

پایش روند تغییرات ارتفاعی سطح زمین در شهر کرمان و تعیین مناطق پرخطر با استفاده از تصاویر

راداری ASAR و SENTINEL 1

علی مهرابی^۱ - استادیار، جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
حسین غضنفرپور - دانشیار، جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۹

چکیده

تغییرات ارتفاعی رخداده در سطح زمین که غالباً به صورت فرونشست و گاهی بالآمدگی ظاهر می‌شود، به‌عنوان یک مخاطره خاموش ولی جدی در محدوده شهرها به حساب می‌آید، که می‌تواند به‌مرور زمان صدمات جدی به تأسیسات شهری وارد سازد. به دلیل تغییرات رخداده در سطح آب‌های زیرزمینی شهر کرمان، پدیده فرونشست و بالآمدگی با شدت زیادی در این محدوده وجود دارد که می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به شهر وارد نماید و هدف تحقیق پایش این تغییرات است. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تصاویر راداری میزان تغییرات ارتفاعی رخداده در محدوده شهر کرمان بررسی و نحوه تغییرات مکانی آن در طول ۱۴ سال اخیر مورد پایش قرار گیرد. در این راستا از ۶ تصویر از سنجنده ASAR و ۲ تصویر از سنجنده SENTINEL1 مربوط به چهار دوره زمانی، استفاده شد و با انجام تکنیک تداخل‌سنجی، چهار تداخل‌نگاشت از محدوده مورد مطالعه تهیه گردید. با مطالعه تداخل‌نگاشت‌ها، نرخ و دامنه فرونشست و بالآمدگی استخراج گردید. بر این اساس حداکثر نرخ فرونشست و بالآمدگی در چهار دوره زمانی مربوط به سال‌های ۱۳۸۶ - ۱۳۸۳، ۱۳۸۹ - ۱۳۸۶، ۱۳۹۱ - ۱۳۸۹ و ۱۳۹۶ - ۱۳۹۳، به ترتیب ۷/۳، ۷/۶، ۹ و ۱۰/۶ سانتیمتر در سال فرونشست و ۶، ۶/۶، ۵ و ۴/۶ سانتیمتر در سال بالآمدگی بوده است. استخراج عرصه در معرض مخاطره نشان داد از مجموع مساحت محدوده در حدود ۴۳ درصد در پهنه‌های پرخطر تا نسبتاً پرخطر قرار دارد. شواهد میدانی نشان می‌دهد که علاوه بر محدوده‌های فرونشستی، در مناطق با نرخ تورم و بالآمدگی زیاد نیز آثار و شواهد خسارات به ساختمان‌ها به‌وضوح دیده می‌شود. نقشه‌های جابجایی ایجاد شده نشان می‌دهد که سطح زمین در شهر

کرمان از سال ۱۳۸۳ تاکنون دچار یک روند فرونشست فزاینده‌ای شده است به طوری که علاوه بر افزایش نرخ فرونشست، محدوده‌های بیشتری از شهر درگیر آن شده است.

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری، ASAR، SENTINEL 1، شهر کرمان.

۱. مقدمه

یکی از مشکلات اساسی و روزافزون در اکثر جوامع بشری که بیشتر در اثر فعالیت‌های بشری رخ می‌دهد پدیده فرونشست است. فرونشست به فرورفتگی سطح زمین اشاره دارد که بر اثر عوامل گوناگون طبیعی مانند انحلال، آب شدگی یخ‌ها، فعالیت‌های انسانی نظیر معدنکاری، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و یا نفت حاصل می‌گردد. رشد روزافزون جمعیت منجر به استفاده بی‌رویه از آب در مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی شده و پیرو آن ایجاد اثرات نامطلوب کمی و کیفی در منابع آب بوده است. افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌عمق یا دریاچه‌ای تحکیم نیافته انباشته گشته‌اند، باعث ایجاد فرونشست می‌شود. در بسیاری از دشت‌های ایران بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب زیرزمینی منجر به رخداد فرونشست در آنها شده است (یاراحمدی، ۱۳۹۵؛ Jafari et al. 2016). (شریفی کیا، ۱۳۹۱؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Galloway and Burbey, 2011؛ Ghazifard et al. 2016؛ Liu et al. 2017). بدین جهت، احتمال دستیابی به شواهدی در ارتباط با وجود پدیده فرونشست در دشت‌ها بالاست. از آنجائی که اولین گام در مطالعه این پدیده، شناخت گستره فضائی آن و اندازه‌گیری هر چه دقیق‌تر میزان فرونشست است؛ بنابراین با شناخت مشخصات مکانی و رفتار زمانی این پدیده، امکان ارائه و توسعه مدل منطقه‌ای این پدیده میسر شده و از این طریق می‌توان راهکارهایی اساسی و عملی در جهت جلوگیری از روند آتی و کاهش خسارات مرتبط با آن اتخاذ کرد. امروزه، برای اندازه‌گیری فرونشست زمین روش‌های مختلف ژئودیتیک و غیرژئودیتیک وجود دارند. مشاهدات زمینی از طریق برداشت‌های GPS، توتال استیشن و لیزر اسکنر از جمله روش‌های ژئودیتیک محسوب می‌شوند. مشاهداتی که از طریق این روش‌ها صورت می‌گیرند از جمله ایستگاه‌های GPS اندازه‌گیری‌های دقیق و پیوسته‌ای را در نقاط محدودی از منطقه فرونشست ارائه می‌دهند بنابراین هیچ‌کدام از این روش‌ها، توانائی تعیین وسعت و الگوی فضائی پدیده فرونشست را ندارند (Lanari et al. 2004؛ Boni et al. 2015, Sharifikia, 2012). از طرف دیگر، تکرار انجام هرکدام از این روش‌ها به‌ویژه هنگامی که برای منطقه وسیعی مورد نظر باشد بسیار پرهزینه و زمان‌بر خواهد بود. وجود چنین محدودیت‌هایی همواره از چالش‌های اساسی محققان در ارتباط با اندازه‌گیری‌های دقیق و پایش فضائی تغییرات سطح زمین محسوب می‌شود. با ظهور سنجنده‌های دورسنجی مختلف و ماهواره‌های راداری تصویربرداری در دهه ۱۹۹۰ و توسعه سریع آن در سال‌های بعد از آن، افقی تازه و بسیار امیدوارکننده‌ای پیش روی محققان علوم زمین قرار گرفت (یاراحمدی، ۱۳۹۵). همگام با

