

# مطالعه فرونشست در مناطق شهری و تأثیر آن بر زیرساخت‌های حمل‌ونقلی با استفاده از روش مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی

محمد رضا ارجمندراد<sup>۱</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۲</sup>، زهرا قربانی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

MRezaArjmandRad@email.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

vosoghi@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Zahra.Ghorbani@email.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: آبان‌ماه ۱۴۰۱، تاریخ تصویب: دی‌ماه ۱۴۰۱)

## چکیده

در مناطق شهری، تغییر شکل زیرساخت‌های حمل و نقلی و شبکه‌های جاده‌ای ممکن است منجر به حوادث ایمنی جدی شود. بنابراین، مدیریت و نظارت برای جلوگیری از حوادث حمل و نقل و اطمینان از کیفیت ساخت و سازها، به ویژه در مناطقی با فرونشست زمین مانند استان قم، حیاتی است. آمار پایین بارندگی سالانه، خشک‌سالی‌های پیاپی و نیز جنس خاک منطقه سبب شده تا این استان به ویژه شهر قم در زمره مناطق مستعد فرونشست زمین قرار گیرند. نبود ایستگاه دائمی ژئودینامیک در محدوده شهری قم و همچنین پرهزینه و زمان‌بر بودن انجام عملیات ترازبایی سبب شد تا فناوری تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان یکی از روش‌های برتر جهت پایش تغییر شکل زمین انتخاب شود. در این مطالعه، از روش تداخل‌سنجی راداری با درجه مصنوعی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی (PS-InSAR) به منظور پایش و بازرسی زیرساخت‌ها استفاده شده‌است، زیرا امکان دستیابی به نتایج قابل اعتماد در شناسایی و پیشگیری از ناپایداری‌های زیرساختی را در طول زمان فراهم می‌کند. برای برآورد نرخ فرونشست زمین در شهر قم از ۲۹ تصویر راداری پایین‌رو سنجده سنتینل-۱ طی بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۹ تا نوامبر ۲۰۲۰ استفاده شده‌است. جهت پردازش تصاویر راداری و تحلیل سری زمانی از نرم‌افزار GMTSAR2StaMPS (G2S) استفاده شده‌است. نتایج نشان داد که محدوده جنوب شرقی شهر قم دارای فرونشستی به میزان ۵۴/۵- میلی‌متر بر سال در راستای خط دید ماهواره است. موضوع نگران‌کننده کشیده شدن فرونشست زمین به محدوده مرکزی شهر و آسیب در زیرساخت‌های مهم شهری می‌باشد که جهت پیشگیری از این مسئله باید تدابیر کارآمدی در نظر گرفته شود. بررسی پیژومترهای منطقه و هیدروگراف قم-کهنک نشان‌دهنده افت ۱/۸ متری تراز سطح آب در بازه زمانی مهر ۱۳۹۶ تا مهر ۱۴۰۰ است که این امر موجب فرونشستی در حدود ۷/۵- سانتی‌متر بر سال در راستای قائم در جنوب شرقی قم شده‌است. همچنین، با توجه به تطابق خوب نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری و افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه می‌توان بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی دلیل اصلی فرونشست در این محدوده دانست.

**واژگان کلیدی:** فرونشست، قم، تداخل‌سنجی راداری، سنتینل-۱، آب زیرزمینی، چاه‌های پیژومتر

## ۱- مقدمه

فرونشست زمین یک خطر زمین‌شناسی است که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت آب‌های زیرزمینی، استخراج معادن زیرزمینی و ساخت و سازهای مهندسی است. فرونشست زمین می‌تواند باعث ایجاد برخی بلایای زمین‌شناسی مانند ترک‌خوردگی خانه‌ها، تاسیسات شهری و خط لوله‌های زیرزمینی شود [۱]. در مناطق شهری، تغییرشکل زیرساخت‌های حمل و نقل و شبکه‌های جاده‌ای ممکن است منجر به حوادث ایمنی جدی شود [۲]. بنابراین مدیریت و نظارت برای جلوگیری از حوادث حمل و نقل و اطمینان از کیفیت ساخت و سازها، به ویژه در مناطق با فرونشست زمین منطقه‌ای، مانند استان قم، حیاتی است.

استان قم نیز همانند بسیاری از استان‌های در حال توسعه در کشور از این امر مستثنی نبوده و فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب از منابع زیرزمینی و کاهش سطح سفره‌ها و همچنین به دلیل گرمی هوا و خشک‌سالی با سرعت بیشتری دنبال شده و اکنون زنگ خطر فرونشست در برخی از مناطق استان به صدا درآمده است. رونق شهرنشینی در استان قم و به دنبال آن افزایش سرانه مصرف آب و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، می‌تواند خسارت‌های سنگینی برای تأسیسات زیربنایی، شبکه‌های انتقال آب، برق و گاز، ساختمان‌ها، جاده‌ها، اماکن مذهبی یا تفریحی، پل‌ها، راه‌آهن، فرودگاه و مهم‌تر از همه محیط‌زیست استان در پی داشته و آن را دچار آسیب جدی کند. لذا این امر سبب شده تا راه‌اندازی یک سامانه جهت پایش فرونشست شهری در قم به‌منظور شناسایی ناحیه‌هایی که بیشتر در معرض خطر هستند و همچنین کاهش خسارت‌های جانی و مالی ناشی از آن کاملاً ضروری به نظر برسد. نبود ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک در محدوده شهری قم و نیز پرهزینه و زمان‌بر بودن عملیات ترازبایی سبب شد تا فناوری تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روش برتر جهت پایش نرخ فرونشست زمین انتخاب گردد.

توسعه روش‌های تداخل‌سنجی راداری با درجه مصنوعی (InSAR) در بیست سال گذشته باعث شده است که از آن‌ها برای مشاهده جابجایی‌های سطحی، از جمله پدیده‌هایی با منشأ انسانی و طبیعی استفاده شود. به خصوص استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی راداری پراکنشگرهای دائمی (PS)

