



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Subsidence Monitoring along Tehran Railway: An Analysis of InSAR and Ground Observations

J. Piri, E. Javadnia*

Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ABSTRACT

Received: 17 February 2024
 Reviewed: 17 April 2024
 Revised: 04 May 2024
 Accepted: 06 June 2024

KEYWORDS:

Subsidence
 Sentinel
 Railway
 InSAR
 Validation

* Corresponding author

✉ Javadnia@znu.ac.ir

☎ (+9824) 33054504

Background and Objectives: Land subsidence is recognized as one of the most perilous natural occurrences, often resulting from human negligence in water extraction, underground mining, and various other factors. This phenomenon poses a significant threat, specifically in sensitive areas such as railway systems, where irreparable damage can transpire. Notably, subsidence-induced cracks have emerged along several railway routes, including Tehran-Mashhad, Tehran-Varamin, and Isfahan to Shiraz, jeopardizing the integrity of these lines. Consequently, comprehensive monitoring of subsidence and deformation in both temporal and spatial dimensions becomes imperative for effective event management. To accurately assess the deformation patterns of such phenomena, a thorough analysis of the instantaneous time series within the study region is essential. In recent times, Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) has emerged as a widely adopted technique for precisely measuring crustal deformation.

Methods: This study focuses on examining the rate of land subsidence along the railway lines in the Tehran region, utilizing InSAR and Sentinel-1 satellite imagery spanning the period from 2017 to 2020. The analysis involved processing a total of 46 images and generating 158 interferograms through the application of time series analysis and employing the Small Baseline Subset (SBAS) technique. GMTSAR software was used to create a time series and a displacement map from the interferograms. To ensure the credibility and comprehension of the research findings, diverse datasets were utilized, including the Iranian Permanent GPS Network for Geodynamics (IPGN) data, the data sourced from the Shamim network of the Land Registry Organization, the measurements from piezometric wells, and the soil characteristics derived from drilling boreholes.

Findings: The analysis of the interferometry time series reveals the occurrence of subsidence in specific areas within the case study. The most significant subsidence was observed along the Karaj-Kordan and Maleki-Aprin railway lines, with a deformation rate of approximately 139 mm/year along the line of sight (LOS). Notably, the validation process considering the errors associated with each method yielded relatively satisfactory results. Furthermore, an investigation was conducted to explore the relationship between subsidence, groundwater withdrawal, and soil type. This investigation utilized data from 12 piezometric wells located in the Tehran and Karaj plains, as well as information gathered from drilling boreholes in the study region. The overall findings indicate that the primary cause of subsidence in the region is attributed to a decline in groundwater withdrawal.

Conclusion: Upon analyzing the relationship between annual water loss, subsidence, and the soil characteristics within the region, it was determined that the primary cause of subsidence is the withdrawal of groundwater in areas characterized by thick deposits of fine-grained sediments. The proposed approach in this study highlights the effectiveness of utilizing the InSAR technique for initial evaluations of subsidence along linear infrastructures like railway lines. However, it is advised to employ more precise methods in subsidence-affected regions. Given the relatively limited resolution of Sentinel-1 imagery, it is recommended to utilize images with smaller pixel sizes when assessing linear structures such as roads or railways. Additionally, accurate leveling techniques can be employed to enhance the precision and identification of subsidence areas.



NUMBER OF REFERENCES

39



NUMBER OF FIGURES

23



NUMBER OF TABLES

1

مقاله پژوهشی

پایش فرونشست خط راه آهن تهران با استفاده از تکنیک اینسار و مشاهدات زمینی

جلیل پیری، اسلام جوادنیا*

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: یکی از خطرناک‌ترین رخداد‌های طبیعی، فرونشست سطح زمین است و اغلب به جهت سهل انگاری بشر در استخراج آب‌ها و معادن زیرزمینی و عوامل دیگر حادث می‌شود. این پدیده، به‌خصوص در مناطق حساس مانند خطوط ریلی، می‌تواند منجر به حوادث جبران ناپذیری شود. شکاف‌های ناشی از فرونشست در برخی از مسیرهای ریلی همچون مسیر تهران-مشهد، تهران-ورامین، اصفهان به شیراز و ... تا نزدیکی این خطوط پیشروی داشته و تهدیدی برای این خطوط به‌شمار می‌آید. بنابراین، پایش فرونشست و بررسی تغییر شکل در بعد زمان و مکان به‌منظور مدیریت حادثه ضروری می‌باشد. برای رفتار سنجی تغییر شکل پدیده‌ها نیازمند بررسی سری زمانی آبی پدیده در منطقه مورد مطالعه هستیم. امروزه، تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) به دلیل پیوستگی مکانی و زمانی یک تکنیک متداول برای اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته زمین شده است.

روش‌ها: در این تحقیق، نرخ فرونشست زمین در طول خطوط ریلی در شاخه‌های خروجی خط آهن تهران با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفته است. میزان جابه‌جایی سطح زمین از طریق پردازش ۴۶ تصویر و ایجاد ۱۵۸ تداخل نگار به کمک آنالیز سری زمانی و با استفاده از روش خط مبنای کوتاه (SBAS) به دست آمد. برای اعتبار سنجی و تفسیر نتایج پژوهش از داده‌های شبکه ژئودینامیک کشور، شبکه شمیم سازمان ثبت اسناد و املاک، داده‌های چاه‌های پیژومتری و همچنین مشخصات خاک گمانه‌های حفاری استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی، نشان از وقوع فرونشست قابل ملاحظه‌ای در مناطقی از محدوده مورد مطالعه دارد که بیشینه آن مربوط به مسیرهای کرج-کردان و ملکی-آپرین با نرخ جابه‌جایی ۱۳۹ میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره (LOS) می‌باشد. اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده با در نظر گرفتن خطاهای مربوط به هر کدام از روش‌ها نسبتاً خوب بود. همچنین ارتباط بین پدیده فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی و نوع خاک منطقه به کمک داده‌های ۱۲ چاه پیژومتری دشت‌های تهران و کرج و اطلاعات گمانه‌های حفاری تعدادی از چاه‌های پیژومتری منطقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی نشان دهنده این بود که علت اصلی نشست در منطقه، افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، با بررسی رابطه افت سالانه آب و فرونشست و همچنین نوع، جنس و ضخامت خاک منطقه، مشخص گردید که علت اصلی نشست در منطقه، افت سطح آب‌های زیر زمینی در مناطق با ضخامت بالای رسوبات ریز دانه می‌باشد. رویکرد پیشنهادی در این تحقیق نشان داد که به‌منظور پایش فرونشست در امتداد تأسیسات خطی از قبیل خطوط راه آهن، به‌کارگیری تکنیک InSAR می‌تواند در ارزیابی‌های اولیه و به دنبال آن، استفاده از روش‌های دقیق‌تر در مناطق درگیر فرونشست، مؤثر واقع گردد. به دلیل قدرت تفکیک نسبتاً پایین سنتینل-۱، پیشنهاد می‌شود در کاربردهای مرتبط با ساختارهای خطی از قبیل جاده یا راه آهن از تصاویر با اندازه پیکسل کوچک‌تر استفاده گردد. علاوه بر این، برای ارزیابی و شناسایی دقیق‌تر مناطق تحت فرونشست می‌توان از ترازیبی دقیق نیز بهره برد.

واژگان کلیدی:

فرونشست

سنتینل

خطوط ریلی

اینسار

اعتبارسنجی

* نویسنده مسئول

javadnia@znuu.ac.ir

۰۲۴-۳۳۰۵۴۵۰۴

مقدمه

امنیت این خطوط و تأسیسات ساخته شده در مسیر ریلی وابسته به این حرکات و جابه‌جایی‌های زمین می‌باشد. فرونشست زمین باعث شکست و افتادگی این خطوط می‌گردد که این موضوع بسیار فاجعه بار می‌باشد و می‌تواند جان هزاران نفر را به خطر بیندازد. از این رو پایش فرونشست زمین و تعیین نرخ آن در مناطق دارای خطوط ریلی می‌تواند گامی مؤثر در پیشگیری از وقوع یک حادثه فاجعه‌بار گردد. شکل‌های (۱) و (۲) دو نمونه از فرونشست در مناطق ریلی را نشان می‌دهد.

فرونشست زمین، عبارت است از فروریزش یا پایین رفتن سطح زمین که به‌صورت تغییرات ارتفاعی عمودی سطح زمین قابل شناسایی می‌باشد و با جابه‌جایی‌های اندک افقی نیز همراه است. در مناطقی که فرونشست رخ می‌دهد یک یا چند عامل مانند حرکت گسل‌ها و برداشت بی‌رویه منابع آبی و نفتی نقش اساسی دارند [۱]. امروزه بسیاری از نقاط کشور ایران با درجات مختلف درگیر معضل فرونشست زمین شده‌اند که در برخی از این مناطق خطوط ریلی وجود دارد. پایداری و

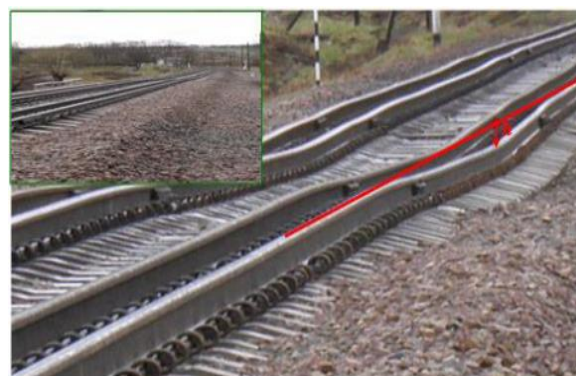
و فرونشست که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شود، مورد استفاده قرار گرفته است [۸-۱۰]. امروزه محصولات تداخل سنجی راداری در تجزیه و تحلیل تغییر شکل‌های رخ داده در زیرساخت‌های عمرانی در مناطق شهری [۱۱، ۱۲]، سد‌ها [۱۳، ۱۴]، پل‌ها [۱۵]، راه آهن [۱۶]، جاده‌ها [۱۷] کاربرد زیادی دارد. افزایش ماهواره‌ها و مأموریت‌های فضایی همچون انویست (Envisat)، سنتینل-۱ (Sentinel-1) و همچنین توسعه الگوریتم‌های پردازش داده مانند پراکنش‌کننده‌های پایدار (PS) (Persistent Scatterers) [۱۸] روش خط مبنای کوتاه (SBAS) (Small Baseline Subset) [۱۹]، امکان اندازه‌گیری تغییر شکل در حد سانتی‌متر را با بهبود کیفیت و وضوح تصاویر فراهم آورده است [۲۰]. در خصوص پایش مناطق ریلی با استفاده از تکنیک اینسار در ایران و مناطق مختلف جهان مطالعات گوناگونی صورت گرفته است [۲۱-۲۵].

