



Analysing Time Series of Land Subsidence in the West of Tehran Province (Shahriar Plain) and its Relation to Groundwater Discharge by InSAR Technique

Ramin Papi¹, Sara Attarchi^{2*}, Masoud Soleimani¹

¹ M.A. Student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type: Research article

Article history:

Received 18 January 2020

Accepted 22 April 2020

Available online 20 May 2020

Keywords:

Land Subsidence, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), SBAS, Groundwater Changes, SAR.

Citation: 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. *Geography and Sustainability of Environment*, 10 (1), 109-128.

doi: [10.22126/GES.2020.49332182](https://doi.org/10.22126/GES.2020.49332182)

ABSTRACT

Land subsidence, as one of the natural and geological hazards, can be caused by human activities such as long-term discharge of groundwater and traditional irrigation farming. In the last two decades, climate change and successive droughts, unsustainable management of water resources and overexploitation of groundwater as well as population growth have caused land subsidence in Shahriar plain in the west of Tehran province. The present study aims to monitor and estimate land subsidence using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) approach. Moreover, it tries to investigate the relationship between groundwater level and subsidence rate. Therefore, the time series of the ENVISAT-ASAR satellite images from 2003 to 2010 were used. The Small Baseline Subset (SBAS) algorithm was applied to analyze the time series of land surface displacement and to generate the mean displacement velocity map. The findings from time series analysis of InSAR data indicate a continuous subsidence occurrence in the agricultural lands of the region. The mean velocity of deformation along the satellite line of sight (LOS) in the time period of study, shows the displacement at an average rate of -10 cm / year and a maximum rate of -27 cm / year in the Shahriar plain in the west of Tehran province. Over this time period, groundwater level decreases about 0.5 to 1.5 m in the aquifer storage at 12 observational wells located in the study area. The overall correlation between changes in groundwater level and subsidence rate was estimated circa 89.45 percent, which indicates a strong relationship between subsidence and groundwater exploitation in the region.



تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری

رامین پایی^۱، سارا عطارچی^{۲*}، مسعود سلیمانی^۱

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

فرونشست زمین به‌مثابه یکی از انواع مخاطرات طبیعی و زمین‌شناسی به‌شمار می‌آید که می‌تواند به‌طور طبیعی یا بر اثر فعالیت‌های انسانی همچون برداشت درازمدت آب زیرزمینی و کشاورزی سنتی حاصل شود. در دو دهه اخیر پیرو رخداد تغییرات اقلیم و خشکسالی‌های پیاپی از یک‌سو و نیز مدیریت غیر اصولی منابع آب، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و رشد فزاینده جمعیت، سبب رخداد فرونشست در استان تهران به‌ویژه منطقه دشتی واقع در غرب استان شده است. به‌طور کلی هدف از پژوهش حاضر پایش و اندازه‌گیری فرونشست زمین با استفاده از رویکرد تداخل‌سنجی راداری و همچنین تحلیل و بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در غرب استان تهران است. بدین‌منظور از سری زمانی تصاویر ماهواره ENVISAT-ASAR از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بهره گرفته شد. به‌منظور تحلیل سری زمانی جابه‌جایی سطح زمین و تولید نقشه متوسط نرخ جابه‌جایی، از الگوریتم زیرمجموعه خط مبنای کوتاه (SBAS) استفاده شد. نتایج تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی نشان‌دهنده رخداد فرونشست به‌صورت پیوسته در زمین‌های کشاورزی منطقه است که سرعت میانگین تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره حاصل از تحلیل سری زمانی، جابه‌جایی را با نرخ متوسط ۱۰- سانتی‌متر و حداکثر ۲۷- سانتی‌متر در سال در منطقه دشتی نشان می‌دهد؛ همچنین نتایج حاصل از بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در واژه چاهک مشاهداتی برای بازه زمانی مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه نیز نشان‌دهنده کاهش به‌طور متوسط ۰/۵ تا ۱/۵ متری سطح آب در آبخوان منطقه است. همبستگی کلی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست، معادل ۸۹/۴۵٪ تخمین زده شد که نشانگر وابستگی رخداد فرونشست و برداشت آب‌های زیرزمینی در منطقه است.

مشخصات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۸ دی ۱۳۹۸

پذیرش ۳ اردیبهشت ۱۳۹۹

دسترسی آنلاین ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، SBAS، تغییرات آب زیرزمینی، رادار دریچه مصنوعی (SAR).

استناد: پایی، رامین؛ عطارچی، سارا؛ سلیمانی، مسعود (۱۳۹۹). تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۰ (۱)، ۱۰۹-۱۲۸.

doi: [10.22126/GES.2020.4933.2182](https://doi.org/10.22126/GES.2020.4933.2182)

مقدمه

فرونشست زمین^۱ به مثابه پدیده‌ای طبیعی، به معنی نشست تدریجی یا پایین رفتن ناگهانی سطح زمین ناشی از تراکم مواد زیرسطحی بر اثر فشار لایه‌های بالایی تعریف می‌شود که به سبب‌های گوناگونی رخ می‌دهد (هو^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از علل‌های رایج وقوع این پدیده، برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی است (لی و پارک^۳، ۲۰۱۳). در مناطقی که سفره‌های آب زیرزمینی بسته دارند، به دنبال تخلیه آب‌های زیرزمینی، فشار منافذ کاهش یافته و لایه‌های رسوبی فشرده و متراکم می‌شوند که این فرایند در سطح زمین سبب کاهش ارتفاع و نشست سطح را به طور تدریجی یا ناگهانی می‌شود (پولند^۴، ۱۹۸۴؛ چن^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). پدیده فرونشست به عنوان معضلی جهانی منجر به وقوع پیامدهای محیطی زیادی همچون آسیب‌رساندن به سازه‌های بشرساخت مانند ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو، ایجاد شکاف‌هایی روی سطح زمین، تشدید سیلاب و آب‌گرفتگی و کاهش ظرفیت آبخوان‌ها برای ذخیره آب می‌شود و در نهایت خطراتی را به لحاظ اجتماعی و اقتصادی برای جوامع بشری در پی دارد (هافمن^۶ و همکاران، ۲۰۰۳؛ هولزر و گالووی^۷، ۲۰۰۵). نرخ و الگوهای مکانی فرونشست در طول زمان تغییر می‌کند؛ بنابراین اندازه‌گیری‌های دقیق و استفاده از ابزارهای پیش‌بینی‌کننده برای بهبود درک فرونشست زمین لازم است (اگلستون و پاپ^۸، ۲۰۱۳).

دوره‌های خشکسالی متعددی ناشی از گرمایش جهانی و تغییرات اقلیم در طول نیم‌قرن اخیر در منطقه خاورمیانه و غرب آسیا به وقوع پیوسته و معضلات زیست‌محیطی بسیاری را متوجه قسمت‌های مختلفی از این منطقه (آگراوالا^۹ و همکاران، ۲۰۰۱) به ویژه کشور ایران ساخته است. در این میان دو دوره خشکسالی شدید رخ داده در فاصله زمانی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ (میسون^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵) و ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ (کانویسکی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۲) شایان توجه و اهمیت است؛ از جمله نمودهای عینی تأثیرات بسیار شدید ناشی از رخداد خشکسالی‌های دوره‌ای نام‌برده در ایران، می‌توان به کاهش ریزش‌های جوی و در پی آن کاهش آب‌های سطحی در تعامل با افزایش فعالیت‌های انسانی که سبب خشکی کمابیش کامل (۹۹٪) دریاچه هامون در سال ۲۰۰۱ (راشکی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۳) و خشکی بیش از ۷۰٪ دریاچه ارومیه در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ (پنگرا^{۱۳}، ۲۰۱۲؛ مردی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره کرد. افزون بر دلایل طبیعی ناشی از تغییرات اقلیم، در سال‌های اخیر، رشد فزاینده جمعیت در تعامل با توسعه شهری، صنعتی و کشاورزی سبب افزایش تقاضا برای تأمین آب در دشت تهران شده است و پس از این، به علت استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی به منظور تأمین مصارف صنعتی، کشاورزی و آشامیدنی؛ دشت تهران به عنوان یکی از مناطق دارای رخداد فرونشست شناسایی شده است (حقیقی و معتق^{۱۵}، ۲۰۱۹).

- 1- Land Subsidence
- 2- Hu
- 3- Lee & Park
- 4- Poland
- 5- Chen
- 6- Hoffmann
- 7- Holzer & Galloway
- 8- Eggleston & Pope
- 9- Agrawala
- 10- Mason
- 11- Kaniewski
- 12- Rashki
- 13- Pengra
- 14- Mardi
- 15- Haghghi & Motagh

امروزه به‌منظور پایش و اندازه‌گیری فرونشست زمین روش‌های ژئودتیک و غیر ژئودتیک مختلفی توسعه داده شده است. ایستگاه‌های سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۱ زمینی به‌عنوان روش‌های ژئودتیک تنها اندازه‌گیری‌های دقیق و پیوسته‌ای را در نقاط محدودی از سطح زمین ارائه می‌دهند و توانایی لازم را برای تعیین وسعت و الگوهای مکانی نشست ندارند (لاناری^۲ و همکاران، ۲۰۰۷). درمقابل تکنیک تداخل‌سنجی راداری^۳ به‌مثابه یکی از روش‌های غیر ژئودتیک با توجه به مزیت‌هایی که نسبت به سایر روش‌ها دارد، در چند دهه اخیر به‌طور گسترده‌ای در زمینه مطالعات فرونشست زمین مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این رویکرد در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت مکانی بسیار بالا به‌حساب می‌آید (فرونو و سارتی^۴، ۲۰۰۰؛ تسورو^۵ و همکاران، ۲۰۰۰).

