



Monitoring Land Subsidence Patterns in Southwestern Tehran Using Radar Interferometry Time Series and Global Positioning System Observations

Amin Rezaeezadeh,¹ Arash Tayfehrostami,^{2*}  Meysam Amiri

1. M.Sc., Department of Construction Engineering, École de technologie supérieure ÉTS, 1100 Notre-Dame St W, Montreal, Quebec, H3C 1K3, Canada. Email: amin.rezaeezadeh.1@ens.etsmtl.ca
2. Ph.D. Candidate, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: a.tayfehrostami@email.kntu.ac.ir
3. Ph.D. in Geophysics, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran. Email: m.amiri@iasbs.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received July 09, 2025
Received in revised form
August 22, 2025
Accepted September 13, 2024
Available online September
23, 2025

Keywords:
Subsidence,
Radar Interferometry,
Interferogram,
Small Baseline Subset,
Global Positioning System.

ABSTRACT

Research Topic: This study investigates land subsidence trends in the southwestern region of Tehran, Iran, where overextraction of groundwater combined with prolonged drought has triggered severe and accelerating ground deformation. Given the critical implications for infrastructure stability and water resource sustainability, this research aims to analyze the spatial and temporal patterns of subsidence in this area using advanced geodetic techniques..

Objective: This study investigates the rate and trend of land subsidence in the southwest of Tehran Province during the years 2014 to 2017. The main objective is to analyze ground surface changes and to examine the impacts of excessive groundwater extraction in this region, which has become one of the most critical plains in the country.

Method: A time-series analysis was conducted using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar (SAR) data processed with the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR technique for the period from October 2014 to March 2017. To validate the InSAR-derived displacement results, GNSS data from the Varamin station were used. The analysis focused on vertical ground movements to quantify the rate and extent of subsidence in the study area.

Results: The findings reveal that the maximum subsidence rate reached 174 mm/year along the satellite's line of sight, corresponding to 227 mm/year in the vertical direction. The GNSS data confirmed the reliability of the InSAR results, despite minor spatial scale differences between the two datasets. The most severe subsidence was recorded in the Shahriar and Eslamshahr regions, where uncontrolled groundwater extraction has led to critical ground deformations threatening urban infrastructures, roads, and pipelines. The observed subsidence pattern correlates strongly with the spatial distribution of groundwater pumping wells and agricultural water consumption, exacerbated by consecutive drought periods.

Conclusions: This study highlights the alarming rate of land subsidence in southwestern Tehran and underscores the urgent need for continuous geodetic monitoring combined with groundwater management strategies. Without effective intervention, the ongoing depletion of aquifers will likely lead to irreversible ground deformation and significant socio-economic and environmental risks. The integration of InSAR time-series analysis with ground-based GNSS observations provides a robust framework for assessing and mitigating land subsidence hazards in vulnerable urban and peri-urban areas.

Cite this article: Rezaeezadeh, A., Tayfehrostami, A., Amiri, M. (2024). Monitoring Land Subsidence Patterns in Southwestern Tehran Using Radar Interferometry Time Series and Global Positioning System Observations. *ECOHYDROLOGY*, 12 (3), 812-827. <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.397729.1875>

© Amin Rezaeezadeh, Arash Tayfehrostami, Meysam Amiri.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.397729.1875>



Extended Abstract

Background and Motivation

Groundwater depletion has emerged as one of the most critical environmental and socio-economic challenges in Iran, where rapid population growth, agricultural expansion, and consecutive droughts have placed severe pressure on aquifers. Southwestern Tehran, encompassing the Shahriar, Eslamshahr, and Robat Karim regions, is among the most severely affected areas. Persistent groundwater overexploitation has triggered alarming land subsidence rates that pose direct threats to infrastructure, water resources, and sustainable urban development. Previous studies documented this phenomenon mostly prior to 2010, leaving a knowledge gap regarding more recent subsidence patterns and their drivers. This study aims to address this gap by employing advanced geodetic techniques to provide an updated and comprehensive assessment.

Objectives

The primary objective of this research is to quantify the spatial and temporal patterns of land subsidence in southwestern Tehran during the period 2014–2017. Specifically, it seeks to:

1. Estimate annual subsidence rates using Sentinel-1A radar imagery and the Small Baseline Subset (SBAS-InSAR) method.
2. Validate satellite-derived measurements against Global Navigation Satellite System (GNSS) observations from the Varamin station.
3. Examine the relationship between subsidence trends, groundwater extraction, and precipitation events to better understand the interplay between anthropogenic and natural drivers.

Data and Methodology

A dataset of 21 Sentinel-1A radar images acquired between October 2014 and March 2017 was processed using the SBAS-InSAR technique to generate a time series of ground displacements. Atmospheric phase delays were corrected using ERA-Interim meteorological parameters, while topographic contributions were removed via Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation data. GNSS daily positioning data from the Varamin station were analyzed with the GAMIT/GLOBK software and used for cross-validation of InSAR-derived results. Finally, rainfall records from the Shahriar station were compared with the subsidence time series to detect correlations with episodic uplift.

Key Findings

- The maximum detected subsidence reached 174 mm/year along the satellite line-of-sight, equivalent to 227 mm/year in the vertical direction, indicating severe ground deformation.
- The most intense subsidence was observed in Shahriar and Eslamshahr, where agricultural groundwater extraction is most concentrated.
- GNSS observations showed a subsidence rate of ~ 9.6 mm/year at the Varamin station, consistent with the broader InSAR-derived deformation trends but lower due to the point-scale nature of GNSS measurements.
- Time-series analysis revealed six distinct uplift events exceeding 50 mm, occurring after rainfall episodes greater than 20 mm. These temporary uplifts reflect short-term aquifer recharge but remain insufficient to counterbalance long-term subsidence driven by continuous overextraction.
- Spatial correlation between subsiding zones and groundwater well density confirms that anthropogenic water use is the dominant cause of land deformation.

Conclusions and Implications

This study demonstrates that land subsidence in southwestern Tehran has reached critical and unsustainable levels, threatening urban infrastructure, transportation networks, and natural resources. The integration of SBAS-InSAR with GNSS validation proved effective in capturing both large-scale deformation and local variations, offering a reliable monitoring framework. The results highlight the urgent need for:

- Continuous geodetic monitoring using InSAR and GNSS time series.

- Comprehensive groundwater management strategies aimed at reducing overextraction.
- Incorporation of land deformation risks into urban planning and infrastructure design.

Without timely intervention, the continuation of current groundwater use practices will lead to irreversible ground deformation, severe environmental degradation, and escalating socio-economic risks. This research thus provides essential insights for policymakers, urban planners, and environmental managers seeking to mitigate the impacts of subsidence and promote sustainable water resource management in Tehran and comparable urbanized basins.

Author Contributions

All authors contributed substantially to the conception and design of the study. Amin Rezaeezadeh performed the InSAR modeling, radar data preprocessing, and time-series analysis. Arash Tayfehrostami contributed to GNSS data validation, integration of results, and manuscript preparation. Meysam Amiri supervised the research and provided critical revisions to the manuscript. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Data Availability Statement

The Sentinel-1A SAR data used in this study are publicly available through the European Space Agency (ESA) Copernicus Open Access Hub.

GNSS data from the Varamin station were provided by the National Cartographic Center of Iran (NCC).

Meteorological ERA-Interim parameters were obtained from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

All processed results are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to the European Space Agency (ESA) for providing Sentinel-1A radar images, the ECMWF for meteorological parameters, the Iran Meteorological Organization for rainfall records, and the National Cartographic Center of Iran for supplying GNSS time-series data.

Ethical Considerations

This research did not involve human or animal participants. All data used were obtained from open or authorized institutional sources. The authors affirm that the study complies with the journal's ethical standards.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

پایش الگوی فرونشست جنوب غربی تهران با استفاده از سری زمانی مشاهدات تداخل سنجی راداری و سامانه تعیین موقعیت جهانی

