

# مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان

زهرا حاجب<sup>۱</sup>، زهرا موسوی<sup>۲</sup>، زهره معصومی<sup>۲</sup> و ابوالفضل رضایی<sup>۲</sup>

کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

## چکیده

رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای آب در سال‌های اخیر، سبب برداشت بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. برداشت آب زیرزمینی و افت تراز آب در آبخوان‌ها معمولاً می‌تواند فرونشست زمین و به تبع آن مختل شدن خطوط آب‌رسانی، راه آهن و گاز، تخریب پی ساختمان‌ها، تغییرات شیب زمین و کاهش ضریب ذخیره آبخوان را در پی داشته باشد. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ENVISAT و به کمک تکنیک تداخل‌سنجی رادار دهانه مصنوعی (InSAR) و آنالیز سری زمانی SBAS، نرخ فرونشست سالانه زمین در دشت‌های جعفرآباد و قنات استان قم برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برآورد شد. سپس با استفاده از تغییرات تراز آب پیرومترهای منطقه و ضخامت لایه‌های ریزدانه با قابلیت فرونشست دائم، ارتباط تغییرات مکانی نرخ فرونشست در نقاط مختلف آبخوان با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز سری زمانی تصاویر تداخل‌سنجی نشان می‌دهد که نرخ متوسط فرونشست در دشت‌های جعفرآباد و قنات به ترتیب ۳۵ و ۲۸ میلی‌متر بر سال در راستای خط دید ماهواره است. نقشه پهنه‌بندی فرونشست حاصل از پردازش تداخل‌سنجی راداری در تلفیق با داده‌های تراز آب پیرومترها و ضخامت لایه‌های ریزدانه حاکی از این است که فرونشست علاوه بر افت تراز آب به جنس خاک لایه‌های زیرین نیز بستگی دارد، به طوری که بیشترین نرخ نشست در مناطقی رخ داده که از یک سو تراکم چاه‌های بهره‌برداری آب زیاد است و از سوی دیگر لایه‌های ضخیم رس وجود دارد. نتایج این کار به خوبی عواقب عدم مدیریت بهینه منابع آب و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را به تصویر می‌کشد و می‌تواند در زمینه تصمیم‌گیری مناسب برای مدیریت بهینه برداشت از آب‌های زیرزمینی در آینده مثمر ثمر باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تداخل‌سنجی راداری، فرونشست، دشت قم.

\*نویسنده مسئول: زهرا حاجب

E-mail: hajeb.z@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای آب در سال‌های اخیر، سبب برداشت بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. برداشت بی‌رویه با کاهش فشار آب منفذی آبخوان، در صورت وجود لایه‌های با قابلیت فشردگی غیر قابل بازگشت (رس و سیلت) می‌تواند منجر به فرونشست زمین شود (Calderhead et al., 2011). فرونشست در واقع نشست رو به پایین و غیرقابل بازگشت سطح زمین است که می‌تواند خسارات اقتصادی جبران‌ناپذیری به بار آورد (Sneed et al., 2003). در مناطقی که فرونشست رخ می‌دهد یک یا چند عامل مانند حرکت گسل‌ها و برداشت بی‌رویه منابع آبی و نفتی نقش اساسی دارند. در مطالعات مربوط به فرونشست مهم‌ترین مراحل عبارتند از: (۱) شناسایی محدوده و نرخ فرونشست در نقاط مختلف یک منطقه، (۲) شناسایی عواملی که سبب فرونشست شده‌اند و (۳) ارائه راهکار مناسب به منظور کاهش نرخ فرونشست و سپس مدیریت و جلوگیری از خسارات ناشی از آن.

تکنیک تداخل‌سنجی راداری با داشتن ویژگی‌هایی همچون پوشش زمینی پیوسته و قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب به عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش از دور، برای بررسی تغییرات سطحی زمین شناخته شده است (Gabriel et al., 1989; Rott, H. and Nagler, T., 2006). در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصاویری که در زمان‌های مختلف از یک منطقه برداشت شده‌اند، پیکسل به پیکسل مقایسه و سپس از هم کم می‌شود (Ferretti et al., 2007). از تفریق مقادیر فاز دو تصویر، تصویر جدیدی به دست می‌آید که تداخل‌نگار نامیده می‌شود و اساس پردازش‌های راداری است (Hooper, 2007). خلیفی و همکاران (۱۳۹۶) با مطالعه دشت اردبیل نشان دادند که نرخ فرونشست حدود ۸۰ تا ۱۵۴ میلی‌متر بر سال است. بابایی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری نشان دادند که بیشینه دامنه فرونشستی دشت قزوین حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر بر سال است. کریم‌زاده (۲۰۱۵) به مطالعه فرونشست حوضه تبریز با ترکیب روش‌های SBAS و PS و با استفاده از ۱۷ تصویر راداری ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ پرداخت و به این نتیجه رسید که بیشینه

فرونشستی در این حوضه حدود ۴۰ میلی‌متر بر سال است. طبق مطالعه‌ای که بر روی دشت همدان با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) به کمک تصاویر ماهواره‌ای Envisat به منظور بررسی پدیده فرونشست زمین صورت گرفت، بیشینه فرونشستی برابر ۶۰ میلی‌متر بر سال برآورد شده است (شیخ‌احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج پایش فرونشست در دشت هشنگرد که توسط Haghightmehr et al. (2010) صورت گرفته است، نرخ نشست را حدود ۳۵ میلی‌متر بر ماه نشان می‌دهد. معتق و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تصاویر ماهواره ENVISAT و با روش تداخل‌سنجی راداری طول باز کوتاه، فرونشست دشت مهیار جنوبی اصفهان را ۸/۶ سانتی‌متر در سال محاسبه کردند. نرخ فرونشست شهر مکزیکوسیتی در کشور مکزیک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ENVISAT با روش پراکنشگرهای پایدار، به میزان ۳۰۰ میلی‌متر بر سال محاسبه شده است (Osmanoglu et al., 2010).