رخداد فرونشست زمین ناشی از استخراج بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق مختلفی از جهان گزارش شده (چن و همکاران، ۲۰۰۳؛ تیاتینی^۶ و همکاران، ۲۰۰۶؛ گالووی و بری^۷، ۲۰۱۱) و به‌منظور پایش و اندازه‌گیری آن از راه قابلیت‌های InSAR، نیز مطالعات گسترده‌ای در سطح جهانی صورت گرفته است (گالووی و همکاران، ۱۹۹۸؛ هافمن و همکاران، ۲۰۰۱؛ باکلی^۸ و همکاران، ۲۰۰۳؛ لاناری و همکاران، ۲۰۰۴؛ معتق و همکاران، ۲۰۰۸؛ دهقانی^۹ و همکاران، ۲۰۰۹؛ الف؛ سیگنا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۲؛ چوسارد^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۳؛ معتق و همکاران، ۲۰۱۷؛ حقیقی و معتق، ۲۰۱۹). یکی از قابلیت‌های کاربردی InSAR، تحلیل سری زمانی جابه‌جایی با استفاده از مؤلفه‌های اختلاف فاز مربوط به فاصله‌های زمانی مختلف است. در این راستا رویکردهای مختلفی توسعه داده شده است. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها، الگوریتم تحلیل سری زمانی زیرمجموعه خط مبنای کوتاه^{۱۲} است. الگوریتم SBAS براساس خط مبنای کوچک^{۱۳} برای نظارت بر تکامل زمانی تغییر شکل سطح زمین (فرونشست) توسعه داده شده است. این تکنیک بر انتخاب ترکیب مناسبی از تداخل‌نگاشت‌های^{۱۴} تفاضلی تولیدشده با جفت تصویرهای راداری استوار است که از راه جداسازی مداری کوچک (خط مبنای) به‌منظور کاهش پدیده غیر همبستگی مکانی مشخص می‌شود (براردینو^{۱۵} و همکاران، ۲۰۰۲).

در پژوهش حاضر منطقه دشتی واقع در غرب استان تهران، دربرگیرنده شهرستان‌های اسلام‌شهر، رباط‌کریم و شهریار براساس گزارش‌های مبنی بر رخداد فرونشست در این نواحی، بررسی شد. به‌طور کلی مطالعات صورت گرفته در این منطقه در خصوص پایش و برآورد فرونشست زمین به دو دسته ژئودتیک و غیر ژئودتیک قابل تفکیک هستند. درباره مطالعات ژئودتیکی، عملیات ترازیابی^{۱۶} و همچنین استفاده از شبکه ایستگاه‌های زمینی

- 1- Global Positioning Systems (GPS)
- 2- Lanari
- 3- Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)
- 4- Fruneau & Sarti
- 5- Tesaro
- 6- Teatini
- 7- Galloway & Burbey
- 8- Buckley
- 9- Dehghani
- 10- Cigna
- 11- Chaussard
- 12- Small Baseline Subset (SBAS)
- 13- Small Baseline
- 14- Interferogram
- 15- Berardino
- 16- Leveling surveys

سامانه موقعیت‌یابی جهانی قابل توجه است. در این راستا می‌توان به پژوهش‌های انجام‌شده عربی^۱ و همکاران (۲۰۰۵) به‌منظور پایش فرونشست زمین در منطقه مورد بررسی در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ از راه ترازایی و پیروزی و اسلامی^۲ (۲۰۱۷) در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ از راه نقاط پنج‌مارک سازمان نقشه‌برداری کشور اشاره کرد. همان‌طور که گفته شد؛ اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و میدانی باوجود برخورداری از دقت بالا، به‌منظور استخراج الگوهای زمانی و به‌ویژه مکانی فرونشست زمین چندان کارآمد نیستند. همان‌گونه که نصب و راه‌اندازی آن و اندازه‌گیری‌های میدانی بدین‌طریق بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است.

درخصوص مطالعات غیر ژئودتیکی می‌توان به استفاده از قابلیت‌های سنجش از دور و داده‌های ماهواره‌ای و رویکردهای مرتبط با آن؛ همچون تداخل‌سنجی راداری اشاره کرد. پژوهش‌های تداخل‌سنجی راداری انجام‌شده در منطقه مورد بررسی به‌منظور پایش و برآورد تغییرات شکل سطح و فرونشست زمین، از چهار دیدگاه قابل بررسی و تقسیم‌بندی هستند. ۱- پژوهش‌هایی که به‌منظور پایش و شناسایی الگوهای مکانی - زمانی نشست منطقه و نیز معرفی روش تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان رویکرد و ابزاری کارآمد و نوین در این زمینه انجام شده‌اند (معتق و همکاران، ۲۰۰۸؛ علیپور^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). ۲- مطالعاتی که تمرکز آن‌ها بر بررسی قابلیت‌های مجموعه داده‌های مختلف راداری برای پایش فرونشست زمین بوده است (حق‌شناس حقیقی و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۷). ۳- پژوهش‌هایی که در راستای توسعه الگوریتم و بهینه‌سازی دقت نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی جابه‌جایی زمین صورت گرفته است (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسماعیلی و معتق^۴، ۲۰۱۶). ۴- مطالعاتی که به تحلیل ارتباط بین فرونشست زمین و تغییرات عمق آب‌های زیرزمینی توجه داشته‌اند (حق‌شناس حقیقی و معتق، ۲۰۱۹). در بررسی‌های انجام‌شده درخصوص پایش فرونشست زمین در دشت غربی تهران با استفاده از سنجش از دور، باوجود نرخ قابل توجه نشست در طول زمان، به ارتباط مکانی - زمانی فرونشست و تغییرات آب زیرزمینی توجه چندانی نشده است. در واقع تمرکز غالب این مطالعات بر برآورد فرونشست با استفاده از قابلیت‌های رویکرد سنجش از دوری تداخل‌سنجی راداری بوده است و منشأ و علت اصلی معضل حادث‌شده به‌صورت کمی و خاص بررسی و تجزیه و تحلیل نشده است؛ بنابراین پژوهش حاضر بیشتر با هدف پایش و تحلیل دقیق‌تر روندهای گذشته در منطقه مورد بررسی به‌لحاظ رخداد فرونشست زمین و تغییرات آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی و اثرگذار بر رخداد آن، سازمان‌دهی شده است.

با توجه به ماهیت پویای پدیده فرونشست زمین در مقایسه با پدیده‌هایی که به‌طور ناگهانی اتفاق می‌افتند، مطالعه روندها و استخراج الگوهای به‌وقوع‌پیوسته در گذشته با استفاده از آرشیو داده‌های ماهواره‌ای، می‌تواند در درک و شناخت بهتر وضعیت فعلی و نیز اتخاذ راهکارهای مدیریتی و پیشگیرانه برای آینده کارساز واقع شود. در نوشتار پیش رو با استفاده از داده‌های SAR و به‌کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی راداری SBAS، سری زمانی پدیده جابه‌جایی و به‌طور خاص فرونشست زمین در دشت غربی استان تهران، پایش و اندازه‌گیری می‌شود. پس از استخراج الگوی رفتار مکانی - زمانی نشست منطقه، به‌طور جزئی و در مقیاس بسیار کوچک؛ سپس ارتباط و همبستگی بین سری زمانی فرونشست رخ داده و تغییرات سطح آب زیرزمینی در حریم چاه‌های برداشت آب منطقه به‌صورت تفکیک‌شده و با رویکردی کمی بررسی شده است.

1- Arabi
2- Pirouzi & Eslami
3- Alipour
4- Esmaeili & Motagh

معرفی منطقه مورد بررسی

در استان تهران به دلیل وجود تنوع ارتفاعی، تنوع پارامترهای اقلیمی همچون دما، بارش و رطوبت نسبی در مناطق مختلف استان، از فیروزکوه و دماوند گرفته تا محدوده دشت ورامین وجود دارد. براساس داده‌های بلندمدت هواشناسی، میانگین بارندگی سالانه استان ۲۴۰ میلی‌متر است که در ارتفاعات شمالی و مناطق شرقی بارندگی بیشتر و دشت‌های جنوبی و غربی سهم کمتری از بارش را به خود اختصاص می‌دهند. بیشترین بارش سالیانه ۶۰۰ میلی‌متر، در کوهپایه‌های البرز و کمترین بارش سالیانه ۶۰ میلی‌متر، در محدوده دشت ورامین با ایستگاه‌های باران‌سنجی ثبت شده است. نیمی از این بارش‌ها در فصل زمستان رخ می‌دهد و کمابیش در تابستان بارانی نمی‌بارد (سلیمانی^۱ و همکاران، ۱۳۹۷).

محدوده مورد بررسی، منطقه دشتی واقع در غرب استان تهران است که در طول جغرافیایی تقریبی بین ۵۰° تا ۵۱° ۲۰' شرقی و عرض جغرافیایی تقریبی بین ۲۵° ۳۵' تا ۳۵° ۴۵' شمالی واقع شده و دربرگیرنده شهرستان‌های اسلام‌شهر، رباط‌کریم و به‌ویژه شهریار است. به‌منظور سادگی آدرس‌دهی و ارجاعات درون‌متنی به منطقه مورد بررسی؛ از این پس برای رعایت اختصار، به آن دشت شهریار گفته می‌شود. ارتفاع منطقه به‌طور متوسط ۱۰۹۰ متر از سطح دریا است. شهرهای مهم و پرجمعیتی مانند تهران، شهریار، کرج در نزدیکی این دشت واقع شده‌اند. استان تهران طی چهل سال گذشته رشد بسیار جمعیتی را تجربه کرده است. که پیرو آن با تقاضای فزاینده برای آب به‌منظور تأمین نیازهای جمعیتی روبه‌رو شده است (حق‌شناس حقیقی و معتق، ۲۰۱۹). در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۲ تعداد چاه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی به سه‌برابر افزایش یافته و متوسط تراز آب زیرزمینی منطقه حدود دوازده متر کاهش یافته است (محمدپور^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). پوشش عمده دشت تهران زمین‌های کشاورزی است که به‌طور عمده با آب زیرزمینی آبیاری می‌شوند. شکل ۱ ترکیب رنگی طبیعی تصویر ماهواره لندست ۸ منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد که الگوی پوشش گیاهی منطقه، موقعیت چاه‌های برداشت آب و فریم تصویر انتخابی ENVISAT نیز بر روی آن مشخص شده است.