امین رضائی زاده،^۱ آرش طایفه رستمی،^۲ میثم امیری^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دپارتمان مهندسی عمران، دانشگاه ETS، کبک، کانادا، رایانامه: amin.rezaeezadeh.1@ens.etsmtl.ca
۲. دانشجوی دکتری، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: a.tayfehrostami@email.kntu.ac.ir
۳. دکتری ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران، رایانامه: m.amiri@iasbs.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: پایش و تحلیل الگوی فرونشست زمین در جنوب غرب تهران با بهره‌گیری از سری زمانی داده‌های تداخل سنجی راداری و مقایسه با مشاهدات زمینی.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸	هدف: این پژوهش به بررسی نرخ و روند فرونشست زمین در جنوب غرب استان تهران طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ می‌پردازد. هدف اصلی، تحلیل تغییرات سطح زمین و بررسی اثرات برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در این منطقه است که به یکی از بحرانی‌ترین دشت‌های کشور تبدیل شده است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱	روش تحقیق: داده‌های راداری ماهواره SENTINEL-1A و روش تداخل سنجی با خط مبنای کوتاه (SBAS-InSAR) برای استخراج سری زمانی جابه‌جایی زمین استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج، داده‌های ایستگاه GNSS و رامین به کار گرفته شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲	یافته‌ها: بررسی داده‌ها نشان داد که بیشینه نرخ فرونشست در راستای خط دید ماهواره برابر با ۱۷۴ میلی‌متر در سال و در راستای قائم معادل ۲۲۷ میلی‌متر در سال است. این نتایج با داده‌های ایستگاه GNSS نیز هم‌خوانی قابل قبولی دارد. تحلیل الگوی فضایی نشان داد که بخش‌های شهری و اسلامشهر بیشترین میزان فرونشست را تجربه کرده‌اند که این موضوع زیرساخت‌های شهری و شبکه حمل‌ونقل را در معرض تهدید جدی قرار داده است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، عامل اصلی فرونشست در جنوب غرب تهران است و در صورت ادامه روند کنونی، مخاطرات گسترده‌تری متوجه منطقه خواهد بود. بر این اساس، پایش مستمر با استفاده از داده‌های تداخل سنجی راداری و داده‌های میدانی، و همچنین تدوین برنامه‌های مدیریت منابع آب، به‌عنوان ضرورت‌های جدی برای کاهش بحران توصیه می‌شود.
کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل سنجی راداری، تداخل‌نما، خط مبنای کوتاه، سامانه تعیین موقعیت جهانی.	

استناد: رضائی زاده، امین؛ طایفه رستمی، آرش؛ امیری، میثم. پایش الگوی فرونشست جنوب غربی تهران با استفاده از سری زمانی مشاهدات تداخل سنجی راداری و سامانه

تعیین موقعیت جهانی. *اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۳)، ۸۱۲-۸۲۷.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.397729.1875>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © امین رضائی زاده، آرش طایفه رستمی، میثم امیری.



مقدمه

ایران، کشوری وسیع با مساحتی حدود ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع و جمعیتی نزدیک به ۹۰ میلیون نفر، با بحران آب زیرزمینی در حال افزایش و بحرانی روبه‌روست. عوامل تشدیدکننده این بحران شامل چهار برابر شدن جمعیت در شش دهه گذشته، صنعتی شدن سریع و گسترش کشاورزی است که فشار شدیدی بر منابع آب کشور وارد کرده‌اند (نگهداری، ۱۴۰۱). برای پاسخ به تقاضای رو به افزایش، استخراج غیرپایدار آب زیرزمینی به هنجار تبدیل شده است که منجر به روند نگران‌کننده‌ای از کاهش منابع شده است (مدنی، آقاچوک، و میرچی، ۱۳۹۴؛ ژاله و اسلامی‌پناه، ۱۴۰۲). آب زیرزمینی، خط حیاتی برای نزدیک به یک‌چهارم جمعیت ایران به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اکنون با چالشی ناسازگار روبه‌روست؛ تقاضا برای آب زیرزمینی از ظرفیت تجدیدپذیری آن فراتر رفته و تعادل ظریف چرخه طبیعی آب را به هم زده است. این تنش آبی گسترده نه تنها جوامع را در خطر قرار می‌دهد، بلکه عدم تعادل‌های اکولوژیکی را نیز به دنبال دارد که ضرورت بررسی چندوجهی پیامدهای کاهش آب زیرزمینی را ایجاب می‌کند. با وجود نیاز فوری به تحلیل جامع و دقیق آب زیرزمینی، این تحلیل در مقیاس دقیق کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مقیاس بزرگ و با دقت کم، بحران آب زیرزمینی ایران توسط یافته‌های پیشین مدل‌های جهانی آب زیرزمینی یا مشاهدات مأموریت بازیابی گرانش و آزمایش تغییرات اقلیمی (GRACE) به‌وضوح برجسته شده است (رودل^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ هربرت و دول^۲، ۲۰۱۹؛ هراگاریسیا^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). در سال ۲۰۰۰، برآورد زده شد که نزدیک به نیمی از کل برداشت آب زیرزمینی ایران به شکلی غیرپایدار انجام می‌شود (وادا، ون بیک، و بیرکنس^۴، ۲۰۱۲). علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های چاه‌های آب زیرزمینی نرخ تخلیه سالانه‌ای معادل ۵/۷ میلیارد متر مکعب (BCM) را بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ آشکار کردند که این پدیده توسط اندازه‌گیری‌های GRACE مبنی بر از دست رفتن ذخایر آب در سراسر کشور تأیید شد (اشرف، ناظمی، و آقاچوک، ۱۴۰۰؛ فروتن و همکاران، ۱۳۹۳). ادغام داده‌های GRACE در یک مدل هیدرولوژی جهانی این مسئله را بیشتر تأکید کرد و نشان داد که سطح آب زیرزمینی در طی دهه ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ حدود ۹ سانتی‌متر کاهش یافته است (خاکی و همکاران، ۱۳۹۶). تأثیر تجمعی شگفت‌انگیز در این آمار نمود پیدا می‌کند که ایران در دو دهه گذشته حدود 34 ± 211 میلیارد متر مکعب از ذخایر کل آب خود را از دست داده است (سائمان و همکاران، ۱۴۰۱). این ارقام، ضرورت رسیدگی جامع به معضل آب زیرزمینی ایران را برجسته می‌کنند. فراتر از حجم آب ازدست‌رفته، پیامدها بسیار گسترده‌اند. کاهش منابع آب زیرزمینی بهره‌وری کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و امنیت غذایی ایران را تهدید می‌کند. صنایع وابسته به آب زیرزمینی با عدم قطعیت و افزایش هزینه‌ها مواجه می‌شوند. علاوه بر این، فرونشست زمین که نتیجه مستقیم برداشت بیش از حد آب زیرزمینی است، می‌تواند زیرساخت‌های حیاتی از جمله جاده‌ها، ساختمان‌ها و خطوط لوله را آسیب بزند (اسمیت^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). پیامدهای اجتماعی و اقتصادی قابل انکار نیستند و این بحران را بیشتر تشدید می‌کنند. فرونشست زمین نشانه‌ای ملموس از استرس درون آبخوان‌های ایران است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که برداشت بیش از حد آب منجر به کاهش تراز هیدرولیکی شود که باعث فشردگی اسکلتی خاک به‌ویژه در لایه‌های کم‌تراوا مانند رس و سیلت می‌شود. هنگامی که تراز هیدرولیکی از سطح تاریخی یا تراز پیش فشردگی پایین‌تر بیاید، این فشردگی الاستیک نبوده و بنابراین دائمی است (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۷). در مناطقی که به‌شدت وابسته به آب زیرزمینی هستند، مانند پایتخت تهران (حق‌شناس حقیقی و معتق، ۱۴۰۱)، مرکز کشاورزی رفسنجان (معتق و همکاران، ۱۴۰۰) و شهر پرجمعیت مشهد (معتق و همکاران، ۱۳۸۵)، فرونشست زمین به موضوعی نگران‌کننده تبدیل شده و بحران آب زیرزمینی را آشکار می‌کند. مطالعه ثابتی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از روش‌های InSAR و داده‌های GNSS نشان داد که مناطق دارای آبخوان محصور در دشت ابهر با نرخ فرونشست سالانه تا ۸۰ میلی‌متر و دامنه تغییر فصلی مشابه مشخص می‌شوند (تا ۸۰ میلی‌متر)، که این ویژگی‌ها با یک سیستم آبخوان محصور مطابقت دارند. علاوه بر

1. Rodell
2. Herbert, C., & Döll
3. Herrera-García
4. Wada, Van Beek, & Bierkens
5. Smith

این، همبستگی قوی (ضریب R^2 بین ۰/۶۰ تا ۰/۸۰) بین تغییرات سطح آب و تغییرات زمینی فصلی در پنج چاه پیزومتری تأییدکننده تعیین دقیق نواحی محصور است.

در پی خشکسالی‌های پیاپی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و مصارف شرب، پدیده فرونشست زمین در بسیاری از دشت‌های کشور به‌ویژه در سال‌های اخیر شدت یافته است. یکی از مناطق بحرانی در این زمینه، بخش جنوب غربی استان تهران است که طی دو دهه گذشته به‌طور چشمگیری تحت‌تأثیر فرونشست قرار گرفته است. براساس مطالعات زمین‌شناسی انجام‌شده توسط گروه مهندسی سازمان زمین‌شناسی ایران (GSI)، ضخیم‌ترین لایه‌های رسوبی (بیش از ۱۵۰ متر) که سیستم آبخوان این منطقه را تشکیل می‌دهند، با بالاترین نرخ فرونشست همراه است (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۲). ضریب ذخیره بخش جنوبی سیستم آبخوان واقع‌شده در منطقه فرونشست به‌مراتب کمتر از بخش شمالی آن است. علت این موضوع، وجود مقادیر زیادی از رسوبات ریزدانه در این بخش از سیستم آبخوان است (شمشکی، بلورچی، و انصاری، ۱۳۸۳). گزارش سازمان نقشه‌برداری کشور از شبکه ترازیابی دقیق انجام‌شده در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ در منطقه مورد نظر بیشینه نرخ ۲۰۰ میلی‌متر در سال را نشان داده (عربی و همکاران، ۱۳۸۴) و این میزان در سال ۲۰۰۵ به ۲۳۰ میلی‌متر در سال افزایش داشته است (امیغ‌بی، ۱۳۸۵). نرخ بالای فرونشست سبب تهدید سازه‌ها شده و به‌دلیل کاهش تخلخل، توانایی تأمین آب مجدد سیستم آبخوان را کاهش می‌دهد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۲).

