



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Evaluation of the effect of subsidence on seismicity using satellite images in Tehran plain, a case study (Varamin plain and Shahryar Plain)

Bahareh Alidadiyani¹ | Mehdi Zare² | Arezoo Dorostian³ | Afshin Ashja Ardalan⁴
| Sayyed Keivan Hosseini⁵

1. Corresponding Author, Geophysics (seismological orientation) of Islamic Azad University of northern Tehran, Tehran, Iran. Email: bahardehalidadiyani@yahoo.com, b.alidadiyani@iau-tnb.ac.ir
2. Engineering Seismology, Habilitation a Diriger des Recherches(HDR), en Geomecanique, Universite de Strasbourg-217, Head Earthquake prediction center & Engineering seismology Department, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran and Associate Member, and Head, Geology Division, Academy of Science of the I.R.Iran. Email: mzare@iiees.ac.ir
3. Faculty of Geophysics Department of Islamic Azad University of northern Tehran, Tehran, Iran. Email: dorostian382@yahoo.com
4. Faculty of Geology Department of Islamic Azad University of northern Tehran, Tehran, Iran. Email: afshinashjaardalan@yahoo.com
5. Faculty of Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. Email: k-hosseini@um.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 23 July 2023
Revised 21 August 2023
Accepted 06 September 2023
Published 11 September 2023

Keywords:
Earthquake
Land subsidence
Remote sensing
Interferometry
Shahriar plain
Varamin plain.

ABSTRACT

Due to the unique geographical and geological situation of Iran, the earthquake phenomenon imposes numerous human and financial losses on our country every year. There are solutions to reduce these losses such as identifying areas prone to earthquakes and providing practical solutions. In this regard, the present study aims to investigate the effect of changes in the subsidence rate on the trend of seismicity in plains of Tehran from 2014 to 2021. To determine the subsidence rate of the region, sentinel-1 sensor satellite data with SNAP 5.0 software was used to perform radar interferometry, and the data of 64 piezometer wells in the region from 2014 to 2021 were used to zone the groundwater level. Also, Kijko software was used to correct the seismic catalog. The results showed that there is subsidence in the Shahriar plain at a rate of 54.5 cm per year and in the Varamin plain at a rate of 65 cm per year. Accordingly, 600 thousand cubic meters change in the aquifer volume of the studied area per year leads to the minimum changes of the regional stress to the extent of 5 bar to 17 bar (equivalent to 500 to 1700 kilopascals). Also, the seismicity pattern of the region shows an increasing trend in the probability of future earthquakes on one side, and a shortening of the seismic return period in the studied area on the other side. Finally, the high consistency of the data trend in the distribution charts demonstrates the agreement of the subsidence trend and, subsequently, its effect on the seismicity trend of the studied area, which in turn indicates the effect of subsidence on the seismicity trend in the studied areas.

Cite this article: Alidadiyani, B.; Zare, M.; Dorostian, A.; Ashja Ardalan, A. & Hosseini, K. (2023). Evaluation of the effect of subsidence on seismicity using satellite images in Tehran plain, a case study (Varamin plain and Shahryar Plain). *Environmental Hazards Management*, 10 (2), 137-151. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.362753.788>



© Bahareh Alidadiyani, Mehdi Zare, Arezoo Dorostian, Afshin Ashja Ardalan, Sayyed Keivan Hosseini.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.362753.788>

Introduction

Due to the specific geographical and geological situation of Iran, the earthquake phenomenon imposes numerous human and financial losses on our country every year, and identifying areas prone to earthquakes and providing practical solutions are among the ways to reduce these losses. Also, by examining the impact of the subsidence phenomenon in the seismic process and reaching a

comprehensive and practical model, it is possible to prevent and adjust the volume and scope of potential incidents rooted from this widespread hazard; noting that the relevant institutions have all the necessary regulations and standards for construction and safety regarding this process. The earthquake-prone areas which were subject to subsidence and earthquakes at the same time were reviewed. Conducting comprehensive and detailed studies in order to create a complete and scientific structure to identify and provide maps and updated information on the adaptation of the seismic situation and the subsidence of the country helps to prevent the occurrence of accidents and widespread loss of life and capital during these phenomena. In this regard, this study was planned aiming to investigate and assess the effect of subsidence on the seismicity trends of Varamin and Shahriar plains in Tehran region.

Materials and method

The current research aims to investigate the effect of subsidence rate changes on the seismicity trend using Sentinel-1 satellite data from 2014 to 2021. The studied area is in the southern part of the Alborz mountain range, namely Varamin Plain and Shahriar Plain which are located in the southern and western extremes of Tehran province, respectively. Due to the sensitivity of the research topic and to obtain more accurate results, a combination of digital information and hydrological data along with radar images of the area and field data were processed and analysed. Geological maps 1:50000, fault and seismicity 1:1000000 from the Geological Organization, topography 1:25000 from the National Mapping Organization, and seismic data from the years 1350 to 1400 were obtained from the Geophysics Institute of Tehran University and the International Research Institute of Seismology and Earthquake Engineering of Tehran. The data from 46 piezometer wells in the region from 2014 to 2021 were used for zoning and checking the underground water level. The satellite data of the Sentinel-1 sensor was used for interferometry to determine the subsidence rate of the region.

Results

In the present study, the correction of the seismic catalog with standard techniques and the micro-seismic catalog showed that Varamin and Shahriar plains have subsidence rates of 65 and 54.5 cm per year, respectively, based on changes of 600,000 cubic meters per year in the volume of the aquifer. The studied case has led to the minimum stress changes in the area to the extent of 5 bar to 17 bar (equivalent to 500 to 1700 kilopascals). Also, the seismicity pattern of the area shows an increasing trend in the occurrence of subsequent earthquakes on one side, and a shortening of the seismic return period in the studied area on the other side.

Conclusion

The high consistency of the data trend in the distribution charts demonstrates the consistency of the subsidence trend and, subsequently, its effect on the seismicity trend of the studied area, which in turn indicates the effect of subsidence on the seismicity trend in the studied areas. The stress output resulting from loading shows a high increase in the stress of the area on one hand, and a decrease in pore pressure on the other hand. This is due to the decrease in the resistance of the soil in the studied area which manifests in the form of collapses and falling of structures and, with an emphasis on the extensive decrease in the strength of surface and subsurface layers, causes subsidence and intensification of subsidence in the region. To put it shortly, both of these phenomena will influence one another in an increasing cycle.



ارزیابی تأثیر فرونشست بر روند لرزه‌خیزی دشت ورامین و دشت شهریار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

بهاره علی دادیانی^{۱*} | مهدی زارع^۲ | آرزو درستیان^۳ | افشین اشجع اردلان^۴ | سید کیوان حسینی^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: bahareh.alidadiyani@yahoo.com

۲. گروه زلزله‌شناسی مهندسی، پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی، مدیر مرکز پیش‌بینی زلزله پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی، گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: mzare@iiees.ac.ir

۳. گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: dorostian328@yahoo.com

۴. گروه زمین‌شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: afshinashjaardalan@yahoo.com

۵. گروه ژئوفیزیک، مرکز تحقیقات زلزله‌شناسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. رایانامه: k-hosseini@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی خاص ایران، هر ساله پدیده زمین‌لرزه خسارات جانی و مالی زیادی را بر کشور تحمیل می‌کند. از جمله راهکارهای کاهش این خسارات، شناسایی مناطقی مستعد وقوع زمین‌لرزه و معرفی راهکارهای مؤثر برای کاهش خسارات احتمالی است. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر تغییرات نرخ فرونشست بر روند لرزه‌خیزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1، در دامنه زمانی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۴ در دشت‌های تهران (دشت شهریار و دشت ورامین) پرداخته است. به این منظور از داده‌های ۴۶ حلقه چاه ییزومتری منطقه از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ برای پهنه‌بندی و بررسی سطح آب زیرزمینی استفاده شد. افزون‌بر آن، پس از تصحیح کاتالوگ لرزه‌خیزی با فنون استاندارد و همچنین کاتالوگ خردلرزه‌خیزی در پژوهش حاضر و تعیین وضعیت لرزه‌خیزی منطقه، میزان فرونشست دشت‌های ورامین و شهریار به ترتیب با نرخ ۶۵ و ۵۴/۵ سانتی‌متر در سال به دست آمد. مشاهده شد که تغییرات ۶۰۰ هزار مترمکعب در سال حجم آبخوان محدوده پژوهش، به حداقل تغییرات تنش منطقه به میزان ۵ بار تا ۱۷ بار (معادل ۵۰۰ تا ۱۷۰۰ کیلو پاسکال) منجر شده و الگوی لرزه‌خیزی منطقه نیز نشان‌دهنده روند افزایشی در رخداد زمین‌لرزه‌های بعدی از یک سو و کوتاه شدن دامنه زمانی دوره بازگشت لرزه‌ای در محدوده پژوهش است. در نهایت مطابقت زیاد روند داده‌ها در نمودارهای توزیعی، بیانگر همخوانی روند فرونشست و در نتیجه، تأثیر آن بر روند لرزه‌خیزی منطقه پژوهش است که تأثیر فرونشست را در روند لرزه‌خیزی در مناطق تحت بررسی نشان می‌دهد.