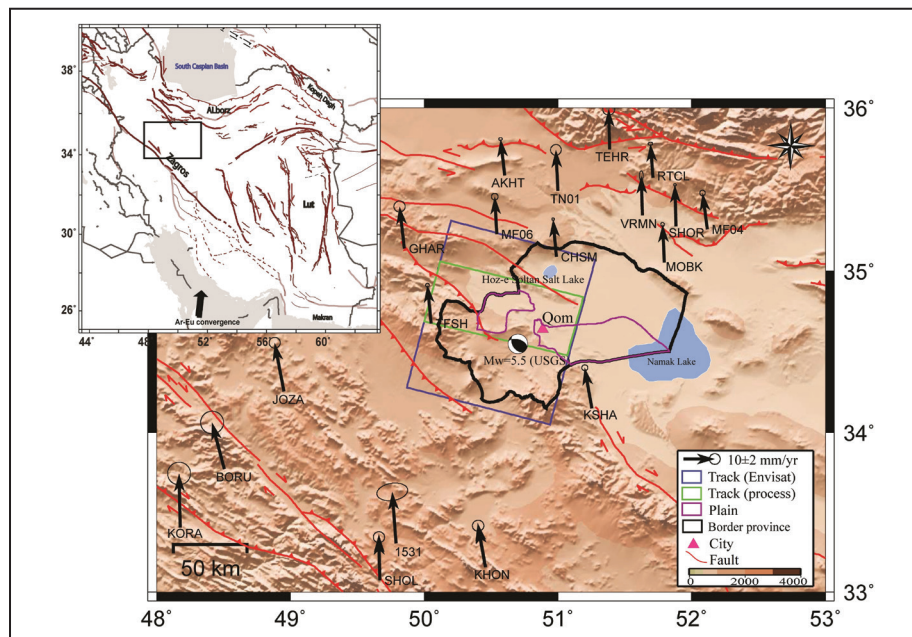
تغییرات تراز هیدرولیکی (تراز آب زیرزمینی) نمایانگر تغییرات انرژی یا بار فشارشی آب منفذی آبخوان است که با کاهش تراز آب بار فشارشی نیز کاهش یافته که موجب افزایش تنش مؤثر و رخداد فرونشست می‌شود. در صورت همگن (هموزن) بودن آبخوان به صورت تئوریک انتظار می‌رود جاهایی که حداکثر افت رخ داده است، مطابق با مناطق دارای بیشینه نرخ فرونشست باشند. اما در شرایط طبیعی آبخوان‌ها ناهمگن هستند و دانه‌بندی خاک در همه جا یکسان نیست، به طوری که ضخامت رسوبات دانه‌ریز (رس و سیلت) که معمولاً متحمل نشست غیرالاستیک می‌شود، می‌تواند باعث عدم تطابق کامل الگوی پهنه‌های فرونشست با الگوی تغییرات تراز هیدرولیکی شود. این مطالعه سعی در تهیه نقشه پهنه‌بندی نرخ فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت‌های شمالی استان قم دارد که برای انجام آن، تصاویر ماهواره ENVISAT از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ مورد آنالیز و پردازش قرار گرفته است. در این مطالعه همچنین سعی شده است که داده‌های

آب بسیار زیاد باشد، به گونه‌ای که این میزان افت در دشت‌های جعفرآباد و قنوت به ترتیب ۲۵ و ۳۵ متر در طول سال‌های ۶۹ تا ۹۳ و ۵۳ تا ۹۳ گزارش شده است (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۴). از آنجا که این دشت‌ها عمدتاً از رسوبات آبرفتی با دانه‌بندی مختلف (شن، ماسه، سیلت و رس) تشکیل شده‌اند، انتظار می‌رود که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی از آنها منجر به فرونشست زمین در منطقه شده باشد (شکل‌های ۲ و ۳). در منطقه مورد مطالعه، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی از سال ۱۳۳۶ شروع شده است و چاه‌های بهره‌برداری در عمق‌های متفاوتی از کم عمق (عمق زیر ۱۰۰ متر)، نیمه عمیق (عمق ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر) تا عمیق (بیش از ۲۰۰ متر) حفر شده‌اند (شکل ۴). مجموعاً ۶۲۴۲ چاه در استان قم واقع شده است که سالانه به طور میانگین حدود ۵۵۷ میلیون متر مکعب از آب زیرزمینی را پمپاژ می‌کنند. بررسی هیدروژئولوژیکی آبخوان آبرفتی دشت قم نشان می‌دهد که سفره آب زیرزمینی این منطقه از نوع آزاد است و عمده برداشت نیز از همین آبخوان صورت می‌گیرد.

تراز آب پیزومترها و ضخامت لایه‌های ریزدانه که قابلیت فرونشست دائم دارند، برای تفسیر بهتر نتایج مورد مطالعه قرار گیرند.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

استان قم در فلات مرکزی ایران دارای دو دشت مهم در نواحی مرکز و شمال به نام‌های قنوت و جعفرآباد است که رواناب سطحی آنها به دریاچه‌های حوض سلطان و نمک قم می‌ریزد (شکل ۱). از آنجا که استان قم با نرخ بارش متوسط سالانه ۱۶۰ میلی‌متر جزو مناطق خشک ایران به شمار می‌رود، فاقد منابع آب سطحی مناسب است و آب زیرزمینی به عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین منطقه عمل می‌کند. آب زیرزمینی منطقه به وسیله چاه‌های بهره‌برداری متعدد به منظور تأمین نیاز شرب، کشاورزی و صنعت به صورت گسترده و بی‌رویه در چند دهه گذشته در حال برداشت بوده است. این برداشت بی‌رویه سبب شده است تا میزان افت تراز



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران و بر روی مدل ارتفاعی رقومی. پیکان‌های سیاه بردارهای GPS (Walpersdorf et al., 2006; Djamour et al., 2010 and 2011) و خطوط قرمز گسل‌های منطقه (Hesami et al., 2003) را نشان می‌دهند.

## ۲-۱. تکنیک تداخل سنجی راداری

(Berardino et al., 2002) به منظور تحلیل آنالیز سری زمانی جابه‌جایی در روش تداخل سنجی راداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه‌ی قائم خط مبنای آنها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا و همچنین خط مبنا زمانی آنها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که همبستگی مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل برآورد می‌شود.

برای برآورد فرونشست در دشت‌های استان قم ۲۰ تصویر راداری درجه مصنوعی سنجنده Envisat از آرژانس فضایی اروپا (تحت پروژه با شماره کد ۲۳/۷) اخذ شد. طول موج این سنجنده ۵/۶ سانتی‌متر و زاویه دید سیگنال ۲۳/۵ درجه نسبت به حالت قائم است. در این تحقیق از بسته نرم‌افزاری StaMPS استفاده شده که بر پایه نرم‌افزار ROIPAC توسط دانشگاه Stanford توسعه داده شده است (Hooper et al., 2012). در این روش ۴۲ تداخل‌نگار با مؤلفه قائم خط مبنای کمتر از ۱۰۷۰ متر و خط مبنا زمانی کمتر از ۱۵۰۰ روز ایجاد شد. فاز ناشی از توپوگرافی زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر و اثر کرویت زمین با استفاده از پارامترهای مداری دقیق حذف می‌شوند (Bürgmann et al., 2000). برای کاهش اثر خطای اتمسفر از تصاویر MERIS-FR که با سنجنده ASAR روی یک ماهواره نصب شده‌اند و افزونه TRAIN استفاده می‌شود. زیرا این تصاویر اطلاعاتی از رفتار اتمسفر دارند و می‌توانند اثر آن بر

تکنیک تداخل سنجی رادار دهانه مصنوعی (Synthetic Aperture Radar Interferometry) یک فناوری دورسنجی است که با استفاده از تصاویر راداری از یک منطقه در زمان‌های متفاوت می‌تواند به بررسی پدیده‌های ژئوفیزیکی مانند زمین‌لرزه، آتشفشان و فرونشست بپردازد (Daniel et al., 2003). تغییرات ایجاد شده در سطح زمین باعث ایجاد اختلاف فاز در دو تصویر رادار در دو زمان مختلف می‌شود. اختلاف فاز به دست آمده از تصاویر نشان‌دهنده میزان تغییر شکل در فاصله زمانی دو گذر ماهواره بر فراز منطقه است. اساس کار این روش استفاده از اطلاعات فاز امواج راداری بازتابی از عوارض سطح زمین است به نحوی که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین، سبب اختلاف فاز در دو تصویر رادار اخذ شده در دو زمان مختلف از یک منطقه می‌شود. با استفاده از اختلاف فاز به دست آمده، تداخل‌نگارها ایجاد می‌شوند که شامل مؤلفه‌های ناشی از توپوگرافی، اثر کرویت زمین، تغییر شکل سطح زمین و خطاهای موجود هستند (رابطه ۱).

