

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی فرونشست دشت کهک، قم با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR)

وحید محمدی^{۱*}، طاهر رجایی^۲ و فاطمه عباسی پور مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

چکیده

در این پژوهش، پدیده فرونشست در دشت کهک، قم با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (InSAR) و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ۱۶ تصویر راداری در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار SNAP پردازش شدند تا میزان تغییرات سطح زمین در طول زمان مشخص شود. همچنین، اطلاعات مربوط به ۳۲ حلقه چاه پیرومتری در دوره ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۹ جمع‌آوری شد و میزان افت سطح آب زیرزمینی در این بازه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که میانگین نرخ فرونشست در این منطقه برابر با ۲/۶ سانتی‌متر در سال است و بیشترین نرخ در محدوده اکتشافی پاسنگان با ۳/۹ سانتی‌متر در سال رخ داده است. نواحی منطقه، شامل حاجی‌آباد، سراج و دولت‌آباد، و جنوب شرقی منطقه شامل اکتشافی پاسنگان، شمال پاسنگان و تقاطع اتوبان بیشترین میزان افت سطح آب و در نتیجه بیشترین میزان فرونشست را تجربه کرده‌اند. بررسی آماری رابطه بین افت سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست نشان داد که این دو عامل همبستگی زیادی با یکدیگر دارند، به طوری که ضریب همبستگی محاسبه‌شده برابر با ۰/۷۳ و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار بوده است. همچنین، بازدیدهای میدانی از مناطق پرخطر، وجود ترک‌های سطحی و آسیب‌های ناشی از فرونشست را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی راداری، دشت کهک، قم، سنتینل ۱، فرونشست، InSAR

مقدمه

جابه‌جایی‌های سطحی با دقتی در حد میلی‌متر را در گستره‌های وسیع و در فواصل زمانی مختلف دارد (Tong et al., 2016). اگر مسیر امواج رادار تا سطح زمین در تصاویر مختلف ثابت باقی بماند، اختلاف فاز نیز وجود نخواهد داشت و بنابراین هیچ جابه‌جایی رخ نداده است. اما در صورت تغییر این فاصله به دلیل جابه‌جایی عمودی یا افقی، اختلاف فاز در تصویر دوم ظاهر می‌شود که حاکی از تغییر موقعیت سطح زمین است (واجدیان و همکاران، ۱۳۹۰). آیدین و همکاران به بررسی پیامدهای زیست‌محیطی پدیده فرونشست در مناطق شهری کشور اندونزی پرداختند. یافته‌های آن‌ها که بر پایه داده‌های حاصل از ابزارهای موقعیت‌یابی دقیق و سنجش‌ازدور به‌دست آمده است، نشان داد که نرخ فرونشست در این مناطق هم از نظر مکانی و هم زمانی دارای نوسانات محسوسی است. آن‌ها میزان نشست زمین را بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال برآورد کردند (Abidin et al., 2015). چن و همکاران در پژوهشی به بررسی ارتباط میان فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی پرداختند. در این تحقیق، با بهره‌گیری از تصاویر راداری مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰، نرخ فرونشست در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. نتایج نشان داد که نرخ فرونشست با دقتی کمتر از ۵ میلی‌متر قابل اندازه‌گیری بوده و الگوی نشست در سطح منطقه به صورت

فرونشست زمین پدیده‌ای ژئو مورفولوژیک است که در اثر عوامل متعددی از جمله فرایندهای طبیعی مانند زمین‌لرزه، فعالیت‌های آتشفشانی، حرکات گسلی، افزایش سطح آب دریا، انحلال سنگ‌ها، اکسایش، تراکم مواد آلی و نیز شکل‌گیری حفره‌ها در مناطق کارستی رخ می‌دهد (فتح‌الهی و همکاران، ۱۳۹۷). تکنیک تداخل سنجی راداری با درجه مصنوعی که مبتنی بر مقایسه حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه در زمان‌های مختلف است، امروزه به‌عنوان یکی از روش‌های دقیق و کارآمد برای پایش تغییرات ارتفاعی سطح زمین شناخته می‌شود (Zhang, 2019). این فناوری قابلیت تشخیص

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- استاد گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

(*- ایمیل نویسنده مسئول: vahid.mhm96@gmail.com)

DOI: [10.22034/ijid.2025.525438.2595](https://doi.org/10.22034/ijid.2025.525438.2595)

فرونشست از جنوب شهر به سمت شمال، شمال شرق و شرق افزایش یافته و در برخی مناطق به ۱۰۰ میلی‌متر در سال نیز رسیده است. در حالی که نواحی جنوبی شهر تقریباً پایدار بوده‌اند (Goorabi et al., 2020).

قره چلو و همکاران (۱۴۰۰) میزان فرونشست زمین در ارتباط با افت آب زیرزمینی با استفاده از ماهواره سنتینل-۱ و الوس-۱ در دشت مشهد را بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷ مورد ارزیابی قرار دادند. در این روش از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی استفاده شده است. بیشترین میزان فرونشست در بخش شمال غربی شهر مشهد با میزان ۱۷/۶ سانتی‌متر مشاهده گردید. مرادی و همکاران با تحلیل تصاویر Sentinel در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ پدیده فرونشست در کلان‌شهر تهران را ارزیابی کردند. روش مورد استفاده در این پژوهش، تکنیک تداخل سنجی تفاضلی با تصحیح اتمسفری بوده است. نتایج نشان دادند که در برخی نقاط جنوب تهران نرخ فرونشست به ۲۵۰ میلی‌متر در سال می‌رسد و این پدیده به شدت با افت سطح آب زیرزمینی مرتبط است (Moradi et al., 2023). قبادی فر و همکاران در مطالعه‌ای در دره سانتا کلارا، کالیفرنیا با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱، تغییرات سطح زمین را در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که در اثر خشکسالی اخیر منطقه تا ۳۰ میلی‌متر فرونشست داشته است (Ghobadi et al., 2023). شهنازی و همکاران با هدف بررسی تأثیر خشکسالی و افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین در دشت مرنده، از داده‌های InSAR و شاخص SGI استفاده کردند. آن‌ها در بازه ۷۵ ماهه با پردازش تصاویر ماهواره Sentinel-1، نرخ فرونشست را در برخی مناطق تا ۶۵ سانتی‌متر برآورد کردند که این نتایج بیانگر همبستگی قوی بین خشکسالی و فرونشست بوده است (Shahnazi et al., 2025). هدف اصلی این مطالعه، پایش و تحلیل میزان و الگوی مکانی-زمانی فرونشست زمین در دشت کهک، قم با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) و داده‌های ماهواره سنتینل-۱ و همچنین بررسی ارتباط آن با تغییرات سطح آب زیرزمینی است. این پژوهش بر پایه این فرضیه اصلی انجام می‌شود که بین نرخ فرونشست زمین و میزان افت سطح آب زیرزمینی در دشت کهک رابطه‌ای مستقیم و معنادار وجود دارد و الگوی مکانی فرونشست با مناطق دارای بیشترین برداشت از آبخوان مطابقت دارد. برای آزمون این فرضیه، از داده‌های ۳۲ چاه پیزومتری در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۹ و ۱۶ تصویر راداری در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند در شناسایی مناطق بحرانی و پیشگیری از خسارات آبی مورد استفاده قرار گیرد.

