

Research Paper

Assessments of Land Subsidence in the Tehran Metropolitan Using Satellite
Radar Interferometry Technique*Mohammad Hassan Nami¹ , Mehdi Naderi² 

1. Department of Political Geography, Farabi University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2. Department of Remote Sensing (GIS), Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Citation** Nami, M. H & Naderi, M. (2024). [Assessments of Land Subsidence in the Tehran Metropolitan Using Satellite Radar Interferometry Technique (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(2):138-157. <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.866.1> <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.866.1>**ABSTRACT**

Background and objective Many cities in the world have land subsidence problems because of environmental issues related to urban development. The arid and semi-arid climatic conditions prevailing in most of the interior regions of Iran and the need for the increasing industrial, agricultural, and drinking water exploitation from underground water resources, as well as urban development, have increased the occurrence of land subsidence in Iran, especially in the metropolis of Tehran. This study aims to assess land subsidence in Tehran, Iran, using the satellite radar interferometry (InSAR) technique.

Method In this research, 31 images of Sentinel-1 were processed using the time series of persistent scatter interferometry (PSI) in 2022, and a map of the average annual rate of land subsidence in Tehran metropolis was prepared. Finally, after validating the results of interferometry with GPS station observations, the relationship between land subsidence and exploitation of underground water resources was examined as the most important factor in ground surface changes in the study area.

Results The findings showed a decreasing trend in land subsidence from plain to urban areas. The highest land subsidence, with a rate of -43 mm per year occurred in the southern and southwestern parts of Tehran. Districts 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, and 20, which comprise about 26% of Tehran's population, were experiencing land subsidence. The drop in the water level of observation wells was considerable in the areas where the highest rate of land subsidence occurred. Another finding of the research was the decrease of the underground water level from the north to the south of Tehran, indicating that the water depth in the southern areas of Tehran decreased due to human activities such as water pumping.

Conclusion There is an increasing pressure in the aquifer through pumping water from wells in the study area for various industrial, agricultural and drinking water uses which has led to the increase in the occurrence of land subsidence.

Keywords Differential Interferometry, Time Series Analysis, Underground Water Resource, Radar interferometry, Tehran Metropolitan

Article Info:

Received: 27 May 2024

Accepted: 04 Jun 2024

Available Online: 01 Jul 2024

*** Corresponding Author:****Mohammad Hassan Nami, Associate Professor.****Address:** Department of Political Geography, Farabi University of Science and Technology, Tehran.**Tel:** +98 (21) 58975621**E-mail:** dr.mh.nami@gmail.com

Copyright © 2024 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Extended Abstract

Introduction

Many cities in the world have land subsidence problems because of environmental issues related to urban development. The arid and semi-arid climatic conditions prevailing in most of the regions of Iran and the need for the increasing industrial, agricultural, and drinking water exploitation of underground water resources, as well as the development of urbanization, have provided a suitable infrastructure for the occurrence of land subsidence in Iran, especially in Tehran. Despite the capability of conventional techniques to measure land subsidence, these methods are time-consuming and somehow difficult. In many cases, accurate measurements are not possible, especially in dense urban areas. Satellite radar interferometry (InSAR) is one of the most accurate remote sensing techniques to obtain information and display ground surface displacements. Due to the use of satellite data and its repeatability, it is possible to monitor land subsidence in the desired location in the shortest time and at an optimal cost. This study aims to assess land subsidence in Tehran, Iran, using the InSAR technique.

Methods

In this analytical survey study, 31 images of Sentinel-1 were processed using the time series of persistent scatter interferometry (PSI) technique in 2022. In the pre-processing stage, after converting the images into a readable format by the SARscape module based on the ENVI platform, images were determined based on the border of the study area. An image with lower spatial and temporal correlation during the time series was selected as a reference image. In the second step, the geometrical registration of the images and the production of the interferometer were performed. In the third step, using the set of interferometers obtained from the previous step as well as the amplitude dispersion index (ADI), persistent scatterer (PS) pixels whose fuzzy behavior was constant over time were selected. In the fourth step, considering that the phase difference of two InSAR images for each PS includes components such as the phase caused by the atmosphere, the phase caused by orbital errors, the phase caused by topography, and the phase caused by noise, the mentioned phases were identified to estimate the phase caused by the displacement of the earth's surface by subtracting these phases from the interferometer phase. In the final step, a map of the average annual rate of subsidence in Tehran metropolis was obtained. After validating the results of InSAR using the observations of the Global Navigation

Satellite System, the relationship between land subsidence and changes in the underground water levels was examined, as the most important factor of surface changes in the study area, using the regression analysis.

Results

The findings showed that the land subsidence pattern had a decreasing trend by moving from the plain to urban areas. The highest land subsidence, with a rate of -43 mm per year, occurred in the southern and southwestern parts of Tehran. Districts 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, and 20, which comprise about 26% of Tehran's population, were affected by land subsidence. The drop in the water level of observation wells was considerable in the areas where the highest land subsidence occurred. The subsidence level had a decreasing trend from the south to the north of Tehran, where districts 1, 3, and 4 had the lowest subsidence rate in 2022. Another finding was the decrease of the underground water level from the north to the south of Tehran, indicating that the water depth in the southern areas of Tehran has decreased due to human activities such as water pumping. The results of regression analysis showed the high relationship between land subsidence and changes in the underground water levels.

Conclusion

The results of this study showed that the increasing in pumping water from wells in the study area for various uses such as drinking, industrial, and agricultural has led to the escalation of land subsidence. Correct and efficient management of water resources in urban and non-urban areas of Tehran metropolis is mandatory with the knowledge that most observation wells have experienced a drop in water level and some of them have dried up. The use of InSAR technique and Sentinel-1 data is helpful in determining the rate and range of land subsidence.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

The current research has been done with the full knowledge of the authors about the process of conducting the research and the points of research ethics have been fully observed in it.

Funding

This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.



Authors' contributions

All authors equally contributed to preparing this article.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank the National Cartographic Center of Iran and the regional water department of Tehran for providing the data needed to conduct this research.



مقاله پژوهشی

بررسی میزان فرونشست کلان شهر تهران با استفاده از تکنیک تداخل سنجی پراکنش گر دائم و تصاویر راداری سنتینل-۱

* محمدحسن نامی^۱، مهدی نادری^۲

۱. گروه جغرافیای سیاسی، دانشگاه علوم و فنون فارابی، تهران، ایران.

۲. گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Use your device to scan and read the article online



Citation Nami, M. H., Naderi, M. (2024). [Assessments of Land Subsidence in the Tehran Metropolitan Using Satellite Radar Interferometry Technique (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(2):138-157. <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.866.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.866.1>

چکیده

زمینه و هدف: بسیاری از شهرهای جهان به دلیل تنش های زیست محیطی ناشی از توسعه شهری با مشکل فرونشست زمین مواجه هستند. شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک حاکم بر اغلب نواحی داخلی ایران و لزوم بهره برداری روزافزون صنعتی، کشاورزی و آب شرب بر منابع آب زیرزمینی و همچنین توسعه شهرنشینی، زیرساخت مناسبی را برای رخداد این پدیده به خصوص در کلان شهر تهران فراهم کرده است. **روش:** در این پژوهش، ۳۱ تصویر سنتینل-۱ با استفاده از تکنیک سری زمانی تداخل سنجی پراکنش گر دائم (PSI) در طول بازه زمانی سال ۱۴۰۱ پردازش و نقشه میانگین نرخ تغییرات سالانه فرونشست کلان شهر تهران تولید شد. در نهایت، پس از صحت سنجی نتایج با مشاهدات ایستگاه GPS، نسبت به تبیین رابطه بین فرونشست زمین و بهره برداری از منابع آب زیرزمینی به عنوان مهم ترین عامل ایجاد تغییرات سطح در محدود مطالعاتی اقدام شد.

یافته ها: یافته ها نشان دادند الگوی فرونشست حادث شده با حرکت از سمت دشت به سمت مناطق شهری، دارای روند کاهشی است. بیشترین میزان فرونشست زمین با نرخ -۴۳ میلی متر در سال در بخش های جنوب و جنوب غربی تهران رخ داده است. مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و بخش هایی از منطقه ۲۰ که حدود ۲۶ درصد از جمعیت تهران را تشکیل می دهند، درگیر فرونشست زمین هستند. افت سطح آب چاه های مشاهده ای در مناطقی که حداکثر نرخ فرونشست سطح در آن ها رخ داده است، قابل توجه بوده است. از دیگر یافته های پژوهش، کاهش تراز آب زیرزمینی از شمال به جنوب تهران است و این بدین معنی است که عمق آب در مناطق جنوبی تهران در اثر فعالیت های انسانی مانند پمپاژ آب کاهش یافته است.

نتیجه گیری: بررسی ها نشان می دهند که افزایش فشار بر آبخوان از طریق پمپاژ آب از چاه های محدوده مطالعاتی به جهت مصارف مختلف صنعتی، کشاورزی و آب شرب به تشدید این مخاطره طبیعی در مقیاس وسیعی منجر شده است.

کلیدواژه ها: تداخل سنجی تفاضلی، تحلیل سری زمانی، منابع آب زیرزمینی، تصاویر رادار، کلان شهر تهران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۰۷ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۵ خرداد ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۱۱ تیر ۱۴۰۳

* نویسنده مسئول:

دکتر محمدحسن نامی

نشانی: تهران، دانشگاه علوم و فنون فارابی، گروه جغرافیای سیاسی،

تلفن: ۵۸۹۷۵۶۲۱ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: dr.mh.nami@gmail.com

Copyright © 2024 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد و توسعه سریع شهرنشینی به نیاز فوری به نظارت و پایش مستمر مناطق شهری منجر شده است. عوامل مختلف طبیعی و انسانی مانند بهره‌برداری بیش از حد از سفره‌های زیرزمینی، زلزله، گسترش شهری و پروژه‌های بزرگ ساخت‌وساز شهری مانند تونل‌سازی زیرزمینی به تغییر شکل زمین و فرونشست مناطق شهری منجر می‌شوند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۱؛ آرانژیو و همکاران، ۲۰۱۴؛ کراستو و همکاران، ۲۰۱۹؛ نوولینو و همکاران، ۲۰۱۷). فرونشست زمین به‌عنوان جابه‌جایی رو به پایین سطح زمین نسبت به سطح مرجع تعریف می‌شود که از چند میلی‌متر تا چند متر متغیر بوده و میزان جابه‌جایی افقی در این حرکت ناچیز است (ویدودو و همکاران، ۲۰۱۹).

رخدادهای تغییرات اقلیم و تداوم خشکسالی و نیز مدیریت غیراصولی منابع آبی به‌دنبال رشد فزاینده جمعیت، به فرونشست زمین در مناطق شهری و غیرشهری کلان‌شهر تهران منجر شده است. گاهی این مخاطره طبیعی به‌سبب تحریک عوامل ایجابی آن مانند بهره‌برداری بیش از ظرفیت منابع آب زیرزمینی دشت‌ها، دامنه گسترده‌ای به خود گرفته و علاوه بر ایجاد پدیده‌های مورفولوژیک فراوان در سطح زمین، به مخاطره^۱ و تهدید برای انسان و دستاوردهای انسانی تبدیل می‌شود (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱). روش‌های مرسوم اندازه‌گیری فرونشست زمین مانند: ۱) اندازه‌گیری مستقیم تراکم آبخوان توسط اکستنسومتر، ۲) مشاهده تراز آب زیرزمینی، ۳) محاسبه با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژی و ۴) اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع توپوگرافی با روش‌های زمین‌سنجی^۲، ترازبایی و سیستم موقعیت‌یاب جهانی^۳، اگرچه دقت بالایی دارند اما تا حدود پذیرفته‌شده‌ای زمان‌بر و دشوار هستند و در بسیاری از موارد اندازه‌گیری دقیق میدانی به‌ویژه در مناطق شهری متراکم امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، روشی برای نظارت بر جابه‌جایی زمین در مقیاس وسیع در مدت‌زمان کوتاه موردنیاز است تا نتایج قابل‌اعتمادی برای پایش زود هنگام و مستمر مناطق تحت تأثیر مخاطره زمین‌شناسی ارائه دهد (ژو و همکاران، ۲۰۲۲؛ هو و همکاران، ۲۰۱۹؛ هرا و همکاران، ۲۰۱۳).

