



Applying PS-InSAR Technique to Identify the Effects of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran City

Sasan Zangenehtabar¹, Mojtaba Yamani^{2*}, Mohammad Sharifikia³,

Seyed Mousa Hoseini⁴, Masoome Amighpey⁵

¹ Ph.D. Student in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor in Remote Sensing, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor in Water Resources Engineering, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

⁵ Head of the Precision Leveling and Radar Interferometry Department, National Cartographic Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History

Received: 26 May 2025

Revised: 22 August 2025

Accepted: 15 September 2025

Available Online: 15 September 2025

Keywords:

Land Subsidence

PS-InSAR

Tehran City

Road Bridges

In this study, using the permanent scatterer radar interferometry technique, Sentinel 1 images were processed in the period of 2022 to investigate the effects of subsidence on urban structures in the southwest of Tehran. For this purpose, GMTSAR and Stamps softwares were used. Also, using groundwater level data from wells in the study area, the standardized cumulative amount of groundwater level changes was calculated. The results of radar processing indicate a displacement rate between +3 and -95 mm per year along the satellite line of sight in the southwest of Tehran. The maximum subsidence is related to the south of region 18 and the western part of region 19 at -70 mm per year. The displacement and lowering of bridge decks due to subsidence was about 2.3 to 4.5 cm per year. Field visits to the studied bridges show that the effects of land subsidence are clearly visible at Bridge No. 3 (intersection of Kazemi highway and Shokofeh Blvd). The results of the study of the relationship between groundwater level changes and elevation changes of permanent scatterer on bridge indicate a high correlation between the two. The high correlation confirms that in addition to the sinking effects of subsidence, hydrological saturation of the soil is effective in the elevation of the ground surface and man-made structures.

* Corresponding author: Dr. Mojtaba Yamani

E-mail address: myamani@ut.ac.ir

How to cite this article: Zangenehtabar, S., Yamani, M., Sharifikia, M., Hoseini, S. M., & Amighpey, M. (2025). Applying PS-InSAR Technique to Identify the Effects of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran City. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeht.2025.93735.1575>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Land subsidence is the response of the earth's surface to the development, exploitation and evolution of underground space caused by natural and human factors. Due to climate change and reduced rainfall, increasing population growth and increasing water demand, human intrusion into groundwater aquifers has increased, and groundwater abstraction is the most common cause of subsidence. Subsidence-induced subsurface voids can lead to catastrophic consequences for structures, which further increases the need for geosynthetic reinforcement methods to mitigate these effects. Using the radar interferometry technique, suspicious displacements of human-made structures can be monitored on a monthly time scale. Furthermore, there are two main features that make the interferometry technique attractive to the scientific community. The first is that it provides a high-resolution two-dimensional representation of deformation over 10–100 km. The second is the high accuracy (up to 1 mm/year) in measuring deformation. Previous research on Tehran's subsidence has mostly led to the preparation of a subsidence map and its limits, and no research has been conducted to date on the impact of subsidence on urban structures and infrastructure. In this study, using radar interferometry and the permanent scatterer method, the behavior of road bridges in Tehran city has been investigated in relation to the subsidence zone, and we seek to investigate to what extent subsidence has affected bridges located within the subsidence zone.

Material and Methods

In this study, single-view complex radar images (SLC) of the Sentinel 1 satellite in VV polarization were used in the period of 2022 with a time interval of 12 days. The number of selected images is 28 pieces. The images are in the low-pass mode (Descending) and are selected from the path 35. This dataset was processed using the PS-InSAR technique using GMTSAR and Stamps software. The standardized cumulative value for the groundwater level of each well was obtained using data from piezometric wells in the study area from 1381 to 1401.

Results and Discussion

Radar processing results indicate a displacement rate of between +3 and -95 mm/year along the satellite line of sight in 2022. The maximum subsidence is in the south of region 18 and the western part of region 19 at 70 mm/year. The rate of displacement and lowering of bridge decks due to subsidence has been about 2.3 to 4.5 centimeters per year. Field visits to the studied bridges indicate that most bridges are affected by ground subsidence in the form of opening of cracks in the bridge wall and cracking of the bridge deck asphalt. In the meantime, Bridge No. 3 clearly shows the effects of ground subsidence. In this part, a 20-centimeter-deep hole has been created, the bridge wall facade has collapsed, the side steps of the bridge have sunk, and the side tables of the bridge have curved outwards. The results of the standardized cumulative value of piezometers in the subsidence area all indicate a sharp decline in groundwater since 2013. In order to investigate the relationship between groundwater level changes and bridge elevation changes, the correlation between the time series graph of PS points and changes in piezometer water levels for the same time period (2022) was determined. The correlation was above the significance level of the data (0.37).

Conclusions

The results of the study of the relationship between groundwater level changes and bridge height changes indicate a high correlation between the height of the piezometer water level and changes in permanent scatterers. From the high correlation between the two, it can be understood that the land subsidence is strongly affected by groundwater level changes, and the rise and fall of the water table will directly affect the land above it. With this in mind, it can be seen that excessive groundwater withdrawal and the continuous drop in its level have a direct role in land subsidence in southwest Tehran, which can have irreparable effects on man-made structures in this area. The behavior of the permanent scatterers selected on the bridges shows that in addition to being affected by the long-term subsidence process caused by the

drop in groundwater level, the bridges are also strongly affected by its short-term fluctuations, so that the rise in groundwater level has caused an upward trend in the permanent scatterer diagram.



به کارگیری تکنیک PS-InSAR برای شناسایی تاثیرات فرونشست زمین بر پل‌های جاده‌ای جنوب غربی شهر تهران

ساسان زنگنه تبار^۱، مجتبی یمانی^{۲*}، محمد شریفی کیا^۳، سید موسی حسینی^۴، معصومه آمیغ پی^۵

^۱ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳ دانشیار سنجش از دور، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۴ دانشیار مهندسی منابع آب، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۵ رئیس اداره ترازیبی دقیق و تداخل سنجی راداری، سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	در این پژوهش با استفاده از روش پراکنشگرهای دائمی تکنیک تداخل سنجی راداری، تصاویر سنیتینل ۱ در بازه زمانی سال ۲۰۲۲ به منظور بررسی تاثیرات فرونشست بر سازه‌های شهری جنوب غرب شهر تهران مورد پردازش قرار گرفت. برای این منظور از نرم‌افزارهای GMTSAR و Stamps استفاده شد. همچنین با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی چاه‌های محدوده مورد مطالعه، مقدار تجمعی استاندارد شده تغییرات سطح آب زیرزمینی محاسبه شد. نتایج پردازش راداری نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی بین ۳+ تا ۹۵- میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره در جنوب غربی شهر تهران می‌باشد. بیشینه فرونشست مربوط به جنوب منطقه ۱۸ و قسمت غربی منطقه ۱۹ به میزان ۷۰- میلی‌متر در سال می‌باشد. میزان جابجایی و پایین رفتن عرشه پل‌ها در اثر فرونشست حدود ۲.۳ تا ۴.۵ سانتیمتر در سال بوده است. انجام بازدید میدانی از پل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در پل شماره ۳ (تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه)، اثرات فرونشست زمین به خوبی محسوس است. نتایج حاصل از بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی پراکنشگرهای دائمی پل‌ها بیانگر میزان همبستگی بالای این دو می‌باشد. بالا بودن میزان همبستگی موید این نکته می‌باشد که علاوه بر تاثیرات فرورونده فرونشست، اشباع هیدرولوژیک خاک در ارتفاع یافتن سطح زمین و سازه‌های انسان‌ساخت تاثیرگذار است.
کلمات کلیدی:	
فرونشست زمین	
PS-InSAR	
شهر تهران	
پل‌های جاده‌ای	