نواوری این مطالعه، بررسی پدیده فرونشست در دشت کهک، قم برای نخستین بار با استفاده از تصاویر Sentinel-1 و تکنیک InSAR

ناهمگن و پراکنده ظاهر شده است. بر پایه این تحلیل‌ها، بیشینه نرخ فرونشست در محدوده مرکزی شهر حدود ۱۰ میلی‌متر در سال برآورد شد، در حالی که در مناطقی مانند تانزو این مقدار به بیش از ۱۴۰ میلی‌متر در سال افزایش یافته است. همچنین بررسی‌های صورت گرفته بر روی سطح آب زیرزمینی حاکی از آن است که میان افت تراز آب زیرزمینی و شدت فرونشست زمین رابطه‌ای مستقیم وجود دارد (chen et al., 2016). روزبان و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای به بررسی پدیده فرونشست زمین در دشت رفسنجان با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) پرداخته و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Sentinel را به کار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که آهنگ فرونشست در این منطقه به میزان حداکثر ۲۸ سانتی‌متر در سال می‌رسد. اسمیت و همکاران در پژوهشی که بر منطقه دره سن‌خوآکین در ایالت کالیفرنیا متمرکز بود، به بررسی پیامدهای ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که در صورتی که استخراج آب از آبخوان‌ها به‌ویژه در مناطقی با لایه‌های رسی بیش از حد ادامه یابد، کاهش فشار آب منجر به فشرده شدن این لایه‌ها شده و ساختار خاک دچار تغییرات غیرقابل بازگشت می‌شود. این فرآیند در نهایت موجب می‌گردد که ظرفیت نگهداری و نفوذپذیری خاک نسبت به آب کاهش یافته و آبخوان، بخشی از توان طبیعی خود برای ذخیره مجدد آب را به‌صورت دائمی از دست بدهد (Smith et al., 2017). جین و همکاران تأثیر فعالیت‌های کشاورزی بر فرونشست در دره سن‌خوآکین، کالیفرنیا را ارزیابی کردند. خشکسالی‌های پی‌درپی در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و همچنین ۲۰۱۲، منجر به برداشت شدید آب زیرزمینی و در پی آن فرونشست قابل توجهی در منطقه شد. یافته‌های آن‌ها نشان داد مناطقی که وابستگی بیشتری به منابع آب زیرزمینی دارند، دچار نرخ بالاتری از فرونشست هستند (jeanne et al., 2019). مرادی و همکاران (۱۳۹۹) در منطقه ۱۸ شهر تهران نشان داد که این ناحیه بر روی رسوبات جوان با تراکم گراولی بالا قرار دارد. به علت افت سطح ایستابی و تخلیه فضای بین‌دانه‌ای، وزن مؤثر افزایش یافته، شرایط برای فرونشست فراهم شده است. بیشترین مقدار فرونشست در این منطقه حدود ۴۳۰ میلی‌متر در محله یافت‌آباد اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی، نرخ فرونشست از شمال به جنوب و از غرب به شرق افزایش یافته و ناحیه شرقی بیشترین تأثیر را پذیرفته است. شفیع‌ی و همکاران (۱۳۹۹) پدیده فرونشست در دشت نورآباد را در بازه ۱۲ ساله بررسی کرده و دریافته‌اند که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی تا ۲۲ متر در مناطق شرقی، جنوبی و مرکزی دشت رخ داده است. میانگین نرخ فرونشست در این منطقه حدود ۴ سانتی‌متر در سال و در مجموع حدود ۱۶ سانتی‌متر طی ۴ سال گزارش شده است. گورابی و همکاران با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-1 به بررسی نرخ فرونشست در کلان‌شهر اصفهان پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که نرخ

با شکل ۲ مشخص شده است. این چاه ها بخشی از شهر قم و شرق و جنوب شرقی شهر قم را شامل می شود.

روش انجام پژوهش

روش کار این پژوهش تحلیلی و میدانی است. در این پژوهش از داده های زمینی ۳۲ چاه پیژومتر در بازه زمانی سال های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۹ برای محاسبه میزان افت آب زیر زمینی و با استفاده از اینترپولیشن نقشه های درونیابی آن تهیه گردیده است. داده های مربوط به سطح آب چاه های پیژومتر در بازه زمانی سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۹ از سایت مدیریت منابع آب کشور، دفتر مطالعات پایه ای منابع آب برداشت گردیده است. یکی از روش های مؤثر برای بررسی پدیده فرونشست زمین، استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) است. این روش با تحلیل اختلاف فاز بین دو تصویر راداری که در زمان های متفاوت از یک منطقه تهیه شده اند، می تواند تغییرات ارتفاعی سطح زمین را در بازه زمانی مشخص اندازه گیری کند. در این تحقیق، برای استخراج میزان و نرخ فرونشست در منطقه مورد مطالعه، از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری بهره گرفته شد. تصاویر مورد استفاده از نوع راداری سنجنده Sentinel-1 در قالب SLC (تک منظر) با پالاریزاسیون VV بوده و هدف از آن، برآورد نرخ جابجایی سطح زمین است.