امروزه با بهره‌گیری از فناوری جدید سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای ارائه‌شده توسط ماهواره‌های مختلف، پایش و نظارت بر فرونشست زمین با دقت بالایی قابل انجام است. تداخل سنجی پراکنش گر دائمی^۴ یک تکنیک سری‌زمانی است که از اطلاعات نامزدهای پراکنش گر پایدار برای پایش مداوم فرونشست زمین و

تخمین سرعت جابه‌جایی هدف در امتداد خط دید^۵ سنسور با دقت میلی‌متر استفاده می‌کند (کراساکیس و همکاران، ۲۰۱۹). به‌کارگیری تکنیک PSI به‌عنوان یک روش جدید و پیشرو می‌تواند بر محدودیت‌های روش سنتی «رادار روزنه مصنوعی تداخل سنج تفاضلی»^۶ از قبیل عدم همبستگی مکانی و زمانی که مانع تولید تداخل‌نماهای تفاضلی^۷ می‌شود و همچنین اثر اتمسفر غلبه کند (کراستو و همکاران، ۲۰۱۹).

لو و همکاران (۲۰۱۴)، تکنیک تداخل سنجی پراکنش گر دائم PSI و تصاویر ترانسار-ایکس^۸ را در تعیین نرخ فرونشست زمین در شهر تیانجین بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ به کار بردند. قاضی‌فرد و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از تکنیک D-InSAR و لایه‌های اطلاعاتی متعدد از قبیل داده‌های پیرومتری، دیواره چاه‌ها و بررسی‌های ژئوفیزیکی به ارزیابی فرونشست زمین در شهر دامنه، ایران پرداختند. در مطالعه فروغ‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)، دو مجموعه تصاویر شامل سنتینل-۱ و انویست-آسار^۹ جهت محاسبه فرونشست زمین شهر تهران با تکنیک PSI مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بیانگر فرونشست چشم‌گیر در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه برای همه آنالیزهای سری‌زمانی بود. دنگ و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی فرونشست زمین در شهر جیانگجین با استفاده از الگوریتم «طول خط مبنای مکانی کوتاه»^{۱۰} و تصاویر سنتینل-۱ پرداختند.

ویدودو و همکاران (۲۰۱۹)، نقشه جابه‌جایی سطح مبتنی بر تکنیک D-InSAR و داده‌های باند C سنتینل-۱ برای منطقه شهری جاکارتا را ارائه دادند. در پژوهش مقصودی و همکاران (۲۰۱۹) که در منطقه غرب تهران و با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی انجام شد، یک سری‌زمانی ۲ ساله متشکل از ۳۰ تصویر سنتینل-۱ مورد استفاده قرار گرفت. در پژوهش استوپر و همکاران (۲۰۲۰) با عنوان «بررسی فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد برای پایش فرونشست معادن بزرگ»، روش‌های نظارتی مانند کل ایستگاه‌ها، سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی^{۱۱} و پهپاد^{۱۲} در معدن زغال سنگ ولنچ طی سال ۲۰۱۷ بررسی شدند. نتایج کلی نشان دادند هر دو روش GNSS و UAV برای نظارت بر فرونشست معدن مناسب هستند. پابی و همکاران (۲۰۲۰)، از تکنیک تداخل سنجی راداری به‌منظور برآورد فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی استفاده کردند.

5. Line of sight

6. Differential interferometric synthetic aperture radar (D-InSAR)

7. Differential interferogram

8. TerraSAR-X

9. ENVISAT-ASAR

10. Small baseline subset (SBAS)

11. Global navigation satellite system (GNSS)

12. Unmanned aerial vehicle (UAV)

1. Hazard

2. Geodesy

3. Global positioning system (GPS)

4. Persistent scatters interferometry (PSI)



مشخصه اصلی زمین‌شناسی تهران، قرار گرفتن آن بین دو توده عظیم رشته‌کوه البرز و فلات ایران است که مهم‌ترین نمود این مسئله، وجود گسل‌های فعالی مانند گسل مشاء، گسل شمال تهران و گسل ری است که موجب وقوع زمین‌لرزه‌های خفیف در محل این گسل‌ها شده است. در چند دهه اخیر، عملکرد نامناسب بشر به‌ویژه در برداشت‌های غیراصولی از منابع سیالی و غیرسیالی زیرسطحی مانند سفره‌های آب زیرزمینی و منابع نفت و گاز و همچنین توسعه شهرنشینی، به رخداد فرونشست زمین در بسیاری از دشت‌های بحرانی کشور از جمله دشت تهران منجر شده است. رشد و توسعه شهرهای بزرگ مانند تهران از نظر ابنیه و همچنین توسعه شریان‌های مهم از قبیل خطوط انتقال برق، گاز، بزرگراه‌ها و ساختمان‌های مهم، پیش از هر چیزی نیازمند انجام مطالعات دقیق و شناخت مخاطره‌های طبیعی از جمله فرونشست زمین است تا مناطق متأثر از این مخاطره زمین‌شناختی شناسایی شده و مورد ارزیابی قرار گیرند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۹). بررسی آمار نشان می‌دهد طی بازه زمانی ۱۹۷۰-۲۰۱۲، تعداد چاه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی به ۳ برابر افزایش یافته و متوسط تراز آب زیرزمینی حدود ۱۲ متر کاهش یافته است (محمودپور و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین باتوجه به مجموع موارد ذکر شده، اهمیت انتخاب کلان‌شهر تهران به‌عنوان محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر نمود پیدا می‌کند. در تصویر شماره ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

داده‌های مورد استفاده

سنتینل-۱، از سری ماهواره‌های راداری سازمان فضایی اروپا^{۱۴} است که به‌منظور نقشه‌برداری سراسری از مناطق خشکی، مناطق ساحلی، مناطق یخی دریا، مناطق قطبی و اقیانوس‌ها با وضوح بالا طراحی شده است. سنتینل-۱ دارای یک مجموعه دو ماهواره‌ای به نام‌های سنتینل-1A و سنتینل-1B است که به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ به فضا فرستاده شدند و هر یک با فاصله ۱۸۰ درجه از یکدیگر قرار گرفته‌اند. اضافه شدن سری B به سری A این سنجنده تنها باعث تقلیل زمان بازدید مجدد^{۱۵} از ۱۲ روز به ۶ روز شده است (نادری، ۱۴۰۰).

از دیگر مشخصه‌های مهم این ماهواره می‌توان به تصویربرداری در محدوده مایکروویو و طول موج باند C (طول موج برابر با ۵/۵ سانتی‌متر)، مدار قطبی خورشید آهنگ و قدرت تفکیک مکانی متغیر از ۵ متر با عرض برداشت ۲۰ کیلومتر تا ۴۰ متر با عرض برداشت ۴۰۰ کیلومتر اشاره داشت. در این پژوهش، از محصول مختلط تک‌منظر^{۱۶} این ماهواره با حالت تصویربرداری نوار عریض

ژو و همکاران (۲۰۲۲)، به کمک روش‌های سری‌زمانی اینسار^{۱۳} و GNSS نسبت به بررسی پایش فرونشست زمین در شهر کون‌مینگ اقدام کردند و حداکثر نرخ فرونشست زمین، ۴۸ میلی‌متر در سال برآورد شد. یونسی سینکی و آخوندزاده هنزائی (۲۰۲۳)، فرونشست تونل خط ۷ متروی تهران را با استفاده از تصاویر پایش‌کننده سنتینل-۱ در یک بازه زمانی ۶ ماهه و روش تداخل‌سنجی موردبررسی قرار دادند.

بررسی ادبیات و پیشینه تحقیق نشان می‌دهد به‌کارگیری تکنیک سری‌زمانی PSI در تحقیقات متعددی به‌خصوص در محدوده مطالعاتی شهر تهران مورد توجه بوده است. با این حال، اکثر مطالعات بر بخش‌های جنوبی شهر تهران که به دشت‌های تهران و شهریار منتهی می‌شود، متمرکز شده‌اند و مطالعه‌ای که فرونشست مناطق ۲۲ گانه شهر تهران را به‌صورت جامع مورد تحلیل و بررسی قرار دهد، مورد نیاز است. به‌منظور تبیین رابطه بین جابه‌جایی‌های حادث‌شده و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی که به‌عنوان مهم‌ترین عامل ایجاد فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی شناخته می‌شود، تغییرات ایستابی آب چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق شهری و غیرشهری مورد ارزیابی قرار گرفت. از دیگر اهداف پژوهش حاضر می‌توان به قابلیت پتانسیل تصاویر SAR سنتینل-۱ برای تحلیل سری‌زمانی در پایش تغییرات سطح زمین اشاره داشت.

روش

منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران به مرکزیت شهر تهران با وسعتی حدود ۱۳۶۸۸ کیلومتر مربع در سمت شمال و شمال‌غربی کشور قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی، این شهر بین ۳۴ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. استان تهران با بیش از ۱۳ میلیون نفر جمعیت، ۵/۱۷ درصد جمعیت کل کشور را در خود جای داده است. گرم‌ترین ماه‌های سال شامل مرداد و شهریور با دمای متوسط ۳۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه‌های سال شامل دی و بهمن با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. از دید ناهمواری‌های طبیعی، تهران به دو ناحیه دشتی و کوهپایه‌ای البرز تقسیم می‌شود و گستره کنونی آن از ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است. تهران دارای اقلیم نیمه‌خشک است؛ به‌گونه‌ای که عواملی از قبیل بارش بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال، دمای کافی و خاک مساعد، پوشش گیاهی مناسبی را به‌صورت مراتع بهاری و تابستانی در مناطق شمالی استان به وجود می‌آورد (نادری و رحیمی هزاروند، ۱۴۰۱).