نوع مقاله:

یادداشت پژوهشی کاربردی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

کلیدواژه:

زلزله

فرونشست

سنجش از دور

تداخل‌سنجی

دشت ورامین

دشت شهریار

استناد: علی دادیانی، بهاره؛ زارع، مهدی؛ درستیان، آرزو؛ اشجع اردلان، افشین و حسینی، سید کیوان (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر فرونشست بر روند لرزه‌خیزی دشت ورامین و دشت شهریار با

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۰ (۲)، ۱۳۷-۱۵۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.362753.788>

© بهاره علی دادیانی، مهدی زارع، آرزو درستیان، افشین اشجع اردلان، سید کیوان حسینی. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.362753.788>



مقدمه

زمین لرزه به عنوان مخرب‌ترین حادثه طبیعی، از مهم‌ترین عوامل تلفات بشری و خسارات اقتصادی شایان توجه در کشور محسوب می‌شود [۱۰]. با توجه به موقعیت خاص جغرافیایی و زمین‌شناسی فلات ایران و قرارگیری آن در کمربند زمین‌لرزه‌خیز آلپ هیمالیا، به طور متوسط هر ساله حدود ۲۵۰ زمین‌لرزه با بزرگی ۴ تا ۴/۹ در مقیاس محلی، ۲۵ زمین‌لرزه با بزرگی ۵ تا ۵/۹ و دو زمین‌لرزه با بزرگی ۶ تا ۶/۹ رخ می‌دهد. این در حالی است که احتمال رخداد زمین‌لرزه با بزرگی ۷ تا ۷/۹ هم حدود ۰/۲ است. به عبارتی هر پنج سال، یک مورد از چنین زمین‌لرزه‌هایی به وقوع می‌پیوندد [۲۵]. براساس سوابق و گزارش‌ها، ایران یکی از آسیب‌پذیرترین کشورها در برابر زمین‌لرزه‌ها معرفی شده است، به صورتی که طبق آمارهای موجود، ایران جزو ده کشور حادثه‌خیز دنیا به شمار می‌رود [۱۵]. عوامل گوناگونی در تشدید و وقوع این حادثه طبیعی مؤثر است. از عوامل مؤثر و ساخته دست بشر، می‌توان برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را نام برد که سبب فرونشست در لایه سطحی پوسته می‌شود [۱۰].

به افت تدریجی سطح زمین که سبب ایجاد شکاف و ترک‌هایی روی زمین می‌شود و با آسیب به سازه‌های سطح زمین همراه است فرونشست گفته می‌شود [۲]. فرونشست زمین یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیک محسوب می‌شود که دارای حرکت کند و بطئی است و در بلندمدت آثار مخرب خود را نشان می‌دهد، پدیده زمین‌لرزه در ایران نیز از قدیم، به منزله مخاطره‌ای طبیعی همواره محل بحث و بررسی بوده است. با بررسی وضعیت فراگیر پدیده فرونشست در ایران و سنجش شرایط مخاطره‌آمیز ناشی از همزادی این پدیده با مخاطره زمین‌لرزه یا قابلیت آن در تغییر روند لرزه‌خیزی، می‌توان احتمال این رویدادهای مشترک را در برخی بسترهای نامن، مشابه تحقیقات انجام گرفته در نقاط دیگر جهان معرفی کرد [۱۲]. در این زمینه پژوهش‌های مختلفی در سراسر جهان صورت گرفته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به پژوهش‌های انستیتوها و مراکزهای بین‌المللی تحقیقاتی مانند گروه تحقیقاتی فرونشست زمین در آریزونا [۲۲]، کارگروه تخصصی فرونشست زمین در ژاپن [۱۵]، کارگروه تخصصی فرونشست در سازمان یونسکو و بسیاری از مراکز تحقیقاتی مخاطرات زمین‌شناسی و پیمایش زمین در کشورهای مختلف اشاره کرد. در این پژوهش‌ها از روش‌ها و راهکارهای نوین مانند رادار (SAR & InSAR) برای مکان‌یابی [۱۹] و سیستم‌های مکان‌یابی جغرافیایی پیشرفته (GPS) [۷] استفاده شده است. این راهکارها به منظور تعیین میزان فرونشست و بررسی ارتباط آن با لرزه‌خیزی به کار برده شده‌اند که برای نمونه می‌توان به تحقیقات آموس و همکاران [۴] اشاره کرد. آنان با آآمدگی حاصل از برداشت آب‌های زیرزمینی در دره سن‌خوان کالیفرنیا را بررسی کردند. نتیجه حاصل بیانگر تأثیر برداشت آب زیرزمینی بر کاهش تنش نرمال بر گسل سن‌آندریاس بود که با مدل الاستیک پیش‌بینی شده ناشی از کاهش سطح آب زیرزمینی انطباق داشت. پچابلو گنزالس و همکاران [۱۱] شروع و انتشار زلزله لورکا در اسپانیا را حاصل تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست منطقه دانستند که به دلیل تغییر تنش حاصل از استخراج آب زیرزمینی در آبخوان مجاور حوزه رخ داده است. ناداو وتزلر و همکاران [۲۴] دلیل فعالیت گسل دریای مرده و مجموعه زلزله‌های رخ داده در نزدیکی آن را برداشت آب زیرزمینی از چند چاه واقع در ۱۰ کیلومتری غرب آن ذکر کرده و اثبات کردند که کاهش فشار منفذی ناشی از برداشت آب می‌تواند تا حد زیادی سبب تغییرات تنش در منطقه و تسریع و ایجاد گسلش در گسل خارج از آبخوان بشود. پیترو لویی براگاتو و همکاران [۵] مشخص کردند که تجمع آب‌های مخزنی به دلایل طبیعی یا انسانی می‌تواند سبب ایجاد زلزله شود. این پدیده در نواحی کارستی تسریع می‌شود و دلیل آن نیز افزایش فشار منفذی و تغییر تنش روی گسل است که سبب ایجاد زلزله‌هایی قوی در ایتالیا شده است. کریشان و همکاران نیز به بررسی فرونشست منطقه کاتماندو قبل و بعد از زلزله‌های رخ داده در منطقه نپال پرداختند [۱۸].