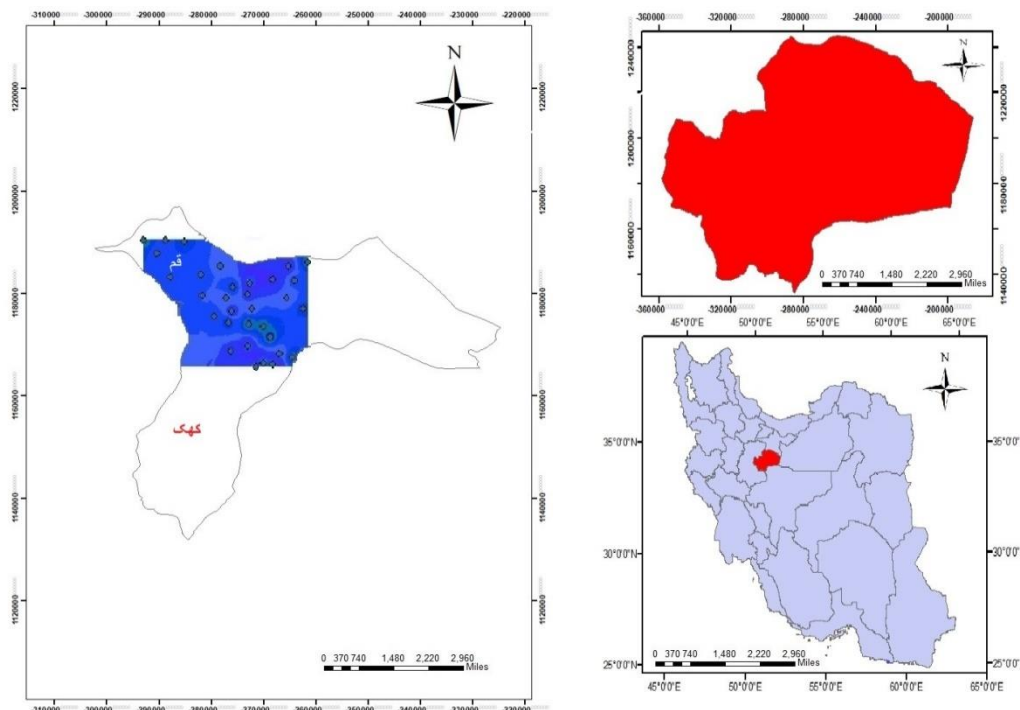
و همچنین تعیین میزان همبستگی آماری بین مقدار فرونشست با افت آب زیر زمینی ناشی از برداشت چاه ها و معرفی کانون های بحرانی فرونشست در منطقه که می تواند تسهیل دهنده تصمیم گیری ها در مدیریت منابع آب و برنامه ریزی توسعه شهری در استان قم باشد.

مواد و روش ها

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه فی مابین دو شهرستان استان قم، شهرستان قم و شهرستان کهک واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در محدوده جغرافیایی بین عرض های شمالی ۳۸ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۹ دقیقه، و طول های شرقی ۴۸ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۴ دقیقه واقع شده است. بزرگ ترین شهر این محدوده شهر قم است که در ارتفاع ۹۳۸ متری از سطح دریا قرار دارد. بیشترین ارتفاع این محدوده مربوط به زنبورک با ارتفاع ۹۶۵ متر و کمترین ارتفاع مربوط به پالایشگاه با ۸۳۹ متر از سطح دریا می باشد. مساحت این محدوده ۴۰۸.۵۲ کیلومترمربع می باشد که ۶۵.۵ کیلومترمربع مساحتی هست که شهر قم از این محدوده در بر میگیرد و مابقی به شهر های کوچک و روستاها و زمین های تحت کشت و بایر اختصاص دارد. این محدوده دارای ۳۲ حلقه چاه پیژومتر می باشد (شکل ۲).

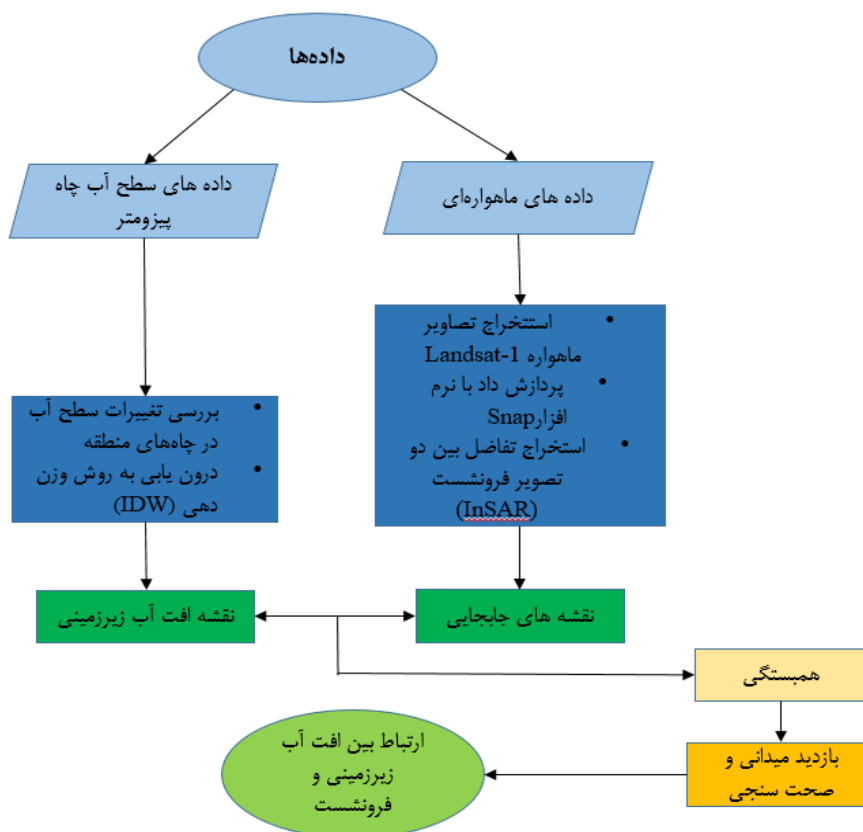
موقعیت مربوط به ۳۲ چاه پیژومتر منطقه دشت کهک، قم مطابق