$$\Delta\varphi_{int} = \Delta\varphi_{flatten} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{am} + \Delta\varphi_{noise} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta\varphi_{flatten}$  مؤلفه فاز زمین مسطح،  $\Delta\varphi_{topo}$  سهم فاز توپوگرافی،  $\Delta\varphi_{def}$  اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل زمین و  $\Delta\varphi_{am}$  فاز ناشی از خطای اتمسفر است. برای تعیین فاز تغییر شکل باید اثر سه مؤلفه دیگر در فاز تداخل‌نگار حذف شود. فاز زمین مسطح با استفاده از فایل‌های مداری و فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (Digital Elevation Model) تصحیح می‌شوند.

پس از حذف مؤلفه‌های دیگر فاز تداخل‌نگار، روش خط مبنای کوتاه

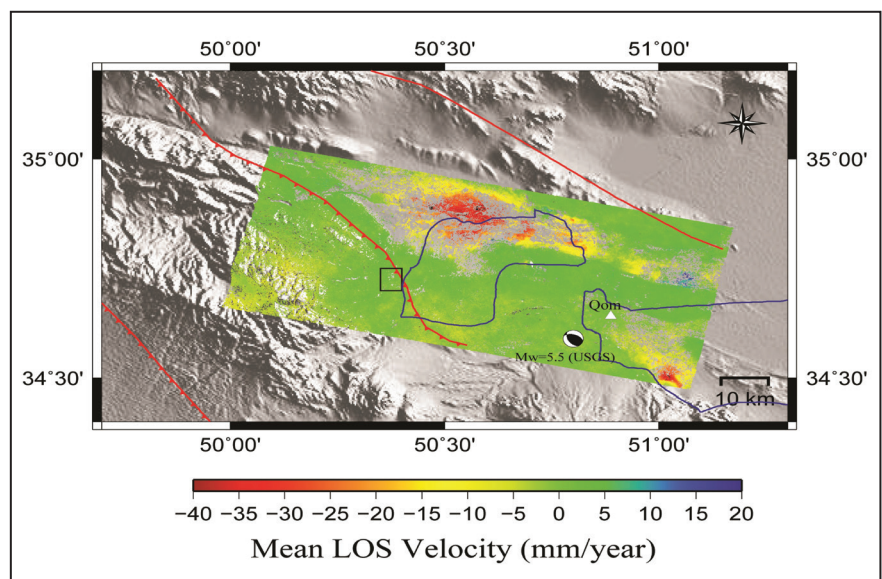
داده شده است. این نقشه ۳۵ میلی‌متر بر سال جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره نشان می‌دهد. میدان سرعت مسطحاتی ایستگاه‌های GPS در منطقه (شکل ۱) نشانگر کمتر از ۲ میلی‌متر بر سال فشردگی شمالی - جنوبی به دلیل برخورد قاره‌ای اوراسیا - عربی است. بنابراین می‌توان از تغییر شکل افقی در منطقه صرف نظر کرد و تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره را به تغییر شکل در راستای قائم با استفاده از رابطه زیر تبدیل کرد (Samsonov and d'Oreye, 2012):

$$V_{los} = V_V \cos \theta - V_H \sin \theta \quad (2)$$

در این رابطه  $\theta$  زاویه فرود (زاویه دید ماهواره با جهت عمود بر سطح زمین) و  $V_V$  و  $V_H$  به ترتیب سرعت در راستای افقی و ارتفاعی هستند. با قرار دادن زاویه فرود ماهواره ENVISAT برابر با مقدار تقریبی  $23^\circ$ ، مقدار تغییر شکل قائم به اندازه ۳۸ میلی‌متر بر سال به دست می‌آید. با توجه به عدم وجود تغییر شکل زمین‌ساختی قابل ملاحظه در منطقه احتمال دارد که این تغییر شکل ناشی از افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست قائم باشد.

فاز امواج راداری را کاهش دهند. تصاویر پردازش شده در این تحقیق مدت زمان ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ را پوشش می‌دهد که در این بازه زمانی زمین‌لرزه‌ای به بزرگای ۵/۶ (ML=5.6) در مقیاس امواج محلی (IIEES) در تاریخ ۲۸ خرداد ماه ۱۳۸۶ هجری شمسی (۱۸ ژوئن ۲۰۰۷ میلادی) به وقوع پیوست. بر اساس لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله، این زمین‌لرزه در مختصات  $34/52$  درجه عرض شمالی و  $50/86$  درجه طول خاوری رخ داده است. رومرکز دستگاهی این زمین‌لرزه در ۱۴ کیلومتری جنوب باختر قم و ۱۵ کیلومتری شمال بخش کهک مکان‌یابی شد. برای حذف اثر زمین‌لرزه بر روی نقشه جابه‌جایی منطقه در طول زمان تصاویر قبل و بعد این زمین‌لرزه از داده‌های پردازش شده حذف شده است.

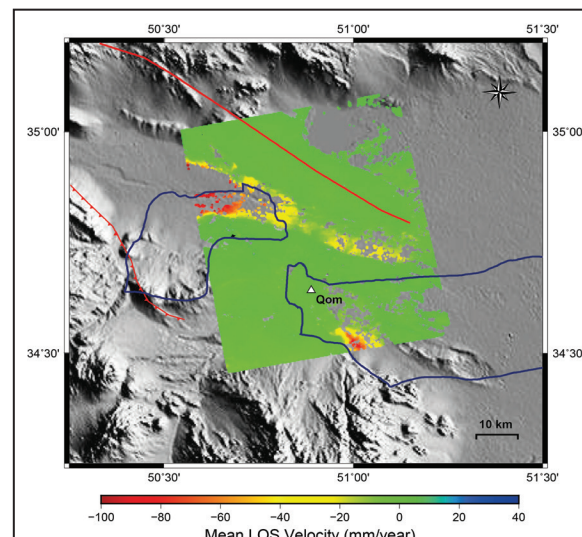
نقشه میانگین سرعت در جهت خط دید ماهواره با استفاده از آنالیز سری زمانی طول پایه کوتاه تداخل‌نگارهای به دست آمده از پردازش تصاویر پس از حذف مؤلفه‌های توپوگرافی، زمین مسطح و اتمسفر محاسبه شد. سرعت متوسط تغییر شکل منطقه در راستای خط دید ماهواره، نسبت به منطقه رفرنس معین، در شکل ۲ نشان



شکل ۲- میدان سرعت متوسط مربوط به دشت‌های جعفرآباد و قنات بعد از حذف خطاها. کادر سیاه معرف منطقه‌ای است که به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. مثلث سفید موقعیت شهر قم را نشان می‌دهد. محدوده‌هایی که با رنگ آبی مشخص شده‌اند محدوده دشت‌ها در استان قم هستند. سازوکار کانونی مشاهده شده مربوط به زمین‌لرزه ۲۰۰۷ منطقه کهک قم بوده که بزرگای ۵/۵ داشته است.

