

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

Zahra Kal Mishi 101, Iman Rousta 102*, Rahman Zandi 103

^{1 & 2} Faculty of Geography, University of Yazd, Yazd, Iran ³Department of Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT		
Article History	One of the most significant impacts of earthquakes is ground displacement, which plays a major role in causing both human and		
Received: 14 December 2023	financial losses. Dehloran, located in the southern part of Ilam Province,		
Revised: 24 March 2025	is a region that is frequently affected by both small and large earthquakes.		
Accepted: 06 April 2025	In this study, 10 Sentinel-1A radar images, both before and after earthquakes were used to analyze the subsidence and uplift in cities		
Available Online: 10 April 2025	dams, and surrounding areas. To validate the results of ground		
Keywords:	⁻ displacement, pixel coherence evaluation was conducted, which indicated high accuracy in interferometric measurements. The results showed that		
Dehloran	the northern regions of Dehloran experienced subsidence, while the		
Synthetic Aperture Radar (SAR)	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		
Earthquake-Induced Ground Deformation	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		
Active Faults	reduce damages in urban development, dam construction, and oil and gas projects.		
Sentinel-1A Satellite			

*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/geoeh.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 Abdanan 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 زمینلرزه با استفاده از تداخلسنجی راداری: مطالعه موردی استان ایلام و گسل پیشانی کوهستان

[®]زهرا کل میشی^۱، [©]ایمان روستا²*، [©]رحمان زندی³

^{۲۰۱} گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران ^۳گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیدہ	اطلاعات مقاله
یکی از مهمترین اثرات زمینلرزهها، جابجایی سطح زمین است که نقش عمدهای در	تاريخچه مقاله:
خسارات جانی و مالی ایفا می کند. شهرستان دهلران در بخش جنوبی استان ایلام یا مناطقی است که همواره تحت تأثیر زمین[یزههای کوحک و بزرگ قرار دارد. در این ر	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳
۲۰ تصویر راداری ماهواره Sentinel-1A قبل و بعد از زمینلرزهها برای تحلیل ه	تاريخ بازنگرى: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴
پایینرفتگی و بالاآمدگی در شهرها، سدها و مناطق اطراف استفاده شد. برای اعتبارس	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷
نتایج جابجایی سطح زمین، ارزیابی همدوسی پیکسل ها انجام شد که نشان دهنده دقت . در اندانیگ م هام تداخل بنج مید نتایج نشان داد که نیام مشلل شده میتان ده	كلمات كلىدى:
دچار پایین فتگی شده و نواحی جنوبی بیشتر دچار بالاآمدگی گردیدهاند. جابجایے	بادار را دهانه ترکیب (SAR)
ناشی از زمینلرزههای با بزرگای بالای ۴ ریشتر در منطقه بهصورت جابجایی	ری و دیک کر دید.
سانتیمتری ثبت گردید. این مطالعه نشان میدهد که حتی زمینلرزههای کوچک می: -	معییر شکل زمین کاسی از زلزگ
اسیبهای جبرانناپذیری در این منطقه ایجاد کنند. یافتههای این تحقیق میتواند	کسلهای فعال
شناسایی مناطق پرخطر و کمخطر بهمنظور کاهش خسارات در پروژههای شهرس	سنتينل-١
سدسازی و نفت و گاز مفید واقع گردد.	دهلران

*نویسنده مسئول: دکتر ایمان روستا

Email: irousta@yazd.ac.ir

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 می شود (Zare Kamali, Al-Husseini Al-Madrassi & Naghdi, 2017). با بررسی درست این موضوع و ارائه مدلهای می توان به مدیران در این زمینه برای مدیریت مخاطراتی همچون زمین لرزه 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 نایذیری شود (Basareh, Joudeki, Farzipoursain & Safaei, 2013). امروزه با گسترش فناوری های نوین با روش های مختلف می توان 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 می شد که از معایب آن صرف زمان طولانی برای اندازه گیری 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 برای تولید محصولات گوناگون استفاده شد (Sansosti, Casu, Manzo & Lanari, 2010). یکی از این روشها، تکنیک «تداخلسنجی رادار دریچه مصنوعی» (InSAR²) است که از اختلاف فاز بین زوج تصویر راداری اطلاعاتی مانند جابجایی و یا ارتفاع را استخراج می کند (Ho Tong Minh, Hanssen & Rocca, 2020) و بنابراین تغییر شکل یا میزان جابجایی يوسته زمين برآورد مي شود (Auriac et al., 2013).

