



Investigating the Ground Displacement Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry: A Case Study of Ilam Province and the Mountain Front Fault

Zahra Kal Mishi ¹, Iman Rousta ^{2*}, Rahman Zandi ³

^{1 & 2} Faculty of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

³ Department of Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 14 December 2023

Revised: 24 March 2025

Accepted: 06 April 2025

Available Online: 10 April 2025

Keywords:

Dehloran

Synthetic Aperture Radar
(SAR)

Earthquake-Induced
Ground Deformation

Active Faults

Sentinel-1A Satellite

ABSTRACT

One of the most significant impacts of earthquakes is ground displacement, which plays a major role in causing both human and financial losses. Dehloran, located in the southern part of Ilam Province, is a region that is frequently affected by both small and large earthquakes. In this study, 10 Sentinel-1A radar images, both before and after earthquakes, were used to analyze the subsidence and uplift in cities, dams, and surrounding areas. To validate the results of ground displacement, pixel coherence evaluation was conducted, which indicated high accuracy in interferometric measurements. The results showed that the northern regions of Dehloran experienced subsidence, while the southern areas experienced uplift. Displacements from earthquakes with magnitudes above 4 on the Richter scale in the region were recorded as centimeter-scale displacements. This study shows that even small earthquakes can cause significant damage in this area. The findings of this research can be useful for identifying high-risk and low-risk areas to reduce damages in urban development, dam construction, and oil and gas projects.

*Corresponding author: Dr. Iman Rousta

E-mail address: irousta@yazd.ac.ir

How to cite this article: Kal Mishi, Z., Rousta, I., & Zandi, R. (2025). Investigating the Ground Displacement Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry: A Case Study of Ilam Province and the Mountain Front Fault. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 287-307. <https://doi.org/10.22067/geoe.h.2025.85880.1443>



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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Ground displacement caused by natural factors such as earthquakes and anthropogenic factors like subsidence can lead to significant changes in the landscape and the occurrence of natural disasters. Dehloran, due to its oil resources and improper construction practices, is one of the most vulnerable regions to earthquakes. With the advancement of remote sensing technologies, methods like Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) have become precise tools for monitoring such changes and evaluating the extent of ground displacement. Compared to traditional methods like geodetic surveys, these technologies are faster, more cost-effective, and more accurate, allowing for large-scale monitoring of natural hazards.

Study Area

Dehloran County, located in Ilam Province in southwest Iran, is a seismic region rich in oil and gas reserves. It is the second most populous county in Ilam Province and lies 130 km from the provincial capital. Dehloran spans from 46.31°E to 48.2°E longitude and from 32.3°N to 33.19°N latitude. It is bordered by Abadan County to the north, Iraq to the south, Khuzestan Province to the east, and Mehran County to the west. The region is also intersected by active faults, including the Mountain Front Fault, which is the primary seismic source in the area.

Results and Discussion

In this study, to estimate ground displacement in Dehloran County, 10 Sentinel-1A images were analyzed using SNAP and ArcGIS software in combination with radar interferometry (InSAR) techniques. The results of data processing showed that the northern parts of Dehloran County experienced the most significant subsidence, while the plains and southern areas showed signs of uplift. Displacement maps from 2015, 2019, and 2020 revealed notable land surface elevation changes. In 2015, the most significant subsidence was observed in the northern parts of the county, likely caused by fault activity and seismic events. In 2019 and 2020, displacement levels initially decreased; however, in 2020, a sharp increase in displacement was recorded, again likely due to new earthquakes and reactivation of faults. An analysis of soil types overlaid on displacement maps revealed that clay and limestone soils exhibited displacements ranging from +7 to -3 cm, while badlands showed displacements between +3 and +2 cm. These findings indicate serious implications for infrastructure and water resources, particularly in urban and rural areas located near active faults.

Conclusion

This research demonstrates that radar interferometry (InSAR) is an effective and reliable tool for estimating ground displacement caused by low-magnitude earthquakes in Dehloran County. This study is the first to investigate displacements resulting from earthquakes below magnitude 5 on the Richter scale in the region. The findings indicate that small earthquakes, despite their low magnitude, can have cumulative and significant impacts on urban infrastructure, oil and gas fields, and rural communities. Displacements in areas such as Pahleh City and around active faults between 2015 and 2020 ranged from +7 cm to -10 cm, highlighting the vulnerability of the region's infrastructure to seismic activity. Furthermore, the repeated occurrence of small earthquakes in various locations suggests a potential for larger seismic events and ongoing ground deformation in the future. These displacements, particularly in sensitive zones such as oil and gas fields, carry serious risks. Therefore, continuous monitoring and reinforcement of infrastructure are essential to mitigate potential damage, especially given the ongoing threats from subsidence and active ground deformation.



بررسی میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین لرزه با استفاده از تداخل سنجی راداری: مطالعه موردی استان ایلام و گسل پیشانی کوهستان

زهرا کل میشی^۱، ایمان روستا^{۲*}، رحمان زندی^۳

^۱ گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
یکی از مهمترین اثرات زمین لرزه‌ها، جابجایی سطح زمین است که نقش عمده‌ای در ایجاد خسارات جانی و مالی ایفا می‌کند. شهرستان دهلران در بخش جنوبی استان ایلام یکی از مناطقی است که همواره تحت تأثیر زمین لرزه‌های کوچک و بزرگ قرار دارد. در این راستا، ۱۰ تصویر راداری ماهواره Sentinel-1A قبل و بعد از زمین لرزه‌ها برای تحلیل میزان پایین رفتگی و بالآمدگی در شهرها، سدها و مناطق اطراف استفاده شد. برای اعتبارسنجی نتایج جابجایی سطح زمین، ارزیابی همدوسی پیکسل‌ها انجام شد که نشان دهنده دقت بالا در اندازه گیری‌های تداخل سنجی بود. نتایج نشان داد که نواحی شمالی شهرستان دهلران دچار پایین رفتگی شده و نواحی جنوبی بیشتر دچار بالآمدگی گردیده‌اند. جابجایی‌های ناشی از زمین لرزه‌های با بزرگای بالای ۴ ریشتر در منطقه به صورت جابجایی‌های سانتی متری ثبت گردید. این مطالعه نشان می‌دهد که حتی زمین لرزه‌های کوچک می‌توانند آسیب‌های جبران ناپذیری در این منطقه ایجاد کنند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای شناسایی مناطق پرخطر و کم‌خطر به منظور کاهش خسارات در پروژه‌های شهرسازی، سدسازی و نفت و گاز مفید واقع گردد.	تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷ کلمات کلیدی: رادار با دهانه ترکیبی (SAR) تغییر شکل زمین ناشی از زلزله گسل‌های فعال سنتینل-۱ دهلران

مقدمه

جابجایی سطح پوسته زمین ناشی از عوامل طبیعی (زمین‌لرزه) و عوامل غیرطبیعی (فرونشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی، نفت، معدن) است. این جابجایی‌های طبیعی یا انسان‌ساخت، شکل زمین را تغییر داده و موجب بلایای طبیعی و خسارات می‌شود (Zare Kamali, Al-Husseini Al-Madrassi & Naghdi, 2017). با بررسی درست این موضوع و ارائه مدل‌های می‌توان به مدیران در این زمینه برای مدیریت مخاطراتی همچون زمین‌لرزه کمک کرد (Maghsoudi & Mahdavi, 2016). شهرستان دهلران یکی از مناطق نفت خیز ایران است و سدهای بزرگ در آن احداث شده است و دارای شهر و روستاهای با بافت سنتی و ساخت سازه‌های غیر اصولی است و از این رو این مطالعه شهرستان دهلران دارای اهمیت است و وقوع زمین‌لرزه می‌تواند باعث آسیب‌های جبران ناپذیری شود (Basareh, Joudeki, Farzipoursain & Safaei, 2013). امروزه با گسترش فناوری‌های نوین با روش‌های مختلف می‌توان به پایش تغییرات سطح پوسته زمین پرداخت. فناوری «سنجش از دور» به خصوص با استفاده از داده‌های رادار، یکی از ابزارهایی است که می‌تواند جابجایی پوسته را در بلایای طبیعی مانند زلزله بررسی کند و نشان دهد که تا چه اندازه سطح پوسته زمین جابجا شده است (Joyce, Wright, Samsonov & Ambrosia, 2009). ذکر این نکته ضروری است که در گذشته این امر با روش‌های ژئودتیکی انجام می‌شد که از معایب آن صرف زمان طولانی برای اندازه‌گیری بود؛ اما فناوری سنجش از دور راداری، سطح وسیع‌تری از زمین را پوشش می‌دهد و هزینه و زمان کمتری نسبت به روش‌های زمینی می‌برد. با گسترش فناوری سنجش از دور راداری، از تصاویر SAR^۱ برای تولید محصولات گوناگون استفاده شد (Sansosti, Casu, Manzo & Lanari, 2010). یکی از این روش‌ها، تکنیک «تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی» (InSAR^۲) است که از اختلاف فاز بین زوج تصویر راداری اطلاعاتی مانند جابجایی و یا ارتفاع را استخراج می‌کند (Ho Tong Minh, Hanssen & Rocca, 2020) و بنابراین تغییر شکل یا میزان جابجایی پوسته زمین برآورد می‌شود (Auriac et al., 2013).

در زمینه تداخل‌سنجی راداری در سطح جهان و ایران پژوهش‌های صورت گرفته است به آن می‌پردازیم. زارع کمالی و همکاران (Zare Kamali et al., 2017) به مطالعه‌ی میزان جابجایی عمودی زمین پرداخته‌اند. در این پژوهش میزان جابه‌جایی عمودی سطح زمین در اراضی تهران با استفاده از تحلیل سری زمانی بر مبنای الگوریتم طول خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS^۳) و تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با روزه مصنوعی (DINSAR^۴) مورد مطالعه قرار گرفته است که در این پژوهش برای این منظور از ۱۹ تصویر باند C سنجنده ASAR و ۱۱ تصویر باند X سنجنده (TERRA SAR) استفاده شد. بررسی نتایج دو سنجنده نشان داد که میزان نشست برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۰/۷۶۱ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۰/۷۷۷ میلی‌متر در روز است. همچنین نتایج نشان داد که برخی نقاط بالآمدگی داشته‌اند که میزان بالآمدگی برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۰/۵۲۹ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۰/۴۷۶ میلی‌متر در روز است. و نتایج نشان داد که مناطق نشست و بالآمدگی برای هر دو سنجنده نزدیک به هم است. عبدالملکی و همکاران (Abdulmaleki, Maleki & Khazaei, 2021) به مطالعه جابجایی ارتفاعی زمین و تحلیل اثرات ژئومورفولوژیکی با استفاده از داده‌های دورسنجی پرداختن که از دو تصویر ماهواره Sentinel-1 به منظور بررسی میزان تغییرات جابجایی منطقه سرپل ذهاب استفاده کردند و این نتیجه به دست آمد که تکنیک تداخل‌سنجی راداری، ابزاری کارآمد برای محاسبه میزان جابجایی زمین است. آتزوری و همکاران (Atzori, Manunta, Fornaro, Ganas & Salvi, 2008) به مطالعه جابجایی زلزله آتن، با استفاده از تداخل‌سنجی چندزمانه تفاضلی پرداختند. در این مطالعه از صد تصویر برای برآورد جابجایی زمین در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ استفاده گردید و دیده شد که تحلیل چندزمانه تفاضلی، روشی مناسب برای مطالعه شکستگی‌های بزرگ ناشی از زلزله است و داده‌های ماهواره Sentinel-1 با موفقیت تغییر شکل سطح را