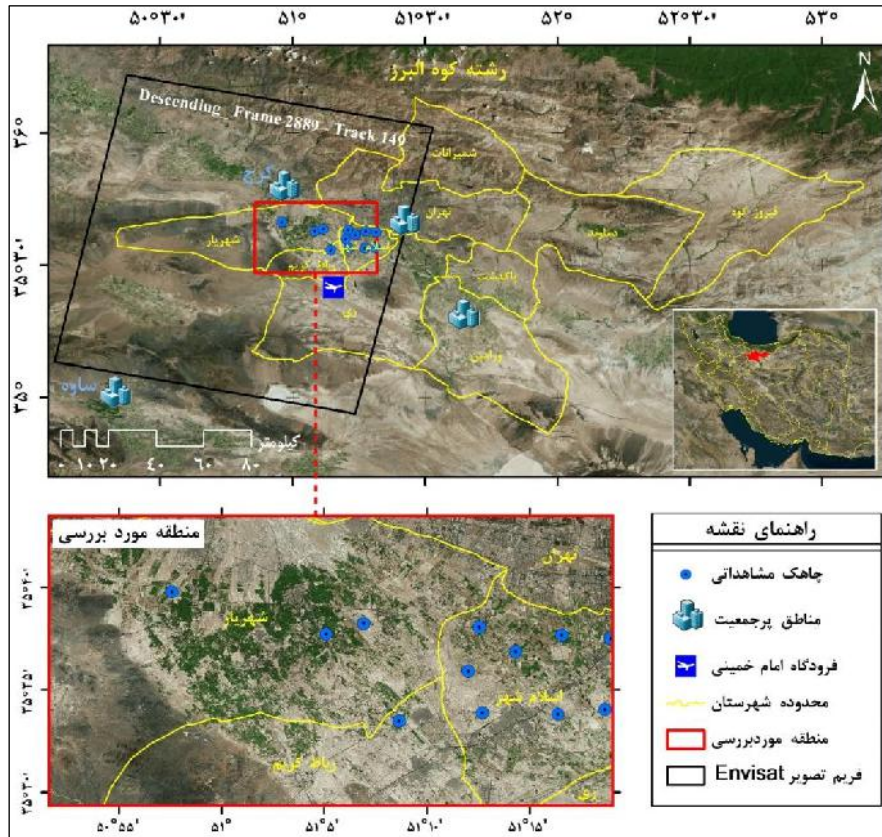
مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر به‌منظور پایش، برآورد و تحلیل سری زمانی جابه‌جایی زمین در دشت شهریار، از قابلیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. همان‌طور که در بخش مقدمه به‌تفصیل بیان شد؛ براساس بررسی‌های به‌عمل آمده، رخداد خشکسالی‌های دوره‌ای شدید در دهه اول قرن بیست‌ویکم در تعامل با فعالیت‌های انسانی در منطقه مورد بررسی، سبب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و وقوع پدیده‌هایی همچون فرونشست شده است. بنابراین دهه اول قرن حاضر به‌مثابه برهه زمانی حساسی درباره مطالعات فرونشست در این منطقه شناسایی شد. از طرفی با توجه به هدف اصلی پژوهش درخصوص بررسی دقیق ارتباط بین الگوهای مکانی - زمانی فرونشست و تغییرات آب زیرزمینی، انتخاب سری زمانی داده‌های SAR با توجه به در دسترس بودن داده‌های مشاهده‌ای عمق آب زیرزمینی تعیین شد. براساس بازه زمانی و دسترسی رایگان، تصاویر ماهواره ENVISAT به‌عنوان بهترین گزینه برای برآورد فرونشست شناسایی شد. به‌منظور دستیابی به این هدف، سری زمانی داده‌های محصول سطح یک ماهواره ENVISAT سنسور ASAR مربوط به فریم ۲۸۸۹ از مسیر نزولی شماره ۱۴۹، از سایت سازمان فضایی اروپا^۳ تهیه و به‌کار گرفته شد.

1- Soleimani

2- Mahmoudpour

3- <https://esar-ds.eo.esa.int/oads/access/>



شکل ۱. منطقه مورد بررسی - غرب استان تهران (مستطیل قرمز رنگ) و موقعیت چاهک‌های مشاهداتی آب زیرزمینی

۱- اندازه‌گیری فرونشست زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری

در ابتدا روش تداخل‌سنجی راداری از راه آنالیز تمامی تداخل‌نگاشت‌های^۱ تفاضلی ممکن با رعایت طول خط^۲ مبنای زمانی^۳ و مکانی^۴ به منظور تشخیص سیگنال‌های قابل مشاهده تغییر شکل یا جابه‌جایی زمین (به‌طور خاص فرونشست زمین)، به کار گرفته شد. در مرحله دوم، با انتخاب مجموعه‌ای از تداخل‌نگاشت‌های تولیدشده مطلوب به لحاظ خط مبنای مکانی و زمانی و استفاده از الگوریتم SBAS، سری زمانی جابه‌جایی ارزیابی شده و نقشه میانگین نرخ جابه‌جایی^۴ برای منطقه مورد بررسی، استخراج شد. همه مراحل پردازش تداخل‌سنجی از تولید تداخل‌نگاشت تا بازیابی فاز و تحلیل سری زمانی جابه‌جایی با نرم‌افزار متن‌باز GMTSAR پیاده‌سازی شده است.

۱-۱- انتخاب جفت تصویر

تجزیه و تحلیل زمانی داده‌های SAR نیازمند چندین جفت تصویر است که به لحاظ هندسی برهم منطبق باشند. در ساده‌ترین روش، تصویر مبنایی انتخاب شده و تمامی تحلیل‌های تداخل‌نگاشتی نسبت به این تصویر انجام می‌شود (فرتی^۵ و همکاران، ۲۰۰۰؛ هوپر^۶ و همکاران، ۲۰۰۴). یکی از مزیت‌های استراتژی تک‌مبنای^۷ درباره انتخاب جفت تصاویر، این است که ثبت هندسی تصاویر نسبت به تصویر مبنای به صورت مطلق است. در حالی که محدودیت

- 1- Interferogram
- 2- Temporal Baseline
- 3- Spatial Baseline
- 4- Mean Displacement Velocity
- 5- Ferretti
- 6- Hooper
- 7- Single-Master

اصلی این روش، خطّ مبنای عمودی^۱ بزرگ ناشی از تغییر در مدار گردش ماهواره و خطّ مبنای زمانی زیاد بین دو تصویر بوده که سبب ایجاد خطاهایی همچون عدم همبستگی مکانی و زمانی می‌شود. یک استراتژی جایگزین، انتخاب ترکیبی از جفت تصاویر یا گروهی از جفت تصاویر براساس کیفیت مورد انتظار در تداخل‌نگاشت‌های تولیدی است (لیونز و سندول^۲، ۲۰۰۳؛ رفیس^۳ و همکاران، ۲۰۰۴).

در نوشتار پیش رو به منظور اجرای پردازش تداخل‌سنجی از میان تصاویر SAR تهیه شده برای فریم مورد نظر، ترکیب دو از کل لحاظ شد و تمامی حالات ممکن در ارتباط با انتخاب دو تصویر از میان کلّ تصاویر مشخص شد. پس از بررسی جفت تصاویر انتخابی به لحاظ خطّ مبنای مکانی، زمانی و کوهرنس^۴، حالات بهینه‌ای از ترکیب جفت تصاویر به منظور تولید تداخل‌نگاشت‌های مطلوب مدّ نظر قرار گرفت. در حالت ایده‌آل تفکیک زمانی ۳۵ روزه برای داده‌های ENVISAT لحاظ شده است، اما در عمل به ندرت چنین تفکیک زمانی در آرشیو داده‌ها مشاهده می‌شود. در داده‌های موجود گاهی گپ‌های تا دو ساله نیز وجود دارد. این معضل سبب مقادیر کوهرنسی ضعیف بین جفت تصاویر انتخابی و بروز خطای غیر همبستگی زمانی در تداخل‌نگاشت‌های تولیدی می‌شود. بدین ترتیب برای ۲۳ تصویر موجود در بازه زمانی ۲۰۰۳/۷/۱۸ تا ۲۰۱۰/۵/۷، با لحاظ نمودن خطّ مبنای مکانی و زمانی به ترتیب کمتر از ۶۰۰ متر و حداکثر یک سال (هانسن^۵، ۲۰۰۱؛ علیپور و همکاران، ۲۰۰۸)؛ تعداد ۵۰ حالت ترکیب جفت تصویر مختلف در نظر گرفته شد که از این میان، تنها ۲۶ حالت به عنوان جفت تصاویر مطلوب به لحاظ خطّ مبنای مکانی و کوهرنس به منظور ادامه مراحل پردازش انتخاب شدند.

۱-۲- ثبت هندسی جفت تصویر

از آنجاکه تصویر مبنا و پیرو دارای هندسه‌ای کمابیش متفاوت هستند، بنابراین در قالب فرایندی با عنوان ثبت هندسی^۶ پیکسل‌ها در تصویر پیرو به منظور تأمین دقت زیرپیکسل در جهت پیکسل‌های تصویر مبنا حرکت داده شده و نمونه برداری مجدد^۷ می‌شوند. با اجرای ثبت هندسی این اطمینان حاصل می‌شود که هر پیکسل هدف زمینی در هر دو تصویر مبنا و پیرو دارای دامنه و آزیموتی به ترتیب منفرد و یکسان هستند. محاسبه اختلاف فاز دو تصویر مربوط به دو زمان مختلف و تولید تداخل‌نگاشت به طور مطلوب، به فرایند ثبت هندسی دقیق دو تصویر مورد استفاده بستگی دارد (زبکر و گلدشتاین^۸، ۱۹۸۶).

۱-۳- تولید تداخل‌نگاشت

تداخل‌نگاشت از ضرب خارجی تصویر مبنا در مجموعه توأم تصویر پیرو حاصل می‌آید. مقادیر دامنه هر دو تصویر از حاصل ضرب، ولی مقادیر فاز حاصل اختلاف فاز میان دو تصویر است. فاز تداخل‌سنجی هر پیکسل از تصویر SAR حاصل تفاوت در هر مسیر طی شده برای دو تصویر SAR نسبت به تفکیک مورد نظر است (باملر و هارتل^۹، ۱۹۹۸؛ ماسوننت و فیگل^{۱۰}، ۱۹۹۸؛ بورگمان^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۰). به طور کلی اختلاف فاز ($\Delta\varphi$) محاسبه شده بین دو

- 1- Perpendicular Baseline
- 2- Lyons & Sandwell
- 3- Refice
- 4- Coherence
- 5- Hanssen
- 6- Co-Registration / Alignment
- 7- Resample
- 8- Zebker & Goldstein
- 9- Bamler & Hartl
- 10- Massonnet & Feigl
- 11- Bürgmann

تصویر شامل پنج منبع مختلف فاز به شرح رابطه ۱ است:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{earth flat}} + \Delta\varphi_{\text{elevation}} + \Delta\varphi_{\text{displacement}} + \Delta\varphi_{\text{atmosphere}} + \Delta\varphi_{\text{noise}} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن $\Delta\varphi_{\text{earth flat}}$ ، فاز زمین مسطح نامیده می‌شود و ناشی از انحنای سطح زمین^۱ است. $\Delta\varphi_{\text{elevation}}$ ، ناشی از تأثیر توپوگرافی مرجع روی فاز تداخل‌سنجی؛ $\Delta\varphi_{\text{displacement}}$ ، ناشی از تأثیر تغییر شکل سطح روی فاز تداخل‌سنجی (تغییر فاصله مایل بین حس‌گر^۲ و هدف در فاصله زمانی بین دو برداشت)؛ $\Delta\varphi_{\text{atmosphere}}$ ، تأثیر اتمسفر روی فاز تداخل‌سنجی (این مؤلفه از تغییرات رطوبت، دما و فشار اتمسفر بین دو برداشت تصویر به وجود می‌آید) و $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ ، نوفه فاز ایجاد شده که با تغییرات موقت پخش‌کننده‌ها^۳، زاویه دید متفاوت و پخش حجمی حاصل می‌شود (رائوکولز^۴ و همکاران، ۲۰۰۷).