توسعه روش‌های مختلف پردازشی این قبیل داده‌های دورسنجی، بکارگیری روش ایتترفرومتری راداری^۱ نیز در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های غیرژئودیتیک و ابزاری کارآمد در آشکارسازی تغییرات سطح زمین و پایش جابجائی‌های ناشی از پدیده‌های مختلفی نظیر فرونشست، آتشفشان و زمین لغزش و زلزله و ... مورد توجه محققان علوم زمین قرار گرفته است (Liu et al. Raspini, Lubis et al. 2011; Motagh et al. 2007; Chang et al. 2004; Ghazifard et al. 2017; 2013; Zhao, 2016; 2014; ۱۳۹۷). برخی مزایای این روش که نسبت به نوع سنجنده متفاوت است می‌توان به پوشش مکانی وسیع و پیوسته، امکان محاسبه جابجایی‌ها با دقت سانتیمتر و پائینتر، قابلیت تصویربرداری در هر شرایط آب و هوایی و هر ساعت از طول شبانه روز، تکرار تصویربرداری از یک منطقه خاص در هر ۳۵ یا ۱۱ روز و سهولت دسترسی به داده‌های آرشیوی و آنلاین سنجنده‌های راداری و در نتیجه، نیاز کمتر به انجام مجدد عملیات میدانی و صرف هزینه بسیار پائین آن در مقایسه با روش پیشین ذکر کرد (یاراحمدی، ۱۳۹۵). در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت جهان به خصوص در مناطق شهری به‌عنوان یک پدیده مهم، پیچیدگی‌ها و مشکلات زیادی را در زمینه‌های مختلف ایجاد کرده است. در این میان با برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی خطر فرونشست زمین در محدوده‌های شهری به‌عنوان یکی از مهمترین موضوعات در حوزه‌های برنامه‌ریزی و طراحی شهری به جهت مدیریت بحران و خطرپذیری، کاهش ریسک و آسیبها و افزایش ایمنی می‌باشد. مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمان‌ها و جریان‌های ارتباطی به طور ویژه آسیب پذیرتر می‌باشند. این پدیده می‌تواند به خیابانها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب زده خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده به پی ساختمان‌ها آسیب رسانده و موجب ترک در آنها گردد. در این میان، سازه‌هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب پذیرترند. بعنوان مثال، خطوط راه آهن، سدهای خاکی، تصفیه خانه‌ها و کانال‌ها از آسیب پذیری زیادتری برخوردار هستند. شناسایی مناطق فرونشست و اندازه‌گیری میزان آن می‌تواند نقش موثری در مدیریت این پدیده و مدل سازی آن به منظور پیش بینی ایفا نماید (تورانی و همکاران، ۱۳۹۷). با وجود انجام مطالعات فراوان درباره فرونشست در محدوده دشت‌های ایران (جنت و همکاران، ۱۳۸۸؛ شریفی‌کیا، ۱۳۹۱؛ افضلی و همکاران، ۱۳۹۲؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۲؛ میرشاهی و همکاران، ۱۳۹۲؛ حشمی و المدرسی، ۱۳۹۴؛ حاجب و همکاران، ۱۳۹۷)، فرونشست پهنه‌های شهری کمتر مورد توجه قرار گرفته است بطوری که می‌توان تنها به مطالعات محدودی اشاره کرد به طور مثال کریمی و همکاران (۱۳۹۲)، خطرپذیری سکونتگاه‌های شهری واقع در منطقه ۱۸ شهر تهران ناشی از پدیده فرونشست مورد بررسی قرار داده و نرخ فرونشست را تا ۲۵ سانتیمتر در بخش‌های جنوبی محدوده مورد مطالعه خود برآورد می‌کنند. تورانی و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به پدیده فرونشست در غرب استان گلستان بویژه شهر گرگان پرداخته‌اند، ایشان محدوده فرونشستی به میزان ۴/۸ سانتیمتر در شمال شهر گرگان مشخص کردند.

لیو و همکاران^۱ (۲۰۱۷) با استفاده از تکنیک پراکنش گره‌های دائمی تصاویر رادار، تغییرات ارتفاعی سطح زمین در شهر کانچو چین را مورد بررسی قرار داده و مناطقی که دچار فرونشست و یا بالآمدگی شده‌اند را مشخص کرده است. کاستلازی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) با استفاده از روش تداخل سنجی بر روی تصاویر رادارست، نرخ فرونشست شهر مکزیکوسیتی را بطور متوسط سالانه ۱۰ سانتیمتر برآورد کردند، طبق نتایج ایشان مناطق مرکزی و شرقی شهر بیشتر دچار فرونشست شده است.

شهر کرمان نیز به مانند بسیاری از شهرهای کویری ایران به دلیل خشکسالی‌های چند سال اخیر مجبور به استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی شده است. در نتیجه با خطر فرونشست روبرو است. در این رابطه عباس نژاد و حسن زاده (۱۳۸۵) با استفاده از عکس‌های هوایی و اطلاعات نقشه‌برداری به ارزیابی خطر فرونشست و تورم زمین در سطح شهر پرداخته‌اند، نتایج مطالعات ایشان نشان می‌دهد که در محدوده‌هایی از سطح شهر فرونشست اتفاق افتاده است همچنین ایشان میزان بالآمدگی را در بخش‌هایی از شهر بالغ بر ۶ سانتیمتر اندازه‌گیری کرده‌اند. ولیکن در تحقیق حاضر سعی شده تا با استفاده از روش نوین تداخل سنجی تصاویر راداری ASAR و SENTINEL 1 مقوله فرونشست زمین در محدوده شهر کرمان مورد بررسی جامع قرار گرفته، و ضمن تعیین میزان فرونشست، روند تغییرات آن در شهر کرمان طی چهار دوره و در مجموع در طول ۱۵ سال اخیر پایش شده و در نهایت محدوده‌های پرخطر در سطح شهر شناسایی شوند.