1-Synthetic Aperture Radar

2-Interferometric Synthetic Aperture Radar

3- Small Baseline Subset

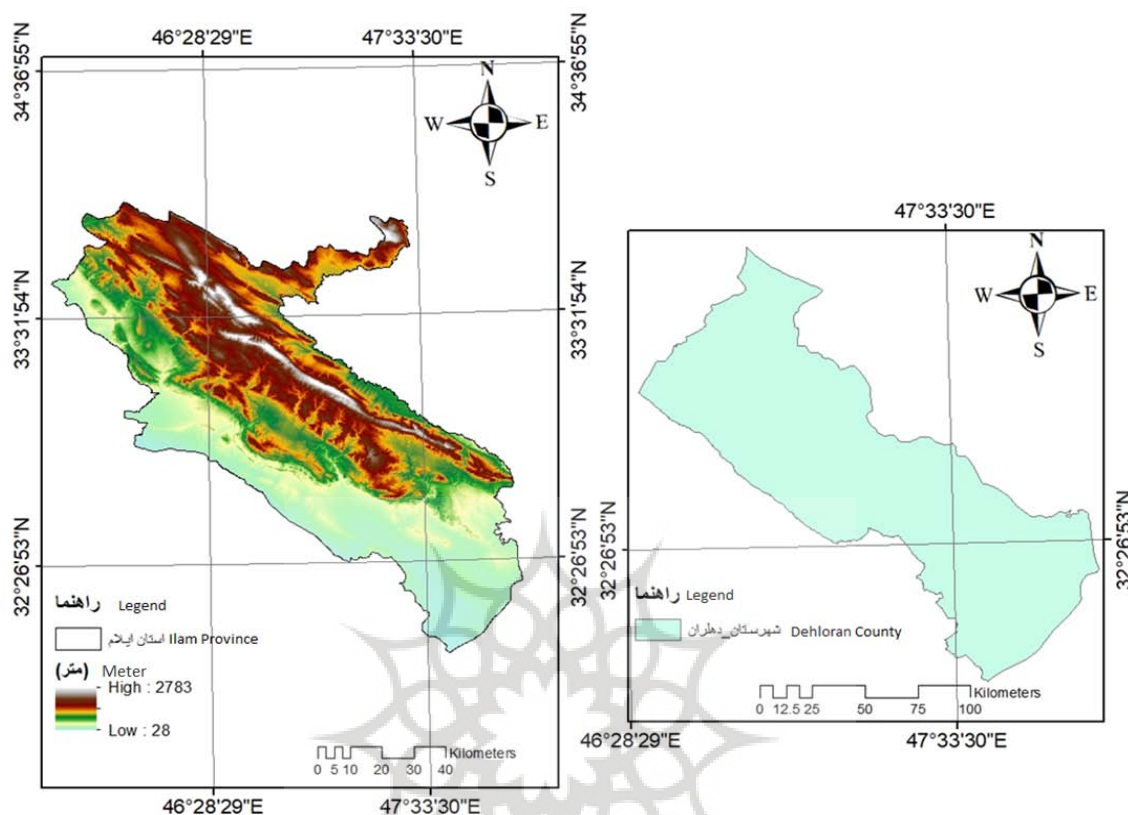
4-Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

برای بازه‌ای ۱۲ روزه برآورد کرده است. ساری‌چیخنا و همکاران (Sarychikhna et al., 2009) به بررسی جابجایی سطح و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در زلزله ۵۴ در سال ۲۰۰۶ در گسل مورلیا در کالیفرنیا پرداختند. آنها از تصاویر ماهواره Envisat و روش تداخل‌سنجی راداری برای شناسایی جابجایی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که اختلاف بین مدل و داده‌های ترازایی شده عمدتاً بین ۶-۰ سانتی‌متر است. دلونگ و همکاران (Delong et al., 2016) تغییر شکل سطح زمین در زلزله ۶ در ناپا ۲۰۱۴ را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از تصاویر راداری بالگرد و پهپاد استفاده شد و نتایج نشان داد که تغییر شکل در امتداد گسل بوده و لغزش پس‌لرزه‌ای در گسل اصلی رخ داده است. شهرستان دهلران در یکی از مناطق مهمی است که دارای سد، میادین نفتی، میادین گازی، شهرها و روستاها است. سالانه زمین لرزه‌های بزرگ و کوچکی در شهرستان دهلران رخ می‌دهد و این دو موضوع باعث اهمیت شهرستان دهلران شده است و به همین علت مطالعه و پایش زمین لرزه‌های بزرگ و کوچک در شهرستان دهلران امری ضروری و مهم است. بنابراین مطالعه حاضر به برآورد میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین لرزه‌های ۴/۶ ریشتری ۲۳ اسفند سال ۱۳۹۸، ۴/۹ ریشتری سال ... و ۴/۳ ریشتری اسفند ۱۳۹۷ شهرستان دهلران با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداخته است. این مطالعه گامی است در جهت به دست آوردن نقشه میزان جابجایی سطح زمین که در بروز حوادث دارای اهمیت می‌باشد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان در مناطق شهری و روستایی تحت تأثیر زمین‌لرزه با انجام پیش‌بینی‌های لازم از ساخت ساز در پرخطر جلوگیری کرده و به هدایت ساخت سازها به سمت مناطقی که کمتر تحت تأثیر زمین‌لرزه قرار می‌گیرند، مبادرت کرد. همچنین با داشتن نقشه میزان جابجایی سطح زمین می‌توان میادینی که تحت تأثیر زمین‌لرزه قرار گرفته‌اند و میزان هدر رفت انرژی را برآورد کرد و از هدر رفتن بیشتر آن جلوگیری کرد و همچنین با اندازه‌گیری میزان جابجایی بدنه سدها می‌توان از آسیب به بدنه سدها و خسارات احتمالی جلوگیری کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

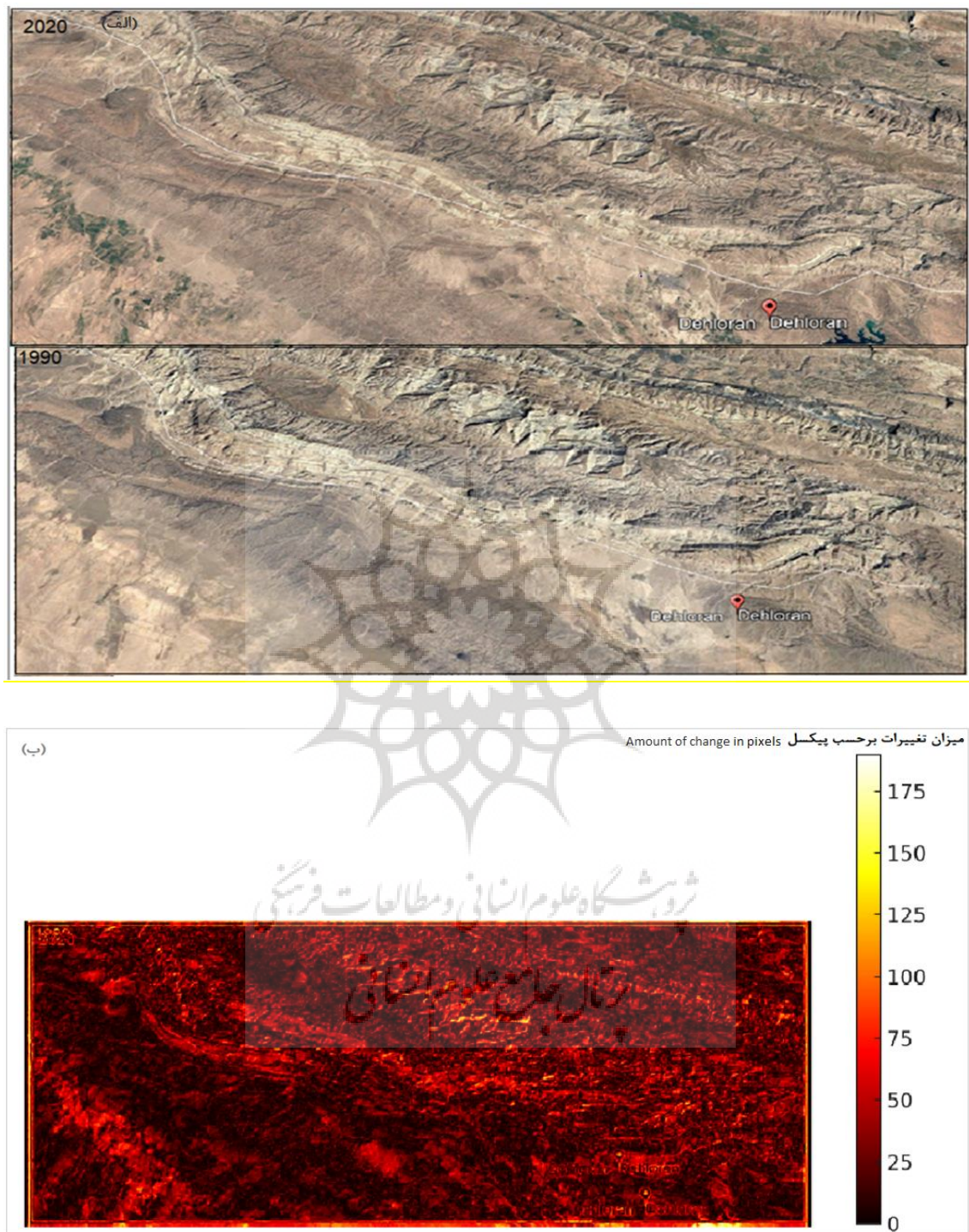
شهرستان دهلران در استان ایلام از مناطق نفت‌خیز کشور محسوب می‌شود. دهلران دومین شهرستان استان از لحاظ جمعیت است. مساحت این شهرستان، ۶۷۸۵ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا ۲۱۶ متر می‌باشد. شهرستان دهلران در طول جغرافیایی ۴۶.۳۱.۱۹ غربی تا ۴۸.۲.۲۹ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲.۳.۱۱ جنوبی تا ۳۳.۱۹.۱۴ شمالی قرار دارد. شهرستان دهلران در جنوب شرقی استان ایلام است و شهر دهلران ۱۳۰ کیلومتر با مرکز استان فاصله دارد. شهرستان دهلران از شمال به شهرستان آبدانان، از جنوب به کشور عراق، از شرق به استان خوزستان و از غرب به شهرستان مهران محدود می‌شود و همچنین موقعیت گسل در شکل ۲ بر روی تصاویر گوگل ارث برای سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه استان ایلام (سمت چپ) و نقشه شهرستان دهلران (سمت راست)

Fig.1. Map of Ilam Province (left) and map of Dehloran County (right)

در شکل ۲ نقشه تغییرات بین سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ در دهلران را مشاهده می‌کنید. در این تصویر، نواحی روشن‌تر نشان‌دهنده تغییرات بیشتری هستند. به نظر می‌رسد که برخی مناطق در طول این دوره تغییرات قابل توجهی داشته‌اند، که ممکن است ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناسی مانند جابجایی گسل باشد. مقدار تغییرات در این نقشه به واحد شدت تغییرات پیکسلی در تصاویر است (بر اساس مقدار روشنایی در تصاویر ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰). این مقدار مستقیماً با تغییرات سطح زمین مرتبط است، در شکل ۲ تغییرات نشان داده شده است و نقاطی که در طول زمان دچار تغییرات شده است به رنگ زرد نشان داده شده است.