از میان روش‌های متعدد زمینی و فضایی که به‌منظور مطالعه فرونشست استفاده می‌گردد، InSAR از آن دسته روش‌هایی است که اندازه‌گیری‌های دقیق جابه‌جایی سطح زمین را با توان تفکیک مکانی بالا برای منطقه‌ای وسیع فراهم می‌کند (گالووی^۱ و همکاران، ۱۹۹۸؛ پلتزر^۲ و همکاران، ۱۹۹۸؛ آملونگ^۳ و همکاران، ۱۹۹۹؛ فرونو و سارتی^۴، ۲۰۰۰؛ تسائورو^۵ و همکاران، ۲۰۰۰؛ کروسیتو^۶ و همکاران، ۲۰۰۲؛ معتق و همکاران، ۱۳۸۶). در این راستا، پژوهش‌های متعددی در زمینه فرونشست جنوب غربی تهران صورت گرفته است. علیپور و همکاران میزان بیشینه فرونشست بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ را با استفاده از روش خط مبنای کوتاه (SBAS) حدود ۲۲۵ میلی‌متر در سال به دست آوردند (علیپور و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین بیشینه فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ با استفاده از روش تلفیقی بین تداخل‌سنجی سنتی و روش پراکنش‌گرهای دائمی (PSI) توسط دهقانی و همکاران به میزان ۲۵۶ میلی‌متر در سال برآورد گردید (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۲). صادقی و همکاران نیز طبق الگوریتمی مبتنی بر تلفیق دو روش StaMPS و DePSI، این مقدار را برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ برابر با ۲۴۹ میلی‌متر در سال به دست آوردند (صادقی و همکاران، ۱۳۹۰). با وجود اینکه مطالعات زیادی در زمینه فرونشست منطقه جنوب غربی تهران انجام شده است، اما عمده این مطالعات مربوط به قبل از سال ۲۰۱۰ بوده است؛ در صورتی که به‌دلیل شدت بحران ایجادشده در این منطقه و خسارات جبران‌ناپذیر ناشی از این موضوع، مطالعه مداوم در زمان‌های نزدیک‌تر برای به دست آوردن الگوی فرونشست منطقه ضروری است. به همین دلیل در این مطالعه با توجه به در دسترس بودن داده‌های ایستگاه‌های زمینی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) به بررسی چگونگی فرونشست دشت تهران در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ با به‌کارگیری روش خط مبنای کوتاه جهت پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر راداری مأموریت Sentinel-1 A پرداخته شده است. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری ترکیبی داده‌های SBAS-InSAR و مشاهدات زمینی GNSS برای استخراج دقیق‌ترین نرخ فرونشست در جنوب غرب تهران است. در این مطالعه، برای نخستین‌بار، تحلیل یکپارچه تغییرات سطح زمین، با استفاده از داده‌های سری زمانی جدید (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷) در این منطقه انجام شده است. این کار می‌تواند به‌عنوان الگویی برای مدیریت ریسک فرونشست در مناطق پرجمعیت مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

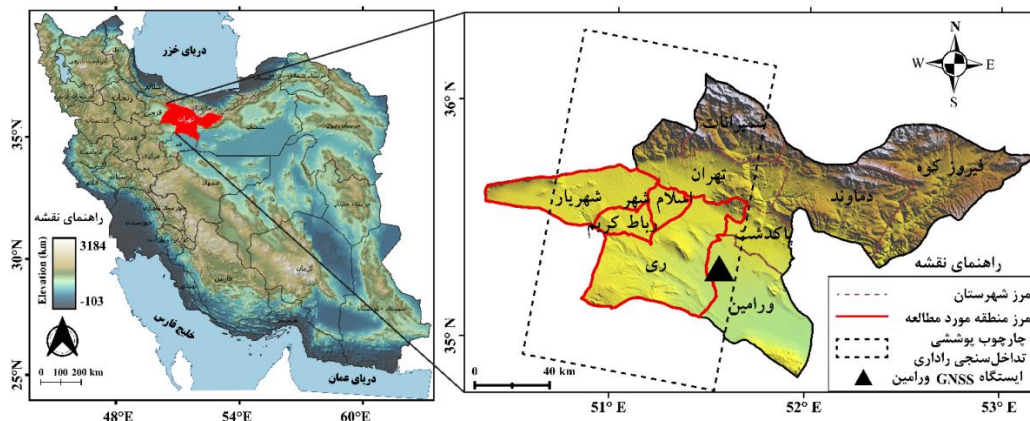
1. Galloway
2. Peltzer
3. Amelung
4. Fruneau & Sarti
5. Tesauro
6. Crosetto

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

تصاویر ماهوریت Sentinel-1

در این مطالعه از ۲۱ تصویر پایین گذر SENTINEL-1A مربوط به بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۴ تا مارس ۲۰۱۷ با زاویه دید مرکزی ۳۹/۹۵۵ درجه استفاده گردید. ماهواره SENTINEL-1A از سال ۲۰۱۴ شروع به کار نموده و گذر مجدد آن از یک منطقه جهت اخذ تصویر هر دوازده روز یک بار اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است که با پرتاب ماهواره SENTINEL-1B در سال ۲۰۱۶ تفکیک زمانی اخذ تصاویر این ماهواره به شش روز ارتقا پیدا کرده است. این سنجنده به جهت طراحی مداری بسیار دقیق و حرکت مداری منظم، در گذرهای مجدد از یک منطقه دچار جابه‌جایی مداری کمتری شده و بر این اساس تداخل‌نماهای تشکیل شده از تصاویر اخذ شده توسط آن، طول خط مبنای کوتاه‌تری (کمتر از ۱۵۰ متر) دارند. از نظر زمانی نیز دارای نظم بیشتری در اخذ تصاویر نسبت به ماهواره ENVISAT است. همچنین باید یادآور شد که تصاویر SENTINEL-1A شامل سه دامنه وسیع تداخل سنجی شامل IW1، IW2 و IW3 هستند که منطقه بسیار وسیعی را تحت پوشش قرار می‌دهند، اما در این پژوهش به دلیل قرار داشتن منطقه مطالعاتی در دامنه وسیع IW2 تنها از این بخش از تصاویر SENTINEL-1A استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱. وضعیت پوشش دامنه وسیع IW2 تصاویر SENTINEL-1A

مشاهدات ایستگاه GNSS

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مشاهدات InSAR و بررسی دقت تغییرات ارتفاعی، از داده‌های تعیین موقعیت روزانه ایستگاه GNSS ورامین استفاده شد. این ایستگاه به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه GNSS سازمان نقشه‌برداری کشور به منطقه جنوب غرب تهران و حوزه مطالعاتی ورامین، منبعی مطمئن و کارآمد برای مقایسه داده‌های InSAR محسوب می‌شود. (طایفه رستمی و عامریان، ۲۰۲۵).

داده‌های GNSS مذکور با بهره‌گیری از نرم‌افزار پردازش تعیین موقعیت ماهواره‌ای GAMIT/GLOBK نسخه ۱۰/۶ تحلیل شدند (هرینگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). این نرم‌افزار از استانداردهای پیشرفته در پردازش داده‌های GNSS به شمار می‌آید و قابلیت ارائه موقعیت‌های دقیق سه‌بعدی را داراست. همچنین تمامی داده‌های پردازش شده در چارچوب مرجع زمینی بین‌المللی ITRF2014 (International Terrestrial Reference Frame 2014) تنظیم شده‌اند، که به عنوان مرجع استاندارد جهانی برای تعیین موقعیت‌های جغرافیایی دقیق پذیرفته شده است (التامیمی^۲ و همکاران، ۲۰۱۶).

این رویکرد تضمین می‌کند که داده‌های GNSS ورامین به عنوان مرجعی قابل اعتماد برای اعتبارسنجی نرخ فرونشست و تغییرات ارتفاعی استخراج شده از داده‌های اینسار در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شوند.

1. Herring
2. Altamimi

تداخل سنجی راداری

سنجده‌های راداری، پالسی از انرژی الکترومغناطیسی را تولید و به سمت هدف ارسال می‌کند. بخشی از این انرژی از طرف اشیا در میدان دید رادار به سمت سنجده بازگشت داده شده و سنجده آن را دریافت، اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. امواج راداری در محیط اتمسفری (برای مثال ابر، مه، دود، گردوغبار) بدون هیچ‌گونه حذف قابل توجه سیگنال، انتشار یافته و توانایی تصویربرداری در شب و در هرگونه شرایط آب‌وهوایی را میسر می‌سازد. اندازه‌گیری ثبت‌شده توسط امواج راداری در دو بخش دامنه و فاز صورت می‌گیرد (هانس،^۱ ۲۰۰۱؛ آسواتی^۲ و همکاران، ۲۰۲۲).