سنتینل-۱ مجموعه مشاهدات راداری ماهواره‌ای است که با همکاری اتحادیه اروپا و آژانس فضایی اروپا از سال ۲۰۱۴ فعالیت خود را آغاز کرده است [۲۶]. سنتینل با پوشش مکانی و قدرت تفکیک مکانی بهتر نسبت به سنجنده‌های قبلی به صورت پلاریزاسیون دوگانه HH (Horizontal Horizontal)، HV (Horizontal Vertical)، VH، VV قادر است هر ۱۲ روزی کبار از کل کره زمین تصویربرداری کند. زاویه فرود این سنجنده ۲۹/۱ الی ۴۶ درجه است. ماهواره سنتینل-۱ دارای مدار قطبی است که به صورت راداری تصویربرداری انجام می‌دهد و قادر است که پدیده‌ها و عوارض را در شب و روز بدون در نظر داشتن شرایط آب‌وهوایی جمع‌آوری کند. این ماهواره همچنین به گونه‌ای طراحی شده است تا در یک حالت عملیاتی بدون وقفه تصویربرداری از تمام مناطق کره زمین را انجام دهد.

دشت تهران جزو مناطق مستعد وقوع فرونشست در کشور محسوب می‌شود، منطقه جنوب و جنوب غرب این دشت یکی از مناطق بسیار مهم است که فرونشست‌های متعددی در آن گزارش گردیده و احتمال وقوع این پدیده در سال‌های اخیر به سرعت بالا رفته است. وجود تأسیسات زیربنایی، خطوط انتقال نیرو و راه‌های ارتباطی زیاد در این منطقه باعث شده فرونشست همواره تهدیدی برای تخریب آن‌ها به‌شمار آید. در بعضی از مناطق این دشت از جمله ورامین شکاف‌های ناشی از فرونشست تا نزدیکی خطوط ریلی پیشروی کرده است و تهدیدی جدی برای امنیت و پایداری این خطوط به‌شمار می‌رود و کوچک‌ترین آسیبی به این خطوط ممکن است خسارات جبران‌ناپذیر مالی و جانی در پی داشته باشد. به همین دلیل به منظور جلوگیری از خسارات احتمالی لزوم شناسایی و پایش مداوم این منطقه و خطوط ریلی واقع در آن بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق، بررسی و تعیین میزان نشست زمین در خطوط ریلی پایتخت و سه شاخه خروجی آن به سمت نواحی در نظر گرفته شد تا مناطق درگیر و دارای ریسک بالای فرونشست به منظور مقابله و کاهش خطرات ناشی از آن شناسایی گردند. بدین منظور در این تحقیق از تکنیک تداخل سنجی راداری با بهره‌گیری از ۴۶ تصویر سنتینل-۱ در بازه زمانی سه ساله و روش SBAS برای



شکل ۱: فرونشست در محدوده راه آهن شیراز- اصفهان [۲]
Fig. 1: Subsidence in the area of Shiraz-Isfahan railway [2]

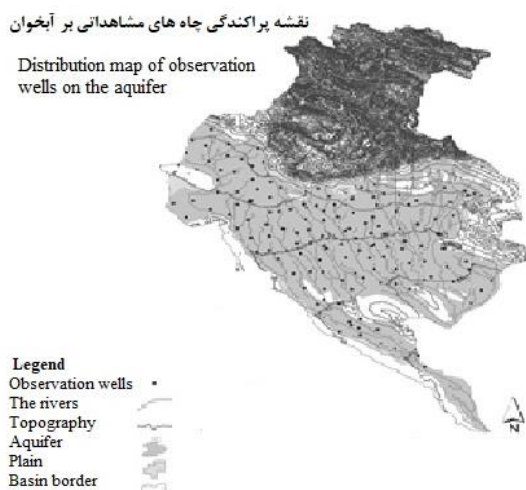


شکل ۲: فرونشست در خطوط ریلی [۳]
Fig. 2: Subsidence in railway [3]

امروزه با پیشرفت تکنولوژی ماهواره‌ای و سنجش از دوری امکان پایش فرونشست به صورت آبی و با قدرت تفکیک مکانی بالا و دقت قابل قبولی میسر می‌باشد [۴-۶]. به سبب زمان‌بر و هزینه‌بر بودن روش‌های اندازه‌گیری و پایش فرونشست توسط نقشه‌برداری زمینی، مانند ترازبایی و سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) (Global positioning system) و همچنین تراکم پایین نقاط ایستگاه‌های GPS، ارزیابی فرونشست به وسیله تداخل سنجی راداری با دریچه مصنوعی (اینسار) (Interferometric synthetic aperture radar) راهی نوین را در جهت اندازه‌گیری میزان فرونشست فراهم آورده است [۷]. امکان دسترسی به داده‌هایی با سطح پوشش بالاتر، قدرت تفکیک مکانی بالا، دسترسی آسان‌تر، سطح اطلاعات بیشتر و با پوشش زمانی بسیار بهتر، امکان سنجش بهتر پدیده‌های طبیعی را برای محققین فراهم آورده است. به گونه‌ای که می‌توان تغییرات ارتفاعی در ابعاد تقریباً یک سانتی‌متر را تشخیص و از طریق اندازه‌گیری‌های سری زمانی سیگنال‌های بازگشتی رادار، گستره وقوع، روند و موقعیت مکانی تغییرات سطح زمین را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. تصاویر تداخل سنجی با توجه به توانایی به تصویر کشیدن و فراهم کردن داده‌های پیوسته در یک بازه مکانی نسبتاً وسیع، ابزار مناسبی برای مطالعات جابه‌جایی زمین (از نظر الگو تغییرات و میزان آن) هستند [۷].

از اواخر دهه نود میلادی، تکنیک تداخل سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه پدیده‌هایی مانند زمین لرزه، فعالیت‌های آتشفشانی

دشت تهران- کرج از نظر تقسیم‌بندی حوزه‌های آبریز ایران، بخشی از حوزه آبریز مرکزی می‌باشد، که از دامنه‌های جنوبی البرز شروع و تا دشت‌های ورامین و شهریار گسترش یافته است. آبخوان ناحیه مورد مطالعه دشت تهران- کرج دارای سرشت مشترک بوده و یک واحد هیدرولوژیکی را تشکیل می‌دهند. نوع آبخوان به صورت آزاد بوده، عناصر عمده تشکیل دهنده آبخوان به نسبت‌های متفاوتی از عناصر تخریبی نظیر رس، ماسه، شن و قلوه سنگ تشکیل یافته است و عموماً در نواحی ورودی و شمالی دشت عناصر درشت دانه‌تر درصد بیشتری از بافت خاک را شامل می‌شوند و به سمت نواحی خروجی و جنوبی دشت و با فاصله یافتن از محورهای رسوب‌گذاری به تدریج قطر ذرات کاهش می‌یابد. در شکل (۵) نقشه دشت، آبخوان، توپوگرافی منطقه، رودها و پراکندگی چاه‌های مشاهداتی آورده شده است [۲۹].



شکل ۵: نقشه آبخوان تهران- کرج [۲۹]
Fig. 5: Tehran-Karaj aquifer map [22]

داده‌های مورد استفاده

به منظور مطالعه، بررسی و تعیین نرخ فرونشست در خطوط ریلی ناحیه مورد مطالعه، از داده‌های راداری سنجنده سنتینل-۱ در مسیر ۳۵ استفاده گردید. تعداد ۴۶ تصویر SLC پایین گذر (Descending) در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۲/۱۸ تا ۲۰۲۰/۰۳/۲۲ با پلاریزاسیون ۷۷ و مد (Interferometric Wide swath) و زاویه فرود ۳۶ درجه تهیه شد. نام و مشخصات تصاویر در جدول (۱) آورده شده است. ردیف مشخص شده با رنگ قرمز در جدول زیر، مربوط به تصویر اصلی در ایجاد شبکه تداخل نگارها می‌باشد که توسط نرم‌افزار اسنپ به طور خودکار انتخاب شد.

برای حذف فاز ایجاد شده ناشی از خطاهای توپوگرافی باید از مدل ارتفاعی رقومی منطقه استفاده کرد. در این تحقیق، از مدل ارتفاعی رقومی سنجنده SRTM1 ۳۰ متری استفاده شد. همچنین، برای حذف فاز مداری ناشی از خطاهای مداری باید از اطلاعات مداری دقیق (Precise Orbits) استفاده کرد. به تعداد تصاویر راداری تهیه شده باید

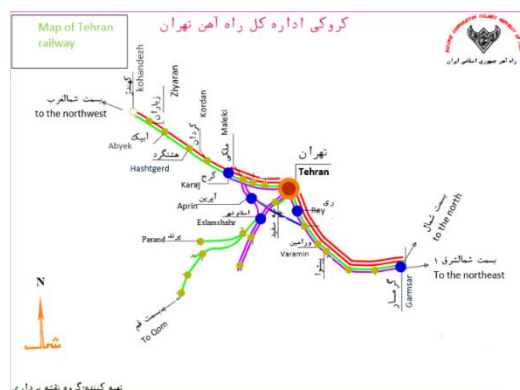
بررسی پدیده فرونشست خطوط ریلی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه تهران- کرج از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از غرب به استان قزوین و از شرق به استان سمنان محدود است. این منطقه با وسعتی معادل ۱۹۱۹۴ کیلومتر مربع بین ۳۴ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی از استان‌های بسیار مهم کشور محسوب می‌شود [۲۷].

اگر ایستگاه راه‌آهن تهران را مبدأ مسیرهای خطوط راه‌آهن در نظر بگیرد به طور کلی شبکه ریلی کشور در سه محور اصلی فعالیت می‌کند. شکل‌های (۳) و (۴). این سه محور اصلی شامل شمال- شرق، آذربایجان و جنوب شرق خواهد بود. گسترده‌ترین محور راه‌آهن همان محور جنوب است که با بیش از ۲۰۰ ایستگاه شما را به بیشتر مقاصد جنوبی، شرقی و غربی کشور خواهد رساند. کوتاه‌ترین محور نیز محور آذربایجان با چیزی در حدود ۷۰ ایستگاه است که شما را به مناطق شمال غربی کشور می‌رساند [۲۸].



شکل ۳: سه شاخه اصلی راه آهن مرکز به سمت نواحی

Fig. 3: Three main branches of the central railway towards the districts



شکل ۴: منطقه مورد مطالعه و خطوط ریلی واقع بر آن

Fig. 4: The studied area and the railway lines located on it

منطقه جهت حذف خطاهای مداری و توپوگرافی و نیز، رفع خطای زمین مسطح که ناشی از انحنای زمین می‌باشد (Flat earth) دانلود می‌شوند. بعد از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، پردازش داده‌ها انجام می‌گیرد. مراحل پردازش شامل تشکیل شبکه خط مبنای کوتاه، تبدیل توپوگرافی به فاز و تشکیل تداخل نگارها و بازبازی فاز و در آخر ایجاد سری زمانی از تداخل نگارهای تشکیل شده، می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از پردازش در بخش بعدی به تفصیل توضیح داده شده است. مراحل کلی پردازش تصاویر راداری و تشکیل تداخل نگارها به‌صورت کلی در شکل (۶) نشان داده شده است.

تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر روش خط مبنای کوتاه (SBAS) روش SBAS در مکان‌هایی که امکان وجود پیکسل‌هایی با هم‌دوسی (Coherence) بالا بسیار کم است مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۰]. در این روش، تداخل نگارها، تنها بین تصاویری با بازه زمانی کوتاه و تغییر اندک در زاویه دید تشکیل می‌شود. در واقع در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنای باشد [۳۱]. الگوریتم SBAS جهت غلبه بر معضلات مربوط به غیر همبستگی داده‌های اینسار توسعه داده شده است. این رویکرد، تأثیرات ناشی از غیر همبستگی مکانی و زمانی بر برآوردهای تغییر شکل را تنها با به‌کارگیری تداخل نگارهای بسیار همبسته کاهش می‌دهد. غیر همبستگی مکانی ناشی از جداسازی فیزیکی بین دو موقعیت آنتن SAR در دو گذر ماهواره است که برای کاهش این خطا، جفت تصویر در محدوده خط مبنای مکانی بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر می‌تواند لحاظ شود [۲۸].

فایل مداری مربوط به هر تصویر را نیز دانلود نمود. در این تحقیق ۴۶ فایل مداری مربوط به هر کدام از تصاویر راداری سنتینل-۱ تهیه شد. برای اطمینان از نتایج تحقیق و تفسیر آن‌ها از داده‌های ژئودتیک سازمان نقشه‌برداری و سامانه شمیم سازمان ثبت اسناد و املاک کشور استفاده گردید. این ایستگاه‌ها به‌صورت ۲۴ ساعته به ردیابی و ثبت سیگنال‌های دریافتی از سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (Global Navigation Satellite System) (GNSS) می‌پردازند و پردازش داده‌های این ایستگاه‌ها در چارچوب مرجع مختصاتی ITRF2014 انجام می‌پذیرد. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک تهران واقع در محوطه سازمان نقشه‌برداری با مختصات جغرافیایی ($35^{\circ}41'50''$ و $51^{\circ}20'01''$) و در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ و داده‌های ایستگاه ثابت شمیم استان البرز به مختصات ($35^{\circ}49'59''$ و $50^{\circ}59'48''$) در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. همچنین برای بررسی میزان ارتباط نرخ فرونشست با تغییرات آب‌های زیرزمینی از داده‌های ۲۰ چاه پیزومتری شرکت آب منطقه‌ای تهران و البرز بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۷ و همین‌طور برای بررسی میزان ارتباط این نرخ با نوع خاک منطقه از داده‌های گمانه‌های حفاری شرکت آب منطقه‌ای استفاده گردید.

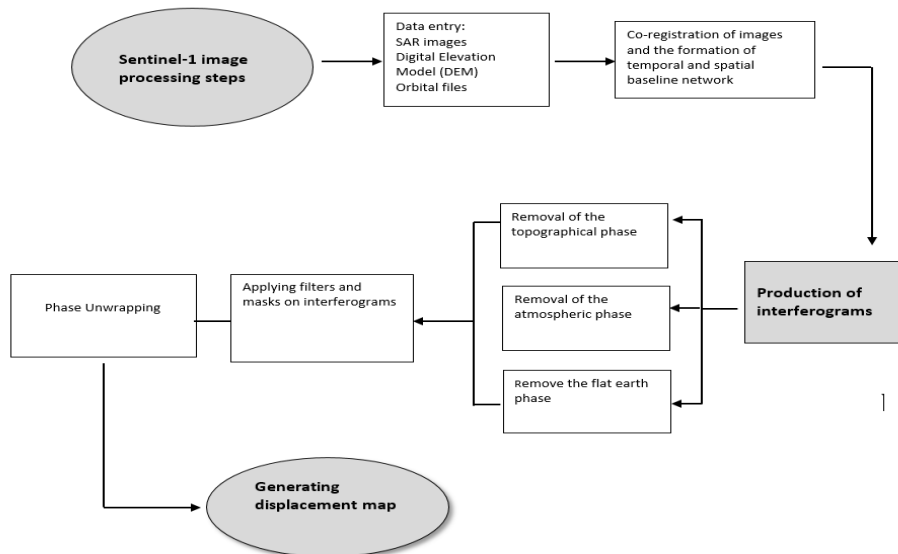
روش شناسی

برای انجام پروسه تداخل‌سنجی و تشکیل تداخل نگارها و استخراج میزان نرخ و دامنه فرونشست در منطقه، از نرم‌افزار متن باز GMTSAR تحت سیستم عامل لینوکس استفاده گردید. پردازش‌های انجام گرفته در این نرم‌افزار شامل مراحل مختلفی می‌باشد بدین صورت که، بعد از تهیه تصاویر منطقه مورد مطالعه از آژانس فضایی اروپا، دانلود فایل‌های مداری مربوط به هر تصویر و همچنین مدل ارتفاعی رقومی مربوط به

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده

Table 1: Specifications of images used

شماره	تاریخ	شماره	تاریخ	مسیر
Number	Date	Number	Date	path
1	2017/02/18	24	2018/09/17	35
2	2017/03/14	25	2018/10/11	35
3	2017/04/07	26	2018/11/04	35
4	2017/05/01	27	2018/11/28	35
5	2017/06/06	28	2019/01/15	35
6	2017/07/12	29	2019/02/08	35
7	2017/08/05	30	2019/03/04	35
8	2017/08/29	31	2019/03/28	35
9	2017/09/22	32	2019/04/09	35
10	2017/10/16	33	2019/05/03	35
11	2017/11/09	34	2019/05/27	35
12	2017/12/03	35	2019/06/20	35
13	2017/12/27	36	2019/07/14	35
14	2018/01/20	37	2019/08/07	35
15	2018/02/13	38	2019/08/31	35
16	2018/03/09	39	2019/09/24	35
17	2018/04/02	40	2019/10/18	35
18	2018/04/26	41	2019/11/11	35
19	2018/05/20	42	2019/12/17	35
20	2018/06/13	43	2020/01/10	35
21	2018/07/07	44	2020/02/03	35
22	2018/07/31	45	2020/02/27	35
23	2018/08/24	46	2020/03/22	35



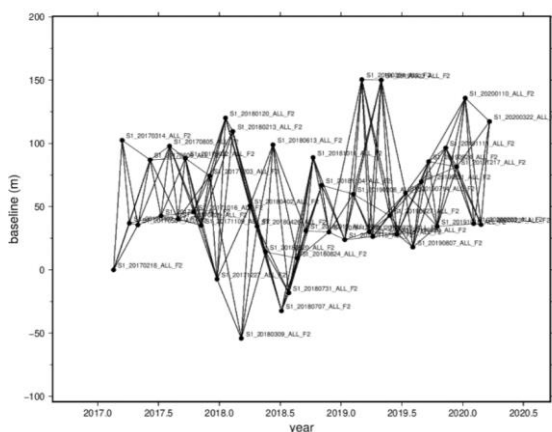
شکل ۶: مراحل کلی تداخل سنجی و تشکیل نقشه جابه‌جایی

Fig. 6: General steps of interferometry and formation of displacement map

که تصویر ۱۷ سپتامبر ۲۰۱۸ به‌عنوان تصویر اصلی و تصاویر دیگر به‌عنوان تصویر فرعی انتخاب شده و پیکسل‌های تصاویر فرعی نسبت به تصویر اصلی هم مرجع می‌شوند. برای انتخاب تصویر اصلی به‌صورت خودکار از نرم افزار اسنپ استفاده شد.

شبکه تداخل نگارهای مکانی و زمانی تصاویر سنتینل-۱

برای بررسی سری زمانی تصاویر سنتینل از روش SBAS استفاده گردید. در این روش، برای تشکیل تداخل نگار، از جفت تصویری که دارای کمترین طول خط مبنا از نظر زمانی و مکانی می‌باشند، استفاده شد. برای این کار ۴۶ تصویر ماهواره سنتینل-۱ از ۱۸ فوریه ۲۰۱۷ تا ۲۲ مارس ۲۰۲۰ پردازش گردید. در این مطالعه از نرم‌افزار GMTSAR برای تولید ۱۵۸ تداخل نگار با خط مبنا مکانی کمتر از ۱۳۰ متر و خط مبنا زمانی کمتر از ۱۰۰ روز استفاده شد، که در شکل (۷) نحوه انتخاب تصاویر برای تشکیل تداخل نگارها و خط مبنا مکانی آن‌ها بر حسب روز نمایش داده شده است.



شکل ۷: نمایش خط مبنا مکانی و زمانی تداخل نگارها

Fig. 7: Displaying the spatial and temporal baseline of interferometers

در مقابل، غیر همبستگی زمانی ناشی از عدم تشابه خواص بازپراکنشی اشیاء موجود در زمین در فاصله زمانی بین دو تاریخ برداشت تصویر است. بدین منظور تداخل نگارها به‌طور معمول از ترکیب جفت تصویری حاصل می‌شوند که دارای خط مبنا مکانی و زمانی کوچکی هستند. الگوریتم SBAS به‌طور کلی بر اساس قاعده پیکسل به پیکسل، از طریق رابطه (۱) بر روی تداخل نگارها پیاده می‌شوند [۱۶].

$$\left(T \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda r \sin \theta} \right) \left(\frac{V}{h_c} \right) = (\delta \phi) \quad (1)$$

که در آن T بیانگر ماتریسی از فاصله‌های زمانی مرجع، ν بردار میانگین سرعت در راستای خط دید برای یک پیکسل بین هر مرحله زمانی، h_c سیگنال توپوگرافی باقیمانده، $\delta \phi$ بردار مشاهدات مربوط به تغییرات فاز بازنده، λ طول موج رادار، r فاصله بین حسگر رادار تا هدف زمینی و θ زاویه فرودی است. این روش راه حل حداقل کمترین مربعات را ارائه می‌دهد. هدف اصلی در تحلیل سری زمانی، وارون کردن تداخل نگارها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های دریافت تصاویر با استفاده از روش کمترین مربعات است. با حل کمترین مربعات رابطه (۱) می‌توان مقدار فاز مربوط به هر تصویر راداری را برآورد کرد. مقدار فاز اولین تصویر صفر در نظر گرفته می‌شود.

پردازش داده‌ها

در این بخش ابتدا پردازش‌های لازم به‌منظور ایجاد سری زمانی و نقشه جابه‌جایی انجام گردید، این پردازش‌ها شامل انطباق هندسی تصاویر و تشکیل داخل نگارهای مکانی و زمانی بود که به‌صورت زیر انجام شد:

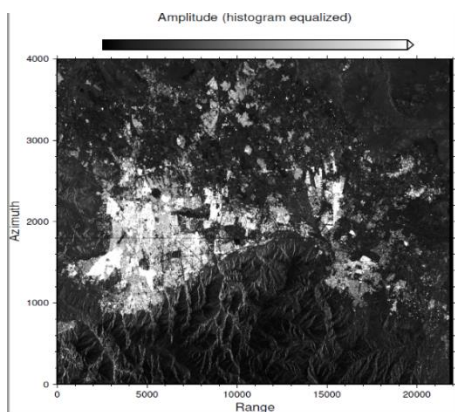
انطباق تصاویر

برای پردازش‌های تصاویر راداری، دو یا تعداد بیشتری تصویر باید به‌صورت یک دسته تصاویر (Stack) ثبت هندسی گردند. بدین ترتیب

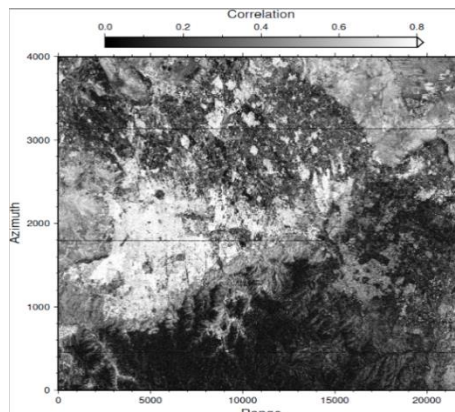
تحلیل سری زمانی استفاده شده است. نمونه‌ای از محصولات تولید شده در فرآیند تداخل سنجی راداری توسط GMTSAR در شکل‌های (۸) تا (۱۳) نشان داده شده است.