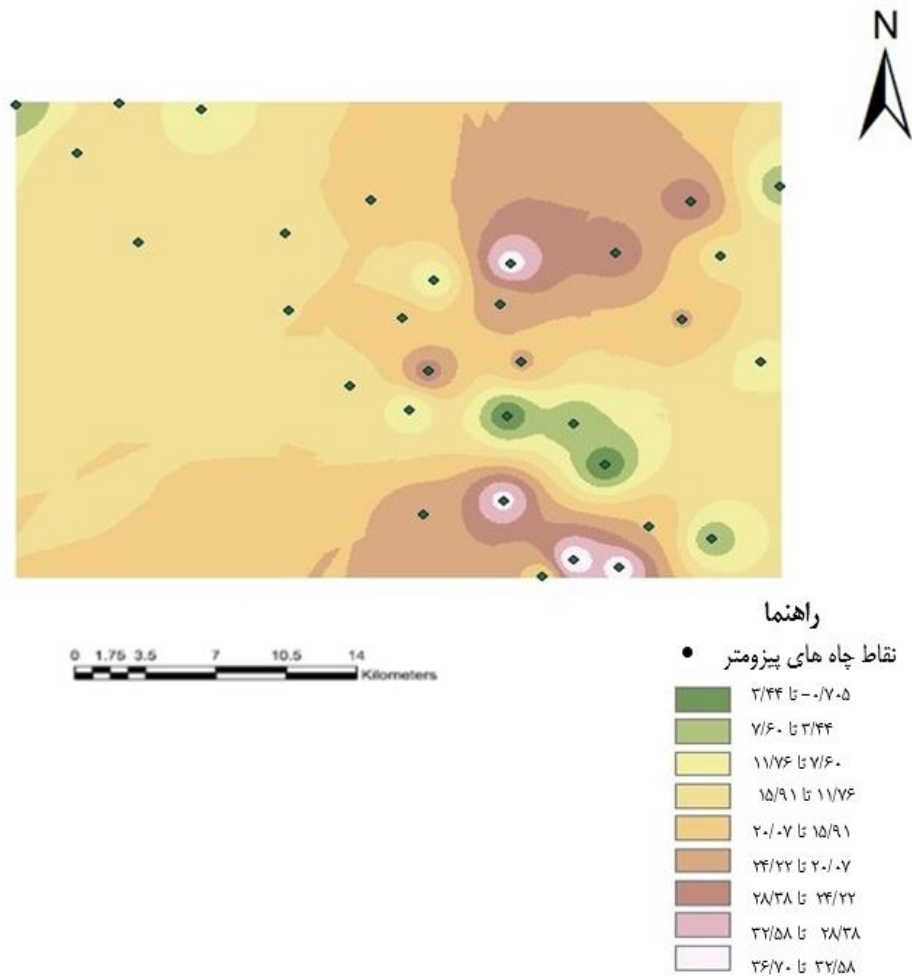
شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه دشت کهک، قم

جدول ۱- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری
۱	۲۰۱۷/۰۱/۰۸	SLC	IW	Ascending
۲	۲۰۱۷/۰۴/۰۷	SLC	IW	Ascending
۳	۲۰۱۷/۰۷/۱۰	SLC	IW	Ascending
۴	۲۰۱۷/۱۰/۰۳	SLC	IW	Ascending
۵	۲۰۱۸/۰۱/۰۸	SLC	IW	Ascending
۶	۲۰۱۸/۰۴/۰۲	SLC	IW	Ascending
۷	۲۰۱۸/۰۷/۱۹	SLC	IW	Ascending
۸	۲۰۱۸/۱۰/۱۱	SLC	IW	Ascending
۹	۲۰۱۹/۰۱/۰۳	SLC	IW	Ascending
۱۰	۲۰۱۹/۰۴/۰۹	SLC	IW	Ascending
۱۱	۲۰۱۹/۰۷/۰۲	SLC	IW	Ascending
۱۲	۲۰۱۹/۱۰/۰۶	SLC	IW	Ascending
۱۳	۲۰۲۰/۰۱/۱۰	SLC	IW	Ascending
۱۴	۲۰۲۰/۰۴/۰۹	SLC	IW	Ascending
۱۵	۲۰۲۰/۰۷/۰۹	SLC	IW	Ascending
۱۶	۲۰۲۰/۱۰/۰۱	SLC	IW	Ascending