در مرحله ساخت تداخل‌نگاشت، فاز زمین مسطح با استفاده از اطلاعات فراداده و مداری متناظر با تصاویر SAR مورد استفاده، از سایر سیگنال‌ها برآورد شده و سپس از تداخل‌نگاشت حاصل تفریق می‌شود. فاز توپوگرافی مرجع نیز با استفاده از یک مدل ارتفاعی رقومی^۵، از فاز تداخل‌سنجی کسر شد (ماسوننت و همکاران، ۱۹۹۳). بدین منظور از مدل ارتفاعی رقومی با دقت مکانی ۳۰ متر مستخرج از ماهواره SRTM^۶ استفاده شد. تصحیح فاز زمین مسطح و توپوگرافی مرجع در مرحله مسطح‌سازی تداخل‌نگاشت^۷ صورت می‌گیرد.

تأخیر اتمسفر یکی از منابع نوفه‌های شناخته شده در پردازش تداخل‌سنجی است که به لحاظ مکانی و زمانی در طول مسیر انتشار امواج رادار متفاوت است. در تداخل‌سنجی راداری دوگذری، تأخیر اتمسفر دارای تأثیر آینه‌ای بر نتایج است و این مهم در سیستم‌های با گذر- تکراری بسیار مهم است (زبکر و همکاران، ۱۹۹۴؛ رزن^۸ و همکاران، ۲۰۰۰). به منظور کاهش اثر اتمسفر می‌توان از ترکیب یک‌سری فیلترهای پایین‌گذر مکانی و بالاگذر زمانی (که روی سری زمانی جابه‌جایی اعمال می‌شود) استفاده کرد (گلدشتاین و ورنر^۹، ۱۹۹۸؛ باران^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۳). از طرفی پایین بودن همبستگی سبب نامناسب شدن الگوی تداخل‌سنجی می‌شود. به منظور بازیابی مناسب فاز، نیاز است که نسبت سیگنال به نویز^{۱۱} از راه اعمال فیلتر فاز افزایش یابد. در پژوهش حاضر از فیلترهای پایین‌گذر، فیلتر طیفی (طول موج) گاوسی ۲۰۰ متر و یک فیلتر طیفی تطبیقی^{۱۲} براساس الگوریتم فیلتر گلدشتاین اصلاح شده (گلدشتاین و ورنر، ۱۹۹۸) برای کاهش نویز و تصحیح اثر اتمسفر از تداخل‌نگاشت‌های تولیدی، استفاده شد.

۱-۴- بازیابی فاز

در تجزیه و تحلیل تداخل‌سنجی، فاز مشاهده شده اندازه‌گیری تکراری‌ای است که به‌طور کلی به‌عنوان نماینده‌ای از برخی کمیت‌های فیزیکی سطح همچون تغییر شکل یا توپوگرافی در نظر گرفته می‌شود (داوسون^{۱۳}، ۲۰۰۸).

- 1- Earth Curvature
- 2- Sensor
- 3- Scatterer
- 4- Raucoules
- 5- Digital Elevation Model (DEM)
- 6- Shuttle Radar Topography Mission
- 7- Interferogram Flattening
- 8- Rosen
- 9- Werner
- 10- Baran
- 11- Signal to Noise Ratio (SNR)
- 12- Adaptive Spectral Filtering
- 13- Dawson

در واقع اطلاعات فاز پیوسته در فاز پیچیده شده^۱ گسسته‌ای نمونه برداری می‌شود. به این صورت که فاز مطلق در فاصله بین $-\pi$ تا $+\pi$ بیان شده است که این فاز ابهام دارد؛ به بیان ساده‌تر، از آنجاکه ظرفیت هر فاز تنها به میزان 2π است؛ بنابراین در تداخل نگاشت تولید شده مقادیر اختلاف فاز بیشتر از این عدد، دوباره به صورت 2π نوشته شده و امکان درج رقم نهایی اختلاف فاز میسر نیست؛ بنابراین برای برخی کاربردهای خاص همچون مطالعات تغییر شکل زمین نیاز است مقادیر بزرگ‌تر از 2π به صورت پیوسته بازیابی شود. فرایند تبدیل مقادیر گسسته و مبهم فاز مشاهده شده به مقادیر پیوسته و مطلق، در اصطلاح بازیابی فاز^۲ نام دارد (ایتو^۳، ۱۹۸۲؛ گیگلیا و پری^۴، ۱۹۹۸).

۱-۵- زمین مرجع کردن

در این مرحله تمامی تداخل نگاشت‌های باز شده، از مختصات راداری (برد مایل/آزیموت) به مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) انتقال داده می‌شوند. این فرایند در اصطلاح زمین مرجع سازی^۵ نام دارد (سندول و همکاران، ۲۰۱۱). بدین منظور تمامی تداخل نگاشت‌های پردازش شده، با ابعاد پیکسل مربعی کمابیش ۵۰ متر به مختصات جغرافیایی نمونه برداری مجدد شدند.

۱-۶- تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل سنجی

الگوریتم SBAS جهت غلبه بر معضلات مربوط به غیر همبستگی داده‌های InSAR توسعه داده شده است. این رویکرد، تأثیرات ناشی از غیر همبستگی مکانی و زمانی بر برآوردهای تغییر شکل را تنها با به کارگیری تداخل نگاشت‌های بسیار همبسته، کاهش می‌دهد. غیر همبستگی مکانی ناشی از جداسازی فیزیکی (خط مبنای مکانی) بین موقعیت دو آنتن SAR در دو گذر ماهواره است که برای کاهش این خطا، جفت تصویر در محدوده خط مبنای مکانی بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر می‌تواند لحاظ شود (هانسن، ۲۰۰۱). در مقابل، غیر همبستگی زمانی^۶ ناشی از عدم تشابه خواص بازپراکنشی اشیاء موجود در زمین در فاصله زمانی بین دو تاریخ برداشت تصویر است. از جمله مهم‌ترین اشیاء زمینی تشدیدکننده این نوع خطا می‌توان به سطح آب، تغییرات و رشد پوشش گیاهی اشاره کرد. بدین منظور تداخل نگاشت‌ها به طور معمول از ترکیب جفت تصاویری حاصل می‌شوند که دارای خط مبنای مکانی (به طور معمول کمتر از ۲۰۰ متر) و زمانی کوچکی هستند. الگوریتم SBAS به طور کلی بر اساس قاعده پیکسل به پیکسل، از طریق رابطه ۲ بر روی تداخل نگاشت‌های باز شده پیاده سازی می‌شود (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\left(T \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda r \sin \theta} \right) \left(h_c \right) = (\delta \phi) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن T : بیانگر ماتریسی از فاصله‌های زمانی مرجع، V : بردار میانگین سرعت در راستای خط دید برای یک پیکسل بین هر مرحله زمانی، h_c : سیگنال توپوگرافی باقیمانده، $\delta \phi$: بردار مشاهدات مربوط به تغییرات فاز باز شده، λ : طول موج رادار، r : فاصله مایل بین حس گر رادار تا هدف زمینی و θ : زاویه فرودی است. این روش تضمین نمی‌کند که داده‌ها در تمام مراحل فاصله‌های زمانی در دسترس باشند و رابطه ۲ به طور کلی با استفاده از روش

- 1- Wrapped
- 2- Phase Unwrapping
- 3- Itoh
- 4- Ghiglia & Pritt
- 5- Geocoding
- 6- Spatial Decorrelation
- 7- Temporal Decorrelation

تجزیه مقادیر منفرد^۱ حل می‌شود. این روش، راه‌حل حداقل کمترین مربعات^۲ را ارائه می‌دهد. هدف اصلی در تحلیل سری زمانی، وارون کردن تداخل‌نگاشت‌ها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های دریافت تصاویر با استفاده از روش کمترین مربعات است. با حل کمترین مربعات رابطه^۲، می‌توان مقدار فاز مربوط به هر تصویر راداری را برآورد کرد. مقدار فاز اولین تصویر صفر در نظر گرفته می‌شود. رویکرد کلی الگوریتم SBAS در شکل ۲ نشان داده شده است.

در مطالعه حاضر، به منظور تحلیل سری زمانی فرونشست زمین، الگوریتم SBAS براساس تئوری شرح داده شده در خصوص آن، به کار گرفته شد. برای به حداقل رسانیدن اثر عدم همبستگی زمانی و مکانی، تداخل‌نگاشت‌های تولیدشده با خط مبنای زمانی و مکانی کوتاه استفاده شدند. با اعمال ضریب $1/4\pi$ به تمام تداخل‌نگاشت‌ها، فاز تداخل‌نگاشتی به میزان جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل می‌شود (λ بیانگر طول موج رادار است). پس از اعمال این ضریب، مقادیر منفی در تداخل‌نگاشت‌ها بیانگر سیگنال‌های فرونشست^۳ و مقادیر مثبت معرف سیگنال‌های بالا آمدگی^۴ هستند. با توجه به زاویه دید مایل کوچک ماهواره (کمابیش ۲۳ درجه)، بنابراین ضمن صرف نظر از مؤلفه جابه‌جایی افقی، می‌توان بیشترین بخش سیگنال‌های تغییر شکل و جابه‌جایی زمین را به مثابه مؤلفه عمودی جابه‌جایی (فرونشست زمین) در نظر گرفت (دهقانی و همکاران، ۲۰۰۹ ب).