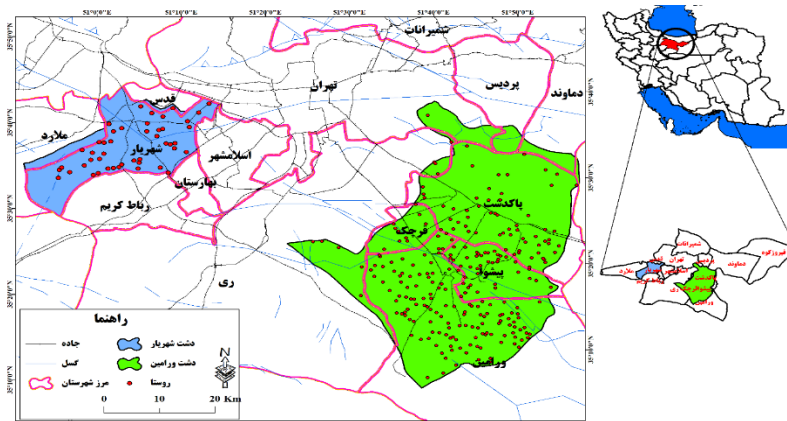
در ایران عابدینی و همکاران [۲] فرونشست را با استفاده از GPS و روش تداخل‌سنجی راداری بررسی کرده‌اند. آمیخچی و همکاران [۳] و کوهبنانی و همکاران [۱۷] در زمینه ارتباط لرزه‌خیزی و فرونشست زمین در جزیره قشم را استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری تحقیق کرده‌اند. جلینی و همکاران این ارتباط را در دشت نیشابور بررسی کرده‌اند [۱۴]، فتحی و همکاران [۸] به بررسی تغییرات فرونشست حاصل از تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت کاشان پرداخته‌اند. در مجموع نتایج پژوهش‌ها [۲۰] نشان از فرونشست دشت‌های ایران دارند. در اغلب این موارد براساس نتایج، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین دلایل وقوع این پدیده بوده است. موضوعی که درک آن از یک سو مستلزم بسط پژوهش‌ها برای شناسایی کامل نواحی مستعد از نظر فرونشست و لرزه‌خیزی به صورت یک طرح ملی است و از سوی دیگر، باید زیرساخت‌های لازم برای آگاهی‌رسانی و همگانی کردن اطلاع از تهدیدها و معضلات ناشی از این مسئله، با هدف توسعه استانداردهای فنی برای مناطق

مستعد فرونشست، با پژوهش‌های زیرسطحی و استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به‌منظور تعیین مناطق فرونشست و شناسایی حریم آنها قبل از اجرای طرح‌ها و ساخت‌وسازهای عمرانی و تأسیساتی انجام گیرد تا برای جلب مشارکت مردم و تعدیل زیرساخت‌های اجرایی بستر مناسبی فراهم آید.

دستگاه‌های ذی‌ربط نیز با بررسی تأثیر پدیده فرونشست در روند لرزه‌خیزی و با رسیدن به الگوی جامع و کاربردی می‌توانند برای پیشگیری و کاهش حوادث ناشی از این مخاطره، در مقررات و استانداردهای ساخت‌وساز و ایمنی در نواحی مستعد لرزه‌خیز که همزمان در معرض فرونشست قرار دارند بازنگری کنند و به پژوهش‌های جامع و دقیق با هدف ایجاد ساختار کامل و علمی برای شناسایی و ارائه نقشه‌ها و اطلاعات به‌روز از انطباق وضعیت لرزه‌خیزی و فرونشست کشور بپردازند. این پژوهش با هدف بررسی و ارزیابی تأثیر فرونشست در روند لرزه‌خیزی دشت‌های ورامین و شهریار در منطقه تهران اجرا شد.

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش یعنی دشت ورامین و دشت شهریار در قسمت جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده است که به‌ترتیب در انتهای جنوبی و غربی استان تهران واقع شده‌اند. به دلیل آب‌وهوای نیمه‌خشک منطقه، منابع آب زیرزمینی استان تهران به برداشت حساس‌اند. در طی سال‌های اخیر، بیلان آب زیرزمینی در منطقه پژوهش منفی بوده است. کاهش سطح آب زیرزمینی در کنار لایه‌های تراکم‌پذیر رسی در رسوبات آبرفتی سیستم آبخوان تهران و دو دشت یادشده، موجب نشست گسترده در لایه‌های سطحی و به‌نسبت عمیق شده‌اند. این وضعیت بیش از پیش روند کلی منطقه را به‌سوی فرونشست‌های وسیع و جبران‌ناپذیر پیش می‌برد. همچنین در این نواحی به‌علت وجود گسل‌های فعال و لرزه‌زا و پیشینه وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی ویرانگر و در عین حال فعالیت‌های لرزه‌ای گسل‌های منطقه در دوران حاضر، همواره این نواحی در تهدید خطر زلزله قرار داشته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش (محدوده قرمز نشان‌دهنده موقعیت استان تهران است.)

داده‌ها و روش پژوهش

به‌علت حساسیت موضوع پژوهش و برای کسب نتایج دقیق‌تر، تلفیقی از اطلاعات رقومی و داده‌های هیدرولوژیکی به‌همراه تصاویر رادار منطقه و داده‌های میدانی پردازش و تحلیل شد. برای تهیه داده‌های رقومی، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰، گسلی و لرزه‌خیزی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی کشور، توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری کشور و داده‌های لرزه‌خیزی دستگامی از سال ۱۳۵۰ تا پایان سال ۱۴۰۰ از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران در دو بخش، تحت عنوان کاتالوگ لرزه‌خیزی مربوط به زلزله‌های بزرگ‌تر از ۳-۴ و کاتالوگ خردلرزه خیزی اخذ شد. برای تکمیل داده‌های هیدرولوژیکی، آمار چاه‌های پیژومتر شامل ۴۶ حلقه چاه پیژومتر منطقه پژوهش از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۴۰۰ با هدف پهنه‌بندی سطح آب و تعیین وضعیت و میزان برداشت آبخوان و لایه افت آب زیرزمینی و همچنین آمار

چاه‌های محدوده شامل ۲۷ حلقه چاه حفاری و آمار چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و قنات‌ها از آب منطقه‌ای استان تهران دریافت شد.

به‌منظور تعیین نرخ فرونشست منطقه از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده Sentinel-1 برای تداخل‌سنجی استفاده شد. سنجنده Sentinel-1 از دو ماهواره‌ای که هر یک با فاصله ۱۸۰ درجه از یکدیگر قرار دارند، در هر شش روز همه کره زمین را تصویربرداری می‌کند. مأموریت سنجنده Sentinel-1 در چهار حالت تصویربرداری منحصربه‌فرد شامل تصویربرداری در باند C با قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۵ متر و پوشش تا ۴۰۰ کیلومتر مربع است [۶]. رایگان و در دسترس بودن داده‌های ماهواره‌ای سنجنده Sentinel-1 از ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن است که سبب شده پردازش و تجزیه و تحلیل این داده‌ها با سرعت بیشتری صورت گیرد. برای تهیه نقشه‌های این پژوهش از حالت IW در ماهواره سنتینل برای تداخل‌سنجی راداری استفاده می‌شود که حالت اصلی اخذ داده‌های زمینی است و بیشتر نیازهای تصویربرداری و محاسبات وابسته به آن را برآورده می‌کند. جدول ۱ مشخصات تصاویر استفاده‌شده در پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات تصاویر استفاده‌شده در پژوهش

شماره	تاریخ تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری	فرمت تصویربرداری
۱	۲۰۱۴/۰۷/۲۶	IW	نزولی	Slc
۲	۲۰۱۴/۰۹/۱۶	IW	نزولی	Slc
۳	۲۰۱۵/۰۷/۱۹	IW	نزولی	Slc
۴	۲۰۱۵/۰۹/۲۵	IW	نزولی	Slc
۵	۲۰۱۶/۰۷/۱۴	IW	نزولی	Slc
۶	۲۰۱۶/۰۹/۲۷	IW	نزولی	Slc
۷	۲۰۱۷/۰۷/۲۵	IW	نزولی	Slc
۸	۲۰۱۷/۰۹/۲۴	IW	نزولی	Slc
۹	۲۰۱۸/۰۷/۱۵	IW	نزولی	Slc
۱۰	۲۰۱۸/۰۹/۱۸	IW	نزولی	Slc
۱۱	۲۰۱۹/۰۷/۱۸	IW	نزولی	Slc
۱۲	۲۰۱۹/۰۹/۰۹	IW	نزولی	Slc
۱۳	۲۰۲۰/۰۷/۱۴	IW	نزولی	Slc
۱۴	۲۰۲۰/۰۹/۱۶	IW	نزولی	Slc
۱۵	۲۰۲۱/۰۹/۲۰	IW	نزولی	Slc

همچنین از داده‌های پیمایشی و میدانی، برای استخراج پدیده‌های مورفولوژی ناشی از فرونشست زمین استفاده شد و برای کنترل درستی نتایج نرخ فرونشست از تداخل‌سنجی راداری، نقاطی از منطقه انتخاب شد که نرخ بیشتری از فرونشست در تصاویر راداری را داشتند. در ادامه روی زمین به کمک GPS مشاهده و عکس‌برداری شد که ترجیحاً در این مرحله از تأسیساتی همانند پل‌ها، نمای دیوارها و ساختمان‌ها و در محدوده‌هایی بدون کاربری از عکس‌های قبل در مقایسه با زمان حال استفاده شد.