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، در پردازش تصاویر راداری در نرم افزار GMTSAR بر خلاف نرم‌افزارهای دیگر از جمله استامپس حذف خطاهای توپوگرافی و مداری به صورت یکجا و هنگام تشکیل تداخل نگار صورت می‌پذیرد.

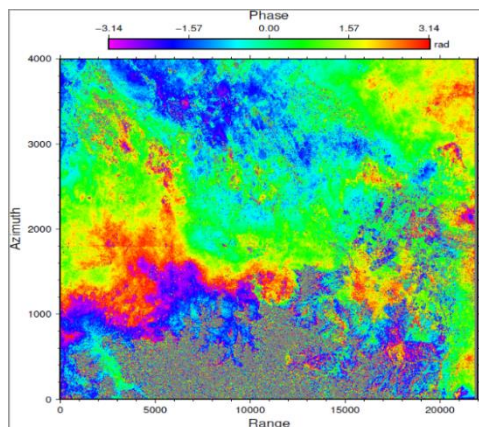
در واقع این روش بر پایه انتخاب تداخل نگارهای مناسب بین تصاویر دریافتی رادار جهت تداخل سنجی راداری و تعیین میزان جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد. معیار مورد استفاده در این روش انتخاب جفت تصاویری است که طول خط مبنای آن‌ها کوچک باشد. به عبارت دیگر، تنها تداخل نگارهایی تشکیل می‌شوند که جفت تصویر آن‌ها مسیرهای نزدیک به هم هستند و اختلاف مکانی بین مدارهایشان کوچک است [۳۲]. در این روش سری از روش کمترین مربعات برای



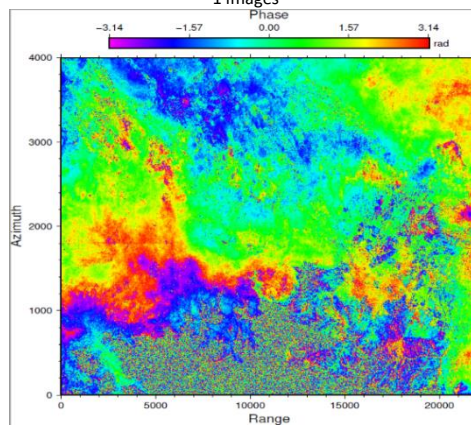
شکل ۹: نقشه دامنه تداخل نگار تولید شده
Fig. 9: Generated interferometer domain map



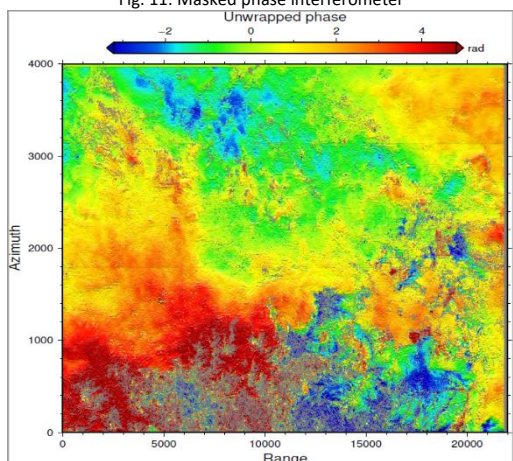
شکل ۸: نقشه همبستگی تولید شده از تداخل نگار بین دو تصویر سنتینل-۱
Fig. 8: Correlation map generated from interferometer between two Sentinel-1 images



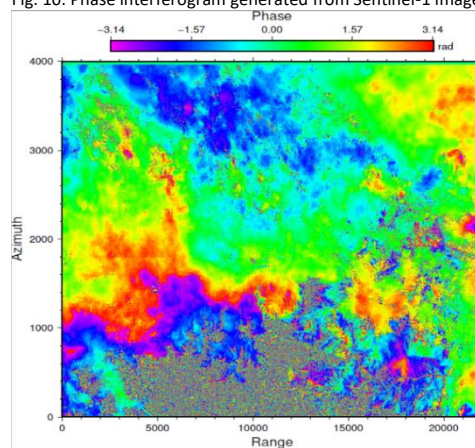
شکل ۱۱: تداخل نگار فاز ماسک شده
Fig. 11: Masked phase interferometer



شکل ۱۰: تداخل نگار فاز تولید شده از تصاویر سنتینل-۱
Fig. 10: Phase interferogram generated from Sentinel-1 images



شکل ۱۳: تداخل نگار تولید شده بعد از بازیابی فاز
Fig. 13: Unwrapped phase

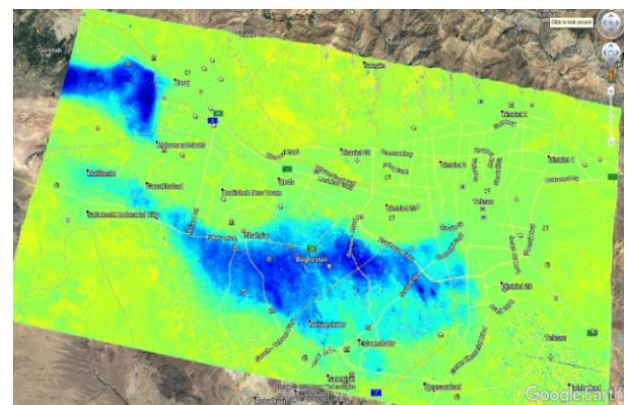
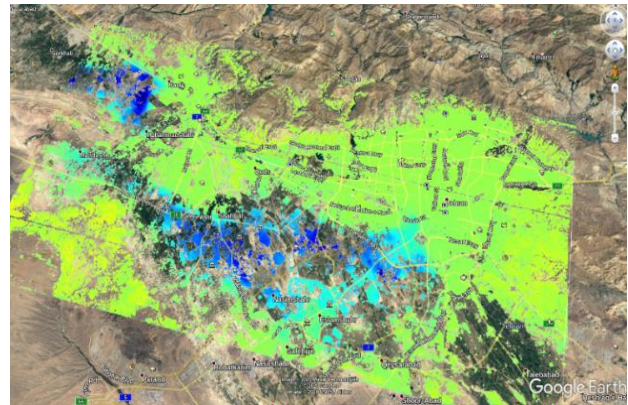


شکل ۱۲: تداخل نگار فاز ماسک شده و فیلتر شده
Fig. 12: Masked and filtered phase interferometer

نتایج حاصل از روش SBAS و نقشه‌های جابه‌جایی به‌دست آمده بیانگر حداکثر ۱۳۹ میلی‌متر فرونشست در محدوده زمانی مورد نظر در راستای دید ماهواره (LOS) (Line Of Sight) مربوط به شاخه غربی و جنوب غربی خطوط ریلی کشور به مرکزیت ایستگاه تهران می‌باشد. نقشه جابه‌جایی زمین و نرخ فرونشست در نواحی مختلف خطوط ریلی و ایستگاه‌های راه آهن در منطقه در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.

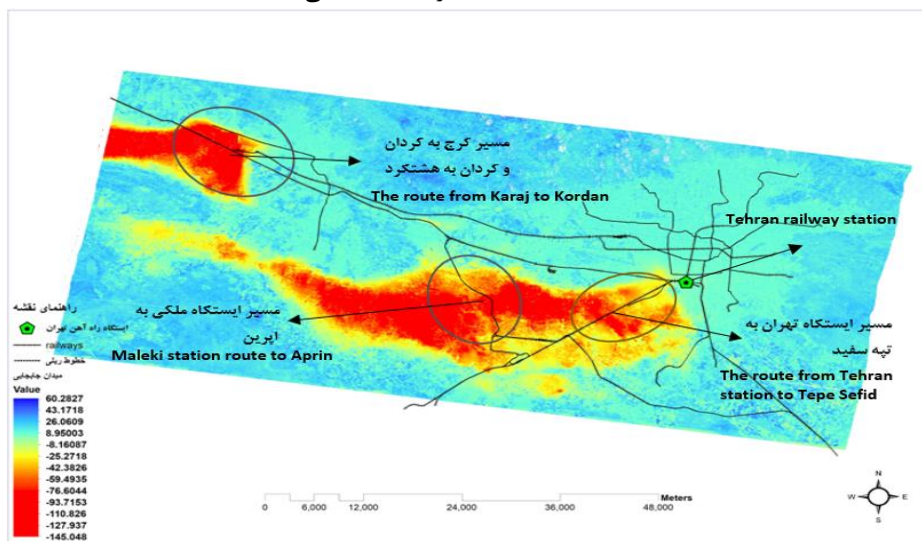
در شکل (۱۵) توزیع میزان فرونشست در ناحیه مورد بررسی، توسط رنگ‌های مختلف بر حسب میلی‌متر در سال نمایش داده شده است، همان‌طور که مشخص است بخش‌هایی از خطوط ریلی در معرض فرونشست زمین قرار دارند که می‌تواند خطرناک شود. مناطق با رنگ قرمز دارای بیشترین فرونشست و مناطق آبی رنگ کمترین نشست زمین در مناطق ریلی و حوالی آن می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره گردید، هدف اصلی این تحقیق، بررسی و تعیین میزان نشست زمین در خطوط ریلی پایتخت و سه شاخه خروجی آن به سمت نواحی بوده تا کمکی باشد برای شناسایی مناطق درگیر و دارای ریسک بالای فرونشست به‌منظور مقابله و کاهش خطرات ناشی از این پدیده. طبق نتایج به‌دست آمده، میزان نشست زمین در خود ایستگاه تهران حدود دو میلی‌متر در سال بوده که در حال حاضر ریسک بالایی به شمار نمی‌رود. مناطق پرخطر در شکل (۱۵) با بیضی مشخص گردیده است، بخش‌هایی از خطوط ریلی مربوط به بلاک‌های کرج به کردان محدوده کمال شهر و همچنین مسیر کردان به هشتگرد (۱۰۵ الی ۱۳۹ میلی‌متر در سال) و نیز بخش‌هایی از شاخه‌های جنوبی و جنوب غربی راه آهن تهران، مسیر مربوط به ایستگاه ملکی به گار مانوری آپرین، حوالی شهریار و ورامین (۸۵ الی ۱۳۹ میلی‌متر در سال) دارای ریسک بالایی هستند. علاوه بر مناطق ذکر شده، خطوط ریلی مربوط به بلاک‌های تهران به تپه سفید و اسلام شهر نیز به نسبت کمتر (۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر در سال) دچار پدیده فرونشست می‌باشند. مقادیر اعلام شده در راستای LOS می‌باشند.

