

Research Paper

**Assessing Geohazards on a Strategic Island: An InSAR-Based
Characterization of Land Subsidence and Salt Diapirism in Qeshm,
Persian Gulf**

Maziar Asmani^{*1}, Kazem Bashirnezhad²

1. Assistant professor, Department of Computer Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

PP: 626-640

Use your device to scan and read
the article online



Keywords: *Land
Subsidence Interferometric
Synthetic Aperture Radar
(InSAR) Qeshm Island
Tectonic Uplift
Groundwater*

Abstract

Qeshm Island, as the largest island in the Persian Gulf and a part of the Zagros fold-and-thrust belt, represents a unique geodynamic environment where natural geological processes, such as salt diapirism and active tectonics, intersect with intense anthropogenic pressures from groundwater over-extraction. This study quantitatively analyzes land surface deformation on the island between 2022 and 2024 using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) time-series analysis on a dataset of 39 Sentinel-1 images. The methodology is based on the Short Baseline Subset (SBAS) algorithm to derive the vertical displacement rate map and deformation time series. The findings reveal two distinct spatial patterns: a localized and significant uplift zone in the west with a maximum rate of +7.5 cm/year, attributed to salt dome activity, and two widespread subsidence bowls in the central and eastern regions with a maximum rate of -11.5 cm/year. Time-series analysis of specific points of interest confirms the direct correlation between subsidence and groundwater level decline through the identification of seasonal oscillations. Furthermore, the results indicate that existing fault structures play a crucial role in controlling the spatial pattern of subsidence. This study highlights the capability of InSAR technology for geohazard monitoring, provides a critical warning regarding risks to infrastructure and increased coastal flooding hazards on Qeshm, and underscores the necessity for sustainable water resource management.

Citation: Asmani, Maziar and Bashirnejad, Kazem. (2024). **Geological Hazard Assessment in a Strategic Island: Characterization of Land Subsidence and Salt Diapirism in Qeshm, Persian Gulf, Based on Radar Interferometry.** Quarterly Journal of Geography (Regional Planning), 14(55),626-640

DOI:10.22034/jgeoq.2023.284686.3062

*** Corresponding author:** Maziar Asmani, **Email:** maziarasmani@iau.ac.ir

Copyright © 2024 The Authors. Published by Qeshm Institute. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence is recognized as a prominent geohazard, particularly in arid and semi-arid regions where anthropogenic activities intersect with complex geological structures. In Iran, this phenomenon has escalated into a national crisis, threatening urban infrastructure, agricultural productivity, and ecological sustainability. Qeshm Island, as the largest island in the Persian Gulf and a part of the Zagros fold-and-thrust belt, serves as a prime example of these conditions. The island faces a significant land subsidence challenge due to its unique geological features, such as active tectonics and salt diapirism, combined with rapid population growth and the over-extraction of groundwater resources.

Methodology

This study employs Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) and time-series analysis using the Short Baseline Subset (SBAS) technique to derive the land surface deformation field. For this purpose, a dataset of 39 Sentinel-1 satellite radar images, acquired by the European Space Agency between 2022 and 2024, was utilized. The images were obtained as Single Look Complex (SLC) data in the Interferometric Wide Swath (IW) mode with VV polarization. Additionally, a 30-meter resolution Digital Elevation Model (DEM) was used to remove the topographic contribution from the interferometric phase. The data processing workflow consisted of the following steps:

- **Interferogram Formation:** Precise co-registration of Master and Slave images, followed by the complex multiplication of the Master signal with the complex conjugate of the Slave signal.
- **Topographic Phase Removal:** Utilization of the DEM to create a differential interferogram.
- **Phase Unwrapping:** Application of the Minimum Cost Flow (MCF) algorithm to resolve phase ambiguity.
- **Phase-to-Displacement Conversion:** Conversion of the unwrapped phase to line-of-sight (LOS) displacement

and subsequently to vertical displacement.

- **Time-Series Analysis:** Implementation of the SBAS method and Singular Value Decomposition (SVD) to calculate the temporal evolution of displacement and mitigate atmospheric errors.

Results and Discussion

Through the InSAR time-series analysis, a map of the mean annual vertical displacement rate for Qeshm Island was generated for the 2022–2024 period. This map reveals complex spatial patterns of surface deformation, characterized by two primary phenomena: subsidence and uplift. The results indicate that extensive areas in the central and eastern parts of the island are experiencing subsidence, whereas a distinct and localized uplift pattern is observable in the western part. The most severe subsidence rate, at -11.5 cm/year, is concentrated in the eastern region, which corresponds to urban and agricultural areas with a high density of water wells. Conversely, the western part of the island exhibits a significant uplift rate of up to $+7.5$ cm/year, indicating a powerful and active geological process. To better understand the temporal behavior of the deformation, the cumulative displacement time series for three points of interest (POIs) from different zones were extracted. The POI in the center of the uplift zone shows a nearly linear uplift trend, consistent with a stable and continuous geological process such as salt diapirism. In contrast, the POI in the severe subsidence bowl exhibits not only a strong linear subsidence trend but also distinct seasonal oscillations. These fluctuations clearly correlate with the annual hydrological cycles: during wet seasons, the subsidence rate decelerates or even shows slight uplift due to reduced groundwater extraction and increased recharge, while it accelerates during dry seasons. This behavior confirms the direct link between subsidence in this area and groundwater exploitation. Furthermore, spatial analysis reveals a significant correlation between the boundaries of the main subsidence bowls and the trends of existing faults, suggesting that these geological structures act as hydrodynamic and

structural barriers, creating distinct tectonic blocks.

Conclusion

This research utilized advanced InSAR time-series techniques to conduct a quantitative and qualitative analysis of land surface deformation on Qeshm Island from 2022 to 2024. The results present a comprehensive picture of a complex and active geodynamic environment where natural and anthropogenic processes are concurrently shaping the land surface at varying intensities. The key findings include the identification of two dominant deformation patterns: a localized and severe uplift zone in the west with a maximum rate of +7.5 cm/year, and two extensive subsidence bowls in the central and eastern parts with a maximum rate of -11.5 cm/year. The observed uplift is almost certainly caused by salt diapirism, whereas the widespread subsidence and its seasonal oscillations in the time series confirm a direct

and significant correlation with the decline of groundwater levels due to over-extraction for agricultural and urban use. Additionally, the analysis of the spatial overlay of the subsidence map and regional faults demonstrated that existing tectonic structures play a critical role in controlling the spatial pattern of subsidence. This study provides, for the first time, a high-resolution quantitative assessment of recent subsidence rates, which can serve as a baseline for future aquifer system modeling and prediction. The identification of high subsidence rates in the urban and infrastructural areas of the eastern part of the island poses a serious threat to critical infrastructure and increases the risk of relative sea-level rise along the coast. This research reaffirms the power of InSAR technology as an accurate, cost-effective, and wide-coverage tool for monitoring and managing geohazards.