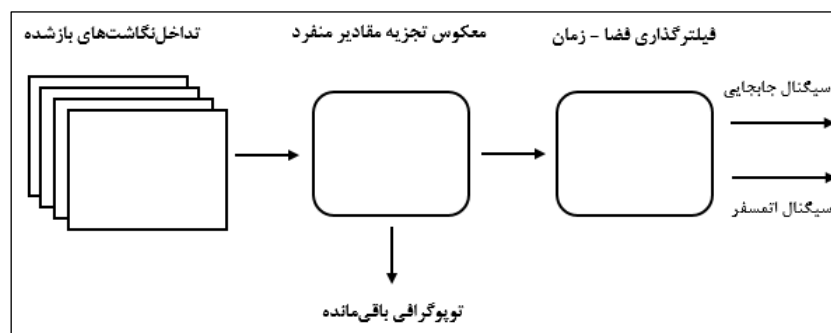
۲- تغییرات آب زیرزمینی

پس از برآورد فرونشست زمین، به منظور بررسی تغییرات آب زیرزمینی منطقه و نیز تحلیل ارتباط بین رخداد فرونشست و برداشت آب زیرزمینی، داده‌های سری زمانی ماهیانه تراز آب زیرزمینی منطقه تهیه شدند. این داده‌ها مربوط به تعداد دوازده حلقه چاهک مشاهداتی برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ میلادی است که از پراکنش مناسبی در سطح منطقه مورد بررسی برخوردار هستند. در شکل ۱، موقعیت و پراکنش مکانی چاهک‌های مشاهداتی در منطقه مورد بررسی قابل مشاهده هستند.

نتایج

۱- برآورد فرونشست زمین

نتایج حاصل از به کارگیری رویکرد تداخل‌سنجی راداری، نشان‌دهنده رخداد فرونشست در ناحیه شرق شهرستان شهریار و غرب شهرستان اسلام‌شهر با نرخ متوسط ۱۰- سانتی‌متر در سال است؛ همچنین حداکثر نرخ فرونشست در این منطقه ۲۷- سانتی‌متر در سال برآورد شده است.

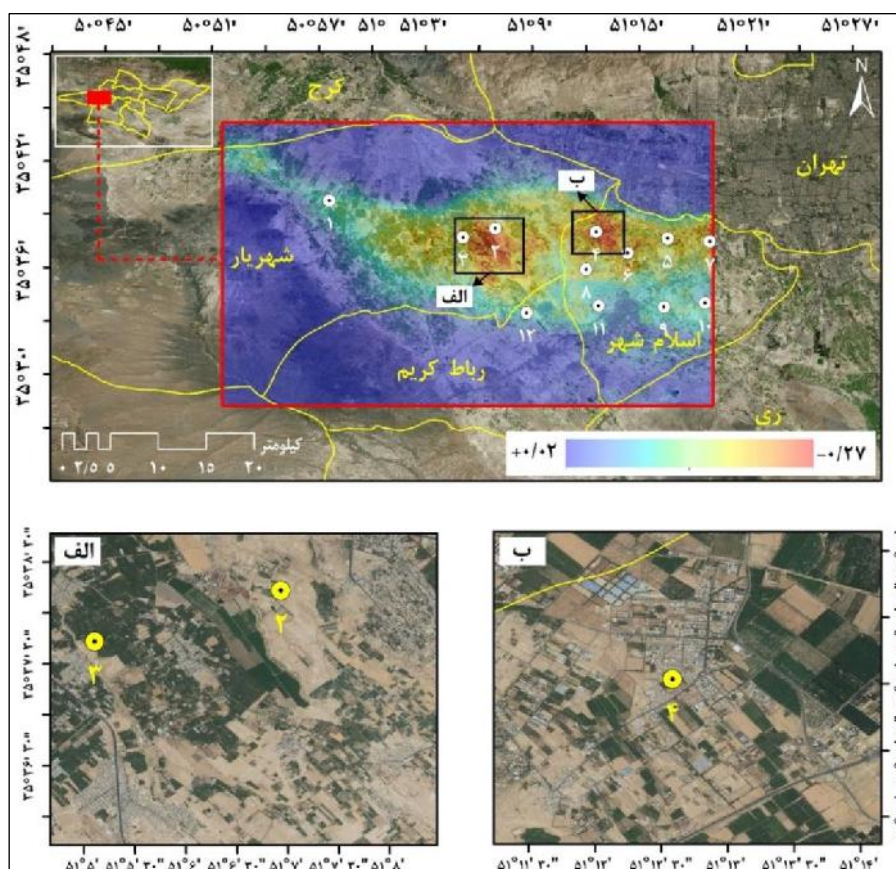


شکل ۲. منطق کلی الگوریتم SBAS (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲)

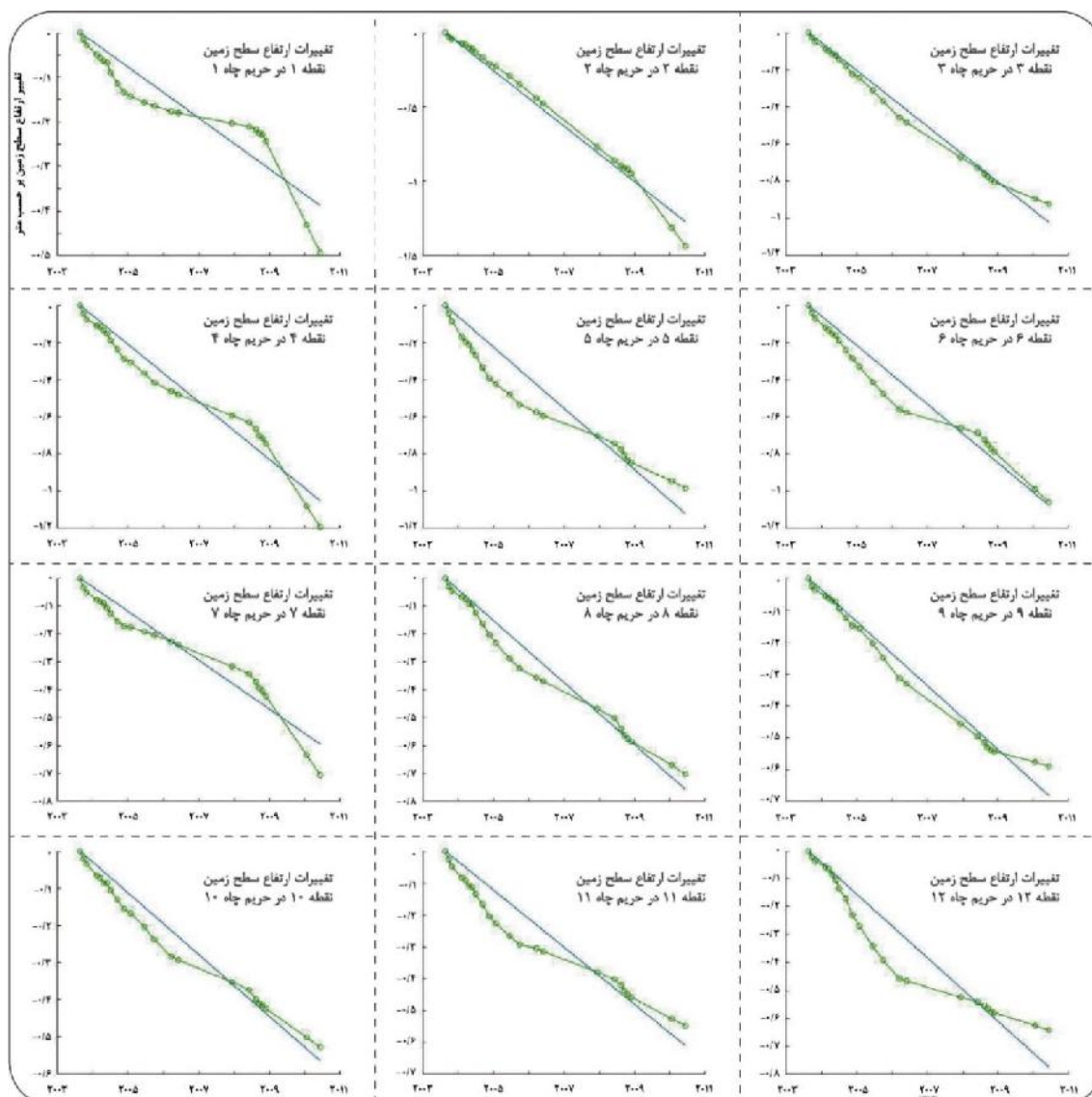
- 1- Singular Value Decomposition (SVD)
- 2- Minimum-Norm Least Squares
- 3- Downlift
- 4- Uplift

بررسی تصاویر با رزولوشن بالای گوگل ارث^۱ مطابق شکل ۳ نشان داد الگوی مکانی نشست در منطقه مورد بررسی، بیشتر منطبق بر زمین‌های کشاورزی است که این زمین‌ها به‌طور عمده با استفاده از آب زیرزمینی آبیاری می‌شوند. به‌طور کلی می‌توان این‌گونه استنباط کرد که الگوی فرونشست استخراج‌شده، منطبق بر سیستم آبخوان منطقه است که پیرو استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی از آن؛ به‌طور پیوسته در نشست تدریجی واقع شده است. در الگوی مکانی قابل مشاهده در شکل ۳؛ افزون بر زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی نیز قرار دارد؛ اما سیگنال‌های قابل توجه و قوی نشست در سری زمانی مورد بررسی، به‌طور عمده منطبق بر زمین‌های کشاورزی هستند. همان‌طور که در نقشه متوسط نرخ جابه‌جایی قابل مشاهده است؛ بیشترین نشست حادث‌شده در سری زمانی مربوط به دشت شهریار واقع در حوالی چاهک‌های مشاهداتی شماره دو و سه (محدوده الف در شکل ۳) و نواحی غرب و شمال غربی شهرستان اسلام‌شهر واقع در محدوده چاهک شماره چهار (محدوده ب در شکل ۳) است.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر، سری زمانی سیگنال‌های فرونشست در دوازده نقطه واقع در حریم چاهک‌های مشاهداتی برداشت آب زیرزمینی تحلیل شدند. به‌طور کلی میزان کل فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در محدوده این نقاط، معادل نرخ تجمعی ۰/۵ تا ۱/۵ متر است (شکل ۴). نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی با استفاده از الگوریتم SBAS نشان داد فرونشست در بازه زمانی پیش از ۲۰۰۵ با نرخی سریع‌تر و شدیدتر از سال‌های بعد از آن اتفاق افتاده است.