شکل ۳- مراحل انجام کار این مطالعه

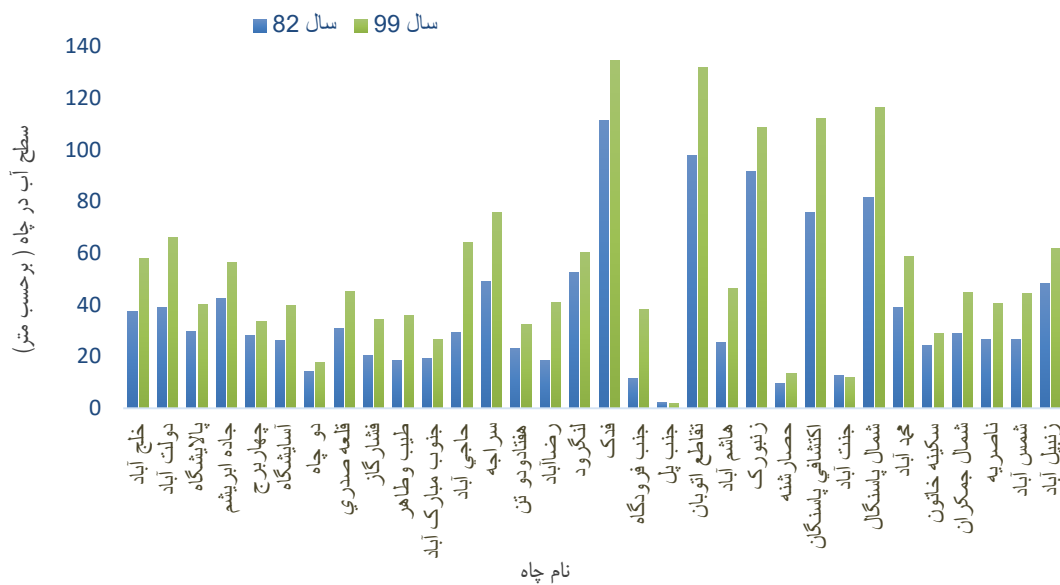


شکل ۴- نقشه افت آب زیرزمینی منطقه قم - کهک از سال ۸۲ تا ۹۹

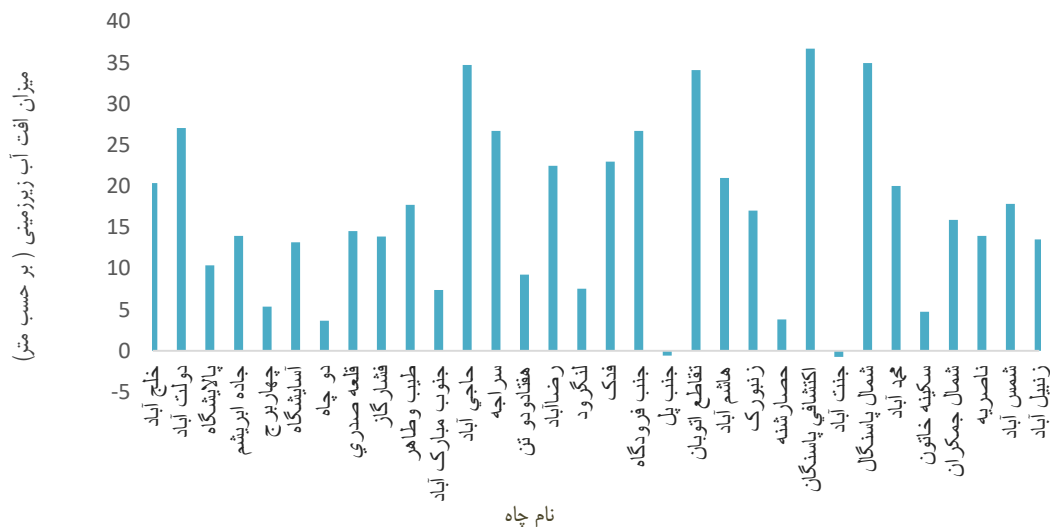
بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۹ مطابق شکل ۶ می باشد. بیشترین میزان افت آب زیر زمینی مربوط به اکتشافی پاسنگان، حاجی آباد، شمال پاسنگان و تقاطع اتوبان است. مشخصات چاه های پیزومتر و میزان افت آب زیر زمینی و فرونشست به دست آمده از پردازش تصاویر ماهواره ای در جدول ۲ نمایش داده شده است.

در جدول ۲ نتایج حاصل از میزان فرونشست با استفاده از تصاویر و میزان افت آب زیر زمینی مربوط به تمامی چاه های منطقه ارائه گردیده است. تصاویر اخذ شده از ماهواره سنتینل ۱، به صورت دو به دو پردازش گردیدند و در نهایت تصاویر پردازش شده به وسیله نرم افزار Snap مطابق شکل ۷ است.

باتوجه به جمعیت ۱/۵ میلیون نفری این منطقه و قرار داشتن شهر قم در این محدوده، بخش اعظمی از امکانات صنعتی و کشاورزی استان قم در این محدوده می باشد با توجه به داده های ارائه شده در سایت شرکت مدیریت منابع آب کشور، در سال ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ بالای ۱/۴ میلیارد مترمکعب بوده است که این میزان تا سال ۹۵ به کمتر ۸۰۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. در سال ۸۲ حدوداً ۹۰ درصد مصرف آب استان قم مربوط به کشاورزی، ۷ درصد مصرف شرب و ۳ درصد در بخش صنعت بوده است. در سال ۹۵ هم علی رقم کاهش محسوس مصرف آب در استان قم بازهم ۹۰ درصد مصرف آب مربوط به بخش کشاورزی بوده است. بیشتر برداشت آب از سفره های آب زیرزمینی در این منطقه به ترتیب از طریق چاه های عمیق، قنات، چاه های نیمه عمیق و چشمه ها تامین می شود. سطح آب چاه های پیزومتر منطقه طبق شکل ۵ و میزان افت این چاه ها در



شکل ۵- نمودار سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۲ و ۱۳۹۹ در چاه های منطقه



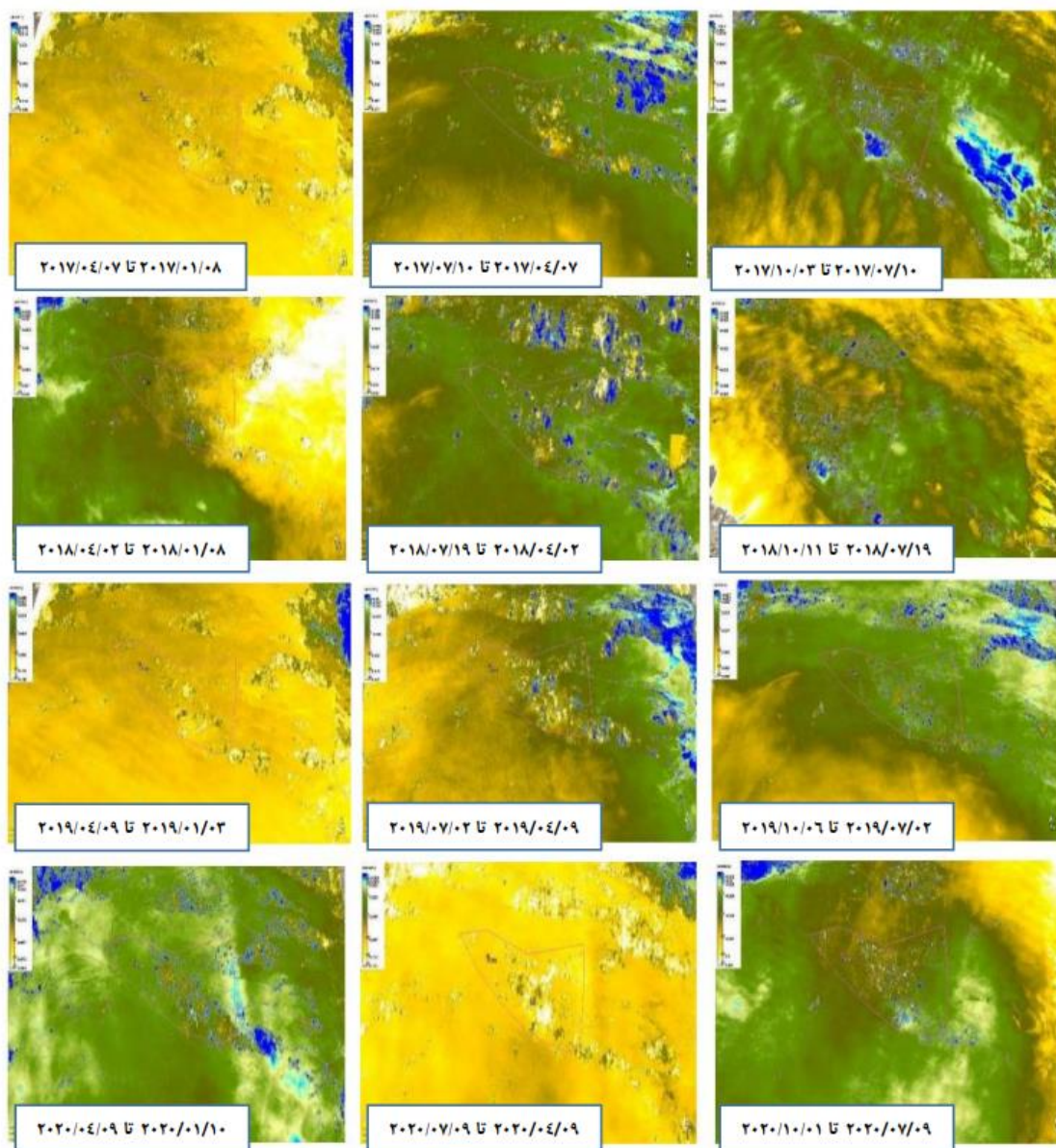
شکل ۶- میزان افت سطح آب زیر زمینی در چاه های منطقه بین سال های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۹