References

1. NIACouncil, "The Land Subsidence Crisis in Iran: A Result of Mismanagement and Unsustainable Development Policies," 2025. [Online]. Available: <https://niacouncil.org/the-land-subsidence-crisis-in-iran-a-result-of-mismanagement-and-unsustainable-development-policies/>
2. E. Nissen, M. Ghorashi, J. Jackson, B. Parsons, and M. Talebian, "The 2005 Qeshm Island earthquake (Iran)—a link between buried reverse faulting and surface folding in the Zagros Simply Folded Belt?," *Geophysical Journal International*, vol. 171, no. 1, pp. 326-338, 2007.
3. M. Bockstiegel *et al.*, "Simulation of present and future land subsidence in the Rafsanjan plain, Iran, due to groundwater overexploitation using numerical modeling and InSAR data analysis," *Hydrogeology Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 289-305, 2024.
4. P. Van Isacker and W. Gelletly, "James Philip Elliott. 27 July 1929—21 October 2008," ed: The Royal Society Publishing, 2021.
5. R. TALEBÍ and M. HATEMÍ, "HYDROPOLITICS AND WATER ISSUES AFTER THE IRANIAN REVOLUTION (1979-2021)," 2023.
6. M. Haghshenas Haghghi and M. Motagh, "Land subsidence hazard in Iran revealed by country-scale analysis of Sentinel-1 InSAR," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives*, vol. 43, pp. 155-161, 2021.
7. L. O. Ohenhen *et al.*, "Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises," *Nature Cities*, pp. 1-12, 2025.
8. M. Dehghani, M. J. Valadan Zoej, I. Entezam, A. Mansourian, and S. Saatchi, "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran," *Geophysical Journal International*, vol. 178, no. 1, pp. 47-56, 2009.
9. S. Mahoozi, "Iran Faces Widespread Land Subsidence Amid Escalating Water Emergency," *Forbes*, 2025.
10. M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetzel, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, vol. 168, no. 2, pp. 518-526, 2007.
11. J. A. Payne *et al.*, "Widespread extent of irrecoverable aquifer depletion revealed by country-wide analysis of land surface subsidence hazard in Iran, 2014–2022, using two component Sentinel-1 InSAR time series," *Authorea Preprints*, 2024.
12. D. L. Galloway, *Measuring land subsidence from space*. US Geological Survey, 2000.

13. G. W. Bawden, M. Sneed, S. V. Stork, and D. L. Galloway, "Measuring human-induced land subsidence from space," US Geological Survey, 2327-6932, 2003 .
14. T. Times, "A Crisis Deeper Than War." [Online]. Available: https://www.realcleardefense.com/articles/2025/06/16/a_crisis_deeper_than_war_1116811.html
15. C. S. Portal, *Welcome to the COMET-LiCS Land Subsidence Portal*, Retrieved 29 August 2025 ed.
16. A. Sepehr, V. Shafaie, N. Kariminejad, and M. R. Rashti, "Susceptibility mapping for land subsidence and collapsed pipes in north-east Iran," in *Advanced Tools for Studying Soil Erosion Processes*: Elsevier, 2024, pp. 579-594.
17. H. Gharechae *et al.*, "Land subsidence susceptibility mapping using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and machine learning models in a semiarid region of Iran," *Land*, vol. 12, no. 4, p. 843, 2023.
18. Z. Ghorbani, A. Khosravi, Y. Maghsoudi, F. F. Mojtahedi, E. Javadnia, and A. Nazari, "Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 13998, 2022.
19. M. H. Haghighi and M. Motagh, "Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping," *ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, no. zfv 4/2017, 2017.
20. F. Nilfouroushan, "Ground movements in the Zagros fold-thrust belt of SW Iran measured by GPS and InSAR compared to Physical models," 2007 .
21. D. Ma, R. Zhao, Y. Li, and Z. Li, "Land subsidence assessment of an Archipelago based on the InSAR time series analysis method," *Water*, vol. 15, no. 3, p. 465, 2023.
22. F. Rafiei, S. Gharechelou, S. Golian, and B. A. Johnson, "Aquifer and land subsidence interaction assessment using sentinel-1 data and DInSAR technique," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, no. 9, p. 495, 2022.
23. M. Khorrami, S. Abrishami, Y. Maghsoudi, B. Alizadeh, and D. Perissin, "Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 11357, 2020.
24. S. M. J. Mirzadeh *et al.*, "Characterization of irreversible land subsidence in the Yazd-Ardakan plain, Iran from 2003 to 2020 InSAR time series," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, no. 11, p. e2021JB022258, 2021.
25. L. S. Othman, J. Majidi, and A. Amini, "Land Subsidence Assessment in the Darab Plain, Fars Province, Iran: Integrating Sentinel-1 InSAR and Groundwater Level Data," *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, vol. 2, no. 1, pp. 57-61, 2025.



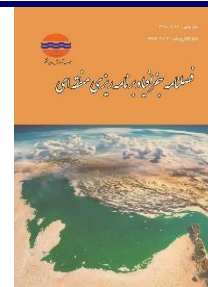
انجمن ژئوپلیتیک ایران

فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)

دوره ۱۴، شماره ۵۵، تابستان ۱۴۰۳

شاپا چاپی: ۶۴۶۲-۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲-۲۷۸۳

Journal Homepage: <https://www.jgeoqeshm.ir/>



مقاله پژوهشی

ارزیابی مخاطرات زمین‌شناسی در یک جزیره استراتژیک: مشخصه‌یابی فرونشست زمین و دی‌پایریسم نمکی در قشم، خلیج فارس، مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری

مازیار اسمنی* - گروه مهندسی کامپیوتر، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

کاظم بشیرنژاد - دانشیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده

جزیره قشم به عنوان بزرگترین جزیره خلیج فارس و بخشی از کمربند چین‌خورده زاگرس، یک محیط ژئودینامیک منحصربه‌فرد است که در آن فرآیندهای زمین‌شناسی طبیعی مانند دی‌پایریسم نمکی و تکتونیک فعال با فشارهای شدید انسانی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی تلاقی می‌کنند. این پژوهش با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری سری زمانی و با پردازش ۳۹ تصویر ماهواره Sentinel-1 به تحلیل کمی تغییرات سطح زمین در این جزیره در بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ می‌پردازد. روش‌شناسی تحقیق بر پایه الگوریتم زیرمجموعه بیس لاین کوتاه برای استخراج نقشه نرخ جابجایی عمودی و سری‌های زمانی جابجایی استوار است. یافته‌ها دو الگوی فضایی کاملاً متمایز را آشکار می‌سازد؛ یک زون بال‌آمدگی متمرکز در غرب جزیره با حداکثر نرخ $+7/5$ سانتی‌متر در سال که به فعالیت گنبد نمکی نسبت داده می‌شود و دو حوضه فرونشستی گسترده در نواحی مرکزی و شرقی با حداکثر نرخ $-11/5$ سانتی‌متر در سال. تحلیل سری زمانی نقاط شاخص، ارتباط مستقیم فرونشست با افت سطح آب زیرزمینی را از طریق شناسایی نوسانات فصلی تأیید می‌کند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که ساختارهای گسلی موجود نقش کنترلی مهمی در الگوی فضایی فرونشست ایفا می‌کنند. این مطالعه ضمن تأکید بر قدرت فناوری تداخل‌سنجی راداری برای پایش مخاطرات زمین‌شناسی، هشدار جدی در مورد آسیب به زیرساخت‌ها و افزایش خطر سیلاب‌های ساحلی در قشم ارائه می‌دهد و لزوم مدیریت پایدار منابع آب را برجسته می‌سازد.