پردازش تصاویر رادار

تولید تداخل‌نگار، حاصل نمایش اختلاف فاز ناشی از تغییر فاصله بین دو پدیده و سنجنده در دو عبور متوالی است. فاصله یک نقطه در روی زمین از سنجنده در دو عبور متفاوت، می‌تواند با محاسبه اختلاف فازی حاصل از دو تصویر در فرم مختلط^۱، محاسبه شود. فاز حاصل از این ضرب مختلط، فاز تفاضلی است و حاصل فازهای مربوط به توپوگرافی، فاز اصلاح‌شده در نتیجه تغییرات مداری، فاز مربوط به اختلال اتمسفر و در نهایت فاز حاصل از جابه‌جایی احتمالی پوسته سطحی زمین است. تداخل‌نگار تفاضلی حاصل از حذف اثرهای توپوگرافی در مرحله پیشین حاوی نویزهایی است که در نتیجه اختلاف زمانی با بازه زمانی

1. complex

دریافت دو تصویر SAR و همچنین وجود خط مبنای مکانی پدید آمده است. برای حذف این نویزها و همزمان بهبود بصری تداخل‌نگار از فیلترهای توافقی استفاده شد. در تحقیق حاضر به‌واسطه خط مبنای زمانی طولانی بین داده‌ها و بزرگ بودن محدوده تصویربرداری و ناهماهنگی زمانی در هنگام برداشت تصاویر با قابلیت پوشش کل منطقه، از فیلتر گلاشتاین برای پاکسازی تداخل‌نگار تفاضلی حاصل استفاده شد. این فیلتر به‌صورت توافقی و دینامیک عمل کرده و عملیات فیلتر را به‌صورت محلی اجرا می‌کند. بعد از پالایش و تصحیح مضاعف فاز، حال می‌توان فاز مطلق حاصل را به مقادیر جابه‌جایی با نقشه جابه‌جایی تبدیل و زمین مرجع کرد. نقشه خروجی، نشانه شدت میزان جابه‌جایی به‌ازای هر پیکسل در واحد متریک است. به کمک عملیات فیلترگذاری و الگوریتم‌های همبستگی تولید فایل‌های همدوسی و فیلترشده اقدام شد و نتایج آنالیز آماری پیکسل‌های دو تصویر راداری نیز مشخص می‌کند که مقدار همدوسی بین دو داده حدود ۰/۲ است.

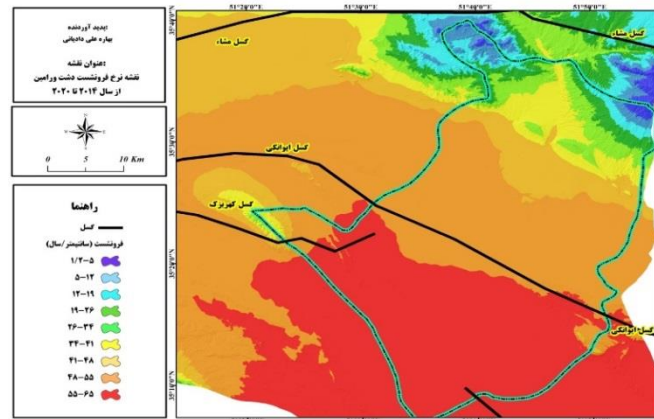
پس از محاسبات و تولید فایل همدوسی که بیانگر بسامد و شکل موج کاملاً یکسان است، نقشه فاز باقی‌مانده یا جابه‌جایی در خط دید سنجنده با اعمال فیلتر به نقشه‌ای که دارای سیکل تغییرات رنگی مشخص‌تری به نام فرینچ است تبدیل شد. در رادار Sentinel_1 هر فرینچ، معادل ۲/۸ سانتی‌متر جابه‌جایی در افق دید سنجنده است. در گام بعدی برای تصحیح اثر کرویت، پالایش و حذف بعضی از خطاهای باقی‌مانده راداری مانند کوتاه‌شدگی و روی‌هم‌افتادگی عوارض و خطای سایه، ۱۰ نقطه کنترلی روی نقشه مدل رقومی ارتفاعی حاصل از مرحله قبل اقدام شد. در پایان از تفاضل نقشه‌های رستری (مدل رقومی ارتفاع) نشان‌دهنده میزان فرونشست در محدوده تحت بررسی حاصل شد.

یافته‌های تحقیق

با توجه به کاتالوگ لرزه‌خیزی، اغلب زمین‌لرزه‌ها در این گستره، در عمق کمتر از ۲۰ کیلومتر و بیشتر از ۱۰ کیلومتر به وقوع پیوسته‌اند. شایان ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده، براساس زمین‌لرزه‌های موجود در کاتالوگ جهانی، کمتر از این مقدار برآورد شده است و اختلاف ناچیزی در پیش‌بینی عمق وقوع بین ایستگاه‌های محلی و جهانی وجود دارد. این اختلاف بیانگر گسترده و دور بودن فاصله از محل وقوع در ایستگاه‌های محلی نسبت به ایستگاه‌های دریافت‌کننده جهانی است. بنابراین برای بررسی عمق رخداد زمین‌لرزه، اطلاعات حاصل از ایستگاه‌های جهانی خطای بیشتری دارند و دقت مناسبی ندارند. در نتیجه گزارش‌های محلی قابل اتکاتر و دقیق‌ترند. نتایج بررسی‌های اخیر و ارزیابی عمق زمین‌لرزه‌ها در ایران نشان می‌دهد که عمق متوسط زمین‌لرزه‌ها در البرز مرکزی کمتر از ۲۰ کیلومتر و به‌طور متوسط ۱۰ کیلومتر است [۲۵].

همان‌طور که اشاره شد، هدف پژوهش حاضر بررسی میزان تأثیر فرونشست بر روند لرزه‌خیزی در دشت‌های تهران و به‌طور اختصاصی دشت شهریار و دشت ورامین است. نخستین گام در نیل به اهداف برنامه‌ریزی‌شده، برآورد میزان فرونشست در منطقه پژوهش و تطبیق آن با تغییرات لرزه‌خیزی است؛ از این‌رو پس از محاسبه میزان فرونشست در محدوده بررسی نقشه‌های حاصل بیانگر این است که این پدیده از نواحی مرکزی دشت شروع شده و در راستای کاهش سطح ارتفاعی دشت به سمت جنوب ادامه یافته است و کشیدگی ناحیه فرونشست، در امتداد روند کشیدگی دشت ایجاد شده است. شکل ۲ نرخ فرونشست از سال ۲۰۱۴ تا پایان ۲۰۲۰ را در دشت ورامین نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از سال ۲۰۱۴ تا پایان سال ۲۰۲۰ کمترین فرونشست در نواحی شمالی دشت، با حداکثر ۵ سانتی‌متر در سال و بیشترین فرونشست در نواحی جنوبی دشت، با اندازه ۵۵ تا ۶۵ سانتی‌متری است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده که حکایت از فرونشست زیاد دشت دارد، تحلیل فازهای موجی مناطق حاشیه دشت نیز بیانگر روند فرونشست در کل منطقه است. همچنین در نواحی دارای فرونشست بسیار کم، می‌توان اظهار داشت که دلیل اصلی، جنس زمین‌شناسی ناحیه و کم بودن عمق خاک به‌دلیل محدوده ارتفاعی و قرار داشتن در مناطق مرتفع و کوهستانی است. همچنین زیاد بودن فرونشست در مناطق جنوبی دشت را می‌توان به تخلیه آب زیرزمینی و نزدیکی آن به آبخوان ورامین نسبت داد. در جدول زیر میزان سالانه فرونشست محدوده دشت ورامین آورده شده است.