مقدمه

فرونشست زمین واکنش سطح زمین به توسعه، بهره‌برداری و تکامل فضای زیرزمینی است که توسط عوامل طبیعی و انسانی ایجاد می‌شود. فرونشست زمین به معنی کاهش ارتفاع زمین، یک پدیده محیطی و زمین‌شناسی است (Castellazzi et al., 2016). فرآیند فرونشست شامل فعل و انفعالات پیچیده بین مواد مختلف با الاستیسیته متفاوت می‌باشد که منجر به تغییر در هندسه ساختاری این مواد به عنوان تکیه‌گاه سطح زمین می‌شود (Hakało & Wroński, 2003). عوامل متعددی سبب رخداد پدیده فرونشست زمین می‌شوند که می‌توان به انحلال و ریزش سنگ‌ها، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، فعالیت‌های آتشفشانی، تحکیم خاک‌های رسی و فعالیت‌های تکتونیکی، فعالیت معدنکاری، تراکم آبی خاک‌های ریزی، زهکشی و اکسیداسیون خاک‌های آلی، رخداد زمین‌لرزه، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، نشست ناشی از بارگذاری بیش از حد روی زمین، نشست ناشی از استخراج آب در مناطق ژئوترمال، تغییر کاربری زمین و استخراج نفت اشاره کرد. به دلیل تغییر اقلیم و کاهش بارندگی، رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز آبی، هجوم انسان به سفره‌های آب زیرزمینی بیشتر شده است و برداشت آب زیرزمینی معمول‌ترین دلیل برای فرونشست است. فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی به عنوان مشکلی اساسی همراه با پیامدهای محیطی در بسیاری از نواحی، شناخته شده است (Galloway, Jones & Ingebritsen, 1999; Abidin et al., 2001; Amelung, Galloway, Bell, Zebker & Lacznia, 1999; Poland, 1984; Tolman & Poland, 1940). فرونشست تهدیدات قابل توجهی برای زیرساخت‌ها، ساختمان‌ها و محیط‌زیست ایجاد می‌کند به طور مثال زیرساخت‌های حمل و نقل مانند راه آهن تایوان را تحت تأثیر قرار داده است (Hu & Chiu, 2023). فرونشست زمین به دلیل اضافه برداشت آب زیرزمینی در دره مرکزی در کالیفرنیا، کنترل سیل و زیرساخت‌های مخازن آبی را تهدید می‌کند و بیانگر اهمیت نظارت و مدیریت فرونشست برای دسترسی به منابع آب در آینده می‌باشد (Jones, Farr, Liu & Miller, 2020). خاک دلتایی نرم در شهرهای جنوب شرقی آسیا با مشکلات فرونشست، تأثیر بر ساختمان‌ها، جاده‌ها و افزایش هزینه‌های ساخت‌وساز مواجه است که نیاز به نظارت بر آب‌های زیرزمینی و سکونت‌گاه‌ها یا تحلیل‌های عددی برای ارزیابی دارد (Giao, Saowiang & Anh, 2019). علاوه بر این، حفره‌های زیرزمینی ناشی از فرونشست می‌تواند منجر به عواقب فاجعه‌بار برای سازه‌ها شود که نیاز به روش‌های تقویت ژئوسنتتیک در کاهش این تأثیرات را دو چندان می‌کند (Al Heib, Hassoun, Emeriault, Villard & Farhat, 2021). تکنیک سری زمانی تداخل‌سنجی راداری این پتانسیل را دارد که از توسعه ابزارهای جدید و مؤثرتر برای نظارت و تجزیه و تحلیل سلامت سازه‌ها پشتیبانی کند و باعث کاهش هزینه‌ها شود. با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری می‌توان جابجایی‌های مشکوک سازه‌های انسانی را در مقیاس زمانی ماهانه پایش کرد. علاوه بر این، دو ویژگی اصلی وجود دارد که تکنیک تداخل‌سنجی را برای جامعه علمی جذاب می‌کند. اولین مورد این است که یک نمایش دو بعدی با وضوح بالا از تغییر شکل در ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر را ارائه می‌دهد. دوم دقت بالا (تا ۱ میلی‌متر در سال) در اندازه‌گیری تغییر شکل است (Hooper, Bekaert, Spaans & Arkan, 2012). علاوه بر این، به داده‌های بایگانی شده تصاویر ماهواره راداری مورد نظر برای به دست آوردن اطلاعات تغییر شکل در گذشته دسترسی وجود دارد.

سلامت پل قدیمی آلیس‌فورد واقع در شهر کنت انگلستان را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و رادار نفوذی زمینی مورد پایش قرار داده شد. نتایج بررسی با استفاده از رادار نفوذی زمینی (GPR) منجر به شناسایی گرهک‌های ساختاری موجود در سازه شد. نتایج مشاهدات یک دوره ۲۱ ماهه با استفاده از تکنیک InSAR، یک مطابقت آشکار بین روندهای فصلی جابجایی پراکنشگرهای دائمی واقع در مجاورت پل و روند سیل ثبت شده توسط دو ایستگاه نزدیک به محل پل را نشان می‌دهد. روند چرخه‌ای جابجایی‌های شناسایی شده، نشان می‌دهد که جابجایی‌های رو به بالا و پایین پل با روند اشباع خاک در طول چرخه هیدرولوژیکی مطابقت دارد (Alani, Tosti, Ciampoli, Gagliardi & Benedetto, 2020). توانایی تکنیک پراکنشگرهای دائمی تداخل‌سنجی راداری (PS-InSAR) برای اندازه‌گیری جابجایی‌های پل هنگ‌کینگ-ژوهای-ماکائو (HZMB) با استفاده از ۸۶ تصویر Sentinel-1A در بازه زمانی

۶ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۷ نوامبر ۲۰۲۰ بررسی شد. نتایج نشان داد که فرونشست مداوم حدود ۱۰ میلی‌متر در سال، ۱۷ میلی‌متر در سال و ۱۴ میلی‌متر در سال به ترتیب در راهروی شمالی ترمینال مسافربری ژوهای-ماکائو، جزیره مصنوعی شرقی و ساختمان‌های ترمینال مسافربری هنگ‌کنگ نمایان است. نرخ فرونشست حاشیه جزیره مصنوعی غربی نسبت به قسمت مرکزی کمی بیشتر است. در همین حال، نقشه همبستگی دما نشان می‌دهد که تغییرات دوره‌ای ناشی از دما بر روی ساختمان‌ها، جاده‌ها و پل‌ها، تحت تأثیر اثر انبساط حرارتی رخ می‌دهد (Ma, Wu, Zhang & Au, 2024). تحقیقات پیشین، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را طی سال‌های اخیر مهمترین علت پدیده فرونشست در آبخانه دشت تهران دانسته‌اند.