اطلاعات مقاله

شماره صفحات: ۶۲۶-۶۴۰

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، جزیره قشم، بال‌آمدگی تکتونیکی، آب زیرزمینی

استناد: اسمنی، مازیار و بشیرنژاد، کاظم. (۱۴۰۳). ارزیابی مخاطرات زمین‌شناسی در یک جزیره استراتژیک: مشخصه‌یابی فرونشست زمین و دی‌پایریسم نمکی در قشم، خلیج فارس، مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)، (۱۴) ۵۵، ۶۲۶-۶۴۰

DOI:10.22034/jgeoq.2023.284686.3062

* نویسنده مسئول: مازیار اسمنی، پست الکترونیکی: maziarasmani@iauo.ac.ir

مقدمه

فرونشست زمین یکی از مخاطرات زمین‌شناسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که در اثر تلاقی فعالیت‌های انسانی با ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی به وجود می‌آید. این پدیده در ایران به یک بحران ملی تبدیل شده و با تهدید زیرساخت‌های شهری، بهره‌وری کشاورزی و پایداری اکولوژیکی، بخش‌های وسیعی از کشور را تحت تأثیر قرار داده است. جزیره قشم در خلیج فارس به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد زمین‌شناسی و قرارگیری در تنگه استراتژیک هرمز نمونه‌ای برجسته از تشدید این ریسک است. قشم بزرگ‌ترین جزیره خلیج فارس، نه تنها قطب اقتصادی مهمی در زمینه گردشگری، شیلات و کشاورزی به شمار می‌رود بلکه به دلیل قرارگیری در کمربند چین‌خورده زاگرس و برخورداری از تکتونیک فعال، دیابیرسیم نمکی و ساختارهای چین‌خورده از شگفتی‌های زمین‌شناختی نیز محسوب می‌شود. با این حال در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت، توسعه کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی فرونشست زمین در این جزیره را تشدید کرده و با ایجاد تغییرشکل‌های سطحی، پایداری آن را به خطر انداخته است. این مطالعه با تمرکز بر جزیره قشم به بررسی و تحلیل این مخاطرات می‌پردازد. این جزیره با مساحتی حدود ۱۴۹۱ کیلومتر مربع در جنوب ایران واقع شده و از نظر زمین‌شناسی بخشی از کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس است که در اثر برخورد صفحات عربی و اوراسیا شکل گرفته است. از ویژگی‌های بارز این منطقه می‌توان به ساختارهای چین‌خوردگی، گسل‌های فعال و دیابیرهای نمکی اشاره کرد. گنبد‌های نمکی مانند گنبد نمکدان در غرب جزیره با ایجاد بالآمدگی‌های موضعی، پویایی منطقه را دوچندان کرده‌اند. این دیابیرها که از رسوبات تبخیری سازند هرمز سرچشمه می‌گیرند، با حرکتی شناور به سمت بالا لایه‌های رسوبی را تغییرشکل می‌دهند. هیدرولوژی قشم نیز تحت تأثیر آبخوان‌های کارستی و دشت‌های آبرفتی است و آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب برای مصارف کشاورزی و خانگی محسوب می‌شود. با این حال برداشت بی‌رویه آب منجر به کاهش سطح آبخوان، افت فشار منفذی، فشردگی رسوبات دانه‌ریز و در نهایت فرونشست زمین شده است. دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، به دلیل افزایش فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی از جمله خشکسالی‌های طولانی‌مدت، برای تحلیل دینامیک فرونشست در قشم، دوره‌ای حیاتی به شمار می‌رود.

مبانی نظری

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات برجسته زمین‌شناسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌ویژه در مناطقی که فعالیت‌های انسانی با ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی تلاقی می‌کنند، شناخته می‌شود. در ایران این پدیده به یک بحران ملی تبدیل شده و بخش‌های وسیعی از زمین را تحت تأثیر قرار داده، زیرساخت‌های شهری، بهره‌وری کشاورزی و پایداری اکولوژیکی را تهدید می‌کند [۱]. منطقه خلیج فارس شامل تنگه استراتژیک هرمز دارای ویژگی‌های زمین‌شناسی منحصربه‌فردی است که ریسک فرونشست را تشدید می‌کند و جزیره قشم نمونه‌ای برجسته از این شرایط است. قشم به‌عنوان بزرگ‌ترین جزیره خلیج فارس نه تنها مرکز فعالیت‌های اقتصادی از طریق گردشگری، شیلات و کشاورزی است بلکه از نظر زمین‌شناسی به دلیل وجود تکتونیک فعال، دیابیرسیم نمکی و ساختارهای چین‌خورده در کمربند زاگرس، یک شگفتی زمین‌شناختی محسوب می‌شود [۲]. در دهه گذشته رشد سریع جمعیت، توسعه کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی فرونشست زمین را در این جزیره تشدید کرده و تغییر شکل‌های سطحی را به دنبال داشته که پایداری جزیره را به خطر می‌اندازد. این مطالعه بر جزیره قشم، واقع در جنوب ایران با مختصات تقریبی ۲۶/۵-۲۷ درجه شمالی و ۵۵/۲-۵۶/۳ درجه شرقی و مساحت حدود ۱۴۹۱ کیلومتر مربع تمرکز دارد. از نظر زمین‌شناسی، قشم در کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس^۱ قرار دارد، منطقه‌ای که در اثر برخورد صفحات عربی و اوراسیا شکل گرفته و با ساختارهای چین‌خوردگی، گسل‌های فعال و دیابیرهای نمکی مشخص می‌شود [۳]. گنبد‌های نمکی مانند گنبد نمکدان در غرب جزیره، پدیده‌های بالآمدگی موضعی را در میان روندهای فرونشست منطقه‌ای ایجاد می‌کنند [۴]. این دیابیرها که از رسوبات تبخیری سازند هرمز سرچشمه می‌گیرند با حرکت شناور به سمت بالا از میان لایه‌های رسوبی تغییر شکل‌های محلی ایجاد می‌کنند. هیدرولوژی قشم تحت سلطه آبخوان‌های کارستی و دشت‌های آبرفتی است که آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب برای کشاورزی و مصارف خانگی محسوب می‌شود. با این حال برداشت بیش از حد باعث کاهش سطح آبخوان، افت

^۱ Zagros Fold-and-Thrust Belt (ZFTB)