نتایج سری زمانی حاصل از پردازش تصاویر سنتینل-۱ برای ایجاد سری زمانی و نقشه جابه‌جایی از ۱۵۸ تداخل نگار ایجاد شده در مرحله پردازش تصاویر، از نرم‌افزار GMTSAR استفاده شد. تداخل نگارهای نامناسب نیز از مرحله پردازش حذف شدند. برای ایجاد نقشه جابه‌جایی زمین از دو مقدار ۰/۰۸ و ۰/۰۲ برای میزان همدوسی استفاده گردید. شکل (۱۴ الف و ب).



شکل ۱۴: نقشه جابه‌جایی زمین با همدوسی های (الف) ۰/۰۸ و (ب) ۰/۰۲

Fig. 14: Land displacement map with difference coherences



شکل ۱۵: نقشه میزان فرونشست (میلیمتر بر سال) در منطقه مورد مطالعه و مسیرهای ریلی درگیر فرونشست

Fig. 15: Map of the amount of subsidence (mm/year) in the study area and the railway tracks involved in the subsidence

($51^{\circ}20'01''$ و $35^{\circ}41'50''$) واقع شده است، برای ایجاد سری زمانی حاصل از نتایج تداخل سنجی مربوط به این نقطه، می‌بایست مختصات راداری متناظر با مختصات جغرافیایی را بر روی فایل‌های جابه‌جایی پیدا کرد، برای این کار از نقشه جابه‌جایی در نرم افزار SNAP استفاده شد، مختصات ($X=860, Y=628$) نقطه متناظر این ایستگاه بر روی نقشه جابه‌جایی می‌باشد.

شکل (۱۷) سری زمانی جابه‌جایی زمین مربوط به ایستگاه دائم ژئودینامیک تهران را بین سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۲۰ نشان می‌دهد که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور ارائه شده است و شکل (۱۸) سری زمانی جابه‌جایی حاصل از تداخل سنجی راداری می‌باشد.

هر دو نمودار بالا رفتار مشابهی را در سال برای نقطه مورد نظر نشان می‌دهند. طبق نتایج تداخل سنجی راداری نرخ جابه‌جایی برای نقطه مذکور سه الی پنج میلی‌متر در جهت دور شدن از خط دید ماهواره می‌باشد، این در حالی است که نرخ جابه‌جایی به‌دست آمده از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک ۲ تا ۳ میلی‌متر در سال می‌باشد که به دلیل وجود منابع مختلف خطا اختلاف در حد چند میلی‌متر منطقی می‌باشد. البته لازم به ذکر است، جابه‌جایی به‌دست آمده از ایستگاه GPS در راستای قائم و جابه‌جایی حاصل از نتایج اینسار در راستای خط دید ماهواره می‌باشد.

اعتبار سنجی با داده‌های شبکه شمیم سازمان ثبت اسناد و املاک کشور از بین ایستگاه‌های موجود، دو ایستگاه مربوط به واحدهای ثبتی تهران (THTH) و کرج (ALKJ) در محدوده مطالعاتی این تحقیق قرار داشت که برای اعتبارسنجی نتایج تحقیق، داده‌های مربوط به ایستگاه ثابت شمیم کرج از طریق اداره کل کاداستر سازمان ثبت اسناد و املاک کشور تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اخذ شده از اداره کل کاداستر، در فرمت راینکس نسخه ۲ بودند که برای ایجاد سری زمانی از آن‌ها، نیاز به پردازش داشتند. روش‌های مختلفی برای پردازش فرمت راینکس وجود دارد که در این تحقیق از روش شبکه‌ای استفاده شد.

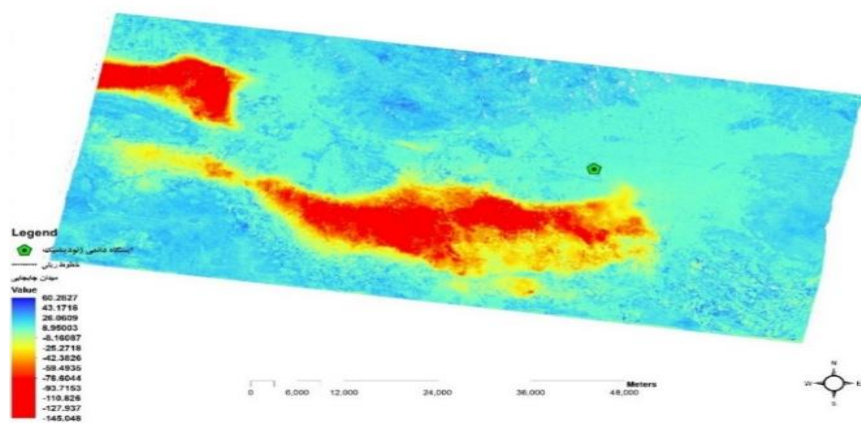
جدا از بحث خطوط ریلی، نتایج به‌دست آمده از تداخل سنجی راداری در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشینه فرونشست با نرخ ۱۴۰ میلی‌متر در سال (در راستای LOS) مربوط به منطقه شهریار می‌باشد. بررسی سطح آب‌های زیرزمینی از طریق داده‌های چاه‌های پیژومتری، حاکی از برداشت بی‌رویه آب در نواحی جنوبی استان تهران حوالی ورامین و شهریار می‌باشد [۳۳]. لازم به ذکر است، مقادیر فرونشست به‌دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات پیشین انجام شده در منطقه جنوب و جنوب غرب تهران که خطوط ریلی نیز در آنجا قرار دارد همخوانی دارد [۳۴-۳۷]. بنابراین به‌نظر می‌رسد هرچه سریعتر باید با اقدامات و روش‌های پیشگیرانه با آن‌ها مقابله نمود، تا با افزایش نرخ فرونشست تهدیدی برای خطوط ریلی و سایر تأسیسات موجود در منطقه نشود و منجر به حادثه‌ای نگردد.

نتایج و بحث

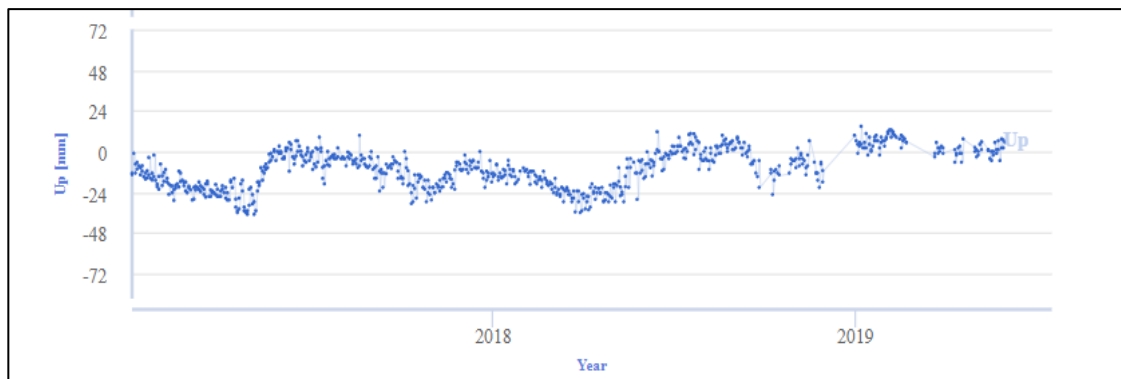
به‌منظور بررسی و تأیید جابه‌جایی به‌دست آمده از روش تداخل سنجی راداری، از داده‌های شبکه ژئودینامیک یا ترازبایی دقیق و همچنین داده‌های شبکه شمیم سازمان ثبت اسناد و املاک کشور استفاده گردید. همچنین باید نحوه و میزان ارتباط آن را نیز با دلایل مطروحه فرونشست در منطقه سنجید، که برای این کار از داده‌های چاه‌های پیژومتری و همچنین نوع و ضخامت خاک گمانه‌های حفاری استفاده گردید.

اعتبار سنجی مقدار فرونشست با داده‌های ایستگاه‌های دائم GNSS سازمان نقشه‌برداری کشور

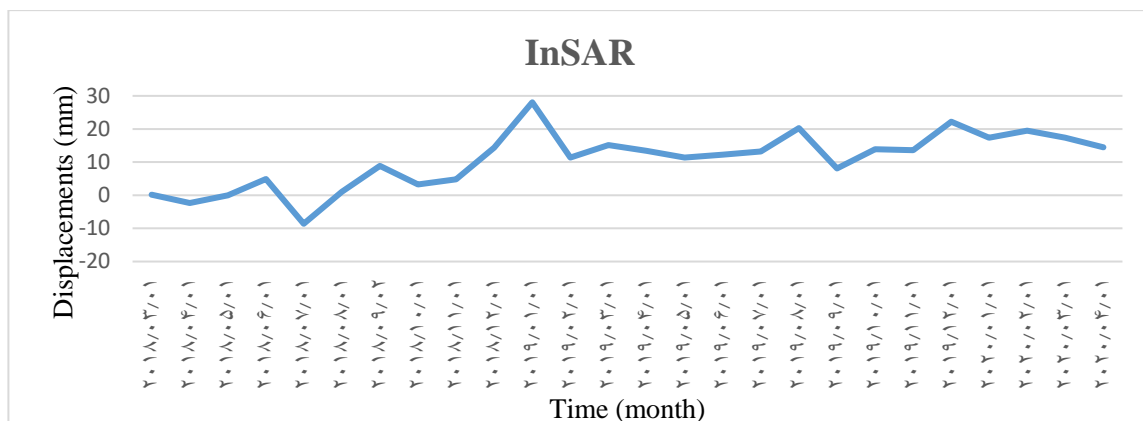
از بین ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیک کشور تنها ایستگاه GPS تهران که در محوطه سازمان نقشه‌برداری کشور واقع شده، در منطقه مورد مطالعه قرار دارد که برای بررسی صحت نتایج تداخل سنجی، از سری زمانی داده‌های این ایستگاه استفاده گردید. شکل (۱۶) موقعیت ایستگاه دائمی ژئودینامیک سازمان نقشه‌برداری کشور را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. ایستگاه دائم GNSS سازمان نقشه‌برداری در موقعیت جغرافیایی



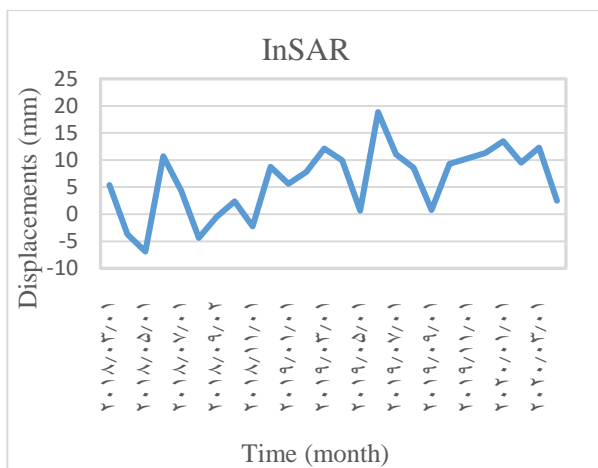
شکل ۱۶: موقعیت ایستگاه دائمی ژئودینامیک محوطه سازمان نقشه‌برداری - تهران
Fig. 16: The location of the permanent geodynamics station of the Mapping Organization-Tehran