شکل ۳. نقشه متوسط نرخ سالیانه جابه‌جایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره (برحسب متر در سال) حاصل از تحلیل سری زمانی جابه‌جایی زمین در منطقه غرب استان تهران با استفاده از الگوریتم SBAS

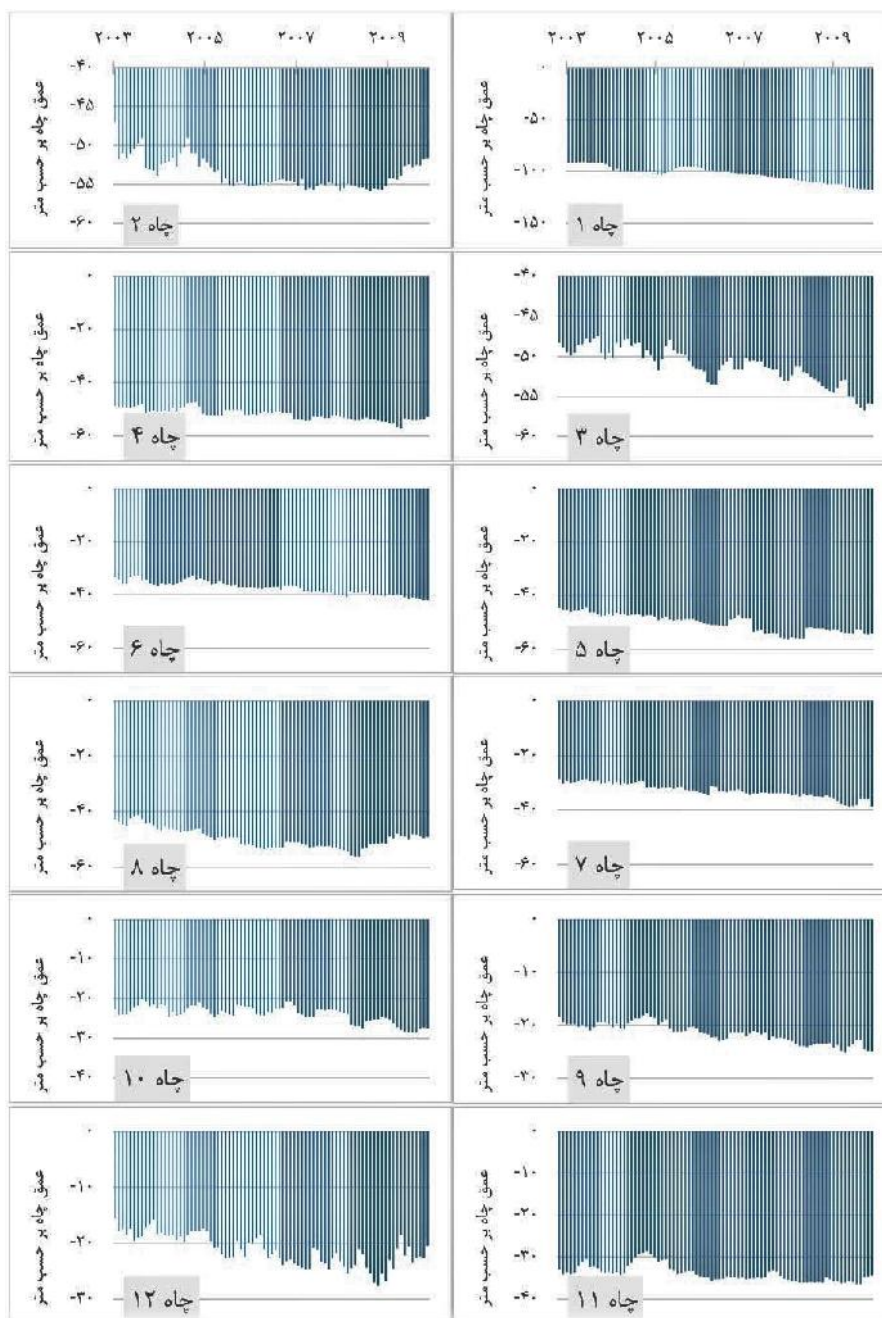


شکل ۴. تغییرات ارتفاع سطح زمین در حریم دوازده چاهک مشاهداتی - نقاط و خطوط منحنی نشان‌دهنده ارتفاع سطح زمین اندازه‌گیری شده به وسیله پردازش تداخل‌سنجی راداری و خط مستقیم رگرسیون آن است. (بازه زمانی ۲۰۰۳/۷/۱۸ تا ۲۰۱۰/۵/۷)

۲- تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی

داده‌های مربوط به سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ به‌طور کلی نشان‌دهنده افت تراز آب‌های زیرزمینی است. به سبب شیب و ارتفاع منطقه، چاه‌هایی که در قسمت شمالی ناحیه قرار دارند؛ عمق بیشتری نسبت به چاه‌های واقع در نواحی جنوبی دارند؛ همچنین روند کاهش سطح آب در این منطقه همیشه نزولی نبوده و گاه در بعضی مقاطع زمانی سطح آب نیز به‌صورت محدود افزایش داشته است.

نتایج نشان می‌دهد کاهش سطح آب در مناطق شمالی و غربی منطقه، نسبت به مناطق جنوبی و شرقی به‌شکل شدیدتری رخ داده است. به‌طوری که چاهک شماره یک، هفده متر افت سطح آب را در بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهد. درحالی که در مناطق جنوبی افت سطح آب زیرزمینی در حدود چهار تا هشت متر در بازه زمانی مورد نظر دیده می‌شود. شکل ۵ تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در دوازده چاهک مشاهداتی را نسبت به سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا اواسط ۲۰۱۰ نشان می‌دهد.

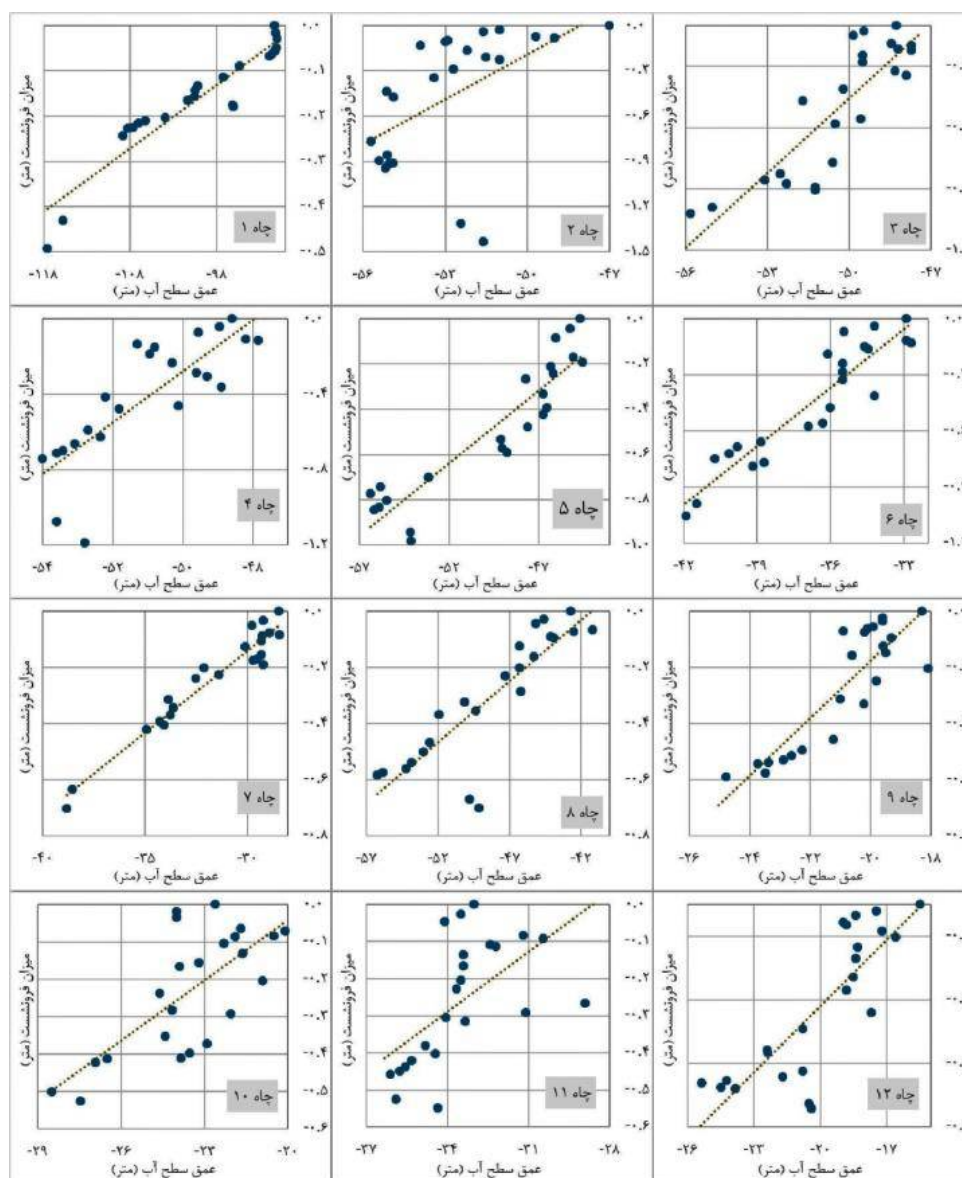


شکل ۵. سطح آب‌های زیرزمینی در ۱۲ چاهک مشاهداتی انتخابی نسبت به سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا اواخر ۲۰۱۰

۳- ارتباط سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست

به‌طور کلی نتایج حاصل از تحلیل همبستگی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست زمین، نشانگر وجود ارتباط و وابستگی زیاد رخداد فرونشست به تغییرات تراز آب زیرزمینی با تخمینی معادل ۸۹/۴۵٪ است. شکل ۶ میزان همبستگی تغییرات سطح آب زیرزمینی در هریک از چاهک‌ها و میزان فرونشست در حریم چاه مربوطه را به‌طور جداگانه نشان می‌دهد. کمترین میزان همبستگی در چاه شماره دو رخ داده که برابر با ۵۲/۱۱٪ است. درمقابل، بیشترین میزان همبستگی در چاه شماره هفت رخ داده که برابر با ۹۶/۹۹٪ است. تفاوت میزان همبستگی برآوردشده بین عمق آب چاه‌های مشاهداتی و فرونشست، ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، نوع خاک و تأخیر زمانی رخداد فرونشست به‌سبب برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی است. در برخی مناطق به‌علت دلایل

گفته شده و همچنین ضخامت رسوبات ریزدانه و قابلیت هدایت هیدرولیکی اندک این رسوبات؛ گاه ممکن است تأخیر زمانی ای بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست وجود داشته باشد؛ بنابراین همواره نمی توان رابطه خطی ای بین افت سطح آب زیرزمینی و نشست سطح زمین متصور شد (حقیقت مهر^۱ و همکاران، ۱۳۹۱). این موضوع در خصوص چاهک های مشاهداتی شماره دو و یازده صدق می کند. براساس شکل ۵، روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در دو چاهک نام برده نوسانات بیشتری را نسبت به سایر چاهک ها در سری زمانی نشان می دهند. با توجه به نمودارهای سری زمانی تولید شده برای دو پارامتر مورد بررسی در نوشتار پیش رو، پس از بررسی نرخ کلی نشست سطح زمین و همچنین نرخ کلی افت سطح تراز آب زیرزمینی در محدوده تمامی چاهک های مشاهداتی، می توان این گونه بیان کرد که به طور متوسط به ازای هر یک متر افت سطح آب زیرزمینی، بین ۵ تا ۱۲ سانتی متر فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است.