فشار منفذی و فشردگی رسوبات دانه ریز شده که به فرونشست زمین منجر می‌گردد^[۵]. بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ برای تحلیل دینامیک فرونشست در قشم دوره‌ای حیاتی است زیرا شامل فشارهای فزاینده انسانی در کنار تغییرات اقلیمی از جمله خشکسالی‌های طولانی مدت است که تقاضای آب را افزایش داده‌اند^[۶]. گزارش‌های ملی نشان می‌دهند که ایران در برخی دشت‌ها نرخ فرونشست بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال را تجربه می‌کند و تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۲۵۴ منطقه تحت تأثیر این پدیده شناسایی شده‌اند^[۷]. در حالی که توجه زیادی به مناطق داخلی مانند تهران، مشهد و نیشابور که مطالعات تداخل‌سنجی راداری^۱ نرخ‌هایی تا ۱۹ سانتی‌متر در سال را نشان داده‌اند^[۸] و محیط‌های جزیره‌ای مانند قشم کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این کمبود توجه نگران‌کننده است زیرا فرونشست در قشم می‌تواند با افزایش نسبی سطح دریا تعامل کرده و باعث تشدید سیلاب‌های ساحلی و فرسایش شود که اکوسیستم‌های مانگرو و سکونتگاه‌های انسانی را تهدید می‌کند^[۹]. فرونشست در قشم پدیده‌ای چندوجهی است که از فرآیندهای درون‌زا و برون‌زا ناشی می‌شود. فعالیت تکتونیکی در کمر بند چین‌خورده و رانده زاگرس گسل‌هایی را ایجاد می‌کند که به‌عنوان موانع هیدرولوژیکی عمل کرده و آبخوان‌ها را تقسیم‌بندی می‌کنند، بر الگوهای فرونشست تأثیر می‌گذارند^[۱۰]. برای مثال، گسل قشم و ساختارهای مرتبط ممکن است فرونشست نامتقارن را تسهیل کرده و ریسک‌های لرزه‌ای را از طریق فعال‌سازی مجدد گسل‌ها افزایش دهند^[۱۱]. علاوه بر این عامل انسانی نقش مهمی ایفا می‌کند؛ از سال ۲۰۱۰، گسترش کشاورزی برداشت آب زیرزمینی را دو برابر کرده و افت چند متری سطح پیزومتری را به دنبال داشته است^[۱۲]. دی‌پایرسم نمکی پیچیدگی بیشتری ایجاد می‌کند زیرا بالاآمدگی در مناطق غربی را در برابر فرونشست غالب در دیگر نقاط قرار می‌دهد^[۱۳]. تغییرات اقلیمی این مسائل را تشدید کرده و کاهش بارندگی از سال ۲۰۲۰ تغذیه آبخوان‌ها را کاهش داده و افت سطح آب را تسریع کرده است^[۱۴]. روش‌های سنتی پایش مانند ترازسنجی و شبکه‌های GPS، اگرچه دقت بالایی دارند اما به دلیل پوشش محدود و هزینه‌های بالا برای مناطق جزیره‌ای وسیع غیرعملی هستند^[۱۵]. در مقابل تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری تأثیرگذار برای نقشه‌برداری فرونشست ظاهر شده و امکان اندازه‌گیری با دقت میلی‌متری در مناطق وسیع را بدون نیاز به ابزارهای زمینی فراهم می‌کند^[۱۶]. با بهره‌گیری از تفاوت‌های فاز در سیگنال‌های راداری ماهواره‌هایی مانند Sentinel-1، جابجایی‌های سطحی را در راستای دید^۲ شناسایی کرده و امکان تفکیک مولفه‌های عمودی و افقی را با فرضیات مشخص فراهم می‌سازد^[۱۷]. روش‌های سری زمانی مانند زیرمجموعه بیس‌لاین کوتاه^۳ و تداخل‌سنجی پراکنده‌های دائمی^۴ اثرات اتمسفری و دکورلاسیون را کاهش داده و نقشه‌های سرعت و تاریخچه جابجایی قابل اعتمادی تولید می‌کنند^[۱۸]. کاربرد تداخل‌سنجی راداری در مطالعات فرونشست ایران از اوایل دهه ۲۰۲۰ به دلیل دسترسی آزاد به داده‌های Sentinel-1 از آژانس فضایی اروپا^۵ گسترش یافته است^[۶]. مطالعات پیشگامانه شامل تحلیل‌های مقیاس کشوری است که نقاط داغ فرونشست را در ۹۹ منطقه با نرخ‌هایی تا ۳۰ سانتی‌متر در سال شناسایی کرده و به برداشت بیش از حد آب زیرزمینی مرتبط دانسته‌اند^[۸]. در شمال شرق، فرونشست نیشابور با نرخ ۱۹ سانتی‌متر در سال با استفاده از داده‌های Sentinel-1 و Envisat پایش شده و فشردگی غیرالاستیک در آبخوان‌های محصور را نشان داده است^[۱۹]. در نزدیکی قشم مطالعات در دشت‌های ساحلی زاگرس سیگنال‌های تغییر شکل ناشی از استخراج نفت و تکتونیک را شناسایی کرده و تداخل‌سنجی راداری حرکات ظریفی را در جزایری مانند کیش ردیابی کرده است^[۲۰]. با این حال تحقیقات اختصاصی تداخل‌سنجی راداری برای قشم نادر است و گزارش‌های اولیه تنها به بالاآمدگی اطراف گنبد‌های نمکی اشاره کرده‌اند، بدون ارزیابی جامع فرونشست^[۲۱]. پیشرفت قابل توجهی در تلفیق تداخل‌سنجی راداری با یادگیری ماشین برای نقشه‌برداری حساسیت فرونشست صورت گرفته است، همان‌طور که در دشت‌های ایران نشان داده شده که مدل‌ها فرونشست را بر اساس متغیرهای هیدرولوژیکی پیش‌بینی می‌کنند^[۲۲]. این رویکردها فرونشست غیرقابل بازگشت را در مرکز ایران کمی‌سازی کرده‌اند، جایی که بیش از ۸۰ درصد تغییر شکل غیرالاستیک است و نشان‌دهنده آسیب دائمی به آبخوان‌ها است^[۲۳]. برای قشم مدل‌سازی مشابه می‌تواند

¹ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

² LOS

³ Small Baseline Subset (SBAS)

⁴ Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

⁵ European Space Agency (ESA)

تعامل بین دی‌پایریسم و فرونشست را روشن کند اما به داده‌های به‌روز در سال‌های اخیر نیاز دارد [۲۴]. بازه ۲۰۲۰-۲۰۲۵ به‌ویژه به دلیل تأثیرات خشکسالی پس از ۲۰۲۰ و تغییرات سیاستی در مدیریت آب، دوره‌ای مرتبط است [۲۵].

روش پژوهش

روش‌شناسی پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری

برای استخراج میدان تغییر شکل سطح زمین از تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی و تحلیل سری زمانی به روش زیرمجموعه بیس‌لاین کوتاه استفاده شد. این فرآیند شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌های پیچیده ریاضی و پردازش سیگنال است که در ادامه تشریح می‌شوند.