شکل ۱۷: سری زمانی فرونشست زمین حاصل از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک تهران
 Fig. 17: The time series of land subsidence obtained from the data of Tehran Geodynamic Station



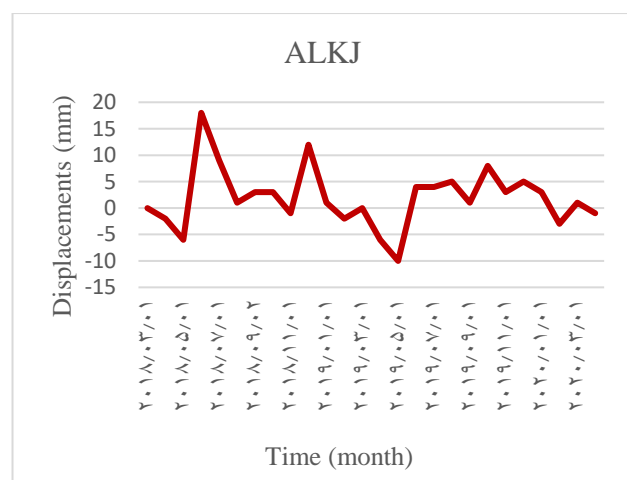
شکل ۱۸: سری زمانی فرونشست زمین حاصل از تداخل سنجی راداری
 Fig. 18: Time series of ground subsidence obtained from radar interferometry



شکل ۲۰: سری زمانی فرونشست حاصل از تداخل سنجی راداری
 Fig. 20: Time series of subsidence obtained from radar interferometry

طبق نتایج به دست آمده از تداخل سنجی راداری نرخ جابه‌جایی برای این نقطه در بازه زمانی مورد مطالعه ۷ الی ۸ میلی‌متر مثبت در سال در راستای LOS می‌باشد. مقدار جابه‌جایی متناظر به دست آمده از مشاهدات ایستگاه دائمی GNSS سامانه شمیم ۲ الی ۳ میلی‌متر می‌باشد. اختلاف به دست آمده می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد، اول این که مقدار جابه‌جایی در روش تداخل سنجی در راستای خط دید ماهواره

بعد از پردازش داده‌های راینکس سامانه شمیم، سری زمانی این داده‌ها ترسیم گردید. شکل (۱۹) سری زمانی مربوط به ایستگاه دائمی شمیم استان البرز - شهرستان کرج و شکل (۲۰) سری زمانی حاصل از تداخل سنجی راداری مربوط به نقطه متناظر این ایستگاه بر روی تداخل نگارها و فایل‌های جابه‌جایی را نشان می‌دهد.



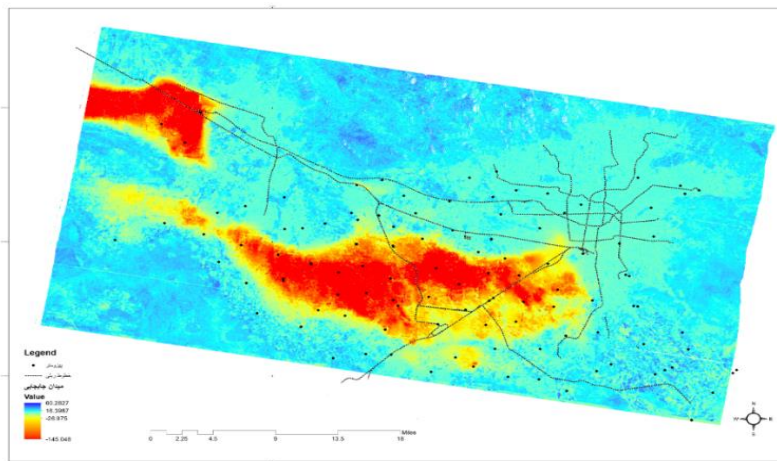
شکل ۱۹: سری زمانی جابه‌جایی مربوط به ایستگاه ثابت سامانه شمیم کرج
 Fig. 19: The displacement time series related to the fixed station of the Shamim Karaj

راداری و مقایسه موقعیت و وضعیت این نشست‌ها و بالا آمدگی‌ها با موقعیت چاه‌ها و تراکم آن‌ها و افت تراز سطح آب زیرزمینی و روند تغییرات افت، میزان ارتباط بین این دو مقوله بررسی گردید. شکل (۲۱) موقعیت چاه‌های پیژومتری تهران و البرز را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

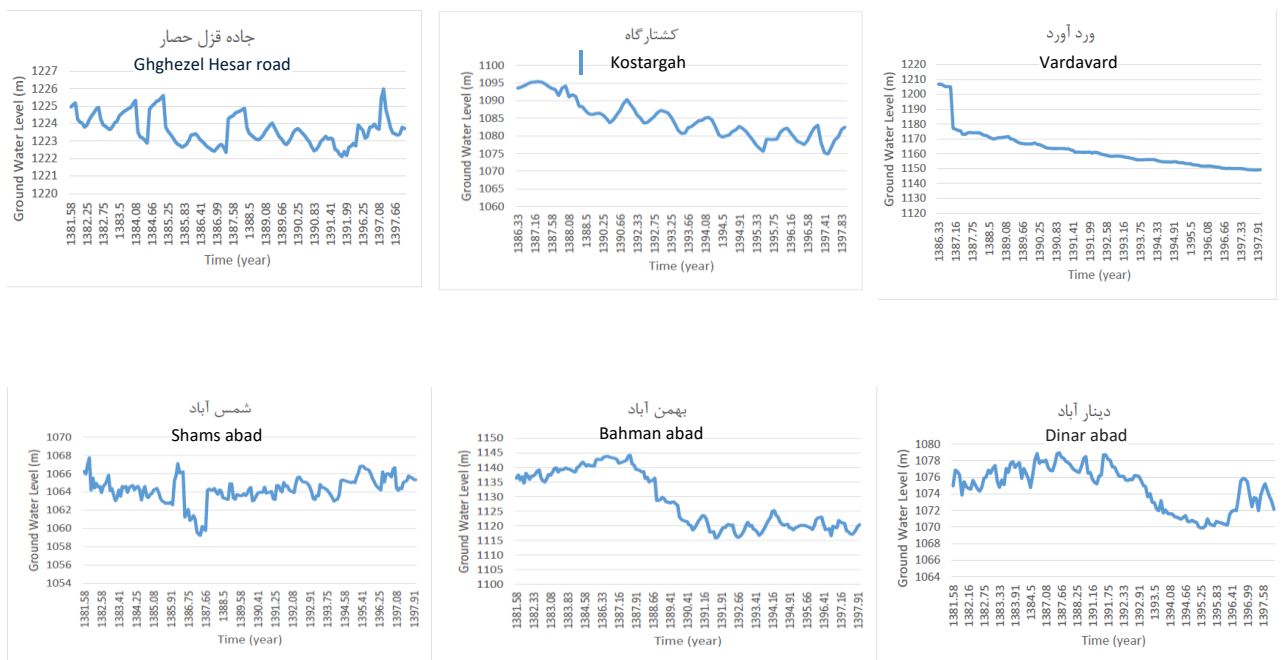
تعدادی از پیژومترهای موجود در منطقه جهت بررسی ارتباط بین نرخ فرونشست و میزان افت‌وخیز سطح آب چاه‌ها انتخاب شدند. بیشتر از داده‌های چاه‌هایی استفاده شد که در منطقه با نرخ نشست بالا بود و هیدروگراف تراز سطح آب زیرزمینی برای این چاه‌ها ترسیم گردید. برای ۱۲ چاه پیژومتری هیدروگراف تراز سطح آب زیرزمینی برای بازه زمانی نزدیک به بیست سال ترسیم شد، شکل (۲۲).

می‌باشد درحالی‌که در ایستگاه شمیم مقدار جابه‌جایی در راستای قائم محاسبه شده است. دومین منبع خطا که به‌نظر می‌رسد منشأ اصلی خطا هم باشد خطای ناشی از روش به‌کار رفته برای پردازش داده‌های راینکس مشاهدات ایستگاه سامانه شمیم می‌باشد.

بررسی میزان ارتباط بین پدیده فرونشست و تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و داده‌های چاه‌های مشاهداتی برای بررسی علت رخداد فرونشست در منطقه و میزان ارتباط آن با تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، داده‌های تعدادی از چاه‌های پیژومتری محدوده مورد مطالعه از طریق شرکت آب منطقه‌ای تهران تهیه شد و نمودار سری زمانی تغییرات تراز سطح آب برای آن‌ها ترسیم گردید. با استفاده از نقشه جابه‌جایی به‌دست آمده از تداخل سنجی



شکل ۲۱: موقعیت چاه‌های پیژومتری تهران و البرز بر روی نقشه جابه‌جایی
Fig. 21: Location of Tehran and Alborz piezometric wells on displacement map



شکل ۲۲: هیدروگراف تراز آب زیر زمینی چاه‌های منطقه
Fig. 22: Hydrograph of underground water level of wells in the region

آب زیرزمینی متراکم شده و منجر به وجود آمدن فرونشست در آن مناطق می‌گردند.