اساس کار تداخل سنجی راداری، تفاضل فازهای دو تصویر اخذشده از یک منطقه است که منجر به تولید تداخل نما می‌شود. تداخل نما از حاصل ضرب یک تصویر راداری در مختلط مزدوج تصویر دوم به دست می‌آید. بنابراین تفاضل بین فاز زوج تصویر، فاز تداخل نما را تشکیل داده و حاصل ضرب دامنه‌های زوج تصویر نیز دامنه تداخل نما را تولید می‌کند (هانس،^۱ ۲۰۰۱؛ آسواتی و همکاران، ۲۰۲۲).

$$y_1 = a_1 \exp(i \phi_1) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$y_2 = a_2 \exp(i \phi_2) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$y_1 \cdot y_2^* = a_1 a_2 \exp(i (\phi_1 - \phi_2)) = A \exp(i \phi) \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه‌های (۱) تا (۳)، y_1 و y_2 موج‌های ثبت‌شده در تصاویر اول و دوم برای یک نقطه، a_1 و a_2 دامنه موج‌های ثبت‌شده، ϕ_1 و ϕ_2 فاز آن‌ها، A حاصل ضرب دامنه موج‌های ذکر شده و نهایتاً ϕ فاز تداخل نما می‌باشد. علامت * به مفهوم مختلط مزدوج است. علاوه بر جابه‌جایی، عوامل مؤثر دیگری نیز بر روی فاز تداخل نما تأثیرگذارند و می‌توان فاز تداخل نما را به صورت تابعی از این عوامل تعریف نمود (کامپس،^۳ ۲۰۰۵؛ هوپر،^۴ ۲۰۰۶؛ دهقانی و همکاران،^۵ ۱۳۹۲؛ یون^۶ و همکاران، ۲۰۱۵؛ ثابتی و همکاران،^۷ ۱۴۰۲):

$$\phi_{InSAR} = \phi_{topo} + \phi_{orb} + \phi_{defo} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، ϕ_{InSAR} اختلاف فاز تداخل سنجی بین دو تصویر راداری است. همچنین ϕ_{topo} فاز ناشی از توپوگرافی منطقه بوده که با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی می‌توان اثر آن را حذف نمود (دینگ^۸ و همکاران، ۲۰۰۸). ϕ_{orb} فاز ایجادشده به دلیل انحنای زمین است و با استفاده از اطلاعات مداری دقیق حذف می‌گردد (یون و همکاران، ۲۰۱۵). ϕ_{noise} فاز نویز است (که عمدتاً ناشی از ناهمبستگی سیگنال InSAR، ایجادشده توسط پوشش گیاهی و یا تغییرات محیطی سطح زمین است). برای کاهش فاز نویز نیز از فیلتر گلدشتاین استفاده می‌شود (هانس،^۱ ۲۰۰۱؛ آسواتی و همکاران، ۲۰۲۲). ϕ_{atm} فاز مربوط به تأثیرات جوی است. به منظور تصحیح فاز ناشی از جو روش‌های متفاوتی ارائه شده است که از مؤثرترین آن‌ها می‌توان به محاسبه این خطا با استفاده از پارامترهای جوی تولیدشده توسط مدل‌های عددی هواشناسی همچون ERA-Interim و WRF و محصولات سنجنده MERIS (برای تصاویر ENVISAT ASAR) اشاره نمود (بکائرت^۹ و همکاران، ۲۰۱۵). رابطه بین فاز جابه‌جایی (ϕ_{defo}) و مقدار جابه‌جایی (Δx_{LOS}) در امتداد خط دید ماهواره با رابطه (۵) بیان می‌گردد (ماسونت و فیگل،^۸ ۱۹۹۸؛ ثابتی و همکاران، ۱۴۰۲):

$$\phi_{defo} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{LOS} \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه فوق، λ طول موج سیگنال ارسالی سنجده است. جابه‌جایی محاسبه‌شده در هر تداخل نما در راستای خط دید ماهواره است و برای مطالعه جابه‌جایی‌های سطح زمین، باید این اندازه‌گیری به جابه‌جایی در راستای افقی و قائم تبدیل شود. در مطالعات

1. Hanssen
2. Aswathi
3. Kampes
4. Hooper
5. Yun
6. Ding
7. Bekaert
8. Massonnet & Feigl

مربوط به فرونشست برای تبدیل این مقدار جابه جایی در راستای قائم با فرض اینکه جابه جایی افقی وجود ندارد، از رابطه (۶) استفاده می گردد (بارسلونانت، ۲۰۱۳):

$$\Delta r_{vert} = \frac{\Delta x_{LOS}}{\cos \theta} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه فوق، Δx_{LOS} جابه جایی در راستای خط دید ماهواره، Δr_{vert} جابه جایی ارتفاعی و θ نیز زاویه برخورد سیگنال است. عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر موجب می شود تا بخش بزرگی از تداخل نما همبستگی پایینی داشته باشد. این امر موجب عدم اطمینان در اندازه گیری ها می شود. از این رو، روش های آنالیز سری زمانی تداخل سنجی مطرح گردید (فرتی، پراتی، و روکا، ۲۰۰۱). از جمله این روش ها می توان به روش پراکنشگرهای دائمی (PS) و روش خط مبنای کوتاه (SBAS) اشاره کرد (مقصودی و مهدوی، ۱۳۹۴). در این مطالعه از روش خط مبنای کوتاه استفاده شده است.

روش خط مبنای کوتاه

این روش از تصاویر یک منطقه در زمان های متفاوت استفاده می کند. از آنجا که بزرگ بودن خط مبنای مکانی و زمانی یک زوج تصویر موجب ناهمبستگی مکانی و زمانی بیشتری در تداخل نما می شود، در این روش از زوج تصویرهایی استفاده می گردد که خط مبنای مکانی و زمانی کوتاهی دارند (براردینو^۳ و همکاران، ۲۰۰۲؛ ثابتی و همکاران، ۱۴۰۲).

فاز تداخل نما، حاصل تفاضل فاز زوج تصویر سازنده آن است. با اصلاح فاز تداخل نما، فاز اصلاح شده هریک از زوج تصویر سازنده نیز قابل بازیابی خواهد بود. معادلات رابطه (۷) دستگاه معادلات خطی مربوطه را برای یک پراکنشگر نشان می دهد (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ ثابتی و همکاران، ۱۴۰۲):

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \\ \vdots \\ \phi_k = \phi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j \end{cases} \quad \text{رابطه ۷}$$

در دستگاه معادلات فوق، $k = 1, \dots, n$ و $i, j = 1, \dots, m$ است، به طوری که n تعداد تداخل نماها و m تعداد تصاویر است. همچنین ϕ_k فاز تداخل نمای k ام، ϕ_{ij} فاز تداخل نمای حاصل از تصاویر i ام و j ام، φ_i فاز تصویر i ام و φ_j فاز تصویر j ام است. دستگاه معادلات فوق را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، $\mathbf{L}$ بردار مشاهدات، $\mathbf{A}$ ماتریس ضرایب و $\mathbf{X}$ بردار مجهولات است و هریک به شرح زیر تعریف می شود (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ ثابتی و همکاران، ۲۰۲۳):

$$\mathbf{L}_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_{(m \times 1)} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{(n \times m)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۹}$$

در این روش، فاز تصویر اول به عنوان مرجع برابر با صفر در نظر گرفته می شود. در واقع، فاز سایر تصاویر نسبت به تصویر اول تعیین می گردد؛ در نتیجه بردار مجهولات به صورت زیر بیان می گردد:

$$\varphi_1 = 0, \quad \mathbf{X}_{(m-1 \times 1)} = \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \vdots \\ \varphi_m \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در نهایت بردار مجهولات با استفاده از روش کمترین مربعات به صورت زیر برآورد می‌گردد:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}$$