افت آب زیرزمینی و پدیده فرونشست است. بررسی میزان فرونشست حاصل از تصاویر و تغییرات سطح آب پیژومتر با استفاده از روش همبستگی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و نتایج حاصل نشان داد که ضریب R^2 برابر با 0.73 و با ضریب معناداری سطح ۹۹ درصد می باشد. از مقایسه میزان نشست با افت آب زیر زمینی در بخش های جنوب شرقی و محدوده شمال پاسنگان، تقاطع اتوبان و اکتشافی پاسنگان و در بخش حاجی آباد همبستگی بالایی را نشان می دهند (شکل ۸).

طبق تصاویر پردازش شده شکل بالا، مناطقی که با رنگ آبی مشخص گردیده اند در آن بازه زمانی بیشترین میزان فرونشست را داشته اند. با برآورد مقدار عدم قطعیت ± 1 سانتی متری در یک سال که از انحراف معیار نرخ فرونشست در منطقه پایدار کوه خضر بدست آمد، نشان دهنده رابطه معنادار بین الگوی فرونشست و مناطق دارای افت آب زیر زمینی است. در مناطقی همچون جنب پل و جنت آباد که افت سطح آب زیرزمینی در این بازه زمانی نداشتند نرخ فرونشست کمتر از ۲ سانتی متر در سال بود و در محدوده خطای روش قرار داشت. این همخوانی فضایی شاهدهی برای تایید رابطه همبستگی بین

جدول ۲- مشخصات چاه های منطقه

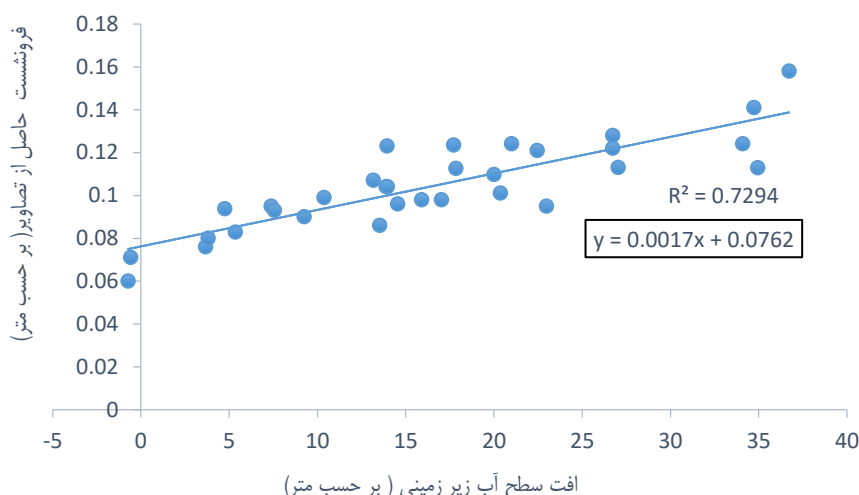
ردیف	نام چاه	UTM(x)	UTM(y)	ارتفاع نقطه نشانه به متر	افت چاه به متر	فرونشست با تصاویر به متر
۱	خلج آباد	۵۱۰۲۸۰	۳۸۲۶۹۷۳	۸۵۲/۱۳	۲۰/۳۷۵	۰/۱۰۱
۲	دولت آباد	۵۱۰۶۳۷	۳۸۳۲۸۰۵	۸۵۱/۳۳	۳۷/۰۵	۰/۱۱۳
۳	پالایشگاه	۵۱۳۶۶۲	۳۸۲۴۸۱۴	۸۴۰/۳۲	۱۰/۳۸	۰/۰۹۹
۴	جاده ابریشم	۵۱۱۹۰۸	۳۸۳۰۱۴۸	۸۴۷/۲۵	۱۳/۹۵۵	۰/۱۲۳
۵	چهار برج	۵۱۴۵۰۰	۳۸۳۳۵۹۶	۸۳۹/۱۳	۵/۳۶	۰/۰۸۲۸
۶	آسایشگاه	۴۹۳۱۰۶	۳۸۳۱۲۳۱	۹۱۳/۴۴	۱۳/۱۷۵	۰/۱۰۷
۷	دو چاه	۴۸۱۵۰۷	۳۸۳۷۶۷۹	۹۲۰/۶	۳/۶۶۵	۰/۰۷۶
۸	قلعه صدری	۴۸۴۱۴۹	۳۸۳۵۲۵۵	۹۳۲/۴۲	۱۴/۵۵۵	۰/۰۹۶
۹	فشارگاز	۴۸۵۹۸۲	۳۸۳۷۷۷۶	۹۱۹/۲۶	۱۳/۹	۰/۱۰۴
۱۰	طیب و طاهر	۴۹۶۸۴۰	۳۸۳۲۹۲۰	۹۰۴/۱۳	۱۷/۷۲	۰/۱۲۳۵
۱۱	جنوب مبارک آباد	۴۹۹۵۰۴	۳۸۲۸۹۲۳	۸۹۱/۱۳	۷/۳۸۵	۰/۰۹۵
۱۲	حاجی آباد	۵۰۲۸۵۰	۳۸۲۹۷۶۵	۸۷۷/۸۵	۳۴/۷۴	۰/۱۴۱
۱۳	سراج	۵۰۷۴۰۳	۳۸۳۰۲۵۴	۸۶۳/۴۸	۲۶/۷۳۵	۰/۱۲۸
۱۴	هفتادودو تن	۴۸۹۵۲۵	۳۸۳۷۴۴۴	۹۱۹/۱۸	۹/۲۵	۰/۰۹
۱۵	رضا آباد	۵۰۲۴۲۱	۳۸۲۷۷۳۰	۸۸۰/۶۱	۲۲/۴۶	۰/۱۲۱
۱۶	لنگرود	۴۹۸۴۶۹	۳۸۲۲۴۶۱	۹۰۷/۹۵	۷/۵۶۵	۰/۰۹۳
۱۷	فدک	۴۹۹۰۵۵	۳۸۱۷۱۹۵	۹۴۴/۰۲	۲۲/۹۷۵	۰/۰۹۵
۱۸	جنب فرودگاه	۴۹۹۲۷۳	۳۸۲۴۳۶۳	۸۹۵	۲۶/۷۳	۰/۱۲۲
۱۹	جنب پل	۵۰۲۷۲۹	۳۸۲۲۱۶۱	۸۸۸/۵۷	--/۵۷	۰/۰۷۱
۲۰	تقاطع اتوبان	۵۰۲۵۲۶	۳۸۱۷۹۳۵	۹۲۱	۳۴/۱	۰/۱۲۴
۲۱	هاشم آباد	۵۰۳۳۳۱	۳۸۲۴۸۳۶	۸۸۱/۹	۲۱	۰/۱۲۴
۲۲	زنبورک	۵۰۴۲۲۸	۳۸۱۴۱۲۰	۹۲۳	۱۷/۰۲۵	۰/۰۹۸
۲۳	حصار شنه	۵۰۵۵۳۴	۳۸۲۱۷۵۱	۸۷۹/۳۲	۳/۸۲	۰/۰۸
۲۴	اکتشافی پاسنگان	۵۰۵۵۷۲	۳۸۱۴۹۳۶	۹۰۸	۳۶/۷۲۵	۰/۱۵۸
۲۵	جنت آباد	۵۰۶۹۰۵	۳۸۱۹۶۷۶	۸۷۷/۹۸	--/۷۲۵	۰/۰۶
۲۶	شمال پاسنگال	۵۰۷۵۴۸	۳۸۱۴۵۶۴	۹۱۰/۴۶	۳۴/۹۴۵	۰/۱۱۲۸
۲۷	محمد آباد	۵۰۸۸۳۹	۳۸۱۶۶۲۹	۸۷۷/۹۵	۲۰/۰۱	۰/۱۰۹۸
۲۸	سکینه خاتون	۵۱۱۵۳۶	۳۸۱۵۹۸۵	۸۶۶/۶۵	۴/۷۵۵	۰/۰۹۳۸
۲۹	شمال جمکران	۴۹۳۲۴۳	۳۸۲۷۴۲۴	۹۱۲	۱۵/۹۰۵	۰/۰۹۸
۳۰	ناصریه	۴۹۵۹۰۵	۳۸۲۳۵۹۷	۹۰۹	۱۳/۹۷	۰/۱۰۴
۳۱	شمس آباد	۴۹۸۱۷۷	۳۸۲۷۰۱۴	۸۹۴/۲	۱۷/۸۴	۰/۱۱۲۵
۳۲	زنبیل آباد	۴۸۶۸۱۰	۳۸۳۰۷۷۰	۹۴۶/۰۹	۱۳/۵۳	۰/۰۸۶