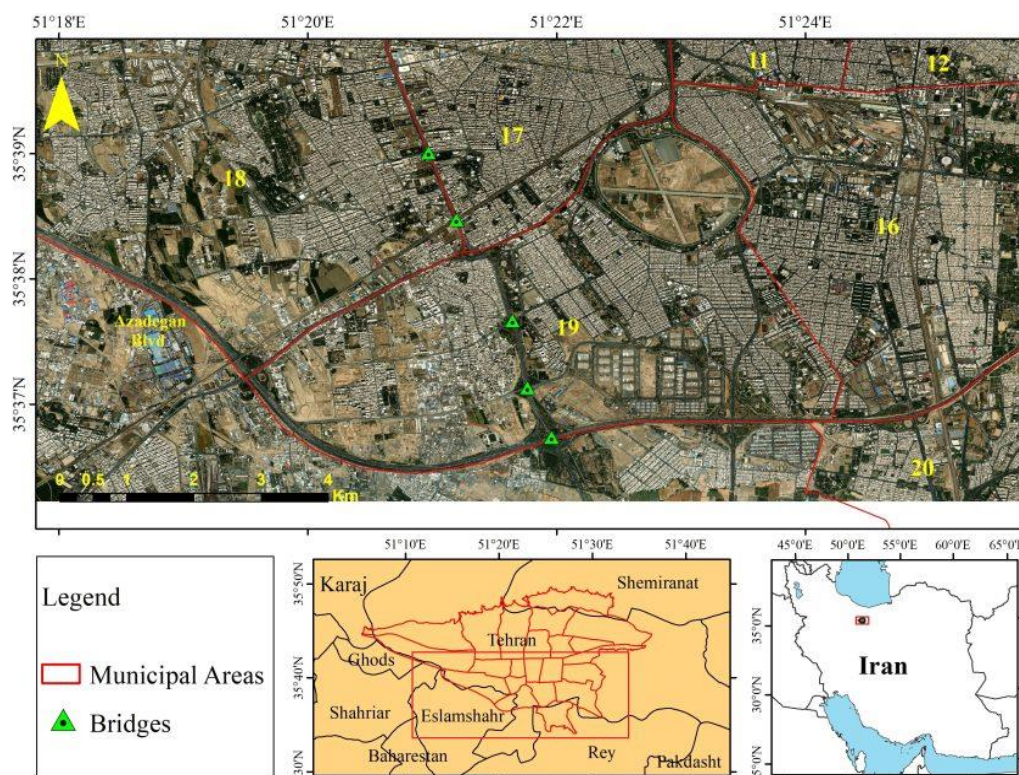
در پژوهشی که در خصوص بررسی فرونشست دشت تهران-ورامین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری انجام شد، نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین برای دوره مطالعاتی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ در دشت تهران-ورامین، در جنوب غرب از ۲۵ سانتی‌متر در سال، در نزدیکی فرودگاه امام خمینی از ۵ سانتی‌متر در سال و در شهرستان ورامین از ۲۲ سانتی‌متر در سال فراتر می‌رود. تجزیه و تحلیل جابجایی‌های مشاهده شده همراه با اطلاعات به دست آمده از نقشه‌های زمین‌شناسی و سطح آب زیرزمینی در منطقه نشان داد که برداشت بیش از حد آب زیرزمینی علت اصلی تغییر شکل سطح است. طبق این پژوهش فرونشست دشت تهران-ورامین دو الگوی اصلی شامل جابجایی بلندمدت در نتیجه کاهش سطح آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر و تغییرات کوتاه‌مدت مربوط به تخلیه و تغذیه فصلی آب‌های زیرزمینی دارد (Haghighi & Motagh, 2019). رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی بررسی شد. نتایج، جابجایی سالانه ۱۵ سانتیمتری را در جنوب منطقه مورد مطالعه منتهی به دشت‌های شهریار و تهران نشان داد اما جابجایی تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده بلکه به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. به طوری که در مناطق دارای واحدهای صنعتی و مسکونی طی دو سال، میزان جابجایی تجمعی ۸ تا ۱۳ سانتیمتر بوده است. در محورهای ارتباطی نظیر بزرگراه فتح میزان جابجایی بالای ۴ سانتی‌متر در سال محاسبه شده است. همچنین بررسی الگوی فرونشست بیانگر این است که عمده بردار جابجایی را حرکت قائم تشکیل می‌دهد و میزان جابجایی افقی بسیار پایین می‌باشد (Maghsoudi, Amani & Ahmadi, 2019).

در مطالعه‌ای با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر Sentinel-1A برای سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ اقدام به بررسی فضایی-زمانی فرونشست زمین در دشت تهران شد. نتایج نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست بر روی دشت تهران در طول دوره مورد مطالعه تقریباً ۲۰ سانتی‌متر در سال است که زبانه‌های فرونشست از جنوب و جنوب غرب به داخل شهر تهران که دارای خاک ریزدانه است در حال گسترش می‌باشد. حداکثر نرخ جابجایی افقی مطلق حدود ۸ سانتی‌متر در سال در جهت شرق به غرب محاسبه شد. همچنین نتایج حاکی از کاهش میزان فرونشست در سال‌های اخیر بوده است این امر می‌تواند ناشی از فرآیند تغذیه آب زیرزمینی و افزایش سطح آب در نتیجه افزایش نرخ بارندگی از سال ۲۰۱۸ باشد (Babaee, Khalili, Chirico, Sorrentino & Di Martire, 2024). تحقیقات پیشین درباره فرونشست تهران غالباً به تهیه نقشه فرونشست و تعیین حدود آن منتهی شده‌اند و در خصوص بررسی میزان تأثیر فرونشست بر سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری تا اکنون تحقیقی انجام نشده است. در این تحقیق با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و روش پراکنشگرهای دائمی اقدام به بررسی رفتار پل‌های جاده‌ای سطح شهر تهران در ارتباط با پهنه فرونشست شده است و در پی آن هستیم تا بررسی کنیم که فرونشست تا چه میزان بر پل‌هایی که در محدوده فرونشست قرار گرفته‌اند تأثیر گذاشته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر تهران با جمعیت بیش از ۹ میلیون نفر یکی از کلان‌شهرهای جهانی و بزرگترین شهر ایران می‌باشد. نقش سیاسی شهر تهران و قرار گرفتن به عنوان پایتخت، بر اهمیت این شهر می‌افزاید. موقعیت مطلق مکانی این شهر از ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و از ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی می‌باشد این شهر از نظر تقسیمات شهری به ۲۲ منطقه شهرداری تقسیم می‌شود. شکل ۱، شهر تهران و موقعیت پل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این تحقیق ۵ پل جاده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که در جنوب غربی شهر تهران و در مناطق ۱۷، ۱۸ و ۱۹ قرار دارند. این محدوده از شهر تهران منطبق بر دشت آبرفتی با رسوبات آبرفتی دوره کواترنری می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (جنوب غربی شهر تهران)

Fig.1. Location of the study area (southwest of Tehran)

در این پژوهش از تصاویر راداری تک منظر پیچیده (SLC) ماهواره سنتینل ۱ در پلاریزاسیون VV در بازه زمانی سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. هدف از انتخاب سال ۲۰۲۲ انطباق زمانی با آخرین داده‌های تراز آب زیرزمینی موجود برگرفته از آب منطقه‌ای تهران می‌باشد. به منظور دست یابی به بهترین نتایج از تصاویر با کمترین فاصله زمانی ممکن (۱۲ روز) استفاده شد. تعداد تصاویر انتخاب شده ۲۸ قطعه می‌باشد. تصاویر در حالت پایین‌گذر (Descending) بوده و از مسیر ۳۵ انتخاب شده‌اند. در جدول ۱ مشخصات ماهواره راداری سنتینل ۱ نمایش داده شده است و در جدول ۲، تصاویر راداری مورد استفاده و مشخصات آن‌ها آورده شده است. تصاویر مورد استفاده از وبسایت تسهیلات فضایی آلاسکا (ASF) تهیه شده است. برای انجام تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری

از حالت IW تصاویر سنتینل ۱ استفاده شده است و با توجه به موقعیت منطقه مورد مطالعه نوار IW2 برای انجام پردازش انتخاب شد. برای حذف تاثیرات توپوگرافی از DEM ۳۰ متری SRTM سازمان فضایی آمریکا استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱

Table 1- General characteristics of Sentinel 1 satellite radar images

دوره بازگشت (روز)	قدرت تفکیک	حالت تصویربرداری	طول موج	فرکانس	ماهواره
Return period (days)	Resolution	Shooting mode	Wavelength	Frequency	Satellite
12	Centimeter	Wide Interferometry (IW)	5.66 cm Band C	5.4 GHz	Sentinel 1A

جدول ۲- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده از ماهواره سنتینل ۱

Table 2- Characteristics of Sentinel 1 satellite radar images used in this research

خط مبنای زمانی (روز)	خط مبنای مکانی (متر)	مسیر عبور	نوار	نوع تصویر	مسیر	تاریخ تصویر	ردیف
Time baseline (day)	Spatial baseline (meter)	Passage Way	Tape	Image Type	Pass	Image Date	Num.
-336	-57	Descending	IW2	SLC	35	2022/01/11	1
-324	-39	Descending	IW2	SLC	35	2022/01/23	2
-312	-71	Descending	IW2	SLC	35	2022/02/04	3
-300	-24	Descending	IW2	SLC	35	2022/02/16	4
-288	-21	Descending	IW2	SLC	35	2022/02/28	5
-276	-105	Descending	IW2	SLC	35	2022/03/12	6
-264	-65	Descending	IW2	SLC	35	2022/03/24	7
-252	-55	Descending	IW2	SLC	35	2022/04/05	8
-240	-24	Descending	IW2	SLC	35	2022/04/17	9
-228	-24	Descending	IW2	SLC	35	2022/04/29	10
-216	-86	Descending	IW2	SLC	35	2022/05/11	11
-204	-43	Descending	IW2	SLC	35	2022/05/23	12
-192	-25	Descending	IW2	SLC	35	2022/06/04	13
-180	-104	Descending	IW2	SLC	35	2022/06/16	14
-168	33	Descending	IW2	SLC	35	2022/06/26	15
-144	-87	Descending	IW2	SLC	35	2022/07/22	16
-132	-41	Descending	IW2	SLC	35	2022/08/03	17
-120	-37	Descending	IW2	SLC	35	2022/08/15	18
-108	-19	Descending	IW2	SLC	35	2022/08/27	19
-96	80	Descending	IW2	SLC	35	2022/09/08	20
-72	-40	Descending	IW2	SLC	35	2022/10/02	21
-60	-103	Descending	IW2	SLC	35	2022/10/14	22
-48	49	Descending	IW2	SLC	35	2022/10/26	23
-36	-88	Descending	IW2	SLC	35	2022/11/07	24
-24	-44	Descending	IW2	SLC	35	2022/11/20	25
-12	-123	Descending	IW2	SLC	35	2022/12/01	26
0	0	Descending	IW2	SLC	35	2022/12/13	27
12	39	Descending	IW2	SLC	35	2022/12/25	28