زمانی به روش خط مبنای کوتاه (Berardino et al., 2002) به منظور محاسبه میدان جابه‌جایی و آنالیز سری زمانی تصاویر در طول زمان مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۳ نقشه میدان سرعت متوسط برای منطقه دیده می‌شود که نشان از ادامه روند تغییر شکل در محدوده دشت‌های جعفرآباد و قنات با الگوی یکسان با نتایج حاصل از ENVISAT دارد. اما میزان فرونشست در مناطق درونی آبخوان در سال‌های اخیر افزایش داشته است.

برای مطالعه سرعت و گستردگی فرونشست در سال‌های اخیر، تصاویر ماهواره TOPS S1 از اکتبر سال ۲۰۱۴ تا اکتبر ۲۰۱۶ با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR (Sandwell, et al., 2011) پردازش شد. ۹۴ تداخل‌نگار با مؤلفه قائم خط مبنای کمتر از ۱۲۰ متر و خط مبنای زمانی کمتر از ۱۳۰ روز تولید و فاز ناشی از توپوگرافی زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر و اثر کروییت زمین با استفاده از پارامترهای مداری دقیق حذف شده‌اند. سپس آنالیز سری



شکل ۳- میدان سرعت متوسط حاصل از پردازش تصاویر Sentinel مربوط به دشت‌های جعفرآباد و قنات بعد از حذف خطاها. کادر سیاه معرف منطقه‌ای بوده که به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. مثلث سفید موقعیت شهر قم را نشان می‌دهد. محدوده‌هایی که با رنگ آبی مشخص شده‌اند محدوده دشت‌ها در استان قم هستند.

## ۲-۲. شرایط هیدروژئولوژی منطقه

دشت‌های جعفرآباد و قنوت، سعی می‌شود که علاوه بر نوسانات تراز آب پیزومترها، پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری، میزان برداشت آب، نقشه پهنه‌بندی میزان تخلیه سالانه آب زیرزمینی و ضخامت لایه‌های رس و سیلت مورد بررسی قرار بگیرد. چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مهم‌ترین فاکتور تخلیه آب از دشت‌ها هستند و از آنجا که هر چاه، با تخلیه آب منفذی محدوده شعاعی اطراف خودش سبب کاهش فشار آب منفذی می‌شود، تعادل نیروها به هم می‌خورد و تنش مؤثر در محدوده اطراف چاه افزایش می‌یابد. برای جبران کاهش فشار آب منفذی آبخوان تراکم می‌شود و این امر به نشست غیرالاستیک در لایه‌های ریزدانه می‌انجامد.

به منظور بررسی ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه، در این بخش هیدروگراف‌های معرف آب زیرزمینی دشت‌های جعفرآباد و قنوت به همراه تغییرات تراز بلندمدت آب زیرزمینی پیزومترهای مختلف ارائه خواهد شد، زیرا رفتار پیزومترها به خوبی بیانگر روند کاهش فشار آب منفذی در آبخوان است. در

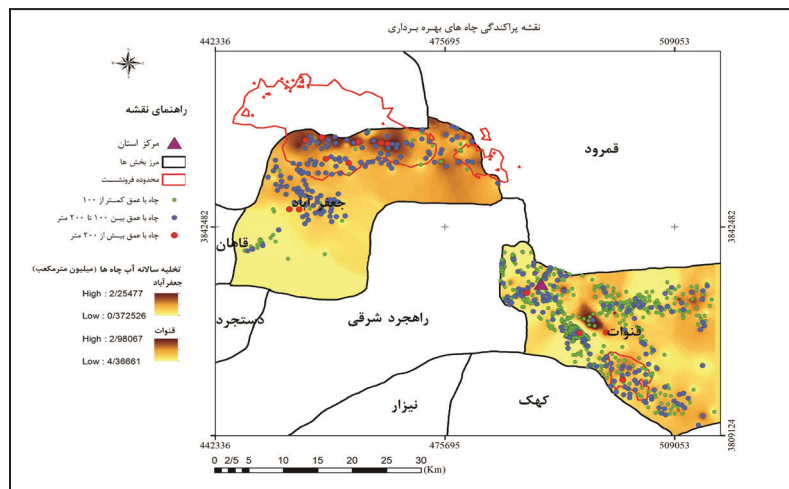
شکل ۵ مشاهده می‌شود که هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت‌های جعفرآباد و قنوت افت محسوسی در طی چندین دهه اخیر داشته، به طوری که میزان افت تراز آب در دشت جعفرآباد حدود ۳۰ متر در طول ۲۴ سال (۶۹ از سال تا ۹۳) و در دشت قنوت حدود ۴۰ متر در طول ۴۰ سال (از سال ۵۳ تا ۹۳) بوده است.

با توجه به اینکه میزان برداشت آب در همه نقاط دشت‌ها یکسان نیست، برای درک بهتر تفاوت میزان برداشت و مقایسه مناطق مختلف از نظر میزان افت آب زیرزمینی پهنه‌بندی تخلیه سالانه آب زیرزمینی و محدوده فرونشست در شکل ۶ نشان داده شده است. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری نمونه‌هایی از شواهد صحرایی این فرونشست در شکل ۷ ارائه شده است.

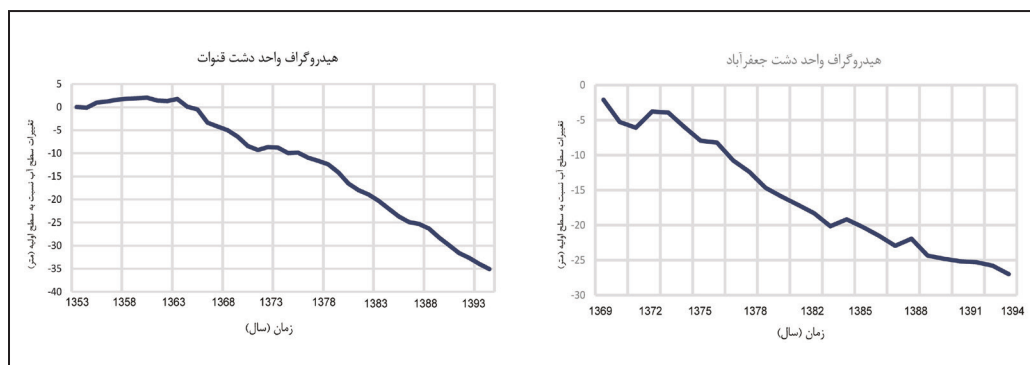
با توجه به وجود شواهدی مانند: (۱) بردارهای GPS و مشاهده میزان تغییر شکلی که این بردارها نمایش می‌دهند، (۲) حذف تصاویری نزدیک به تاریخ وقوع زمین‌لرزه که عامل اصلی جابه‌جایی در بازه زمانی خیلی کوتاه هستند و (۳) تطابق بیشترین نرخ فرونشست با محدوده آبخوان‌های آبرفتی، می‌توان گفت که عامل اصلی رخ دادن فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و افت شدید تراز آب است. نشستی که تحت تأثیر پدیده تحکیم بر اثر خروج آب از لایه‌های ذرات خاک‌های ریزدانه (رس و سیلت) حاصل می‌شود و وقوع آن تدریجی و تابع زمان است را نشست غیرالاستیک گویند (رحیمی، ۱۳۸۴). یعنی در این حالت بر خلاف نشست الاستیک، تغییر شکل بلافاصله بعد از اعمال نیرو به وقوع نمی‌پیوندد، بلکه تدریجاً و با پیشرفت زمان رخ می‌دهد. واحدهای رسی و سیلتی به علت ریزدانه بودن، تخلخل بالا و ضریب نفوذپذیری قابل ملاحظه، نقش کلیدی در مناطق فرونشست بر عهده دارند. زیرا نشست حاصل از برداشت آب از این لایه‌ها غیرقابل بازگشت و دائمی خواهد بود (Wen-jie et al., 2013) و سبب کاهش ضریب ذخیره آبخوان و در موارد بحرانی سبب نابود شدن آبخوان برای همیشه می‌شود.