در زمینه تداخلسنجی راداری در سطح جهان و ایران پژوهش های صورت گرفته است به آن می پردازیم. زارع کمالی و همکاران (2017, 2017) به مطالعه ی 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 (⁷SBAS) و تکنیک تداخل سنجی تفاضلی رادار با روزنه مصنوعی (¹DINSAR) مورد مطالعه قرار گرفته است که در این پژوهش برای این منظور از ۱۹ تمویر 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 و ۱۱ تصویر باند X سنجنده (TERRA SAR) استفاده شد. بررسی نتایج دو سنجنده نشان داد که میلی متر در روز است. همچنین نتایج نشان داد که برخی نقاط بالاآمدگی داشته اند که میزان بالآمدگی برای سنجنده میادی برای سنجنده میادی برای سنجنده برای برای سنجنده نشان داد که میلی متر در روز است. همچنین نتایج نشان داد که برخی نقاط بالاآمدگی داشته دند که میزان بالاآمدگی برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۱۵۲۹ میلی متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۱۹۷۶، میلی متر در روز است. و نتایج نشان مطور میانگین ۱۵۲۹ میلی میران داد که برخی نقاط بالاآمدگی داشته داند که میزان بالاآمدگی برای سنجنده ASAR به مور میانگین ۱۵۲۹، میلی متر در روز و برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۱۹۷۶، میلی متر در روز است. و نتایج نشان داد که مناطق نشست و بالاآمدگی برای هر دو سنجنده نزدیک به هم است. عبدالملکی و همکاران (Khazei, SAL) مطور میانگین در ماطق نشست و بالاآمدگی رای مر دو سنجایی منطقه سرپل ذهاب استفاده از داده مای دورسنجی پرداختن که از مدویر ماهواره ا-Adlumaleki, Maleki مطالعه جابجایی زمین و تعلیل اثرات ژئومورفولوژیکی با استفاده از داده مای دورسنجی پرداختن که از مدویر مویر مواره ا-Adlumaleki, Maleki می تورین این می منطقه سرپل ذهاب استفاده کردند و این نتیجه به دست آمد که تکنیک تداخل سنجی راداری، ابزاری کارآمد برای محاسبه میزان جابجایی زمین است. آنزوری و همکاران (ماز تنیجه به درت آمد که تحیور برای برآورد جابجایی زرکن محاسبه میزان جابجایی زمین است. آنزوری و همکاران (مالی برداختند. در این معلی کاری میلی برای برای برادری، ایزاری ای مرای محاسبه میزان جابخای میمی می می محایم میانی پرداختند. در

^{1 -}Synthetic Aperture Radar

^{2 -}Interferometric Synthetic Aperture Radar

³⁻ Small Baseline Subset

⁴⁻Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

برای بازهای۱۲روزه برآورد کرده است. ساریچیخینا و همکاران (Sarychikhna et al., 2009) به بررسی جابجایی سطح و تغییرات سطح آبهای زیرزمینی در زلزله ۵/۴ 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 ترازیابی 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 لرزه های 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 ۴/۶ریشتری ۲۳ اسفند سال ۱۳۹۸، ۴/۹ ریشتر سال ... و ۴/۳ ریشتری اسفند ۱۳۹۷ شهرستان دهلران با استفاده از روش تداخل سنجی 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 تاثیر زمینلرزه با انجام پیشبینیهای لازم از ساخت ساز در یرخطر جلوگیری کرده و به هدایت ساخت سازها به سمت مناطقی که کمتر تحت تأثیر زمینلرزه قرار می گیرند، 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 اندازه گیری میزان جابجایی بدنه سدها میتوان از آسیب به بدنه سدها و خسارات احتمالی جلوگیری کرد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان دهلران در استان ایلام از مناطق نفتخیز کشور محسوب می شود. دهلران دومین شهرستان استان از لحاظ جمعیت است. مساحت این شهرستان، ۶۷۸۵ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا ۲۱۶ متر می باشد. شهرستان دهلران در طول جغرافیایی ۴۶.۳۱.۱۹ غربی تا ۴۸.۲.۲۹ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳.۳۱.۱۱ 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 می شود و همچنین موقعیت گسل در شکل ۲ بر روی تصاویر گوگل ارث برای سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان داده شده است.