شکل ۲- الف) موقعیت گسل پیشانی کوهستان شهرستان دهلران بر روی تصاویر گوگل ارث برای سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ ب) میزان تغییرات بین سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ در گسل پیشانی کوهستان در شهرستان دهلران

Fig. 2. A) Location of the mountain foreland fault in Dehloran County on Google Earth images for 2020 and 1990
B) Amount of changes between 1990 to 2020 in the mountain foreland fault in Dehloran County

جدول ۱- بررسی تغییرات ارتفاع با استفاده از مدل رقومی ارتفاع برای گسل پیشانی کوهستان سال ۲۰۱۵ نسبت به سال ۲۰۲۰

Table 1- Examination of elevation changes using the digital elevation model for the Kohistan foreland fault in 2015 compared to 2020

نقاط Points	ارتفاع نقاط سال ۲۰۱۵ Height of points in 2015	ارتفاع نقاط سال ۲۰۲۰ Height of points in 2020	تفاضل نقاط سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ Difference between points in 2015 and 2020
1	1036.493	1036.541	1
2	1046.286	1036.815	4.4
3	669.0253	668.223	0.8
4	411.2166	412.7835	1.5
5	738.6406	740.9424	2.3

در جدول شماره ۱ با استفاده از مدل رقومی ارتفاع برای سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ نسبت اختلاف ارتفاع محاسبه شد و نشان دهنده تغییرات زیاد هست نقاط ۱، ۴، ۵ افزایش ارتفاع داشته و نقاط ۲ و ۳ کاهش ارتفاع داشته است. تغییرات ارتفاعی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای سال ۲۰۱۵-۲۰۲۰ و تغییرات پیکسل‌ها در تصاویر گوگل ارث برای سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان دهنده فرایندهای طبیعی مانند فرسایش، رسوب‌گذاری، جابجایی‌های زمین‌شناسی و تأثیرات انسانی مانند ساخت سازه یا استخراج معدن است که نشان دهنده جابجایی‌های در سطح زمین است و به همین علت با استفاده از تصاویری راداری سار به بررسی میزان تغییرات ناشی از زمین لرزه پرداخته شده است.

دریافت داده‌ها

تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) یکی از ابزارهای جدید برای برآورد میزان جابجایی سطح زمین و تغییرات سطح زمین است (Burgmann, Rosen & Fielding, 2000). در این پژوهش از ۸ تصویر ماهواره Sentinel-1A، مربوط به قبل و بعد از زمین‌لرزه‌ای خفیف از وب کپرنیک (scihub. Copernicus. Eu) اخذ شد، مشخصات تصاویر در جدول ۱ نمایش داده شده است. پیش پردازش‌ها تصاویر نیز در نرم افزار SNAP، نقشه‌نمایی در Arc GIS انجام شد.

جدول ۲- داده‌های ماهواره‌ای مورده استفاده برای محاسبه جابجایی سطح زمین در گسل پیشانی کوهستان، شهرستان دهلران

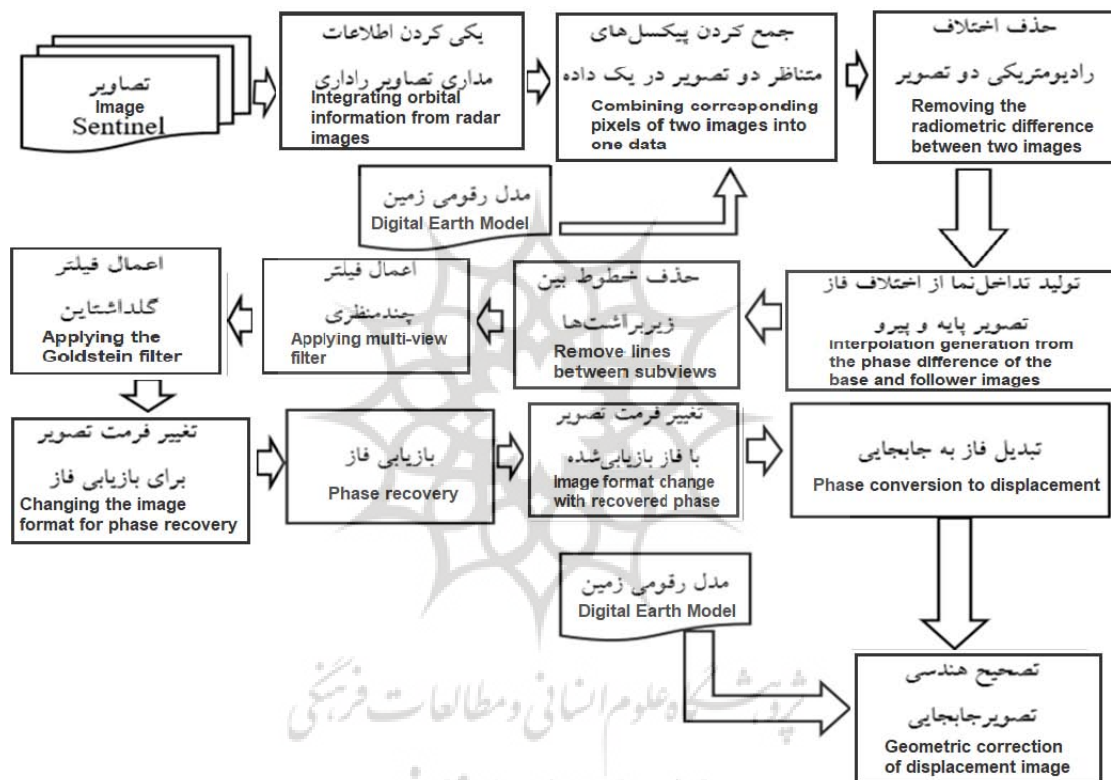
Table 2- Satellite data used to calculate ground surface displacement on the Kohistan foreland fault, Dehloran County

شماره Number	تاریخ تصاویر Date	فرمت تصاویر Image Format	حالت تصویر برداری Imaging Mode	گذر تصویر برداری Imaging Pass
1	2015/02/14	SLC	IW	نزولی (Descending)
2	2015/03/10	SLC	IW	نزولی (Descending)
3	2015/02/03	SLC	IW	نزولی (Descending)
4	2015/03/11	SLC	IW	نزولی (Descending)
5	2019/02/17	SLC	IW	نزولی (Descending)
6	2019/03/01	SLC	IW	نزولی (Descending)
7	2020/02/24	SLC	IW	نزولی (Descending)
8	2020/03/19	SLC	IW	نزولی (Descending)

فرمت این تصاویر، مختلط تک‌نگاه (SLC)^۱ با حالت تصویربرداری برداشت پهن برای تداخل‌سنجی (IW)^۲ و مدار همه تصاویر نزولی است. تصاویر راداری این ماهواره دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی است و برای به دست آوردن نقشه جابجایی سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا مناسب می‌باشد (Hanssen, 2005).

روش انجام پژوهش

در این پژوهش، تداخل‌سنج‌ها طی مراحل شکل ۳ با نرم‌افزار SNAP انجام شد و نتایج نهایی پس از صحت‌سنجی با نرم‌افزار ArcGIS به شکل نقشه درآمد.



شکل ۳- مراحل اجرای تحقیق

Fig.3. Research implementation steps

تولید تداخل‌نما یکی از مهمترین بخش‌های پردازش تصاویر راداری است. از حاصل ضرب تصویر راداری اول در مختلط مزدوج تصویر دوم، تداخل‌نما به دست می‌آید (Massonnet & Feigl, 1998). فاز تداخل‌نما، اختلاف فاز زوج تصویر راداری و دامنه تداخل‌نما حاصل ضرب دامنه‌های آن دو تصویر است.

پس از محاسبه تداخل‌نما، فاز زمین مسطح و همچنین فاز ناشی از توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM حذف گردید. در تداخل‌سنجی، علاوه بر تداخل‌نما، تصویر کوه‌رنسی نیز به دست می‌آید. تصویر کوه‌رنسی نشان‌دهنده میزان تطابق

سیگنال‌های تداخل‌سنجی است و ارزش هر پیکسل آن عددی بین صفر تا یک است که هر چه قدر به یک نزدیک‌تر باشد، محاسبات از دقت بالاتری برخوردار است (Shami, Mashhadi Hosseinali & Babaei, 2019). مقادیر بالاتر از ۰/۶ نشان‌دهنده همدوسی بالا و دقتی مطلوب است.

تصاویر راداری از پیکسل‌هایی با درجات خاکستری تشکیل شده است. در اثر تداخل سازنده و مخرب در امواج بازپراکنش شده، در پیکسل‌های این تصاویر نویز ایجاد می‌شود. نویز در تصاویر راداری، نویز اسپکل^۱ است و شبیه لکه‌هایی با بافت دانه‌دانه است و باعث کاهش کیفیت تصویر می‌شود. این لکه‌ها را به طور کامل نمی‌توان حذف کرد ولی می‌توان آنها را کاهش داد. برای کاهش این لکه‌ها، انواع فیلترها اعمال می‌شود (Maghsoudi & Mahdavi, 2016).

عوامل زیادی همچون خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی، پوشش گیاهی و خطای مدار در ایجاد نویز در تداخل‌نما نقش دارند. نویزها باعث کاهش کیفیت تصویر می‌شوند. برای بهبود کیفیت تصویر، در ابتدا فیلتر چندمنظری^۲ اعمال شد که برای نویزهای ناشی از خط مبنای زمانی، خط مبنای مکانی و پوشش گیاهی موثر است و با میانگین‌گیری از پیکسل‌های مجاور محاسبه می‌شود. برای کاهش بیشتر نویز از فیلتر گلدشتاین^۳ استفاده شد. این فیلتر، نواحی با فازهای با انسجام ضعیف و انسجام به شدت بالا را حذف کرده و دید حاشیه را افزایش می‌دهد. این فیلتر از تبدیل فوری سریع (FFT)^۴ برای افزایش نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌کند (Baran, Stewart, Kampes, Perski & Lilly, 2003).