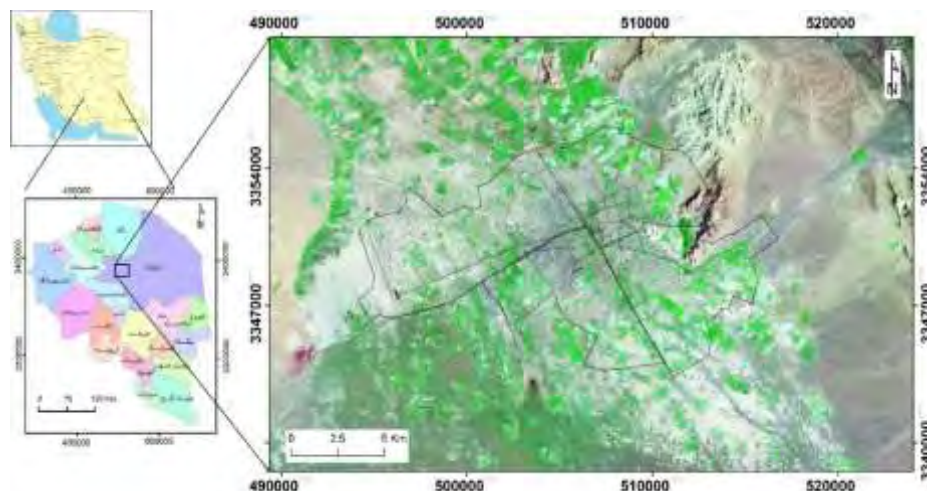
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان کرمان با وسعتی در حدود ۴۴۰۰۰ کیلومتر مربع در بخش شمال شرقی استان کرمان قرار گرفته است. این شهرستان از شمال به خراسان جنوبی، از شرق به بیابان لوت، از غرب به شهرستان رفسنجان و از جنوب به شهرستان بم و بردسیر منتهی می‌گردد. شهر کرمان در بخش غربی شهرستان و مابین طول جغرافیایی ۵۷ درجه تا ۵۷ درجه و ۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط شهر کرمان از سطح دریا ۱۷۶۰ متر بوده و دارای آب و هوای خشک و نسبتاً گرم است (عباس نژاد، ۱۳۸۳).

1 Lio et al.

2 Castellazi et al.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش از دو سری داده راداری استفاده شد. تعداد ۶ تصویر از سنجنده ASAR، ماهواره Envisat سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC^۱ (تک منظر) از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV، که مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۴/۰۳/۰۹ تا ۲۰۱۲/۰۶/۲۷ است؛ و ۲ تصویر از سنجنده SENTINEL 1، ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV، مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۴/۰۷/۰۲ و ۲۰۱۷/۰۹/۲۱. این نوع داده‌ها داده‌های خامی هستند که تنها پردازش اولیه بر روی آنها انجام گرفته و به تصاویر تک منظر تبدیل شده‌اند، و اطلاعات آنها به هیچ عنوان مخدوش نگردیده است. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی^۲ نیز جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین یا به دست آوردن جابجایی‌ها در جهات مختلف با استفاده از ایتر فرمتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه در این تحقیق هدف پایش میزان فرونشست است، تنها از داده‌های نزولی استفاده شده است. همچنین مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متری SRTM برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد. جدول شماره ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده در تحقیق

شماره	نوع تصویر	تاریخ	فریم	مسیر	خط مبنا عمودی (متر)
۱	ASAR	۲۰۰۴/۰۳/۰۹ - ۲۰۰۷/۰۴/۲۱	۲۹۹۷	۱۶۳	۱۵
۲	ASAR	۲۰۰۷/۰۲/۱۱ - ۲۰۱۰/۰۶/۲۸	۲۹۹۷	۱۶۳	۲۱
۳	ASAR	۲۰۱۰/۰۵/۰۷ - ۲۰۱۲/۸/۲۴	۲۹۹۷	۱۶۳	۱۸
۴	SENTINEL 1	۲۰۱۴/۰۷/۰۲ - ۲۰۱۷/۰۹/۲۱	۳۰۶۹	۲۰۶	۲۷

1 Single looking complex

2 Ascending and Descending

تحقیق حاضر با استفاده از روش تداخل سنجی راداری صورت گرفته است. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (Ferretti et al. 2007). در تداخل سنجی راداری، فاز تصویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویر برداری و یا زمان‌های تصویر برداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود (Ferretti et al. 2015). از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی حاصل می‌شود که تداخل‌سنج^۱ نام دارد. تشکیل تداخل‌سنج یا ایترفروگرام اساس پردازش راداری است (Hooper, 2012). بدین منظور با استفاده از نرم افزار SARscape و SNAP به پردازش تصاویر دو زمانه راداری مربوط به سنجنده Envisat و SENTINEL 1 با روش فوق اقدام گردید و حاصل این فرآیند با بهره‌گیری از محیط نرم افزاری Arc GIS 10.3 علاوه بر استخراج نرخ و دامنه فرورفتگی و بالآمدگی، پایگاه داده‌های مکانی ایجاد و پهنه‌بندی این پدیده در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت.

۲-۲- تداخل سنجی راداری

نحوه اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین به روش تداخل سنجی راداری در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است. در این شکل P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست^۲ این فضا را در زمان t_0 ثبت و مقدار فاز آن را اندازه‌گیری می‌کند ($M\Phi$). مقدار نشست فاصله P تا P_1 است؛ که طی زمان مشخصی صورت گرفته است (Dt). برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویری دومی^۳ در زمان t و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز را بر روی آن اندازه‌گیری می‌کند (Φ_S). روش تداخل سنجی تفاضلی تفاضل فاز Φ_S و $M\Phi$ را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می‌دهد ($\Delta\Phi_{int}$). صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر (SP- MP) ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده است و مقدار آن به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta\Phi_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} \quad 1$$

در اندازه‌گیری مقدار بالآمدگی به کمک این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به طوریکه سطح از P به P_1 تنزل یافته است. تعیین مقدار جابجایی در فاصله زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Delta\Phi_{int}$) به همراه فاز ناشی از اثر توپوگرافی (Φ_{top}) و فاز ناشی از جابجایی سطح (Φ_{Mov}) و همچنین فاز ناشی از اثر اتمسفر (Φ_{Atm}) خواهد بود.