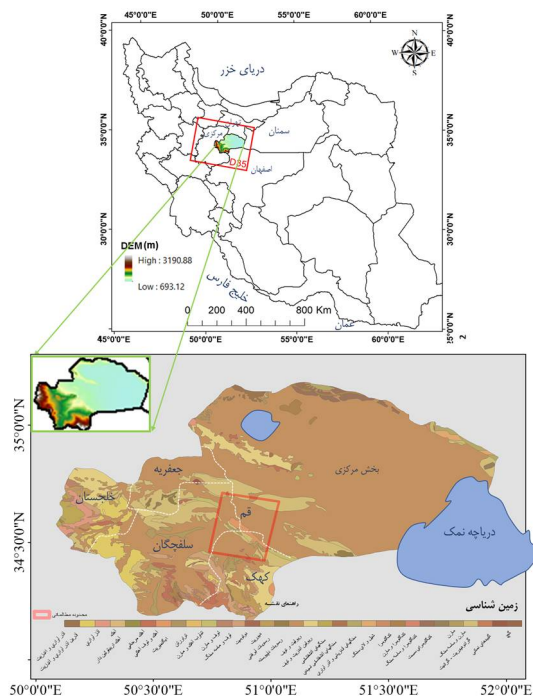
InSAR) یا زیر مجموعه خط پایه کوچک<sup>۱</sup> (SBAS) به تجزیه و تحلیل پیشرفته جابجایی‌های موجود در سری‌های زمانی کمک کرده است که امکان پایش بینی رخداد آن‌ها در آینده را فراهم می‌کند [۳]. طبق تحقیق حاجب و همکاران در سال ۱۳۹۷، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ENVISAT و آنالیز سری زمانی SBAS، نرخ سالانه فرونشست زمین در دشت‌های جعفرآباد و قنوت استان قم برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برآورد شد. نتایج آنالیز سری زمانی تصاویر تداخل‌سنجی نشان داد که نرخ متوسط فرونشست در دشت‌های جعفرآباد و قنوت به ترتیب ۳۵ و ۲۸ میلی‌متر بر سال در راستای خط دید ماهواره<sup>۲</sup> است [۴]. همچنین در مطالعه عدالت و همکاران در سال ۱۴۰۰، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر روش SBAS و به کمک تصاویر سنجنده سنتینل-۱ تغییرشکل عمودی زمین در دشت علی‌آباد در بازه زمانی ۱۸ ماهه از فروردین ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵ مورد پایش قرار دادند و نتایج حداکثر میزان فرونشست حدود ۲۴۰ میلی‌متر را نمایان ساخت [۵].

طی مطالعات پیشین تمرکز اصلی بر روی غرب استان به‌خصوص دشت قم بوده اما در این مطالعه محدوده شهری و حومه شهر با استفاده از روش‌های PS-InSAR مورد بحث و بررسی قرار گرفت. ایده PS-InSAR مبتنی بر پراکنده‌سازهای پایدار است که به عنوان نقاط قابل شناسایی دائمی در سطح زمین شناخته می‌شوند که توانایی بازگشت انرژی بسیار بیشتری نسبت به سایر اجسام دارند. این بدان معنی است که پراکنشگرهای پایدار، بیشتر امواج الکترومغناطیسی و دامنه و موج را منعکس می‌کنند. نقاط PS اغلب اجسام ساخت بشر، مانند سقف ساختمان‌ها یا سازه‌های خطی مانند پل‌ها، جاده‌ها، بزرگراه‌ها، راه‌آهن، خطوط انتقال برق هستند. به همین دلیل، روش PS-InSAR وسیع‌ترین کاربرد را در مناطق شهری ساخته شده پیدا می‌کند. روش PS-InSAR، نیز جایگزین یا مکمل خوبی برای روش‌های کلاسیک، از جمله تسطیح ژئودتیکی کل ایستگاه‌ها یا سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) است که برای تعیین تغییرشکل در زمین استفاده می‌شود. با توجه به توانایی شناسایی روند وقوع تغییرشکل با مشاهده طولانی مدت منطقه، می‌توان از آن برای تشخیص جابجایی‌های زمین و همچنین پایش‌بینی اثرات آتی بهره‌برداری استفاده کرد. این روش به طور گسترده برای

<sup>۱</sup> Small Baseline Subset (SBAS) Technique

<sup>۲</sup> Line Of Sight

استان سمنان و دریاچه نمک، از جنوب به استان اصفهان و از غرب به استان مرکزی محدود است. شهر قم مهم‌ترین شهر و مرکز استان قم می‌باشد. در شکل-۱ موقعیت جغرافیایی و همچنین مرزبندی بخش‌های مختلف استان قم در نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است. از نظر زمین‌شناسی، در دوران سوم بخش مهمی از نواحی اطراف قم به واسطه دریای بزرگ مدیترانه مرکزی پوشیده بوده است. رسوبات و ته‌نشین‌های دریای مزبور اکنون در اطراف کوه‌های شاه جمال، نرداغی، دویرادران، خضر، کیکویه و دیگر کوه‌های شهرستان قم دیده می‌شود. طبق آمار ارائه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان قم و همان‌طور که در شکل-۱ مشاهده می‌شود، جنس خاک و سنگ در محدوده مطالعاتی (محدوده شهری قم) از لایه‌های رسوبات ناپیوسته (رسوبات و ته‌نشین‌های دریا)، آهک، مارن و ماسه‌سنگ تشکیل شده است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه استان قم و فریم انتخاب شده تصویر راداری سنتینل-۱ برای مسیر پایین‌رو (D35). در پس‌زمینه از مدل ارتفاعی رقومی<sup>۱</sup> (DEM) ۳۰ متری از وب‌سایت (<https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen>) استفاده شده است.

به‌طور کلی منابع آب زیرزمینی در قم به‌عنوان منبع اصلی جهت تأمین آب مصرفی در حوزه‌های کشاورزی و صنعتی به حساب می‌آید. چراکه وجود اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک، کاهش نزولات جوی، وقوع خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت و

نظارت بر حرکات آهسته یا نسبتاً آهسته ناشی از عوامل مرتبط با فعالیت‌های انسانی، مانند فعالیت‌های معدنی [۳،۶]، زیرساخت‌های شهری [۱۳-۷] و فرونشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی [۱۴،۱۵] استفاده شده است. علاوه بر این، PS-InSAR می‌تواند پدیده‌هایی را که در آن‌ها محیط طبیعی نیز نقش کلیدی بازی می‌کند، مانند فعالیت‌های زمین‌گرایی [۱۶]، رانش زمین [۱۷،۱۸]، فروچاله‌ها [۱۹،۲۰] و حرکات فعال یخچال‌های طبیعی [۲۱] شناسایی کند. با این وجود، برخی موانع عملی برای استفاده از PS-InSAR وجود دارد. مهم‌ترین نقص این روش فقدان PS در مناطق غیرشهری (به عنوان مثال، مناطق کشاورزی و جنگلی) است، جایی که بی‌نظمی‌ها در هندسه تصاویر راداری باعث ایجاد ناهمبستگی فاز می‌شوند و باعث مشکل در شناسایی PS می‌شوند [۲۲]. در مقابل، توانایی تشخیص کارآمد حرکات سطحی در مناطق بزرگ شهری با دقت و وضوح نسبتاً بالا، امکان توسعه روش PS-InSAR را در زمینه پایش زیرساخت‌ها با کارایی بالا فراهم کرده است.