به منظور آشنایی بیشتر با وضعیت و ویژگی‌های آبخوان قم، بر طبق مطالعات اکتشافات انجام شده (شرکت سهامی آب منطقه‌ای قم، ۱۳۹۱) ضریب آبگذری از ۴۸۸ تا ۳۴۵۱ متر مربع در روز تغییر می‌کند. میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی را برابر با ۰/۵ تا ۵ متر بر روز، تخلخل را برابر با ۰/۲۵ درصد و ضخامت آبخوان را بین ۲۰ (دامنه ارتفاعات) تا ۳۰۰ متر (میان‌های دشت) گزارش کرده‌اند. مقدار ضریب آبدهی ویژه دشت قم نیز بین ۰/۰۳ تا ۱۵ درصد گزارش شده است.

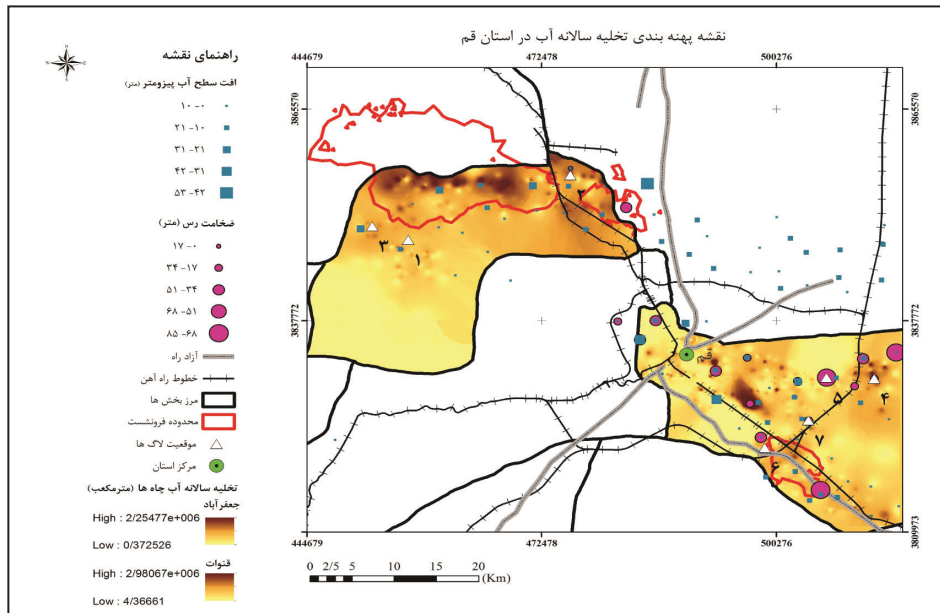
در این مطالعه، به منظور بررسی بیشتر تأثیر افت تراز آب زیرزمینی بر فرونشست



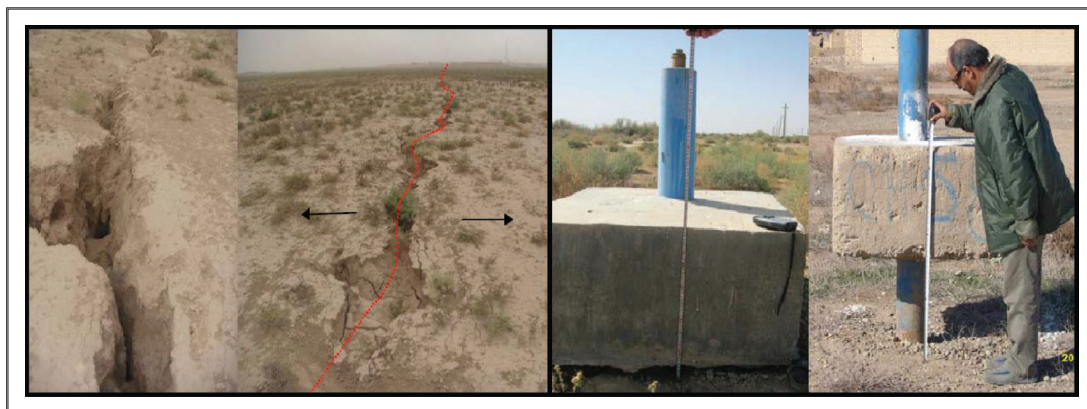
شکل ۴- نقشه پراکندگی چاه‌ها به همراه پهنه‌بندی تخلیه سالانه چاه‌ها.



شکل ۵- هیدروگراف معرف دشت جعفرآباد در سمت راست از سال فروردین ۶۹ تا شهریور ۹۴ و دشت قنوت در چپ از مهر ۵۳ تا شهریور ۹۳.



شکل ۶- نقشه پهنه بندی تخلیه سالانه آب زیرزمینی. پلیگون‌های قرمز محدوده فرونشست را نشان می‌دهند. مثلث‌های سفید لاگ‌های موقعیت لاگ‌های حفاری بررسی شده و شماره آنها را در دشت‌ها نشان می‌دهد. دایره‌های بنفش نشانگر لاگ‌های مورد مطالعه منطقه و اندازه آنها نشان‌دهنده مقدار ضخامت لایه‌های مختلف رس در لاگ‌ها (متر) و اندازه مربع‌های آبی نشانگر میزان افت سطح آب زیرزمینی (متر) در پیزومترهای این مناطق است.



شکل ۷- تصاویر رشد لوله جدار پیزومترهای دشت علی‌آباد، ترک‌ها و حفره‌های به وجود آمده ناشی از فرونشست در حواشی دشت علی‌آباد.