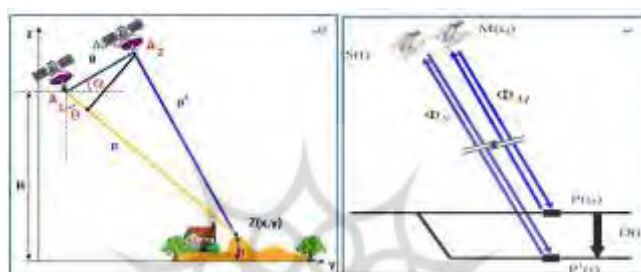
$$\Delta\phi_{int} = 4\pi \frac{PS - PM}{\lambda} = \phi_{Top} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} \quad 2$$

1 Interferogram

2 Master

3 Slave

در این روش در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم، به کمک مدل رقومی ارتفاعی زمین و تبدیل ارتفاع به فاز، یک تداخل نگار مصنوعی تولید می‌شود و از این راه به کمک معکوس اطلاعات DEM اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می‌شود. اختلاف فاز باقی مانده به اثر جابجایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. در نهایت با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابجایی‌های به میزان بالا (چند سانتیمتر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل نگار (Φ_{AD-int}) (تداخل نگار اصلی و مصنوعی) فقط بیان کننده مقادیر جابجایی سطح خواهد بود (شریفی کیا، ۱۳۹۱). فلوجارت روش تداخل سنجی راداری در شکل شماره ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- الف- هندسه روش تداخل سنجی، ب- روش تداخل سنجی تفاضلی برای اندازه گیری تغییرات سطح زمین (Burgmann et al. 2000).



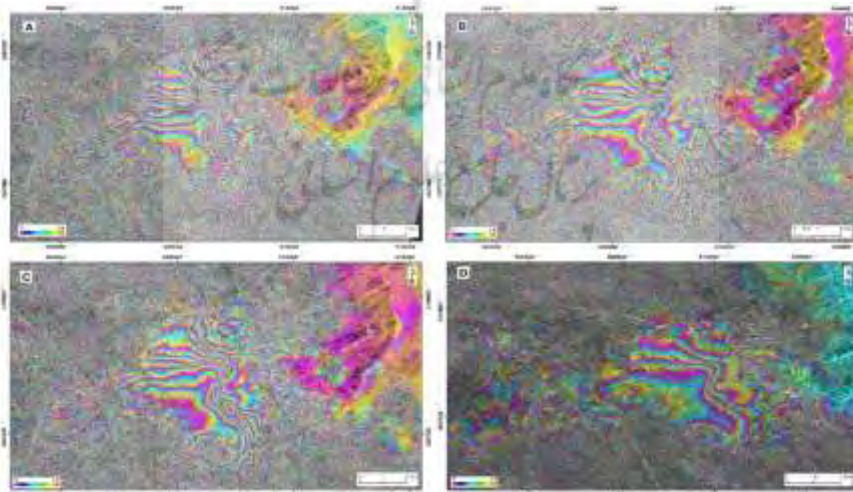
شکل ۳- فلوجارت روش تداخل سنجی راداری

با تهیه زوج تصاویر مناسب (جدول ۱)، یعنی زوج تصاویری که خط مبنای عمودی آنها بسیار کم است، اقدام به اجرای روش تداخل سنجی راداری با استفاده از نرم‌افزار SARscape 5 در محیط ENVI 5 شد. بدین ترتیب پس از

انجام فرایند بازیابی فاز، به منظور رفع خطای نوفه، با انتخاب نقاط کنترل زمینی (GCP) فاز ویرایش شد، سپس به منظور تفکیک سیگنال تغییر شکل، مؤلفه توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاع رقومی، تصحیح و پالایش و تداخل نگاشت‌های مربوطه تهیه شد (شکل ۴). به منظور شناخت محدوده‌های پرخطر در سطح شهر کرمان، اقدام به تهیه نقشه الگوی فضایی عرصه‌های پر مخاطره گردید، بدین منظور دو فاکتور نرخ و دامنه فرونشست و بالآمدگی مستخرج از تداخل نگاشت مربوط به سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ به عنوان فاکتور عامل در زایش مخاطره به تحلیل‌گر سیستم در محیط GIS وارد شد. نقشه خروجی معرف سلول‌های واجد ارزش متفاوت از فاکتور زایش مخاطره است. بر این اساس دسته‌بندی ارزش سلول‌های معرفی شده در نقشه خروجی به ۴ کلاس متفاوت برای خطر فرونشست و ۳ کلاس متفاوت برای خطر بالآمدگی، تحت عنوان پهنه‌های برخوردار از مخاطره فرونشست و بالآمدگی مشتمل بر پهنه بسیار پرخطر، پهنه پرخطر، پهنه نسبتاً پرخطر، و پهنه نسبتاً کم خطر تهیه گردید.