تشکیل اینترفروگرام

اولین گام هم‌ثبت‌سازی^۱ دقیق تصاویر Master و Slave با دقت زیرپیکسل است. پس از آن اینترفروگرام از طریق ضرب مختلط سیگنال Master (S_1) در مزدوج مختلط سیگنال Slave (S_2^*) تشکیل می‌شود. سیگنال SAR یک کمیت مختلط است که می‌توان آن را به صورت $S=A \cdot e^{j\phi}$ نمایش داد که در آن A دامنه و ϕ فاز سیگنال است. بنابراین، فاز اینترفرومتریک (ϕ_{int}) به صورت روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود:

$$I = S_1 \cdot S_2^* = (A_1 e^{j\phi_1}) \cdot (A_2 e^{-j\phi_2}) = A_1 A_2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \quad (۱)$$

$$\phi_{int} = \phi_1 - \phi_2 \quad (۲)$$

فاز حاصله، مجموعه‌ای از چندین مولفه است که به صورت رابطه ۳ نمایش داده می‌شود:

$$\phi_{int} = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (۳)$$

که در آن:

- ϕ_{flat} : فاز ناشی از انحنای سطح زمین.
- ϕ_{topo} : فاز ناشی از توپوگرافی منطقه.
- ϕ_{disp} : فاز ناشی از جابجایی سطح زمین (مولفه مورد نظر).
- ϕ_{atm} : فاز ناشی از تغییرات اتمسفر بین دو تصویربرداری.
- ϕ_{noise} : فاز ناشی از نویزهای حرارتی و دکورلاسیون زمانی.

حذف فاز توپوگرافی و ایجاد اینترفروگرام تفاضلی

برای جداسازی فاز جابجایی ابتدا اثر انحنای زمین و سپس اثر توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع حذف می‌شود. فاز توپوگرافی با رابطه ۴ با ارتفاع (h) و بیس‌لاین عمود (B_{perp}) مرتبط است:

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin(\theta)} h \quad (۴)$$

^۱ Co-registration

که در آن R فاصله اسلنترنج و θ زاویه تابش است. پس از حذف این مولفه‌ها، اینترفروگرام تفاضلی به دست می‌آید که عمدتاً شامل فاز جابجایی و خطای اتمسفر است.

بازکردن فاز^۱

فاز محاسبه شده در محدوده $(-p_i, p_i)$ پیچیده است. برای به دست آوردن مقدار واقعی جابجایی، باید این ابهام p_i حل شود. این فرآیند که بازکردن فاز نام دارد، یک مسئله معکوس بدووضع^۲ است که با الگوریتم‌های مختلفی مانند Minimum Cost Flow (MCF) حل می‌شود. این الگوریتم با یافتن مسیری با کمترین هزینه بین باقی‌مانده‌ها، پرش‌های فازی را تصحیح می‌کند. فاز باز شده (Φ) با فاز پیچیده (ϕ) از طریق رابطه ۵ مرتبط است:

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2k\pi \quad (5)$$

که در آن k یک عدد صحیح است که باید برای هر پیکسل تخمین زده شود.

تبدیل فاز به جابجایی و تصحیح هندسی

پس از بازکردن فاز، جابجایی در راستای دید ماهواره (Δr_{LOS}) از طریق رابطه خطی ۶ محاسبه می‌شود:

$$\Delta r_{LOS} = -\frac{\lambda}{4\pi} \Phi_{disp} \quad (6)$$

این جابجایی حرکت واقعی زمین نیست بلکه مولفه‌ای از آن در راستای دید سنسور است. با فرض اینکه عمده حرکت زمین به صورت عمودی (فرونشست یا بالآمدگی) است، جابجایی عمودی (Δv) از طریق رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$\Delta v = \frac{\Delta r_{LOS}}{\cos(\theta_{inc})} \quad (7)$$

که در آن θ_{inc} زاویه تابش محلی است.

تحلیل سری زمانی به روش زیرمجموعه بیس لاین کوتاه

برای کاهش خطای اتمسفر و محاسبه روند زمانی جابجایی از روش زیرمجموعه بیس لاین کوتاه استفاده شد. در این روش، شبکه‌ای از اینترفروگرام‌ها با بیس لاین زمانی و مکانی کوتاه تشکیل می‌شود. اگر $N+1$ تصویر SAR در زمان‌های (t_0, t_1, \dots, t_N) داشته باشیم و M اینترفروگرام تفاضلی تشکیل دهیم، می‌توانیم رابطه ۸ را به صورت یک دستگاه معادلات خطی بنویسیم:

$$\delta\phi = A \cdot v \quad (8)$$

که در آن $\delta\phi$ بردار $M \times 1$ از مشاهدات فاز باز شده، v بردار $N \times 1$ از سرعت‌های فاز نامعلوم بین هر دو زمان متوالی و A یک ماتریس طراحی $M \times N$ است. از آنجایی که این دستگاه معمولاً فرورته (Rank-deficient) است، از روش تجزیه مقدار منفرد^۳ برای یافتن جوابی با کمترین نرم^۴ برای سرعت‌ها استفاده می‌شود. با انتگرال‌گیری از سرعت‌ها در طول زمان، سری زمانی جابجایی برای هر پیکسل از رابطه ۹ به دست می‌آید:

¹ Phase Unwrapping

² Ill-posed

³ Singular Value Decomposition (SVD)

⁴ Minimum Norm Solution

$$d(t_i) = \sum_{k=1}^i v_k(t_k - t_{k-1}) \quad (9)$$

در نهایت، با اعمال فیلترهای زمانی (پایین‌گذر) و مکانی (بالاگذر) بر روی سری زمانی، اثرات نویز اتمسفری (که در مکان همبستگی زیاد و در زمان همبستگی کمی دارد) از سیگنال جابجایی جدا می‌شود. خروجی نهایی این فرآیند، نقشه نرخ میانگین جابجایی عمودی (میلی‌متر در سال) و سری زمانی جابجایی برای هر پیکسل در بازه مطالعه است.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، جزیره قشم واقع در جنوب ایران در تنگه استراتژیک هرمز است. این جزیره به عنوان بزرگترین جزیره خلیج فارس از نظر زمین‌شناسی در کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس قرار گرفته و دارای ساختارهای زمین‌شناسی بسیار پیچیده‌ای از جمله گسل‌های فعال، چین‌خوردگی‌ها و پدیده منحصر به فرد دیابریسم نمکی (گنبد‌های نمکی) است. در دهه‌های اخیر توسعه کشاورزی، افزایش جمعیت و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی این منطقه را با چالش جدی فرونشست زمین مواجه کرده است. بازه زمانی این پژوهش از ابتدای سال ۲۰۲۲ تا انتهای سال ۲۰۲۴ میلادی را پوشش می‌دهد تا یک تحلیل جامع از تغییرات اخیر سطح زمین ارائه گردد.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 متعلق به آژانس فضایی اروپا استفاده شده است. این ماهواره با فعالیت در باند C (طول موج تقریبی ۵/۶ سانتی‌متر λ) قابلیت تصویربرداری در تمام شرایط آب و هوایی و شبانه‌روز را داراست. داده‌ها به صورت SLC^۱ در مد IW^۲ و با پلاریزاسیون VV دریافت شده‌اند. منبع اصلی تهیه داده‌ها آرشیو مرکز پروازهای فضایی آلاسکا^۳ بوده که از طریق پورتال Vertex قابل جستجو و دانلود است. انتخاب تصاویر بر اساس معیارهایی همچون پوشش کامل منطقه، کمترین بیس‌لاین عمود و فاصله زمانی مناسب برای تشکیل اینترفروگرام‌ها صورت گرفته است. در مجموع ۳۹ صحنه تصویر برای بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ انتخاب و پردازش شدند. علاوه بر این، از مدل رقومی ارتفاع^۴ با تفکیک مکانی ۳۰ متر^۵ برای حذف اثر توپوگرافی از فاز اینترفرومتریک استفاده شد.