### ۲-۳. مقایسه سری زمانی تغییرات تراز آب پیزومترها و تغییرات تراز سطح زمین حاصل از تداخل سنجی راداری

بی‌رویه با فرونشست را به درستی تفسیر کرد. به این منظور در این بخش ۲۰ لاگ لیتولوژیکی در دشت قنات و ۷ لاگ لیتولوژیکی موجود برای دشت جعفرآباد مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۹). در اینجا برای نمونه لاگ‌های پیزومترهای جاده علی‌آباد، شاهجرد و جنوب گازران برای دشت جعفرآباد و لاگ‌های پیزومترهای هاشم‌آباد، لنگرود، سراج و جاده ابریشم مربوط به دشت قنات به صورت گرافیکی ارائه می‌شود. این لاگ‌ها به گونه‌ای تشریح می‌شوند تا به خوبی بتوان این مسئله را به تصویر کشید که برای رخ دادن فرونشست باید هر دو شرایط افت شدید و وجود لایه ریز دانه مهیا باشد. لاگ پیزومتر جنوب گازران (شماره ۱) معرف شرایطی بوده که در کنار لایه‌های ضخیم رس، افت تراز آب چشمگیر است (۲۰ متر) و فرونشست مشاهده می‌شود. لاگ پیزومتر شاهجرد (شماره ۲) معرف منطقه‌ای بوده که در آن افت سطح آب مقدار متوسطی (۴ متر) دارد و به دلیل حضور لایه‌های رس (۱۷ متر) متحمل فرونشستی به مقدار ۴۷ میلی‌متر بر سال شده است. لاگ مربوط به پیزومتر جاده علی‌آباد (شماره ۳) نماینده منطقه‌ای با افت سطح آب کم (۵ متر) و لایه‌های ضخیم رس و سیلت (۴۵ متر) است که در آن فرونشست به مقدار ۶۳ میلی‌متر بر سال

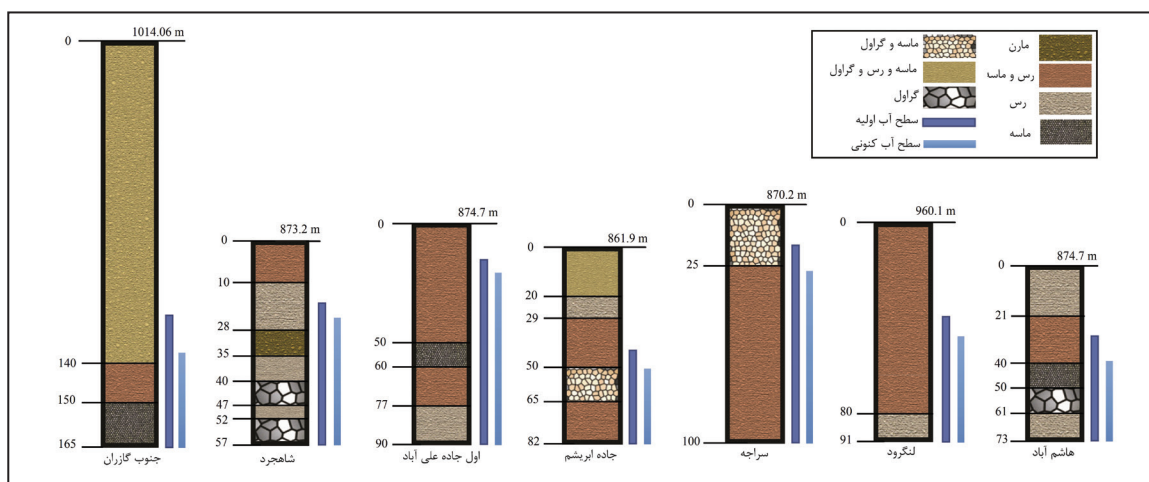
به منظور درک بهتر تأثیر هیدروژئولوژی منطقه بر روی فرونشست، نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری به صورت نمودارهای سری زمانی ترسیم شد و با نمودارهای تغییرات سطح آب زیرزمینی در پیزومترهایی که در همان نقاط قرار داشتند، مقایسه شد (شکل ۸). بر طبق این مقایسه مشاهده می‌شود که روند فرونشست، تطابق قابل ملاحظه‌ای با روند کاهش سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف داشته و در مناطقی که فرونشست بیشتری رخ داده است، بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی نیز مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه این است که از سال ۱۳۸۷ به بعد، تراز آب زیرزمینی افت شدیدی داشته که این امر با نرخ فرونشست بیشتر در منطقه همراه است. دلیل این امر به خشکسالی‌های شدید سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ مربوط می‌شود که منجر به افزایش تقاضا برای آب و اضافه برداشت شدید آب زیرزمینی در منطقه شده است.

از آنجا که به منظور رخ دادن فرونشست علاوه بر کاهش فشار آب منفذی، وجود لایه‌های ریزدانه (رس و سیلت) نیز لازم است، سعی می‌شود که ضخامت لایه‌های ریزدانه در محل پیزومترهای مختلف نیز ارائه شود. در واقع بدون اطلاع از ضخامت لایه‌های ریزدانه، تنها بر اساس افت تراز آب نمی‌توان ارتباط برداشت

بیشترین نرخ فرونشست در این دشت است. دلیل نرخ بالای فرونشست به مقدار ۳۰ میلی‌متر بر سال در این منطقه می‌تواند ضخامت بالای لایه‌های رس (۵۰ متر) در کنار افت متوسط آب (۸ متر) باشد. لاگ پیزومتر هاشم‌آباد (شماره ۷) مربوط به منطقه‌ای است که افت آب در آن متوسط بوده (۱۰ متر) اما متحمل فرونشست شده زیرا لایه بندی به این صورت است که در ابتدا و انتهای لایه‌بندی رس خالص وجود دارد (۱۸ متر) و بین آن مخلوط رس و ماسه (۱۵ متر) به چشم می‌خورد.

رخ داده است. لاگ پیزومتر جاده ابریشم (شماره ۴) با وجود افت متوسط سطح آب (۷ متر)، به دلیل عدم وجود لایه ریزدانه ضخیم و خالص دچار فرونشست نشده است. لاگ پیزومتر سراج (شماره ۵) مربوط به منطقه‌ای بوده که ضخامت لایه رس و ماسه در آن زیاد است (۶۰ متر) و افت تراز آب مقدار متوسطی دارد (۱۱ متر) اما تا سال ۲۰۱۰ فرونشستی در آن محدوده مشاهده نشده است. از جمله لاگ‌های بررسی شده در دشت قنات، می‌توان لاگ پیزومتر لنگرود (شماره ۶) را نام برد که دارای

شکل ۸- نمودارهای سطح آب زیرزمینی و فرونشست در نقاط مختلف. منحنی‌های آبی سطح آب زیرزمینی را بر حسب متر و منحنی‌های سبز نرخ میانگین فرونشست سالانه را بر حسب میلی‌متر بر سال در هر نقطه نشان می‌دهند.