در ادامه، برای تبدیل مقادیر فاز در تداخل‌نما به مقادیری که نشان‌دهنده جابجایی پوسته زمین است، بازیابی فاز^۵ انجام می‌شود. مقادیر اختلاف فاز در تداخل‌نما، عددی بین ۰ تا 2π است و مقادیر بیشتر، گسسته می‌شود. با عمل بازیابی فاز، ابهام فاز از بین می‌رود و ارزش پیکسل‌ها به مقادیر واقعی و پیوسته تبدیل می‌شود (Mehrabi & Pourkhosravani, 2018). تصویر به دست آمده است، بالا آمدگی و پایین رفتگی زمین را با واحد فاز نشان می‌دهد. در پایان، مقادیر پیوسته اختلاف فاز میان دو تصویر قبل و بعد زمین‌لرزه، به جابجایی در جهت دید ماهواره با واحد طول تبدیل می‌شود.

برای ارزیابی دقت پیکسل‌های جابجایی، از میزان همدوسی^۶ تصویر استفاده شد. تصویر همدوسی، میزان تطابق سیگنال‌های تداخل‌سنجی را نشان می‌دهد. مقدار پیکسل‌های همدوسی عددی بین ۰ و ۱ است و هر چه این مقدار بیشتر باشد، دقت کار بالاتر است. عمده پیکسل‌ها دارای همدوسی ۰/۶ به بالا است که دقت کلی خوبی را نشان می‌دهد.

یافته‌های تحقیق

مطالعات آماری زلزله‌ها در منطقه مورد مطالعه

برای مطالعه منطقه مورد نظر، یک دوره زمانی ۳۰ ساله از ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شد. زلزله‌ها معمولاً تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری خود را تحت تاثیر قرار می‌دهند؛ بنابراین دایره‌ای با مرکزیت رومرکز زلزله دهلران و شعاع ۱۰۰ کیلومتر رسم شد و تمام زمین‌لرزه‌های آن بررسی گردید. نتایج نشان داد در این بازه، تعداد ۷۱۰ زلزله رخ داده است. اولین زلزله با بزرگای ۴/۴ و عمق ۳۳ کیلومتر در تاریخ ۱۹۹۰/۱/۱ و آخرین زلزله با بزرگای ۴/۲ و عمق ۱۰ کیلومتر در تاریخ ۲۰۲۰/۱۱/۲ رخ داده است. همچنین بزرگ‌ترین زلزله، بزرگای ۶/۲ و کوچکترین آنها، بزرگای ۳/۲ داشته است و بیشترین عمق زلزله، ۱۰۰/۴ و کمترین آن ۰/۹ کیلومتر بوده است. بیشترین زمین‌لرزه‌ها در بزرگای بین ۴ تا ۵ می‌باشند. بیشترین تراکم زلزله‌ها در محدوده جغرافیایی در طول جغرافیایی ۴۷ تا ۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ تا ۳۳ شمالی قرار دارد. آمار فراوانی زلزله‌ها در جدول ۳ آمده است.

1- Spackle noise
2- Mutilooking filter
3- Goldstein filter

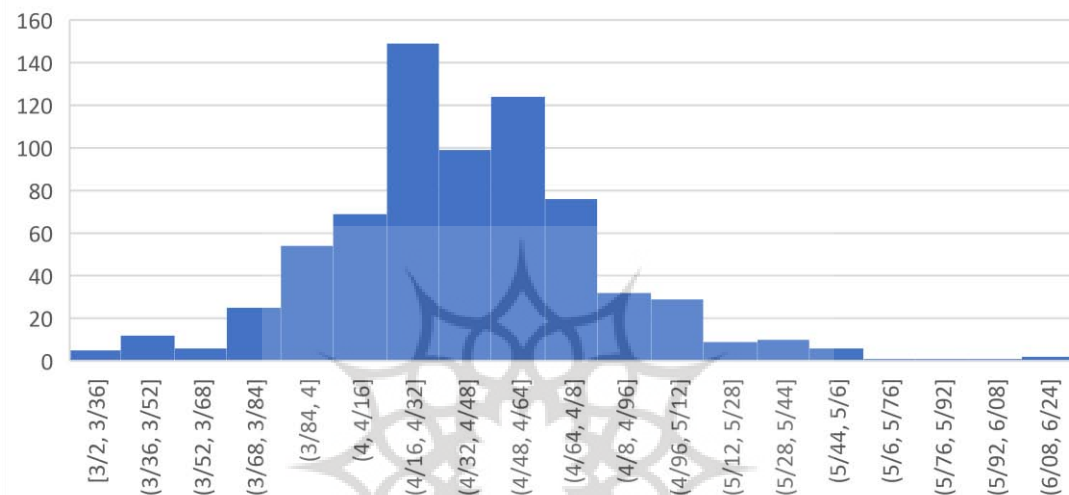
4- Fast Fourier Transform
5- Unwrapping
6- Coherence

جدول ۳- فراوانی زمین‌لرزه در شهرستان دهلران در طی ۳۰ سال گذشته تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر

Table 3- Earthquake frequency in Dehloran County over the past 30 years within a radius of 100 km

بزرگای زلزله (Earthquake magnitude)	3-4	4-5	5-6	6-7
تعداد (Number)	59	592	56	3

برای فهرست زلزله‌های مورد مطالعه، نمودار فراوانی بر اساس بزرگای تهیه گردید (شکل ۴). بیشترین فراوانی مربوط به زلزله‌های با بزرگای بین ۴ تا ۵ است که زمین‌لرزه‌های خفیف شناخته می‌شوند.

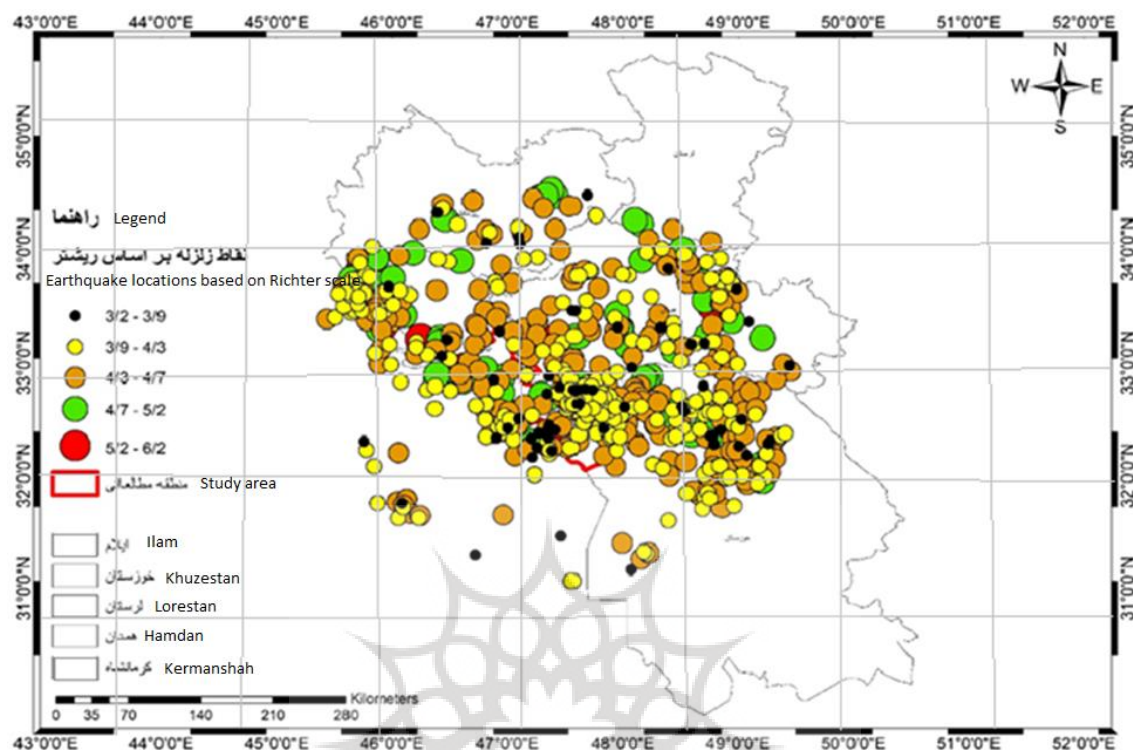


شکل ۴- نمودار فراوانی زلزله‌ها در شهرستان دهلران بر اساس بزرگای در بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر

Fig.4. Earthquake frequency chart in Dehloran County based on magnitude between 1990 and 2020 up to a radius of 100 km

شکل ۵، نقشه پراکنش رومرکز زلزله‌ها بر اساس بزرگای را نشان می‌دهد. در این نقشه، زلزله‌ها بر حسب بزرگای به پنج دسته تقسیم شده‌اند: دسته اول ۳/۹-۳/۲ که بیشتر در جنوب نقشه تمرکز دارند و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم از تعداد آنها کاسته می‌شود. از طرفی این زمین‌لرزه‌ها در قسمت غربی بیشتر از جنوب منطقه است و در جنوب استان ایلام از تراکم بیشتر و در شمال استان خوزستان از تراکم کمتری برخوردارند و در دیگر استان‌ها تعداد ناچیزی دارند. دسته دوم ۴/۳-۳/۹ که در شمال منطقه تراکم کمتری داشته و در غرب بیشتر رخ داده است و با حرکت به سمت شرق، از تعداد آنها کاسته می‌شود. این زمین‌لرزه‌ها در جنوب استان ایلام دارای تراکم بیشتری نسبت به شمال آن است و در استان خوزستان دارای تراکمی بیشتر و در استان همدان دارای پراکندگی بیشتری است.

دسته سوم ۴/۷-۴/۳ که دارای بیشترین تعداد زمین‌لرزه‌ها در استان‌های ایلام و خوزستان است. هر چه به طرف جنوب و غرب منطقه حرکت می‌کنیم بر تعداد این زمین‌لرزه‌ها افزوده و هر چه به سمت شرق می‌رویم پراکنده‌تر می‌شوند. با حرکت به سمت شمال منطقه، از تعداد این زمین‌لرزه‌ها کاسته می‌شود. دسته چهارم ۵/۲-۴/۷ که با تعداد کم در استان‌های ایلام و خوزستان بیشتر رخ داده است. هر چه از مرکز منطقه به سمت جنوب و شرق حرکت می‌کنیم تعداد آنها بیشتر و هر چه از مرکز به سمت شمال منطقه برویم تعداد آنها کاهش می‌یابد. دسته پنجم ۶/۲-۵/۲ که با تعداد بسیار کم در غرب منطقه بیشتر رخ داده است. می‌دانیم که زلزله‌های با بزرگای بیشتر، کمتر رخ می‌دهند. در این منطقه، بیشترین تعداد زلزله‌ها در استان ایلام و در جنوب آن رخ داده است.