هدف اصلی تداخل سنجی راداری، استخراج میزان دگرشکلی از فاز اندازه‌گیری شده کلی با حذف کردن یا کمینه کردن اثر دیگر مولفه‌ها است. DInSAR فقط امکان تشخیص اختلاف فاز بین دو تصویر SAR را می‌دهد و در حذف تأثیرات اتمسفری توانایی ندارد. برای رفع این محدودیت تکنیک‌های PSInSAR (Ferretti, Prati & Rocca, 2002) و Small Baseline (خط مبنای کوچک) (Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2002) ابداع شدند. نوآوری اصلی رویکردهای PSInSAR، امکان تجزیه و تحلیل نقاط خاص روی سطح زمین (یعنی پراکنشگرها) و نظارت بر سری زمانی تغییر شکل آن‌ها است. پراکنشگرهای پایدار با یک دامنه پایدار و یک فاز منسجم در کل مجموعه تصاویر در یک مجموعه داده مشخص می‌شوند (Ferretti et al., 2002). پراکنشگرها معمولاً ویژگی‌های ثابت روی زمین مانند سازه‌ها و زیرساخت‌های دست‌ساز (مانند راه آهن، ساختمان‌ها، پل‌ها، برج‌ها)، رخنمون‌های صخره‌ای و هر ویژگی دائمی دیگری هستند که سیگنال پایداری را به ماهواره منعکس می‌کنند. مراحل تکنیک PS-InSAR به شرح زیر است (Colesanti, Ferretti, Prati & Rocca, 2003):

الف) تجزیه و تحلیل آماری دامنه‌های بازگشت طول موج، پیکسل به پیکسل انجام می‌شود تا شاخص پایداری در طول زمان برای هر پیکسل محاسبه شود.

ب) شناسایی پراکنشگرهای دائمی منتخب (PSCs). اینها پیکسل‌هایی با مقدار شاخص پایداری هستند که از یک آستانه ثابت فراتر می‌رود.

ج) محاسبه فاز تداخل سنجی ($\Delta\phi_i$) برای هر PSC، در هر تداخل نما.

د) شناسایی و حذف سهم فاز اتمسفر، اثرات مداری و سایر نویزها از فاز تداخل سنجی.

در نتیجه فرآیند فوق، بازتابنده‌های پایدار (PSها) را می‌توان در منطقه مورد بررسی شناسایی کرد. این مزیت امکان اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح زمین با دقت میلی‌متری را فراهم می‌کند (Colesanti et al., 2005). در پایان فرآیند، روند تکامل جابجایی را می‌توان برای هر PS بررسی کرد یا یک نقشه سرعت متوسط را می‌توان برای ارائه یک نمای کلی از میانگین حرکت زمین در کل منطقه مورد نظر تولید کرد. این مجموعه داده با استفاده از تکنیک PS با استفاده از نرم‌افزارهای GMTSAR و Stamps پردازش شدند. پردازش InSAR، شامل انتخاب نوار مورد نظر از تصویر، پردازش‌های اولیه، برش تصویر و تشکیل تداخل نما با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR انجام شد و پردازش PS، از جمله انتخاب و بازیابی PS و تهیه نمودارهای سری زمانی از پل‌ها با استفاده از نرم افزار Stamps انجام شد. کل مراحل پردازش در شکل ۲، آورده شده است.

در این پژوهش به منظور مطالعه تأثیر فرونشست بر سازه‌های شهری، ۵ پل جاده‌ای در مناطق ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در جنوب غرب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. موقعیت نسبی و برخی از ویژگی‌های این پل‌ها در جدول ۳ آمده است.

در این مطالعه با استفاده از داده‌های چاه‌های پیژومتری محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. این داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای تهران تهیه شده‌اند. مقدار تجمعی استاندارد شده برای سطح آب زیرزمینی هر چاه با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد. که در آن WL_t سطح آب زیرزمینی در یک زمان مشخص، WL میانگین سطح آب زیرزمینی در کل دوره مورد مطالعه و $WLsd$ انحراف معیار سطح آب زیرزمینی در کل دوره مطالعه می‌باشد.

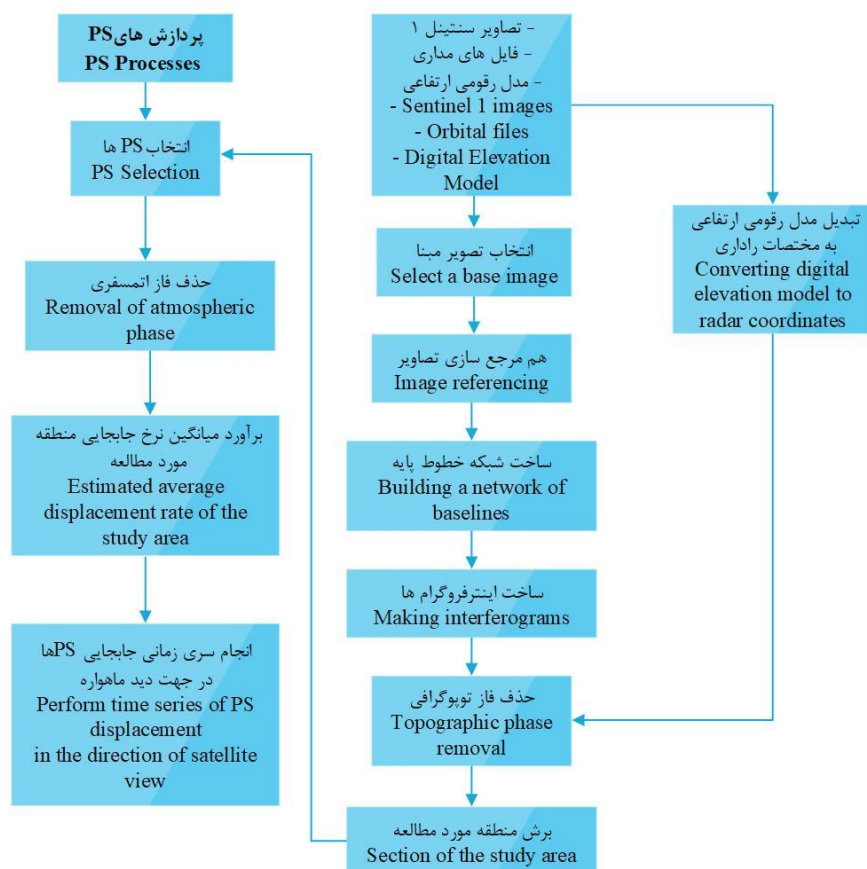
$$WLS = \sum \frac{WL_t - WL}{WLsd} \quad (1)$$

تهیه نقشه‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS انجام شد. به منظور مشاهده مستقیم اثرات فرونشست زمین بر پل‌های مورد مطالعه در شهر تهران اقدام به انجام بازدید میدانی و عکسبرداری از برخی تغییرات پل‌ها گردید.