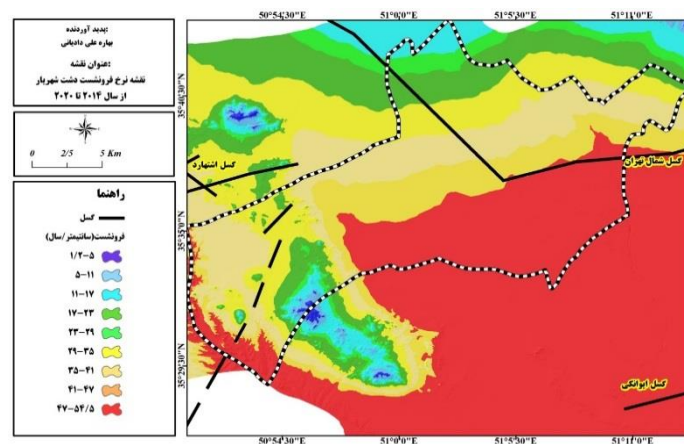
شکل ۲. نرخ فرونشست ورامین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

جدول ۲. میزان فرونشست زمین در محدوده دشت ورامین

سال	۲۰۱۴-	۲۰۱۵-	۲۰۱۶-	۲۰۱۷-	۲۰۱۸-	۲۰۱۹-	۲۰۲۰-	۲۰۲۰+
فرونشست (سانتیمتر)	۷,۵	۱۹,۵	۲۶	۱۳	۲۶	۲۶	۲۶	۶۵

بخشی از منطقه پژوهش، دشت شهریار است که در انتهای جنوب غربی تهران واقع شده است. نتایج برآورد میزان فرونشست در این دشت نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، فرونشست کاهش پیدا می‌کند. به طوری که کمترین فرونشست با نرخ متوسط ۳ سانتی‌متر در سال در مرتفع‌ترین نقطه دشت رخ داده است. در شکل ۳، نرخ فرونشست زمین در دشت شهریار از سال ۲۰۱۴ تا پایان ۲۰۲۰ نشان داده شده است. بر این اساس مشخص شد که این پدیده از نواحی مرکزی دشت شروع شده و در امتداد کاهش سطح ارتفاعی دشت به سمت جنوب و جنوب شرقی ادامه یافته است. کشیدگی سیگنال فرونشست در امتداد روند کشیدگی دشت و متمایل به نواحی جنوبی در عرض دشت ایجاد شده است.

نتایج بررسی فرونشست در محدوده دشت شهریار نشان داد که بیشترین فرونشست از سال ۲۰۱۴ تا پایان ۲۰۲۰ در پست‌ترین نقاط دشت برابر با ۵۴/۵ سانتی‌متر در سال است. این مناطق در نزدیکی آبخوان دشت شهریار واقع‌اند و بیلان آبی این محدوده به صورت تصاعدی از سال ۲۰۱۴ تا پایان ۲۰۲۰ منفی برآورد شده است. از این رو می‌توان اظهار داشت که از مهم‌ترین عوامل ایجاد فرونشست در این محدوده، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و خشکسالی‌های ممتد منطقه و کاهش ورودی به آبخوان‌هاست.



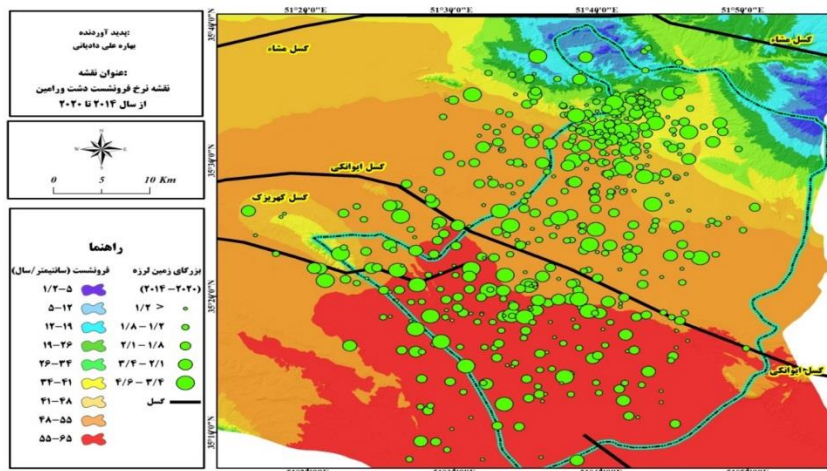
شکل ۳. نرخ فرونشست دشت شهریار سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

با توجه به نقشه‌های به‌دست‌آمده که حکایت از فرونشست زیاد دشت دارد، تحلیل فازهای موجی مناطق حاشیه دشت نیز بیانگر روند فرونشست در کل منطقه است. در جدول زیر نرخ سالانه فرونشست محدوده دشت ورامین آورده شده است.

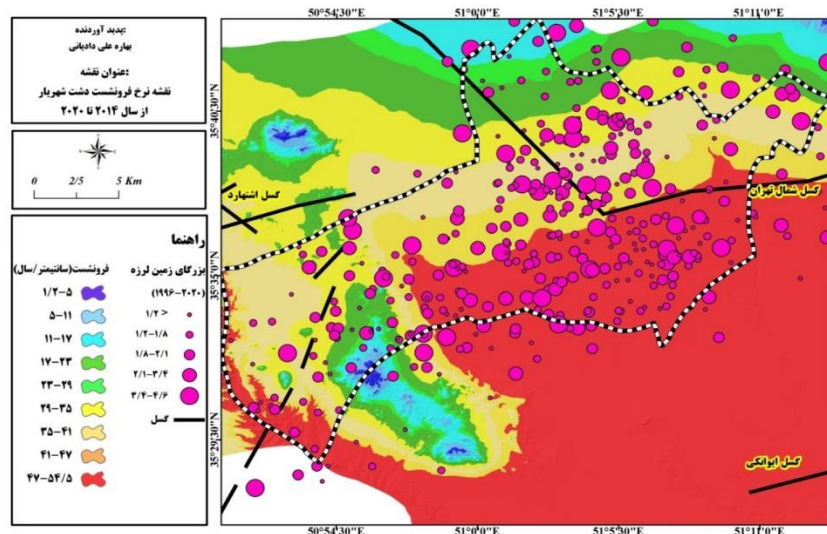
جدول ۳. نرخ فرونشست زمین در محدوده دشت شهریار

سال	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۱۴
فرونشست (سانتی‌متر)	۷/۵	۱۳	۲۰/۳	۱۵/۵	۲۵/۱	۳۷	۴۰	۵۴/۵

پس از برآورد میزان فرونشست در محدوده تحت بررسی، به بررسی رابطه بین فرونشست و لرزه‌خیزی پرداخته شد. شکل‌های ۴ و ۵ نقشه نقاط مراکز زمین‌لرزه‌های رخ داده، در منطقه پژوهش از سال ۲۰۱۴ تا پایان ۲۰۲۰ را نشان می‌دهند. بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی با بررسی داده‌های حاصل از چاه‌های پیژومتریک در منطقه نشان داد که میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی همپوشانی قابل قبولی با مناطق دارای فرونشست دارد. به‌منظور مشخص کردن میزان تغییرات ذخیره مخزن آب زیرزمینی، با استفاده از آمار چاه‌های پیژومتری، هیدروگراف تراز آب آبخوان و نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی ترسیم شد (شکل‌های ۶ و ۷). برای بررسی علت اصلی فرونشست‌ها در منطقه که مربوط به تخلیه بیش از حد مجاز سفره است، باید با توجه به نوع کاربری چاه‌ها و طبقه‌بندی دبی تخلیه روی نقشه هم فرونشست و تفسیر لوگ چاه‌ها فرضیه تحت بررسی را تأیید یا رد کرد. فرض بر این است که مناطق با کاربری اراضی آبی، احتمالاً دارای سازندهای ریزدانه‌اند که فرض دور از واقعیتی نیز نیست. در این خصوص ابتدا چاه‌های با کاربری کشاورزی و دبی بیشتر از ۲۲ لیتر بر ثانیه (حداکثر دبی پمپاژ حدود ۸۰ لیتر بر ثانیه مشاهده شد) با تخلیه سالانه بیش از ۶۰۰ هزار متر مکعب تفکیک شد و روی اراضی محدوده قرار گرفت.

