور کلی دو محل در مرکز دشت (مهرشهر) همچنان نرخ فرونشست بالایی دارند اما نرخ فرونشست سه محل دیگر در شمال غربی دشت به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.

کلید واژه‌ها: فرونشست زمین، افت آب زیرزمینی، ترازیبی، DInSAR، دشت کرج.

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی، مشهد lashkaripour@um.ac.ir

۳. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

فرونشست زمین به فرآیند فرونشست ناگهانی یا تدریجی سطح زمین اشاره دارد که به دلیل تراکم رسوبات ناشی از افزایش تنش مؤثر رخ می‌دهد (Galloway and Burbey, 2011). عوامل متعددی باعث فرونشست زمین می‌شوند که شامل ذوب شدن یخ، لرزش، تراکم طبیعی رسوبات، فعالیت‌های معدنی و برداشت آب‌های زیرزمینی است. از دهه ۱۹۴۰ (Terzaghi, 1943) نقش استخراج آب در افزایش تنش‌های مؤثر اضافی و کاهش فضای خالی لایه‌های خاک به‌خوبی شناخته شده است. به احتمال زیاد، "راهنمای مطالعات فرونشست زمین ناشی از برداشت آب زیرزمینی" اثر پلند (Poland, 1984) اولین مرجعی است که استخراج آب زیرزمینی را به‌عنوان عامل اصلی فرونشست زمین معرفی می‌کند. در دهه‌های اخیر، استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مصارف شهری و کشاورزی، عامل اصلی فرونشست زمین در بسیاری از نقاط جهان از جمله مشهد (Salehi Moteahd et al., 2019)، چین (Wang et al., 2019)، ویتنام (Ty et al., 2021) و سایر نقاط جهان (e.g. Lei et al., 2023; Ghahfarokhi et al., 2023; Chen et al., 2023; Hussain et al., 2024; Chatterjee et al., 2023) می‌باشد. ۴۵ ایالت در ایالات متحده آمریکا و بیش از ۹۵ شهر در چین درگیر پدیده فرونشست زمین می‌باشند (Wu et al., 2008). چندلایه بودن آبخوان‌ها و وجود آبخوان‌های عمیق محبوس همراه با لایه‌های ضخیم رس قابل تحکیم، زمینه‌ساز شکل‌گیری فرونشست می‌باشند (Figueroa-Miranda et al., 2018). باقری و همکاران (Begheri et al., 2021) با مطالعه ۲۹۰ منطقه تحت تأثیر فرونشست در ۴۱ کشور دنیا، دریافتند که ۷۶٫۹۲٪ از موارد فرونشست زمین در سراسر جهان ناشی از فعالیت‌های انسانی است و برداشت آب‌های زیرزمینی با ۵۹٫۷۵٪ بیشترین سهم را در این پدیده دارد. امروزه، مناطق تحت تأثیر فرونشست زمین، از جنبه‌های مختلفی، از جمله مسائل اقتصادی-اجتماعی، محیط زیستی و

حفاظتی، به یک دغدغه بزرگ بدل شده‌اند (Gambolati and Teatini, 2015)، به‌ویژه برای مناطق پرجمعیت دلتایی (Schmidt, 2015). درک عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و اتخاذ راهبردهای مؤثر برای کاهش آن بسیار مهم است. محققان متعددی به‌طور گسترده جنبه‌های مختلف فرونشست زمین را بررسی کرده‌اند و کارهای ارزشمند آن‌ها درک ما را از این پدیده پیچیده افزایش داده است.

تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) برای پایش واکنش‌های الاستیک و غیر الاستیک سیستم‌های آبخوان به تغییرات سطح آب زیرزمینی بسیار مناسب است. علاوه بر این، این تکنیک دیدگاه‌های جدیدی در مورد تأثیر ویژگی‌های لیتولوژی (سنگ‌شناسی) و ساختارهای زمین‌شناسی در آبخوان‌ها ارائه می‌دهد (e.g. Hoffmann et al., 2001; Li and Li., 2023; Motagh et al., 2008; Zuccarini et al., 2023). فنون سنجش‌ازدور که در ۳۸٪ از مطالعات به کار گرفته شده‌اند، به روشی توانمند و سودمند برای پایش فرایندهای تغییر شکل با دقتی بالا در حد میلی‌متر تا سانتیمتر تبدیل شده‌اند (Ciampalini et al., 2014; Zhou et al., 2020). روش‌های زیادی برای پردازش داده‌های DInSAR وجود دارد که هرکدام مزایا و معایبی دارند. انتخاب روش پردازش داده به کاربردهای خاص و داده‌های موجود دارد (Zhang et al., 2022; Pepe and Calò, 2017). در پژوهشی توسط ژنگ و همکاران در سال ۲۰۲۳، از داده‌های InSAR و مدل Peck برای بررسی فرونشست سطح زمین در شهر شوژو، چین، بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. آن‌ها مناطقی که بیشترین فرونشست را دارند، مناطقی با نرخ بالای پمپاژ آب زیرزمینی و مناطقی با خاک‌های نرم هستند (Zheng et al., 2023).

تحلیل وضعیت فرونشست زمین با استفاده از InSAR در دشت‌های زیادی در کشور انجام شده است. از جمله مطالعات انجام شده می‌توان به مطالعه رجبی و همکاران (۱۴۰۱) در دشت علی‌آباد قم با نرخ فرونشست ۱۵۰ میلی‌متر در سال،

نهشته‌های دشت کرج در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده‌اند. این رشته‌کوه به دلیل همگرایی صفحات عربی و اوراسیایی، از فعالیت‌های تکتونیکی قابل‌توجهی برخوردار است. ارتفاعات شمالی منطقه مورد مطالعه از توده توف سبز تشکیل شده، در حالی که ارتفاعات جنوبی از آندزیت و سنگ‌های میوسن تشکیل یافته‌اند. سازند کرج در ائوسن و در نتیجه فاز پیرنه شکل گرفته است. ضخامت این سازند بیش از ۳۳۰۰ متر است. سازند قرمز به‌عنوان زیر بستر در جنوب و غرب محدوده کرج شناخته می‌شود (شکل ۲).

آخرین تحرکات تکتونیکی عمده در منطقه البرز در دوره پلیوسن پسین تا پلیستوسن اولیه رخ داده است که منجر به گسلش و رانش ملایم در کوه‌ها شده است. این فعالیت زمین‌شناسی منجر به تشکیل سازند هزار دره (همچنین به‌عنوان سازند A شناخته می‌شود) گردید (Rieben 1995). رودخانه‌های کرج و کردان به همراه سایر رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی باعث فرسایش در کوه‌های البرز شده‌اند. این فرسایش منجر به رسوب‌گذاری رسوبات آبرفتی کواترنری در دامنه‌های جنوبی کوه‌ها شده است. شهر کرج روی این رسوبات نسبتاً نرم و جوان قرار گرفته است. ریب (۱۹۹۵) مطالعه‌ای بر روی چینه نگاری، لیتولوژی و سن این رسوبات آبرفتی کواترنری انجام داد و آن‌ها را به چهار سازند تقسیم کرد:

- سازند هزار دره (A)
- سازند کهریزک (B)
- رسوبات آبرفتی سازند تهران (C)
- سازند رسوبات جوان (D)

سازند هزار دره، از رسوبات آبرفتی قدیمی در حاشیه کوهستان‌ها تشکیل شده، عمدتاً از قلوه‌سنگ، شن درشت و سیمان ضعیف سیلتی-رسی تشکیل شده است. این سازند با تخلخل و نفوذپذیری پایین، مانع از جریان جانبی آب‌های زیرزمینی در آبخوان می‌شود. پراکندگی این سازند در سراسر منطقه شمال غربی دشت کرج است. سازند کهریزک، شامل

مطالعه منافی آذر و همکاران (۱۳۹۷) دشت جنوب غربی تهران با نرخ فرونشست ۲۲۰ میلی‌متر در سال و بررسی توزیع و سازوکار تشکیل شکاف‌های فرونشستی توسط رکنی و همکاران (۱۳۹۸) در دشت نیشابور اشاره کرد.

دشت‌های جنوب غربی تهران (Mahmoudpour et al., 2016) و اشتهاورد (مهر نور و همکاران، ۱۴۰۱) که در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتری غرب و جنوب دشت کرج واقع شده‌اند، دچار ترک‌های زمینی گسترده ناشی از فرونشست شده‌اند. این پدیده آسیب‌های شدیدی به زیرساخت‌ها و زمین‌های کشاورزی این دو دشت وارد کرده است.

در این مطالعه در مرحله اول هیدروژئولوژی دشت کرج مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله دوم، با روش ارزیابی فرونشست دشت کرج به کمک روش ترازیبی انجام گرفت، در مرحله سوم فرونشست با استفاده از تداخل سنجی دیفرانسیل رادار با سنتز دیافراگم (DInSAR) برآورد شد. در نهایت در مرحله چهارم، نتایج کاهش سطح آب زیرزمینی و ترازیبی با نتایج DInSAR جهت بررسی فرضیات مختلف در مناطق فرونشستی مقایسه گردید.

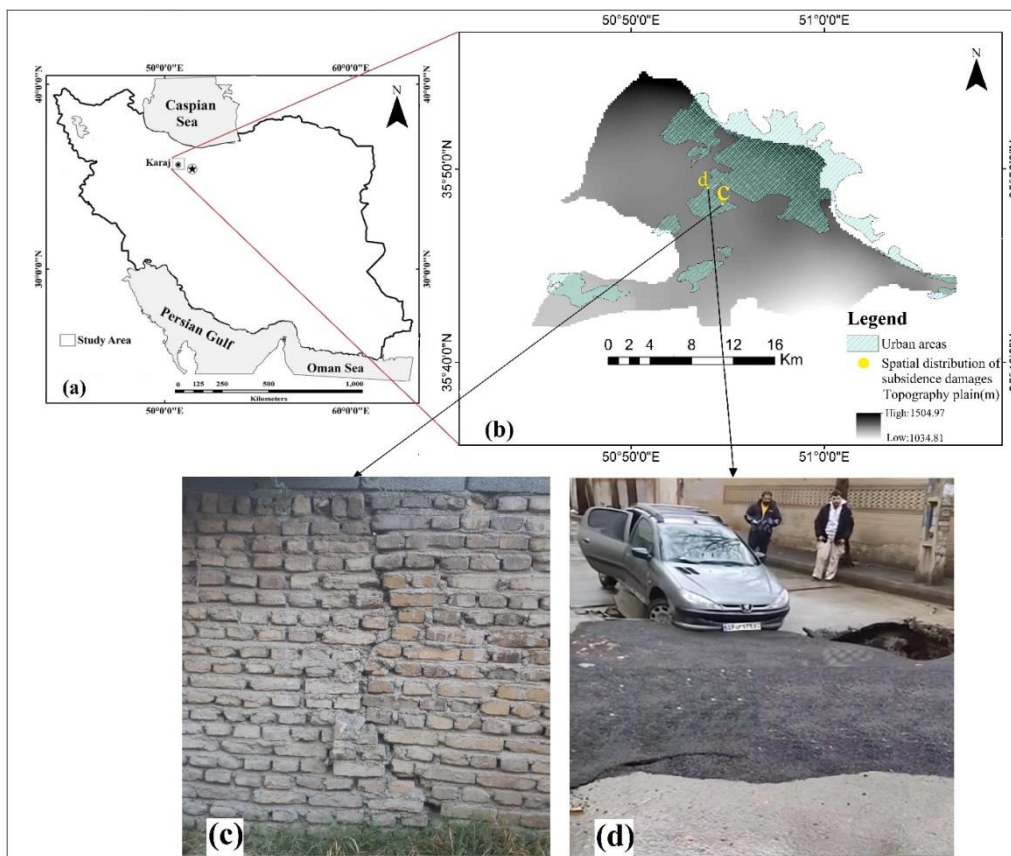
۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