جدول ۳- موقعیت و ویژگی‌های پل‌های مورد مطالعه در شهر تهران

Table 3- Location and characteristics of the studied bridges in Tehran

شماره پل Bridge Number	موقعیت نسبی Relative position	طول پل Bridge length (m)	عرض پل Bridge width (m)	ارتفاع عرشه پل Bridge deck height (m)
1	تقاطع بزرگراه آیت الله سعیدی و بلوار برادران بهرامی در جهت شرقی-غربی The intersection of Ayatollah Saeedi Highway and Baradaren Bahrami Boulevard in the east-west direction	200	22	7
2	به منظور عبور راه آهن تهران از روی بزرگراه آیت الله سعیدی در مسیر شرقی-غربی In order for the Tehran Railway to pass over the Ayatollah Saeedi Highway on the east-west route	50	15	7.5
3	تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه در مسیر شرقی-غربی The intersection of Kazemi Highway and Shokoofeh Boulevard on the east-west route	250	24	7
4	تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شقایق در مسیر شرقی-غربی The intersection of Kazemi Highway and Shaghayegh Boulevard on the east-west route	200	34	7
5	تقاطع بلوار کاظمی و بزرگراه آزادگان در مسیر شمال به جنوب The intersection of Kazemi Boulevard and Azadegan Highway on the north-south route	110	34	7

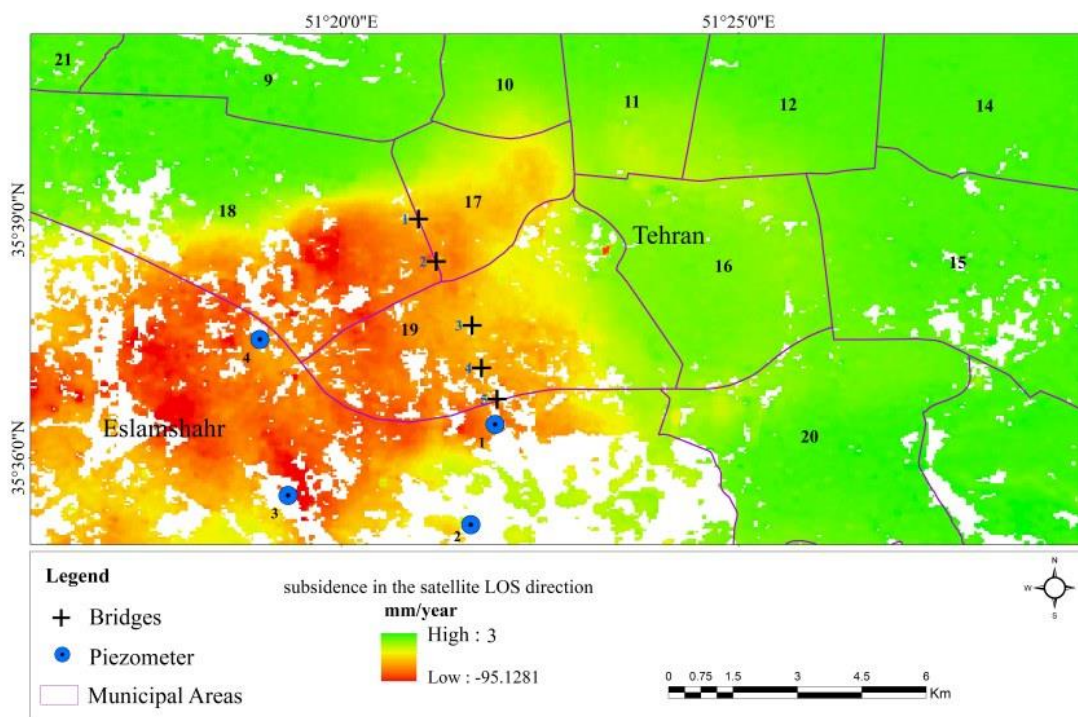


شکل ۲- مراحل انجام پردازش روش PS-InSAR

Fig.2. Steps for performing PS-InSAR processing

نتایج و بحث

نتایج پردازش راداری نشان‌دهنده نرخ جابه‌جایی بین +۳ تا -۹۵ میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره برای سال ۲۰۲۲ است (شکل ۳). با توجه به نقشه جابه‌جایی به دست آمده در این تحقیق، در بازه زمانی مورد مطالعه عمده فرونشست شهر تهران در جنوب غربی این شهر به وقوع پیوسته است که شامل مناطق شهرداری ۱۷، ۱۸ و ۱۹ می‌باشد. در واقع مرکز فرونشست در دشت جنوبی تهران قرار دارد و به سمت شهر تهران گسترش پیدا کرده است. بیشینه فرونشست مربوط به جنوب منطقه ۱۸ و قسمت غربی منطقه ۱۹ به میزان -۷۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. موقعیت پل‌های مورد مطالعه و پیزومترهای نزدیک به موقعیت آن‌ها در روی نقشه فرونشست مشخص گردیده است. هر کدام از پل‌ها و پیزومترها در نقشه با شماره مشخص شده‌اند که نتایج آنالیز راداری و سطح آب آن‌ها در ادامه توضیح داده خواهد شد.

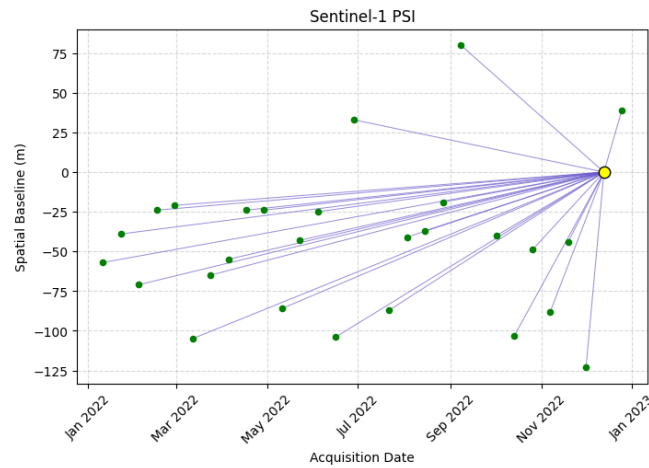


شکل ۳- نقشه میزان فرونشست محدوده مورد مطالعه سال ۲۰۲۲

Fig.3. Map of the subsidence rate of the study area in 2022

نتایج حاصل از پردازش پراکنشگرهای دائمی

با توجه به خط مبنای زمانی و مکانی تصاویر نسبت به تصویر مرکزی (۲۰۲۲/۱۲/۱۳)، شبکه تداخل‌نگارها ایجاد شد که در شکل ۴ نشان داده می‌شود. به منظور بررسی میزان جابجایی پل‌ها در اثر فرونشست بر روی عرشه هر پل، ۴ پراکنشگر دائمی (PS) انتخاب شده است که موقعیت آن‌ها بر روی هر پل در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴- شبکه تداخل نگارها با توجه به موقعیت زمانی و مکانی آن‌ها نسبت به تصویر مرکزی

Fig.4. The network of interferograms according to their temporal and spatial position relative to the central image