یافته‌ها

نقشه نرخ جابجایی عمودی

با استفاده از روش‌شناسی تشریح شده در بخش دوم، نقشه نرخ میانگین جابجایی عمودی سالانه برای جزیره قشم در بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ تهیه گردید. این نقشه (شکل ۱) الگوهای فضایی پیچیده‌ای از تغییر شکل سطح زمین را آشکار می‌سازد که شامل دو پدیده اصلی فرونشست و بالآمدگی است. مقادیر منفی (طیف رنگ‌های گرم) نشان‌دهنده فرونشست و مقادیر مثبت (طیف رنگ‌های سرد) بیانگر بالآمدگی به واحد سانتی‌متر در سال هستند.

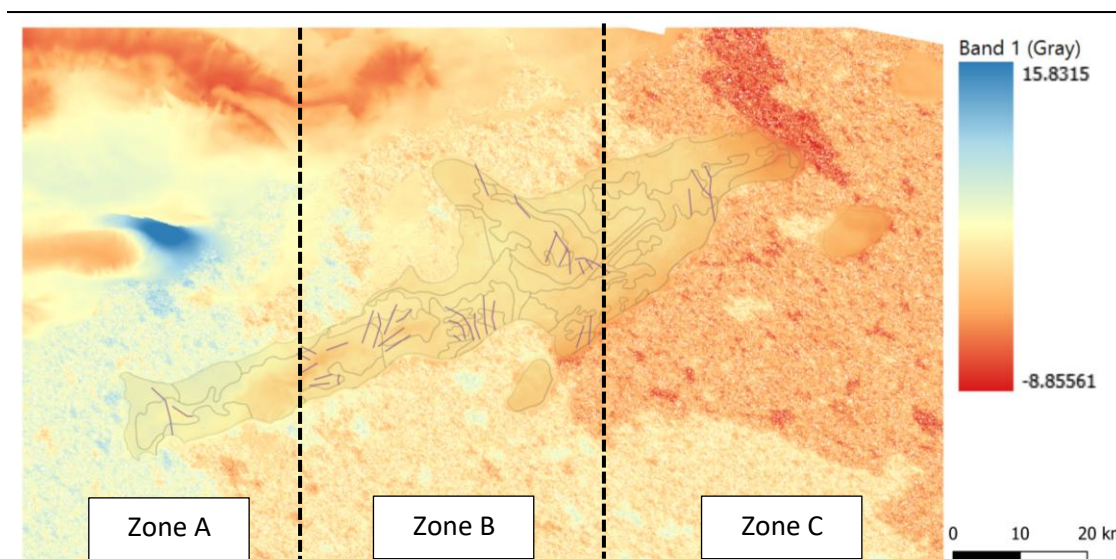
¹ Single Look Complex

² Interferometric Wide Swath

³ Alaska Satellite Facility (ASF)

⁴ Digital Elevation Model (DEM)

⁵ Copernicus GLO-30 DEM



شکل ۱- نقشه فرونشست و برآمدگی جزیره قشم بین سال های ۲۰۲۲ الی ۲۰۲۴

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، بخش های وسیعی از نواحی مرکزی و شرقی جزیره با پدیده فرونشست مواجه هستند، در حالی که یک الگوی بالآمدگی مشخص و متمرکز در بخش غربی جزیره قابل تشخیص است. برای تحلیل کمی این الگوها، سه زون اصلی بر اساس رفتار تغییر شکل تفکیک و آمار مربوط به آنها استخراج گردید (جدول ۱).

جدول ۱- آمار کمی نرخ جابجایی در زون های مختلف جزیره قشم

میانگین نرخ (cm/year)	حداکثر نرخ بالآمدگی (cm/year)	حداکثر نرخ فرونشست (cm/year)	پدیده غالب	توصیف موقعیت	شناسه زون
+۲/۱	+۷/۵	-۰/۸	بالآمدگی	غرب جزیره (محدوده گنبد نمکی نمکدان)	A
-۴/۳	-۰/۵	-۸/۲	فرونشست	دشت مرکزی (اطراف فرودگاه)	B
-۶/۸	+۱/۱	-۱۱/۵	فرونشست	شرق جزیره (اطراف شهر قشم و درگهان)	C

نتایج جدول ۱ به وضوح نشان می دهد که شدیدترین نرخ فرونشست با مقدار $-۱۱/۵$ سانتی متر در سال در شرق جزیره متمرکز است که با مناطق شهری و کشاورزی با تراکم بالای چاه های آب مطابقت دارد. از سوی دیگر نرخ بالآمدگی در غرب جزیره به مقدار قابل توجه $+۷/۵$ سانتی متر در سال می رسد که نشان دهنده یک فرآیند زمین شناسی فعال و قدرتمند است.

بحث

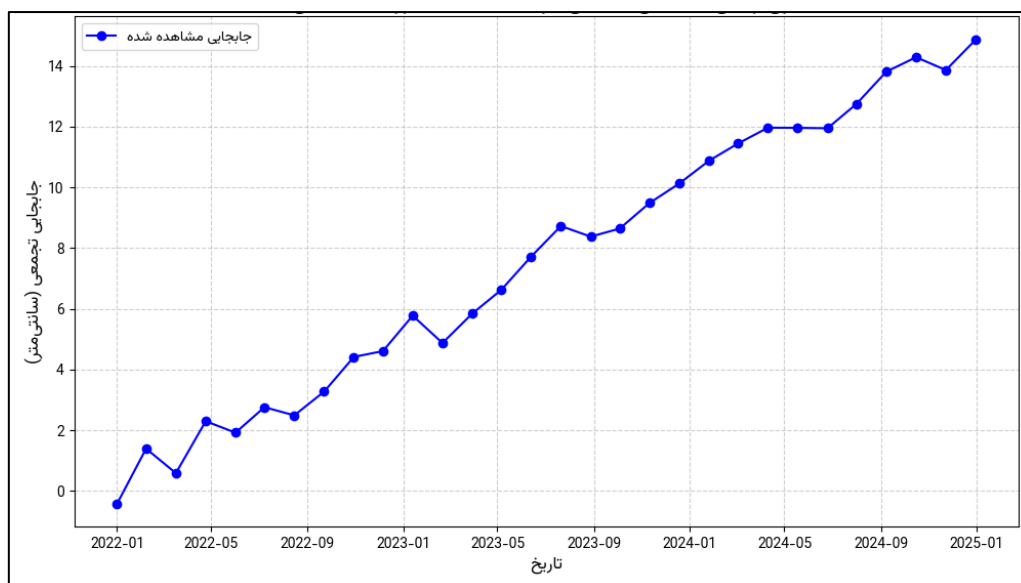
تحلیل سری زمانی نقاط شاخص

برای درک بهتر رفتار زمانی تغییر شکل، سه نقطه شاخص^۱ از سه زون مختلف انتخاب و سری زمانی جابجایی تجمعی آنها استخراج گردید.