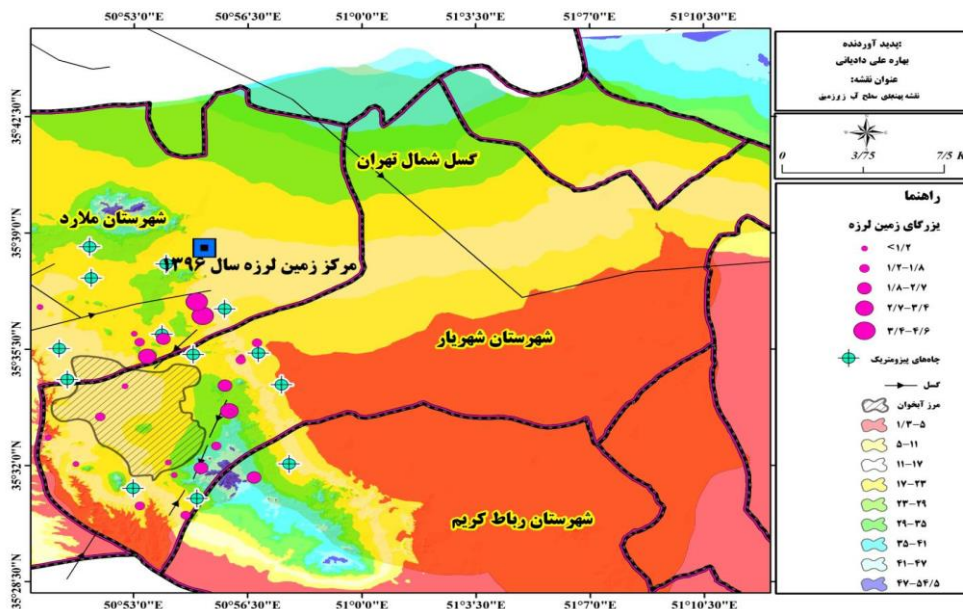


شکل ۴. نقشه لرزه‌خیزی دشت ورامین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

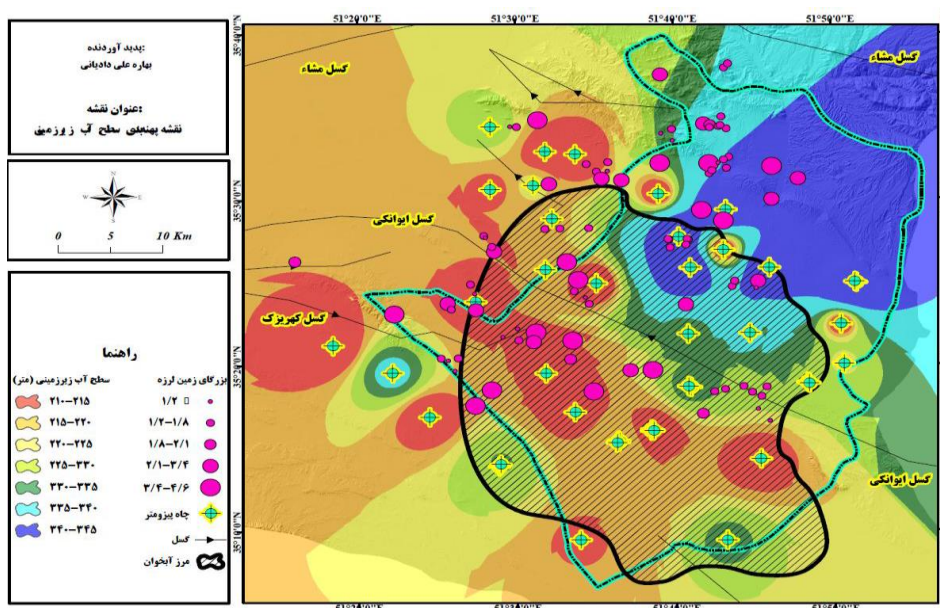


شکل ۵. نقشه لرزه‌خیزی دشت شهریار از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

مقایسه بیلان آب زیرزمینی با دیگر نقشه‌های شماتیک فرونشست در محدوده طرح حاکی از آن است که بیشتر فرونشست‌های منطقه طرح، تقریباً در محدوده اراضی آبی و چاه‌های کشاورزی با تخلیه نسبی بیشتر متمرکز شده است. این موضوع می‌تواند حاکی از اثر تراکم چاه‌های برداشت سفره بر تشدید یا عامل محرک فرونشست منطقه باشد.



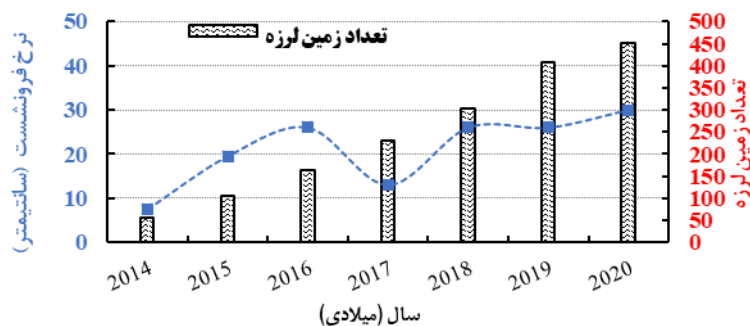
شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی دشت شهریار



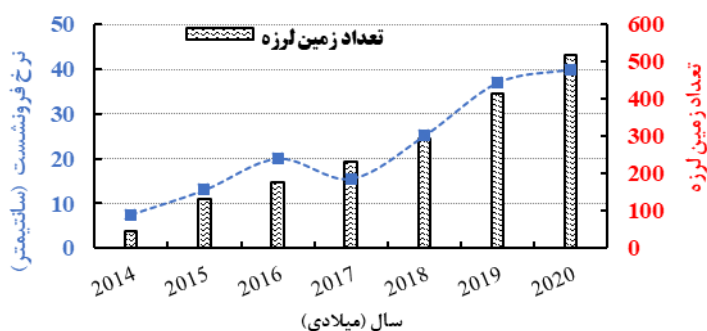
شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی دشت ورامین

نتایج بررسی لرزه‌خیزی منطقه پژوهش حاکی از این است که تعداد و بزرگی زمین‌لرزه‌ها با افزایش فرونشست تغییرات زیادی داشته است. به‌منظور بررسی لرزه‌خیزی منطقه پژوهش، ابتدا برای مطالعه تغییرات تنش از یک سو و بررسی مجزای میزان تأثیرگذاری زلزله‌های خاص بر روند همپوشانی دو پدیده در منطقه از سوی دیگر، از روش گوتنبرگ ریشتر کاتالوگ لرزه‌خیزی تصحیح شد که براساس آن، حدود ۳۰ درصد با خطای ۲ درصد، زلزله‌ها حاصل فعالیت انسانی بوده‌اند سپس با توجه به اینکه برداشت آب زیرزمینی در منطقه آهسته و پیوسته است، به‌منظور افزایش دقت محاسبات و در نظر گرفتن همه تغییرات لرزه‌ای در منطقه کاتالوگ خردلرزه‌ها استفاده شد و مشاهده شد که محل و تعداد این خردلرزه‌ها همپوشانی بسیار مناسبی با تغییرات

فرونشست در منطقه دارد و در نواحی‌ای که نرخ فرونشست افزایش می‌یابد، همزمان روند لرزه‌خیزی و به‌ویژه خردلرزه‌ها در منطقه به‌شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. بر همین اساس و با توجه به بررسی مجموع مشاهدات می‌توان اظهار داشت که برداشت آب زیرزمینی و پایین رفتن سطح سفره آب زیرزمینی سبب برهم خوردن تعادل وزنی پوسته زمین در محدوده می‌شود که بالا آمدگی پوسته در این نواحی را در پی دارد و با توجه به وجود گسل‌های فعال در منطقه، سبب افزایش زمین‌لرزه در منطقه می‌شود. با توجه به اینکه بررسی تغییرات فرونشست در راستای محور عمودی است، جابه‌جایی زمین نیز در راستای عمودی بررسی شده است که بیانگر تغییرات ارتفاعی ناشی از وزن پوسته قبل و بعد از برداشت آب در این نواحی است. شکل‌های ۸ و ۹ نمودار نرخ فرونشست را در مقابل تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در هر سال در محدوده تحت بررسی نشان می‌دهد.