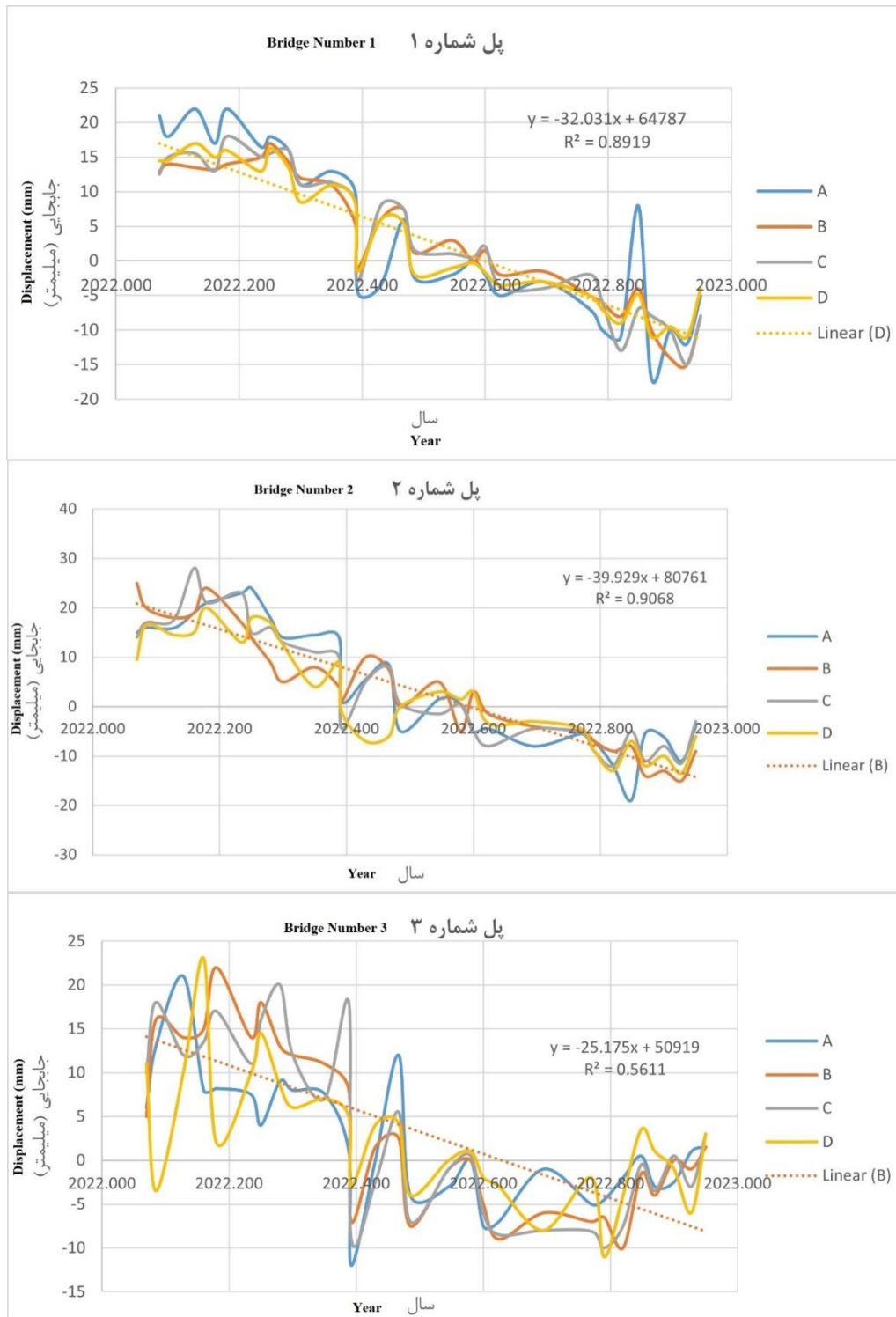


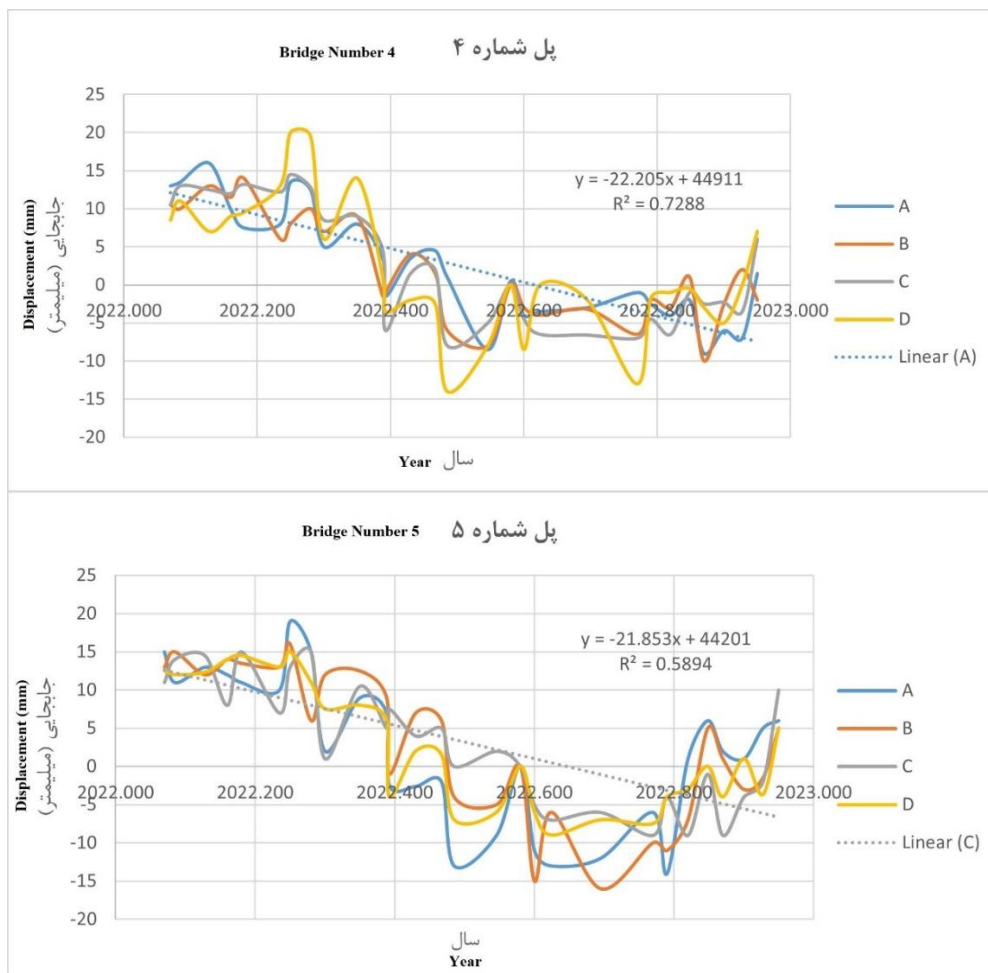
شکل ۵- موقعیت پراکنشگرهای دائمی انتخاب شده بر روی عرشه پل‌های مورد مطالعه جنوب غربی شهر تهران

Fig.5. Location of selected permanent scatterer on the decks of the studied bridges in the southwest of Tehran

شکل ۶، نمودارهای حاصل از پراکنشگرهای دائمی واقع در عرشه پل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در پل شماره ۱، میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل به میزان ۲.۵ تا ۳.۵ سانتیمتر در طول دوره مورد مطالعه (۲۰۲۲) می‌باشد. با توجه به نوسانات هر نمودار، رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم نزولی در عرشه پل می‌باشد. بازدید میدانی از پل، گسیختگی محسوس را در اوضاع پل نشان نمی‌دهد و تغییرات بسیار ناچیز و در حد وجود شکاف در دیواره و روکش آسفالتی عرشه پل می‌باشد که تا حد زیادی مربوط به چند تیکه بودن سازه پل و تغییرات سازه در محل اتصالات آن می‌باشد. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۲، به میزان ۳.۵ تا ۴.۵ سانتیمتر در طول یک سال می‌باشد. رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم فرونشست در عرشه پل می‌باشد. به دلیل پوشیده بودن عرشه پل با سنگریزه‌های پایه خطوط راه‌آهن و قرار گرفتن دیواره‌های جانبی پل در درون زمین امکان مطالعه اثرپذیری سازه از فرونشست به روش مشاهده مستقیم میسر نبود. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۳، به میزان ۳.۵ تا ۴.۵ سانتیمتر در طول یک سال می‌باشد. با توجه به اینکه رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم فرونشست در عرشه پل می‌باشد اما شاهد یک نشست ناگهانی در عرشه پل از ماه چهارم سال ۲۰۲۲ می‌باشیم که به خوبی در نمودار C مشخص است. بازدید میدانی از پل مورد نظر بیانگر نشست محسوس در پایه‌های پل به خصوص در سمت غربی آن می‌باشد. در این قسمت جداسازی دیواره پل به عرض ۵ سانتی‌متر، فروریختن بخشی از نمای دیواره پل، اختلاف سطح محسوس در جداول پایه پل و خالی شدن بخش زیرین جداول (به عمق ۲۰ سانتیمتر) و همچنین فرورفتن قسمت میانی پله‌های حاشیه پل اتفاق افتاده است که در تصاویر شکل ۷ نمایان است. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۴، به میزان ۲.۳ تا ۳.۷ سانتیمتر در طول یک سال مورد مطالعه (۲۰۲۲) می‌باشد. رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم فرونشست در عرشه پل می‌باشد. در پایه غربی این پل، در محل اتصال عرشه و پایه شکافی به عرض ۶ سانتیمتر ایجاد شده است که در کل دیواره محسوس است و بزرگتر از حد معمول فاصله موجود بین اتصالات پل می‌باشد. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۵، به میزان ۲.۵ تا ۳.۴ سانتیمتر در طول یک سال می‌باشد. با توجه رفتار هر ۴ نقطه می‌توان روند فرونشست را به وضوح دید اما در انتهای نمودار، روند بالاآمدگی در نمودار مشخص است که می‌تواند ناشی از تاثیرپذیری زیاد سازه از تغییرات سطح آب زیرزمینی باشد. بازشدگی دیواره و ریزش نما از تغییرات محسوس در پل شماره ۵ بود.