شکل ۷ - تصاویر پردازش شده

فرونشست زمین است که خسارات بسیاری را در پی خواهد داشت. این ترک‌ها و درز و شکاف‌ها موجب بروز فرسایش و سیلاب‌های فراوان و تحلیل و از بین رفتن زمین‌های کشاورزی خواهد شد. در شکل‌های بالا شاهد ترک‌های طولی هستیم که معمولاً در اثر کسش سطحی زمین و به صورت شکاف‌های ممتد ظاهر شده‌اند. این ترک‌ها نشانه‌ی جابه‌جایی‌های غیریکسان لایه‌های زیر سطحی است. در شکل ۱۱ بروز ترک‌های باریک و تخریب و نشست در پیاده‌روها در محدوده سراج را نشان می‌دهد.

در این مطالعه جهت تعیین اعتبار یافته‌های حاصل از سنجش‌ازدور و همچنین جمع‌آوری شواهد مکانی از پدیده فرونشست عملیات پیمایشی و بازدید میدانی صورت پذیرفت. بدین منظور از مناطقی که در معرض نشست بودند بازدید به‌وسیله مؤلفین این مقاله صورت گرفت و بررسی‌های زمینی نشان‌دهنده تعداد زیادی رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از نشست زمین در این منطقه مورد مطالعه بود. شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان دهنده بروز ترک‌های طولی در محدوده حاجی آباد و جنوب شرقی این منطقه بوده است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته وجود ترک‌ها در منطقه بیانگر



شکل ۸ - همبستگی میزان فرونشست با سطح آب چاه های بیژومتر

نتیجه گیری

سالانه در طی چهارساله گذشته مربوط به اکتشافی پاسنگان با ۳/۹ سانتی متر و کمترین میزان آن مربوط به جنت آباد با ۱/۵ سانتی متر سالانه بوده است. محدوده اکتشافی پاسنگان، زنبورک، فدک، تقاطع اتوبان و شمال پاسنگان با ۲۴/۷ کیلومتر مربع و محدوده حاجی آباد، سراج و دولت آباد با ۶/۵ کیلومتر مربع و در مجموع ۳۱/۲ کیلومتر مربع جز مناطق پرخطر نشست در این منطقه است. مناطق با خطر بالای فرونشست ۷/۵ درصد از کل مساحت این منطقه را شامل می شود.

فرونشست پدیده ای مخرب است که هم اکنون در اکثر نقاط جهان به دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی به واسطه برداشت بی رویه و تغییرات اقلیمی شدت یافته است. در منطقه کهک، قم برداشت بی رویه آب زیرزمینی، حفر چاه های غیرمجاز، موجب کاهش سطح آب زیرزمینی در این منطقه شده است. نرخ فرونشست میانگین چهارساله کل این منطقه ۲/۶ سانتی متر بوده است. بیشترین نرخ فرونشست



شکل ۹ - ترک های شکل گرفته در قسمت جنوب شرقی منطقه



شکل ۱۰- ترک های طولی گسترش یافته در محدوده حاجی آباد



شکل ۱۱- ترک خوردگی و نشست پیاده رو در محدوده سراجه

منابع

شرکت مدیریت منابع آب کشور. دفتر مطالعات پایه‌ای منابع آب روزبان، ع. ۱۳۹۵. بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخلسنجی تفاضلی راداری DInSAR و با به‌کارگیری تصاویر سنجنده SENTINEL. دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. دی ماه، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری خواجه نصیرالدین طوسی تهران.