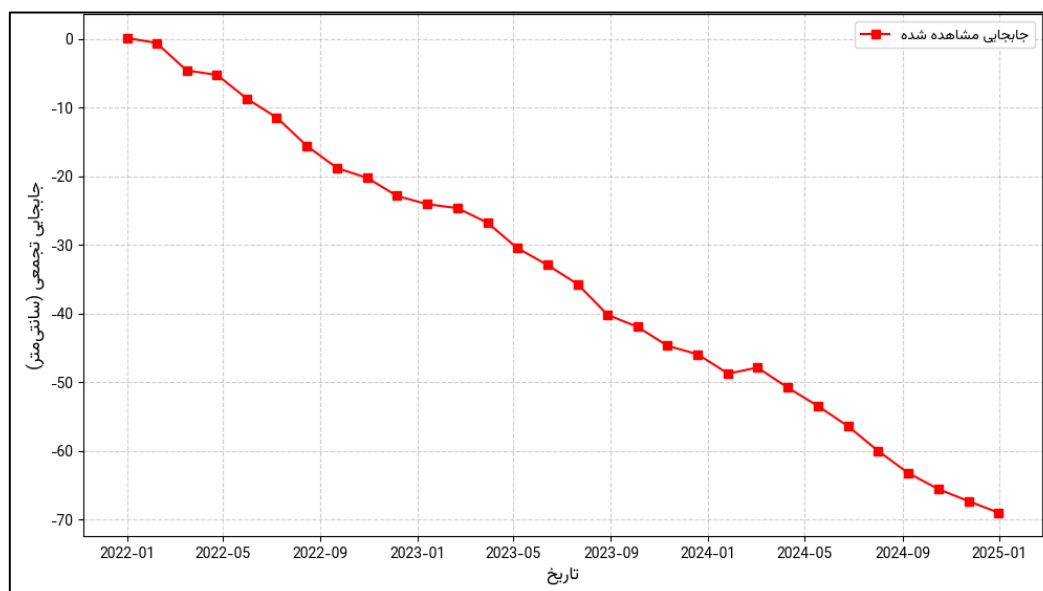
- POI-1: واقع در مرکز زون بالآمدگی (زون A).
- POI-2: واقع در مرکز حوضه فرونشست شدید (زون C).
- POI-3: یک نقطه مرجع پایدار در منطقه سنگی و کوهستانی.

نمودارهای سری زمانی این سه نقطه مطابق شکل ۲ رفتار کاملاً متفاوتی را در طول بازه دو ساله مطالعه نشان می دهند.

^۱ Point of Interest (POI)



شکل ۲- سری زمانی جابجایی تجمعی برای نقطه POI-1 بالآمدگی



شکل ۳- سری زمانی جابجایی تجمعی برای نقطه POI-2 فرونشست

شکل ۲ (POI-1) یک روند تقریباً خطی از بالآمدگی را نشان می‌دهد که با یک فرآیند زمین‌شناسی پایدار و مداوم مانند فعالیت دی‌پایر نمکی سازگار است. در مقابل، شکل ۳ (POI-2) علاوه بر روند خطی شدید فرونشست، دارای نوسانات فصلی نیز می‌باشد. این نوسانات به وضوح با چرخه‌های سالانه آبی مرتبط هستند؛ در فصول مرطوب با کاهش برداشت و افزایش تغذیه نرخ فرونشست کند شده و حتی کمی بالآمدگی مشاهده می‌شود و در فصول خشک با افزایش برداشت، نرخ فرونشست شتاب می‌گیرد. این رفتار ارتباط مستقیم فرونشست در این منطقه با بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را اثبات می‌کند.

• ارتباط فرونشست با ساختارهای زمین‌شناسی

برای بررسی نقش ساختارهای تکتونیکی در کنترل الگوی فرونشست، نقشه گسل‌های اصلی منطقه بر روی نقشه نرخ جابجایی هم‌پوشانی شد. تحلیل فضایی نشان می‌دهد که مرزهای حوضه‌های اصلی فرونشست (به خصوص در زون B و C) انطباق قابل

توجهی با روند گسل‌های موجود دارند. این امر بیانگر آن است که گسل‌ها به عنوان مرزهای هیدرودینامیکی و ساختاری عمل کرده و بلوک‌های تکتونیکي مجزا را ایجاد می‌کنند که هر کدام رفتار متفاوتی در برابر افت سطح آب از خود نشان می‌دهند. در برخی نواحی، گرادیان شدید فرونشست دقیقاً در امتداد یک گسل مشاهده می‌شود که می‌تواند حاکی از نشست نامتقارن در دو طرف گسل و فعال‌سازی مجدد آن در اثر تنش‌های ناشی از فرونشست باشد. این یافته، اهمیت در نظر گرفتن ریسک‌های لرزه‌ای ثانویه ناشی از فرونشست را در این منطقه پررنگ‌تر می‌سازد.

• نتیجه‌گیری و پیشنهادات

• جمع‌بندی نتایج

این پژوهش با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته تداخل‌سنجی راداری سری زمانی و با استفاده از ۳۹ تصویر ماهواره Sentinel-1، به تحلیل کمی و کیفی تغییرات سطح زمین در جزیره قشم طی بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ پرداخت. نتایج به دست آمده تصویری جامع از یک محیط ژئودینامیک فعال و پیچیده را ترسیم می‌کند که در آن فرآیندهای طبیعی و انسانی به طور همزمان و با شدت‌های متفاوت در حال شکل‌دهی به سطح زمین هستند. یافته‌های کلیدی این تحقیق شامل شناسایی دو الگوی غالب تغییر شکل، نقشه نهایی نرخ جابجایی، وجود دو الگوی فضایی متمایز است.

۱- یک زون بالآمدگی متمرکز و شدید در غرب جزیره با حداکثر نرخ $7/5$ سانتی‌متر در سال و دو حوضه فرونشستی گسترده در نواحی مرکزی و شرقی با حداکثر نرخ $11/5$ - سانتی‌متر در سال.