14. European Space Agency (ESA)

15. Revisit time

16. Single look complex (SLC)

13. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR)



جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش حاضر

سنجنده	باند	تعداد	مدار	مد تصویربرداری	قطبش	دوره بازدید مجدد
ستینل 1A	C	۳۱	بالاگر	نوار عریض تداخل سنجی (IW)	عمودی - عمودی (VV)	۱۲

در فرمول‌های شماره ۱ و ۲، Φ_{int} فاز تداخل نما، Φ_{def} فاز ناشی از تغییر شکل زمین، Φ_{resi} فاز باقیمانده، Φ_{topo} فاز ناشی از توپوگرافی، Φ_{atm} فاز ناشی از اثرات اتمسفر، Φ_{orbit} فاز ناشی از خطای موجود در پارامترهای مداری و Φ_{noise} فاز ناشی از نویز نامرتبط تولید شده توسط پراکنش گر ها در پس زمینه‌ای به نام کلاتر و نویز حرارتی که فاز موج الکترومغناطیس را تحت تأثیر قرار می‌دهد، هستند. فازهای ناشی از توپوگرافی (Φ_{topo})، اتمسفر (Φ_{atm})، خطاهای مداری (Φ_{orbit}) و نویز (Φ_{noise})، فاز باقیمانده (Φ_{resi}) را تشکیل می‌دهند. تغییرات فاز ناشی از خطاهای مختلف با استفاده از معادلات ابهام ارتفاعی به دست آمده است. تغییر ارتفاع که تغییر فاز تداخل سنجی 2π را پس از حذف فاز توپوگرافی ایجاد می‌کند، ابهام ارتفاعی (H_a) نامیده می‌شود که معادله آن در فرمول شماره ۳ آورده شده است (باملر و هارتل، ۱۹۹۸):

$$3. H_a = \frac{\lambda r \sin \theta}{2B_n}$$

همچنین ابهام ارتفاعی را می‌توان با استفاده از فرمول شماره ۴ بیان کرد:

$$4. H_a = \frac{\Delta d}{\phi_d 2\pi}$$

با استفاده از فرمول‌های شماره ۳، ۴ و ۵ به صورت زیر تعریف می‌شود:

5.

$$\frac{\Delta d}{\phi_d} 2\pi = \frac{\lambda r \sin \theta}{2B_n}$$

$$\phi_d = \frac{4\pi B_n}{\lambda r \sin \theta} \Delta d$$

$$\Phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot V \cdot T$$

در فرمول‌های شماره ۳، ۴ و ۵، λ طول موج، θ زاویه برخورد، R فاصله رنج، B_n خط مبنای عمود، Δd تغییرات Φ_d و Φ_{dem} تغییر فاز ناشی از عدم دقت مدل رقومی ارتفاعی است (هوپر و همکاران، ۲۰۰۶). فاز ناشی از تغییر شکل زمین را می‌توان با استفاده از تغییر در سرعت مدل سازی کرد (لو و لیائو، ۲۰۰۸). بنابراین Φ_{def} را می‌توان همان طور که در فرمول شماره ۵ نشان داده شده است، بیان کرد؛ جایی که V سرعت جابه جایی در امتداد جهت خط دید و T خط مبنای زمانی بین گذرهای SAR است فرمول‌های شماره ۱ و ۲. فاز تداخل سنجی (Φ_{def}) و فاصله نمونه برداری (T) مقادیر مشاهده شده هستند. سرعت خطی (V) و فاز باقیمانده (K) را می‌توان با استفاده از روش برازش

تداخل سنجی^{۱۷} که در مباحث مرتبط با تداخل سنجی راداری کاربرد دارد، استفاده شده است. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

تکنیک تداخل سنجی پراکنش گر دائمی

تکنیک PSI یک تکنیک سری زمانی InSAR است که از مجموعه تصاویر SAR در یک منطقه یکسان برای بازیابی سرعت تغییر شکل زمین در خط دید سنسور^{۱۸} استفاده می‌کند. PSI، اهداف پراکنش گر دائم^{۱۹} را که دارای کمترین تأثیر از عدم همبستگی مکانی و زمانی هستند، انتخاب می‌کند. علاوه بر این، سهم اثرات جوی در فاز تداخل سنجی با استفاده از تخمین صفحه فاز اتمسفر^{۲۰} برآورد می‌شود که حذف آن به افزایش دقت اندازه گیری جابه جایی تا یک میلی متر در سال منجر می‌شود. پیکسل هایی که ثبات آماری در دامنه و فاز تداخلی مشاهده شده در سیگنال SAR دریافتی در مجموعه سری زمانی تصاویر دارند، کاندیدهای پراکنش گر دائم هستند (تامبورینی و همکاران، ۲۰۱۰). فاز تداخل سنجی SAR در طول فرایند تداخل سنجی پراکنش گر دائم تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند عدم دقت هندسه اکتساب، خطای ناشی از داده های توپوگرافی، اثرات اتمسفر، خطاهای مداری و نویزهای حرارتی قرار می‌گیرد. خطای فاز توپوگرافی در طول حذف فاز توپوگرافی به دلیل عدم دقت مدل رقومی ارتفاعی^{۲۱} استفاده شده القا می‌شود (تامبورینی و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین خطای دیگری به نام خطای توپوگرافی باقیمانده^{۲۲} وجود دارد که دلیل آن، اختلاف بین ارتفاع واقعی مرکز فاز پراکنش یک PS معین و DEM در یک نقطه معین است. خطاهای مداری به دلیل انحراف پلتفرم SAR ایجاد می‌شوند. معادلات ریاضی که فازهای تداخل سنجی مشاهده شده دریافتی از پراکنش ها را کمی می‌کند، در فرمول های شماره ۱ و ۲ ارائه شده است (باملر و هارتل، ۱۹۹۸):

$$1. \Phi_{int} = \Phi_{def} + \Phi_{resi}$$

$$2. \Phi_{int} = \Phi_{def} + \Phi_{topo} + \Phi_{atm} + \Phi_{orbit} + \Phi_{noise}$$

17. Interferometric wide swath (IW)

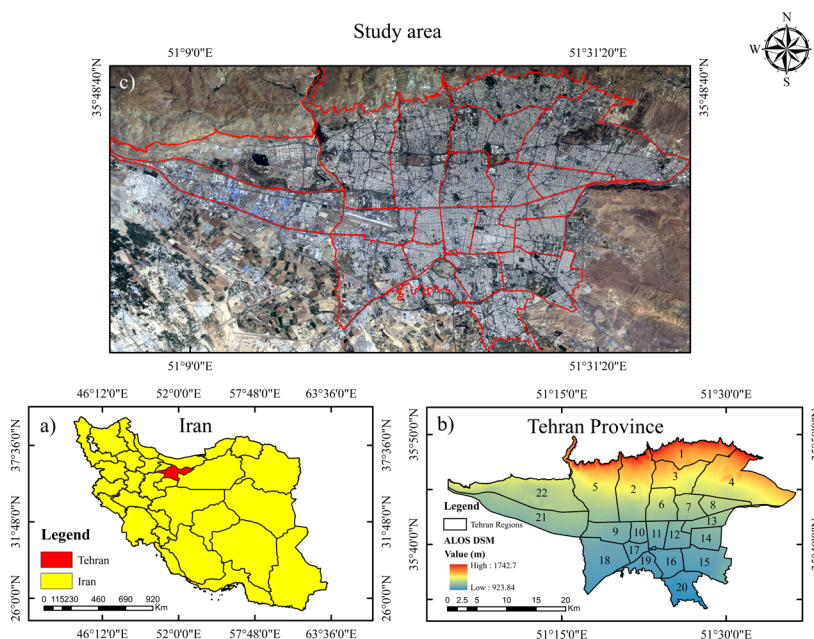
18. Line of sight (LOS)

19. Persistent scatters (PS)

20. Atmospheric phase screen estimation (APS)

21. Digital elevation model (DEM)

22. Residual topographic error (RTE)



تصویر ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

(الف کشور، ب) استان، ج) تصویر ماهواره‌ای لندست-۸ با ترکیب رنگی واقعی (قرمز: باند ۴، سبز: باند ۳ و آبی: باند ۲) (نادری و رحیمی هزاروند، ۱۴۰۱)

روش انجام تحقیق

روش انجام تحقیق حاضر پیمایشی - آمایشگاهی و تحلیلی - استدلالی است. در مرحله پیش‌پردازش، پس از فراخوانی تصاویر و تبدیل آن‌ها به فرمت قابل خوانش توسط ماژول SARscape مستقر بر پلتفرم ENVI، باتوجه به اینکه محدوده مطالعاتی تنها بخشی از سین تصویر را تشکیل می‌دهد، نسبت به برش تصاویر براساس مرز منطقه مورد مطالعه اقدام شد. پس از آماده‌سازی مجموعه داده اولیه، براساس معیارهای اتخاذشده، تصاویر پایه و پیرو سنتینل-۱ طی مرحله اتصال گراف مشخص شدند. تصویری که عدم همبستگی مکانی و زمانی آن در طول سری زمانی حداقل بود، به‌عنوان تصویر مرجع انتخاب شد. در مرحله دوم، ثبت هندسی تصاویر و تولید تداخل‌نما انجام شد. طی فرایند ثبت هندسی، هر پیکسل هدف زمینی دارای آزیموت و دامنه منفرد و یکسان در تصاویر پایه و پیرو است. در مرحله سوم، با استفاده از مجموعه تداخل‌نماهای حاصل‌شده از مرحله قبل و همچنین شاخص پراکندگی دامنه ۳، پیکسل‌های پراکنش‌گر دائم که رفتار فازی آن‌ها در طول زمان ثابت است، برگزیده شدند. پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی، تداخل‌نماهای تمامی تصاویر SAR نسبت به تصویر پایه در نقاط PS محاسبه شدند. در مرحله چهارم، باتوجه به اینکه اختلاف فاز دو تصویر SAR برای هر PS شامل مؤلفه‌هایی از قبیل فاز ناشی از اتمسفر، فاز ناشی از خطاهای مداری، فاز ناشی از توپوگرافی و فاز ناشی از نویز است،

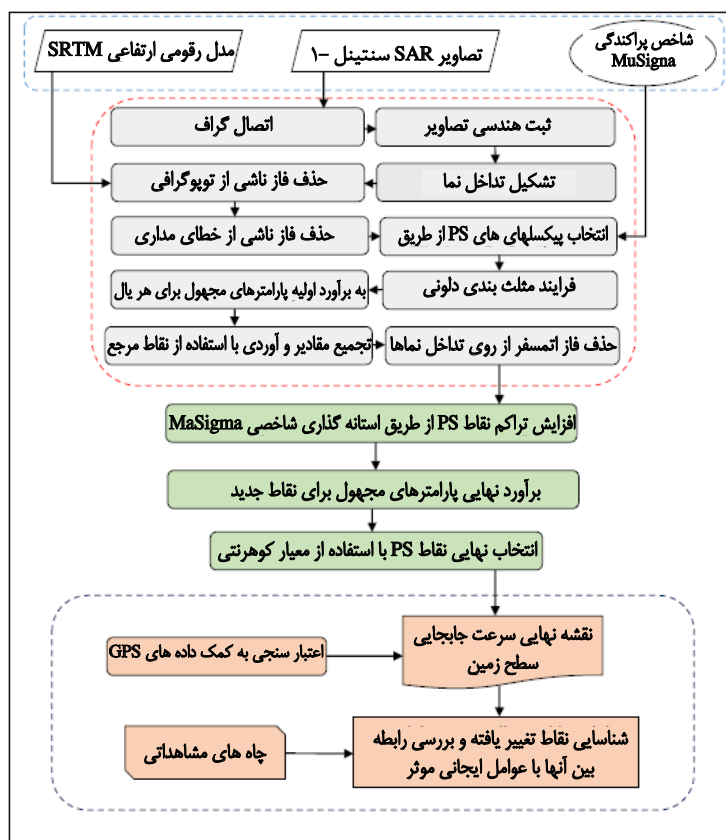
خطی حداقل مربعات محاسبه کرد. بازایی فاز جابه‌جایی خطی از طریق حذف فاز باقیمانده (Φ_{resi}) از فاز تداخل‌نما (Φ_{int}) انجام می‌شود. تخمین فاز ناشی از اتمسفر (Φ_{atm}) پس از حذف سایر مؤلفه‌های فاز باقیمانده انجام می‌شود. این تأخیر فاز اتمسفر دارای همدوسی مکانی بالا (در یک زمان خاص) و همدوسی زمانی کمتری است؛ به این معنی که صحنه‌های SAR همان تأخیر فاز اتمسفر را در همه صحنه‌هایی که به‌طور هم‌زمان به دست می‌آیند، تجربه می‌کنند، اما این تأخیر فاز اتمسفر به‌صورت زمانی از یک صحنه به صحنه دیگر متفاوت است. تخمین APS را می‌توان با استفاده از فرایند کریجینگ انجام داد (گوچیونه و همکاران، ۲۰۱۳؛ آواستی و همکاران، ۲۰۲۰). فرمول این روش درون‌یابی را می‌توان به‌صورت فرمول شماره ۶ بیان کرد (هوپر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$6. Aps(So) = \sum_{i=1}^M \lambda_i APS(Si)$$

$$\sum_{i=1}^M \lambda_i = 1, \lambda_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^M d_i}$$

که $APS(Si)$ فاز اتمسفر نقطه i PS، So پیکسل برای درون‌یابی و M تعداد نقاط PS موردنیاز برای انجام محاسبات است. در تابع وزنی، λ_i وزن فاصله معکوس و d_i فاصله بین نقطه PS و پیکسل برای درون‌یابی است (آواستی و همکاران، ۲۰۲۰). هنگامی که APS ها در شبکه تصویر معمولی تعیین و نمونه‌برداری مجدد شدند، داده‌ها برای سهم این فاز جبران می‌شوند (آواستی و همکاران، ۲۰۲۰). درنهایت، پس از برآورد دقیق فاز اتمسفر و حذف آن، محاسبه فاز جابه‌جایی شامل اجزای خطی و غیرخطی به‌صورت پیکسل به پیکسل انجام می‌شود (آواستی و همکاران، ۲۰۲۰).