(سمت راست) و نقشه شهرستان دهلران (سمت راست) **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 می کنید. در این تصویر، نواحی روشن تر نشان دهنده تغییرات بیشتری هستند. به نظر می رسد که برخی مناطق در طول این دوره تغییرات قابل توجهی داشته اند، که ممکن است ناشی از فعالیتهای زمین شناسی 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 گوگول ارث برای سال ۲۰۲۰ و ۱۹۹۰ 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

نقاط Points	ار تفاع نقاط سال ۲۰۱۵ Height of points in 2015	ارتفاع نقاط سال ۲۰۲۰ Height of points in 2020	تفاضل نقاط سال ۲۰۱۵ و۲۰۲۰ 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

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

در جدول شماره ۱ با استفاده از مدل رقومی ارتفاع برای سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ نسبت اختلاف ارتفاع محاسبه شد و نشاندهنده 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 زمین شناسی 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 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 افزارSNAP، نقشه نهایی در AIS انجام شد.

جدول ۲- دادههای ماهوارهای مورده استفاده برای محاسبه جابجایی سطح زمین درگسل پیشانی کوهستان، شهرستان دهلران Table 2- Satellite data used to calculate ground surface displacement on the Kohistan foreland fault, Dehloran

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

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 حاصلضرب تصویر راداری اول در مختلط مزدوج تصویر دوم، تداخلنما مزدوم، تداخلنما مودرم، 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

¹⁻ Single Look Complex

سیگنالهای تداخلسنجی است و ارزش هر پیکسل آن عددی بین صفر تا یک است که هر چه قدر به یک نزدیک تر باشد، محاسبات از دقت بالاتری برخوردار است (Shami, Mashhadi Hosseinali & Babaei, 2019). مقادیر بالاتر از ۶/۶ 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 میانگین گیری 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 فوریه سریع (FFT)^۹ برای افزایش نسبت سیگنال به نویز استفاده می کند (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 می شود. مقادیر اختلاف فاز در تداخلنما، عددی بین • تا ۲۳ است و مقادیر بیشتر، گسسته می شود. با عمل بازیابی فاز، ابهام فاز از بین می رود و ارزش پیکسل ها به مقدایر واقعی و پیوسته تبدیل می شود (Mehrabi & Pourkhosravani, 2018). تصویر به دست آمده است، بالا آمدگی و پایین رفتگی زمین را با واحد فاز نشان می دهد. در پایان، مقادیر پیوسته اختلاف فاز میان دو تصویر قبل و بعد زمین لرزه،

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.

يافتههاى تحقيق

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 ۲۱۰ زلزله رخ داده است. اولین زلزله با بزرگای ۴/۴ و کیلومتر در تاریخ ۱۹۹۰/۱/۱ و آخرین زلزله با بزرگای ۲/۴ و عمق ۱۰ کیلومتر در تاریخ ۲۰۲۰/۱/۲ رخ داده است. همچنین بزرگترین زلزله، بزرگای ۲/۶ و کوچکترین آنها، بزرگای ۳/۲ داشته است و بیشترین عمق زلزله، ۴۰/۴ و کمترین آن ۹/۰ کیلومتر بوده است. بیشترین زمینلرزهها در بزرگای بین ۴ تا ۵ می باشند. 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- Muitilooking filter
- 3- Goldstein filter

4- Fast Fourier Transform5- Unwrapping6-Coherence

	۱۰۰ کیلومتر	ذشته تا شعاع	طی ۳۰ سال گ	هلران در ه	جدول۳ -فراوانی زمینلرزه در شهرستان د
Tab <u>le</u>	3- Earthquake fi	requency in	Dehloran C	ounty ov	er the past 30 years within a radius of 100 km
	6-7	5-6	4-5	3-4	بزرگای زلزله (Earthquake magnitude)
	3	56	592	59	تعداد (Number)