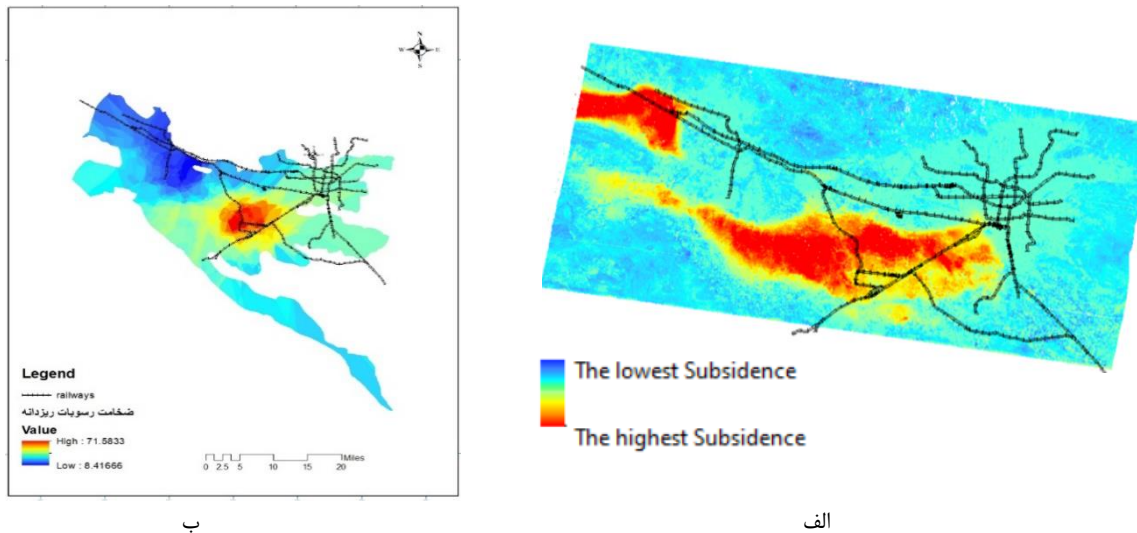
به‌همین منظور برای بررسی دقیق‌تر ارتباط فرونشست با نوع و ضخامت لایه‌های خاک منطقه نیاز به تهیه داده‌های خاک شناسی و گمانه‌های حفاری و اکتشافی محدوده مورد مطالعه می‌باشد. بخشی از این داده‌ها توسط شرکت آب منطقه‌ای در دسترس عموم قرار گرفته است. از آنجا که اطلاعات حاصل از هر لاگ حفاری، ضخامت ریزدانه‌ها در همان محل را ارائه می‌دهد، برای تعیین نقشه پراکندگی ریزدانه‌ها در محدوده دشت، باید از روش درون‌یابی استفاده کرد. چتر سیماب و همکاران، ۱۴۰۰ [۳۶] نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم پذیر را به روش درون‌یابی کریجینگ به دست آوردند شکل (۲۳-ب). طبق این نقشه و اطلاعات گمانه‌های حفاری بالا و سایر گمانه‌های آبخوان‌های موجود، آن‌ها علت اصلی فرونشست در این منطقه را کاهش سطح آب زیرزمینی در مناطق با ضخامت زیاد رسوبات ریزدانه اعلام نمودند [۳۶]. صادقی و همکاران و همین‌طور محمودپور و همکاران، نیز بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از نوع خاک منطقه، گزارش نمودند که ضخامت واحدهای رسی ریزدانه با نفوذ پذیری کم در بخش‌های جنوبی دشت و همچنین از سوی غرب به شرق افزایش می‌یابد و این افزایش همراه با بیشتر شدن حدود روانی و خمیری خاک‌ها می‌باشد [۳۸، ۳۹]. لذا انتظار می‌رود که میزان نرخ فرونشست زمین به ترتیب در بخش‌های جنوبی و شرقی نسبت به بخش‌های شمالی و غربی دشت بیشتر باشد.

نقشه فرونشست به‌دست آمده در تحقیق حاضر شکل (۲۳-الف) مطابقت بسیار خوبی با نتایج پیشین ذکر شده دارد به‌طوری‌که در بخش‌های جنوبی و شرقی دشت تهران که جنس آبخوان در چاه‌های این مناطق از نوع ریزدانه رسی و یا رس سیلتی می‌باشد، بیشترین فرونشست رخ داده است و چنان‌چه در شکل (۲۳-ب) دیده می‌شود در مناطق دارای ضخامت رسوبات ریزدانه بالا، فرونشست زیادی اتفاق افتاده است. بنابراین در این نواحی حتی بعد از این که کاهش تراز آب زیرزمینی از طریق تغذیه آبخوان جبران شده است هم نشست منطقه ادامه پیدا کرده که این نشان می‌دهد نشست زمین در این نواحی غیر قابل بازگشت است. در مقابل، در مناطق فاقد فرونشست یا فرونشست کم، جنس آبخوان از نوع رسوبات درشت دانه می‌باشد و نشست در این نواحی بسیار کم و نزدیک صفر می‌باشد، که این به‌دلیل وجود رسوبات درشت دانه است، زیرا این رسوبات درجه تراکم‌پذیری پایینی دارند و با افزایش تنش مؤثر، دچار تراکم به‌میزان قابل توجهی نمی‌شوند، به همین علت میزان نشست در این نواحی کم است.

چنان‌چه در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود اکثر چاه‌های پیژومتری کاهش سطح آب را شاهد هستند و می‌توان افت سطح منابع آب زیرزمینی را دلیل اصلی نشست در منطقه مورد مطالعه ذکر کرد. اما این، تنها یکی از عوامل مؤثر در فرونشست می‌باشد، همان‌طور که در نمودارهای بالا مشخص است، گرچه در همه این چاه‌ها سطح آب منابع زیرزمینی کاهش پیدا کرده ولی میزان ارتباط این کاهش سطح آب و نرخ فرونشست برای مناطق مختلف یکسان نمی‌باشد، لذا باید عوامل دیگر را نیز در این قضیه دخیل دانست. به‌طور کلی عوامل بسیاری از نظر کمی و کیفی در ایجاد فرونشست زمین در اثر برداشت آب‌های زیرزمین مؤثرند، مانند نوع، جنس و ضخامت لایه‌های خاک منطقه و آبخوان، تخلخل مواد تشکیل دهنده این لایه‌ها، تراکم و ترکیب لایه‌ها، نحوه پمپاژ، ساختار زمین شناسی منطقه، هدایت هیدرولیکی لایه‌های آبدار، بارندگی، دما، میزان رسوب‌پذیری، اندازه ذرات و ضخامت رسوبات ریزدانه به ویژه رس و... [۳۸].

دومین فاکتور مهم در ایجاد فرونشست ضخامت رسوبات ریزدانه است. به‌طور کلی نوع خاک تشکیل دهنده سفره، عامل بسیار مهمی در کنترل پدیده فرونشست می‌باشد [۳۱، ۳۰]. به‌عنوان مثال افت سطح آب زیرزمینی در جایی که خاک تشکیل دهنده سفره رسوبات درشت دانه می‌باشد، تراکم قابل توجهی در سفره ایجاد نمی‌کند، و متعاقب آن در این مناطق یا نشستی رخ نمی‌دهد یا سرعت نشست بسیار پایین می‌باشد. پس یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری و میزان فرونشست زمین، اثر تراکم مواد رسوبی ریزدانه به‌ویژه رس می‌باشد [۳۸، ۳۶]. بنابراین به‌منظور بررسی دقیق‌تر علت نشست، در برخی از مناطق باید نوع، جنس و ضخامت خاک را در لایه‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. برای این کار باید اطلاعات گمانه‌های حفاری را تهیه کرد که وب‌سایت شرکت مدیریت منابع آب ایران (www.wrm.ir) این اطلاعات را جهت بررسی جنس آبخوان در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در بخش بعدی در خصوص ارتباط فرونشست منطقه با نوع و جنس خاک توضیح داده می‌شود.

بررسی میزان ارتباط پدیده فرونشست با نوع و جنس خاک منطقه عوامل متعددی در وقوع فرونشست زمین مؤثر می‌باشد، طبق نتایج پژوهش‌های صورت گرفته [۲۹، ۳۱] یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد نشست زمین در آبخوان‌های کشور بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در مناطقی است که لایه‌های تراکم‌پذیر با ضخامت قابل ملاحظه در آبخوان وجود دارند. این لایه‌ها معمولاً از رس تشکیل شده و نیمه تراوا می‌باشند، که با افزایش فشار منفذی ناشی از کاهش فشار



شکل ۲۳ الف: دسته بندی مناطق بر اساس میزان فرونشست (زیاد، متوسط، کم) ب) ضخامت رسوبات ریزدانه تراکم پذیر در منطقه [۳۴]

Fig. 23 a: Classification of regions based on the amount of subsidence (high, medium, low)- b: The thickness of compressible fine-grained sediments in the region

ماهواره برای مسیر ۳۵ می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده در این تحقیق، مناطق پرخطر شامل بخش‌هایی از خطوط ریلی مربوط به بلاک‌های کرج به کردان محدوده کمال شهر و همچنین مسیر کردان به هشتگرد (میزان فرونشست در محدوده ۱۰۵ الی ۱۳۹ میلی متر در سال) و نیز بخش‌هایی از شاخه‌های جنوبی و جنوب غربی راه آهن تهران، مسیر مربوط به ایستگاه ملکی به گار مانوری آپرین، حوالی شهریار و ورامین (۸۵ الی ۱۳۹ میلی متر در سال) می‌باشند.

در نهایت برای اعتبارسنجی مقادیر فرونشست به دست آمده از روش ماهواره‌ای، از داده‌های ایستگاه دائم ژئودینامیک تهران مربوط به سازمان نقشه‌برداری کشور و داده‌های ایستگاه‌های دائم شمیم سازمان ثبت اسناد و املاک استفاده گردید. نتایج به دست آمده با در نظر گرفتن خطاهای مربوط به هر کدام از روشها نسبتاً خوب بود. همچنین برای بررسی ارتباط بین پدیده فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی و نوع خاک منطقه از داده‌های ۱۲ چاه پیژومتری دشت‌های تهران و کرج و اطلاعات گمانه‌های حفاری تعدادی از چاه‌های پیژومتری منطقه استفاده شد. با بررسی رابطه‌ی افت سالانه آب و فرونشست و همچنین نوع و جنس و ضخامت خاک منطقه مشخص گردید که علت اصلی نشست در منطقه، افت سطح آب‌های زیر زمینی در مناطق با ضخامت بالای رسوبات ریز دانه می‌باشد.

از جمله محدودیت‌های تحقیق می‌توان به قدرت تفکیک مکانی نسبتاً پایین تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ برای پایش ساختارهای خطی مانند ریل راه آهن و همچنین عدم قطعیت داده‌های فراهم شده از سازمان نقشه‌برداری (فاصله نسبتاً زیاد ایستگاه دائمی ژئودینامیک سازمان نقشه‌برداری از منطقه مورد مطالعه) و داده‌های اداره کل کاداستر (روش بکار رفته در پردازش مشاهدات ایستگاه سامانه شمیم) که به منظور بررسی صحت نتایج تداخل سنجی استفاده شده بودند، اشاره نمود.

نتیجه‌گیری

یکی از مخاطراتی که به‌خصوص در سال‌های اخیر در مناطق مختلف دنیا و ایران خودنمایی می‌کند، پدیده فرونشست است. فرونشست زمین یکی از مشکلات زیست محیطی است که باید در تحقیقات اصولی و طولانی مدت مورد بررسی قرار گیرد و به دلیل مشکلات و تبعاتی که به وجود می‌آورد باید به طور مستمر و دائم، پایش و کنترل شود. از تبعات این پدیده می‌توان به آسیب دیدگی خطوط ریلی و جاده‌ها اشاره کرد که می‌تواند منجر به حوادث جبران‌ناپذیر مالی و جانی شود. بنابراین پایش این رخداد و بررسی مقدار جابه‌جایی و تغییر شکل در دو بعد زمان و مکان ضروری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای پایش نشست زمین وجود دارد که به دلیل امکانات محدود و هزینه‌بر و زمان‌بر بودن روش‌های مرسوم مانند ترازبایی دقیق و استفاده از اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های دائم GPS و محدود بودن این ایستگاه‌ها امکان پایش دائم و یکپارچه دشت‌ها و مناطق دیگر وجود ندارد. از این رو، برای پایش دائمی این پدیده باید از روش‌های به صرفه‌تر با امکان دسترسی پیوسته، مانند تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های پردازش آن‌ها استفاده نمود. در این تحقیق برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی نشست زمین در خطوط ریلی پایتخت و سه شاخه خروجی آن از روش تداخل سنجی راداری بر مبنای سری زمانی خط مبنای کوتاه (SBAS) استفاده گردید.