در این مطالعه، هدف اصلی بر این است که تأثیر بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و زیرساخت‌های شهری که به شکل فرونشست در امتداد جاده قم-کاشان، به ویژه بخش بین لنگرود و خطوط مترو ظاهر می‌شود، بررسی شود. انگیزه این تحقیق این است که ساخت و سازها به ویژه در مناطق با فرونشست ناشی از بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی ممکن است تأثیر منفی بر جاده عبوری از آن داشته باشد که در آسیب جاده - برآمدگی‌ها و ترک‌های ایجاد شده روی سطح جاده آسفالت منعکس می‌شود. با چنین روش‌هایی، مدیران حمل و نقل می‌توانند به طور موثر اطلاعات قابل اعتمادی را در مورد علل مشکلات، خسارت‌ها و کمبودهای زیرساختی به دست آورند.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

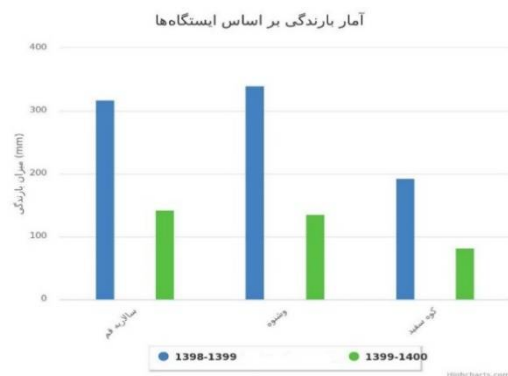
استان قم با جمعیتی بالغ بر ۱۰۶۰،۰۰۰ نفر و وسعت ۱۱۲۳۸ کیلومتر مربع در کریدور مرکزی ایران بین مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ و ۳۴ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا واقع شده است. این استان از شمال به استان تهران از شرق به

<sup>۱</sup> Digital Elevation Model (DEM)

نبود رودخانه‌های دائمی سبب شده تا عمده نیازهای آبی از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین شود. در شکل-۲، طبق آمار ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان قم بارش باران در سه ایستگاه وشنوه، کوه سفید و سالاریه قم بین سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۰ نسبت به مدت مشابه ۱۳۹۸-۱۳۹۹ کاهش داشته است. میانگین بارندگی سالیانه در سطح استان قم در یک دوره ده‌ساله ۱۳۵ میلی‌متر بوده که این میزان نیز به علت اختلاف ارتفاع در نواحی مختلف متفاوت است. هر قدر که از غرب به شرق و از جنوب به شمال استان حرکت کنیم از مقدار بارش کاسته می‌شود. به‌طور کلی منابع آب زیرزمینی در قم به‌عنوان منبع اصلی جهت تأمین آب مصرفی در حوزه‌های کشاورزی و صنعتی به‌حساب می‌آید. چراکه وجود اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک، کاهش نزولات جوی، وقوع خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت و نبود رودخانه‌های دائمی سبب شده تا عمده نیازهای آبی از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین شود. در شکل-۲، طبق آمار ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان قم بارش باران در سه ایستگاه وشنوه، کوه سفید و سالاریه قم بین سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۹ نسبت به مدت مشابه ۱۳۹۸-۱۳۹۹ کاهش داشته است. میانگین بارندگی سالیانه در سطح استان قم در یک دوره ده‌ساله ۱۳۵ میلی‌متر بوده که این میزان نیز به علت اختلاف ارتفاع در نواحی مختلف متفاوت است. هر قدر که از غرب به شرق و از جنوب به شمال استان حرکت کنیم از مقدار بارش کاسته می‌شود.

### ۳- داده‌ها و روش تحقیق

در تحقیق صورت گرفته جهت بررسی و پایش فرورنشست در محدوده شهری قم از روش PS-InSAR استفاده شده است.



شکل ۲- مقایسه نرخ بارش بین سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در استان قم (شرکت آب منطقه‌ای استان قم).

به‌منظور استفاده از این روش، تهیه تصاویر راداری در بازه زمانی مدنظر و همچنین نرم‌افزارهای پردازشی راداری برای پردازش تصاویر اخذ شده ضروری می‌باشد.

### ۳-۱- داده‌های راداری

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، ۲۹ تصویر راداری SLC مربوط به سنجنده سنتینل-۱ مربوط به مسیر پایین‌رو<sup>۱</sup> ۳۵ و در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۹ تا نوامبر ۲۰۲۰ که محدوده شهر قم را پوشش می‌دهد استفاده شد. این تصاویر با دوره زمانی عمدتاً ۲۴ روزه با باند C در قطبش عمودی-عمودی<sup>۲</sup> ۷۷ می‌باشد. همچنین برای حذف فاز مؤلفه توپوگرافی از DEM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده است. جزئیات تصاویر راداری مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل سری زمانی تغییر شکل در جدول-۱ آمده است.

جدول ۱- جزئیات تصاویر راداری مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل سری زمانی تغییر شکل.

سنجنده	سنتینل-۱
مدار	پایین‌رو ۳۵
طول موج	۵/۵۶ سانتی متر
بازگشت مداری	۲۴ روز
زاویه دید سنجنده	۴۳ درجه
تعداد تصاویر	۲۹
بازه زمانی	ژانویه ۲۰۱۹ تا نوامبر ۲۰۲۰
مد	IW-SLC

### ۳-۲- روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر روش PS-InSAR

روش PS-InSAR یا تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی برای غلبه بر عدم همبستگی مکانی و زمانی ارتقا یافته است. این روش برای اولین بار توسط فرتی و همکاران ارائه شد [۲۳]. در روش PS-InSAR، در میان سری زمانی تصاویر راداری، پیکسل‌هایی با معیار دامنه‌ی پایداری جداسازی می‌گردند که کاندیدهای PS یا نقاط کاندید پایداری پراکنشگر دائم نامیده می‌شوند [۲۳]. در واقع، PS نقاط پایداری روی زمین هستند که پاسخ طیفی آن‌ها در طول دریافت‌های مختلف تصاویر راداری به طور قابل‌توجهی تغییر نمی‌کند.

<sup>۲</sup> Vertical (V) polarisation

<sup>۱</sup> Descending

در رابطه فوق  $\Delta r_{vert}$  جابجایی در راستای قائم (فرونشست)،  $\Delta r_{LOS}$  جابجایی در راستای خط دید ماهواره و  $\theta$  زاویه دید سنجنده است. در این مطالعه مقدار متوسط زاویه دید برای تصاویر سنتینل-۱ برابر ۴۳ درجه است.