23. Amplitude dispersion index (ADI)



تصویر ۲. نمودار جریانی تحقیق (تهیه شده توسط نگارنده)

تفاضلی^{۲۴} چندگانه استفاده می‌شود. براساس معیارها و آستانه‌های تعریف شده در شبکه تصاویر، یک تصویر که کمترین تأثیر از عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی را دارد به‌عنوان تصویر پیرو^{۲۵} در نظر گرفته می‌شود. خروجی حاصل از این مرحله، نمودارهای زمان - موقعیت^{۲۶} و زمان - خط مبنا^{۲۷} هستند که در **تصویر شماره ۳ (الف و ب)** ارائه شده‌اند. نمودار زمان - موقعیت معرف فاصله نرمال تصویر پیرو نسبت به تصاویر پایه^{۲۸} است. نمودار زمان - خط مبنا نیز خط مبنای نرمال تصویر پیرو نسبت به تصاویر پایه را ارائه می‌دهد. براساس نتایج، تصویر تاریخ ۱۴ آگوست ۲۰۲۲ به‌عنوان تصویر پیرو در این مرحله انتخاب شد.

مطابق **تصویر شماره ۳**، با استفاده از تصویر مرجع مرتبط با ۱۴ آگوست ۲۰۲۲ و پس از انجام عملیات ثبت هندسی، براساس قاعده کلی که برای یک سری زمانی متشکل از N تصویر، N-1 تداخل نما تولید می‌شود، ۳۰ تداخل نما تشکیل شد و مدل رقومی

نسبت به شناسایی فازهای مذکور اقدام شد تا در نهایت با تفاضل موارد فوق از فاز تداخل نما، فاز ناشی از جابه‌جایی سطح زمین برآورد شود. پس از حصول اطمینان از برآورد صحیح فازهای مذکور و حذف آن‌ها از فاز تداخل نما، فاز باقیمانده صرفاً شامل فاز ناشی از جابه‌جایی زمین بود. در گام آخر و پس از ژئوکد یا زمین مرجع کردن مجموعه خروجی‌های اخذ شده، نقشه نهایی متوسط جابه‌جایی سطح زمین در سیستم مختصات سنجنده تولید شد. علاوه بر این، با تجزیه و تحلیل نقشه فرونشست زمین و شناسایی نقاط تغییر یافته، اقدام به تبیین دلایل ایجابی این امر به‌ویژه تغییرات ایستابی آب چاه‌های مشاهده‌ای شد تا رابطه بین مقدار فرونشست زمین با تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد. نمودار جریانی تحقیق در **تصویر شماره ۲** ارائه شده است.

یافته‌ها

نتایج حاصل از مراحل عملی تداخل‌سنجی PSI جهت تولید نقشه متوسط نرخ تغییرات زمین

اولین مرحله از پردازش تکنیک PSI، اتصال گراف است؛ به‌گونه‌ای که شبکه‌ای از تصاویر پردازش نشده که تحت عنوان تصویر می‌شناسیم، ایجاد می‌شود که برای تولید تداخل‌نماهای

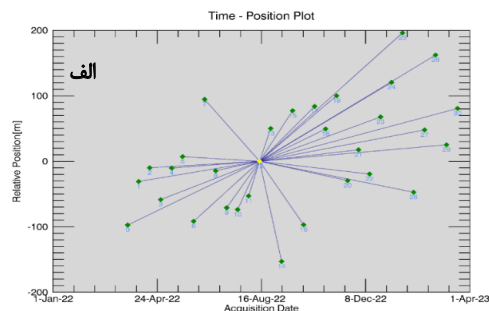
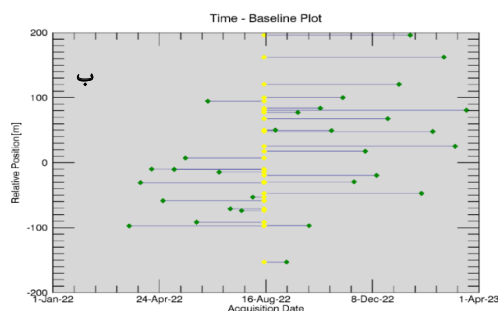
24. Differential interferogram

25. Master

26. Time-position

27. Time-baseline

28. Slave



تصویر ۳. نمودارهای حاصل از فرایند اتصال گراف (تهیه شده توسط نگارنده)

الف) نمودار زمان - موقعیت، ب) نمودار زمان - خط مبدا. نقاط با رنگ زرد معرف تصویر پیرو و نقاط با رنگ سبز معرف اکتسابهای صحیح هستند.

$$9. \xi^A, A0 = 1/M \sum_{int} e^{j(\Delta \phi_{intA, A0} - \phi_{intH, A, A0} - \phi_{intV, A, A0})}$$

که M معرف تعداد تداخل نما و $\xi^A, A0$ مقدار مطلق کوهرنسی زمانی برای یال بین دو پیکسل مجاور A و $A0$ هستند. با استفاده از نقاط مرجع^{۳۱}، مقادیر تخمین زده شده برای هر یال با یکدیگر تجمیع^{۳۲} می شوند تا مقدار فاز باقیمانده و سرعت جابه جایی در هر نقطه از شبکه به دست آید. در تصویر شماره ۴، نقاط مرجع انتخاب شده جهت برآورد مقادیر مجهول هر نقطه از شبکه در زیر ناحیه های مختلف نشان داده شده است.

پس از محاسبه پارامترهای مجهول در شبکه نقاط و همچنین حصول اطمینان از برآورد صحیح فاز اتمسفر و حذف آن از باقیمانده فاز تداخل نماها، یک مدل جابه جایی خطی برای تخمین نرخ تغییرات به صورت فرمول شماره ۱۰ در نظر گرفته شد:

$$10. disp = K + V \times (T - T0)$$

که $disp$ مقدار جابه جایی در زمان T و K عبارت ثابت با درجه صفر است که صرفاً برای فرایند برازش نهایی استفاده می شود و V سرعت جابه جایی است. در تصویر شماره ۵، نقشه متوسط فرونشست سطح محدوده مطالعاتی مستخرج از فرایند تداخل سنجی طی بازه زمانی سال ۱۴۰۱ ارائه شده است. باتوجه به اینکه محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر، علاوه بر مناطق ۲۲ گانه شهری تهران، بخش هایی از اراضی کشاورزی دشت شهریار را نیز تشکیل می دهد، بنابراین یافته های حاصل از نقشه تغییرات فرونشست زمین را می توان در محدوده های شهری و غیرشهری مورد بررسی قرار گیرد. مطابق تصاویر شماره ۵ و ۶ که معرف نقشه نرخ فرونشست زمین در بخش های جنوب غربی استان تهران هستند، ملاحظه می شود که اراضی کشاورزی متحمل فرونشست زمین با مقادیر متغیر از ۲- تا حداکثر ۳۸- میلی متر در سال شده اند. نکته قابل توجه، گسترش و نفوذ این پدیده به شهرها و واحدهای مسکونی - صنعتی مانند شهر قدس و شهرک مسکونی گلگون واقع در محدوده مطالعاتی است. بیشینه نرخ

ارتفاعی مأموریت توپوگرافی شاتل رادار^{۲۹} با وضوح مکانی ۹۰ متر و فایل مداری ماهواره به ترتیب برای حذف فازهای ناشی از توپوگرافی و خطای مداری (زمین مسطح) به کار گرفته شد. به منظور انتخاب کاندیدهای پراکنش گر دائمی از شاخص پراکندگی دامنه $MuSigma$ استفاده شد که به صورت فرمول شماره ۷ تعریف می شود (کوتولاک و همکاران، ۲۰۲۰):

$$7. MuSigma = \frac{Ma}{\sigma a}$$

مبتنی بر شاخص پراکندگی دامنه، پیکسل های پراکنش گر دائم انتخاب و طی فرایند مثلث بندی دلونی^{۳۰} به یکدیگر مرتبط می شوند تا شبکه های از نقاط شکل گیرد. از ملزومات انتخاب پیکسل های PS می توان به پایدار بودن آن ها در طول زمان (نوسانات کمتر از یک میلی متر) و جهت گیری مناسب آن ها به گونه ای که از آنتن SAR قابل تشخیص باشند، اشاره کرد. باتوجه به حذف فاز ناشی از خطای مداری و همچنین فاز ناشی از توپوگرافی از فاز تداخل نما، اختلاف فاز تداخل سنجی برای دو پیکسل مجاور A و $A0$ در شبکه نقاط به صورت فرمول شماره ۸ تعریف می شود:

$$8. \Delta \phi_{intA, A0} = \phi_{intA} - \phi_{intA0} = \phi_{intH, A, A0} + \phi_{intV, A, A0} + \phi_{intNoise, A, A0}$$

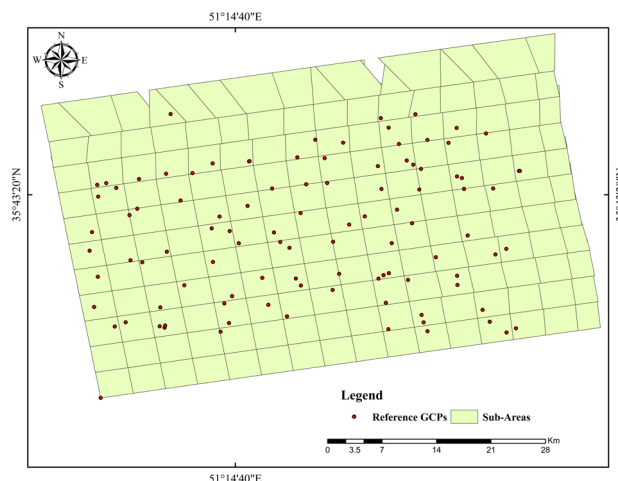
که $d\phi_{intH, A, A0}$ خطای باقیمانده توپوگرافی، $d\phi_{intV, A, A0}$ فاز ناشی از جابه جایی در راستای خط دید ماهواره و $d\phi_{intNoise, A, A0}$ فاز ناشی از نویز بر روی یال بین دو پیکسل مجاور هستند. در صورت بالا بودن تراکم نقاط پراکنش گر دائم و همچنین کمتر بودن اختلاف فاز دو پیکسل مجاور از نصف طول موج (شرط نایکوئیست)، محاسبه پارامترهای مجهول با استفاده از فاز بازیابی نشده امکان پذیر خواهد بود. پارامترهای مجهول قابل برآورد در این مرحله، ارتفاع باقیمانده و سرعت جابه جایی برای هر یال ارتباطی در شبکه نقاط هستند که از طریق ماکزیمم سازی کوهرنسی زمانی به صورت فرمول شماره ۹ محاسبه می شوند (پریسین و همکاران، ۲۰۱۲):