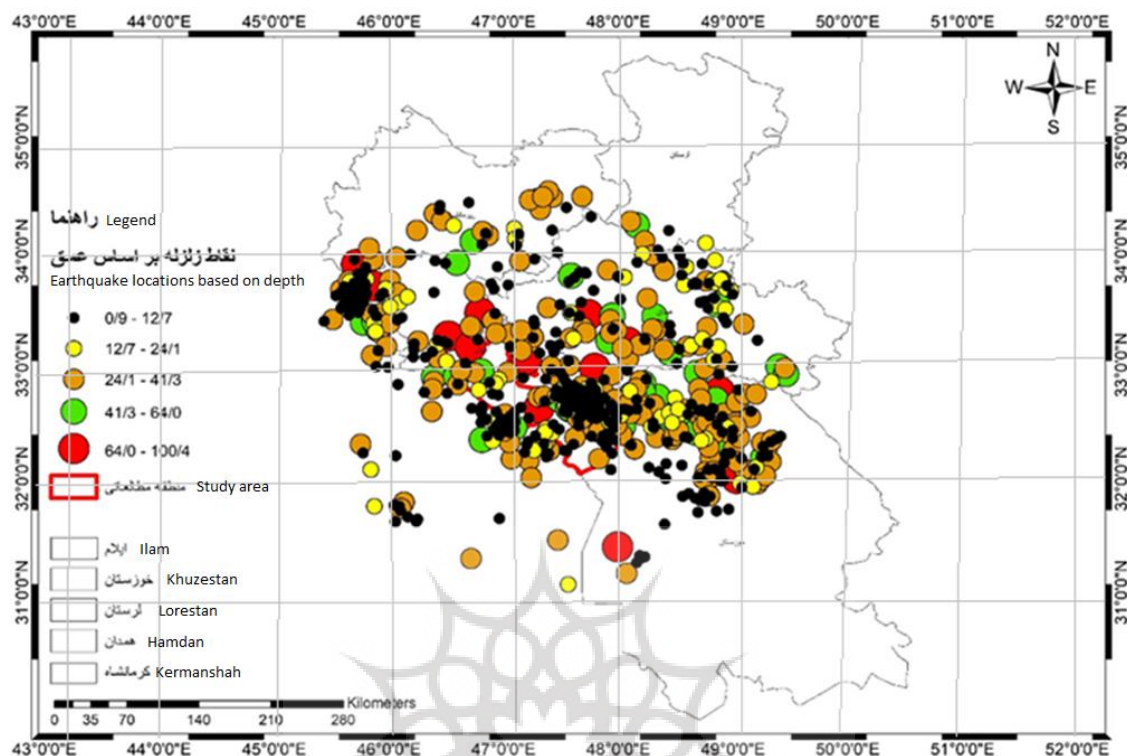


شکل ۵- نقشه پراکنش زمین لرزه ها در شهرستان دهلران بر اساس ریشتر در بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر

Fig.5. Earthquake distribution map in Dehloran County based on Richter between 1990 and 2020 up to a radius of 100 km

شکل ۶، پراکنش زمین‌لرزه‌ها بر اساس عمق را نشان می‌دهد. در این نقشه، زمین‌لرزه‌ها بر اساس عمق (km) به پنج دسته تقسیم شده‌اند: دسته اول ۰/۹-۱۲/۷ که بیشترین فراوانی را دارد و در جنوب استان ایلام بیشتر از شمال آن رخ داده است. در شرق منطقه، این زمین‌لرزه‌ها به صورت پراکنده رخ داده‌اند. دسته دوم ۱۲/۷-۲۴/۱ که بیشترین تمرکز آنها در استان خوزستان است. هر چه از جنوب منطقه به سمت شمال و از مرکز به سمت شرق و غرب حرکت کنیم، از تعداد آنها کاسته می‌شود. دسته سوم ۲۴/۱-۴۱/۳ که بیشترین تعداد آنها به ترتیب در استان‌های خوزستان، ایلام و همدان رخ داده است. تمرکز این زلزله‌ها در جنوب منطقه بیشتر از شمال آن است و در شرق و غرب منطقه نیز به صورت پراکنده رخ داده‌اند.

دسته چهارم ۴۱/۳-۶۴ که فراوانی آنها کمتر از همه بوده و بیشترین رخداد آنها در استان ایلام و به صورت پراکنده است. هر چه از مرکز منطقه به سمت شرق برویم بر تعداد آنها به صورت پراکنده افزوده می‌شود و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم از تعداد آنها کاسته شده و به صفر می‌رسد. در جنوب منطقه نیز تعداد آنها بسیار اندک است. دسته پنجم ۱۰۰/۴-۶۴ که تعدادشان بسیار اندک است. بیشتر این زمین‌لرزه‌ها در غرب منطقه و در استان ایلام رخ داده است و در شمال منطقه تعداد آنها به صفر می‌رسد. در جنوب و شرق منطقه نیز از تعداد آن کاسته می‌شود. در نتیجه، بیشترین زلزله‌ها در عمق‌های کم و در استان ایلام و در جنوب آن رخ داده است.



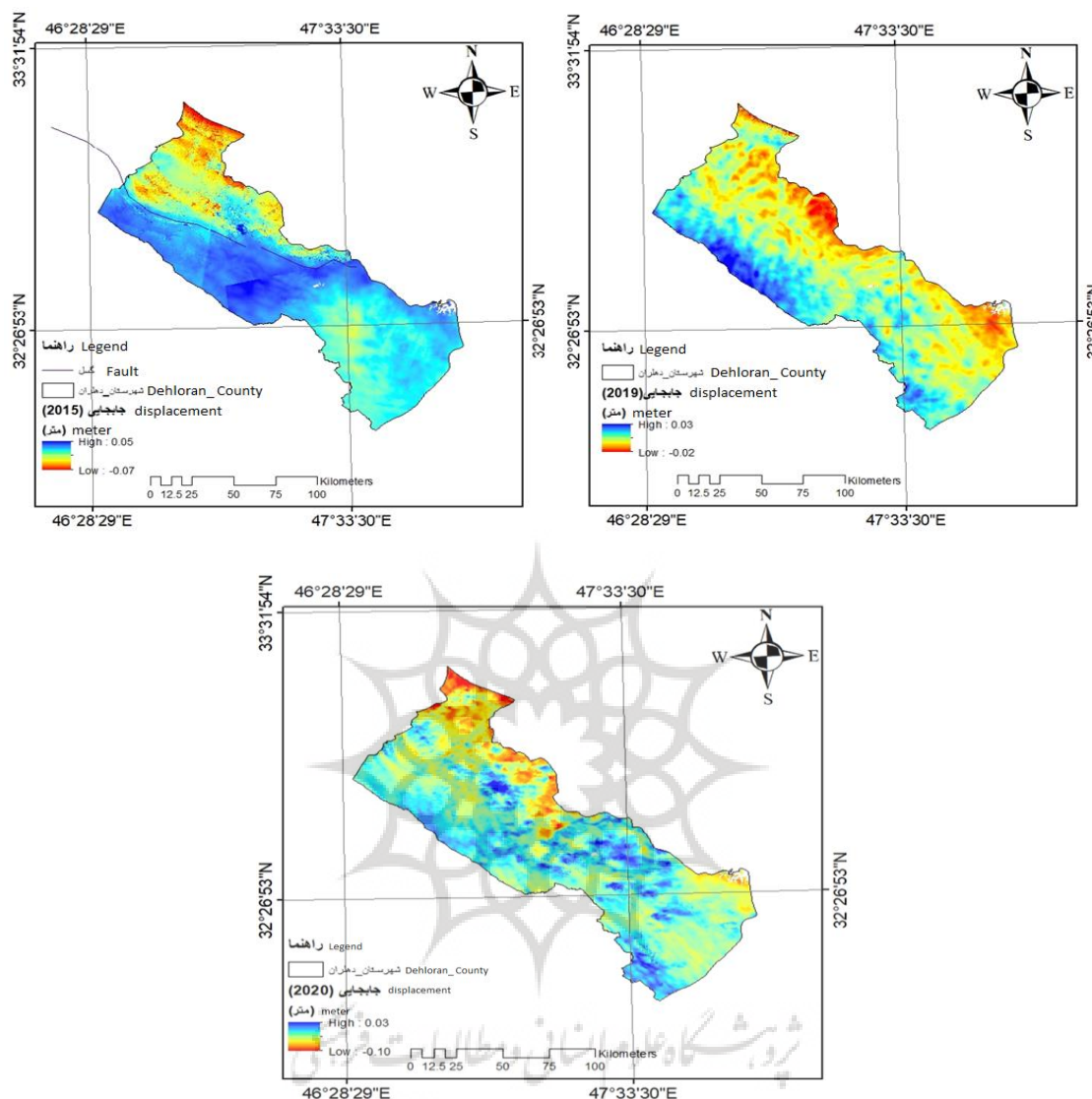
تصویر ۶- نقشه پراکنش زمین‌لرزه‌ها در شهرستان دهلران بر اساس عمق (کیلومتر) بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ به شعاع ۲۰۰ کیلومتر

Fig.6. Earthquake distribution map in Dehloran County based on depth (km) between 1990 and 2020 with a radius of 200 kilometers

نتایج و بحث

برای برآورد میزان جابه‌جایی سطح زمین در منطقه مورد مطالعه از ۱۰ تصویر سنتینل ۱، نرم افزار SNAP, Arc-GIS و تکنیک تداخل سنجی راداری نقشه‌های جابجایی سطح زمین به دست آمد. شکل ۷ نقشه جابجایی نشان داده می‌دهد ارتفاعات در قسمت‌های شمالی نقشه دارای بیشترین میزان پایین رفتگی بوده که با رنگ قرمز مشخص شده است. دشت‌ها و قسمت پایین دست بیشتر دچار جابه‌جایی به صورت بالا آمدگی شده است و بیشترین بالا آمدگی مربوط به دشت‌ها در نواحی جنوبی است. با حرکات به سمت شمال نقشه نشان از تمرکز جابجایی بیشتر نسبت به جنوب نقشه را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، در شکل ۷ جابجایی سطح زمین در شهرستان دهلران طی زمین‌لرزه‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. نقشه‌های ارائه‌شده تغییرات ارتفاعی سطح زمین را در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بر اساس پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری نمایش می‌دهند. نقشه جابجایی سال ۲۰۱۵: محدوده تغییرات ارتفاع: از $-۰/۰۷$ سانتی‌متر (پایین رفتگی) تا $+۰/۰۵$ سانتی‌متر (بالا آمدگی). بیشترین میزان پایین رفتگی در بخش‌های شمال شهرستان دهلران مشاهده می‌شود، که احتمالاً مرتبط با حرکت گسل‌های فعال منطقه و جود اجرام با حجم بالا است در اثر زمین‌لرزه‌های محلی است. بیشترین میزان پایین رفتگی در بخش‌های شمالی و مرکزی دیده می‌شود که می‌تواند نتیجه فشارهای زمین‌ساختی ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای باشد. دامنه تغییرات جابجایی نسبتاً گسترده بوده و نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه زمین‌لرزه بر تغییرات توپوگرافی منطقه است.