دشت کرج در ۲۰ کیلومتری غرب تهران و در شمال ایران واقع شده است. این دشت از دو طرف شمال و جنوب با کوه‌های البرز محدود شده و وسعتی در حدود ۴۶۸ کیلومترمربع دارد (شکل ۱ a و b). بر اساس مرکز آمار ایران در سال ۱۴۰۱، جمعیت ساکن در شهرستان کرج از مرز دو میلیون نفر گذشته است. علاوه بر مناطق مسکونی شهری و روستایی، این دشت همچنین دارای مناطق صنعتی، کارخانه‌ها، جاده‌ها، راه‌آهن و هزاران حلقه چاه است که آب زیرزمینی می‌باشد.

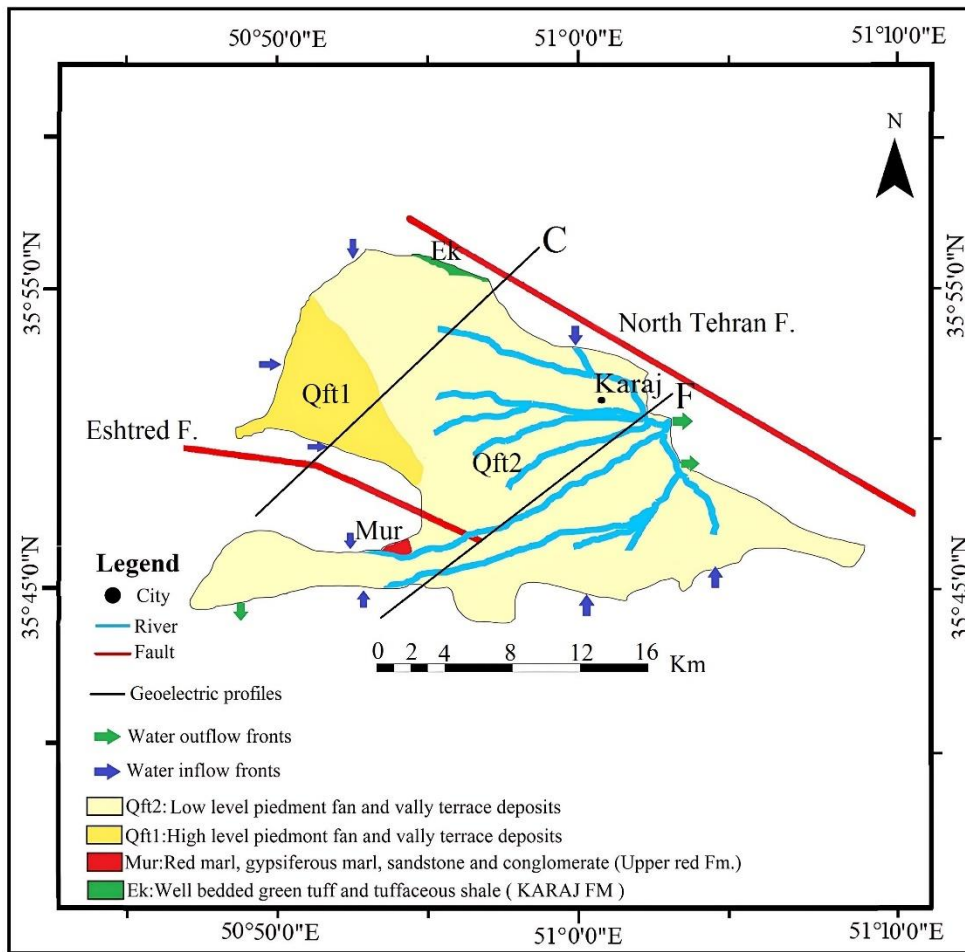
رودخانه اصلی این دشت، رودخانه کرج است که از مرکز آن می‌گذرد. این دشت در معرض فرونشست زمین قرار دارد که به خسارات قابل‌توجهی از آسیب به ساختمان‌ها، وسایل نقلیه و سازه‌های خطی (جاده‌ها) در مرکز دشت بخصوص مهرشهر (شکل ۱ c و d) می‌شود.

برای درک دقیق‌تر شرایط زیرسطحی، سه مقطع عرضی در جهت شمال غربی-جنوب شرقی با استفاده از داده‌های ۱۹ لاگ عمیق چاه آب در دشت کرج بررسی شد (شکل ۳). شکل ۴ نمونه‌ای بازسازی شده از لاگ چاه عمیق را نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۳ در منطقه مهرشهر حفر شده است. بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید، بافت خاک در این محدوده به ۹ گروه مجزا تقسیم می‌شود. با حرکت از شمال غربی به سمت جنوب شرقی، در ابتدا رسوبات درشت‌دانه همراه با مقادیر جزئی مواد ریز مشاهده می‌شوند. سپس، منطقه‌ای با ۶۰ درصد سیلت و رس ریز و ماسه‌های متناوب پدیدار می‌شود. در نهایت، رسوبات مجدداً به صورت درشت‌دانه با ۱۰ درصد مواد ریز ظاهر می‌شوند. بیشترین ضخامت آبرفت در ناحیه مرکزی دشت قرار دارد.

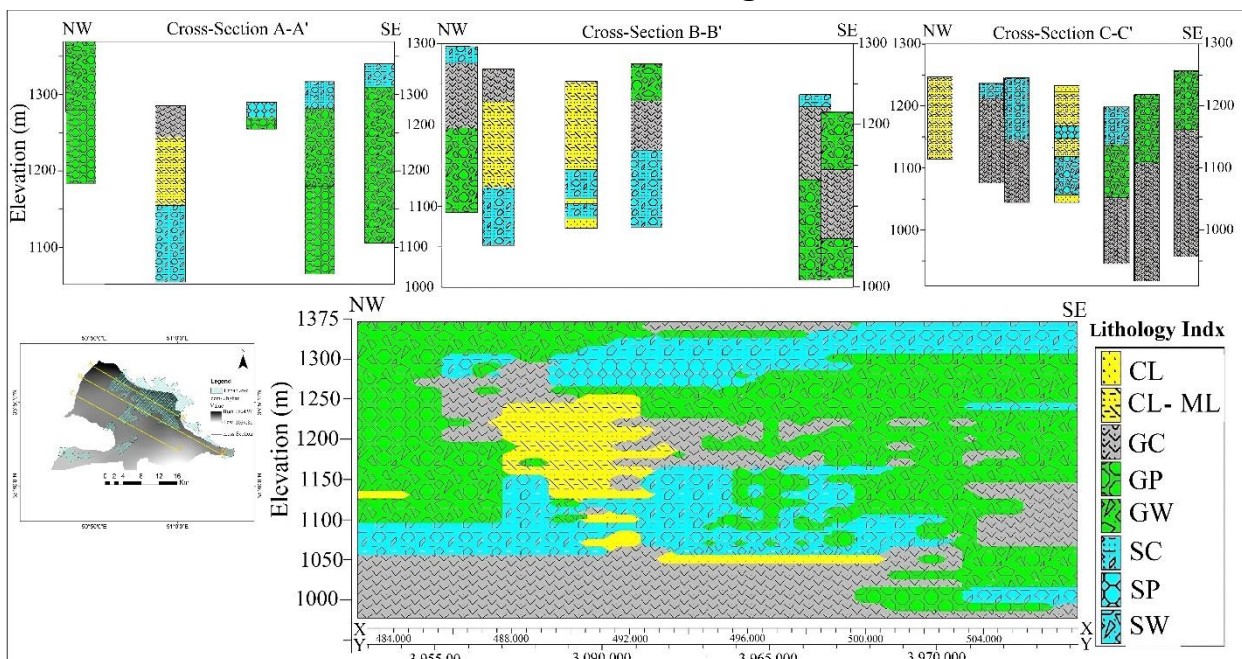
رسوبات آبرفتی جوان‌تر و تراس‌های مرتفع رودخانه‌ای است. دانه‌بندی آن حاکی از ترکیبی از ماسه، شن درشت و قطعات شیست است. قابل ذکر است که این سازند در مقایسه با سازند هزاردره، نفوذپذیری بالاتری دارد. پراکندگی سازند کهریزک، بخش اعظم دشت شامل مناطق مرکزی، شرقی، جنوبی و جنوب غربی را در برمی‌گیرد. سازند آبرفتی تهران، بر اثر فرسایش سازندهای قدیمی‌تر تشکیل شده، از رسوبات مخروطی آبرفتی و دشت سیلابی تشکیل شده است. این سازند بخش زیادی از مناطق پست دشت را می‌پوشاند. ضخامت قابل توجه و نفوذپذیری بالای آن، این سازند را به‌عنوان آبخوان اصلی دشت کرج معرفی می‌کند. سازند رسوبات (D)، جوان‌ترین رسوبات کواترنری موجود در دشت کرج را نشان می‌دهند.