در این پژوهش جهت تحلیل سری زمانی به روش PS-InSAR مجموعه داده سنتینل-۱ از ابزار G2S<sup>۱</sup> برای پایش تغییرات سطح زمین استفاده شده است. برای پردازش تصاویر راداری تا مرحله تولید تداخل نماها از نرم افزار GMTSAR استفاده شده است. GMTSAR یک سیستم پردازش تداخل سنجی منبع باز است که توسط موسسه اقیانوس شناسی و دانشگاه سن دیگو آمریکا تهیه شده است. کد این نرم افزار به زبان C نوشته شده است و نصب GMT<sup>۲</sup> بر روی این سیستم ضروری است [۲۵]. پس از تولید تداخل نماها، در ادامه برای پردازش و تحلیل سری زمانی PS از نرم افزار StaMPS/MTIv-beta 4.1 استفاده می شود [۲۶]. این بخش از پردازش شامل سه مرحله می باشد که عبارتند از: پیش پردازش، تولید تداخل نما در نرم افزار GMTSAR و همچنین آماده سازی خروجی GMTSAR جهت ورود به نرم افزار StaMPS. شکل-۲، الگوریتم مراحل پردازشی تداخل سنجی با نرم افزار G2S را نشان می دهد. پس از انتخاب تصویر اصلی مرحله قبل، شبکه گراف ترسیم شده در شکل-۳، یک نمای کلی از روابط زمانی و مکانی بین تصویر اصلی و تصاویر فرعی و نیز ایجاد تداخل نماها را نشان می دهد. نقاط آبی رنگ نشان دهنده تصاویر و خطوط ارتباطی نشان دهنده تداخل نما تولید شده بین جفت تصویر می باشد. در این گراف محور افقی زمان اخذ تصاویر و محور عمودی خط مبنا عمودی تصاویر نسبت به تصویر اصلی را نشان می دهد. تعداد ۲۸ تداخل نما با استفاده از GMTSAR از ژانویه ۲۰۱۹ تا نوامبر ۲۰۲۰ که برای پایش تغییر شکل زمین انتخاب شده تولید می شوند. در پردازش تصاویر راداری به روش StaMPS جهت شناسایی پیکسل های PS از تحلیل دامنه و فاز استفاده می شود. در مرحله اول پیکسل های PS کاندیدا با استفاده از پارامتر شاخص پراکندگی دامنه (DA) در رابطه ۳ استفاده می شود. این شاخص به عنوان یک حد آستانه جهت شناسایی پراکنش گر ها استفاده می شود. از اینرو، پیکسل هایی که مقدار این شاخص برای آن ها کمتر

اطلاعات فاز پراکنشگر از PS برای تعیین شدت و الگوی زمانی حرکت سطح در امتداد خط دید ماهواره استفاده می شود. با استفاده از یک تصویر اصلی و تصاویر فرعی، هر اکتساب جدید اجازه می دهد تا یک مقدار جابجایی به هر PS شناسایی شده اضافه شود. برای برآورد نرخ جابجایی، تمام مقادیر ثبت شده میانگین گیری می شوند، بنابراین میانگین جابجایی در طول زمان، یعنی میانگین سرعت تغییر شکل (با سرعت حرکت سطح) هر PS به دست می آید. این نرخ تغییر شکل عموماً بر حسب میلی متر در سال بیان می شود. طبق رابطه ۱، برای برآورد میزان جابجایی سطح زمین ناشی از فرونشست زمین، بایستی مقادیر هریک از این فازها را شناسایی نمود و از فاز اندازه گیری شده کسر کرد تا به مقدار فاز ناشی از فرونشست زمین دست یافت [۲۳]:

$$Q = W\{Q_{def} + \Delta Q_{\varepsilon} + Q_{atm} + \Delta Q_{orb} + Q_{noise}\} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $w$  عملگر فاز پیچیده،  $Q_{def}$  نشان دهنده تغییر فاز ناشی از تغییر شکل زمین در راستای خط دید ماهواره،  $\Delta Q_{\varepsilon}$  باقی مانده فاز توپوگرافی به خاطر خطا در مدل ارتفاع رقومی،  $Q_{atm}$  خطای فاز اتمسفری،  $\Delta Q_{orb}$  مؤلفه فاز مداری به خاطر دقیق نبودن اطلاعات مدارها مورداستفاده و در نهایت  $Q_{noise}$  مؤلفه فاز نویزهای ناهمبسته شامل پراکندگی، خطاهای ثبت هندسی، نویز حرارتی و عدم قطعیت در تعیین موقعیت دقیق مرکز فاز پیکسل ها در جهت آزمون می باشد. در بین این پنج مؤلفه،  $Q_{def}$  انتظار می رود با حذف یا به حداقل رساندن تأثیرات سایر مؤلفه های خطا به دقت به دست آید.

از آنجاییکه نقشه نرخ جابجایی محاسبه شده در الگوریتم PS-InSAR نشان دهنده جابجایی در راستای خط دید ماهواره می باشد، باید به جابجایی در راستای افقی و قائم تبدیل شود. در مطالعات مربوط به فرونشست برای تبدیل این مقدار جابجایی به جابجایی در راستای قائم با فرض اینکه در راستای افقی جابجایی نداریم از رابطه ۲ استفاده می شود [۲۴]:

$$\Delta r_{vert} = \frac{\Delta r_{LOS}}{\cos(\theta)} \quad (2)$$

<sup>۱</sup> GMTSAR+StaMPS

<sup>۲</sup> Generic Mapping Tools

از حد آستانه باشند، به عنوان کاندید های اولیه پراکنشگر انتخاب می‌شوند.

در این تحقیق مقدار شاخص پراکندگی دامنه ( $DA$ ) از طریق انحراف معیار استاندارد ( $\delta A$ ) بر میانگین مقادیر دامنه ( $\mu A$ ) برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

$$D_A = \frac{\delta A}{\mu A} \quad (3)$$

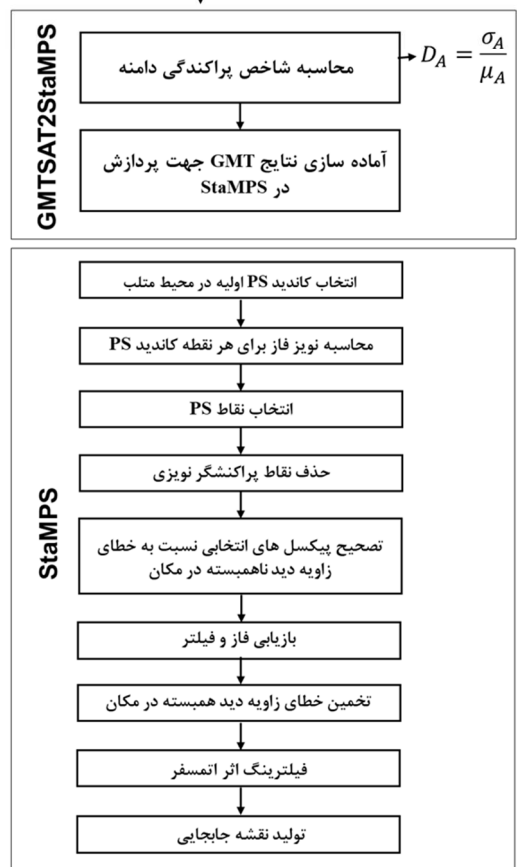
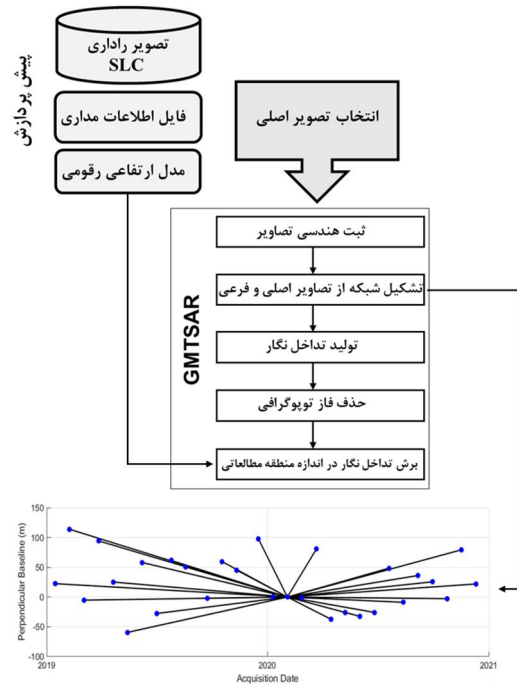
پیکسل‌های PS نهایی با استفاده از برآورد پایداری فاز از طریق تحلیل فاز انتخاب می‌شوند. هدف در تحلیل فاز، حذف مؤلفه‌های مختلف فاز از تداخل‌نماها که در مکان همبسته هستند طی یک فرآیند تکراری می‌باشد.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش از تحقیق نتایج سری‌های زمانی حاصل از روش PS-InSAR تحت عنوان نقشه فرونشست برای تصاویر پایین‌رو سنجنده سنتینل-۱ ارائه شده است. همچنین، به منظور تفسیر و ارزیابی نتایج حاصل از پردازش تصاویر راداری جهت پایش نرخ جابجایی سطح زمین در محدوده شهری قم از داده‌های هیدرولوژی و کاربری اراضی استفاده شده است.