نتایج مقدار تجمعی استاندارد شده پیرومترهای موجود در محدوده فرونشست همگی حاکی از افت شدید آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۲ به بعد دارند (شکل ۸). به منظور بررسی میزان ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی پل‌ها، اقدام به تعیین میزان همبستگی نمودار سری زمانی نقاط PS با تغییرات سطح آب پیرومترها برای یک دوره زمانی یکسان (سال ۲۰۲۲) شد. به این منظور تغییرات نقاط PS پل شماره ۲ با تغییرات سطح آب پیرومتر شماره ۴ و تغییرات نقاط PS پل شماره ۵ با تغییرات سطح آب پیرومتر شماره ۱ مورد مقایسه قرار گرفت. برای نمودار هر یک از پراکنشگرهای دائمی و نمودار تغییرات سطح آب پیرومترها مقدار تجمعی استاندارد شده محاسبه گردید. در شکل ۹ و ۱۰، نمودارهای سری زمانی مربوط به هر پل در کنار نمودار نزدیکترین پیرومتر به پل مربوطه آمده است. نتایج بیانگر میزان همبستگی بالای پیرومترها و پراکنشگرهای دائمی می‌باشد (جدول ۴). میزان سطح معناداری داده‌ها با استفاده از آزمون T برابر با ۰/۳۷ بود. از همبستگی بالای این دو می‌توان فهمید که سطح زمین به شدت متأثر از تغییرات سطح آب زیرزمینی است و بالا و پایین رفتن سطح آب آبخانه، زمین بالای خود را به صورت مستقیم متأثر خواهد کرد. با این اوصاف می‌توان دریافت که برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی و افت مداوم سطح آب آن می‌تواند به سرعت سبب فرونشست زمین شود و اثرات جبران‌ناپذیری بر سازه‌های انسان‌ساخت سطح زمین بگذارد.





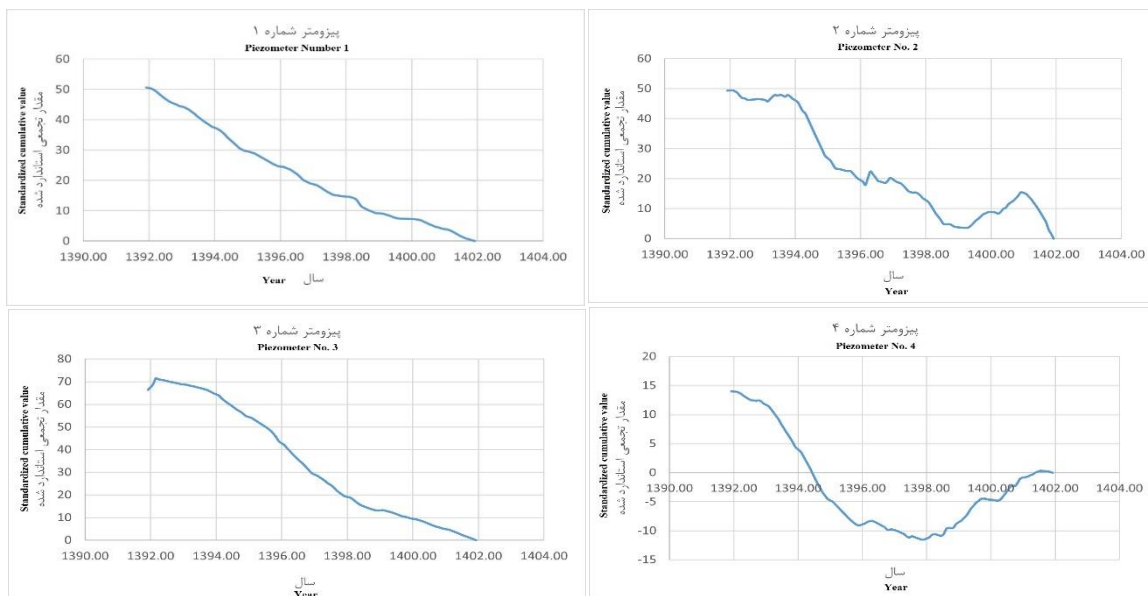
شکل ۶- نمودارهای حاصل از رفتار پراکنشگرهای دائمی واقع در عرشه پل‌های مورد مطالعه

Fig.6. Diagrams obtained from the behavior of permanent Scatterer located on the decks of the studied bridges



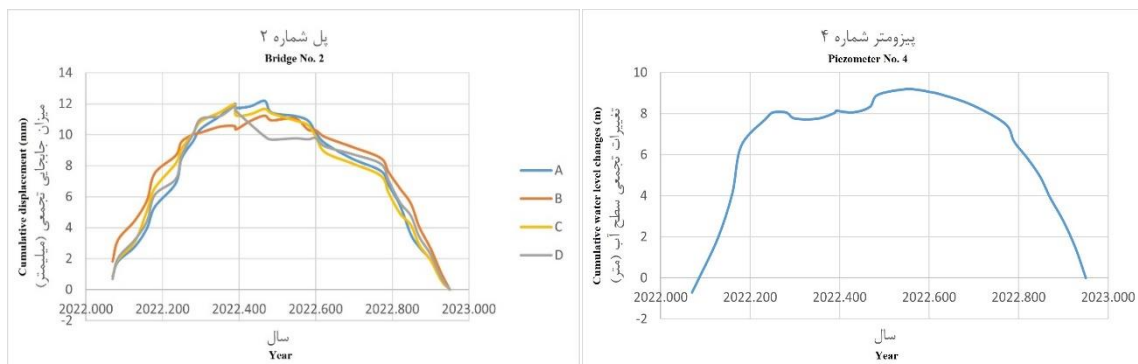
شکل ۷- تصاویر مربوط به تأثیرات فرونشست بر پل شماره ۳ (تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه)

Fig.7. Images of the effects of subsidence on Bridge No. 3 (intersection of Kazemi highway and Shokofeh blvd.)



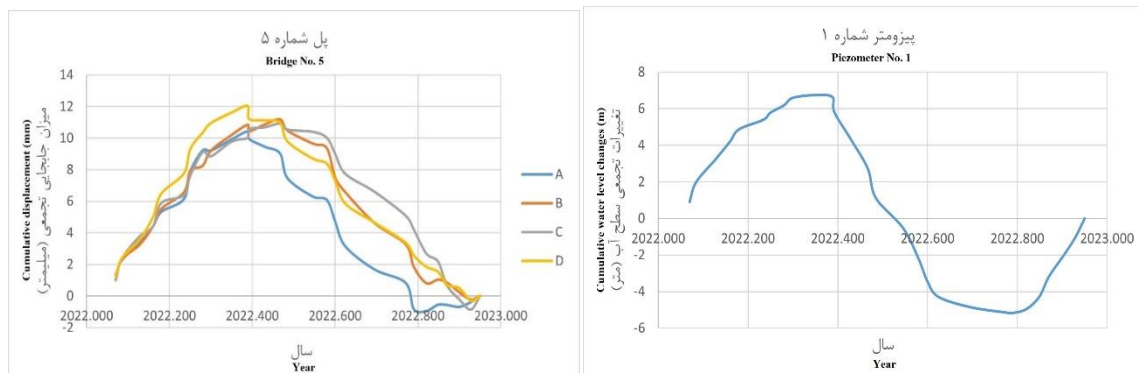
شکل ۸- مقدار تجمعی استاندارد شده سطح آب زیرزمینی پیزومترها در دوره زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۱.