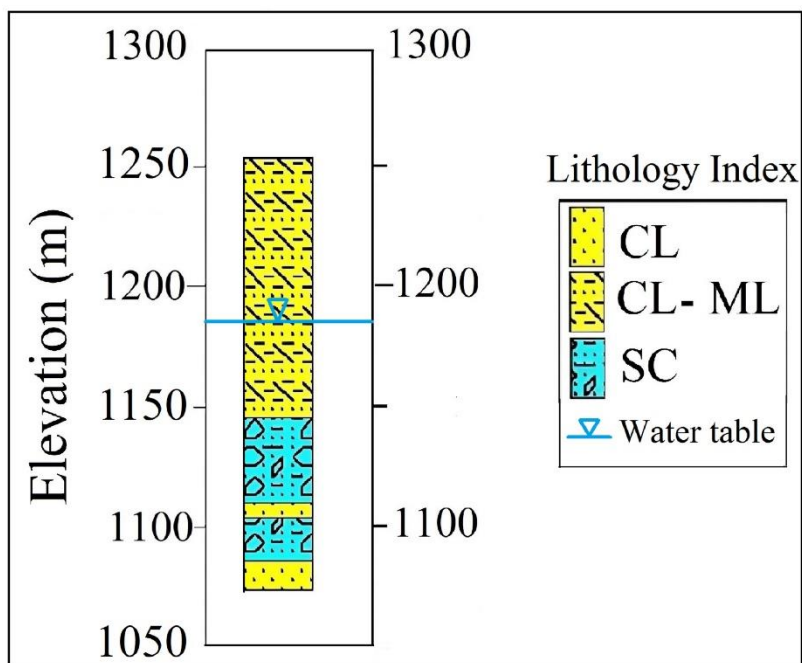
شکل ۱. (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران، (b) موقعیت دشت کرج و منطقه تحلیل تصویر ماهواره‌ای InSAR، (c) نشست زمین و پیامدهای آن بر سازه و (d) آسیب خیابان و وسایل نقلیه



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی دشت کرج (برگرفته از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۱۳۹۹)



شکل ۳. مقاطع عرضی (A-A', B-B' و C-C')



شکل ۴. لاگ چاه عمیق مهرشهر، بلوار امیرکبیر سال ۱۳۹۳ (شرکت آب و فاضلاب البرز، ۱۳۹۸)

۳. مواد و روش‌ها

در این تحقیق، در مرحله اول در ابتدا هیدروژئولوژی دشت کرج بررسی گردید. مرحله دوم ارزیابی فرونشست دشت، با استفاده از داده‌های مسیرهای ترازیبی تهیه‌شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۲ انجام شد. در مرحله سوم بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۱ ارزیابی فرونشست دشت با ماهواره Sentinel-1 صورت گرفت. تصاویر مربوطه از ماهواره پیشرفته رادار دهانه مصنوعی (Synthetic Aperture Radar) آژانس فضایی اروپا به نام Sentinel-1A برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شد. این ماهواره SAR باند C از یک حالت تصویربرداری جدید مشاهده زمین با اسکن تدریجی TOPSAR برای دستیابی به دوره بازگشت ۱۲ روزه و برد مشاهده گسترده ۲۵۰ کیلومتر در ۲۵۰ کیلومتر با رزولوشن متوسط استفاده می‌کند. تصاویر به‌دست‌آمده از Sentinel-1A دارای هم‌پوشانی بالایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. علاوه بر این، تصاویر SAR در یک مدار نزولی با استفاده از حالت

TOPS پهنای باند تداخلی (IW) با پلاریزاسیون VV ثبت شدند. سپس نرم‌افزار GMTSAR برای پردازش اطلاعات اجرا شد.

۳-۱- هیدروژئولوژی دشت کرج

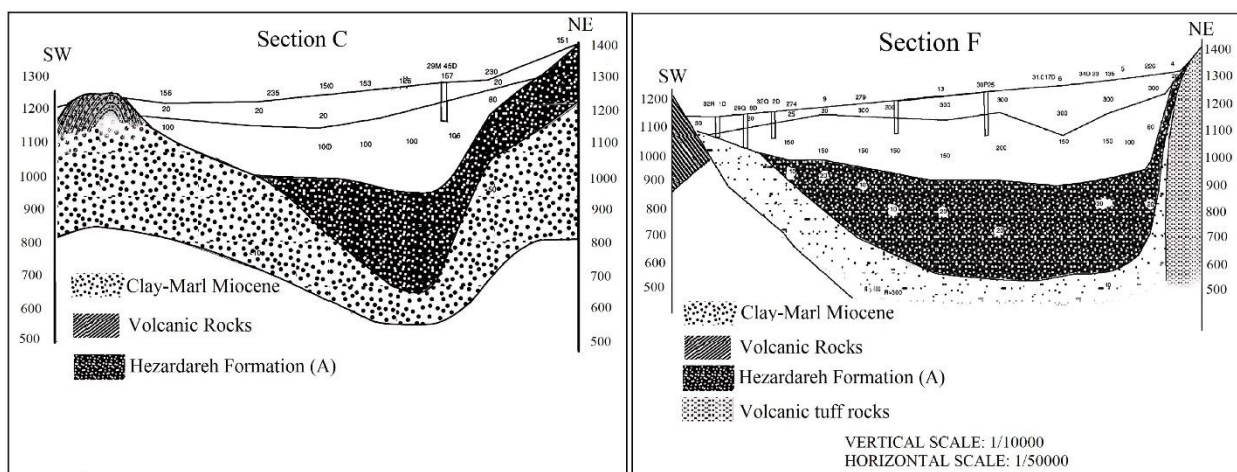
۳-۱-۱- آبخوان دشت کرج

آبخوان دشت کرج وسعتی در حدود ۹.۳۷۶ کیلومترمربع را در برمی‌گیرد. آبخوان اصلی این دشت، سازند آبرفتی تهران است که به دلیل وسعت زیاد، ضخامت قابل‌توجه و نفوذپذیری بالا شناخته‌شده است. این آبخوان از رسوبات آبرفتی کواترنری تشکیل‌شده که در بخش نزدیک به کوهستان‌ها درشت‌دانه تر و در مرکز دشت ریزدانه‌تر می‌شوند. یک همبستگی مثبت بین ضخامت لایه تراکم‌پذیر و نرخ فرونشست وجود دارد، این معناست که افزایش ضخامت لایه رسی باعث ایجاد نرخ بالای فرونشست می‌شود (Li et al. 2017).

پروفیل‌های ژئوالکتریک کرج در جهت شمال شرقی- جنوب غربی هستند (شکل ۲). از میان این پروفیل‌ها، پروفیل‌های C

کرج دارای جهت‌گیری شمال غربی - جنوب شرقی است که به سمت جنوب شرقی شیب ملایمی دارد و در نتیجه باعث ایجاد شکل نعل اسبی متمایز برای دشت می‌شود. عمق سنگ‌بستر در سراسر دشت متفاوت است، به طوری که در دوشاخه نعل اسبی عمق کمتر و در بخش مرکزی عمق بیشتری دارد. ضریب ذخیره آب متوسط در منطقه مورد مطالعه حدود ۵ درصد برآورد می‌شود. حداکثر ضریب تراوی (توان عبور دهی آب) در مرکز-جنوب دشت از ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ مترمربع بر روز متغیر است، در حالی که حداقل آن در جنوب غربی ۴۰۰ مترمربع بر روز است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۱۳۹۹).

و F برای مطالعه دشت کرج انتخاب شدند (شکل ۵). ضخامت آبرفت دشت کرج در نقاط مختلف دشت متفاوت است. ضخیم‌ترین آبرفت دشت که در مرکز دشت (جنوب شهر کرج) قرار دارد، بیش از ۳۰۰ متر ضخامت دارد، در حالی که نازک‌ترین لایه آبرفتی در جنوب غربی حدود ۵۰ متر ضخامت دارد. لایه‌های ضخیم قابل‌توجهی از رسوبات ریزدانه که مستعد نشست هستند، در مرکز و غرب دشت قرار دارند. سنگ کف رسوبات کرج بیشتر شامل تراس‌های A (آبرفت هزار دره)، رسوبات رسی - مارن میوسن و در انتهای شمالی و جنوبی دشت (ارتفاعات دشت) از سنگ‌های آتشفشانی (مثل آندزیت) می‌باشد. در نواحی غربی و جنوب غربی دشت، آبخوان ساختاری لایه‌ای دارد به طوری که لایه‌های درشت‌دانه با لایه‌های کم نفوذ آکوتارد از هم جدا شده و آبخوان‌های محصور را تشکیل می‌دهند. در سایر نقاط دشت، آبخوان غیر محصور است. سنگ‌بستر زیرین دشت



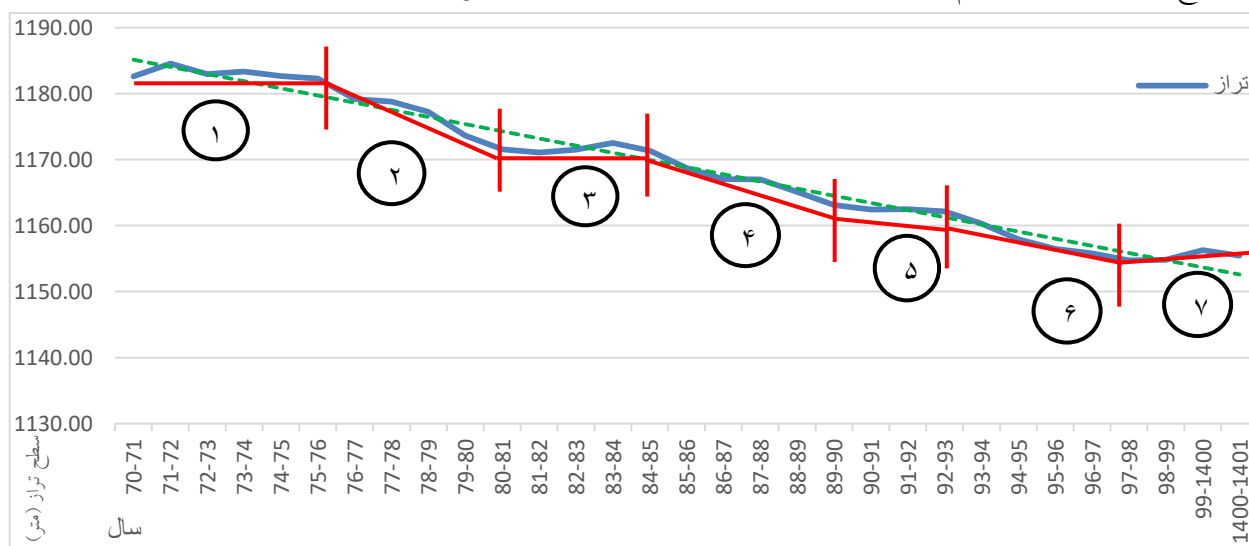
شکل ۵. مقاطع زمین‌شناسی C و F (شرکت ژنرال ژئوفیزیک، ۱۳۴۳-۱۳۴۶)

تغذیه با مجموع عامل‌های تخلیه معادل گردند. بر اساس آمایش شهرستان در سال ۱۳۹۱، ۷۱ درصد آن توسط چاه‌ها، ۲۵ درصد چشمه‌ها و ۴ درصد نیز توسط قنوات استحصال می‌گردد. هیدرو گراف واحد دشت کرج در بازه زمانی ۳۰ ساله از ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ به هفت دوره قابل تقسیم است (شکل ۶). دوره اول بازه زمانی ۱۳۷۰ تا اواسط ۱۳۷۵ می‌باشد که در کل دوره با نوسان کم و بدون تغییر در سطح آب را داشته

۳-۱-۲. بیلان و هیدرو گراف واحد آبخوان کرج
 بیلان آب زیرزمینی نوع ویژه‌ای از بیلان آب است که در آن عامل‌های تغذیه، تخلیه و تغییرات ذخیره در یک آبخوان زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۲ نقاط تخلیه آب زیرزمینی (رنگ سبز) در قسمت شرقی و جنوب غربی آبخوان قرار دارد و سایر جهات نقش تغذیه آبخوان را ایفا می‌کنند. در بیلان آب زیرزمینی لازم است مجموع عامل‌های

مجدداً دوره‌ی با نرخ افت آب نسبتاً زیاد و سالیانه حدود ۱/۴ بوده است. دوره هفتم نوسان مثبت جزئی از اواسط ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ سطح آب مشاهده می‌شود. در کل بازه زمانی ۳۰ ساله شامل سه دوره با نوسانات کم و بدون تغییر در نرخ افت آب، سه دوره با نرخ افت بالا و یک دوره بالآآمدگی جزئی بوده است. در آبخوان کرج کل افت تراز آبخوان ۲۷/۱۵ متر بوده که به‌طور متوسط، نرخ افت سالیانه آب زیرزمینی حدود ۰/۹ متر می‌باشد و در کل کسری مخزن بیش از ۶۱۳ میلیون مترمکعب می‌باشد.