۳- نتایج و بحث

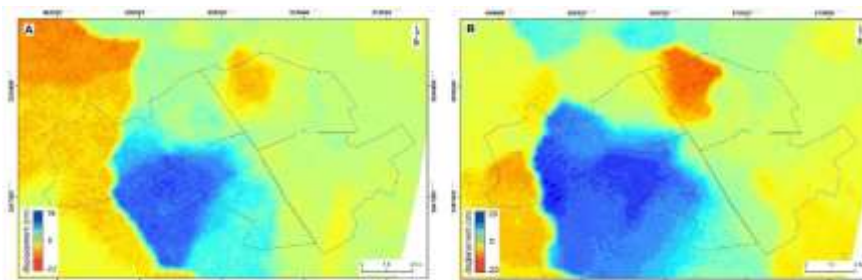
همان‌طور که در شکل شماره ۴ مشاهده می‌شود در تصاویر تداخل نگاشت بدست آمده، فرینچ‌هایی تشکیل شده است. با توجه به نحوه قرار گیری سیکل‌های رنگی مکانیزم جابجایی نیز متفاوت است، بطوری که اگر سیکل رنگی زرد-آبی قرمز باشد، جابجایی دور از رادار و اگر سیکل رنگی زرد-قرمز-آبی باشد جابجایی به سمت رادار اتفاق افتاده است. آنچه‌ان که در شکل شماره ۴ به خوبی مشخص است موقعیت فرینچ‌های ایجاد شده دقیقاً از مرز شهر تبعیت کرده که نشانگر تغییرات ارتفاعی متفاوت در سطح شهر است، همچنین روند و شکل سیکل‌های ایجاد شده در تمامی دوره‌ها نسبتاً مشابه است.



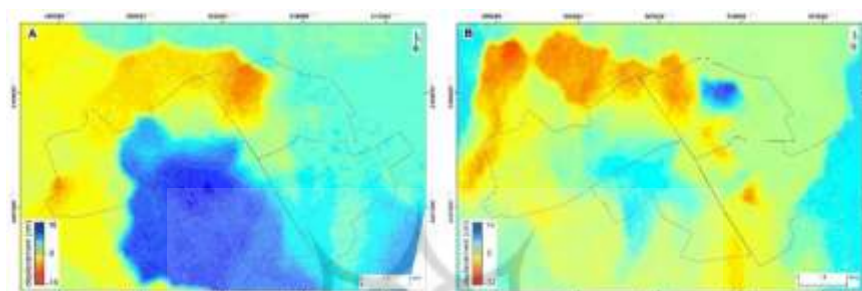
شکل ۴- تداخل نگاشت‌های تشکیل شده A: مربوط به سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۳ و B: مربوط به سال‌های ۱۳۸۹-

۱۳۸۶ C: مربوط به سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۸۹ و D: مربوط به سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۳

به منظور تهیه نقشه جابجایی سطحی منطقه باید با اعمال فیلتر Goldstein بر روی تداخل نگاشت‌ها، خطاهای احتمالی از جمله خطای اسپیکل، را رفع نمود. از آنجا که اطلاعات فاز یک تداخل نگاشت در مقیاس 2π است یک مشکل مبهم در محاسبه تعداد صحیح سیکل‌های فاز وجود دارد که این حل ابهام به‌عنوان حل ابهام فاز (Phase Unwrapping) شناخته می‌شود. به فرآیند بازیابی مقادیر فاز نامبهم و صحیح از یک مجموعه دوبعدی مقادیر فاز که در بازه $(\pi, \pi-)$ است، بازیابی فاز دوبعدی گفته می‌شود؛ و در نهایت با انجام و اعمال فیلتر و حل ابهام فاز، نقشه‌های جابجایی رخ داده در طول دوره‌های مختلف و الگوی توزیع فضایی آن تهیه شد (اشکال ۵ و ۶). از آنجایی که جابجایی‌های رخ داده در راستای دید ماهواره اتفاق افتاده، می‌توان مقادیر مثبت را به معنی نزدیک شدن سطح زمین به ماهواره و بالآمدگی و مقادیر منفی به معنی فاصله گرفتن از ماهواره و فرونشست تلقی نمود، در این صورت محدوده‌های قرمز رنگ مناطق فرونشست و محدوده‌های آبی رنگ مناطق بالآمدگی سطح زمین را نشان می‌دهد. همان‌طور که در اشکال شماره ۵ و ۶ مشاهده می‌شود میزان فرونشست و بالآمدگی سطح زمین بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ بین ۲۲- تا ۱۸ سانتیمتر فرونشست و بالآمدگی اتفاق افتاده است. محدوده‌های فرونشستی بیشتر در اطراف محدوده شهر کرمان متمرکز هستند در حالی که بالآمدگی سطحی بیشتر در مناطق مرکزی شهر اتفاق افتاده است. میزان جابجایی بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ کمی بیشتر شده است و در حدود ۲۳- تا ۲۰ سانتیمتر رسیده است. بر اساس شکل شماره ۶ میزان جابجایی طی دو سال مابین سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ بین ۱۸- تا ۱۰ سانتیمتر بوده است، همچنین در طول سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ این تغییرات بین ۳۲- تا ۱۴ سانتیمتر رسیده است. آنچه که در دوره‌های مختلف مشاهده می‌شود، روند افزایشی میزان فرونشست و روند کاهشی میزان بالآمدگی در طول این سال‌ها است، به‌طوری که نرخ فرونشست طی دوره ۸۳-۸۶ از ۷/۳ به ۷/۶ سانتیمتر در سال طی دوره ۸۶-۸۹ رسیده است و در همین مدت میزان بالآمدگی نیز از ۶ به ۶/۶ سانتیمتر در سال افزایش یافته است. همچنین طی سال‌های ۸۹-۹۱ و ۹۳-۹۶ نرخ فرونشست و بالآمدگی به ترتیب از ۹ به ۱۰/۶ سانتیمتر در سال افزایش و از ۵ به ۴/۶ سانتیمتر در سال کاهش یافته است. همچنین همان‌طور که در اشکال شماره ۵ و ۶ مشخص است، الگوی فضایی جابجایی‌ها نیز طی دوره مطالعه تغییر کرده است، به‌طوری که محدوده‌های فرونشست افزایش وسعت نشان داده و تقریباً از اطراف شهر کرمان به درون محدوده‌های شهری منتقل شده است در حالی که وسعت مناطقی که دچار بالآمدگی شده‌اند، ابتدا یک روند افزایشی داشته ولی از سال ۱۳۸۹ به بعد روند کاهشی در پیش گرفته‌اند.