شکل ۶. نمودار تحلیل همبستگی بین میزان فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوازده چاهک مشاهداتی (بازه زمانی

۲۰۰۳/۷/۱۸ تا ۲۰۱۰/۵/۷)

بحث

روش تداخل‌سنجی راداری در پژوهش‌های بسیاری در مناطق مختلف جهان بارها استفاده شده و در دقت و کارایی این روش به‌منظور برآورد فرونشست زمین تردیدی نیست. با این وجود، نویزهای ناشی از تأثیر اتمسفر، توپوگرافی باقی‌مانده (ناشی از حذف ناموفق سیگنال‌های توپوگرافی مرجع از تداخل‌نگاشت‌های تولیدی) و همچنین تأثیر پدیده‌های پویا مانند پوشش گیاهی بر خصوصیات بازپراکنشی^۱ سطح، سبب می‌شود نتایج با مقداری خطا همراه باشند. در ضمن به‌کارگیری مدل‌های مختلف تداخل‌سنجی راداری به‌منظور برآورد فرونشست ممکن است به نتایج یکسانی منجر نشود؛ زیرا اصول و مبانی هر روشی بر فرضیه‌های مختلفی دلالت دارد. مقایسه نتایج این پژوهش با مدل و نتیجه بررسی پژوهشگران دیگر میزان اعتمادپذیری و دلایل تفاوت نتایج را بهتر آشکار می‌سازد.

براساس بررسی صورت‌گرفته، عربی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از ترازایی زمینی یکی از نخستین مطالعات در خصوص پایش فرونشست زمین در دشت غربی تهران را انجام داده‌اند. آن‌ها حداکثر نرخ فرونشست را برای این منطقه حدود ۲۰ سانتی‌متر در سال برای بازه زمانی شش‌ساله (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰) گزارش کرده‌اند. با توجه به دوره‌های شدید خشکسالی رخ‌داده از سال ۱۹۹۹ به بعد و نیز گسترش کشاورزی و رشد فزاینده جمعیت در منطقه مورد بررسی که براساس شکل ۵ برداشت بی‌رویه و در نتیجه روند نزولی سطح آب زیرزمینی را در منطقه به‌همراه داشته است؛ بنابراین اختلاف نرخی معادل حدود ۷ سانتی‌متر در سال در روند فرونشست منطقه در مقایسه با دهه پایانی قرن بیستم منطقی به‌نظر می‌رسد. نظر به دقت اثبات‌شده و اعتمادپذیری رویکرد تداخل‌سنجی راداری که در مطالعات متعددی در مناطق مختلف صورت پذیرفته است (گالووی و همکاران، ۱۹۹۸؛ براردینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ باکلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ دهقانی و همکاران، ۲۰۰۹؛ ب؛ چوسارد و همکاران، ۲۰۱۳) و با تکیه بر نتایج حاصل از پردازش تداخل‌سنجی در این مطالعه، می‌توان رخداد فرونشست و همچنین افزایش در نرخ و سرعت فرونشست در منطقه مورد بررسی را ناشی از استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در مقایسه با دهه پیش استنباط کرد.

طبق نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی جابه‌جایی صورت‌گرفته به‌وسیله علیپور و همکاران (۲۰۰۸)، حداکثر میزان تجمعی نشست در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از داده‌های مسیر نزولی ENVISAT برای منطقه حاضر، ۶۰ سانتی‌متر (معادل ۳۰ سانتی‌متر در سال) برآورد شده است. دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) نیز با تجزیه و تحلیل سری زمانی تصاویر مسیر صعودی و نزولی ENVISAT؛ حداکثر میزان فرونشست منطقه را برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹، ۲۵/۶ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. در پژوهشی دیگر حق‌شناس - حقیقی و معتق (۲۰۱۸) با استفاده از مجموعه داده‌های مختلف SAR حداکثر نرخ فرونشست منطقه را در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷، ۲۵ سانتی‌متر در سال اندازه‌گیری کرده‌اند. به‌طور کلی می‌توان این‌گونه بیان داشت که الگو و میزان فرونشست برآوردشده در پژوهش حاضر با اختلاف ناچیزی (حدود ۱/۴ سانتی‌متر)، بسیار نزدیک به نتایج پژوهش دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) است. که در مقایسه با نتایج کار علیپور و همکاران (۲۰۰۸) این اختلاف بیشتر و حدود دو برابر (۳ سانتی‌متر) است. در هم‌سنجی با کار حق‌شناس - حقیقی و معتق (۲۰۱۳) با وجود وجود اختلاف برآوردی معادل حدود ۲ سانتی‌متر، اما الگوی مکانی نشست استخراج‌شده کمابیش یکسان است و محدودهای مکانی شناسایی شده دارای بیشترین رخداد فرونشست، در پژوهش حاضر نیز مشاهده شده‌اند. تشابه بیشتر نتایج نوشتار پیش رو با کار دهقانی، به‌دلیل اختلاف کمتر در بازه زمانی مورد بررسی و نیز بهره‌گیری از داده‌های راداری با عرض

برداشت و زاویه فرودی یکسان است. از طرفی دلیل وجود اختلافات جزئی در نتایج، می‌تواند ناشی از نوع الگوریتم و مجموعه داده‌های استفاده شده برای تحلیل سری زمانی باشد. همگرایی نتایج پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش دهقانی، بیانگر آن است که میزان برآورد فرونشست به دو روش استفاده از تصاویر مسیر نزولی به تنهایی یا ترکیب تصاویر مسیر نزولی و صعودی نتایج کمابیش مشابهی در پی خواهد داشت؛ بنابراین تنها استفاده از تصاویر مسیر نزولی برای برآورد فرونشست دقت کافی و لازم را دارد.

پیروزی و اسلامی (۲۰۱۷) فرونشست زمین در غرب استان تهران را با استفاده از نقاط بنچ مارک سازمان نقشه برداری بررسی کرده‌اند. در پژوهش حاضر میزان حداکثر کل کاهش ارتفاع سطح و فرونشست زمین در برخی نواحی از منطقه مورد بررسی در دو دوره زمانی دهساله از ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۱ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ به ترتیب حدود ۱/۲۵ و ۲ متر برآورد شده است. نواحی یادشده به لحاظ مکانی کمابیش منطبق بر مناطق با حداکثر فرونشست شناسایی شده در پژوهش حاضر هستند (محدوده‌های الف و ب در شکل ۳). در مطالعه پیروزی و اسلامی، متوسط نرخ نشست مناطق نام برده در دوره دهساله اول و دوم به ترتیب برابر با ۱۲/۵ و ۲۰ سانتی‌متر در سال است. این مهم بیانگر افزایش سرعت و نرخ نشست در منطقه مورد بررسی در طول دهه پایانی قرن بیستم و دهه اول قرن ۲۱ است. با توجه به نمودار سری زمانی تغییرات عمق آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی منطقه (شکل ۵) که در غالب چاهک‌ها روند افزایشی در عمق آب ناشی از برداشت بی‌رویه به‌طور کامل قابل مشاهده است و از طرفی همبستگی بالای عمق آب چاهک‌ها با رخداد فرونشست در منطقه (شکل ۶) نشان‌دهنده ارتباط بین عمق آب زیرزمینی و فرونشست است؛ بنابراین بیان این استدلال که افزایش سرعت نشست زمین به سبب برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی اتفاق افتاده است، منطقی به نظر می‌رسد.

در مقابل میزان حداکثر کل فرونشست حادث شده در منطقه مورد بررسی (برای نواحی متناظر با پژوهش پیروزی و اسلامی) از راه رویکرد به کار گرفته شده برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در پژوهش حاضر حدود ۱/۵ متر برآورد شده که برابر با نرخ متوسط ۲۱/۴ سانتی‌متر در سال است. تفاوت مقدار برآوردی معادل ۱/۴ سانتی‌متر در سال ناشی از واگرایی نتایج نیست، بلکه به علت تفاوت بازه زمانی مورد بررسی (اختلاف کمابیش سه‌ساله) است. بازه زمانی مورد نظر در پژوهش حاضر از ۲۰۰۳/۷/۱۸ تا ۲۰۱۰/۵/۷ برابر با ۸۳ ماه و به عبارتی کمابیش هفت سال است. در صورتی که بازه زمانی مطالعه شده پیروزی و اسلامی (۲۰۱۷) ده‌ساله است. شایان ذکر است که با فرض یکنواخت بودن روند فرونشست، نسبت‌گیری زمانی نشان می‌دهد مقدار فرونشست در بازه زمانی مشترک، با اختلافی حدود ۱۰ سانتی‌متر؛ مقادیری نزدیک به هم خواهد بود. صرف نظر از اختلافات جزئی، نزدیکی مقادیر فرونشست زمین برآورد شده از راه رویکرد تداخل‌سنجی استفاده شده در نوشتار پیش رو با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط بنچ مارک‌ها نشان می‌دهد که روش تداخل‌سنجی راداری در این منطقه نتایج کمابیش قابل اتکایی به همراه دارد و به واقعیت زمینی نزدیک است.