است. اثرات تغذیه سفره آب در بین سال‌های پرباران ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۳ به‌خوبی مشهود است. دوره دوم از اواسط سال ۱۳۷۵ تا ابتدای ۱۳۸۰ نرخ افت آب زیاد و سالیانه حدود ۲ متر بوده است. دوره سوم از ۱۳۸۰ تا اواسط ۱۳۸۴ دوره با نوسان کم و بدون تغییر در سطح آب را داشته است. دوره چهارم از اواسط ۱۳۸۴ تا اواسط ۱۳۹۰ نرخ افت آب نسبتاً زیاد و سالیانه حدود ۱/۷ متر بوده است. دوره پنجم از اواسط سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲ مجدداً شاهد دوره‌ای کوتاه بدون تغییرات در تراز سطح آب بود. دوره ششم از ابتدای ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۰



شکل ۶. هیدرو گراف معرف آبخوان کرج در بازه زمانی ۳۰ ساله ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰

تغییرات پاسخ می‌دهد. بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ که کمترین میزان بارندگی در دشت مشاهده می‌شود، بیشترین افت سطح آب در هر دو منطقه رخ داده است. در سال ۱۳۹۹ نیز که بیشترین میزان بارندگی در دشت ثبت شده، کمترین افت سطح آب اتفاق افتاده است.

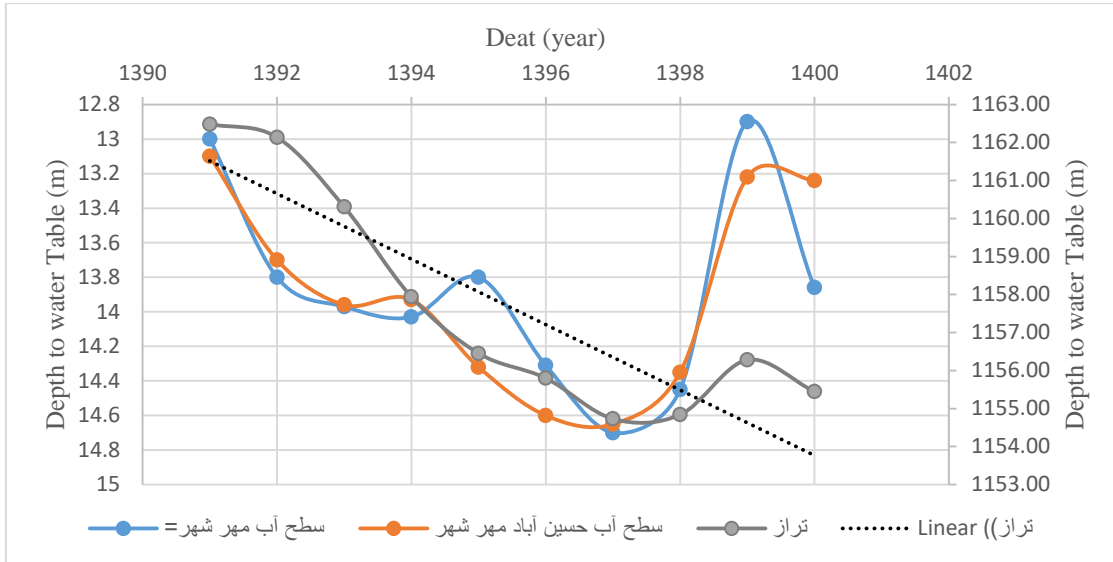
۳-۱-۲. افت آب زیرزمینی در دشت کرج

طبق اطلاعات پایه شرکت آب منطقه‌ای البرز در سال ۱۴۰۱، از سال ۱۳۸۱ تاکنون تعداد ۲۶ چاه مشاهده‌ای (پیزومتر) به‌منظور بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت کرج حفر شده و به‌صورت ماهانه تغییرات را اندازه‌گیری می‌نماید.

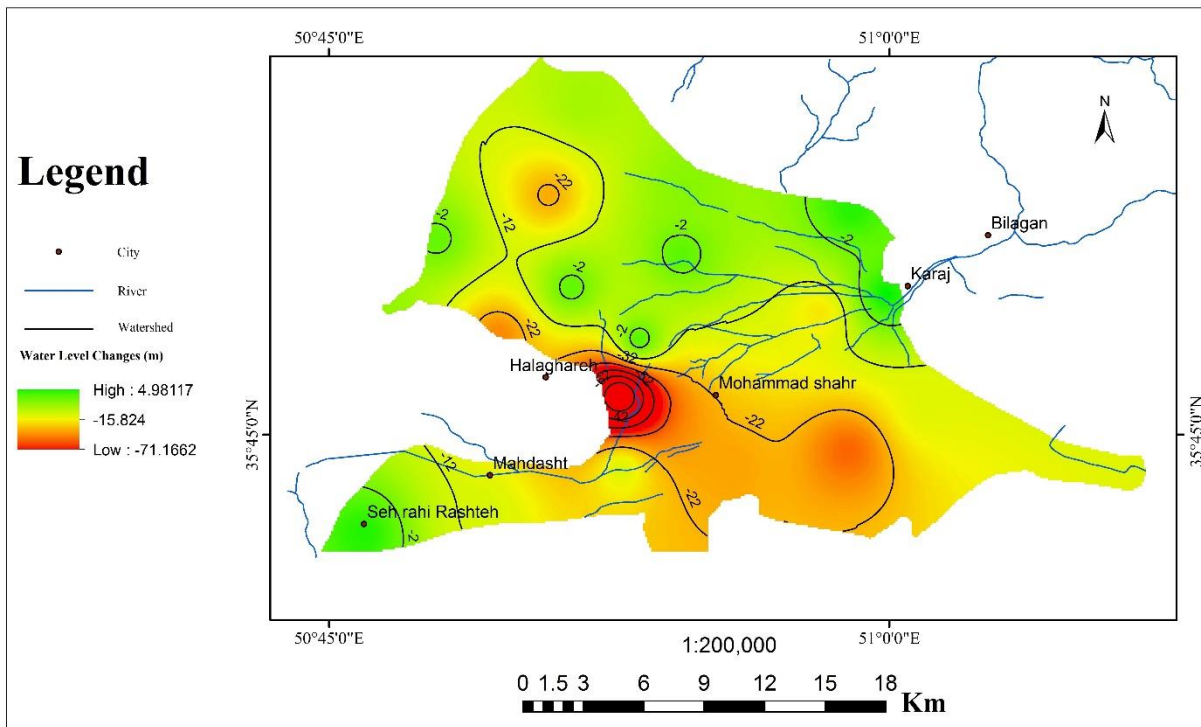
شکل ۷ روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دو منطقه مهرشهر و حسین‌آباد مهرشهر را در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ به همراه هیدرو گراف ۱۰ ساله ارائه می‌کند. بررسی این نمودار نشان‌دهنده هم‌راستایی تغییرات سطح آب با هیدرو گراف در هر دو منطقه است. به این معنی که با افزایش بارندگی، سطح آب نیز افزایش و با کاهش بارندگی، سطح آب نیز افت می‌کند. سرعت تغییرات سطح آب زیرزمینی در مهرشهر و حسین‌آباد مهرشهر در مقایسه با هیدرو گراف کندتر است به‌طوری‌که متوسط افت آب زیرزمینی در هیدرو گراف ۷ متر و در دو منطقه مذکور کمتر از یک متر است. در سال‌هایی که بارندگی به‌طور ناگهانی افزایش یا کاهش می‌یابد، سطح آب زیرزمینی به‌تدریج و با شیب ملایم‌تر به این

زمین و سنگ کف می‌باشد. در دوره ۱۹ ساله مورد مطالعه ۱۳۸۱-۱۴۰۰، در سال ۱۴۰۰، حداکثر عمق در چاه مشاهده‌ای حافظیه (جنوب شرق کرچ) ۱۸۰ متر و حداقل عمق در چاه زاغ زاغ آباد (جنوب غرب) ۸/۲ متر اندازه‌گیری شد. میانگین عمق آب در سال ۱۴۰۰ به ۸۰ متر افزایش یافته است، در حالی که این مقدار در سال ۱۳۸۱ برابر با ۵۹ متر بوده است.