شکل ۵- نقشه‌های جابجایی A: مربوط به سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۶ و B: مربوط به سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۹



شکل ۶- نقشه‌های جابجایی A: مربوط به سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۱ و B: مربوط به سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۶

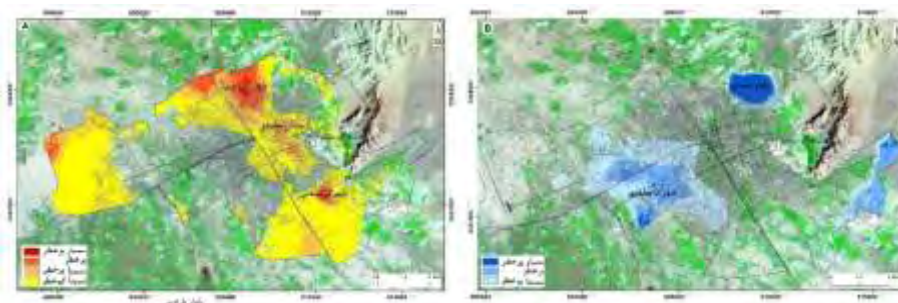
شکل شماره ۷، محدوده‌های پرخطر در سطح شهر کرمان را نمایش می‌دهد. استخراج عرصه متعلق به این پهنه‌ها نشان می‌دهد که قریب ۷۰۰ هکتار از محدوده شهر کرمان در پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر به لحاظ خطر فرونشست و قریب به ۱۷۰۰ هکتار از محدوده شهر در پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر به لحاظ خطر بالآمدگی سطح زمین، واقع شده است (جداول ۲ و ۳).

جدول ۲- مساحت و درصد عرصه‌های شهری واقع در پهنه خطر فرونشست

درصد	مساحت (هکتار)	عرصه خطر
۰/۳۸	۶۲	بسیار پرخطر
۳/۸۱	۶۱۳	پرخطر
۸/۷۵	۱۴۰۶	نسبتاً پرخطر
۳۶/۵۷	۵۸۱۰	نسبتاً کم خطر

جدول ۳- مساحت و درصد عرصه‌های شهری واقع در پهنه خطر بالآمدگی

درصد	مساحت (هکتار)	عرصه خطر
۳/۲۴	۵۲۱	بسیار پرخطر
۷/۵۳	۱۲۱۱	پرخطر
۱۲/۹۲	۲۰۷۸	نسبتاً پرخطر



شکل ۷- پهنه‌بندی مخاطره فرونشست (A) و بالاآمدگی (B) سطح زمین در مناطق چهارگانه شهر کرمان

با روی هم اندازی لایه پهنه‌های پرمخاطره بر روی نقشه مناطق چهارگانه شهر کرمان، محدوده‌های شهری پرمخاطره دقیقاً قابل شناسایی می‌شود، بطوری که طبق شکل شماره ۷، سه محدوده از شهر کرمان شامل محدوده بلوار پارادیس، منطقه حول میدان مشتاق در بخش مرکزی و بافت تاریخی شهر و شهرک صنعتی در بخش شرقی شهر، جزء مناطق پرمخاطره به لحاظ فرونشست قلمداد می‌شوند، همچنین به لحاظ مخاطره بالاآمدگی سطح زمین نیز ۲ محدوده جزء مناطق پرمخاطره محسوب می‌شوند، این مناطق شامل محدوده بلوار سیدی در بخش شمالی شهر و شهرک مطهری در بخش جنوبی شهر می‌شود. مطالعات میدانی انجام گرفته در تمامی محله‌های ذکر شده، نشانگر تأثیر زیاد این مخاطرات بر مناطق مسکونی می‌باشد، به طوری که شواهد زیادی مانند ایجاد ترک در دیوارهای بعضی از منازل، نشست سنگفرش‌ها و تخریب تأسیسات شهری قابل مشاهده است (اشکال ۸ و ۹).



شکل ۸- نمونه‌هایی از تأثیرات فرونشست بر سازه‌های شهری



شکل ۹- نمونه‌هایی از تأثیر بالا آمدگی زمین بر ساختمان‌های شهری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات سطح زمین در محدوده شهر و اطراف آن دو روند کاملاً معکوس بوده است. بدین ترتیب که مناطق پیرامونی شهر در حال فرونشست بوده ولی در محدوده‌های شهری سطح زمین دچار بالا آمدگی شده است و این روند با کمی تغییرات هم‌اکنون نیز ادامه دارد با این تفاوت که در چند سال اخیر بخشی از مناطق شهری نیز دچار فرونشست شده‌اند و روند بالا آمدگی سطح زمین نیز بسیار کاهش یافته و تنها به بخش‌های کمی محدود شده است. دلیل تغییرات رخ داده در ارتفاع سطح زمین در طول این چند سال را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که افزایش آب شرب مصرفی که ناشی از افزایش جمعیت و توسعه شهر کرمان می‌باشد، همراه با انسداد مجاری زیرزمینی مانند قنوات، تغییر کاربری اراضی کشاورزی، حذف چاه‌های بهره برداری و استفاده از چاه‌های جذبی، در شرایط فقدان شبکه فاضلاب شهری موجب بالا آمدن سطح ایستابی در محدوده شهر شده است، به‌طوری‌که این استدلال با نتایج مطالعات آقالایی و همکاران (۱۳۹۶)، نیز همخوانی دارد. علاوه بر آن به دلیل نوع خاک شهر کرمان که بیشتر از نوع خاک‌های رسی می‌باشد (امینی زاده و همکاران، ۱۳۹۵)، در نتیجه جذب آب توسط خاک‌های غنی از رس باعث تورم و بالا آمدگی سطح زمین شده است. این مسئله در نوع خرابی ساختمان‌ها نیز مشهود است همانطور که در شکل شماره ۹ مشاهده می‌شود، پی بسیاری از منازل واقع در محدوده‌های بالا آمده دچار خیس خوردگی ناشی از بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی شده است. البته با احداث سیستم فاضلاب در چند سال اخیر روند بالا آمدگی سطح زمین نیز کاهش یافته و این موضوع در نتایج کاملاً مشهود است؛ و اما حفر چاه و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در بخش‌های پیرامونی شهر کرمان جهت گسترش باغات پسته، باعث فرونشست در اطراف شهر کرمان شده است؛ و دلیل گسترش این مناطق فرونشستی به محدوده شهر کرمان می‌تواند علاوه بر حفر چاه عمیق در سطح شهر، پایین رفتن سطح آب‌های فاضلابی به دلیل شروع به راه‌اندازی سیستم فاضلاب شهری در سطح شهر و در نتیجه از دست دادن آب توسط خاک‌های رسی و متراکم شدن و در نتیجه نشست زمین، باشد. همچنین مقایسه سطح برخورد به آب زیرزمینی (۱۳۶۵-۱۳۹۵) در دشت کرمان و محدوده شهر کرمان توسط آقالایی و همکاران (۱۳۹۶) نشانگر معکوس بودن این دو روند است، به گونه‌ای که در برابر افت سالانه سطح آب در دشت، با افزایش سالانه سطح آب در محدوده شهر مواجه بوده‌ایم، که نتیجه آن در تغییرات ارتفاعی سطحی رخ داده کاملاً