برای فهرست زلزلههای مورد مطالعه، نمودار فراوانی بر اساس بزرگا تهیه گردید (شکل۴). 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 بزرگا 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 رومر کز زلزله ها بر اساس بزرگا را نشان می دهد. در این نقشه، زلزله ها بر حسب بزرگا به پنج دسته تقسیم شدهاند: دسته اول ۳/۹–۲/۲ که بیشتر در جنوب نقشه تمر کز دارند و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم از تعداد آنها کاسته می شود. از طرفی این زمین لرزه ها در قسمت غربی بیشتر از جنوب منطقه است و در جنوب استان ایلام از تراکم بیشتر و در شمال استان خوزستان از تراکم کمتری بر خوردارند و در دیگر استان ها 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 می شود. این زمین لرزه ها 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 میباید. 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 زمین لرزه ها بر اساس عمق را نشان می دهد. در این نقشه، زمین لرزه ها بر اساس عمق (km) به پنج دسته تقسیم شدهاند: دسته اول ۱۲/۷–۰/۹ که بیشترین فراوانی را دارد و در جنوب استان ایلام بیشتر از شمال آن رخ داده است. در شرق منطقه، این زمین لرزه ها به صورت پراکنده رخ دادهاند. دسته دوم ۲۴/۱–۱۲/۷ 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 می شود. دسته سوم ۴۱/۴–۲۴/۱ که بیشترین تعداد آنها به ترتیب در استان های خوزستان، ایلام و همدان رخ داده است. تمرکز این زلزله ها در جنوب منطقه بیشتر از شمال آن است و در شرق و غرب منطقه نیز به صورت پراکنده رخ داده است. تمرکز این زلزله ها در جنوب منطقه بیشتر از

دسته چهارم ۶۴–۴۱/۳ 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 می شود و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم از تعداد آنها کاسته شده و به صفر می رسد. در جنوب منطقه نیز تعداد آنها بسیار اندک است. دسته پنجم ۲۰۰/۴ –۶۴ که تعدادشان بسیار اندک است. بیشتر این زمین لرزه ها در غرب منطقه و در استان ایلام رخ داده است و در شمال منطقه تعداد آنها به صفر می رسد. در جنوب و شرق منطقه نیز از تعداد آن کاسته می شود. در نتیجه، بیشترین زلزله ها در عمق های 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

نتايج 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 نقشه های 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 بالاآمدگی شده است و بیشترین بالاآمدگی 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 زمین لرزههای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. نقشههای ارائه شده تغییرات ارتفاعی سطح زمین را در سالهای ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بر اساس پردازش دادههای تداخل سنجی راداری نمایش می دهند. نقشه جابجایی سال۲۰۱۵: محدوده تغییرات ارتفاع: از ۲۰/۰۰ سانتی متر (پایین رفتگی) تا ۲۰۱۵+ سانتی متر (بالاآمدگی). بیشترین میزان پایین رفتگی در بخشهای شمال شهرستان دهلران مشاهده می شود، که احتمالاً مرتبط با حرکت گسلهای فعال منطقه و جود اجرام با حجم بالا است در اثر زمین لرزههای محلی است. بیشترین میزان پایین رفتگی در بخشهای شمالی و مرکزی دیده می شود که می تواند نتیجه ی فشارهای زمین ساختی ناشی از انتشار امواج لرزه ای باشد. دامنه تغییرات جابجایی نسبتاً گسترده بوده و نشان دهنده تأثیر قابل توجه زمین لرزه بر تغییرات توپوگرافی منطقه است.