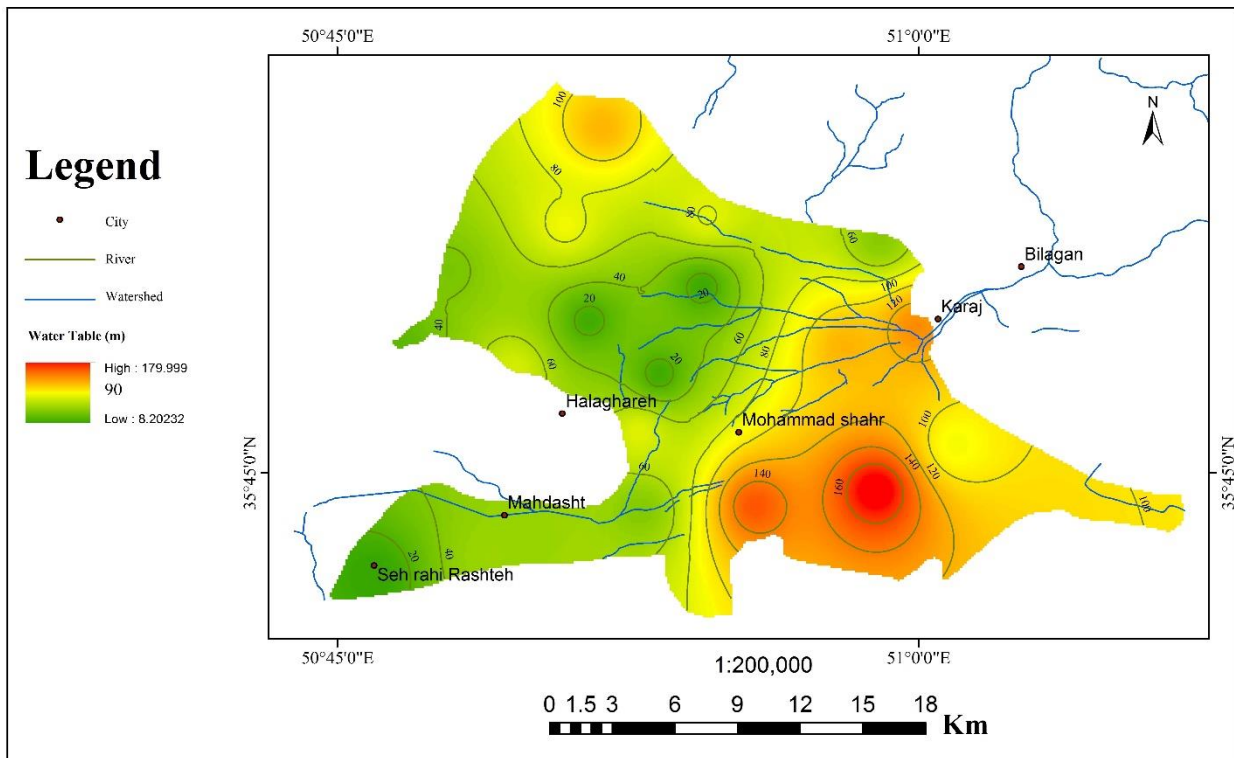
از این تعداد ۱۹ پیزومتر برای بازه زمانی ۱۹ ساله ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰ اطلاعات تراز آب دارند که برای بررسی سری زمانی تغییرات تراز آب در بخش‌های مدل‌سازی فرونشست، نقشه هم‌افت و هم‌عمق از آن‌ها استفاده شده است (شکل ۸ و ۹). تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت کرچ متأثر از شیب هیدرولیکی سطح آب، مورفولوژی سطح



شکل ۷. نمایش روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در مهرشهر و حسین‌آباد مهرشهر با هیدرو گراف معرف آبخوان در (۱۳۹۰-۱۴۰۰)



شکل ۸. تغییرات تراز سطح آب از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰ (داده‌های اولیه به فرمت اکسل توسط شرکت آب منطقه‌ای البرز در اختیار قرار گرفته است).



شکل ۹. نقشه هم عمق آب زیرزمینی سال ۱۴۰۰ (داده‌های اولیه به فرمت اکسل توسط شرکت آب منطقه‌ای البرز در اختیار قرار گرفته است).

منظور از تراز یابی، اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بین نقاط و در نهایت تعیین ارتفاع مطلق آن‌ها نسبت به سطح متوسط آب‌های آزاد است. در البرز، تراز یابی برای مطالعه نرخ فرونشست در مناطق مختلف استفاده شده است. بخشی از خط تراز یابی درجه یک با ۸۷ ایستگاه و طول ۲۰۰ کیلومتر در دشت کرج قرار دارد. داده‌های مسیرهای تراز یابی از سازمان نقشه برداری کشور تهیه شده است. ارزیابی فرونشست به کمک قدیمی‌ترین داده‌های فرونشست به دست آمده از روش تراز یابی درجه یک در جهت شمال غربی- جنوب شرقی ۷ ایستگاه و شمال شرقی- جنوب غربی ۵ ایستگاه در بازه زمانی ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ انجام شده است. در این مطالعه از پنج مارک‌های موجود در محدوده آبخوان دشت کرج استفاده شده است. در جدول ۱ محل و فرونشست سالانه پنج مارک‌های تراز یابی درجه یک آورده شده است. در شکل ۱۰ با استفاده

تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت کرج متأثر از شیب هیدرولیکی سطح آب، مورفولوژی سطح زمین و سنگ کف می‌باشد. به طور کلی در سه بخش که در نقشه هم افت بارنگ‌های قرمز، زرد و سبز کم‌رنگ مشخص شده است، بیشترین افت تراز آب ایجاد شده است. بخش اول واقع در غرب محمد شهر افت تراز آب بالاتر از ۷۱/۱ متر ایجاد شده است. بخش دوم واقع در جنوب آبخوان آبرفتی تراز آب بالاتر از ۳۰ متر است و بخش سوم نیز افت تراز آب بیش از ۲۰ متر در شمال غرب آبخوان در شهر کمال شهر ایجاد شده است. افت شدید تراز آب از حواشی شهر کرج به سمت جنوب و جنوب شرقی آبخوان به علت تمرکز بهره‌برداری آب شرب و کشاورزی به وجود آمده است.

۲-۳. فرونشست دشت کرج به کمک روش تراز یابی از

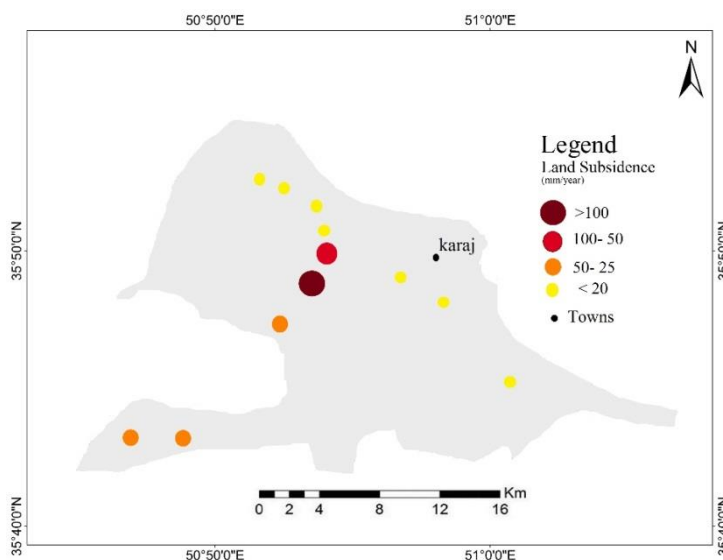
غربی و جنوب دشت، نقشه فرونشست تهیه شده بر اساس داده‌های ترازیبی، ممکن است در این مناطق دقت کافی نداشته باشد و تعمیم آن به کل دشت با خطای بیشتری همراه باشد.

از داده‌های ۱۲ ایستگاه ترازیبی در محیط GIS، توزیع مکانی نرخ‌های مختلف فرونشست در دشت کرج به صورت یک نقشه جامع ارائه شده است. بیشترین نرخ فرونشست ثبت شده ۱۱۰ میلی‌متر در بند مارک EHEI2002 مربوط به منطقه مرکز دشت به سمت محمد شهر می‌باشد. موقعیت مسیرهای ترازیبی و پنج‌مارک‌های آن در میزان فرونشست بسیار تأثیرگذار است. به دلیل توزیع نامناسب پنج‌مارک‌ها در شمال

جدول ۱. محل و فرونشست در پنج‌مارک‌های ترازیبی دشت کرج (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۹۷؛ سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۹).

1368-1392

bnchmark number	long	lati	Annual subsidence rate (mm)
ECED2002	50.910900°	35.821100°	85
EHEI2002	50.891700°	35.800000°	110
EFED2002	50.883000°	35.787800°	32
EFMO2001	50.830600°	35.726000°	64
EFMO2007	50.790600°	35.719800°	38
AXAY1003	51.014555	35.74933	3.67
APAX1064	50.97166	35.80111	2.53
APAX1063	50.95222	35.81361	2.19
APAX1059	50.91055	35.8375	8.32
APAX1057	50.8975	35.85388	18.46
APAX1056	50.87944	35.86277	5.6
APAX1054	50.86361	35.86944	2.8



شکل ۱۰. نقشه فرونشست زمین در آبخوان دشت کرج با استفاده از ایستگاه‌های ترازیبی

۲-۳-۱. داده‌ها و پردازش تداخل سنجی راداری تفاضلی

(DInSAR)

تصاویر Sentinel-1A SAR برای ایجاد نقشه تغییر شکل زمین از منطقه مطالعه با روش DInSAR استفاده شد. ابزار قدرتمندی برای پایش نشست زمین است. برای اندازه‌گیری سیگنال فرونشست ۱۲۷ تصویر راداری که از بالا به پایین گرفته شده‌اند (مسیر نزولی) و از مجموعه داده‌های TOPS در بازه زمانی ۸ اکتبر ۲۰۱۴ تا ۳۰ ژانویه ۲۰۲۳، با استفاده از محصولات SLC (Single Look Complex) که هم‌پوشانی خوبی با محدوده دشت کرج داشتند، تجزیه و تحلیل شدند. با هم‌تراز کردن تصاویر

اصلی و فرعی بافاصله‌ی زمانی حدود یک ماه، ۱۸۳ اینترفروگرام تهیه شد. نمونه‌ای از اینترفروگرام روی مدل ارتفاع رقومی (DEM) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بخش‌های تیره‌رنگ در اینترفروگرام نشان‌دهنده مناطقی هستند که دو تصویر همبستگی کمی با یکدیگر دارند. این مناطق ممکن است شامل مناطقی با تغییرات فیزیکی، مانند فرسایش یا پوشش گیاهی، یا مناطقی با تغییرات مصنوعی، مانند ساخت‌وساز، باشند. فرآیند کلی پردازش DInSAR در شکل ۱۲ به تصویر کشیده شده است. در جدول ۲ مشخصات تصاویر آورده شده است.

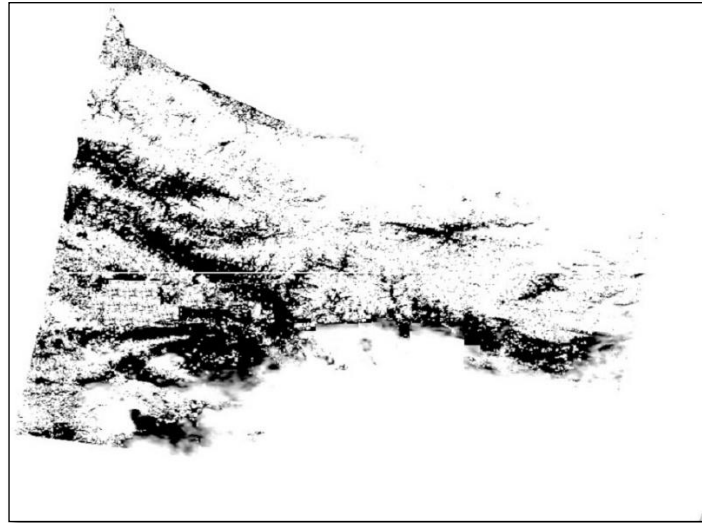
جدول ۲. مشخصات تصاویر ماهواره Sentinel-1A مورد استفاده برای پردازش تداخل سنجی راداری