شفیعی، ن.، مختاری، ل.، امیراحمدی، ا. و زندی، ر. ۱۳۹۹. بررسی فرونشست دشت نورآباد با استفاده از روش تداخلسنجی راداری. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی. 8(4):93-111.

فتح الهی، ن.، آخوندزاده هنزایی، م. و بحرودی، ع. ۱۳۹۷. بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخلسنجی رادار. مجله اطلاعات جغرافیایی. ۲۷(۱۰۵): ۲۳-

در این مناطق به سبب تأمین نیازهای آبی مناطق مسکونی و شهری و روستایی و شهر قم، دست‌اندازی به منابع آب بیشتر بوده و باعث کاهش سطح آب زیر زمینی شده است. خوشبختانه میزان فرونشست در شهر قم، نسبت به مناطق شرق و جنوب شرقی این منطقه کمتر بوده؛ ولی باتوجه به اقلیم خشک این منطقه و کاهش بارش‌ها ممکن است در آینده پدیده فرونشست به یکی از مشکلات شهر قم و جمران مبدل شود. بیشترین میزان فرونشست در این منطقه مربوط به اکتشافی پاستگان با ۱۵/۸ سانتی‌متر در طول چهارساله بوده است. نتایج همبستگی ضریب R2 برابر ۰/۷۳ با سطح معناداری ۹۹ درصد میان افت آب زیرزمینی و فرونشست را نشان داد و بیانگر این است که ارتباط مستقیمی میان این دو پارامتر وجود دارد.

- Guo, J., Zhou, L., Yao, C. and Hu, J. 2016. Surface subsidence analysis by multi-temporal insar and grace: A case study in Beijing. *Sensors*. 16(9), 1495.
- Ghobadi-Far, K., Werth, S., Shirzaei, M. and Bürgmann, R. 2023. Spatiotemporal groundwater storage dynamics and aquifer mechanical properties in the Santa Clara Valley inferred from InSAR deformation over 2017–2022. *Geophysical Research Letters*. 50(22).
- Jeanne, P., Farr, T. G., Rutqvist, J. and Vasco, D. W. 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *Journal of hydrology*. 569: 462-469.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. and Cabral-Cano, E. 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *Isprs journal of photogrammetry and remote sensing*. 115: 90-102.
- Smith, R. G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J. A., Zebker, H. A., Farr, T. and Liu, Z. 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California. *Water Resources Research*. 53(3).
- Shahnazi, S., Roushangar, K., Khodaei, B. and Hashemi, H. 2025. Insights into the Interconnected Dynamics of Groundwater Drought and InSAR-Derived Subsidence in the Marand Plain, Northwestern Iran. *Remote Sensing*. 17(7): 1173.
- Tong, X. and Schmidt, D. 2016. Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing of Environment*. 186: 405-415.
- Zhang, L. 2019. Big data, knowledge mapping for sustainable development: a water quality index case study. *Emerging Science Journal*. 3(4): 249-254.
- قره چلو، س.، اکبری قوچانی، ح.، گلیان، س. و گنجی، ک. ۱۴۰۰. ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب های زیرزمینی به کمک داده ماهواره ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد). *مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)*. ۱۲(۴۴): ۱۱-۱۴.
- مرادی، آ.، عمادالدین، س.، آرخی، ص. و رضایی، خ. ۱۳۹۹. تحلیل زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه های ژئوتکنیکی و پیژومتری. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۷(۱): ۱۵۳-۱۷۶.
- واجدیان، س.، سراجیان، م. و منصوری، ب. ۱۳۹۰. استخراج میدان جابه جایی سه بُعدی با استفاده از فن تداخل سنجی رادار با درجه مصنوعی (SAR) : بررسی موردی گسل بم. *مجله فیزیک زمین و فضا*. ۳۷(۲): ۸۳-۹۶.
- Abidin, H. Z., Aas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P. and Week, M. G. F. W. 2015. Environmental impact of land subsidence in urban areas of Indonesia (7568) From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World Sofia. Bulgaria. pp (17–21).
- Chen, M., Tomás, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L.,... and Gong, X. 2016. Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*. 8(6): 468.
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M. and 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*. 181: 104238.

Investigation of Land Subsidence in the Kahak Plain, Qom, Using Interferometric Radar Technique(InSAR)

V. mohammadi*¹, T. rajaei², F. abasipour moghadam³

Received: May.15, 2025

Accepted: Sep.16, 2025

Abstract

This study investigates the phenomenon of land subsidence in the Kahak Plain, located in Qom Province, using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques and Sentinel-1 satellite imagery. For this purpose, 16 radar images from the period 2017 to 2020 were selected and processed using SNAP software to detect ground surface deformation over time. In addition, data from 32 piezometric wells spanning the years 2003 to 2020 were collected to calculate groundwater level declines during the same period. The results indicate that the average subsidence rate in the area is approximately 2.6 centimeters per year, with the highest rate observed in the Pasangan exploration zone, reaching up to 3.9 centimeters per year. Regions such as Hajjiabad, Sarajeh, and Dowlatabad, as well as the southeastern parts of the area including Pasangan exploration zone, North Pasangan, and the highway intersection have experienced the most significant groundwater level declines and, consequently, the highest subsidence rates. Statistical analysis reveals a strong correlation between groundwater depletion and land subsidence, with a calculated correlation coefficient of 0.73, significant at the 99% confidence level. Field surveys in high-risk areas further confirmed the presence of surface cracks and damages caused by subsidence.

Keywords: Insar, Kahak Plain (Qom), Radar Interferometry, Sentinel-1, Subsidence

¹ PhD Student of Water Civil Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering and Technology, University of Qom, Qom, Iran.

² Professor, Department of Water Civil Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering and Technology, University of Qom, Qom, Iran.

³ MSc student in Water Civil Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering and Technology, Khatam al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran.

(* - Corresponding author's Email: vahid.mhm96@gmail.com)