شکل ۸. لرزه‌خیزی و نرخ فرونشست زمین در محدوده دشت ورامین



شکل ۹. لرزه‌خیزی و نرخ فرونشست زمین در محدوده دشت شهریار

با توجه به نتایج حاصل از شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که تغییرات میزان برداشت آب، با روند تغییرات لرزه‌خیزی تطابق دارد و در زمان‌های افزایش برداشت آب در منطقه، بر فرونشست افزوده شده است. همچنین میزان تنش مؤثر در منطقه به‌صورت کلی، در تمام محدوده و در نواحی دارای فرونشست به تفکیک میزان فرونشست به‌طور مجزا محاسبه شد که بدین منظور با استفاده از تنش مؤثر و تغییرات در بار هیدرولیکی که براساس اصل تنش مؤثر ترزاقی ($\sigma'_{ij} = \delta_{ij}$) بنا شده است استفاده شد. تغییر در تنش مؤثر ممکن است ناشی از تغییر تنش کل یا فشار منفذی باشد تنش کل در هر منطقه به‌وسیله بار مصالح زیاد آن، ناشی از رسوبات اشباع و غیراشباع زیاد و فشارهای تکتونیک است [۱۳].

در اینجا فرض می‌شود که تنش کلی با زمان ثابت باقی می‌ماند، یعنی $\Delta\sigma_{zz} = 0$. به‌طور معمول در سیستم‌های جریان آب زیرزمینی در محیط اشباع، بار هیدرولیکی به‌جای فشار منفذی به‌کار گرفته می‌شود. در یک آبخوان محبوس، تنش کل با تغییر در فشار منفذی تغییر می‌کند. تغییر در تنش مؤثر موجب تراکم و انبساط رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان‌ها می‌شوند که به‌معنای کاهش ضخامت میان لایه‌های افقی است.

بسته به اینکه آیا تنش مؤثر بیش از ماکزیمم تنش یا تحکیم اولیه قبلی بوده است، می‌توان گفت اگر تنش مؤثر کمتر از تنش تحکیم اولیه باقی می‌ماند، افزایش مجددی در تنش مؤثر (کاهش در بار هیدرولیکی) سبب تراکم الاستیک کوچکی در رسوبات دانه‌ریز و دانه‌درشت می‌شود و چنانکه تنش مؤثر به مقدار اولیه‌اش برگردد، این تراکم برگشت‌پذیر می‌شود [۱۶].

در بسیاری از موارد کاربردی، در تراکم سیستم آبخوان، تغییرات صعودی در تنش مؤثر اصولاً کوچک است و از این رو تغییرات ممکن است خطی باشد افزایش در تنش مؤثر درصد کوچکی از حالت اولیه تنش است. در اینجا به منظور محاسبه تنش منطقه باربرداری آبخوان در محدوده تغییرات قبل و بعد از کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه محاسبه شد. بدین منظور از رابطه مشهور معیار گسیختگی مور- کولمب استفاده شد:

$$T(\text{crit}) = T_0 + \mu (\sigma_n) \quad (1)$$

در این رابطه $T(\text{crit})$ یا تنش بحرانی، مقدار تنش لازم برای گسیختگی یک صفحه و T_0 مقاومت برشی ذاتی یا چسبندگی توده سنگی، μ ضریب اصطکاک داخلی و σ_n تنش نرمال وارد شده به صفحه است. با کاهش تنش نرمال یا افزایش تنش برشی، گسیختگی در امتداد شکستگی‌های قبلی رخ خواهد داد و تنش لازم برای گسیختگی نسبت به جهت شکستگی اولیه سنگ افزایش خواهد یافت.

یکی از عوامل تغییرات تنش، افزایش یا کاهش فشار منفذی است. تغییرات تنش نرمال نیز همانند تغییرات تنش برشی ممکن است سبب زمین‌لرزه‌های القایی شود که توسط تغییر فشار منفذی توصیف می‌شود. زمانی که مایعات از درون یک زون دارای شکستگی خارج می‌شوند، تنش نرمال مؤثر، به اندازه فشار منفذی کاسته می‌شود و رابطه مور- کولمب به صورت زیر درمی‌آید که در آن P فشار منفذی است.

$$T(\text{crit}) = T_0 + \mu (\sigma_n - P) \quad (2)$$

با استفاده از تغییرات حجم آبخوان و اطلاعات موجود از منطقه و نرم‌افزار تغییرات استرس کولمب میزان تغییرات حجم آبخوان به‌طور میانگین در نقاط دارای فرونشست و برداشت آب حدود ۱۷ بار (۱۷۰۰ کیلوپاسکال) است که با در نظر گرفتن خارج نشدن حجم آب زیرزمینی در منطقه این میزان حدود ۵ بار (۵۰۰ کیلو پاسکال) به‌دست آمد.

با توجه به اینکه سطح مخزن محدود، سبب افزایش فشار وزن آب بر مساحت محدودی از زمین است، افزایش سرعت برداشت آب می‌تواند سبب تحریک بیشتر تنش در منطقه شود. همچنین با توجه به قرارگیری گسل‌های فعال منطقه، در نواحی دارای بیشترین برداشت آب و فرونشست، می‌توان گفت تغییرات ناشی از فرونشست در این نواحی غیرقابل چشم‌پوشی است و روند کاهش ارتفاع آب و کاهش حجم مخزن، از عواملی است که در واقع شدن یا واقع نشدن این زمین‌لرزه‌ها نقش دارند. مطابق کاتالوگ‌های لرزه‌خیزی که تراکم آنها در نمودارها قابل مشاهده است، میزان لرزه‌خیزی در همان نواحی و در دوره‌های زمانی مشابه نیز افزایش یافته است و همچنین بنا بر توضیحات مطروحه درباره تئوری فرونشست، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر تنش و تنها در نظر گرفتن تغییرات حجم آبخوان منطقه که سالیانه ۶۰۰ هزار مترمکعب است، این امر قابلیت تغییر به میزان ۵ تا ۱۷ بار (۵۰۰ تا ۱۷۰۰ کیلو پاسکال) در تنش مؤثر را دارد که نمایانگر میزان تغییرات است و در میزان حداقلی تغییرات تنش منطقه در صورتی که آبخوان باربرداری نشده باشد، برابر ۵ بار (۵۰۰ کیلوپاسکال) است؛ یعنی میزان تغییرات آن در حدود ۱۲ بار (۱۲۰۰ کیلو پاسکال) است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که میزان تغییرات تنش، تأثیر مشخص و مستقیم در تحریک لرزه‌خیزی گسل‌های قرارگرفته در محدوده باربرداری دارد. به عبارتی تغییر فشار منفذی در اثر برداشت آب و متعاقباً ایجاد فرونشست در محدوده پژوهش از مهم‌ترین دلایل برای تغییر در روند لرزه‌خیزی منطقه است. بنابراین میزان تغییرات تنش حاصل از این مقدار برداشت از حجم آبخوان‌های منطقه و ایجاد فرونشست، تأثیر مستقیمی در تغییر روند لرزه‌خیزی منطقه خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر تغییرات نرخ فرونشست بر روند لرزه‌خیزی در دشت‌های تهران در دامنه زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ بررسی شد. نتایج نشان داد که دشت شهریار ۵۴/۵ سانتی‌متر و دشت ورامین ۶۵ سانتی‌متر در سال فرونشست دارند که براساس تغییرات ۶۰۰ هزار متر مکعبی حجم آبخوان محدوده تحت بررسی در سال به میانگین تغییرات تنش منطقه به میزان ۵ بار (۵۰۰ کیلوپاسکال) در شرایط نبود باربرداری و ۱۷ بار (۱۷۰۰ کیلوپاسکال) در نواحی با تغییرات فرونشست منجر شده است که بیانگر تغییر ۱۲۰۰ کیلو پاسکال