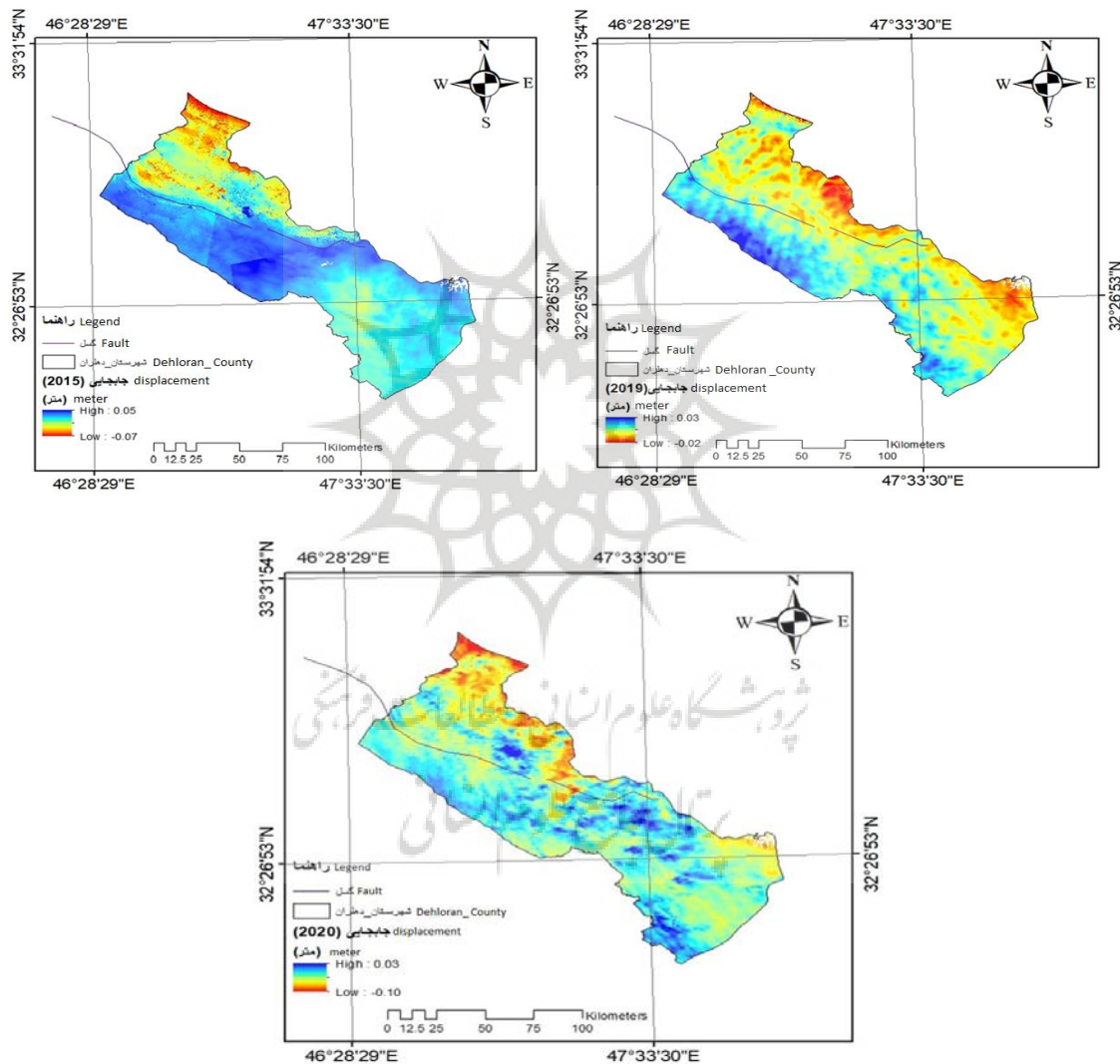


شکل ۷- نقشه میزان جابجایی سطح زمین به سانتیمتر در شهرستان دهلران

Fig.7. Map of land surface displacement in centimeters in Dehloran County

نقشه جابجایی سال ۲۰۱۹: محدوده تغییرات ارتفاع: از -0.02 تا $+0.03$ سانتیمتر. نسبت به سال ۲۰۱۵، دامنه تغییرات ارتفاعی کاهش یافته است که نشان دهنده دوره‌ای از تثبیت نسبی زمین پس از زلزله‌های قبلی است. تغییرات در مناطق مرکزی و شمالی به شکل ترکیبی از پایین رفتگی و بالا آمدگی پراکنده مشاهده می‌شود. این روند می‌تواند بیانگر کاهش فعالیت‌های زمین‌ساختی در این بازه زمانی یا جابجایی گسل‌های فرعی پس از زمین‌لرزه‌های اصلی باشد. نقشه جابجایی سال ۲۰۲۰: محدوده تغییرات ارتفاع: از -0.10 تا $+0.03$ سانتیمتر. افزایش میزان پایین رفتگی (حداکثر -0.10 سانتی‌متر) نسبت به سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد که در این بازه زمانی فعالیت لرزه‌ای مجدد در منطقه رخ داده است. تغییرات شدیدتر در مقایسه با سال ۲۰۱۹ می‌تواند ناشی از یک زمین‌لرزه جدید یا حرکت مجدد گسل‌های منطقه باشد. شدت جابجایی در مناطق شرقی و جنوب‌شرقی بیشتر است، که نشان‌دهنده تأثیر گسل‌های فعال در این نواحی است.

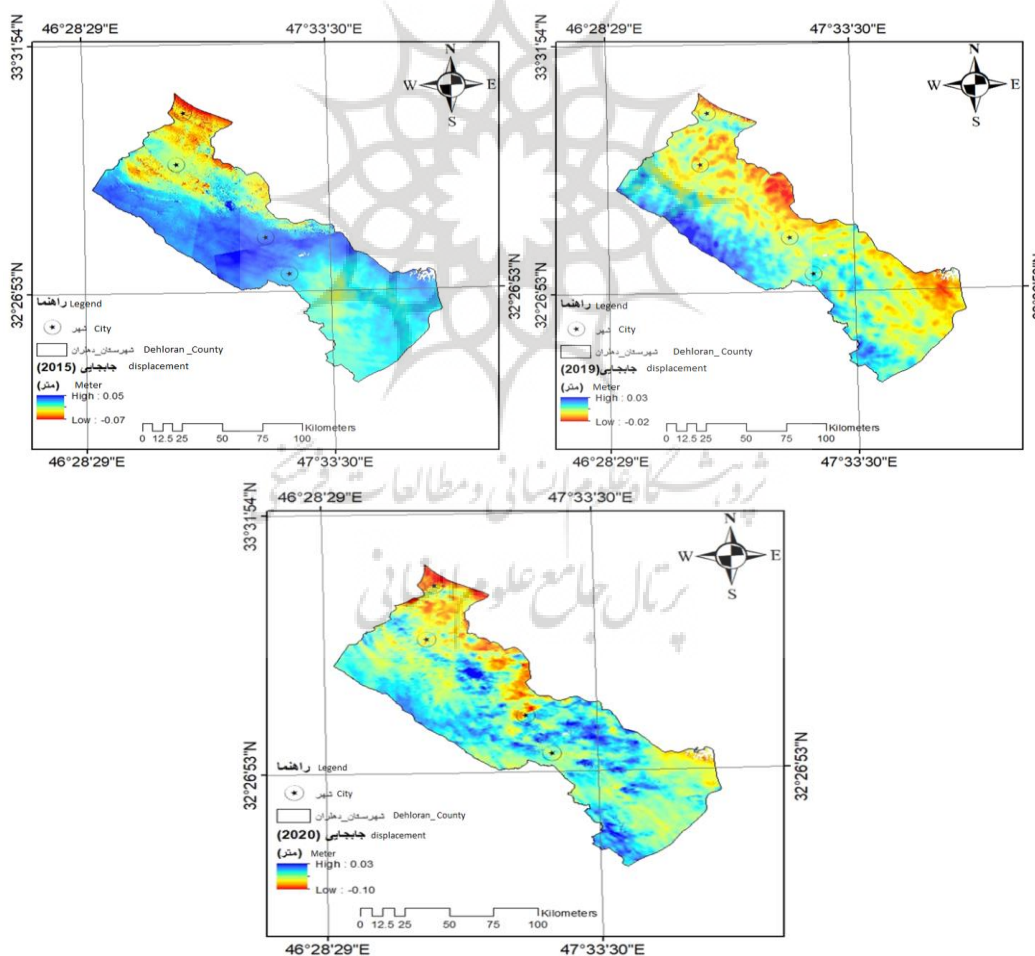
افزایش شدت پایین رفتگی در ۲۰۲۰: مقایسه نقشه‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۰ میزان پایین رفتگی افزایش قابل توجهی داشته است. این پدیده معمولاً به دلیل رخداد مجدد زمین‌لرزه و یا تغییرات تنش‌های زمین‌ساختی در طول زمان اتفاق می‌افتد. تغییرات ناهمگن در سطح زمین: نواحی مختلف جابجایی‌های مثبت و منفی را نشان می‌دهند، که نشان‌دهنده ماهیت پیچیده جابجایی‌های ناشی از گسلش لرزه‌ای و تأثیرات زمین‌ساختی منطقه است. کاهش دامنه تغییرات جابجایی در ۲۰۱۹: این روند نشان می‌دهد که پس از زلزله‌های قبلی، زمین در حال تثبیت بوده، اما با رخدادهای جدید لرزه‌ای در ۲۰۲۰، این روند تغییر کرده است. همبستگی تغییرات جابجایی با فعالیت گسل‌های منطقه: تغییرات مشاهده‌شده با ساختارهای زمین‌شناختی منطقه مطابقت دارد و نشان می‌دهد که حرکت گسل‌ها منجر به جابجایی‌های آشکار در سطح زمین شده است.