31. Reference points

32. Integration

29. Shuttle radar topography mission (SRTM)

30. Delaunay triangulation



تصویر ۴. نقاط مرجع انتخاب شده جهت برآورد مقادیر مجهول هر نقطه از شبکه در زیر ناحیه های مختلف (تهیه شده توسط نگارنده)

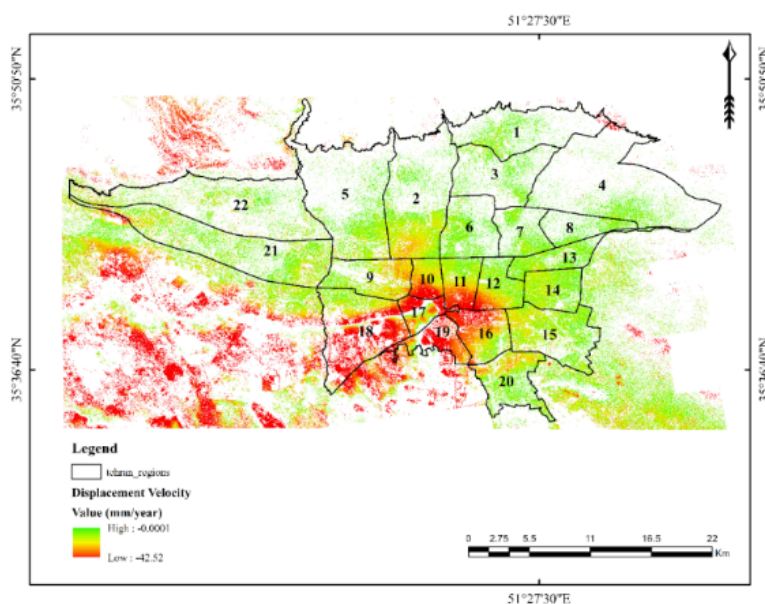
و ۴ دارای کمترین نرخ تغییرات سطح در بازه زمانی سال ۱۴۰۱ بوده اند. از دیگر نقاط تغییر یافته شهری می توان به محدوده کوچکی در انتهای منطقه ۲۱ شهری اشاره داشت؛ جایی که مرکز این جابه جایی با حداکثر نرخ معادل ۲۱- میلی متر در سال در حوالی بزرگراه فتح و بسیار نزدیک به پل تقاطع غیرهمسطح این بزرگراه و خیابان لشکری رخ داده است (تصویر شماره ۸).

اعتبارسنجی مقادیر جابه جایی سطح برآورد شده به کمک تکنیک PSI با مشاهدات ایستگاه دائم GNSS

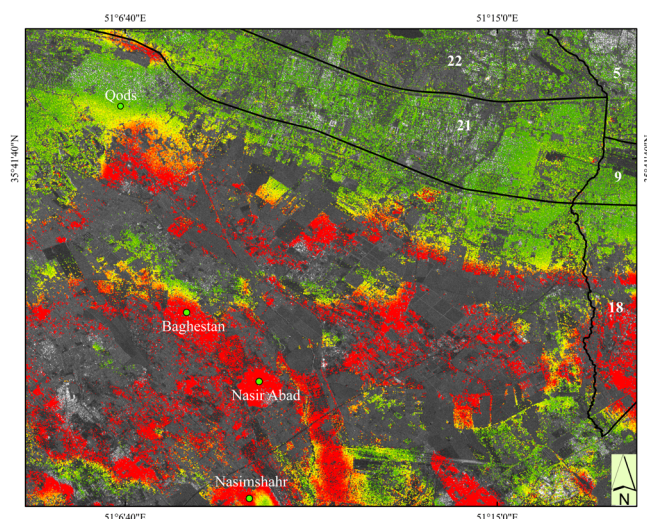
برای ارزیابی صحت نتایج حاصل از تداخل سنجی PSI، از مشاهدات ایستگاه دائم GNSS واقع در سازمان نقشه برداری کشور استفاده شد. این ایستگاه در محدوده شهری و بدون

فرونشست در بخش جنوبی شهر قدس که دارای مرز مشترک با اراضی کشاورزی دشت شهریار است، به ۴۱- میلی متر در سال می رسد. الگوی مشابه در شهرهای باغستان، نسیم شهر و نسیم آباد نیز به چشم می خورد.

مطابق تصویر شماره ۷ که نقشه فرونشست زمین در محدوده شهری را نشان می دهد، مشخص است علی رغم اینکه این پدیده در اکثر مناطق ۲۲ گانه تهران با درجات مختلف به وقوع پیوسته است، با این حال، حداکثر نرخ تغییرات در بخش های جنوبی و به ویژه مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و بخش هایی از منطقه ۲۰ رخ داده است و بیشینه نرخ آن معادل ۴۳- میلی متر در سال است. بررسی و تحلیل نتایج نشان می دهد روند فرونشست سطح از جنوب به شمال شهر تهران کاهشی است و مناطق ۱، ۳



تصویر ۵. نقشه متوسط فرونشست سطح محدوده مطالعاتی مستخرج از فرایند تداخل سنجی طی بازه زمانی سال ۱۴۰۱ (تهیه شده توسط نگارنده)

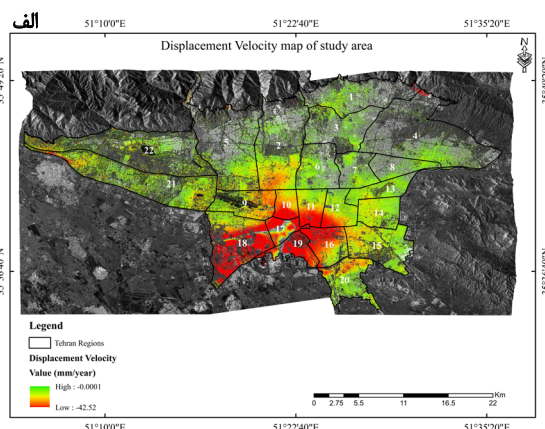
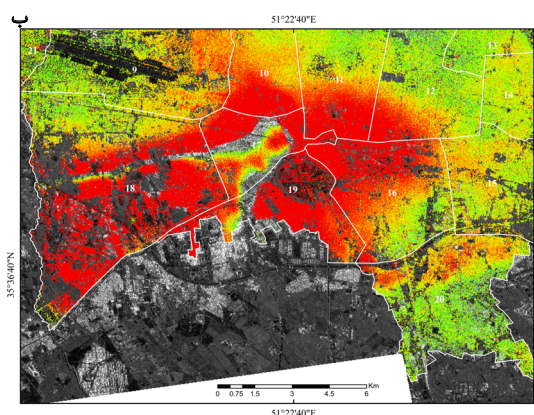


تصویر ۶. نقشه نرخ فرونشست زمین در بخش‌های جنوب‌غربی استان تهران طی بازه زمانی سال ۱۴۰۱ (تهیه شده توسط نگارنده). تصویر میانگین شدت به عنوان تصویر زمینه در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از بررسی رابطه بین فرونشست زمین با اطلاعات حاصل از چاه‌های پی‌زومتری

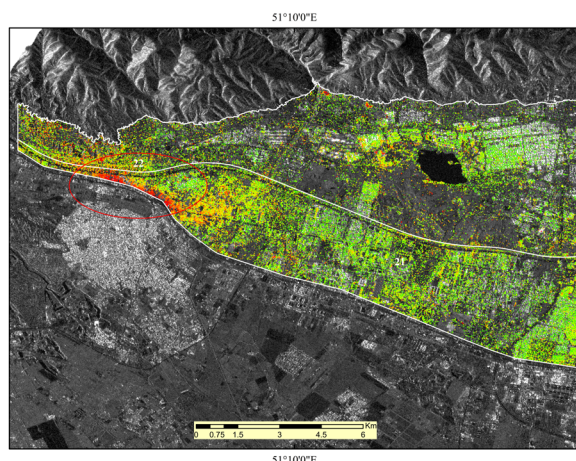
نظر به اینکه نتایج حاصل از فرایند تداخل‌سنجی PSI معرف روند کاهشی فرونشست سطح زمین از سمت دشت به سمت مناطق ۲۲ گانه شهری تهران است (تصویر شماره ۷) و همچنین براساس مطالعات متعدد انجام شده در خصوص عوامل ایجابی فرونشست سطح دشت تهران، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در جهت مصارف مختلف صنعتی، کشاورزی و آب شرب به عنوان مهم‌ترین عامل ایجابی فرونشست سطح زمین در محدوده مطالعاتی مطرح است (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ دهقانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ پاپی و همکاران، ۲۰۲۰؛ اطهری و همکاران، ۲۰۲۲). به منظور بررسی بهتر رابطه بین نقاط تغییر یافته

فرونشست قرار گرفته است. با انتخاب نزدیک‌ترین نقطه پراکنش گر دائمی به ایستگاه مذکور، نمودار رفتار مجموعه زمانی تداخل‌سنجی و مشاهدات زمینی مطابق تصویر شماره ۹ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد الگوی رفتاری فرونشست سطح مستخرج از تداخل‌سنجی PSI با مشاهدات ایستگاه GPS هم‌خوانی دارد و یکدیگر را تأیید می‌کنند. شایان ذکر است با توجه به اینکه مقادیر مشاهدات ایستگاه GPS به صورت قائم است، بنابراین مقادیر جابه‌جایی سطح مستخرج از فرایند تداخل‌سنجی PSI که در راستای خط دید سنجنده است، به مقادیر جابه‌جایی سطح قائم تبدیل شده است.



تصویر ۷. نتایج حاصل از فرایند تداخل‌سنجی PSI (تهیه شده توسط نگارنده)

الف) نقشه فرونشست سطح محدوده شهری شهر تهران طی بازه زمانی سال ۱۴۰۱، (ب) مناطق جنوبی شهر تهران که تحت تأثیر حداکثر نرخ فرونشست سطح بوده‌اند. تصویر میانگین شدت به عنوان تصویر پایه در نظر گرفته شد.



تصویر ۸. محدوده متحمل فرونشست زمین واقع در بخش غربی منطقه ۲۱ شهری تهران (تهیه شده توسط نگارنده)

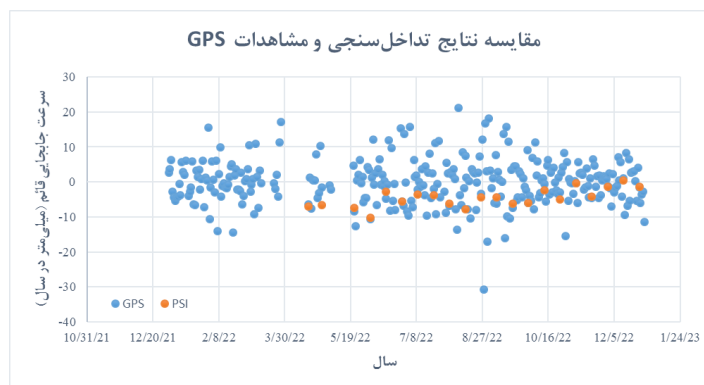
مشاهده‌ای در مرز مناطق شهری و غیرشهری (محدوده B) نشان داده شده است. این محدوده عمدتاً درگیر حداکثر جابه‌جایی سطح زمین بوده است که مرکز این جابه‌جایی، مناطق شهری ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ را دربر می‌گیرد. بررسی نتایج حاصل از سری‌زمانی تغییرات سطح آب در این محدوده نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه تغییرات سطح آب در ایستگاه‌هایی نظیر میدان فتح، یافت‌آباد، خلایز جدید و کشتارگاه افزایشی بوده است، با این حال کاهش روند تغییرات سطح آب در ایستگاه‌هایی مانند رودکی شمالی، حسین‌آباد مفرح، گلدسته D و شمس‌آباد قابل مشاهده است. علاوه بر این، تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای در این محدوده نیز خشک شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به ایستگاه‌های برق الستوم و حسن‌آباد کن در محدوده شهری و فرمان‌آباد و گلدسته در مرز منطقه شهری و غیرشهری اشاره کرد.