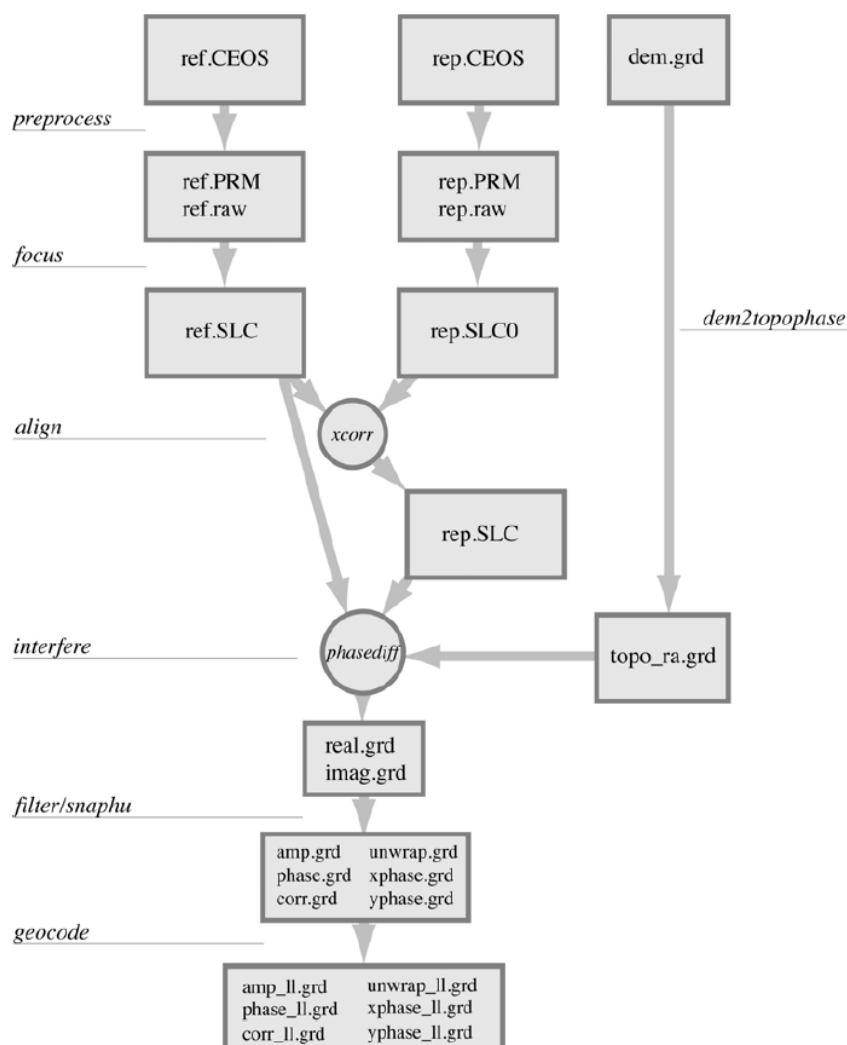
رابطه ۱۱)

با توجه به صفر در نظر گرفتن فاز تصویر اول، به منظور قابل حل بودن معادله فوق باید شرط $n \geq m - 1$ برای تعداد تصاویر و تعداد تداخل‌نماها برقرار باشد. با برآورد مقدار تصحیح‌شده فاز تصاویر، امکان به دست آوردن تغییرات ارتفاعی (متناظر با تغییرات فاز) بین هر دو تصویر دلخواه که در یک شبکه سرشکنی باشند وجود دارد (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ ثابتی و همکاران، ۱۴۰۲).

مراحل پردازش تصاویر راداری

در این پژوهش به منظور پردازش تصاویر راداری از مجموعه GMTSAR استفاده شد. این مجموعه مبنی بر داده‌های مداری دقیق بوده و از ابزار GMT برای پردازش تصاویر استفاده می‌کند (سندول^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

مراحل تولید تداخل‌نما با GMTSAR عبارت‌اند از: انتخاب تصویر اصلی، پیش‌پردازش به منظور تبدیل فایل‌های حاوی اطلاعات فاز و دامنه تصاویر با فرمت خاص هر سنجنده به فایل‌های ascii و raw، تولید تصاویر SLC، ثبت هندسی تصویر اصلی و پیرو، تشکیل تداخل‌نما، تصحیح اثر انحنای زمین (اثر مداری یا زمین مسطح با استفاده از موقعیت دقیق مداری ماهواره)، تصحیح توپوگرافی (با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با تفکیک مکانی افقی ۹۰ متر)، فیلترگذاری جهت کاهش نویز فاز، بازیابی فاز با الگوریتم SNAPHU و در نهایت تبدیل به سیستم مختصات جغرافیایی (شکل ۲).



شکل ۲. نمودار جریانی تولید تداخل‌نما توسط GMTSAR (سندول و همکاران، ۲۰۱۱)

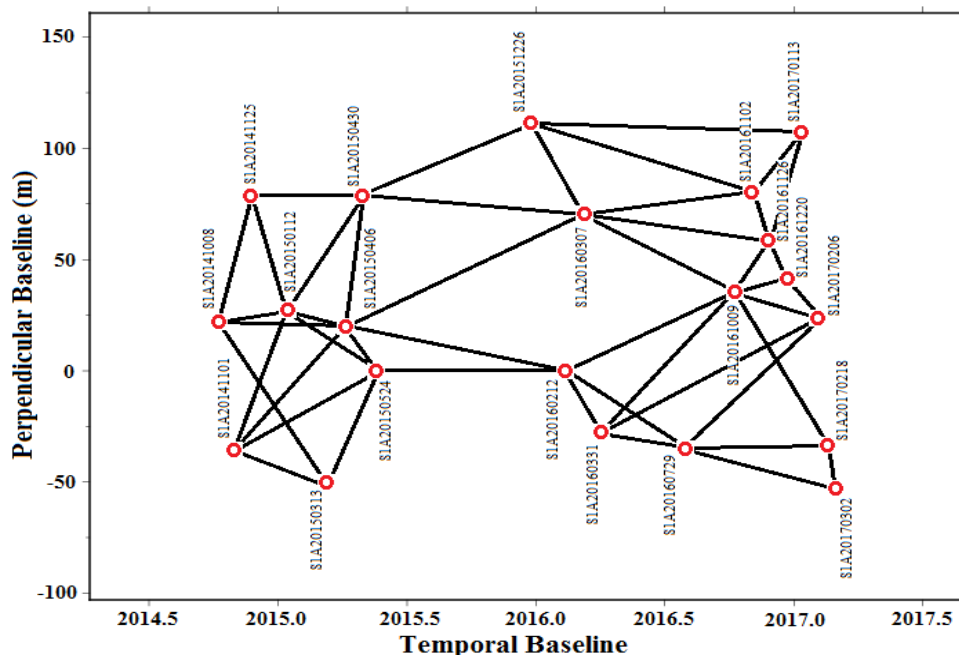
انتخاب تصویر اصلی در حالتی که تداخل نماها نسبت به یک تصویر اصلی مشترک ایجاد می شوند، بر مبنای همدوسی تجمعی کل تداخل نماهاست (کامپس، ۲۰۰۵) که طبق رابطه زیر، تابعی از خط مبنای عمودی $B_{\perp}$ ، خط مبنای زمانی T و فرکانس مرکزی داپلر f_{dc} است.

$$\gamma^m = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [g(B_{\perp}^{k,m}, B_{\perp, \max}) \cdot g(T^{k,m}, T_{\max}) \cdot g(f_{dc}^{k,m}, f_{dc, \max})] \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن تابع g به صورت زیر تعریف می گردد:

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & \text{for } |x| \leq c \\ 0 & \text{for } |x| > c \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در این رابطه، γ^m همدوسی تجمعی برای تصویر پایه m ام و K تعداد تصاویر پیرو است. در این مطالعه تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۶۰۲/۱۲ به عنوان تصویر اصلی (Master) انتخاب شد. نخست، این تصویر به دلیل قرارگیری در میان بازه زمانی تصاویر موجود، فاصله زمانی معقولی با سایر عکس ها دارد که امکان مقایسه دقیق تر و تعادل برقرار کردن بین تصاویر قبلی و بعدی را فراهم می آورد. این موضوع به ویژه در مطالعاتی که به بررسی تغییرات زمانی می پردازند، از جمله فرونشست زمین، حائز اهمیت است، زیرا تصویر مرجع باید بتواند به صورت مؤثری به عنوان پایه ای برای تحلیل داده های زمانی عمل کند. دوم، این تصویر از متوسط میزان همبستگی مناسبی با سایر تصاویر موجود در مجموعه داده برخوردار است. همبستگی بالا بین تصویر مرجع و سایر تصاویر نشان دهنده شباهت های ساختاری و الگوهای مشابه در داده های تصویری است که می تواند به بهبود دقت و اعتبار نتایج تحلیل منجر شود. بنابراین، انتخاب تصویر مذکور به عنوان مرجع اصلی، به دلیل قرارگیری در فاصله زمانی مناسب و داشتن میزان همبستگی متعادل با تصاویر دیگر، اطمینان حاصل می کند که نتایج به دست آمده از این مطالعه از اعتبار و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار باشند. برای تولید میدان سرعت جابه جایی به روش سری زمانی SBAS با استفاده از تصاویر موجود، ۴۵ تداخل نما تشکیل گردید. گراف مربوط به تداخل نماهای تولید شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شبکه، دایره های قرمز رنگ مربوط به تصاویر بوده و خطوط سیاه رنگ نیز تداخل نماهای متشکل از دو تصویر را نشان می دهد. در شبکه تشکیل شده برای روش SBAS تمامی تداخل نماها باید به صورت یک شبکه پیوسته به یکدیگر متصل بوده و جدایی و گسست بین یک تداخل نما با شبکه متشکل از دیگر تداخل نماها وجود نداشته باشد تا مسئله قابل حل شده و دچار کمبود مرتبه نگردد.