Row	Date	Row	Date	Row	Date	Polarization	Sensor mode	Image type	Frequency	Spatial resolution (meters)	Time resolution (n days)
1	20141008	44	20171215	87	20200427	VV	IW	SLC	C-band	12.5	12
2	20141125	45	20171227	88	20200509						
3	20141219	46	20180108	89	20200602						
4	20150112	47	20180120	90	20200614						
5	20150205	48	20180213	91	20200708						
6	20150406	49	20180225	92	20200720						
7	20150524	50	20180309	93	20200813						
8	20150617	51	20180321	94	20200906						
9	20150711	52	20180414	95	20200918						
10	20150828	53	20180508	96	20201012						
11	20150921	54	20180601	97	20201105						
12	20151015	55	20180613	98	20201117						
13	20151202	56	20180625	99	20201211						
14	20151202	57	20180701	100	20201211						

	226		07		1223
15	20160 119	58	201807 19	101	2021 0104
16	20160 307	59	201808 12	102	2021 0116
17	20160 331	60	201808 24	103	2021 0209
18	20160 424	61	201809 05	104	2021 0317
19	20160 518	62	201809 17	105	2021 0329
20	20160 611	63	201810 11	106	2021 0410
21	20160 705	64	201811 04	107	2021 0504
22	20160 822	65	201812 22	108	2021 0609
23	20160 915	66	201901 15	109	2021 0715
24	20161 009	67	201902 08	110	2021 0820
25	20161 102	68	201902 20	111	2021 0925
26	20161 220	69	201903 04	112	2021 1031
27	20170 113	70	201903 16	113	2021 1124
28	20170 206	71	201904 09	114	2021 1218
29	20170 314	72	201905 03	115	2022 0111
30	20170 419	73	201905 15	116	2022 0216
31	20170 513	74	201906 20	117	2022 0324
32	20170 606	75	201907 14	118	2022 0429
33	20170 712	76	201908 07	119	2022 0523
34	20170 805	77	201908 19	120	2022 0616
35	20170 817	78	201909 24	121	2022 0722
36	20170 910	79	201910 18	122	2022 0827
37	20170 922	80	201911 11	123	2022 0920
38	20171 004	81	201911 23	124	2022 1026
39	20171 016	82	201912 17	125	2022 1119
40	20171 028	83	202001 10	126	2022 1225
41	20171 109	84	202002 15	127	2023 0130
42	20171 121	85	202003 10		
43	20171 203	86	202004 15		

MATLAB، نقشه نرخ متوسط فرونشست از تمام ایترفرگرام‌ها به دست آمده است (شکل ۱۳).

پردازش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند GMTSAR تحت سیستم عامل لینوکس انجام شد. سپس با کد نویسی در نرم‌افزار

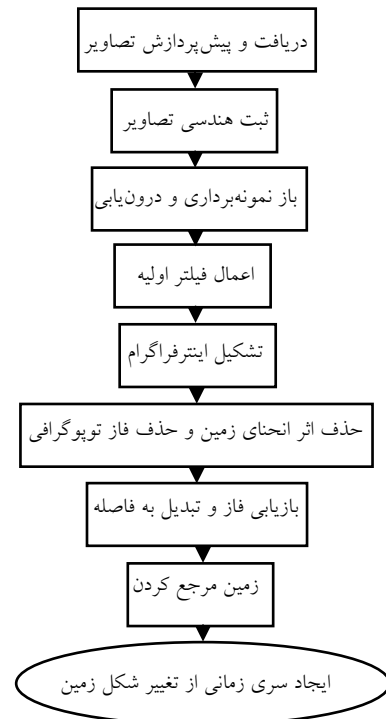


شکل ۳. منحنی تنش- کرنش به دست آمده برای یکی از نمونه‌های رادیولاریت چرتی مورد آزمایش.

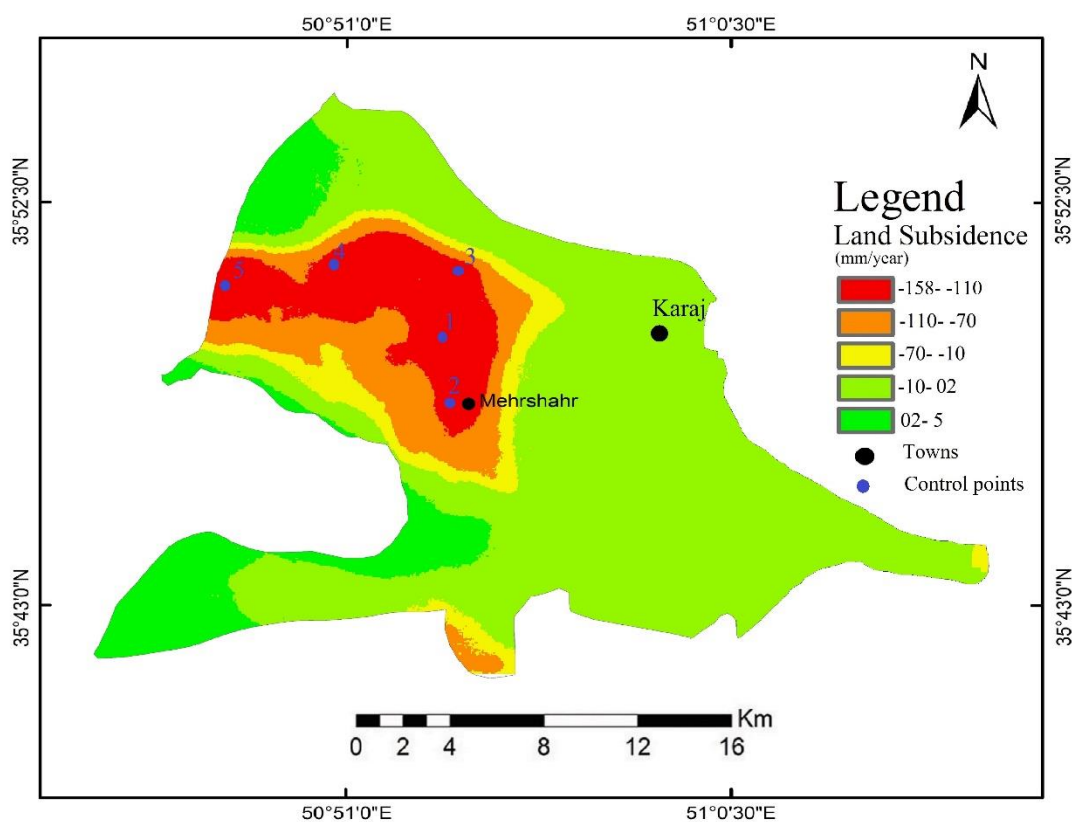
(۱۳۹۱)

نقشه متوسط نرخ فرونشست زمین در دشت کرج، یک هلالی از قوه در شمال غربی تا محمد شهر در جنوب غربی را نشان می‌دهد. این هلال از چهار باغ، خرم دشت و مهرشهر عبور می‌کند. این امر نشان‌دهنده گسترش محدوده تحت تأثیر از شمال غربی به دشت کرج است. بیشترین فرونشست زمین در بخش‌های مرکزی و شمال غربی منطقه با ۱۵۸ میلی‌متر در سال رخ داده است.

برای بررسی دقیق‌تر پدیده فرونشست در دشت کرج، نقشه‌های نرخ فرونشست به پنج زون با نرخ‌های مختلف تقسیم‌بندی شدند. نتایج در جدول ۳ نشان داد که ۶/۶ درصد مساحت دشت در معرض خطر بسیار پرخطر و ۱۸/۸ درصد در معرض خطر بالای فرونشست قرار دارند. این امر نشان‌دهنده بحران جدی فرونشست در این دشت است.



شکل ۱۲. مراحل پردازش تصاویر ماهواره‌ای (صالحی،



شکل ۱۳. نقشه نرخ متوسط فرونشست زمین دشت کرج ۲۰۱۴،۱۰،۰۸ - ۲۰۲۳،۰۱،۳۰

جدول ۳. زون‌های فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۱۴،۱۰،۰۸ - ۲۰۲۳،۰۱،۳۰

Area percentage	Annual meeting rate (mm/year)
6.6	110-158
18.8	70-110
9.3	10-70
44.8	2-10
20.5	<2

۴. بحث

دشت کرج به حساب می‌آید. تناقض موجود در این دو پدیده، ابهاماتی را در خصوص رابطه مستقیم و همیشگی بین افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین ایجاد می‌کند. به همین دلیل، بررسی فرضیات زیر به منظور واکاوی دقیق‌تر این موضوع ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به نقشه فرونشست ارائه شده در شکل ۱۳، نرخ فرونشست زمین در دشت کرج در محدوده‌ای هلالی شکل از قوه در شمال غربی تا محمد شهر در جنوب غربی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سایر نقاط است. این در حالی است که این پهنه جزو مناطقی با کمترین افت آب زیرزمینی در

۴-۱. آبخوان معلق در لایه اول، آبخوان نیمه محصور در لایه دوم

بررسی پیژومترهای واقع در مرکز دشت نشان می‌دهد که این پیژومترها دارای عمق کم آب زیرزمینی هستند و نوسانات قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهند. به‌عنوان مثال، پیژومتر حسین‌آباد مهرشهر (با تراز ۱۲۵۶ متر) در سطح پایین‌تری نسبت به پیژومتر تربیت‌معلم (با تراز ۱۲۸۵ متر) قرار دارد. با این حال، در شهریور ۱۳۹۶، سطح آب در پیژومتر حسین‌آباد در عمق ۱۴/۶ متر و در پیژومتر تربیت‌معلم در عمق ۸۷/۶ متر بوده است. اگر این دو پیژومتر در یک سفره آب قرار می‌گرفتند، چنین شرایطی از نظر هیدرولیکی صحیح نبود؛ زیرا ارتفاعات جنوبی نقشی در تغذیه آبخوان ندارند و احتمالاً پیژومتر حسین‌آباد مهرشهر در لایه اول سفره آب قرار دارد و احتمال دولایه یا چندلایه بودن آبخوان وجود دارد. بر اساس لاگ چاه عمیق نشان داده شده در شکل ۴ که در سال ۱۳۹۳ در منطقه مهرشهر حفر شده است، عمق سطح آب زیرزمینی در این منطقه ۷۳ متر است. با این حال، احتمال دارد که پیژومترهای واقع در مرکز دشت در یک سفره آب معلق کم عمق حفر شده باشند. بررسی شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که دشت کرج از نظر عمق آب زیرزمینی به دو منطقه تقسیم می‌شود: منطقه اول شامل شمال غربی، بخش شرقی و جنوب-جنوب شرقی که عمق آب در آن بیش از ۷۰ متر است. منطقه دوم شامل بخش مرکزی به سمت غرب و بخش جنوب غربی که عمق آب در آن کمتر از ۴۰ متر است. با فرض وجود یک آبخوان واحد، این اختلاف عمق از نظر هیدرولیکی توجیه‌پذیر نیست.