نقشه جابجایی سال ۲۰۱۹: محدوده تغییرات ارتفاع: از ۲۰/۰۲ – تا ۲۰/۰۲ سانتیمتر. نسبت به سال ۲۰۱۵، دامنه تغییرات ارتفاعی کاهش یافته است که نشاندهنده دورهای از تثبیت نسبی زمین پس از زلزلههای قبلی است. تغییرات در مناطق مرکزی و شمالی به شکل ترکیبی از پایین رفتگی و بالآمدگی 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 ۲۰۱۰: محدوده تغییرات ارتفاع: از ۲۰۱۰ سانتیمتر تا ۲۰/۰۴-سانتیمتر. افزایش میزان پایین رفتگی (حداکثر ۲۰۱۰- سانتیمتر) نسبت به سال ۲۰۱۹ میتواند ناشی از یک زمینلرزه 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 قابلتوجهی داشته است. این پدیده معمولاً به دلیل رخداد مجدد زمین لرزه و یا تغییرات تنشهای زمین ساختی در طول زمان اتفاق می افتد. تغییرات ناهمگن در سطح زمین: نواحی مختلف جابجاییهای مثبت و منفی را نشان میدهند، که نشان دهنده ماهیت پیچیده جابجاییهای ناشی از گسلش لرزهای و تأثیرات زمین ساختی 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 مشاهده شده با ساختارهای زمین شناختی 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 مشابهای 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 ۲۰۱۰ 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 وستاهایی 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 می میتواند نفتی و بازی که در این منطقه وجود دارند، میتوانند به دلیل موجود آید. همچنین این جابجاییها میتواند داخته باشد. میادین نفتی و گازی که در این منطقه وجود دارند، میتوانند به دلیل موجود آید. بابراین، در نظر گرفتن این تغییرات و بررسی اثرات آن بر امنیت و پایداری این تأسیسات حیاتی است.



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 قابلتوجه 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 زمین شناسی 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 متعادل تر 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 قابلتوجهی 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 ۱۰/۱۰ - 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 پهله 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 ۲+ تا ۳- و در بدلندها ۳ تا ۲ سانتی متر بوده است. بیشترین وسعت منطقه مورد مطالعه را بدلندها (زمین های خشک تحت تاثیر فرسایش شدید و دارای سنگهای سست) تشکیل داده است. بیشترین وسعت آن دچار پایین فتگی شده است و کمترین وسعت ازبدلندها دچار بالاآمدگی شده است. یکی از دلایل جابجایی سطح زمین به سانتی متر در این مناطق وجود این نوع زمین ها 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 نشاندهنده یک روند تدریجی افزایش پایینرفتگی در مناطق خاصی از شهرستان دهلران، بهویژه 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 ۲+ 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، درحالیکه 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، به خصوص 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 ميدهند كه ميتواند نتيجه پايدار شدن شرايط هيدرولوژيكي و كاهش برداشت آب زيرزميني باشد. بدلندها همچنان بيشترين 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 مناطقي با خاکهاي رسي و آهکي، نشست تدريجي و مداوم بوده، درحالي که در بدلندها نشست ناگهاني تر و شديدتر بوده است. اين تغییرات نه تنها بر زیرساختهای شهری در شهرهایی مانند میمه و دهلران تأثیر گذاشته، بلکه احتمال افزایش ناپایداری زمین در آینده را نیز مطرح می کند. بنابراین، پایش مستمر این تغییرات و اتخاذ تدابیر مدیریتی برای کاهش خطرات ناشی از نشست زمین ضروری به نظر می سد.

نتيجه گيرى

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 برداختهاند (مانند زلزله بم در سال ۱۳۸۲ و زلزله سریل 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 پهله 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 آسیب پذیری 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 ۹/۰ تا ۱۲/۷ کیلومتر بودهاند که نشان دهنده فعالیت لرزهای مستمر این زمین لرزه ها اگر چه عمدتا خفیف هستند اما تداوم آن نشان دهنده فعالیت مداوم گسل هاو احتمال وقوع زمین لرزه های 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، ۲۰۲۲ و ۰/۰۳- در سال ۲۰۱۹ و ۲۰/۰۷ و ۰/۰۷- در سال ۲۰۱۵ رسیده است. همچنین، بررسی رابطه میان گسلهای فعال و میزان جابجایی نشان داد که در جنوب گسل، میزان جابجایی بیش از ۲- 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 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 بالاآمدگی و پایینرفتگی 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 فرسایش پذیر تشکیل شدهاند. نتایج این مطالعه تأکید می کند که وقوع مکرر زمین لرزههای کوچک در شهرستان دهلران میتواند در طول زمان منجر به تغییرات تدریجی اما قابل توجه در سطح زمین شده و آسیبهای جدی به زیرساختهای شهری، روستایی، سدها، و میادین نفتی و گازی وارد کند. علاوه بر این، جابجاییهای زمین میتوانند 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

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 visocelastic 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