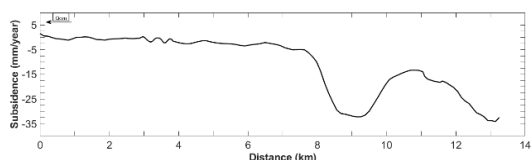
#### ۴-۱- سری زمانی تغییر شکل زیرساخت‌ها حاصل از PS-InSAR

با استفاده از ۲۸ تداخل‌نما بین جفت تصاویر مسیر پایین‌رو ۳۵ سنجنده سنتینل-۱ در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۹ تا نوامبر ۲۰۲۰ نقشه تغییر شکل در راستای دید ماهواره تولید شد (شکل-۴). در نهایت، پس از پردازش نقاط پراکنش کننده شناسایی شده و حذف عوامل مزاحم نظیر فاز توپوگرافی و خطای مداری از روی نتایج، نرخ جابجایی نسبت به نقطه مرجع در مکانی با تغییر شکل تقریباً صفر (مثلاً مشکی در شکل-۴) در حدود ۹/۵ میلی‌متر بر سال در راستای نزدیک شدن به ماهواره و ۵۴/۵- میلی‌متر بر سال در راستای دور شدن از ماهواره در محدوده مطالعاتی می‌باشد. این میزان فرونشست در راستای قائم به مقدار ۷۵/۷۵- میلی‌متر در سال تا ۱۴/۷۵+ میلی‌متر در سال تغییر می‌کند. نتایج این مطالعه حاکی از رخداد پدیده فرونشست در محدوده لنگرود و شهرک لبنیات در جنوب شرقی استان بوده که بطور عمده، این پدیده در گذر زمان به دلیل مصارف کشاورزی و استخراج بی رویه آب زیرزمینی به سمت داخل



شکل ۳- مراحل پردازشی تصاویر راداری با نرم افزار G2S.

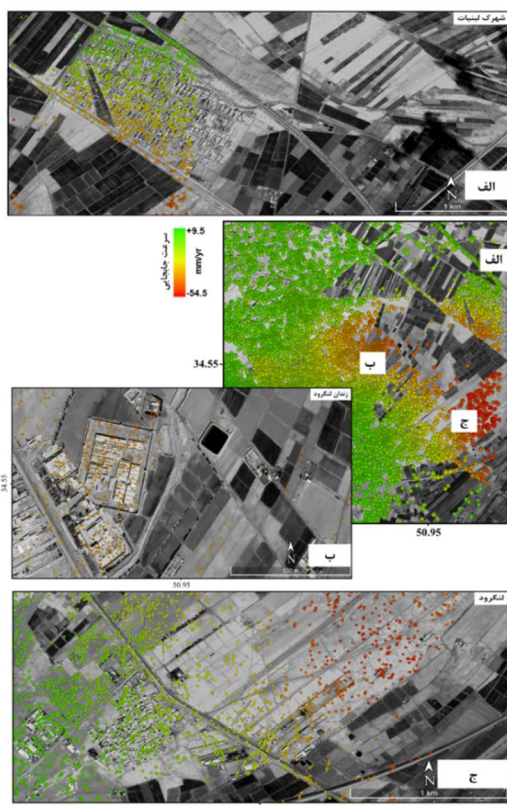




شکل ۵- رسم پروفیل نرخ جابجایی در طول مسیر جاده قم-کاشان

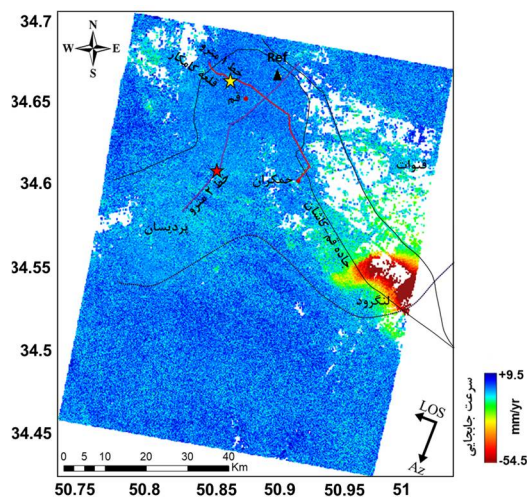
## ۴-۲- تحلیل فرونشست زمین در جنوب شرقی شهر قم

نتایج حاکی از تداخل سنجی راداری نشان دهنده فرونشستی به میزان ۷۵/۷۵- میلی متر در سال در راستای قائم بوده است. از مناطق اداری و صنعتی که در این منطقه واقع شده و خطر فرونشست زمین آن‌ها را تهدید می‌کند می‌توان به بخش‌های شهرک لبنیات (الف)، زندان لنگرود (ب) و لنگرود (ج) اشاره کرد. شکل ۶- موقعیت این سه بخش را روی نقشه نشان می‌دهد. بخش لنگرود فرونشستی به اندازه ۱۵- میلی متر در سال در محدوده لنگرود و ۵۴- میلی متر در سال در محدوده زمین‌های کشاورزی می‌باشد. می‌توان عمده دلیل فرونشست زمین در این محدوده را برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی عنوان کرد.



شکل ۶- موقعیت مناطق فرونشستی در سه بخش شهرک لبنیات، زندان لنگرود و لنگرود در جنوب شرقی قم.

شهر کشیده می‌شود و می‌تواند نگران‌کننده باشد. فضای خالی و بدون نقطه پراکنش کننده دائمی که در نقشه جابجایی مشاهده می‌شود نشان دهنده محدوده‌های کشاورزی در بخش قنوات است که پوشش گیاهی سطح آن را فراگرفته در نتیجه در این بخش نقاط پراکنش کننده پایدار کمتری به علت ناهمبستگی زمانی فاز شناسایی شده است.