شکل ۸- نقشه میزان جابجایی سطح زمین در محل گسل پیشانی کوهستان در شهرستان دهلران

Fig. 8. Map of the land surface displacement at the Kuhistan frontal fault in Dehloran County

شکل ۸ نشان دهنده نقشه‌های جابجایی سطح زمین در منطقه شهرستان دهلران در سال‌های مختلف هستند که با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) تهیه شده‌اند. بر اساس این تصاویر، تغییرات جابجایی زمین در این منطقه قابل مشاهده است، به‌ویژه در مناطقی که گسل‌ها فعال‌تر هستند. در سال ۲۰۱۵، جابجایی‌های منفی در برخی نواحی بزرگ‌تر از دیگر مناطق است که نشان‌دهنده حرکت زمین به سمت پایین (فرورفتگی) در آن مناطق است. این نواحی در مجاورت گسل‌ها قرار دارند و به‌ویژه در بخش‌های شمالی و جنوبی شهرستان دهلران مشاهده می‌شود. در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، تغییرات مشابهی در نواحی مجاور گسل‌ها وجود دارد، با این تفاوت که در سال ۲۰۲۰ میزان جابجایی منفی بیشتر به‌ویژه در نواحی شمالی مشاهده می‌شود. در این مناطق، جابجایی‌های منفی در حدود ۰/۱۰ سانتیمتر به چشم می‌خورد، که می‌تواند نشانه‌ای از فعالیت بیشتر گسل‌ها در آن نواحی باشد. این تغییرات جابجایی زمین می‌تواند تأثیرات جدی بر تأسیسات زیربنایی، خصوصاً میادین نفتی و گازی، و همچنین شهرها و روستاهایی که در نزدیکی گسل‌ها قرار دارند، داشته باشد. میادین نفتی و گازی که در این منطقه وجود دارند، می‌توانند به دلیل جابجایی‌های زمین آسیب ببینند، به‌ویژه در مناطق نزدیک به گسل‌ها که احتمال دارد ترک‌خوردگی در لوله‌ها، تجهیزات و تأسیسات به‌وجود آید. همچنین این جابجایی‌ها می‌توانند منجر به افزایش خطر زلزله و تخریب ساختمان‌ها و سازه‌ها در شهرها و روستاهای مجاور شوند. بنابراین، در نظر گرفتن این تغییرات و بررسی اثرات آن بر امنیت و پایداری این تأسیسات حیاتی است.

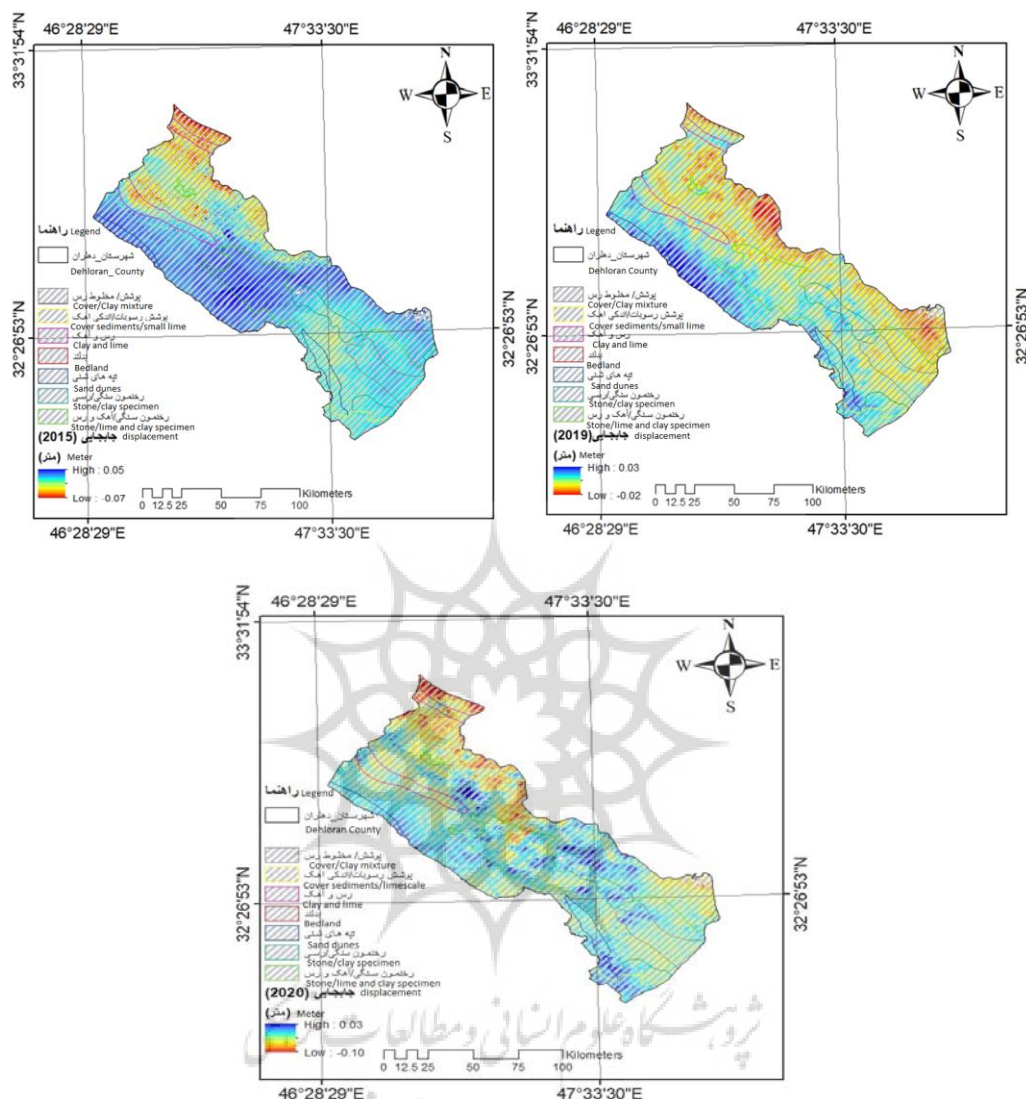


شکل ۹- نقشه میزان نرخ جابجایی سطح زمین در شهر پهل، میمه، دهلران، موسیان برای سال سال ۲۰۲۰، ۲۰۱۹، ۲۰۱۵

Fig. 9. Map of land surface displacement rates in the cities of Pahle, Meimeh, Dehloran and Musian for the years 2015, 2019 and 2020

نقشه‌های جابجایی زمین در شهرستان دهلران و مناطق اطراف آن نشان‌دهنده یک الگوی پایین‌رفتگی قابل توجه در بخش‌های شمالی است که در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ روندی رو به افزایش داشته است. شکل ۹ موقعیت شهرهای مشخص شده با ستاره در این نقشه‌ها نشان می‌دهد که الگوی نشست زمین در نزدیکی این شهرها نیز مشهود است، اما میزان و شدت آن بسته به موقعیت جغرافیایی و ساختار زمین‌شناسی هر شهر متفاوت است. در مناطق شمالی، از جمله اطراف شهر میمه و دیگر شهرهای شمالی، میزان پایین‌رفتگی بیشتر بوده که می‌تواند به ویژگی‌های زمین‌شناختی، کاهش منابع آب زیرزمینی و تنش‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های اخیر مرتبط باشد. در مقابل، شهر دهلران در مرکز نقشه تغییرات کمتری را تجربه کرده است، اما تأثیرات نشست در حومه آن مشهود است. بررسی نقشه ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که شهر میمه در ناحیه‌ای با بیشترین میزان نشست قرار دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از فرسایش خاک، کاهش سطح آب زیرزمینی و فشارهای زمین‌لرزه‌ای باشد که باعث کاهش پایداری لایه‌های زیرین در این ناحیه شده است. در همین سال، میزان جابجایی در جنوب دهلران کمتر بوده و برخی مناطق حتی دارای جابجایی مثبت (بالاآمدگی) بوده‌اند. شهرهای که در بخش شرقی نقشه قرار دارد، نیز دارای نشست محسوسی بوده که نشان‌دهنده تأثیرات فرونشست گسترده در این ناحیه است. در نقشه ۲۰۱۹، شدت پایین‌رفتگی نسبت به ۲۰۱۵ کاهش یافته، اما الگوی کلی همچنان ثابت باقی مانده است. در این سال، مناطق شمالی دهلران همچنان دچار نشست هستند، اما تغییرات در مرکز و جنوب این شهرستان متعادل‌تر شده است. این موضوع نشان می‌دهد که جابجایی زمین در مناطق شهری به تدریج تثبیت شده، اما مناطق پیرامونی شهرها همچنان در معرض نشست قرار دارند. در نزدیکی میمه و شهرهای دیگر مانند میمه، روند پایین‌رفتگی همچنان ادامه دارد، در حالی که بخش‌هایی از جنوب دهلران تغییرات قابل توجهی را تجربه نکرده‌اند. در نقشه ۲۰۲۰، شدت پایین‌رفتگی در برخی مناطق مجدداً افزایش یافته است و در شمال شهر میمه میزان نشست به بیش از ۱۰/۰- سانتی‌متر رسیده است. در مقابل، مناطق جنوبی که در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ نسبتاً پایدار بودند، تغییرات کمتری داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که فرونشست در این ناحیه یک پدیده بلندمدت و مداوم است که تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله زمین‌لرزه‌ها، تغییرات هیدرولوژیکی و ویژگی‌های زمین‌شناسی رخ می‌دهد. با توجه به موقعیت ستاره‌ها در نقشه، می‌توان نتیجه گرفت که مناطق شهری دهلران، میمه و پهل در تحت تأثیر مستقیم این جابجایی‌ها قرار گرفته‌اند، اما شدت آن در شمال و شرق شهرستان بیشتر از مرکز و جنوب است. روند تغییرات نشان می‌دهد که جابجایی در شهرهای شمالی مانند میمه بیشتر بوده و شهرهای مرکزی مانند دهلران تغییرات متوسطی را تجربه کرده‌اند، در حالی که در بخش‌های جنوبی، جابجایی کمتری مشاهده شده است. این الگوی تغییرات می‌تواند بر زیرساخت‌های شهری، منابع آب و پایداری زمین در مناطق مختلف تأثیر بگذارد و نیاز به بررسی دقیق‌تر و اقدامات مدیریتی دارد.

شکل ۱۰، میزان جابجایی در انواع خاک آمده است. در خاک‌های رسی و آهکی جابجایی از ۷+ تا ۳- و در بدلندها ۳ تا ۲ سانتی‌متر بوده است. بیشترین وسعت منطقه مورد مطالعه را بدلندها (زمین‌های خشک تحت تأثیر فرسایش شدید و دارای سنگ‌های سست) تشکیل داده است. بیشترین وسعت آن دچار پایین‌رفتگی شده است و کمترین وسعت از بدلندها دچار بالاآمدگی شده است. یکی از دلایل جابجایی سطح زمین به سانتی‌متر در این مناطق وجود این نوع زمین‌ها است. بیشترین میزان جابجایی در رخنمون سنگی که از آهک رس تشکیل شده، رخ داده است.