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره سنتینل-۱ طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ مربوط به مدار پایین‌رو مسیر ۳۵ با تعداد ۴۶ تصویر استفاده شد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر سنتینل-۱ با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR و روش خط مبنای کوتاه نشان می‌دهد به‌طور کلی نرخ جابه‌جایی پس از حذف خطاهای مداری و باقیمانده فاز توپوگرافی با استفاده از فایل‌های مداری و مدل ارتفاعی رقومی با قدرت تفکیک ۳۰ متری در محدوده ۱۳۹- تا ۴۹+ میلی متر در سال در راستای خط دید

[9] Stramondo S, Trasatti E, Albano M, Moro M, Chini M, Bignami C, Polcari M, Saroli M. Uncovering deformation processes from surface displacements. *Journal of Geodynamics*. 2016 Dec 1;102:58-82.

<https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.08.001>

[10] Polcari M, Montuori A, Bignami C, Moro M, Stramondo S, Tolomei C. Using multi-band InSAR data for detecting local deformation phenomena induced by the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *Remote sensing of environment*. 2017 Nov 1;201:234-42. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.08.001>

[11] Stramondo S, Bozzano F, Marra F, Wegmuller U, Cinti FR, Moro M, Saroli M. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*. 2008 Jun 16;112(6):3160-72.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.008>

[12] Polcari M, Albano M, Saroli M, Tolomei C, Lancia M, Moro M, Stramondo S. Subsidence detected by multi-pass differential SAR interferometry in the Cassino Plain (Central Italy): joint effect of geological and anthropogenic factors?. *Remote Sensing*. 2014 Oct 13;6(10):9676-90.

<https://doi.org/10.3390/rs6109676>

[13] Della Campania C. Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of. *Remote Sensing of Environment*. 2014;148:58-69.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014>

[14] Milillo P, Perissin D, Salzer JT, Lundgren P, Lacava G, Milillo G, Serio C. Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2016 Oct 1;52:221-9.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.013>

[15] Fornaro, G., D. Reale, and S. Verde, *Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012. 10(4): p. 677-681. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.013>

[16] Serrano-Juan A, Pujades E, Vázquez-Suñe E, Crosetto M, Cuevas-González M. Leveling vs. InSAR in urban underground construction monitoring: Pros and cons. Case of la sagrera railway station (Barcelona, Spain). *Engineering Geology*. 2017 Feb 23;218:1-1. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.016>.

[17] Jeon SS, Park YK, Eum KY. Stability assessment of roadbed affected by ground subsidence adjacent to urban railways. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018 Aug 24;18(8):2261-71.

<https://doi.org/10.5194/nhess-10-2391-2010>

[18] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2001 Jan;39(1):8-20.

<https://doi.org/10.1109/36.898661>

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

با تشکر از سازمان نقشه‌برداری کشور بابت در اختیار دادن سری زمانی جابه‌جایی زمین مربوط به ایستگاه دائم ژئودینامیک تهران و اداره کل کاداستر سازمان ثبت اسناد و املاک کشور بابت در اختیار دادن داده‌های مربوط به ایستگاه ثابت شمیم کرج.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است».

منابع و مأخذ

[1] Galloway DL, Burbey TJ. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology* 19: 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>

[2] Available from: <https://www.isna.ir/news/97081305980>

[3] Nabochenko O, Sysyn M, Kovalchuk V, Kovalchuk Y, Pentsak A, Braichenko S. STUDYING THE RAILROAD TRACK GEOMETRY DETERIORATION AS A RESULT OF AN UNEVEN SUBSIDENCE OF THE BALLAST LAYER. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019 Jan 31;97(7).

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154864>

[4] Masoumi Z, Mousavi Z, Hajeb Z. Long-term investigation of subsidence rate and its environmental effects using the InSAR technique and geospatial analyses. *Geocarto International*. 2022 Dec 12;37(24):7161-85.

<https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1964616>

[5] Gao M, Gong H, Chen B, Zhou C, Chen W, Liang Y, Shi M, Si Y. InSAR time-series investigation of long-term ground displacement at Beijing Capital International Airport, China. *Tectonophysics*. 2016 Nov 22;691:271-81.

[6] Chen, B., et al., *Investigating land subsidence and its causes along Beijing high-speed railway using multi-platform InSAR and a maximum entropy model*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021. 96: p. 102284.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.016>

[7] Ranjbarmanesh, N., Entezari, Mozghan., Ramesht, Mohammad Hossein, *Evaluation of groundwater drawdown on subsidence of Mahidasht plain* Master Thesis, *Geomorphology*. Isfahan University, 1392. [In Persian]

[8] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K, Rabaute T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *nature*. 1993 Jul 8;364(6433):138-42. <https://doi.org/10.1038/364138a0>

- [30] Zhu M, Dong SC, Yin HW. Spatial-temporal ground deformation study of Suzhou area from 2007 to 2010 based on the SBAS InSAR method. *Journal of Geo-information Science*. 2016;18(10):1418-27.
- [31] Babaei S S, M.Z., Roostaei M, *Time Series Analysis of SAR Images Using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) Approaches to Determining Subsidence Rate of Qazvin Plain*. JGST. 2016; 5 (4) :95-111. [In Persian]
- [32] Hanssen RF. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media; 2001 Apr 30. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
- [33] Razmghir, R., Mosavi, Morteza., Shemshaki, Amir., Boloorchi, Mohammad Javad, *Investigation Tehran-Shahriar plain subsidence due to uncontrolled extraction of groundwater*. first national conference on costal land water resources management, Sari, 1389. [In Persian]
- [34] Y. Maghsoudi, R. Amani and H. Ahmadi3A, "Study on Land Subsidence in West of Tehran Using Sentinel-1 Images and Persistent Scatterers Interferometry" *Iran-Water Resources Research*, Volume 15, No. 1, Spring 2019 [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.1.22.9>
- [35] A.safar, F.jafari, M. tavakoli "Land subsidence monitoring and its relationship with groundwater withdrawal, Case study: Karaj-Shahriyar plain" *Quantitative geomorphology research*, Volume 5, p. 82-93, 2018. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1395.5.2.6.8>
- [36] Chatsimab, Z., Alesheikh, A., Voosoghi, B., Behzadi, S., Modiri, M. Investigating the effect of aquifer type and groundwater level drop on subsidence rate using radar interference technique and field data (Case study: Tehran-Karaj-Shahriar aquifer area). *Advanced Applied Geology*, 2021; 10(4): 683-689. doi: 10.22055/aag.2020.30557.2028. [In Persian] <https://doi.org/10.22055/aag.2020.30557.2028>
- [37] M. amigh pey, A. saadat, A. molaei, Y. jamour "The first phase of studies to prepare the country's comprehensive subsidence atlas in the country's mapping organization, The 5th National Geomatics Conference and Exhibition and the 3rd Location Information Technology Engineering Conference, 1397 . [In Persian].
- [38] Sadeghi, J., Hamidian, Hadi, *Investigation of alluvial land subsidence due to pressure reduction in aquifers and how the type of alluvium affects land subsidence in Tehran plain*. The Second National Conference on Geotechnical Engineering of Iran, Kermanshah, 1393. [In Persian]
- [39] Mahmoudpour, M., Khamsehchian, M., Nikudel, M., Ghasemi, M. Engineering - hydrogeological model of land subsidence area in the southwest of Tehran (Tehran – Shahriyar plain). *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 2017; 9(Number 3 & 4): 1-17. [In Persian]
- [19] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2002 Nov;40(11):2375-83. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- [20] Casu F, Manzo M, Lanari R. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*. 2006 Jun 15;102(3-4):195-210. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.023>
- [21] Shami, Siavash, et al. "Assessments of ground subsidence along the railway in the Kashan plain, Iran, using Sentinel-1 data and NSBAS algorithm." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112 (2022): 102898. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102898>
- [22] Polcari, Marco, et al. "Anthropogenic subsidence along railway and road infrastructures in Northern Italy highlighted by Cosmo-SkyMed satellite data." *Journal of Applied Remote Sensing* 13.2 (2019): 024515-024515. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.024515>
- [23] Shi, Min, et al. "Monitoring differential subsidence along the beijing–tianjin intercity railway with multiband SAR data." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16.22 (2019): 4453. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224453>
- [24] L Lu Y, Chen D. Land Subsidence Monitoring Along Highway And Railway in SU-XI-CHANG Area. In2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC) 2019 May 24 (pp. 1908-1911). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITAIC.2019.8785579>
- [25] Luo, Qingli, Jian Li, and Yuanzhi Zhang. "Monitoring subsidence over the planned Jakarta–Bandung (Indonesia) high-speed railway using Sentinel-1 multi-temporal InSAR data." *Remote Sensing* 14.17 (2022): 4138. <https://doi.org/10.3390/rs14174138>
- [26] Aslan G, Cakir Z, Lasserre C, Renard F. Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing*. 2019 Jan 5;11(1):85. <https://doi.org/10.3390/rs11010085>
- [27] Hossein Zadeh, m., " *Landslide Hazard Zonation of Tehran, s Northern slopes "* (Master Thesis), Faculty Of Earth Science, in Department Of Environmental Geology and Hydrology. 1393, Shahrood Industrial University. [In Persian]
- [28] Iran, R.s.o.t.I.R.o. Wednesday 2022-2-16 20:13.
- [29] Pakkhesal, R., *Compilation optimum model of Tehran – Karaj’s Groundwater monitoring network by hybrid geostatistical model*, (Master Thesis), in Department of Water and Environmental Engineering. 1394, Shahrood Industry Faculty. [In Persian]



دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری-سنجش از دور بترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۶ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران دریافت نمودند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه کاربرد یادگیری ماشین در برآورد پارامترهای جوی می‌باشد و همچنین کاربردهای سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، کشاورزی، مدیریت جنگل‌ها، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل‌سازی محیطی با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌باشد. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: پردازش تصاویر اپتیکی و راداری، یادگیری ماشین، توسعه کاربردهای سنجش از دور.

Javadnia, E. Assistant Professor at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ javadnia@znu.ac.ir

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES




جلیل پیری دارای تحصیلات کارشناسی در رشته مهندسی عمران- نقشه‌برداری و کارشناسی ارشد- ژئودزی از دانشگاه زنجان می‌باشد. وی از سال ۱۳۹۷ تا کنون به عنوان کارشناس نقشه‌برداری و کاداستر در اداره ثبت اسناد و املاک استان زنجان مشغول به خدمت می‌باشد.

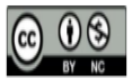
Piri, J. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ j.piri@znu.ac.ir

اسلام جوادنیا استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و

Citation (Vancouver): Piri J, Javadnia E. [Subsidence Monitoring along Tehran Railway: An Analysis of InSAR and Ground Observations]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(1): 97-112

 <https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.10771.1059>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)