مشهود است. مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق با مطالعات عباس زاده و حسن زاده (۱۳۸۵)، نشان می دهد که مناطق فرونشستی روند تغییرات مشابهی را طی نموده است، علاوه بر آن ایشان، میزان بالآآمدگی زیاد سطح زمین اندازه گیری شده توسط دستگاه های نقشه برداری را ناشی از خطای احتمالی این تجهیزات دانسته است در حالی که نتایج این تحقیق، آن را واقعی دانسته و تأیید می کند. مقایسه نتایج مطالعات مشابه (Liu et al. 2017, Castellazzia et al. 2016) با نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر یکسان بودن دلایل، زمینه ها و عوامل رخداد و وقوع اینگونه تغییرات در سطح زمین، که همانا تغییرات سطح آب های زیرزمینی بوده، است.

۴- جمع بندی

امروزه تصاویر راداری در بسیاری از مطالعات جغرافیایی کاربرد دارد. یکی از موارد کاربرد آن در تعیین جابجایی های ارتفاعی سطح زمین است، امری که در این تحقیق از آن استفاده شده است. نتایج بدست آمده از روش تداخل سنجی راداری نشان می دهد که مناطق مختلف شهر کرمان در طول ۱۵ سال اخیر به لحاظ فرونشست و بالآآمدگی رفتارهای متفاوتی داشته به طوری که در طول سال های ۱۳۸۳-۱۳۸۶ با توجه به تمرکز اراضی کشاورزی و به تبع آن افت نسبی سطح آب های زیرزمینی در اطراف و خارج از محدوده شهر، مناطق فرونشستی بیشتر در اطراف شهر کرمان متمرکز بوده و نرخ فرونشست نسبتاً پایین بوده است. همچنین در این دوره به دلیل بالآآمدگی سطح آب های زیرزمینی در محدوده شهر، بخش وسیعی از مناطق مرکزی شهر دچار پدیده بالآآمدگی سطح زمین شده است. بین سال های ۱۳۸۶-۱۳۸۹ موقعیت مناطق فرونشست در اطراف شهر کمی تغییر کرده و محدوده هایی از شهر نیز درگیر پدیده فرونشست شده است. در طول سال های بعد مناطق بیشتری از سطح شهر دچار فرونشست شده و تاکنون نیز ادامه دارد. پایش بالآآمدگی سطح زمین طی این ۱۵ سال کمی متفاوت بوده است به طوری که طی سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ روند گسترش مناطق بالآآمده کاهش یافته که این می تواند ناشی از پایین رفتن سطح آب به دلیل راه اندازی و احداث سیستم فاضلاب شهری و در نتیجه پایین آمدن رطوبت خاک های رسی و نشست زمین باشد. با توجه به وجود شواهد تخریبی در سازه های موجود در محدوده های بالآآمده شهر می توان چنین برداشت کرد که بالآآمدگی سطح زمین نیز به مانند فرونشست می تواند مخاطره آمیز باشد. با توجه به پهنه بندی خطر فرونشست شهر کرمان، سه منطقه شامل محدوده بلوار پارادیس، منطقه حول میدان مشتاق در بخش مرکزی و بافت تاریخی شهر و شهرک صنعتی در بخش شرقی شهر در کلاس با خطر بسیار زیاد قرار دارند که باید ساخت و سازها در این مناطق با تمهیدات و حساسیت بیشتری انجام گیرد.