در تصویر شماره ۱۳، سری‌زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق کشاورزی بخش جنوب و جنوب‌غربی شهر تهران (محدوده C) نشان داده شده است. مستند به این موضوع که برداشت بی‌رویه آب از منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل ایجاد پدیده فرونشست است، بنابراین انتظار می‌رود روند تغییرات سطح

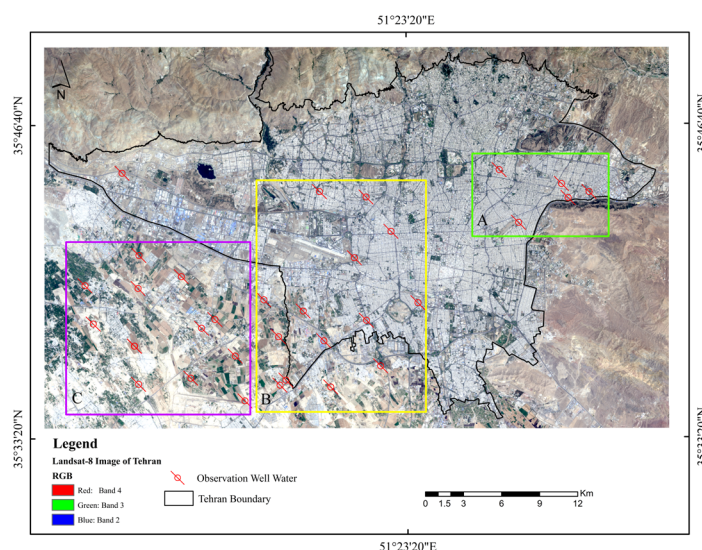
با تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، سه محدوده: (۱) شهری (منطقه A)، (۲) مرز منطقه شهری و غیرشهری (منطقه B) و (۳) مناطق کشاورزی (منطقه C) در نظر گرفته شد. پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ای محدوده‌های شهری (A)، مرز بین شهری و غیرشهری (B) و اراضی کشاورزی (C) در تصویر شماره ۱۰ نشان داده شده است.

براساس تصویر شماره ۱۱ که معرف سری‌زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق شهری با حداقل نرخ فرونشست زمین است (محدوده A)، روند تغییرات سطح آب در چاه‌های مذکور افزایشی بوده است؛ به گونه‌ای که سطح آب در ایستگاه مجیدیه از مقدار ۹/۱۲۶ متر در سال ۱۳۸۶ به مقدار ۵/۱۴۳ متر در سال ۱۴۰۱ رسیده است. این روند در سایر ایستگاه‌های محدوده مورد بررسی نیز به چشم می‌خورد. افزایش عمق ایستابی چاه در این مناطق به‌وضوح قابل مشاهده است؛ این بدین معنی است که در آبخوانی که چاه‌های منطقه از آن تغذیه می‌کنند، آب کافی وجود دارد که می‌تواند در نتیجه شارژ مجدد آبخوان یا افزایش جریان آب زیرزمینی به سمت چاه‌ها باشد.

در تصویر شماره ۱۲، سری‌زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های



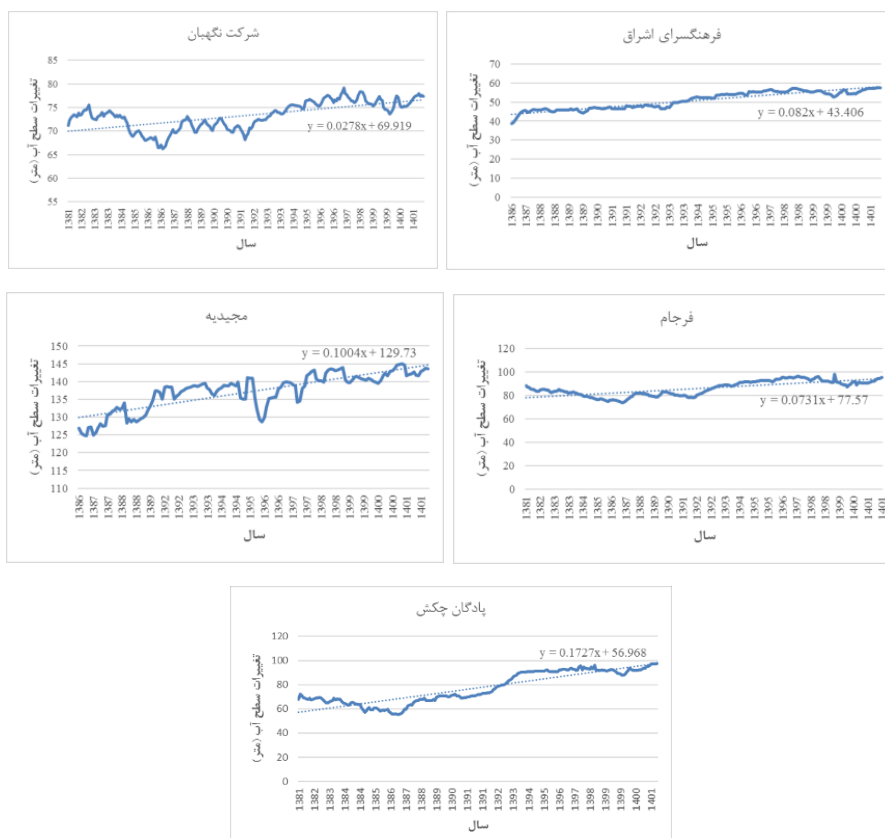
تصویر ۹. مقایسه نتایج مستخرج از تحلیل تداخل‌سنجی PSI و مشاهدات ایستگاه GPS در راستای قائم (تهیه شده توسط نگارنده)



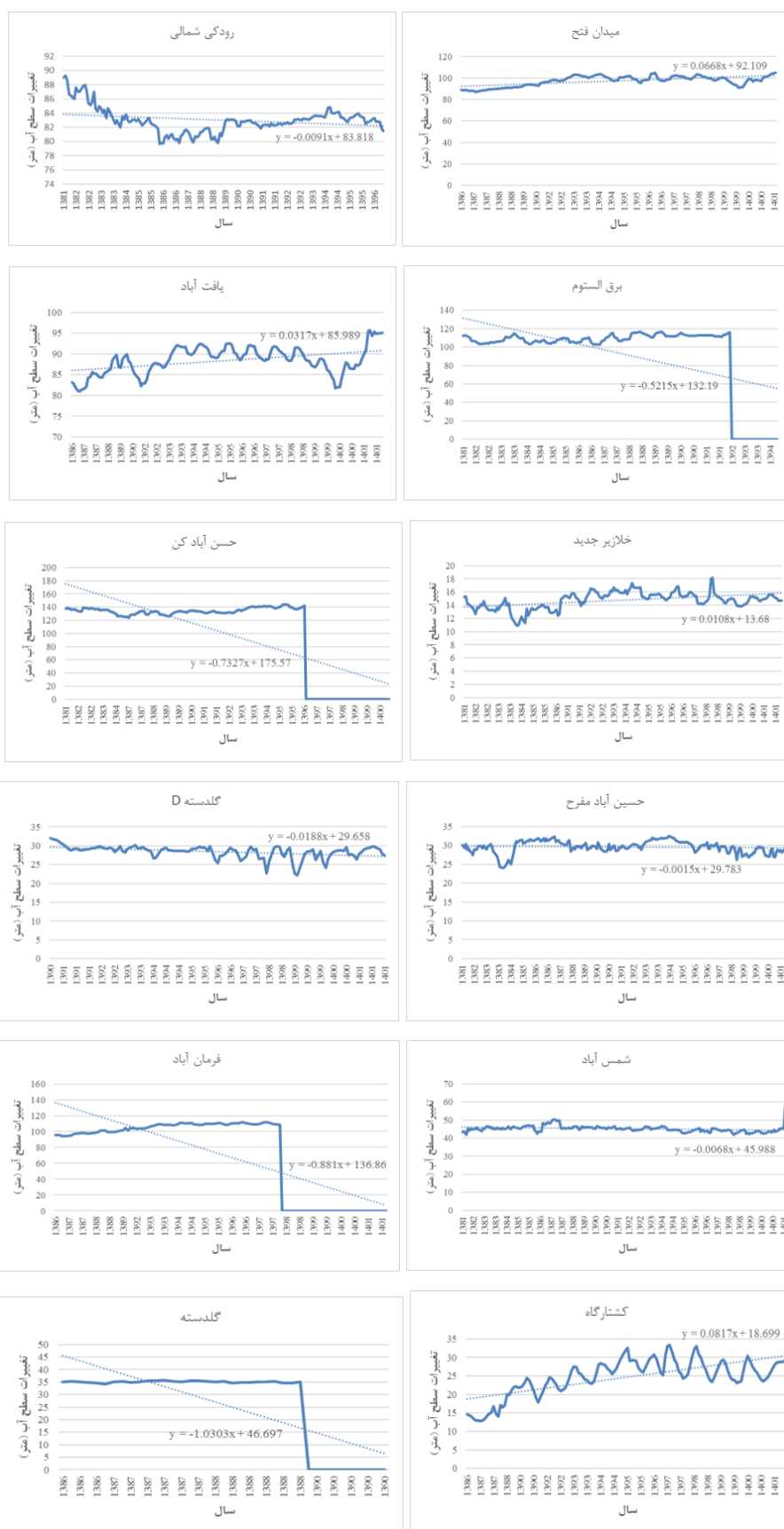
تصویر ۱۰. پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ای محدوده‌های شهری (A)، مرز بین شهری و غیرشهری (B) و اراضی کشاورزی (C) (تهیه‌شده توسط نگارنده)

مختارخانی، بهمن‌آباد، موسی‌آباد، نصیرآباد و احمدآباد مستوفی اشاره کرد. در این محدوده، ایستگاه‌های باباسلمان و سعیدآباد ورامینه به ترتیب بعد از سال ۱۳۸۷ و ۱۳۹۷ به طور کامل خشک شده‌اند. به طور کلی، در خصوص رابطه بین فرونشست سطح و برداشت آب از منابع آب زیرزمینی در محدوده‌های A، B و C عنوان می‌شود که بیشترین فرونشست سطح حادث شده در این