شکل ۹- لاگ‌های بررسی شده برای دشت جعفرآباد (پیزومترهای اول جاده علی‌آباد، شاهجرد و جنوب گازران) و دشت قنات (پیزومترهای هاشم‌آباد، لنگرود، سراج و جاده ابریشم) موقعیت این لاگ‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

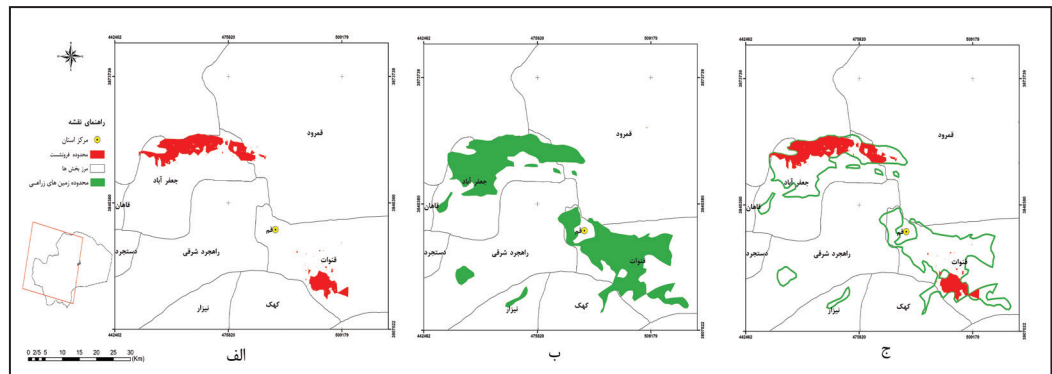
### ۳- بحث و بررسی

همان‌طور که در ابتدا گفته شد فرونشست به نشست قائم رو به پایین سطح زمین گفته می‌شود که علت بروز آن در بسیاری از موارد برداشت بیش از حد مجاز از آب‌های زیرزمینی است. مقدار میانگین فرونشستی که از نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری برای دشت‌های جعفرآباد و قنات استان قم برآورد شد، به ترتیب ۳۵ و ۲۸ میلی‌متر

بر سال است. با توجه به نقشه میانگین سرعت (شکل ۲)، بیشینه میزان فرونشست در مرکز محدوده دشت و آبخوان صورت گرفته است و به سمت حاشیه‌های دشت، این مقدار کاهش می‌یابد. در غالب موارد سری زمانی فرونشست با منحنی افت تراز سطح آب زیرزمینی همخوانی قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه این

(شکل‌های ۶ و ۸). از مخاطراتی که می‌تواند فرونشست در استان قم به دنبال داشته باشد، می‌توان به تحت تأثیر قرار گرفتن ریل راه آهن و آزادراه‌ها اشاره کرد (شکل ۶). در شکل ۶ مشاهده می‌شود که خطوط راه آهن و آزادراه‌ها از مناطقی که فرونشست رخ داده است، عبور کرده‌اند و افزایش روند فرونشست می‌تواند خسارات جبران ناپذیری به بار آورد. از جمله مناطق متحمل فرونشست، شهرک صنعتی شکوهیه در قسمت خاوری جعفرآباد است که از نظر اقتصادی اهمیت فراوانی دارد و تخریب زمین در این مناطق می‌تواند موجب صدمات زیادی شود.

با به دست آوردن مساحت زمین‌های زراعی و محاسبه مساحت قسمت‌های فرونشست می‌توان مقدار درصدی از نشست زمین‌های زراعی را گزارش داد. نتایج و محاسبات برای هر دو دشت در شکل ۱۰ آورده شده است. در شکل ۱۰-الف محدوده فرونشست هر سه دشت با پلیگون‌های قرمز و در شکل ۱۰-ب محدوده زمین‌های زراعی با پلیگون‌های سبز رنگ نمایش داده شده‌اند. در شکل ۱۰-ج همپوشانی مناطق فرونشست و زمین‌های زراعی مشاهده می‌شود که با استفاده از قابلیت‌های تحلیل‌های مکانی در محیط نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات مکانی محاسبه شده است. در مورد دشت جعفرآباد میزان این همپوشانی ۴۰٪ و برای قنوت حدوداً ۱۱٪ است.



شکل ۱۰- بررسی فرونشست دشت‌های قم. نواحی قرمز نشان‌دهنده مناطق فرونشست و نواحی سبز نشان‌دهنده زمین‌های زراعی هستند. نقشه سمت راست همپوشانی این دو را نشان می‌دهد. مربع قرمز در نقشه سمت چپ پوشش تصاویر ماهواره‌ای است.

است) نرخ فرونشست افزایش یافته است که این امر می‌تواند خسارات جبران ناپذیری هم برای خود آبخوان‌ها و هم برای سازه‌های مهندسی منطقه در پی داشته باشد. نتایج همچنین حاکی از این بوده که حداکثر فرونشست در مناطقی از آبخوان‌ها رخ داده است که علاوه بر افت شدید تراز آب زیرزمینی، لایه‌های ریزدانه ضخیم نیز وجود دارند. به منظور کنترل و جلوگیری از خسارت‌های وارده از پدیده فرونشست، پیشنهاد شد که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی محدود و سعی شود که با جلوگیری از کشت محصولات نیازمند به آب فراوان، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز، آموزش کشاورزان، افزایش راندمان آبیاری و تغذیه مصنوعی آبخوان، به سمت مدیریت بهینه منابع آبی منطقه گام برداشت.

بوده که بیشترین میزان فرونشست در مناطقی رخ داده است که علاوه بر افت شدید تراز آب، لایه‌های ضخیم رس و سیلت با قابلیت فشرده‌گی دائم بالا نیز وجود دارند. همچنین در برخی مناطق با وجود افت شدید تراز آب، هیچ نشست قابل ملاحظه‌ای رخ نداده است که بررسی اطلاعات دانه‌بندی لایه‌های زیرین نشان می‌دهد در این مناطق لایه‌های ریزدانه ضخیم (رس و سیلت) وجود ندارد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که احتمال وقوع فرونشست در مکان‌هایی با لایه‌های ریزدانه بالاست.

در این پژوهش بیشینه نرخ فرونشست در دشت‌ها میزان ۳۵ میلی‌متر بر سال در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۹ در راستای خط دید ماهواره تعیین شده است. با در نظر گرفتن شواهد هیدروژئولوژیکی و میدان سرعت تغییر شکل حاصل از تداخل سنجی راداری، می‌توان همبستگی قابل ملاحظه‌ای بین مناطق دارای فرونشست و مناطق دارای بیشترین میزان افت سطح آب و دارای لایه‌های ریزدانه ضخیم مشاهده کرد (شکل ۶). بنابراین بین میزان افت تراز آب و میزان فرونشست تطابق مکانی کاملی وجود ندارد. زیرا همان‌طور که نشان داده شد، علاوه بر میزان افت آب، لایه‌های ضخیم رسوبات دانه‌ریز نیز نقش اساسی در ایجاد فرونشست دارند. بررسی ضخامت لایه‌های ریزدانه در محل پی‌زومترهای مختلف نشان می‌دهد که در مناطقی که ضخامت این لایه‌ها زیاد بوده و افت تراز آب شدید رخ داده، میزان فرونشست نیز زیاد است

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با تلفیق داده‌های تراز سطح زمین که حاصل تکنیک تداخل سنجی راداری هستند با داده‌های هیدروژئولوژیکی (تراز آب، لاگ‌های حفاری، میزان برداشت آب) فرونشست دشت‌های جعفرآباد و قنوت در استان قم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از این است که دشت جعفرآباد و قنوت متحمل بیشینه نشست معادل حدود ۳۵ میلی‌متر بر سال و ۲۸ میلی‌متر بر سال، در راستای خط دید ماهواره شده‌اند. مقایسه بین محدوده و الگوی فرونشست رخ داده با موقعیت چاه‌های بهره‌برداری آب‌های زیرزمینی در این دشت‌ها نشان می‌دهد که فرونشست اغلب در مناطق دارای تراکم چاه‌های بیشتر رخ داده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد طی سال‌های اخیر (از سال ۱۳۸۷ به بعد که همزمان با خشکسالی شدید در کشور بوده