کتابنامه

- امینی زاده بزنجانی، محمدرضا؛ آقاملایی، ایمان؛ لشکری پور، غلامرضا؛ غفوری، محمد؛ بهرامی، محمد؛ ۱۳۹۵. بررسی تأثیر محیط رسوبی بر خواص مهندس خاک‌های شهر کرمان با توجه به رفتار مقاومتی آن‌ها. *نشریه زمین شناسی مهندسی*. جلد دهم. شماره ۱. صص. ۳۲۴۵-۳۲۷۰.
- آقاملایی، ایمان؛ لشکری پور، غلامرضا؛ غفوری، محمد؛ حافظی مقدس، ناصر؛ ۱۳۹۶. بررسی اثرات بالا آمدگی و پیش بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی ناشی از توسعه شبکه جمع آوری فاضلاب در شهر کرمان. *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*. سال هشتم. شماره سی‌ام. صص. ۱۴۰-۱۵۷.
- تورانی، مرجان؛ آقاتابای، مریم؛ روستایی، مه‌آسا؛ ۱۳۹۷. مطالعه فرورانشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*. سال هشتم. شماره بیست و هفتم. صص. ۱۱۷-۱۲۸.
- جنت، کبری؛ قاضی فرد، اکبر؛ ۱۳۸۸. بررسی ویژگی‌ها و علل فرورانشست در دشت گلپایگان با استفاده از تداخل سنجی رادار و GIS. *نخستین کنفرانس آب‌های زیرزمینی*. صص. ۹-۱.
- حاجب، زهرا؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ رضایی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۷. بررسی فرورانشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری. *مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*. صص. ۳۵۲-۳۵۵.
- حشمتی، شیمیا؛ المدرسی، سید علی؛ ۱۳۹۴. مدل‌سازی فرورانشست دشت نیشابور با استفاده از سری‌های زمانی و تکنیک DINSAR. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی* (۱)۵۷. صص. ۶۷-۸۴.
- شریفی کیا، محمد؛ مال امیری، نعمت؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۲. سنجش میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر مخاطره فرورانشست زمین مطالعه موردی (بخشی از جنوب شهر تهران). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. شماره پنجم. صص. ۹۱-۱۰۶.
- شریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرورانشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در دشت نوق-بهرمان. *مجله مدرس علوم انسانی - برنامه‌ریزی و آمایش فضا* (۳)۱۶. صص. ۳۴-۴۲.
- صالحی، رضا؛ غفوری، محمد؛ لشکری پور، غلام رضا؛ دهقانی، محمد؛ ۱۳۹۲. بررسی فرورانشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*. سال سوم. شماره ۱۱. صص. ۴۷-۵۷.
- عباس نژاد، احمد؛ ۱۳۸۳. حفره فروکش کارستی در اختیارآباد شمال باختری کرمان. *نشریه علوم زمین*. سال یازدهم. شماره ۵۱. صص. ۲۸-۳۵.
- عباس نژاد، احمد؛ حسن زاده، رضا؛ ۱۳۸۵. ارزیابی خطر نشست و تورم زمین در شهر کرمان با استفاده از GIS. *بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین*. صص. ۱-۷.
- کریمی، مرتضی؛ قنبری، علی اصغر؛ امیری، شهرام؛ ۱۳۹۲. سنجش خطرپذیری سکونتگاه‌های شهری از پدیده فرورانشست زمین مطالعه موردی: منطقه ۱۸ شهر تهران. *مجله علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)*. سال سوم. شماره اول. صص. ۳۷-۵۶.

مهرابی، علی؛ پورخسروانی، محسن؛ ۱۳۹۷. اندازه گیری میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زلزله ۱۳۸۳ داهوئیه (زرنند) استان کرمان و شناسایی گسل عامل آن با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری. *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. دوره ۷. شماره ۱. صص. ۶۱-۷۳.

میرشاهی، فاطمه‌السادات؛ ولدان‌زوج، محمدجواد؛ دهقانی، مریم؛ هاشمی امین‌آبادی، سیدمحمد؛ ۱۳۹۲. اندازه گیری فرونشست سطح زمین به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری با استفاده از تصاویر TerraSAR. بیستمین همایش ملی ژئوماتیک.

یاراحمدی، جمشید؛ ۱۳۹۵. بررسی پدیده فرونشست زمین در دشت‌های بحرانی استان آذربایجان شرقی به روش ایترفرومتري راداری. اولین همایش بین المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها. تبریز.

- Boni, R., Herrera, G., Meisina C., Notti, D., Bejar-Pizarro, M., Zucca, F., Gonzalez, P.J., Palano, M., Tomas, R., Fernandez, J., Fernandez- Merodo, J.A., Mulas, J., Aragon, R., Guardiola-Albert, C., Mora, O., 2015. Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: the Alto Guadalentín Basin (Spain) case study. *Eng Geo*, 198:40-5
- Burgmann, R., Rosen, P., Fielding E., 2000. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 28, 169- 209.
- Castellazzia, P., Domínguez, N., Martela, R., Calderheada, A., Normandc, J., Gárfiasb, L., Riverada, A., 2016. Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47: 102-111.
- Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kue, C. H. & Chen, K. S., 2004. Land surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan. *Math. Comput. Sim.*, 67: 351-359.
- Ferretti, A., Savio, G. Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2007. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation. *Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions*, 45, 1142-1153.
- Ferretti, D., Colombo, A., Fumagalli, F., Novali, F., Rucci A., 2015. InSAR data for monitoring land subsidence: time to think. *big-proc-iahs.net*.
- Ghazifard, A., Akbari, E., Shirani, K., Safaei, H., 2017. Evaluating land subsidence by field survey and D-InSAR technique in Damaneh City, Iran. *J Arid Land*, 9(5): 778-789.
- Ghazifard, A., Moslehi, A., Safaei, H., Roostaei, M., 2016. Effects of groundwater withdrawal on land subsidence in Kashan Plain, Iran. *Bull Eng Geol Environ*, 75:1157-1168.
- Hooper, M., Bekaert, D., Spaans, K., Arikan, M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, pp: 514- 517.
- Jafari, F., Javadi, S., Golmohammadi, G., Karimi, N., Mohammadi, K., 2016. Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran. *Environ Earth Sci.*, 75:833.
- Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M. & Casu, F., 2004. Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 31.
- Liu, X., Wang, Y., Yan, S., 2014. Monitoring vertical ground deformation in the North China Plain using the multitrack PSInSAR technique. *Chin J Geophys- Chin Edit*, 57:3129-3139

- Liu, X., Wang, Y., Yan, S., 2017. Ground deformation associated with exploitation of deep groundwater in Cangzhou City measured by multi-sensor synthetic aperture radar images. *Environ Earth Sci.*, 76:6.
- Lubis, AM., Sato, T., Tomiyama, N., Isezaki, N., Yamanokuchi, T., 2011. Ground subsidence in Semarang-Indonesia investigated by ALOS-PALSAR satellite SAR interferometry. *J Asian Earth Sci.*, 40:1079-1088.
- Motagh, M., Y. Djamour, T.R. Walter, H.U. Wetzal, J. Zschau and S. Arabi., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran, results from InSAR, leveling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168: 518-526.
- Raspini, F., 2013. Advanced interpretation of land subsidence by validati multi-interferometric SAR data: the case study of the Anthemountas basin (Northern Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (23): 24-45.
- Sharifikia, M., 2012. Determination of the rate and extent of earth subsidence using the radar interferometry method in Noogk-Bahreman plain. *Quarterly Journal of Humanities (Space Planning)*, 16(3): 34 -42.
- Zhao, F., 2016. Study on the Method of Multi-platform SAR Data Sets Based Ground Deformation Monitoring (Chinese) Dissertation. *China University of Mining and Technology*, (23)12: 123-134.