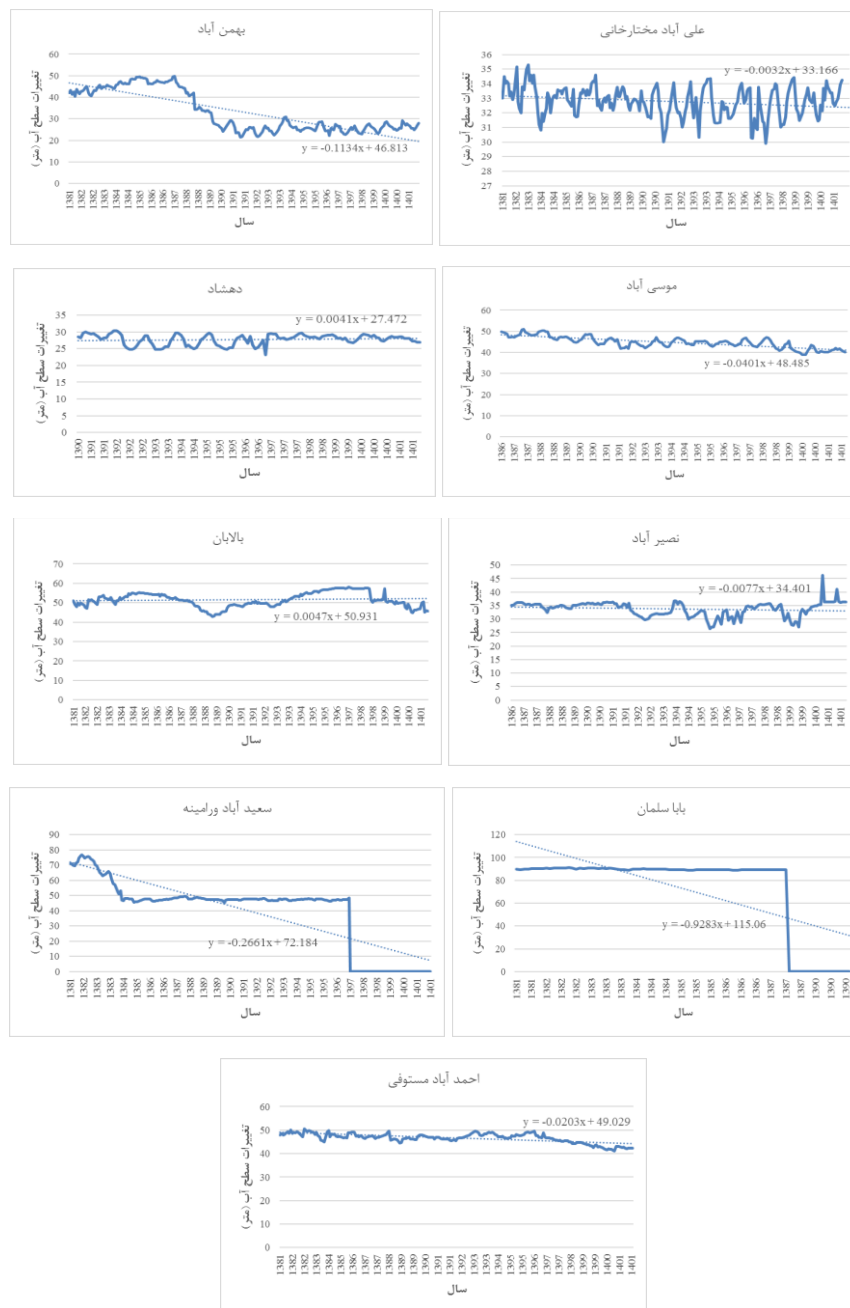
آب در این محدوده که عمدتاً تحت کشت محصولات کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی است، کاهشی باشد که تحلیل نتایج چاه‌های پیژومتری و انطباق نتایج با یافته‌های تداخل‌سنجی PSI نیز این موضوع را تصدیق می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهند اکثر چاه‌های مشاهده‌ای در این محدوده دارای روند کاهشی تغییرات سطح ایستابی آب هستند که از آن جمله می‌توان به ایستگاه‌های علی‌آباد



تصویر ۱۱. سری‌زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق شهری با حداقل نرخ فرونشست زمین (محدوده A) (تهیه‌شده توسط نگارنده)



تصویر ۱۲. سری زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در مرز مناطق شهری و غیرشهری (محدوده B) (تهیه شده توسط نگارنده)



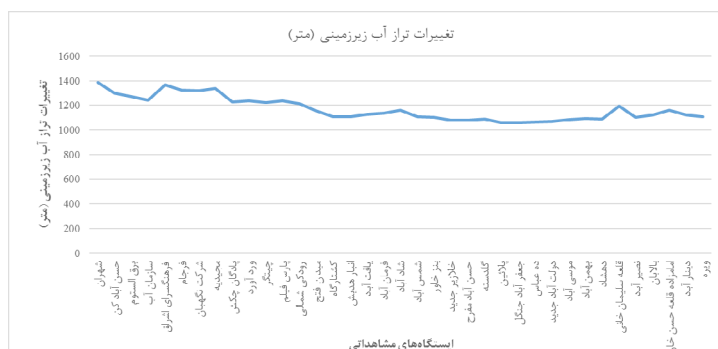
تصویر ۱۳. سری زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق کشاورزی بخش جنوب و جنوب غربی شهر تهران (محدوده C) (تهیه شده توسط نگارنده)

زیرزمینی به کاهش عمق آب در زمین منجر می‌شود. عمق آب در زمین تحت تأثیر عواملی نظیر بارندگی و نفوذپذیری خاک تغییر می‌کند. با این حال، یکی از علل بالقوه تغییرات عمق آب در زمین، فعالیت‌های انسانی مانند پمپاژ آب برای مصارف مختلف است. با توجه به افزایش ضخامت آبرفت‌ها در نواحی جنوب غربی تهران، با از دست رفتن آب‌های زیرزمینی، نیروی فشاری در جهت گرانش نیز افزایش می‌یابد که در نهایت به فشردگی و نشست زمین منجر می‌شود (مرادی و همکاران، ۲۰۲۳).

به منظور بررسی رابطه بین مقادیر فرونشست سطح با تغییرات

محدوده‌ها در نزدیکی چاه‌های مشاهده‌ای رخ داده است؛ این بدین معنی است که افزایش فشار بر آبخوان و ایستگاه‌های منطقه از طریق پمپاژ آب از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف مختلف به تشدید این مخاطره طبیعی در سطح گسترده‌ای منجر شده است.

از دیگر یافته‌های این پژوهش، تغییرات تراز آب زیرزمینی در ایستگاه‌های مشاهده‌ای محدوده مطالعاتی است که نتایج تجزیه و تحلیل آن در تصویر شماره ۱۴ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند تراز آب زیرزمینی چاه‌های پیژومتری با حرکت از شمال به جنوب شهر تهران کاهش می‌یابد. کاهش تراز آب

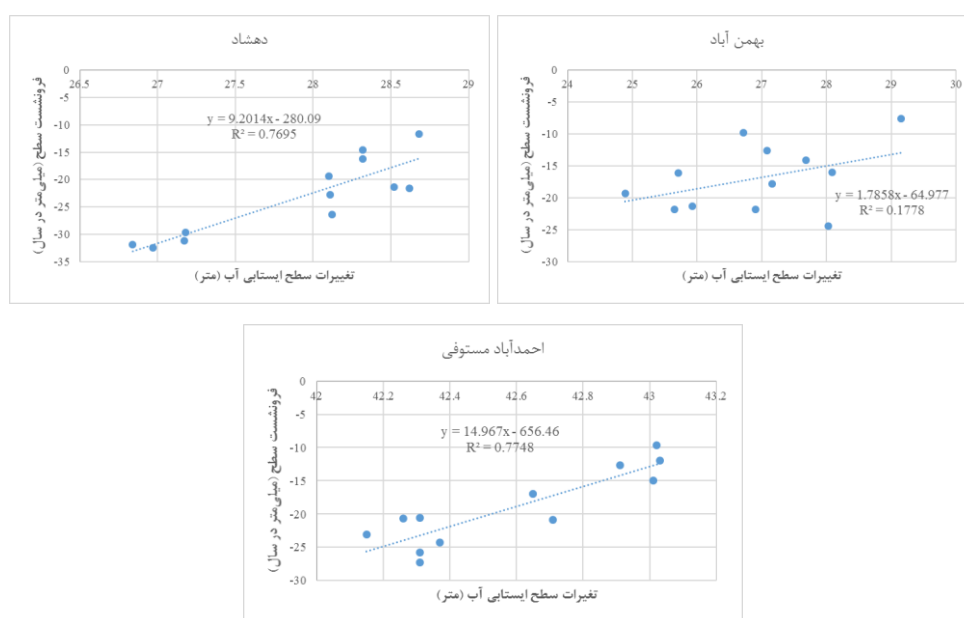


تصویر ۱۴. تغییرات تراز آب زیرزمینی ایستگاه‌های مشاهداتی محدوده مطالعاتی (تهیه شده توسط نگارنده)

بحث

اقلیم خشک و نیمه خشک حاکم بر اکثر مناطق ایران و همچنین کاهش نزولات جوی به عنوان منبع اصلی تأمین آب موجب شده تا ایران جزو کشورهایی با بحران کمبود آب تلقی شود. علاوه بر این، توسعه شهری به ویژه در کلان شهر تهران به سرعت در حال افزایش است تا فضایی را برای هر نوع فعالیت فراهم کند. بنابراین تأمین آب شرب جمعیت رو به رشد و همچنین مصارف مختلف کشاورزی و صنعتی به بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی منجر شده است. در این پژوهش، تصاویر رادار سنتینل-۱ به همراه تکنیک سری زمانی PSI به منظور شناسایی پهنه‌های درگیر فرونشست زمین در کلان شهر تهران طی بازه زمانی سال ۱۴۰۱ به کار گرفته شد. یافته‌ها حاکی از آن است که بیشینه نرخ فرونشست زمین در بخش‌های جنوبی تهران و در مناطق شهری ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ که حدود ۲۶ درصد از جمعیت تهران (حدود ۲/۳ میلیون نفر در سال

سطح آب در سال ۱۴۰۱، در محل هر کدام از چاه‌های پیژومتری به خصوص در نقاطی که فرونشست زمین با نرخ بالایی رخ داده است، تجزیه و تحلیل همبستگی رگرسیون انجام شد و نتایج حاصل از آن در تصویر شماره ۱۵ که براساس این تصویر، همبستگی بالا برای ایستگاه‌هایی مانند دهشاد (۷۶ درصد) و احمدآباد مستوفی (۷۷ درصد) برآورد شد. در خصوص ایستگاه بهمن آباد، اگرچه مقادیر همبستگی بالایی حاصل نشده است، اما روند تغییرات به خوبی این موضوع را نمایان می کند که با کاهش سطح ایستابی آب، نرخ فرونشست زمین نیز افزایش یافته است. یکی از دلایل این امر، ارقام فرونشست زمین نسبت داده شده به چاه‌های مشاهده‌ای است؛ جایی که در مواردی مکان چاه با فاصله از نقاط فرونشست موجود قرار گرفته بود. بنابراین همبستگی بالایی بین داده‌های چاه‌های پیژومتری با مقادیر فرونشست زمین در این نقاط حاصل نشد.



تصویر ۱۵. تجزیه و تحلیل همبستگی رگرسیون بین مقادیر فرونشست سطح با تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای طی بازه زمانی سال ۱۴۰۱ (تهیه شده توسط نگارنده)



افت سطح ایستابی آب را تجربه کرده و تعدادی از آن‌ها نیز خشک شده‌اند، الزامی است و باید مدنظر کارشناسان این حوزه قرار گیرد. علاوه بر این، یافته‌های حاصل از این پژوهش، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری و داده‌های سنتینل-۱ با خط مبنای مکانی و زمانی مطلوب در تعیین نرخ و دامنه فرونشست زمین را معرفی می‌کند.

به‌کارگیری مدل رقومی ارتفاعی با وضوح مکانی بهتر، انتخاب نهایی تعداد نقاط PS، تنظیم فیلترهای مکانی و زمانی به‌منظور تصحیح فازهای ناشی از نویز و اتمسفر و همچنین استفاده از لایه‌های اطلاعاتی مختلف نظیر مواد تشکیل‌دهنده خاک، جنس سازند زمین‌شناسی، کاربری و پوشش زمین و تراکم سکونتگاه‌های مسکونی در جهت تبیین و تفسیر بهتر عوامل ایجابی فرونشست زمین در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

پژوهش حاضر با آگاهی کامل نویسندگان از روند اجرای پژوهش به انجام رسیده است و نکات اخلاق پژوهش به‌طور کامل در آن رعایت شده است.

حامی مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در آماده‌سازی این مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

از سازمان‌های نقشه‌برداری کشور و همچنین آب منطقه‌ای تهران به‌دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های موردنیاز برای انجام این پژوهش، سپاسگزاری می‌شود.