شکل ۱۰- نقشه میزان جابجایی سطح زمین در انواع خاکها در شهرستان دهلران برای سال (۲۰۱۵، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰)

Fig. 10. Map of land surface displacement in different types of soils in Dehloran County for the year (2015, 2019, 2020)

بررسی میزان جابجایی سطح زمین در سالهای ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ نشان دهنده یک روند تدریجی افزایش پایین رفتگی در مناطق خاصی از شهرستان دهلران، به ویژه در مناطقی با خاکهای سست و بدلندها است. مقایسه نقشه‌های جابجایی با نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که نوع خاک تأثیر مستقیمی بر میزان نشست زمین داشته است. در سال ۲۰۱۵ (با استناد به روند تغییرات در ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰)، میزان جابجایی نسبت به سال‌های بعد کمتر بوده، اما مناطق با خاک‌های رسی، آهکی و بدلندها از همان زمان دچار نشست شده‌اند. در این سال، بیشترین تغییرات در شمال شهرستان و اطراف شهر میمه مشاهده شد که احتمالاً به دلیل افت سطح آب زیرزمینی و فرسایش شدید خاک‌های سست در این مناطق بوده است. در همین دوره، مناطق با رخنمون‌های

سنگی پایدارتر بوده و تغییرات کمتری را تجربه کرده‌اند. در سال ۲۰۱۹، شدت جابجایی در مناطق دارای خاک‌های رسی و آهکی افزایش یافته است، به‌طوری که تغییرات بین ۷+ تا ۳- سانتی‌متر ثبت شده است. با این حال، بدلندها که بیشترین وسعت منطقه را تشکیل می‌دهند، دچار تغییرات شدیدی شده‌اند. میزان جابجایی در این خاک‌ها از ۳- تا ۲+ سانتی‌متر متغیر بوده است، به این معنا که برخی مناطق دچار فرونشست شدید شده‌اند، درحالی که مناطق محدودی از بدلندها دچار بالاآمدگی شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که فرایندهای فرسایشی و حرکت مواد سطحی در این مناطق بسیار فعال بوده و به ناپایداری بیشتر آن‌ها کمک کرده است. در سال ۲۰۲۰، شدیدترین میزان پایین‌رفتگی ثبت شده است، به‌خصوص در مناطق دارای رخنمون سنگی آهک‌دار که جابجایی ۱۰- سانتی‌متر را تجربه کرده‌اند. این رخنمون‌ها که از سنگ‌های آهکی و رسی تشکیل شده‌اند، به دلیل نفوذپذیری پایین و فشارهای تکتونیکی دچار نشست بیشتری شده‌اند. در مقابل، برخی مناطق که در سال ۲۰۱۹ دچار نشست بودند، تغییرات کمتری را نشان می‌دهند که می‌تواند نتیجه پایدار شدن شرایط هیدرولوژیکی و کاهش برداشت آب زیرزمینی باشد. بدلندها همچنان بیشترین وسعت منطقه را پوشش می‌دهند و میزان نشست در این خاک‌ها افزایش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده یک روند پیوسته فرسایشی و کاهش مقاومت مکانیکی خاک در اثر گذر زمان است. به‌طور کلی، روند تغییرات از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که فرونشست زمین به‌ویژه در مناطق شمالی و شرقی شهرستان دهلران شدت یافته و ارتباط مستقیمی با نوع خاک و ویژگی‌های زمین‌شناسی دارد. در مناطقی با خاک‌های رسی و آهکی، نشست تدریجی و مداوم بوده، درحالی که در بدلندها نشست ناگهانی‌تر و شدیدتر بوده است. این تغییرات نه تنها بر زیرساخت‌های شهری در شهرهایی مانند میمه و دهلران تأثیر گذاشته، بلکه احتمال افزایش ناپایداری زمین در آینده را نیز مطرح می‌کند. بنابراین، پایش مستمر این تغییرات و اتخاذ تدابیر مدیریتی برای کاهش خطرات ناشی از نشست زمین ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که تکنیک تداخل‌سنجی راداری ابزار بسیار کارآمدی برای برآورد میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای پایین در شهرستان دهلران است. برای نخستین بار، در این پژوهش، جابجایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای کمتر از ۵ ریشتر در این منطقه بررسی شد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به زمین‌لرزه‌های بزرگ و خسارت‌زا پرداخته‌اند (مانند زلزله بم در سال ۱۳۸۲ و زلزله سرپل ذهاب در سال ۱۳۹۶)، نتایج این تحقیق نشان داد که زمین‌لرزه‌های کوچک نیز در مناطق با لرزه‌خیزی بالا، می‌توانند در طول زمان تأثیرات تجمعی قابل توجهی بر زیرساخت‌های شهری، سدها و میادین نفتی و گازی داشته باشند. بررسی‌های انجام‌شده در شهر پهلان نشان داد که در هر سه زمین‌لرزه بررسی‌شده، بخش جنوب غربی این شهر دچار پایین‌رفتگی شده است. همچنین، در سایر شهرهای شهرستان دهلران، میزان جابجایی ثبت‌شده در مقیاس چند سانتی‌متر بوده و روند ثابتی را نشان داده است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری در برابر این جابجایی‌ها باشد. مطالعه زمین‌لرزه‌ها در این منطقه برای یک دوره ۳۰ ساله نشان داد شهرستان دهلران یکی از مناطق با لرزه‌خیزی بالا در جنوب استان ایلام است. زلزله‌های ثبت‌شده در این منطقه دارای بزرگای ۳ تا ۴/۷ و عمق ۰/۹ تا ۱۲/۷ کیلومتر بوده‌اند که نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌ای مستمر این زمین لرزه‌ها اگر چه عمدتاً خفیف هستند اما تداوم آن نشان‌دهنده فعالیت مداوم گسل‌ها و احتمال وقوع زمین لرزه‌های بزرگتر در آینده و امکان جابجایی مداوم سطح زمین است. نقشه‌های تهیه‌شده از جابجایی سطح زمین نشان می‌دهند که میزان جابجایی در برخی مناطق به ۱۰- و ۳+ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰، ۰/۲+ و ۰/۳- در سال ۲۰۱۹ و ۰/۷+ و ۰/۵- در سال ۲۰۱۵ رسیده است. همچنین، بررسی رابطه میان گسل‌های فعال و میزان جابجایی نشان داد که در جنوب گسل، میزان جابجایی بیش از ۷- سانتی‌متر و در شمال گسل حدود ۴- سانتی‌متر بوده است. این جابجایی‌ها در سطح منطقه در ۱۰ کلاس طبقه‌بندی شده و میزان تغییرات در مناطق انسانی و طبیعی مشخص شده است. در شهر دهلران، میزان جابجایی بین ۱- تا ۶- سانتی‌متر با

دقت ۰.۸ ثبت شده است. همچنین، یکی از میادین نفتی مهم در جنوب شرقی دهلران، در فاصله ۳۰ کیلومتری این شهر، تحت تأثیر این جابجایی‌ها قرار دارد. بیشترین میزان بالآمدگی و پایین‌رفتنی سطح زمین در ارتفاعات شمالی دهلران (۲۴۹۰ تا ۱۵۳۱ متر) و زمین‌های بدلند (۹۸۵ تا ۵۴۶ متر) مشاهده شده است که عمدتاً از رخنمون‌های سنگی، آهکی و رسوبات فرسایش‌پذیر تشکیل شده‌اند. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که وقوع مکرر زمین‌لرزه‌های کوچک در شهرستان دهلران می‌تواند در طول زمان منجر به تغییرات تدریجی اما قابل‌توجه در سطح زمین شده و آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های شهری، روستایی، سدها، و میادین نفتی و گازی وارد کند. علاوه بر این، جابجایی‌های زمین می‌تواند باعث ناپایداری سازه‌های مهم و کاهش بهره‌وری منابع نفت و گاز شوند. بنابراین، پایش مستمر این مناطق و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های شهری و صنعتی ضروری است تا از خسارات احتمالی در آینده جلوگیری شود.

References

- Abdulmaleki, A., Maleki, A., & Khazaei, A. (2021). Monitoring of land elevation displacement and analyzing its geomorphological effects using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 12(4), 118-95. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/girs.2021.681011>
- Atzori, S., Manunta, M., Fornaro, G., Ganas, S., & Salvi, S. (2008). Postseismic displacement of the 1999 Athens earthquake retrieved by the differential interferometry by synthetic aperture radar time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B9), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2007JB005504>
- Auriac, A., Spaans, K. H., Sigmundsson, F., Hooper, A., Schmidt, P., & Lund, B. (2013). Iceland rising: Solid Earth response to ice retreat inferred from satellite radar interferometry and viscoelastic modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1331-1344. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50082>
- 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. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.817212>
- Basareh, M., Joudeki, M., Farzipoursain, A., & Safaei, H. (2013). Seismic survey and earthquake hazard analysis in the area of Dehloran County. Paper presented at the Proceedings of the Conference of the Iranian Society of Engineering and Environmental Geology, Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]
- Burgmann, 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. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Delong, S. B., Donnellan, A., Ponti, D. J., Rubin, R. S., Lienkaemper, J. J., Prentice, C. S., ... & Parker, J. W. (2016). Tearing the terroir: Details and implications of surface rupture and deformation from the 24 August 2014 M6.0 South Napa earthquake, California. *Earth and Space Science*, 3(10), 416-430. <https://doi.org/10.1002/2016EA000176>
- Hanssen, R. F. (2005). Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3-4): 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.004>

- Ho Tong Minh, D., Hanssen, R., & Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, 12(9), 1364. <https://doi.org/10.3390/rs12091364>
- Joyce, K. E., Wright, K. C., Samsonov, S. V., & Ambrosia, V. G. (2009). Remote sensing and the disaster management cycle. *Advances in Geoscience and Remote Sensing*, 48(7), 317-346.
- Maghsoudi, Y., & Mahdavi, S. (2016). *Fundamentals of Radar Remote Sensing*. Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology Publications. [In Persian]
- 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. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- Mehrabi, A., & Pourkhosravani, M. (2018). Measuring the amount of ground surface displacement caused by the 1383 Dahuieh (Zarand) earthquake in Kerman province and identifying its causal fault using radar interferometry technique. *Quantitative Geomorphology Research*, 7(1), 61-73. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.1.5.9>
- Sansosti, E., Casu, F., Manzo, M., & Lanari, R. (2010). Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis. *Geophysical Research Letters*, 37(20), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2010GL044379>
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., Mellors, R., Vazquez, R., Munguia, L., & Guzman, M. (2009). Surface displacement and groundwater level changes associated with the 24 May 2006 Mw5.4 Morelia fault earthquake, Mexicali Valley, Baja California, Mexico. *Bulletin of The Seismological Society of America*, 99(4), 2180–2189. <https://doi.org/10.1785/0120080228>
- Shami, S., Mashhadi Hosseinali, M., & Babaei, S. (2019). Analysis of large-scale displacements using radar interferometry technology in open-pit mines (case study: Golgohar mine, Sirjan). *Journal of Surveying and Spatial Information Engineering*, 10(3), 41-51. [In Persian] <http://gej.issgeac.ir/article-1-329-fa.html>
- Zare Kamali, M., Al-Husseini Al-Madrassi, S. A., & Naghdi, K. (2017). Comparing the magnitude of the earth's vertical relocation using the SBAS algorithm in X and C radar bands (Case study: Tehran lands). *Journal of RS GIS for Natural Resources*, 8(3), 104-120. [In Persian] <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1396.8.3.7.4>