شکل ۳. گراف تشکیل شده از تداخل نماها برای پردازش سری زمانی SBAS

تصحیح اتمسفری فاز تداخل نما به عنوان یک منبع خطای تأثیرگذار از طریق پارامترهای هواشناسی مدل جهانی ECMWF صورت پذیرفت (یوسفی، ۱۳۹۶). در مدل ECMWF با استفاده از مدل های پیش بینی و داده گواری داده های اندازه گیری شده با حسگرهای مختلف از جمله رادیوسوند، ایستگاه های سینوپتیک، داده های ماهواره ای، تایید گیج ها، اطلاعات جمع آوری شده توسط کشتی ها و سایر منابع جمع آوری داده های هواشناسی، مدل نهایی تولید می شود و در قالب داده های ERA-Interim در اختیار کاربران قرار می گیرد. هدف از داده گواری در این مدل، امکان تخمین بهترین وضعیت جوئی با استفاده از داده های با نرخ زمانی کوتاه است. این مدل عددی هواشناسی، توسط مرکز اروپایی پیش بینی های میان مدت جوئی (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/en/about>) با استفاده از مشاهدات هواشناسی پارامترهای جوئی را در ۳۷ لایه فشاری در راستای قائم و با تفکیک مکانی افقی متنوع در اختیار کاربران قرار می دهد. در این پژوهش از داده های با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵ درجه استفاده گردید. برای محاسبه تأخیر تروپسفری در راستای قائم از رابطه ارائه شده مربوط به امواج ماکروویو استفاده شد (دیویس^۱ و همکاران، ۱۹۸۵).

$$ZTD = 10^{-6} \sum_{i=surface}^{last\ layer} \left(\left(k_1 R_d \left(\frac{P_i - e_i}{R_d T_i} + \frac{e_i}{R_w T_i} \right) + \left(k_2' \frac{e_i}{T_i} + k_3 \frac{e_i}{T_i^2} \right) \right) dh_i \right) \quad (\text{رابطه } ۱۴)$$

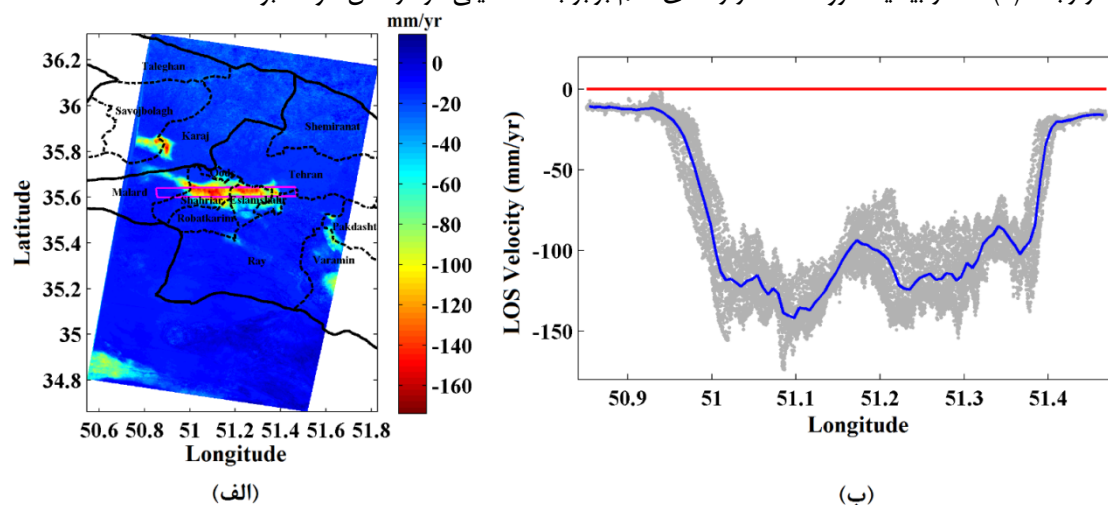
در این رابطه، e_i ، T_i و p_i به ترتیب چگالی بخار آب، دما و فشار در لایه مورد نظر است. شایان ذکر است که یکی دیگر از پارامترهای جوئی مؤثر در تأخیر تروپسفری آب مایع ($1.4 W_i$) است (هانسن، ۲۰۰۱) که در این مطالعه به منظور محاسبه تأخیر تروپسفری در نظر گرفته شد. تمامی این پارامترها توسط ERA-Interim ارائه می شود. سپس به منظور تخمین تأخیر تروپسفری در راستای مایل از تابع نگاشت استفاده گردید.

$$mf = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{رابطه } ۱۵)$$

که در این رابطه، θ زاویه دید ماهواره است. پس از تصحیح تروپسفری تداخل نماها از الگوریتم SBAS موجود در GMTSAR جهت تولید میدان سرعت جابه جایی استفاده گردید.

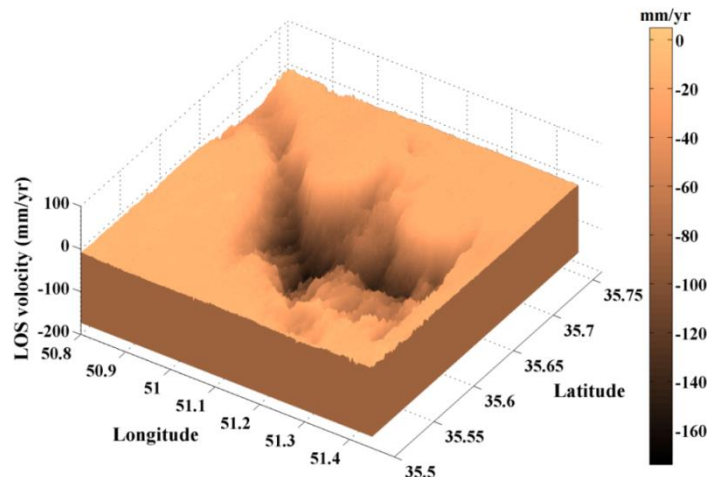
نتایج اولیه به دست آمده

میدان سرعت جابه جایی به دست آمده از روش SBAS (شکل ۴ الف) برای بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷، فرونشستی با بیشینه مقدار ۱۷۴ میلی متر در سال در راستای خط دید ماهواره را برای منطقه جنوب غربی تهران نشان می دهد. با فرض عدم جابه جایی افقی و استفاده از رابطه (۶)، مقدار بیشینه فرونشست در راستای قائم برابر با ۲۲۷ میلی متر در سال خواهد بود.



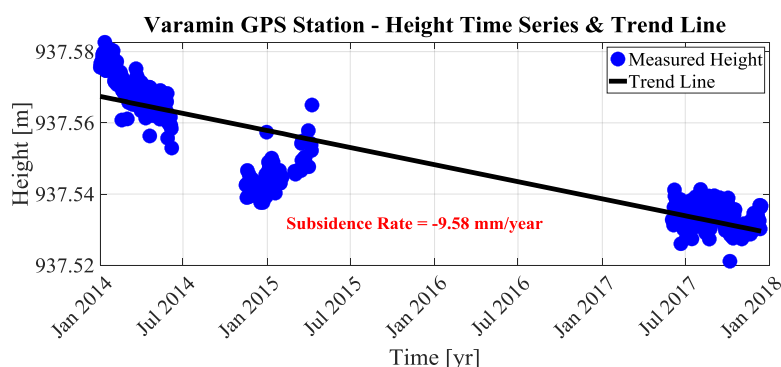
شکل ۴. الف) میدان میانگین سرعت جابه جایی در راستای خط دید ماهواره؛ ب) ترسیم میانگین سرعت جابه جایی نقاط موجود در محدوده مستطیل به رنگ بنفش

بخش عمده مناطق فرونشست در شهرستان‌های شهریار و اسلامشهر واقع شده است که به شدت مناطق شهری و راه‌های ارتباطی و... را مورد تهدید جدی قرار می‌دهد. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، دلیل این میزان از فرونشست مربوط به خشکسالی و برداشت بی‌رویه از چاه‌های موجود در منطقه است (علیپور و همکاران، ۱۳۸۷؛ دهقانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۰). در این محدوده، ۶۸۴۸ حلقه چاه به منظور مصارف آشامیدن، کشاورزی، صنعتی و دیگر مصارف حفر گردیده که بیشترین سهم مصرفی به بخش کشاورزی با ۴۸۰/۱۴ میلیون متر مکعب در سال مربوط می‌شود (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷). شکل ۵، نمایش سه‌بعدی از فرونشست منطقه را نشان می‌دهد، به طوری که میزان فرونشست منطقه نسبت به مناطق مجاور بسیار زیاد بوده و به شدت منطقه را مورد تهدید قرار می‌دهد.



شکل ۵. نمایش سه‌بعدی میدان میانگین سرعت جابه‌جایی منطقه مطالعاتی

در شکل ۶ تغییرات ارتفاعی حاصل از ایستگاه GNSS ورامین نشان داده شده است.