همان‌طور که در ابتدای بحث بدان پرداخته شد؛ تقدّم و تأخّر فاز ناشی از تأثیر اتمسفر و همچنین تغییرات خصوصیات بازپراکنشی سطح ناشی از عواملی همچون تغییر وضعیت رطوبتی و پوشش گیاهی سطح، دقت برآورد سیگنال‌های جابه‌جایی زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. غیر همبستگی مکانی و زمانی نمونه‌هایی از خطاهای شایع در پردازش تداخل‌سنجی هستند که ناشی از دلایل مشروح رخ می‌دهند. در پردازش داده‌های ENVISAT برای منطقه مورد بررسی در پژوهش حاضر، به دلیل عدم برخورداری از خط مبنای مکانی و زمانی مطلوب؛ دو نوع خطای نام برده در برخی تداخل‌نگاشت‌های تفاضلی مشاهده شد؛ از این‌رو، وجود اختلافات برآورد جزئی مدل به کار گرفته شده در نوشتار پیش رو با اندازه‌گیری‌های زمینی فرونشست می‌تواند ناشی

از عوامل پیش‌گفته باشد. در این راستا توصیه می‌شود که از داده‌های راداری با تفکیک مکانی و زمانی کوتاه و مطلوب همچون داده‌های ماهواره Sentinel-1 A/B استفاده شود؛ همچنین به منظور انجام مطالعات آتی در مقیاس کوچک‌تر، با توجه به کاربری غالب پوشش گیاهی مرتعی و کشاورزی در منطقه مورد بررسی، همان‌طور که دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) نیز به این موضوع پرداخته‌اند، به منظور جلوگیری از خطاهای ناشی از غیر همبستگی زمانی (به دلیل تغییرات و نوسانات پوشش گیاهی سطح در گذر زمان و تاثیر آن بر مقادیر فاز تصاویر راداری) می‌توان از روش‌های تحلیل سری زمانی جابه‌جایی مبتنی بر پراکنده‌ساز ثابت^۱ بهره گرفت.

نتیجه‌گیری

در نوشتار پیش رو پس از شناخت ماهیت پدیده فرونشست زمین، براساس مروری که بر منابع پیشین به عمل آمد، سری زمانی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در منطقه غرب استان تهران برآورد شد؛ سپس ارتباط میان میزان فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه بررسی شد. نتایج حاصل از تحلیل آماری دومتغیره صورت گرفته، نشان‌دهنده وجود همبستگی بالا (به‌طور متوسط $0.89/45$) بین رخداد فرونشست و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی است؛ همچنین انطباق الگوهای مکانی فرونشست بر زمین‌های کشاورزی منطقه بیانگر وجود ارتباط بین رخداد فرونشست و نوع کاربری زمین است. میزان کل فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در محدوده چاه‌های استخراج آب در این منطقه، معادل نرخ 0.5 تا 1.5 متر برآورد شده است که وضعیت بحرانی این منطقه را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در پژوهش حاضر با نگاهی دقیق‌تر، ارتباط فرونشست با عمق آب چاه‌های مشاهداتی به صورت جداگانه بررسی شد. با توجه به مشاهده الگوهای همبستگی غیر خطی در روند تغییرات تراز آب زیرزمینی و فرونشست منطقه در محدوده برخی چاهک‌های مشاهداتی (چاهک شماره دو و یازده)، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی ساختار زمین‌شناسی منطقه در حریم هر چاه به‌طور جداگانه بررسی و با میزان فرونشست مقایسه شود. اجرای طرح‌های مختلف تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی متناسب با شرایط منطقه برای جلوگیری از فرونشست بیشتر و آسیب‌های احتمالی ناشی از این معضل از جمله تخریب برگشت‌ناپذیر آبخوان منطقه پیشنهاد می‌شوند.

منابع

- حقیقت‌مهر، پریسا؛ ولدان‌زوج، محمدجواد؛ تاجیک، رضا؛ جباری، سعید؛ صاحبی، محمودرضا؛ اسلامی، رضا؛ گنجیان، مصطفی؛ دهقانی، مریم (۱۳۹۱) تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یابی جهانی. علوم زمین، ۲۲ (۸۵)، ۱۰۵-۱۱۴.
- سلیمانی، مسعود؛ حمزه، سعید؛ پاپی، رامین (۱۳۹۷). پتانسیل‌یابی اراضی مستعد کشت گردو در استان تهران با روش Fuzzy AHP. نشریه حفاظت منابع آب‌وخاک، ۱ (۱)، ۴۹-۷۲.

References

- Agrawala, S., Barlow, M., Cullen, H. & Lyon, B. (2001). The drought and humanitarian crisis in central and southwest Asia: A climate perspective. *International Research Institute for Climate Prediction*. <https://doi.org/10.7916/D8NZ8FHQ>.
- Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M. A. & Walter, T. R. (2008). InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. *2008 Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas, track 414*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/USEREST.2008.4740370>.
- 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.
- Bamler, R. & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14 (4), R1.
- Baran, I., Stewart, M. P., Kampes, B. M., Perski, Z. & Lilly, P. (2003). A modification to the Goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (9), 2114-2118.
- 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.
- Buckley, S. M., Rosen, P. A., Hensley, S. & Tapley, B. D. (2003). Land subsidence in Houston, Texas, measured by radar interferometry and constrained by extensometers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108 (B11), 8-1-8-12.
- Bürgmann, R., Rosen, P. A. & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28 (1), 169-209.
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. & Hong, S.-H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>
- Chen, C., Pei, S. & Jiao, J. (2003). Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China. *Hydrogeology Journal*, 11 (2), 275-287.
- Chen, J., Knight, R., Zebker, H. A. & Schreüder, W. A. (2016). Confined aquifer head measurements and storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations. *Water Resources Research*, 52 (5), 3623-3636.
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C. & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Dawson, J. H. (2008). *Satellite radar interferometry with application to the observation of surface deformation in Australia*.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Entezam, I., Mansourian, A. & Saatchi, S. (2009 a). InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 178 (1), 47-56. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04135.x>.
- Dehghani, M., Zoej, M. J. V., Saatchi, S., Biggs, J., Parsons, B. & Wright, T. (2009 b). Radar interferometry time series analysis of Mashhad subsidence. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37 (1), 147-156. <https://doi.org/10.1007/s12524-009-0006-x>.
- 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.
- Eggleston, J. & Pope, J. (2013). Land subsidence and relative sea-level rise in the southern Chesapeake Bay region. *US Geological Survey Circular*, 1392, 30 p. <https://dx.doi.org/10.3133/cir1392>.
- Esmaili, M. & Motagh, M. (2016). Improved persistent scatterer analysis using amplitude dispersion index optimization of dual polarimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 108-114.
- Esmaili, M., Motagh, M. & Hooper, A. (2017). Application of dual-polarimetry SAR images in multitemporal InSAR processing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14 (9), 1489-1493.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5), 2202-2212.
- 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. & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying

- groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19 (8), 1459-1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F. & Rosen, P. A. (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.
- Ghiglia, D. C. & Pritt, M. D. (1998). *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software* (Vol. 4). Wiley New York.
- Goldstein, R. M. & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25 (21), 4035-4038.
- Haghighatmehr, P., Valadan Zoej, M. J., Tajik, R., Jabbari, S., Sahebi, M. R., Eslami, R., Ganjian, M. & Dehghani, M. (2012). Time series analysis of Hashtgerd subsidence using InSAR technique and global positioning system. *Journal of Earth Sciences*, 22 (85), 105-114. (In Persian)
- Haghighi, M. H. & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550.
- Haghshenas-Haghighi, M., Motagh, M. & Esmaili, M. (2013). continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran, as evidenced by C-band, L-band and X-band radar measurements. *The 5th TerraSAR-X Science Team Meeting*.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Hoffmann, J., Zebker, H. A., Galloway, D. L. & Amelung, F. (2001). Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Water Resources Research*, 37 (6), 1551-1566. <https://doi.org/10.1029/2000WR900404>.
- Hoffmann, J., Leake, S. A., Galloway, D. L. & Wilson, A. (2003). MODFLOW-2000 ground-water model—User guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package. *US Geological Survey Open-File Report 03-233*, 46.
- Holzer, T. L. & Galloway, D. L. (2005). Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States. *Humans as Geologic Agents*, 16, 87.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31 (23), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>.
- Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Wang, D. & Xu, S. (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences*, 59 (2), 269-276. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6>
- Itoh, K. (1982). Analysis of the phase unwrapping algorithm. *Applied Optics*, 21 (14), 2470.
- Kaniewski, D., Van Campo, E. & Weiss, H. (2012). Drought is a recurring challenge in the Middle East. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (10), 3862-3867.
- Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M. & Casu, F. (2004). Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 31 (23), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021294>.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M. & Lundgren, P. (2007). Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California. *Remote Sensing of Environment*, 109 (1), 20-28.
- Lee, S. & Park, I. (2013). Application of decision tree model for the ground subsidence hazard mapping near abandoned underground coal mines. *Journal of Environmental Management*, 127, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.010>.
- Lyons, S. & Sandwell, D. (2003). Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108 (B1), 11-24. <https://doi.org/10.1029/2002JB001831>.
- Mahmoudpour, M., Khamehchiyan, 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.
- Mardi, A. H., Khaghani, A., MacDonald, A. B., Nguyen, P., Karimi, N., Heidary, P., Karimi, N., Saemian, P., Sehatkashani, S. & Tajrishy, M. (2018). The Lake Urmia environmental disaster in Iran: A look at aerosol pollution. *Science of The Total Environment*, 633, 42-49.
- Mason, S., Fletcher, J. K., Haynes, J. M., Franklin, C., Protat, A. & Jakob, C. (2015). A hybrid cloud regime methodology used to evaluate Southern Ocean cloud and shortwave radiation errors in ACCESS. *Journal of Climate*, 28 (15), 6001-6018.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364 (6433), 138.
- 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., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35 (16), L16403. <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M. H., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 218, 134-151.
- Pengra, B. (2012). The drying of Iran's Lake Urmia and its environmental consequences. *UNEP-GRID, Sioux Falls, UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS)*.
- Pirouzi, A. & Eslami, A. (2017). Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 30.
- Poland, J. F. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Goudie, A. S. & Kahn, R. A. (2013). Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of the Total Environment*, 463-464, 552-564.
- Raucoules, D., Colesanti, C. & Carnec, C. (2007). Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *Comptes Rendus Geoscience*, 339 (5), 289-302.
- Refice, A., Bovenga, F., Nutricato, R. & Chiaradia, M. T. (2004). Assessment of multitemporal DInSAR stepwise processing. *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6, 3876-3879.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88 (3), 333-382.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. & Wessel, P. (2011). Open radar interferometry software for mapping surface deformation. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92 (28), 234.
- Soleimani, M., Hamzeh, S. & Papi, R. (2018). Potential assessment of suitable lands for walnut cultivation in Tehran province using fuzzy AHP method. *Journal of Soil and Water Conservation (JSWC)*, 8 (1), 49-72. (In Persian)
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G. & Gonella, M. (2006). Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research*, 42 (1), 1-19.
- 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.
- Zebker, H. A. & Goldstein, R. M. (1986). Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91 (B5), 4993-4999.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. & Werner, C. L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99 (B10), 19617-19634.