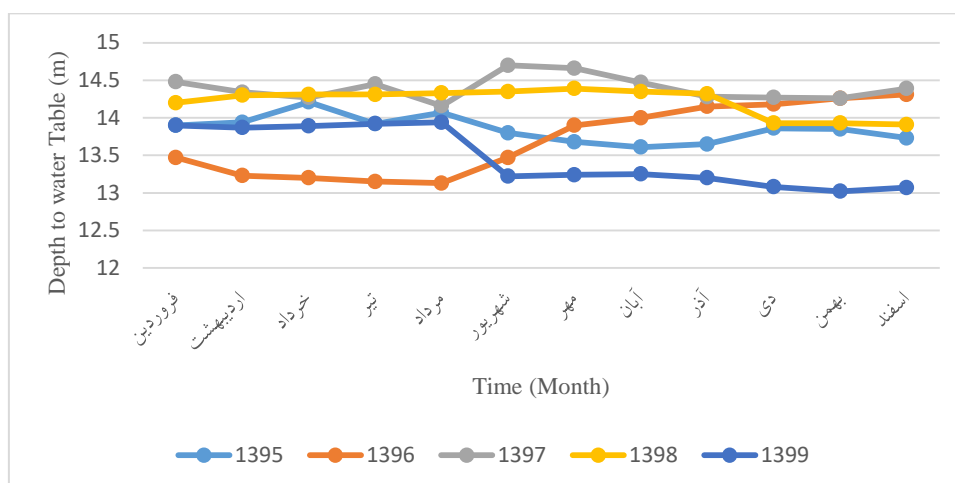
۴-۲. نوسانات سالانه پیژومتر

مهرشهر که در منطقه‌ای با بیشترین نرخ فرونشست زمین واقع شده، برای بررسی نوسانات سالانه سطح آب در بازه زمانی ۵ ساله از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که نوسانات سالانه سطح آب در هر سال

کمتر از یک متر بوده که با توجه به دوره‌های تر و خشک‌سال، در محدوده نرمال قرار دارد (شکل ۱۴). در مطالعه‌ای که توسط بیابانی و همکاران در سال ۱۳۹۸ در دشت کرج انجام شد، نتایج حاصل از آنالیزهای آنیونی و کاتیونی نشان می‌دهد که روند تغییر هدایت الکتریکی به‌طور کلی به این صورت است که در دشت کرج، نحوه تکامل کیفیت آب زیرزمینی از سمت بی‌کربنات‌های کلسیک به سمت سولفات و یا کلرور سدیم در حال انتقال است. این امر ناشی از افزایش تخلیه، کاهش تغذیه و آب برگشتی حاصل از مصارف شرب شهری و روستایی، آب برگشتی مصارف کشاورزی و صنایع است.

۴-۳. نوسانات سالانه پیژومتر

برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی، سطح آب‌های زیرزمینی را به شدت کاهش می‌دهد و تنش خاک را به دلیل خالی شدن آب درون حفرات افزایش می‌دهد. این فرآیند به‌مرور زمان منجر به نشست خاک، پر شدن حفرات و ایجاد گرادیان هیدرولیکی می‌شود. در نتیجه، ذرات خاک شسته شده و به داخل چاه‌ها حرکت می‌کنند. این امر سبب شسته شدن خاک با دانه‌بندی ریزتر، خالی شدن فضای بین ذرات خاک و افزایش تخلخل خاک می‌شود که به پدیده‌ی لانه روباه معروف است و فرونشست زمین را تشدید می‌کند. بر اساس گزارش شرکت آب و فاضلاب استان البرز در سال ۱۳۹۸، مصرف سالانه آب در شهرستان کرج بیش از ۱۰۰۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. همچنین، اطلاعات پایه آمار آب منطقه‌ای البرز نشان می‌دهد که متوسط کسری مخزن در سال بیش از ۲۰ میلیون مترمکعب است؛ اما در خصوص ماسه دهی چاه‌ها یا شسته شدن ذرات در سطح شهرستان، اطلاعات دقیقی در دسترس نیست.



شکل ۱۴. نوسانات سالانه سطح آب در پیزومتر مهرشهر (۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹)

نتایج مربوط به فرونشست تجمعی با استفاده از روش DInSAR محاسبه و سری زمانی فرونشست در نقاط کنترلی برای بازه زمانی بین سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ استخراج و در جدول ۴ ارائه شده است. نقطه ۱ واقع در شمال مهرشهر با ۹۷۰ میلی‌متر فرونشست تجمعی در طول ۸ سال، بیشترین میزان فرونشست را تجربه کرده است. نقطه ۵ واقع در شمال شرقی دشت نیز با ۶۱۲ میلی‌متر فرونشست تجمعی، کمترین میزان فرونشست را به خود اختصاص داده است.

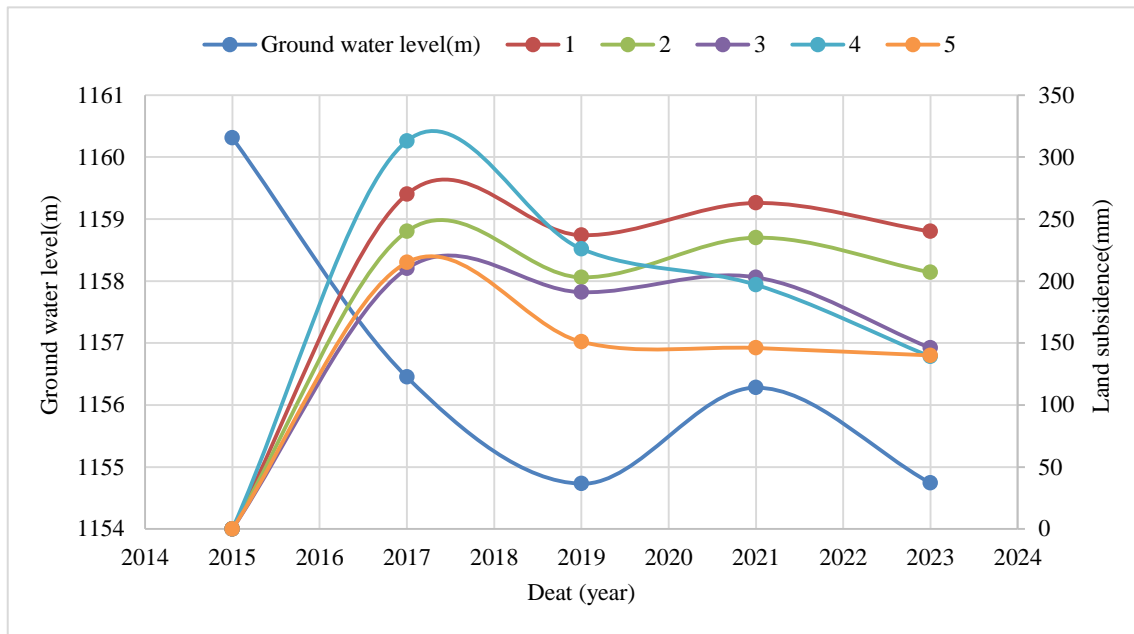
به منظور مقایسه روندهای فرونشست زمین و کاهش سطح آب زیرزمینی در دشت کرج، پس از بررسی نقشه پهنه‌بندی فرونشست دشت و شناسایی نواحی با بیشترین نرخ فرونشست، پنج نقطه کنترلی انتخاب و در فاصله زمانی بین سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ به چهار دوره دوساله تقسیم شدند. موقعیت این پنج نقطه در شکل ۱۳ نشان داده شده است و مقایسه سطوح تراز آبخوان و فرونشست زمین در شکل ۱۵ ارائه گردیده است.

جدول ۴. فرونشست تجمعی نقاط کنترلی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ (میلیمتر/سال)

Control points	2015-2017	2017-2019	2019-2021	2021- 2023
1	260	487	740	970
2	230	423	648	845
3	200	381	574	710
4	303	500	687	816
5	205	346	482	612

بارندگی، روند نزولی سطح آب سفره و افزایش متعاقب نرخ فرونشست زمین در سالهای ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ تکرار گردید. با عنایت به افزایش جزئی بارندگی در سال ۲۰۲۲، نرخ سالیانه فرونشست زمین در سال ۲۰۲۳ کاهش جزئی را نشان می‌دهد؛ بنابراین، نقاط ۱ و ۲ همچنان با نرخ بالایی از فرونشست زمین روبرو هستند. نقاط کنترلی همبستگی مثبت قوی، از ۸۸٪ تا ۹۹٪ را نشان می‌دهند. علاوه بر این، همبستگی منفی قابل توجهی بین ۶۶٪ تا ۸۸٪ بین کاهش سطح آب زیرزمینی و نقاط کنترل مشاهده می‌شود (جدول ۵).

به‌طورکلی، بالاترین نرخ فرونشست زمین در دشت کرج با کاهش سطح ایستابی آب، با تأخیری در حدود دو سال، به حداکثر خود می‌رسد. بالاترین نرخ سالیانه فرونشست زمین در هر پنج نقطه کنترلی در سال ۲۰۱۷ رخ داده است که احتمالاً به علت کاهش بارندگی در سالهای ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ و افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی بوده است. به دلیل افزایش بارندگی در سالهای ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ و متعاقباً کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی و افزایش نسبی سطح آب، نرخ سالیانه فرونشست زمین در هر پنج نقطه در سال ۲۰۱۹ کاهش یافت. با این حال، به دلیل کاهش



شکل ۱۵. روند تغییرات جابجایی عمودی در نقاط کنترلی در مقایسه با تغییرات سطح آب زیرزمینی

جدول ۵. همبستگی بین نقاط کنترل و افت آب زیرزمینی

Correlation		1	2	3	4	5	
drop of underground water	1						
drop of underground water	1	-0.882	1				
drop of underground water	2	-0.863	0.999	1			
drop of underground water	3	-0.817	0.977	0.979	1		
drop of underground water	4	-0.665	0.879	0.883	0.933	1	
drop of underground water	5	-0.775	0.950	0.952	0.951	0.968	1

• مطالعات نشان می‌دهد که نرخ فرونشست زمین در محدوده‌های هلالی شکل از شمال غربی تا محمد شهر در جنوب غربی دشت کرج به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر نقاط است. این در حالی است که این پهنه جزو مناطقی با کمترین افت آب زیرزمینی در دشت کرج به حساب می‌آید. این تناقض، ابهاماتی را در رابطه مستقیم و همبستگی بین افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین ایجاد می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

• هدف از این پژوهش، مطالعه وضعیت هیدروژئولوژی و مقایسه نتایج ترازیبی و DInSAR در دشت کرج برای بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین، باوجود افت کم سطح آب زیرزمینی در شمال شرقی تا مرکز این دشت است.