Fig. 8. Standardized cumulative value of groundwater level of piezometers



شکل ۹- نمودار مقدار تجمعی استاندارد شده پراکنشگرهای دائمی (PS) پل ۲ و پیزومتر شماره ۴

Fig.9. Standardized cumulative value diagram of permanent scatterers (PS) of Bridge 2 and piezometer No. 4



شکل ۱۰- نمودار مقدار تجمعی استاندارد شده پراکنشگرهای دائمی (PS) پل ۵ و پیزومتر شماره ۱

Fig.10. Standardized cumulative value diagram of permanent scatterers (PS) of Bridge 5 and piezometer No. 1

جدول ۴- همبستگی پراکنشگرهای دائمی روی پل‌ها با سطح آب پیزومترها

Table 4- Correlation of permanent scatterer on bridges with piezometer water levels

همبستگی پل شماره ۵ Correlation of Bridge No. 5				همبستگی پل شماره ۲ Correlation of Bridge No. 2				
D	C	B	A	D	C	B	A	
*	*	*	*	0.936	0.928	0.957	0.922	پیزومتر ۴ Piezometer 4
0.655	0.423	0.562	0.794	*	*	*	*	پیزومتر ۱ Piezometer 1

نتیجه‌گیری

نتایج پردازش راداری نشان‌دهنده نرخ جابه‌جایی بین ۳+ تا ۹۵- میلیمتر در سال در راستای خط دید ماهواره است. در واقع مرکز فرونشست در دشت جنوبی تهران قرار دارد و به سمت جنوب غربی شهر تهران گسترش پیدا کرده است. بیشینه فرونشست مربوط به جنوب منطقه ۱۸ و قسمت غربی منطقه ۱۹ به میزان ۷۰- میلی‌متر در سال می‌باشد که با تحقیقات حقیقی و معتق (Haghighi & Motagh, 2019) و بابایی و همکاران (Babae et al., 2024) از نظر مکانی مطابقت دارد. نتایج بررسی پراکنشگرهای دائمی انتخاب شده بر روی عرشه پل‌ها بیانگر تاثیرپذیری از فرونشست زمین در سال ۲۰۲۲ می‌باشد. میزان جابجایی و پایین رفتن عرشه پل‌ها در اثر فرونشست حدود ۲.۳ تا ۴.۵ سانتیمتر در سال بوده است. انجام بازدید میدانی از پل‌های مورد مطالعه حاکی از تاثیرپذیری غالب پل‌ها از فرونشست زمین به شکل بازشدگی شکاف دیواره پل و ترک خوردگی آسفالت عرشه پل می‌باشد. در این میان، پل شماره ۳ به خوبی اثرات فرونشست زمین را نشان می‌دهد این پل که در تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه قرار دارد در پایه سمت غربی آن نشست محسوس نمایان است. در این قسمت چاله به عمق ۲۰ سانتیمتر ایجاد شده، نمای دیواره پل دچار ریزش شده، پله‌های کناری پل دچار فرورفتگی شدند و جدول‌های کناره پل به سمت بیرون انحنا پیدا کرده‌اند.

نتایج مقدار تجمعی استاندارد شده پیزومترهای موجود در محدوده فرونشست همگی حاکی از افت شدید آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۲ به بعد دارند. نتایج حاصل از بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی پل‌ها بیانگر میزان همبستگی بالای ارتفاع سطح آب پیزومترها با تغییرات پراکنشگرهای دائمی می‌باشد. از همبستگی بالای این دو می‌توان فهمید که سطح زمین به شدت متأثر از تغییرات سطح آب زیرزمینی است و بالا و پایین رفتن سطح آب آبخانه، زمین بالای خود را به صورت مستقیم متأثر خواهد کرد. با این اوصاف می‌توان دریافت که برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی و افت مداوم سطح آن نقش مستقیمی در فرونشست زمین در جنوب غربی تهران دارد که می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری بر سازه‌های انسان‌ساخت در این محدوده بگذارد. رفتار پراکنشگرهای دائمی انتخاب شده بر روی پل‌ها نشان می‌دهد که پل‌ها علاوه بر متأثر شدن از روند طولانی مدت فرونشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، به شدت متأثر از نوسانات کوتاه مدت آن نیز هستند به طوری که بالا آمدن سطح آب زیرزمینی باعث روند صعودی در نمودار پراکنشگرهای دائمی شده است به طوری که با پژوهش آلانی و همکاران (Alani et al., 2020)، در پایش سلامت پل قدیمی آیلسفورد واقع در شهر کنت انگلستان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مطابقت دارد که نشان داده شده است که جابجایی‌های رو به بالا و پایین پل با روند اشباع خاک در طول چرخه هیدرولوژیکی مطابقت دارد.

به نظر می‌رسد روش PS-InSAR بهترین روش برای بررسی تغییرات نامحسوس سازه‌های عظیم شهری در بلندمدت بدون نیاز به نصب دستگاه‌های گران قیمت و با هزینه زیاد نگهداری می‌باشد. دسترسی به آرشیو گذشته با توجه به ماهواره راداری انتخاب شده، دقت بالا در حد میلی‌متر و پردازش تصاویر به صورت سری زمانی می‌تواند مسئولان شهری را در بررسی رفتار سازه‌های مهم در مناطق متأثر از فرونشست یاری دهد تا بتوانند در مناطق بحرانی در سریع‌ترین زمان، اقدام به تصمیم‌گیری کنند.

References

- Abidin, H. Z., Djaja, R., Darmawan, D., Hadi, S., Akbar, A., Rajiyowiryo, H., ... & Subarya, C. (2001). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system. *Natural Hazards*, 23(2), 365-387. <https://doi.org/10.1023/A:1011144602064>
- Al Heib, M., Hassoun, M., Emeriault, F., Villard, P., & Farhat, A. (2021). Predicting subsidence of cohesive and granular soil layers reinforced by geosynthetic. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09350-3>
- Alani, A. M., Tosti, F., Ciampoli, L. B., Gagliardi, V., & Benedetto, A. (2020). An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies. *NDT & E International*, 115, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288>
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., & Lacznik, R. J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6), 483-486. <https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- Babae, S., Khalili, M. A., Chirico, R., Sorrentino, A., & Di Martire, D. (2024). Spatiotemporal characterization of the subsidence and change detection in Tehran plain (Iran) using InSAR observations and Landsat 8 satellite imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101290. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101290>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C., Gárfias, J., & Rivera, 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, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.002>
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68(1-2), 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00195-3)
- Colesanti, C., Mouelic, S. L., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec, C., & Ferretti, A. (2005). Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique—a case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 201-207. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274069>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2002). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772008>
- Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). *Land subsidence in the United States* (Vol. 1182). Geological Survey (USGS).
- Giao, P. H., Saowiang, K., & Anh, N. T. H. (2019). The Role of Groundwater and Land Subsidence Analysis for Sustainable Development of Infrastructure in Some SE Asian Cities. In *International Conference on Critical Thinking in Sustainable Rehabilitation and Risk Management of the Built Environment* (pp. 90-100). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61118-7_7
- Haghighi, M. H., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-55. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003>
- Hakał, J., & Wroński, J. (2003). Subsidence and its effects on the anterior plate stabilization in the course of cervical interbody spondylodesis. Part II. Clinical evaluation. Study design. *Neurologia i Neurochirurgia Polska*, 37(5), 1063-1072. <https://europepmc.org/article/med/15174252>

- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13 . <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hu, J. C., & Chiu, C. Y. (2023). Additional horizontal displacement across the transportation infrastructures induced by land subsidence revealed by SAR interferometry. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023EGUGA..25.5681H/doi:10.5194/egusphere-egu23-5681
- Jones, C. E., Farr, T. G., Liu, Z., & Miller, M. M. (2020). Measuring Subsidence in California and Its Impact on Water Conveyance Infrastructure. In *Advances in Remote Sensing for Infrastructure Monitoring* (pp. 211-226). Springer . https://doi.org/10.1007/978-3-030-59109-0_9
- Ma, P., Wu, Z., Zhang, Z., & Au, F. T. (2024). SAR-Transformer-based decomposition and geophysical interpretation of InSAR time-series deformations for the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. *Remote Sensing of Environment*, 302, 113962 . <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113962>
- Maghsoudi, Y., Amani, R., & Ahmadi, H. (2019). A Study of land Subsidence in West of Tehran Using Sentinel-1 Images and Permanent Scatterers Interferometry. *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 299-313 [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.1.22.9>
- Poland, J. F. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal* . <https://policycommons.net/artifacts/10710460/guidebook-to-studies-of-land-subsidence-due-to-ground-water-withdrawal/11617224/>
- Tolman, C. F., & Poland, J. F. (1940). Ground-water, salt-water infiltration, and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 21(1), 23-35. <https://doi.org/10.1029/TR021i001p00023>