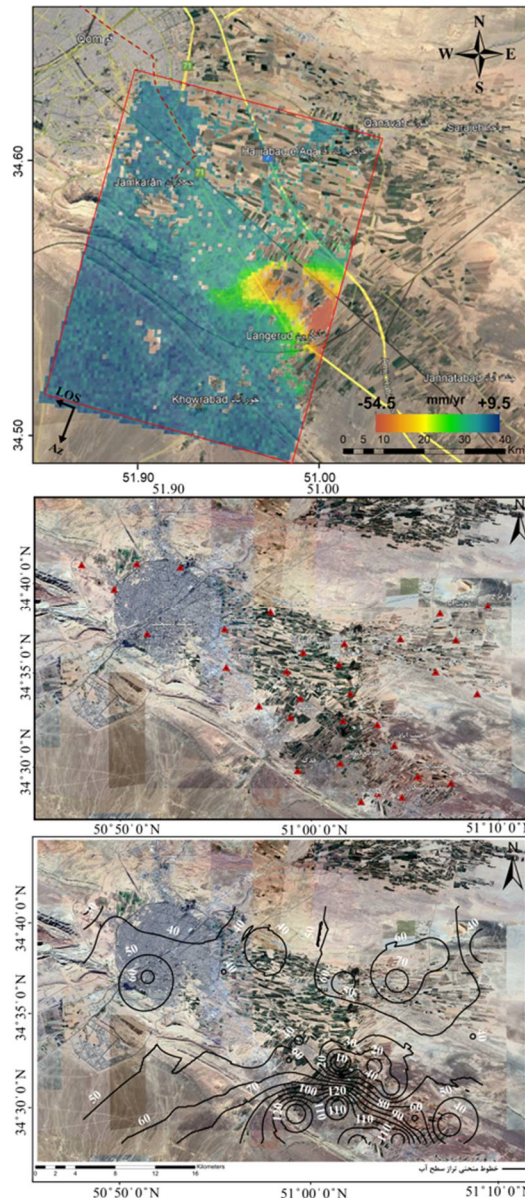
شکل ۴- نقشه سرعت جابجایی شهر قم

برای بررسی رفتار سطحی و فرونشست در خطوط مترو قم وضعیت دو مسیر اصلی؛ خط ۱ (قلعه کامکار به سمت مسجد جمکران) و خط ۲ (باجک به سمت پردیسان) با نتایج استخراج شده از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی تطبیق داده شده است. نتایج پردازش حاکی از این است که خوشبختانه در طول مدت این دو سال فرونشست معناداری در مسیر این خطوط اتفاق نیفتاده است. طبق شکل ۱-، در طول مسیر خط ۱ مترو که حفاری در آن به صورت کامل انجام شده است نشان می‌دهد که بیشترین میزان جابجایی در مسیر خط ۱ مترو در ایستگاه‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ (محدوده خیابان سوم خرداد تا قلعه کامکار، ستاره زرد) کمتر از ۵ میلی متر در سال و بیشترین میزان جابجایی در خط ۲ مربوط به ایستگاه‌های ۱۰ تا ۱۶ (محدوده فلکه مفید تا شهرک پردیسان، ستاره قرمز) کمتر از ۴ میلی متر در سال برآورد شده است.

همچنین از دیگر زیرساخت‌های شهری که تحت تأثیر فرونشست زمین قرار می‌گیرد می‌توان به جاده قدیم قم-کاشان اشاره کرد که رسم پروفیل نرخ جابجایی (شکل ۵) در طول این مسیر فرونشستی در حدود ۳۵ میلی متر در سال را نشان می‌دهد.

### ۳-۴- ارتباط با تراز آب زیرزمینی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصاویر راداری سنتینل-۱ برای بررسی فرونشست اتفاق افتاده در محدوده جنوب شرقی شهر قم (شکل-۷)، داده‌های چاه‌های پیزومتری در این محدوده دریافت گردید که موقعیت آن‌ها در شکل-۷ الف، نشان داده شده است.

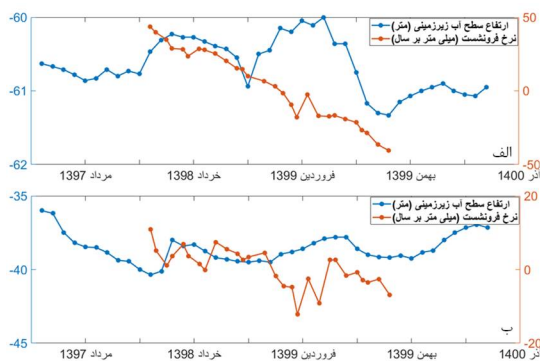


شکل ۷- مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصاویر راداری سنتینل-۱ در محدوده جنوب شرقی شهر قم الف) موقعیت چاه‌های پیزومتری در محدوده جنوب شرقی قم و ب) نقشه خطوط منحنی تراز افت سطح آب‌های زیرزمینی شهر قم.

به‌منظور بررسی تأثیرات هیدروژئولوژی بر روی پدیده فرونشست زمین در منطقه مطالعاتی، خطوط منحنی تراز

سطح آب که به‌صورت نقشه در منطقه تهیه شده بررسی شد. بر اساس مقایسه صورت گرفته بین نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی و شکل-۷ ب، مربوط به منحنی‌های تراز افت سطح آب زیرزمینی، مشاهده می‌شود که خطوط منحنی تراز با بیشینه مقدار ۱۲۰ متر در محدوده خطر فرونشست زمین به هم نزدیک و ما شاهد افت سطح آب در این محدوده هستیم.

در ادامه جهت تشریح بهتر این مسئله طی بازه زمانی فروردین ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۴۰۰ تغییرات سطح آب در چاه‌های پیزومتر لنگرود و جنب فرودگاه به‌صورت نمودار در شکل-۸ ا ارائه و با نرخ فرونشست رخ داده طی بازه زمانی پردازش تصاویر راداری در محدوده پیزومترها مقایسه شده است. نتایج مقایسه صورت گرفته نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی با نرخ فرونشست، همبستگی آماری نسبتاً خوب ( $R = 0.47$ ) در محدوده پیزومترهای لنگرود (شکل-۸ الف) نسبت به جنب فرودگاه در (شکل-۸ ب) با مقدار ( $R = 0.38$ ) داشته است. در واقع، می‌توان دلیل اصلی فرونشست زمین در منطقه را بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی عنوان کرد. در نمودار ارائه شده برای پیزومتر لنگرود به مشاهده می‌شود که در بازه زمانی آبان ۱۳۹۸ تا شهریور ۱۳۹۹ حتی با بالا آمدن سطح آب زیرزمینی شاهد تغییرات کم در روند فرونشست زمین در این محدوده هستیم که این امر حاکی از سختی جبران این پدیده دارد (شکل-۷ الف). همچنین در شکل-۹، تراز سطح آب در هیدروگراف واحد قم-کهک بررسی شده که نشان‌دهنده پایین آمدن ۱/۸ متری تراز سطح آب در بازه زمانی مهر ۱۳۹۶ تا مهر ۱۴۰۰ دارد در این محدوده است.