(۱۳۹۵) را تشکیل می‌دهند، حادث شده است. الگوها و هسته‌های فرونشست شناسایی شده در این مطالعه با مطالعات سایر محققین (فروغ‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶؛ مرادی و همکاران، ۲۰۲۳؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۸) مطابقت دارد. علی‌رغم هم‌خوانی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی با مشاهدات ایستگاه GPS، در برخی نقاط خطاهای کم‌برازش^{۳۳} و بیش‌برازش^{۳۴} رخ داده است. دلایل این امر را می‌توان در مراحل عملی تداخل‌سنجی PSI مانند استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با وضوح مکانی ۹۰ متر برای تصحیح فاز ناشی از توپوگرافی، اندازه فیلترهای مکانی و زمانی برای تصحیح فاز ناشی از اتمسفر یا تنظیمات مرتبط با انتخاب نهایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائم جست‌وجو کرد. در بررسی رابطه بین فرونشست زمین و منابع آب زیرزمینی، یافته‌ها نشان دادند اکثر چاه‌های پیرومتری که در مجاورت مناطق با بیشینه نرخ فرونشست زمین قرار داشته‌اند، در اثر بهره‌برداری بی‌رویه، افت سطح ایستابی آب را تجربه کرده و در مواردی به‌طور کامل خشک شده‌اند. برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی برای مدت طولانی، کاهش نفوذپذیری و ضخامت رسوبات را به‌همراه دارد که به تغییرات دائمی در شکل و حجم دانه خاک منجر شده (قاضی‌فرد و همکاران، ۲۰۱۷) و در نهایت باعث فرونشست زمین می‌شود. نتایج این بخش نیز با سایر تحقیقات در این زمینه (پاپی و همکاران، ۲۰۲۰؛ مرادی و همکاران، ۲۰۲۳؛ اطهری و همکاران، ۲۰۲۲) مطابقت دارد. مطابق بررسی‌های انجام‌شده (تصویر شماره ۳)، به‌علت قرار گرفتن خط مبنای مکانی تصاویر سنتینل-۱ بین ۲۰۰ تا ۲۰۰ متر که به کوه‌رنسی بالای تصاویر SAR در نتیجه تراکم بالای نقاط PS منجر می‌شود، نقشه فرونشست متراکم‌تری نیز حاصل شده است. بنابراین نشان داده می‌شود که به‌کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی راداری و داده‌های سنتینل-۱، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های آن‌ها در تعیین نرخ و دامنه فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه را معرفی می‌کند. بیشتر بودن نسبت سیگنال به نویز در حالت تصویربرداری TOPS^{۳۵} و خط مبنای زمانی کوتاه از دیگر دلایل کارایی این داده‌ها برای تحلیل مجموعه زمانی به‌منظور برآورد جابه‌جایی سطح زمین محسوب می‌شوند.

نتیجه‌گیری

یافته‌ها نشان می‌دهند افزایش فشار بر آبخوان از طریق پمپاژ آب از چاه‌های مشاهده‌ای محدوده مطالعاتی جهت مصارف مختلف صنعتی، کشاورزی و آب شرب به تشدید این مخاطره طبیعی در مقیاس وسیعی منجر شده است. بنابراین، مدیریت صحیح و کارآمد منابع آب در مناطق شهری و غیرشهری کلان‌شهر تهران با آگاهی و علم به اینکه اکثر چاه‌های مشاهده‌ای،

33. Underestimation

34. Overestimation

35. Terrain Observation with Progressive Scans SAR



References

- Arangio, S., Calò, F., Di Mauro, M., Bonano, M., Marsella, M., & Manunta, M. (2014). An application of the SBAS-DInSAR technique for the assessment of structural damage in the city of Rome. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(11), 1469-1483. [DOI:10.1080/15732479.2013.833949]
- Athari, M., Azizi, H. R., Hashemi, S. S., & Honari, H. (2022). [Investigation of the relationship between land surface changes due to subsidence and groundwater using sentinel-1 satellite images and statistical models (case study: Varamin plain) (Persian)]. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 7(1), 34-43. [DOI:10.22112/jwwse.2021.261650.1232]
- Awasthi, S., Jain, K., Mishra, V., & Kumar, A. (2020). An approach for multi-dimensional land subsidence velocity estimation using time-series sentinel-1 SAR datasets by applying persistent scatterer interferometry technique. *Geocarto International*, 37(9), 2647-2678. [DOI:10.1080/10106049.2020.1831624]
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4), R1-R54. [DOI:10.1088/0266-5611/14/4/001]
- Crosetto, M., Monserrat, O., & Budillon, A. (2019). *Urban deformation monitoring using persistent scatterer interferometry and SAR tomography*. Basel: MDPI. [DOI:10.3390/books978-3-03921-127-2]
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Entezam, I., Saatchi, S., & Shemshaki, A. (2010). Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1), 041864. [DOI:10.1117/1.3527999]
- Dehghani, M., Zoej, M. J. V., Hooper, A., Hanssen, R. F., Entezam, I., & Saatchi, S. (2013). Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 157-170. [DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.02.012]
- Deng, J., Li, T., & Feng, D. (2019). *Urban ground surface subsidence monitoring based on time series InSAR technology*. Paper presented at: 5th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering (ESCE2019), Nanchang, China, 13-14 April; 2019. [DOI:10.1088/1755-1315/283/1/012058]
- Foroughnia, F., Nemati, S., & Maghsoudi, Y. (2018). PS-InSAR Time Series Analysis Using Sentinel-1A and ENVISAT-ASAR data Stacks for Subsidence Estimation in Tehran (Persian)]. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 10(1), 57-72. [Link]
- Ghazifard, A., Akbari, E., Shirani, K., & Safaei, H. (2017). Evaluation land subsidence by field survey and D-InSAR technique in Damaneh City, Iran. *Journal of Arid Land*, 9(5), 778-789. [DOI:10.1007/s40333-017-0104-5]
- Guccione, P., Zonno, M., Nico, G., Nicoletti, M., & Di Pasquale, A. (2013). Kriging interpolation on GB-SAR data to quickly update topographic maps in areas prone to slope instability. Paper presented at: 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, Melbourne, VIC, Australia, 21-26 July, 2013. [DOI:10.1109/IGARSS.2013.6723118]
- Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J. C., Guerrero, J., Notti, D., & Galve, J. P., et al. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 128, 31-43. [DOI:10.1016/j.rse.2012.09.020]
- Hooper, A. J. (2006). Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation [PhD dissertation]. California: Stanford University. [Link]
- Hu, B., Chen, J., & Zhang, X. (2019). Monitoring the surface subsidence area in a coastal urban area with InSAR and GNSS. *Sensors*, 19(14), 3181. [DOI:10.3390/s19143181] [PMID]
- Kotulak, N., Mleczo, M., Crosetto, M., Palama, R., & Mroz, M. (2022). Interferometric SAR deformation monitoring using passive reflectors and Ascending and Descending passes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-2022*, 285-292. [DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-285-2022]
- Krassakis, P., Kazana, S., Chen, F., Koukoulas, N., Parcharidis, I., & Lekkas, E. (2021). Detecting subsidence spatial risk distribution of ground deformation induced by urban hidden streams. *Geocarto International*, 36(6), 622-639. [DOI:10.1080/10106049.2019.1622601]
- Lu, L., & Liao, M. (2008). Subsidence measurement with PS-InSAR techniques in Shanghai Urban. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, s. Vol. XXXVII, 173-178. [Link]
- Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y., & Wang, W. (2014). Subsidence monitoring of Tianjin Suburbs by TerraSAR-X persistent scatterers interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5), 1642-1650. [DOI:10.1109/JSTARS.2013.2271501]
- Maghsoudi, Y., Amani, R., & Ahmadi, H. (2019). A study on land subsidence in West of Tehran using Sentinel-1 images and Persistent Scatterers Interferometry. *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 299-313. [Link]
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M. R., & Ghassemi, M. R. (2016). Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201, 6-28. [DOI:10.1016/j.enggeo.2015.12.004]
- Moradi, A., Emadodin, S., Beitollahi, A., Abdolazimi, H., & Ghods, B. (2023). Assessment of land subsidence in Tehran metropolitan, Iran, using Sentinel-1A InSAR. *Environmental Earth Sciences*, 82, 569. [DOI:10.1007/s12665-023-11225-2]
- Moradi, A., Emadodin, S., Arekhi, S., & Rezaei, K. (2020). [Earth subsidence analysis using radar interferometry technique, geotechnical and piezometric wells (case study: Urban region 18 Tehran) (Persian)]. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7(1), 153-176. [DOI:10.29252/jsaeh.7.1.11]
- Naderi, M. (2022). [Launching multi-temporal & multi-sensor data to identify and marked micro drainage pattern changes over the lowland of East Caspian Sea (Persian)] [MA thesis]. Tehran: Tarbiat Modares University. [Link]
- Naderi, M., & Rahimi Hezarvand, S. (2022). [The performance of spectral built-up indices in improving the classification process to detecting the physical time series changes of Tehran during the period (1986-2018) using landsat satellite imagery (Persian)]. Paper presented at: Sixth International Conference on the Development of Geography and Tourism and Sustainable Development of Iran, Tehran, Iran, 20 October 2022. [Link]

- Novellino, A., Cigna, F., Brahmi, M., Sowter, A., Batesonm L., & Marsh, S. (2017). Assessing the feasibility of a national InSAR ground deformation map of great Britain with sentinel-1. *Geosciences*, 7(2), 19. [DOI:10.3390/geosciences7020019]
- Papi, R., Attarchi, S., & Soleimani, M. (2020). [Analysing time series of land subsidence in the West of Tehran Province (Shahriar Plain) and its relation to groundwater discharge by InSAR Technique (Persian)]. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(1), 109-128. [DOI:10.22126/ges.2020.4933.2182]
- Perissin, D., Wang, Z., & Lin, H. (2012). Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed persistent scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73, 58-67. [DOI:10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002]
- Sharifikia, M. (2012). [Determining the rate of land subsidence using radar interferometric method (D-InSAR) in Nouq-Behrman plain (Persian)]. *The Journal of Spatial Planning*, 16(3), 55-78. [Link]
- Stuper, D. I., Roser, J., & Vulic, M. (2020). Investigation on unmanned aerial vehicles-based photogrammetry for large mine subsidence monitoring. *Minerals*, 10(2), 196. [DOI:10.3390/min10020196]
- Tamburini, A., Bianchi, M., Giannico, C., & Novali, F. (2010). Retrieving surface deformation by PSInSAR??? technology: A powerful tool in reservoir monitoring. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(6), 928-937. [DOI:10.1016/j.ijggc.2009.12.009]
- Widodo, J., Herlambang, A., Sulaiman, A., Yohandri, P. R., Perissin, D., & Kuze, H., et al. (2019). *Land subsidence rate analysis of Jakarta Metropolitan Region based on D-InSAR processing of Sentinel Data C-Band frequency*. Paper presented at: The 2018 International Conference on Research and Learning of Physics, Padang, West Sumatra, Indonesia, 5-6 August 2018. [DOI:10.1088/1742-6596/1185/1/012004]
- Younesi Sienaki, A., & Akhoondzadeh Hanzaei, M. (2023). [Monitoring of urban subway lines subsidence Using satellite radar interferometry method (Study area: Part of Tehran Metro Line 7) (Persian)]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 12(2), 16-29. [Link]
- Zhao, C. Y., Zhang, Q., Yang, C., & Zou, W. (2011). Integration of MODIS data and Short Baseline Subset (SBAS) technique for land subsidence monitoring in Datong, China. *Journal of Geodynamics*, 52(1), 16-23. [DOI:10.1016/j.jog.2010.11.004]
- Zhu, S., Zuo, X., Shi, K., Li, Y., Guo, S., & Li, C. (2022). Surface subsidence monitoring in Kunming City with Time-Series InSAR and GNSS. *Applied Science*, 12(24), 12752. [DOI:10.3390/app122412752]