#### کتابنگاری

- بابایی، س.، موسوی، ز. و روستایی، م.، ۱۳۹۵- آتالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط‌بنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۵ (۴)، ص. ۹۵ تا ۱۱۱ (<http://jgst.issge.ir/article-1-417-fa.html>).
- خلیفی، پ.، نوین پور، ع.، ندیری، ع. و قره‌خانی، م.، ۱۳۹۶- بررسی فرونشست دشت اردبیل با استفاده از GIS، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، انجمن هیدرولوژی ایران ([https://www.civilica.com/Paper-WRRC02-WRRC02\\_219.html](https://www.civilica.com/Paper-WRRC02-WRRC02_219.html)).
- دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۴- گزارش آب منطقه‌ای استان قم (<http://qmrw.ir>).
- رحیمی، ح.، ۱۳۸۴- مکانیک خاک، انتشارات دانش و فن، ۳۸۳ ص.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای قم، ۱۳۹۱- پیش‌بینی میزان فرونشست ناشی از بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدلسازی ترکیبی و تکنیک تداخل سنجی در تصاویر ماهواره‌ای راداری (مطالعه موردی: دشت علی‌آباد قم).
- شیخ‌احمدی، پ.، معتق، م. و اکبری، ب.، ۱۳۹۵- بررسی پدیده فرونشست زمین در دشت همدان با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری تصاویر ماهواره‌ای، هشتمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران ([https://www.civilica.com/Paper-INDM08-INDM08\\_056.html](https://www.civilica.com/Paper-INDM08-INDM08_056.html)).

معتق، م.، داودی جم، م.، مومنی، م. و هاشمی، م.، ۱۳۹۱- کشف و نمایش فرودنشست دشت مهاباد اصفهان به کمک تداخل‌سنجی راداری، نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دوره سوم، شماره ۲ (http://www.magiran.com/view.asp?Type=pdf&ID=1116132&l=fa).

## References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., 2002- A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(11): p. 2375- 2383 (https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792).
- Bürgmann, R. Rosen, P. A. and Fielding, E. J., 2000- Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. 28:169- 209.
- Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R. and Garfias, J., 2011- Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advanced in Water Resources* 34: 83- 97 (http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017).
- Daniel, R., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C. and Hosford, S., 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement, *Remote Sensing of Environment*, 88, 468- 478.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H. R., Ritz, J. F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M. and Khorrami, F., 2010- GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, *Iran Geophysical Journal International*, 183 (3), pp.1287- 1301 ( https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04811.x).
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R. and Tavakoli, F., 2011- NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters, Elsevier*, 307 (1-2), pp. 27- 34 ( https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.029).
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C. and Rocca, F., 2007- Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol 45, pp. 1142- 1153 (http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4156314/).
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A., 1989- Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 94 (B7), 9183- 9191, doi:10.1029/JB094iB07p09183 http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB094iB07p09183.
- Haghighatmehr, P., Valadanzoj, M., Sahebi, M. and Dehghani, M., 2010- TIME SERIES ANALYSIS OF HASHTGERD SUBSIDENCE USING RADAR INTERFEROMETRY AND GLOBAL POSITIONING SYSTEM, *Geomatics 2010*, Iran National Cartographic Center.
- Hesami, Kh., Jamali, F. and Tabasi, H., 2003- Major Active Fault of Iran, 1:2500000 scale map, Ministry of Science, Research and Technology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.
- Hooper, A. J., 2007- Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. 2006 (doi:10.1029/2006JB004763, 2007).
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. and Arikan, M., 2012- Recent series analysis for measuring crustal deformation, *Tectonophysics* pp. 514 (http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013 ).
- Karimzadeh, S., 2015- Characterization of land subsidence in Tabriz basin (NW Iran) using InSAR and watershed analyses. *Acta Geodaetica et Geophysica*, p. 1- 15 (DOI:10.1007/s40328-015-0118-4).
- Osmanoglu, B. and Dixon, T. H., Wdowinski, Sh., Cabral-Cano, E. and Yan, J., 2010- Mexico city subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *Int J Appl Earth Obs.* 13. 1- 12. (http://scholarcommons.usf.edu/geo\_facpub/428).
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., and Fielding, E. J., 2000- Synthetic Aperture Radar Interferometry To Measure Earth S Surface Topography and Its Deformation” *Annu. Rev. Earth Planet.* 28:169- 209 (https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169).
- Rott, H. and Nagler, T., 2006- The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4): 710- 719 ( https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059).
- Samsonov, S. and d'Oreye, N., 2012- Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province. *Geophys.J. Int.* 191 (3):1095- 1108 (http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05669.x).
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. and Wessel, P., 2011- Gmtsar: An insar processing system based on generic mapping tools. *Scripps Institution of Oceanography* (doi:10.1029/2011EO280002).
- Sneed, M., Ikehara, M. E., Stork, S. V., Amelung, F., and Galloway, D. L., 2003- Detection and measurement of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar and global positioning system, San Bernardino County, Mojave Desert, California: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4015, 60 p. (http://pubs.usgs.gov/wri/wri034015/).
- Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chéry, J. and Masson, F., 2006- Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran). *Geophysical Journal International*, 167, 1077- 1088 (http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.2006.03147.x).
- Wen-jie, N., Zhenyu, W., Feng, Ch. and Hongran, L., 2013- Settlement Analysis of a Confined Sand Aquifer Overlain by a Clay Layer due to Single Well Pumping, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 789853, 13 pages (https://doi.org/doi:10.1155/2013/789853).



# Investigation of Qom plain subsidence using synthetic aperture radar Interferometry and aquifer hydrogeological characterization

Z. Hajeb<sup>1\*</sup>, Z. Mousavi<sup>2</sup>, Z. Masoumi<sup>2</sup> and A. Rezaei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M. Sc., Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Received: 2018 January 08

Accepted: 2018 September 03

## Abstract

The arid and semi-arid climate with a low rainfall along with the population growth has been lead to overexertion from groundwater resources over recent two decades in Iran. This over-extraction has been led to the significant groundwater depletion and water level decline in most parts of Iran as well as to the significant land subsidence in many aquifers throughout Iran. In this study, we investigated the subsidence occurred over the Jafarabad and Qanavat in Qom plain using the radar interferometry technique in conjunction with hydrogeological measurements. We used ENVISAT ASAR images from 2003 to 2010, in descending orbits to produce interferograms. Once all interferograms are corrected from topographic and flatten phase, we obtain the mean velocity map of the Qom plain region based on SBAS time series analysis method. The mean velocity map reveals 35 and 28 mm/yr of going away deformation in the line of sight direction in Jafarabad plain and Qanvat plain, respectively. Zoning map of subsidence resulted from the InSAR analysis in conjunction with the water level measurements and the thickness of fine-grained sediments (clay and silt) across the aquifers indicated that the maximum subsidence occurred in the places that not only have a higher water level decline but also have the thicker thicknesses of fine-grained sediments. This work clearly highlights the influences of mismanagement of water resources and over-extraction of groundwater in the arid areas.

**Keyword:** InSAR, Subsidence, Qom Plain.

For Persian Version see pages 251 to 258

\*Corresponding author: Z. hajeb; E-mail: hajeb.z@yahoo.com