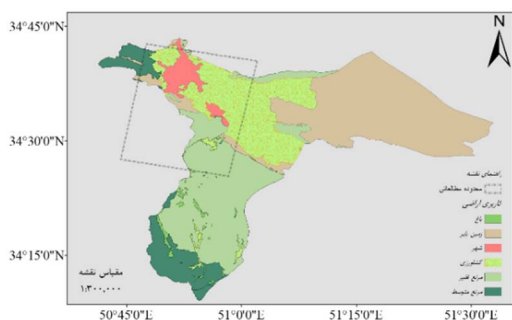


شکل ۸- نمودار سطح آب زیرزمینی و فرونشست در دو پیزومتر ذکر شده: الف) پیزومتر لنگرود و ب) جنب فرودگاه. منحنی‌های آبی سطح آب زیرزمینی را برحسب متر و منحنی‌های قرمز نرخ فرونشست را برحسب میلی‌متر بر سال نشان می‌دهد (شرکت آب منطقه‌ای استان قم)



#### ۴-۴- ارتباط فرونشست با کاربری اراضی

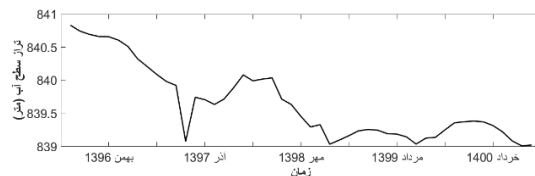
طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده بر روی نقشه کاربری اراضی، محدوده جنوب شرقی استان که عمده نرخ فرونشست متوجه آن است دارای کاربری کشاورزی است. این مهم باعث افزایش سرانه مصرف آب و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در منطقه و نهایتاً فرونشست زمین طی گذر زمان خواهد شد. شکل-۱۱، نقشه کاربری اراضی ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان قم بوده و بیانگر این مسئله است که محدوده جنوب شرقی استان که در آن شاهد رخداد پدیده فرونشست زمین هستیم در محدوده کاربری کشاورزی واقع‌شده که بر فرونشست منطقه بسیار تأثیرگذار خواهد بود. با توجه به مطالب عنوان‌شده می‌توان گفت کاهش نزولات جوی و خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت در محدوده‌هایی که دارای کاربری کشاورزی هستند سبب می‌شود تا سرانه مصرف از منابع آب زیرزمینی افزایش پیدا کند. در نتیجه بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی باعث نشست رسوبات و کاهش تخلخل آن‌ها شده و نهایتاً شاهد فرونشست زمین در این مناطق خواهیم بود.



شکل ۱۱- نقشه کاربری اراضی استان قم (شرکت آب منطقه‌ای استان قم).

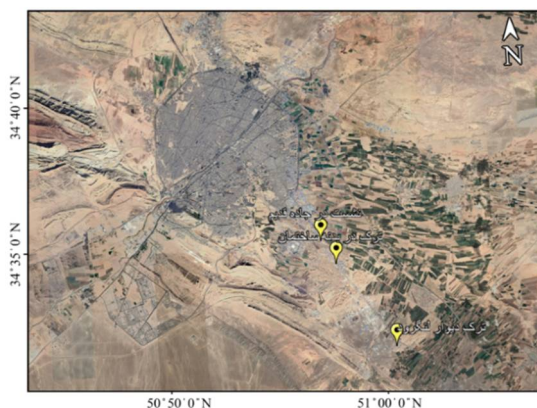
#### ۵- نتیجه‌گیری

فرونشست زمین در محدوده‌های شهری نظیر قم به دلیل تلفات و خسارات جانی و مالی که می‌تواند در پی داشته باشد باید در تحقیقات اصولی و طی یک بازه زمانی طولانی موردبحث و بررسی قرار بگیرد. با توجه موقعیت حساس جغرافیایی استان قم در مرکز کشور، رشد و توسعه شهرنشینی و نیز جاده‌هایی که از استان عبور می‌کنند، مطالعه این پدیده به‌صورت مستمر جهت کنترل و مدیریت آن امری ضروری می‌باشد. به همین منظور، در این مطالعه جهت ایجاد یک سیستم پایش دائمی و ارائه نمای کلی از مناطقی در قم که



شکل ۹- هیدروگراف واحد قم-کهنک (شرکت آب منطقه‌ای استان قم)

جهت ارزیابی نتایج حاصل از پردازش تداخل‌سنجی راداری و میزان تطابق آن با واقعیت، احتیاج به بازدید میدانی از منطقه می‌باشد. در نتیجه برای بررسی نتایج، انطباق آن‌ها با شواهد زمینی و اطلاعات مربوط به چاه‌های پیژومتری و نیز هیدروگراف منطقه در دستور کار قرار گرفت. به دلیل وسعت منطقه تنها جاده قدیم قم-کاشان و بخش لنگرود جهت مشاهدات و کنترل‌های میدانی انتخاب شدند. در شکل-۱۰، برخی از شواهد وقوع فرونشست زمین با انجام مشاهدات و کنترل‌های میدانی بازدید و جمع‌آوری شده‌اند. (شکل-۱۰ الف) مربوط به فرونشست زمین در جاده قم-کاشان (محدوده ورودی شهر قم)، (شکل-۱۰ ب و ج) مربوط به ترک ساختمانی در امتداد جاده قم-کاشان و نهایتاً (شکل-۱۰ د) مربوط به ترک دیوار و فرونشست زمین در محدوده بخش مسکونی لنگرود می‌باشد.



شکل ۱۰- آثار فرونشست زمین بر زیرساخت شهری

خطر فرونشست زمین آن‌ها را تهدید می‌کند از فناوری تداخل‌سنجی راداری بر اساس تحلیل سری زمانی PS-InSAR استفاده شد. در این مطالعه، ۲۹ تصویر ماهواره سنتینل-۱ طی بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ مربوط به مدار پایین‌رو مسیر ۳۵ مورد استفاده قرار گرفته است. جهت پردازش تصاویر راداری از ابزار G2S و نتایج حاصل از آن با استفاده از اطلاعات مربوط به چاه‌های پیژومتری صحت‌سنجی شده است. نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری در محدوده شهری قم، نشان‌دهنده بیشینه نرخ فرونشست، ۵/۴- میلی‌متر بر سال در راستای دید ماهواره در جنوب شرقی شهر بوده است. بررسی و تحلیل اطلاعات مربوط به چاه‌های پیژومتری در محدوده فرونشست، نشان‌دهنده این مسئله است که مناطق با نرخ فرونشست بالا، دارای افت شدید تراز آبخوان هستند. این افت تراز سطح آب زیرزمینی در این محدوده علت اصلی

فرونشست زمین است. در حالت کلی تأثیر افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست در مناطق مختلف متفاوت خواهد بود که تفاوت آن بستگی به جنس خاک در منطقه دارد. مقایسه اطلاعات هیدرولوژی و نرخ فرونشست مشاهده شده در جنوب شرقی قم بیانگر این مسئله است که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی در این محدوده باعث فرونشست زمین شده است که این خطر به‌مرور زمان محدوده‌های شهری را نیز تهدید خواهد کرد. در ادامه، پیشنهاد می‌شود ترکیبی از خصوصیات ژئوتکنیکی و تحلیل‌های سری زمانی تداخل‌سنجی راداری برای ارتباط خسارات ناشی از فرونشست با چندین مکانیسم آغازگر مانند اثرات دینامیکی متروها و بهره‌برداری خارج از آب‌های زیرزمینی در امتداد خطوط حمل‌ونقلی استفاده شود.