- بررسی پیژومترهای واقع در مرکز دشت کرج، نشان‌دهنده شرایطی غیرمعمول است. این پیژومترها عمق کم آب زیرزمینی را نشان می‌دهند و نوسانات قابل توجهی در سطح آب آن‌ها مشاهده نمی‌شود. به‌عنوان مثال، پیژومتر حسین‌آباد مهرشهر در تراز پایین‌تری نسبت به پیژومتر تربیت‌معلم قرار دارد. با توجه به نقشه هم عمق آب زیرزمینی سال ۱۴۰۰، عمق آب زیرزمینی در مرکز دشت به‌طور معنی‌داری کمتر از شمال و جنوب دشت است. این شرایط از نظر هیدرولیکی در یک سفره آب واحد غیرممکن است؛ زیرا ارتفاعات جنوبی نقشی در تغذیه آبخوان ندارند. بر اساس لاگ چاه عمیق که در سال ۱۳۹۳ در منطقه مهرشهر حفر شده است، سطح آب زیرزمینی در این منطقه ۷۳ متر عمق دارد. با این حال، این احتمال وجود دارد که آبخوان دشت کرج دولایه یا چندلایه می‌باشد و پیژومترهای واقع در مرکز دشت در یک سفره آب معلق کم‌عمق حفاری شده باشند. سرعت تغییرات سطح آب زیرزمینی در مهرشهر و حسین‌آباد مهرشهر در مقایسه با هیدروگراف کندتر است. به‌طوری‌که متوسط افت آب زیرزمینی در هیدروگراف ۷ متر و در دو منطقه مذکور کمتر از یک متر است. به‌طور کلی طی سه دهه اخیر، دشت کرج به‌طور متوسط سالانه ۰/۹ متر افت سطح آب زیرزمینی را تجربه کرده است.
 - نوسانات سالانه سطح آب در پیژومتر مهرشهر به‌طور مستقیم با فرونشست زمین در این منطقه مرتبط نیست. فرضیه شسته شدن ذرات منفصل در
- اثر دبی ورودی و خروجی بالا، به‌عنوان یکی دیگر از عوامل تشدیدکننده فرونشست زمین در دشت کرج مطرح شده است. با این وجود، اطلاعات دقیقی در خصوص نقش و سهم دقیق این عامل در فرونشست دشت کرج در دسترس نیست. مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌تواند تشدیدکننده فرونشست باشد، اما به‌عنوان عامل اصلی آن شناخته نمی‌شود.
- مقایسه نتایج ترازیبی با روش‌های تداخل سنجی راداری همبستگی قابل قبولی را نشان داد. با این حال، توزیع نامناسب پنج‌مارک‌ها، به‌ویژه کمبودشان در شمال غربی و جنوب دشت، دقت تهیه نقشه‌های فرونشست حاصل از ترازیبی‌ها را کاهش داده است.
 - در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳، ۵ نقطه کنترلی فرونشست زمین در مناطق مستعد فرونشست در دشت کرج انتخاب شدند. نتایج فرونشست تجمعی نشان می‌دهد که نقطه کنترلی شماره یک در شمال مهرشهر با حدود یک متر فرونشست تجمعی در ۸ سال، بیشترین فرونشست را داشته است. طبق نمودار شکل ۱۴، نقاط ۱ و ۲ در مرکز دشت (مهرشهر) همچنان نرخ فرونشست بالایی دارند و تا زمان تحکیم ثانویه خاک، فرونشست ادامه خواهد داشت. در مقابل، نرخ فرونشست سه نقطه دیگر در شمال غربی دشت به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.

منابع

- بیابانی، ل.، زهتابیان، غ.، خسروی، ح.، و حنیفه پور، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت کرج. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۶(۱)، ۱۵۸-۱۷۱. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.119334>
- رجبی، ع.م.، یاسمن، ا.، و عدالت، ع.، ۱۴۰۱. کاربرد ماشین بردار پشتیبان در مدل‌سازی فرونشست زمین در بخش‌هایی از دشت علی‌آباد قم. فصلنامه علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، بهار، ۱۶(۱): ۷۷-۹۲.
- رکنی، ج.، حسین زاده، س. ر.، لشکری پور، غ.ر.، و ولایتی، س.، ۱۳۹۸. تحلیل توزیع مکانی و سازوکار تشکیل شکاف‌های فرونشست زمین در دشت نیشابور. فصلنامه علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، پاییز، ۱۲(۳): ۶۵-۸۲.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی؛ ۱۳۹۹. طرح بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست استان تهران (دشت کرج). استان تهران، جلد سوم: ص ۱۵۳ و ۲۷۴.
- سازمان نقشه‌برداری کشور؛ ۱۳۹۷. اطلس نقشه و اطلاعات مکانی، استان البرز.
- سازمان نقشه‌برداری کشور؛ ۱۳۸۹. نتایج ترازبازی دقیق استان البرز، استان البرز.
- شرکت آب منطقه‌ای البرز؛ ۱۴۰۱. آمار و اطلاعات پایه منابع آب. کرج: دفتر مطالعات پایه منابع آب.
- شرکت آب و فاضلاب البرز؛ ۱۳۹۸. آمار و اطلاعات پایه منابع آب. کرج: دفتر اجرای طرح‌های آب شهری، سیستم مدیریت یکپارچه.
- شرکت ژنرال ژئوفیزیک فرانسه؛ ۱۳۴۳ تا ۱۳۴۶. مطالعات ژئوفیزیکی تهران. تهران، ایران.
- صالحی، ر.، ۱۳۹۱. بررسی علل فرونشست زمین در دشت مهاباد جنوبی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- منافی آذر، ع.، خامه چیان، م.، ندیری، ع.، و شریفی کیا، م.، ۱۳۹۷. بهینه‌سازی روش ALPRIFT با استفاده از ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران. فصلنامه علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، تابستان، ۱۱(۲): ۱-۱۴.
- مهرنور، ش.، رباطی، م.، خیرخواه زرکش، م.م.، فرساد، ف.، و بیگ پور، ش.، ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار: WOI-BWM. نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی، زمستان، ۱۱(۴۴): ۱۲۷-۱۴۸. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75445.1188>
- Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., and Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778, 146193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>.
- Chatterjee, R. S., Pranjali, P., Kannaujia, S., Thapa, S., Bhardwaj, A., Kapoor, U., Dwivedi, S. N., Chandra, R., Srivastava, R. K., Singh, S. K., Kumar, H., Bhattacharjee, R., Singha, S., Kala, S., and Kumar, A., 2023. Unravelling the dynamics and causes of land subsidence in the National Capital Territory of Delhi, India, by spaceborne and in situ observations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(2), 413-428. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03399-7>.
- Chen, H., Hwang, C., Tanaka, Y., Chang, P.Y., 2023. Gravity estimation of groundwater mass balance of sandy aquifers in the LS-hit region of Yunlin County, Taiwan. *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107021>.
- Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S., and Casagli, N., 2014. Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 166-180.
- Figuroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J.A., Hernández-Madrigal, V.M., Villaseñor-Reyes, C.I., 2018. Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: a review. *Eng. Geol.* 246, 91-106.

- Galloway, D. L., and Burbey, T. J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Reviews of Geophysics* 49:3001-3032. <https://doi.org/10.1029/2010RG000355>.
- Ghahfarokhi, M., Sadeghi, M., Moradzadeh, M., 2023. Identification of LS hazard in Asadabad plain using the PS InSAR method and its relationship with the geological characteristics. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05963-6>.
- Hoffmann, J., Zebker, H. A., Galloway, D. L., and Amelung, F., 2001. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resour Res* 37:1551-1566.
- Hussain, M. A., Chen, Z., and Khan, J., 2024. Monitoring land subsidence in the Peshawar District, Pakistan, with a multi-track PS-InSAR technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31995-x>.
- Lei K, Ma. F., Chen, B., Luo, Y., Cui, W., Zhao, L., Wang, X., Sun, A., 2023. Effects of South-to-North Water Diversion Project on groundwater and LS in Beijing, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-01887-7>.
- Li, X., Li, Y., 2023. Study on land subsidence characteristics and deformation evolution mechanism in Caofeidian New Area, Bohai Bay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(2), 96-107. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03121-7>.
- Li, Y., Gong, H., Zhu, L., and Li, X., 2017. Measuring spatiotemporal features of LS, groundwater drawdown, and compressible layer thickness in Beijing Plain. *China Water* 9:64.
- Mahmoudpour, M., Khamsehchian, M., Nikudel, M. R., and Ghassemi, M. R., 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Eng Geol* 201:6–28.
- Motagh, M., Walter, R. T., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., and Zschau, J., 2008. LS in Iran caused by widespread water reservoir over exploitation. *Geophysical Research Letters* 35:403-412.
- Pepe, A., Calò, F., 2017. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. *Applied Sciences* 7:1264. <https://doi.org/10.3390/app7121264>.
- Poland, J.F., 1984. *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Ground-Water Withdrawal*.
- Rieben, H., 1955. The Geology of the Tehran Plain. *American Journal of Science* 253:617-639. <https://doi.org/10.2475/ajs.253.11.617>.
- Salehi Moteahd, F., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G. R., and Dehghani, M., 2019. Geological parameters affected LS in Mashhad plain, north-east of Iran. *Environmental Earth Sciences* 78:405. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8413-y>.
- Schmidt, C., 2015. Alarm over a sinking delta. Shen, S.L., Ma, L., Xu, Y.S., Yin, Z.Y., 2013. Interpretation of increased deformation rate in aquifer IV due to groundwater pumping in Shanghai. *Can. Geotech. J.* 50 (11), 1129–1142.
- Terzaghi, K., 1943. *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd Edition). New York: John Wiley and Sons.
- Ty, T. V., Minh, H. V. T., Avtar, R., Kumar, P., Hiep, H. V., and Kurasaki, M., 2021. Spatiotemporal variations in groundwater levels and the impact on LS in Can Tho, Vietnam. *Groundwater for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100680>.
- Wang, Y. Q., Wang, Z. F., and Cheng, W. C., 2019. A review on LS caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78:2851-2863.
- Wu, J., Shi, X., Xue, Y., Zhang, Y., Wei, Z., Yu, J., 2008. The development and control of the land subsidence in the Yangtze Delta, China. *Environ. Geol.* 55 (8), 1725–1735.

-
- Zhang, Y., Yang, H., Li, J., Zhang, H., and Chen, Z., 2022. A review of DInSAR data processing methods for LS monitoring. *Remote Sensing* 14:660.
- Zheng, M., Guo, Q., Zhao, R., Wang, L., and Han, Y., 2023. Surface subsidence disasters over Xuzhou city, China 2014–2018 revealed by InSAR and Peck model. *Environmental Earth Sciences* 82: 264.
- Zhou, C., Lan, H., Gong, H., Zhang, Y., Warner, T.A., Clague, J.J., Wu, Y., 2020. Reduced rate of LS since 2016 in Beijing, China: evidence from Tomo-PSInSAR using RadarSAT-2 and Sentinel-1 datasets. *International Journal of Remote Sensing* 41:1259-1285.
- Zuccarini, A., Giacomelli, S., Severi, P., and Berti, M., 2023. Long-term spatiotemporal evolution of land subsidence in the urban area of Bologna, Italy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(1), 35. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03517-5>.