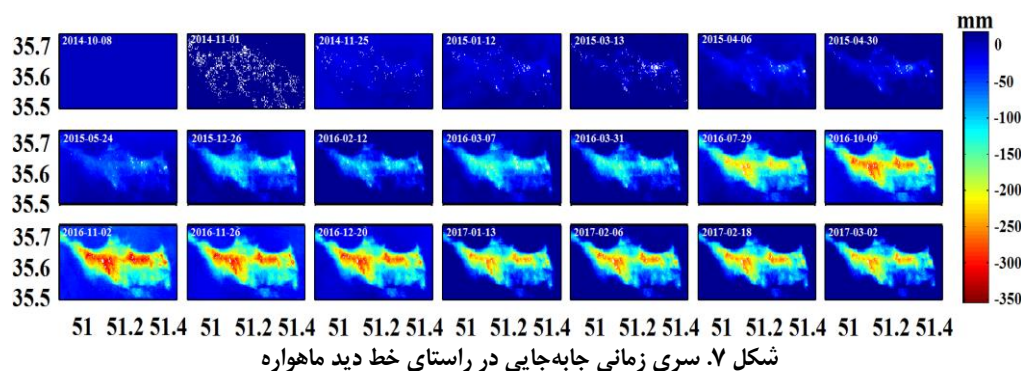


شکل ۶. سری زمانی تغییرات ارتفاعی حاصل از ایستگاه GNSS ورامین

شکل ۶ روند تغییرات ارتفاعی ثبت شده توسط ایستگاه GNSS ورامین را در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۴ تا ژانویه ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. در این نمودار، نقاط آبی نمایانگر ارتفاع‌های اندازه‌گیری شده روزانه هستند و خط سیاه، روند کلی تغییرات را به صورت یک خط رگرسیون خطی نشان می‌دهد. براساس این تحلیل، نرخ فرونشست در محل ایستگاه برابر با ۹/۵۸ میلی‌متر در سال برآورد شده است. این مقدار گرچه نسبت به نرخ‌های بیشینه استخراج شده از داده‌های InSAR برای منطقه مورد مطالعه - که در راستای دید ماهواره تا ۱۷۴ میلی‌متر در سال و در راستای قائم تا ۲۲۷ میلی‌متر در سال تخمین زده شده‌اند - به مراتب کمتر است، تطابق کیفی خوبی با الگوی کلی فرونشست منطقه دارد. این اختلاف در نرخ‌ها را می‌توان به تفاوت در مقیاس مکانی اندازه‌گیری‌ها نسبت داد: داده‌های GPS تنها مربوط به یک نقطه مشخص (محل ایستگاه ورامین) هستند، در حالی که مشاهدات InSAR نمایی پیوسته از کل ناحیه فراهم می‌کنند و قادرند نرخ‌های موضعی شدیدتر را نیز آشکار سازند. بنابراین، نتایج GNSS ضمن ارائه شواهد مستقل و مستقیم از وجود پدیده فرونشست، نقش موثری در اعتبارسنجی داده‌های اینسار ایفا می‌کنند.

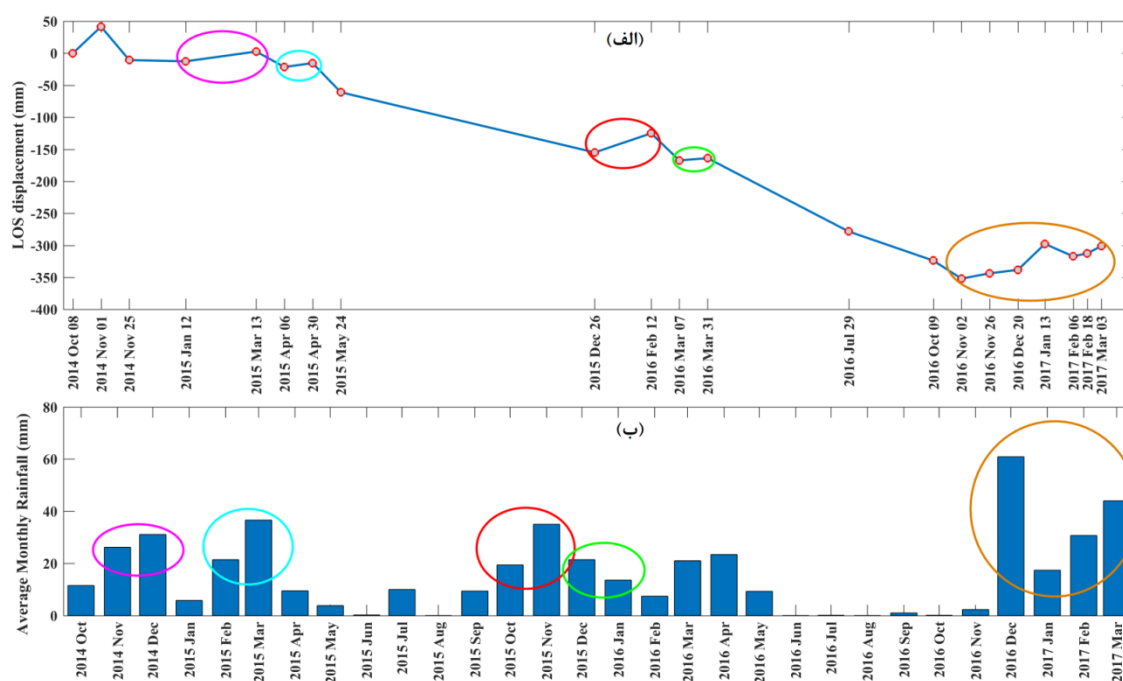
تجزیه و تحلیل نتایج

سری زمانی جابه‌جایی منطقه فرونشست در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۴ تا مارس ۲۰۱۷ در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با گذر زمان، بخش فرونشست بیشتر خود را نشان داده و به رنگ قرمز نزدیک می‌گردد. به‌طوری‌که به‌علت استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، جابه‌جایی غالب منطقه مربوط به فرونشست بوده و به بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در بازه زمانی مورد مطالعه می‌رسد. اما نکته قابل توجه این است که در برخی تاریخ‌ها بخش فرونشست (که به سمت رنگ سبز، زرد و قرمز متمایل می‌شود) نسبت به تاریخ قبلی کم‌رنگ‌تر شده (به سمت آبی میل پیدا می‌کند) و نشان‌دهنده بالآمدگی در این تاریخ‌هاست. برای مثال بخش فرونشست در میدان جابه‌جایی مربوط به تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۱۲ نسبت به تاریخ قبلی کم‌رنگ‌تر شده است. همچنین بیشترین میزان فرونشست به تاریخ ۲۰۱۶/۱۱/۰۲ مربوط شده و از این تاریخ به بعد (شش تاریخ انتهایی) بخش قرمز رنگ کم‌رنگ می‌گردد و این نشان از بالآمدگی منطقه در این زمان است.



شکل ۷. سری زمانی جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره

برای بررسی بهتر، از آنجاکه علت فرونشست در منطقه، پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی است و این امر ارتباط نزدیکی با میزان بارش در منطقه دارد، بارش میانگین ماهانه ایستگاه شهرداری (نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه فرونشست) با سری زمانی جابه‌جایی منطقه، مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۸).



شکل ۸. الف) سری زمانی جابه‌جایی منطقه فرونشست در راستای خط دید ماهواره؛ ب) نمودار میله‌ای بارش ماهانه ایستگاه شهرداری

مقایسه سری زمانی جابه جایی منطقه و میانگین بارش ماهانه نشان می دهد در ماه هایی که میزان بارش بیش از ۲۰ میلی متر بوده، منطقه مورد نظر پس از مدتی تقریباً یک ماهه (تا آب ناشی از بارندگی به سفره آب های زیرزمینی ملحق شود) دچار بالا آمدگی گردیده است. این موضوع می تواند اطلاعات مناسبی به منظور جلوگیری از بحران ناشی از فرونشست منطقه در اختیار ارگان های مسئول قرار دهد. البته شایان ذکر است علاوه بر میزان بارش باید ارتباط بین استخراج آب های زیرزمینی نیز با جابه جایی منطقه مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به یک آگاهی جامع دست یافت.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی روند و الگوی فرونشست زمین در جنوب غرب استان تهران، به ویژه در مناطق شهریار، اسلامشهر و رباط کریم انجام شد. نتایج به وضوح نشان داد که این منطقه در حال تجربه نرخ بالای فرونشست است که تهدید جدی برای زیرساخت های شهری، تأسیسات حمل و نقل، خطوط انتقال و منابع طبیعی به شمار می آید. بیشینه نرخ فرونشست محاسبه شده در راستای قائم به ۲۲۷ میلی متر در سال رسید که رقمی نگران کننده و نشانه ای از تخلیه بی رویه منابع آب زیرزمینی است.