## مراجع

- [1] Gao, M.; Gong, H.; Li, X.; Chen, B.; Zhou, C.; Shi, M.; Guo, L.; Chen, Z.; Ni, Z.; Duan, G. Land Subsidence and Ground Fissures in Beijing Capital International Airport (BCIA): Evidence from Quasi-PS InSAR Analysis. *Remote Sens.* 2019, 11, 1466.
- [2] Hu, S.; Zhang, H.; Zhang, L. Influence analysis of ground seam on urban overpass and disease prevention. *J. China Foreign Highw.* 2018, 38, 167-172.
- [3] Bugajska, N. J., & Milczarek, W. J. (2021, March). Remote sensing monitoring of influence of underground mining in the area of the S3 Express Road. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 684, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
- [4] حاجب، موسوی، معصومی، رضایی. ۱۳۹۸. مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان. *علوم زمین*, ۲۹, ۲۵۱-۲۵۸.
- [5] عدالت، خداپرست، رجبی. ۲۰۲۱. بررسی اثرات تغییر تراز آب زیرزمینی آبخوان بر پدیده فرونشست و راهکارهای تعادل بخشی آبخوان (مطالعه موردی؛ دشت علی‌آباد قم). *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*, ۵۳, ۱۸-۱۸.
- [6] Thapa, S., Chatterjee, R. S., Singh, K. B., & Kumar, D. (2016). LAND SUBSIDENCE MONITORING USING PS-InSAR TECHNIQUE FOR L-BAND SAR DATA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 40.
- [7] Tarighat, F., Foroughnia, F., & Perissin, D. (2021). Monitoring of power towers' movement using persistent scatterer SAR interferometry in south west of Tehran. *Remote Sensing*, 13(3), 407.
- [8] Lyu, M., Ke, Y., Li, X., Zhu, L., Guo, L., & Gong, H. (2020). Detection of seasonal deformation of highway overpasses using the PS-InSAR technique: A case study in Beijing urban area. *Remote Sensing*, 12(18), 3071.
- [9] Qin, M. Liao, L. Zhang and M. Yang, "Structural Health and Stability Assessment of High-Speed Railways via Thermal Dilation Mapping With Time-Series InSAR Analysis," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 6, pp. 2999-3010, June 2017, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2719025.
- [10] Y. Wang et al., "Using TerraSAR X-Band and Sentinel-1 C-Band SAR Interferometry for Deformation Along Beijing-Tianjin Intercity Railway Analysis," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 4832-4841, 2021, doi: 10.1109/JSTARS.2021.3076244.
- [11] Hu, F.; Leijen, F.J.v.; Chang, L.; Wu, J.; Hanssen, R.F. Monitoring Deformation along Railway Systems Combining Multi-Temporal InSAR and LiDAR Data. *Remote Sens.* 2019, 11, 2298. <https://doi.org/10.3390/rs11192298>
- [12] Karimzadeh, S.; Matsuoka, M. Remote Sensing X-Band SAR Data for Land Subsidence and Pavement Monitoring. *Sensors* 2020, 20, 4751. <https://doi.org/10.3390/s20174751>
- [13] Karimzadeh, S.; Matsuoka, M. Ground Displacement in East Azerbaijan Province, Iran, Revealed by L-band and C-band InSAR Analyses. *Sensors* 2020, 20, 6913. <https://doi.org/10.3390/s20236913>

- [14] Soodmand Afshar, R., & Ahmadi, S. (2020). Monitoring of land subsidence due to overexploitation of groundwater using PS-InSAR in the region in Hamadan province, Iran. *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, 8(1), 79-99.
- [15] Deng, Z., Ke, Y., Gong, H., Li, X., & Li, Z. (2017). Land subsidence prediction in Beijing based on PS-InSAR technique and improved Grey-Markov model. *GIScience & Remote Sensing*, 54(6), 797-818.
- [16] Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A. (2018). Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 386-396.
- [17] Hussain, S., Hongxing, S., Ali, M., & Ali, M. (2021). PS-InSAR based validated landslide susceptibility modelling: a case study of Ghizer valley, Northern Pakistan. *Geocarto International*, 1-22.
- [18] Dwivedi, R., Varshney, P., Tiwari, A., Narayan, A. B., Singh, A. K., Dikshit, O., & Pallav, K. (2015, March). Monitoring of landslides in Nainital, Uttarakhand, India: validation of PS-InSAR results. In *2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [19] Galve, J.P.; Castañeda, C.; Gutiérrez, F. Railway deformation detected by DInSAR over active sinkholes in the Ebro Valley evaporite karst, Spain. *Hazards Earth Syst. Sci.* 2015, 15, 2439–2448.
- [20] Galve, J.P.; Castañeda, C.; Gutiérrez, F.; Herrera, G. Assessing sinkhole activity in the Ebro Valley mantled evaporite karst using advanced DInSAR. *Geomorphology* 2015, 229, 30–44.
- [21] Villarreal, C.D.; Beliveau, G.T.; Forte, A.P.; Monserrat, O.; Morvillo, M. DInSAR for a regional inventory of active rock glaciers in the Dry Andes Mountains of Argentina and Chile with Sentinel-1 data. *Remote Sens.* 2018, 10, 1588.
- [22] Solari, L.; Ciampalini, A.; Raspini, F.; Bianchini, S.; Moretti, S. PSInSAR analysis in the pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization. *Remote Sens.* 2016, 8, 120.
- [23] Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001, 39, 8–20.
- [24] Babae, S.S., S. Khazai, and F. Ghasser Mobarake, Interferometric Processing Time Series COSMO-SkyMed Pictures to Calculate Subsidence Rate of the Ground and Underground Structures. *ISSGE*, 2017. 7(1): p. 55-67.
- [25] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Xu, X., Wei, M., & Wessel, P. [http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR\\_2ND\\_TEX.pdf](http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR_2ND_TEX.pdf).
- [26] Hooper, A., Bekaert, D., Hussain, E., & Spaans, K. (2018). *StaMPS/MTI manual: Version 4.1 b*. School of Earth and Environment, University of Leeds. Retrieved October, 15, 2019.