در تنش منطقه است که عدد شایان توجهی است. همچنین الگوی لرزه‌خیزی منطقه با توجه به همپوشانی در روند افزایشی زمین‌لرزه‌ها با فرونشست در منطقه، نشان‌دهنده روند افزایشی در احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بعدی از یک سو و کوتاه شدن بازه دوره بازگشت لرزه‌ای در محدوده پژوهش است. در نهایت تطابق بسیار خوب روند داده‌ها در نمودارهای توزیعی بیانگر همخوانی روند فرونشست و متعاقباً تأثیر آن بر روند لرزه‌خیزی منطقه پژوهش است. افزایش فرونشست در منطقه پژوهش به علت کاهش شدید آب زیرزمینی سبب کاهش وزن لایه‌های زمین در آن ناحیه و فرونشست وسیع شده و به موازات آن، این باربرداری، کاهش گسترده وزن لایه‌های سطحی و افزایش تنش مؤثر در منطقه را در پی داشته است که این امر بر روند لرزه‌خیزی منطقه تأثیر بسزایی دارد و سبب افزایش نرخ رویداد لرزه‌ای در منطقه می‌شود. همچنین این امر سبب تسریع دوره بازگشت زلزله‌های بزرگ‌تر و افزایش تعداد زلزله‌های کوچک‌تر در منطقه می‌شود. در بررسی این همپوشانی با توجه به خروجی نقشه‌ها و نمودارهای کمی، باید افزود که افزون بر تأثیر فرونشست در روند لرزه‌خیزی منطقه، به شکل مشابه زلزله‌هایی با توان و بزرگی بیشتر نیز می‌تواند در وضعیت فرونشست منطقه تأثیرگذار باشند، زیرا خروجی تنش حاصل از باربرداری، مبین افزایش زیاد استرس منطقه از یک سو و کاهش فشار منفذی از سوی دیگر است. این موضوع با توجه به کاهش توان مقاومتی خاک در منطقه پژوهش به شکل ریزش‌ها، فرو ریختن سازه‌ها و با تأکید بر کاهش گسترده استحکام لایه‌های سطحی و زیرسطحی، سبب ریزش و تشدید فرونشست در منطقه می‌شود که به اختصار می‌توان گفت هر دو پدیده به شکل چرخه‌ای افزایشی بر یکدیگر تأثیرگذار خواهند بود.

تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری است که با حمایت گروه ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال فراهم شده است. از اعضای هیأت علمی این گروه و همچنین دانشگاه قدردانی می‌شود.

منابع

- [1] Abbasi, A. (2017). Evaluation of earthquake locations by the two local and regional seismic networks in Central Alborz (Iran), *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(3), 4
- [2] Abedini, M., Ebady, E., & Ghale, E. (2022). Investigation of subsidence of Mahidasht plain of Kermanshah province using radar interferometry method, *Journal of Geography and Planning*, 26(79), 207-220. (In Persian).
- [3] Amighpey, M., Vosooghi, B., & Mothagh, M. (2016). Assessment Evaluation of source parameters of 2005 Qeshm earthquake based on inversion of INSAR observation using genetic algorithm, *Tectonics Journal*, 24(95), 343-350. (In Persian)
- [4] Amos, C., Audet, P., Hammond, W., Burgmann, R., Johanson, I., & Blewitt, G., (2014). Uplift and seismicity driven by groundwater depletion in central California, *Nature*, vol 509.
- [5] Bragato, P. (2021). Systematic Triggering of Large Earthquakes by Karst Water Recharge: Statistical Evidence in Northeastern Italy, *Frontiers in Earth science*, 9, 664932.
- [6] Chen, Y., Sung, Q., & Cheng, K., (2003). Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis, *Geomorphology*, 56(1), 109-137.
- [7] Dura, T., Horton, B. P., Cisternas, M., Ely, L. L., Hong, I., Nelson, A. R., & Nikitina, D. (2017). Subduction zone slip variability during the last millennium, south-central Chile, *Quaternary Science Reviews*, 175, 112-137.
- [8] Fathi, M., & Noorian-Bidgoli, M. (2021). Evaluation of Land Subsidence Due to Water-Level Decline in Kashan Plain, *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 6(4), 45-57. (In Persian)
- [9] Ghohroudi, M., Pourmousavi, S.M., & Khosravi, S., (2018). Investigating the potential of seismic destruction by using multi-indicator models (case study: one area of Tehran city), *Quantitative Geomorphological Research*, 1(3), 57-67. (In Persian)
- [10] Ghorbani, Z., Khosravi, A., Mojtahedi, F. F., Javadnia, E., & Nazari, A. (2022). Use of InSAR Data for the Measurement of Land Subsidence in Response to Groundwater Fluctuations and Climate Change (Case Study: Ardabil Plain, Iran).
- [11] González1, P., Tiampo, K., Palano, M., , Cannavo, F., & Fernández, J., (2012). The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading, *Nature Geo Science*, 5.
- [12] Hawkes, A. D., Horton, B. P., Nelson, A. R., Vane, C. H., & Sawai, Y. (2011). Coastal subsidence in Oregon, USA, during the giant Cascadia earthquake of AD 1700. *Quaternary Science Reviews*, 30(3-4), 364-376.
- [13] Hill, D. (2012). Dynamic Stresses, Coulomb Failure, and Remote Triggering—Corrected, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6).
- [14] Jalini, M., Sepehr, A., Lashkari poor, G., & Rashki, A. (2018). Morphometric correlation of land subsidence related fissures and edaphic variability over Neyshabour Plain, *Quantitative Geomorphological Research*, 5(4), 59-75. (In Persian)
- [15] Japan International Cooperation Agency (2001) Final Report of Seismic Micro-zoning in Tehran, Center for Environmental Studies of Tehran. (In Persian)
- [16] King, G., Stein, R., & Lin, J, (1996). Static Stress Changes and the Triggering OF Earthquakes, Revised for *Bull. Seismol. Soc. Am.*
- [17] Koohbanani, H., Yazdani, M., & Hosseini, S. K. (2020) Spatiotemporal relation of RADAR-derived land subsidence with groundwater and seismicity in semnan-Iran, *Journal of natural Hazards*, 103(1), 785-798.
- [18] Krishnan, S., Kim, D., Jung, & Jungkyo. (2018). Subsidence in the Kathmandu Basin, before and after the 2015 Mw 7.8 Gorkha Earthquake, Nepal Revealed from Small Baseline Subset-DInSAR Analysis, *GIScience & Remote Sensing*, 55(4), 604-621.
- [19] Milker, Y., Horton, B. P., Vane, C. H., Engelhart, S. E., Nelson, A. R., Witter, R. C., ... & Bridgeland, W. T. (2015). Annual and seasonal distribution of intertidal foraminifera and stable carbon isotope geochemistry, Bandon Marsh, Oregon, USA, *The Journal of Foraminiferal Research*, 45(2), 146-155.
- [20] Mojtahedi, F. (2016) Investigation of Ardabil plain subsidence with respect to changes in groundwater level and climate fluctuation.
- [21] Mottaghi, A. (2017) Improving locations of earthquakes along the Central Alborz, Iran, using waveform cross-correlation-based time delays, *Iranian Journal of Geophysics*, 11(1), 9.
- [22] Padgett, J. S., Engelhart, S. E., Kelsey, H. M., Witter, R. C., Cahill, N., & Hemphill-Haley, E. (2021). Timing and amount of southern Cascadia earthquake subsidence over the past 1700 years at northern Humboldt Bay, California, USA. *GSA Bulletin*, 133(9-10), 2137-2156.

- [23] Wang, P. L., Engelhart, S. E., Wang, K., Hawkes, A. D., Horton, B. P., Nelson, A. R., & Witter, R. C. (2013). Heterogeneous rupture in the great Cascadia earthquake of 1700 inferred from coastal subsidence estimates, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2460-2473.
- [24] Wetzler, N., Shalev, E., Göbel, T., Amelung, F., Kurzon, I., Lyakhovsky, V., & Brodsk, E. (2019). Earthquake swarms triggered by groundwater extraction near the Dead Sea Fault, AGU 100, *Geophysical Research Letters*, 46, 8056–8063.
- [25] Zareh, H., (2011). Seismic Risk Assessment Based on Segmentation of Active Faults in Semnan Province, Fifteenth Symposium of Geological Society of Iran, 14-15 Dec 2001, Tarbiat Moalem University. (In Persian)