داده های به دست آمده از تداخل سنجی راداری سری زمانی (SBAS-InSAR)، پس از پردازش و تحلیل، با داده های مشاهداتی GNSS ایستگاه ورامین مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان داد که جابه جایی های ثبت شده در هر دو سامانه دارای تطابق قابل قبول هستند و این موضوع دقت و صحت روش مورد استفاده را تأیید می کند. تلفیق داده های ماهواره ای با داده های زمینی، مزیت مهم این تحقیق نسبت به رویکردهای صرفاً ماهواره محور بوده و دقت نتایج را افزایش داده است.

نتایج به دست آمده از این تحقیق، با روند کلی گزارش شده در سایر مناطق درگیر پدیده فرونشست در کشور و حتی در سایر مناطق مشابه در سطح جهان هم راستاست. الگوی فرونشست عمدتاً با توزیع مکانی چاه های برداشت آب زیرزمینی و اراضی کشاورزی هم پوشانی دارد. گرچه اطلاعات دقیق و به روز مربوط به پراکنش چاه های بهره برداری به دلایل محدودیت های دسترسی در این پژوهش لحاظ نشد، تطابق مکانی مناطق نشست با محدوده های کشاورزی فعال و دشت های آبرفتی کاملاً مشهود است. این موضوع، برداشت بی رویه آب زیرزمینی را به عنوان اصلی ترین عامل بروز این پدیده در منطقه تأیید می کند.

با توجه به ماهیت غیرقابل برگشت فرونشست در لایه های رسوبی دشت تهران، تداوم وضعیت فعلی می تواند منجر به خسارت های زیرساختی گسترده، نشست سازه ها، شکست خطوط انتقال، افزایش ریسک سیلاب در فرورفتگی ها و تغییر شکل سطح زمین شود. این پدیده، تهدیدی جدی برای پایداری محیط زیست و توسعه پایدار منطقه است.

بر این اساس، پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، پایش سری زمانی فرونشست با داده های به روز InSAR و GNSS به صورت مستمر ادامه یابد تا روندهای جدید با دقت بیشتری رصد شود. همچنین به کارگیری داده های دقیق کاربری اراضی و پراکنش چاه های برداشت آب به منظور تحلیل عمیق تر روابط میان بهره برداری منابع آب و نرخ نشست زمین ضروری است. توسعه مدل های پیش بینی مبتنی بر سناریوهای مختلف مدیریتی و اقلیمی می تواند به تصمیم گیری های بهتر کمک کند. انجام مطالعات تفصیلی بر روی تأثیر فرونشست بر زیرساخت های شهری و شناسایی مناطق پرریسک برای برنامه ریزی شهری نیز از اقدامات ضروری آتی است. علاوه بر این، بررسی راهکارهای جایگزین برای تأمین آب، مدیریت تقاضا و کاهش فشار بر آبخوان های منطقه باید به عنوان یک راهبرد کلان در دستور کار نهادهای ذی ربط قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از سازمان فضایی اروپا به منظور فراهم سازی تصاویر راداری SENTINEL-1A، مرکز پیش بینی آب و هوایی اروپا برای ارائه پارامترهای جو ERA-Interim، سازمان هواشناسی کشور بابت در اختیار قرار دادن داده های بارش ماهانه، و همچنین سازمان نقشه برداری کشور به جهت تأمین داده های روندی GNSS به صورت رایگان اعلام می دارند.

References

- Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M., & Walter, T. (2008). *InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. Paper presented at the Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas, 2008*. USEReST 2008. Second Workshop on.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., & Lacznia, 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.
- Amighpay, M., Arabi, S., Talebi, A., & Djamour, Y. (2006). Elevation changes of the precise leveling tracks in the Iran leveling network. *Scientific report published in National Cartographic Center (NCC) of Iran*.
- Arabi, S., Montazerian, A. R., Maleki, E., & Talebi, A. (2005). Study of land subsidence in south-west of Tehran. *Journal of Engineering and Surveying*, 69, 14-24.
- Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 9135.
- Aswathi, J., Kumar, R. B. B., Oommen, T., Bouali, E. H., & Sajinkumar, K. S. (2022). InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. *Energy Geoscience*, 3(2), 160-171.
- Barcelonnette. (2013). *Traditional Differential Interferometry Synthetic-Aperture Radar*.
- Bekaert, D., Walters, R., Wright, T., Hooper, A., & Parker, D. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47.
- 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.
- Crosetto, M., Tscherning, C. C., Crippa, B., & Castillo, M. (2002). Subsidence monitoring using SAR interferometry: reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering. *Geophysical Research Letters*, 29(9).
- Davis, J., Herring, T., Shapiro, I., Rogers, A., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593-1607.
- Dehghani, M., Zoj, 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.
- Ding, X.-l., Li, Z.-w., Zhu, J.-j., Feng, G.-c., & Long, J.-p. (2008). Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation. *Sensors*, 8(9), 5426-5448.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Forootan, E., Rietbroek, R., Kusche, J., Awange, J. L., Schmidt, M., Omondi, P., & Famiglietti, J. (2014). Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data. *Remote Sensing of Environment*, 140, 580–595.
- Fruneau, B., & Sarti, F. (2000). Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophysical Research Letters*, 27(24), 3981-3984.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34(10), 2573-2585.
- Geological Survey of Iran. (2008a). *Investigation of subsidence hazards in Tehran Province: Hydrogeology of the land subsidence area in the southwest of Tehran Plain and groundwater balance*.

- Haghshenas Haghighi, M., & 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, 534–550.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2): Springer Science & Business Media.
- Herbert, C., & Döll, P. (2019). Global assessment of current and future groundwater stress with a focus on transboundary aquifers. *Water Resources Research*, 55(6), 4760–4784.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W.-C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, S., & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36.
- Herring, T. A., Melbourne, T. I., Murray, M. H., Floyd, M. A., Szeliga, W. M., King, R. W., Phillips, D. A., Puskas, C. M., Santillan, M., & Wang, L. (2016). Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products, *Rev. Geophys.*, 54, 759–808, doi:10.1002/2016RG000529
- Hooper, A. J. (2006). *Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*.
- Jaleh, B., & Eslamipناه, M. (2023). Restore Iran's declining groundwater. *Science*, 379(6628), 148–148.
- Kampes, B. (2005). *Radar interferometry: Persistent scatterer technique*.
- Khaki, M., Forootan, E., Kuhn, M., Awange, J., Van Dijk, A. I. J. M., Schumacher, M., & Sharifi, M. A. (2018). Determining water storage depletion within Iran by assimilating GRACE data into the W3RA hydrological model. *Advances in Water Resources*, 114, 1–18.
- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: Challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997–1016.
- Maghsoudi, Y., & Mahdavi, S. (2015). *Fundamentals of radar remote sensing*. Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441–500.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H.-U., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2), 518–526.
- Motagh, M., Shamshir, R., Haghshenas Haghighi, M., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanzan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 218, 134–151.
- Negahdary, M. (2022). Shrinking aquifers and land subsidence in Iran. *Science*, 376(6595), 1279–1279.
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F., & Hudnut, K. (1998). Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture. *Journal of geophysical research: solid earth*, 103(B12), 30131–30145.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M.-H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651–659.
- Sabeti, H., Pourmina, A., Rezaei, A. et al. Discovering confined zones and land deformation characteristics across an aquifer system in Iran using GNSS and InSAR techniques. *Hydrogeol J* 31, 2061–2076 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02704-8>
- Sadeghi, Z., Veldan-Zoj, M. J., & Dehghani, M. (2011). Integration of two different radar interferometry methods based on permanent scatterers for monitoring land subsidence. *Journal of Earth Sciences*, 90, 45–58.
- Saemian, P., Tourian, M. J., AghaKouchak, A., Madani, K., & Sneeuw, N. (2022). How much water did Iran lose over the last two decades? *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101095.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). *Gmtsar: An insar processing system based on generic mapping tools*.
- Shemshaki, A., Blourchi, M. J., & Ansari, F. (2005). *Earth subsidence review at Tehran plain-Shahriar (first report)*.

- Smith, R. G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J. A., Zebker, H. A., Farr, T., & Liu, Z. (2017). Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California. *Water Resources Research*, 53(3), 2133–2148.
- Tayfehrostami, A. and Amerian, Y. (2025). Analysis of Tropospheric Precipitable Water Vapor Variations Using GNSS Radio Occultation Data and Radiosonde Observations (Case Study: Iran). *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 499-516. doi: 10.22059/jesphys.2025.396147.1007694
- Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansosti, E., Fornaro, G., & Franceschetti, G. (2000). Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(13), 1961-1964.
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., & Bierkens, M. F. P. (2012). Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48, W00L06.
- Yousefi, M. (2017). *Evaluation of the capability of numerical weather prediction models and tomography models in reducing tropospheric error of radar interferometry observations* (Master's thesis). Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Iran.
- Yun, Y., Zeng, Q., Green, B. W., & Zhang, F. (2015). Mitigating atmospheric effects in InSAR measurements through high-resolution data assimilation and numerical simulations with a weather prediction model. *International Journal of Remote Sensing*, 36(8), 2129-2147.