۲- تفسیر منشأ پدیده‌ها: بالآمدگی مشاهده شده در غرب جزیره با توجه به شدت، تمرکز و روند زمانی خطی به احتمال قریب به یقین ناشی از یک فرآیند زمین‌شناسی درون‌زاد یعنی دیاپیرسیم نمکی (فعالیت گنبد نمکی) است. در مقابل الگوی فرونشست گسترده و وجود نوسانات فصلی مشخص در سری‌های زمانی، ارتباط مستقیم و معنادار این پدیده را با افت سطح آب‌های زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه برای مصارف کشاورزی و شهری اثبات می‌کند.

۳- نقش کنترلی ساختارهای تکتونیکي: تحلیل هم‌پوشانی نقشه فرونشست و گسل‌های منطقه نشان داد که ساختارهای تکتونیکي موجود نقش کلیدی در کنترل الگوی فضایی فرونشست ایفا می‌کنند. گسل‌ها نه تنها مرزهای حوضه‌های فرونشستی را تعریف می‌کنند بلکه نشست نامتقارن در امتداد آنها می‌تواند منجر به فعال‌سازی مجدد این ساختارها و افزایش ریسک‌های ژئوتکتونیکي و لرزه‌ای شود.

• اهمیت و پیامدهای پژوهش

نتایج این پژوهش دارای پیامدهای علمی و کاربردی مهمی برای مدیریت پایدار منابع و کاهش خطر در جزیره قشم است. اولاً، این تحقیق برای اولین بار یک ارزیابی کمی و با تفکیک مکانی بالا از نرخ فرونشست در سال‌های اخیر ارائه می‌دهد که می‌تواند به عنوان داده پایه برای مدل‌سازی‌های آینده سیستم آبخوان و پیش‌بینی رفتار آن مورد استفاده قرار گیرد. ثانیاً، شناسایی نرخ بالای فرونشست (بیش از ۱۱ سانتی‌متر در سال) در مناطق شهری و زیرساختی شرق جزیره، یک زنگ خطر جدی برای آسیب به زیرساخت‌های حیاتی (مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها، خطوط لوله) و افزایش خطر بالآمدن نسبی سطح آب دریا در نواحی ساحلی است. ارتباط تنگاتنگ فرونشست با گسل‌ها، بعد دیگری از مخاطرات را آشکار می‌سازد. تنش‌های ایجاد شده در اثر نشست نامتقارن می‌تواند منجر به ایجاد شکاف‌های سطحی و افزایش ریسک لرزه‌خیزی القایی شود. بنابراین نتایج این پژوهش باید به طور جدی در برنامه‌ریزی‌های شهری، مدیریت بحران و به‌ویژه در سیاست‌گذاری‌های مربوط به مدیریت منابع آب زیرزمینی مد نظر قرار گیرد. این تحقیق بار دیگر قدرت فناوری تداخل‌سنجی راداری را به عنوان یک ابزار پایش دقیق، کم‌هزینه و با پوشش وسیع برای شناسایی و مدیریت مخاطرات زمین‌شناسی به اثبات رساند.

• محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آتی

هر پژوهشی با محدودیت‌هایی روبرو است و این تحقیق نیز از این قاعده مستثنی نیست. مهم‌ترین محدودیت عدم وجود داده‌های صحرائی مانند مشاهدات GPS، داده‌های ترازسنجی دقیق و آمار دقیق از سطح آب چاه‌های پیژومتری برای اعتبارسنجی و کالیبراسیون نتایج تداخل‌سنجی راداری بود. هرچند روش سری زمانی بخش زیادی از خطاهای اتمسفری را حذف می‌کند اما وجود داده‌های صحرائی می‌توانست دقت مدل را به مراتب افزایش دهد.

با توجه به یافته‌ها و محدودیت‌های این پژوهش مسیرهای زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد:

۱- ایجاد یک شبکه پایش ترکیبی: نصب چند ایستگاه GPS دائمی در نقاط کلیدی (زون بال‌آمدگی، مرکز فرونشست و یک نقطه پایدار) و پایش منظم سطح آب چاه‌ها برای ایجاد یک مدل یکپارچه و کالیبره شده از تغییر شکل زمین.

۲- تحلیل سری زمانی بلندمدت: گسترش بازه زمانی مطالعه به دهه‌های گذشته با استفاده از آرشیو ماهواره‌های قدیمی‌تر (مانند ERS و Envisat) برای درک بهتر تاریخچه و تکامل پدیده فرونشست در منطقه.

۳- مدل‌سازی عددی و ژئومکانیکی: استفاده از نتایج تداخل‌سنجی راداری به عنوان ورودی برای مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی رفتار مکانیکی سیستم آبخوان در برابر سناریوهای مختلف برداشت آب. این مدل‌ها می‌توانند به مدیران در تصمیم‌گیری برای مدیریت پایدار منابع آب کمک شایانی کنند.

۴- تفکیک مولفه‌های جابجایی: استفاده از تصاویر راداری با هندسه تصویربرداری متفاوت (مدارهای صعودی و نزولی) برای تفکیک مولفه‌های جابجایی عمودی و افقی و درک دقیق‌تر دینامیک حرکت گسل‌ها.

ادامه این تحقیقات نه تنها به درک عمیق‌تر علمی از فرآیندهای زمین‌شناسی منطقه کمک می‌کند بلکه ابزارهای عملی و مؤثری را برای حفاظت از این جزیره استراتژیک و ارزشمند در برابر مخاطرات زمین‌شناسی فراهم خواهد آورد.

منابع

- [۱] NIACouncil, "The Land Subsidence Crisis in Iran: A Result of Mismanagement and Unsustainable Development Policies," 2025. [Online]. Available: <https://niacouncil.org/the-land-subsidence-crisis-in-iran-a-result-of-mismanagement-and-unsustainable-development-policies/>
- [۲] E. Nissen, M. Ghorashi, J. Jackson, B. Parsons, and M. Talebian, "The 2005 Qeshm Island earthquake (Iran)—a link between buried reverse faulting and surface folding in the Zagros Simply Folded Belt?," *Geophysical Journal International*, vol. 171, no. 1, pp. 326-338, 2007.
- [۳] M. Bockstiegel *et al.*, "Simulation of present and future land subsidence in the Rafsanjan plain, Iran, due to groundwater overexploitation using numerical modeling and InSAR data analysis," *Hydrogeology Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 289-305, 2024.
- [۴] P. Van Isacker and W. Gellertly, "James Philip Elliott. 27 July 1929—21 October 2008," ed: The Royal Society Publishing, 2021.
- [۵] R. TALEBÍ and M. HATEMÍ, "HYDROPOLITICS AND WATER ISSUES AFTER THE IRANIAN REVOLUTION (1979-2021)," 2023.
- [۶] M. Haghshenas Haghghi and M. Motagh, "Land subsidence hazard in Iran revealed by country-scale analysis of Sentinel-1 InSAR," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives*, vol. 43, pp. 155-161, 2021.
- [۷] L. O. Ohenhen *et al.*, "Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises," *Nature Cities*, pp. 1-12, 2025.
- [۸] M. Dehghani, M. J. Valadan Zoej, I. Entezam, A. Mansourian, and S. Saatchi, "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran," *Geophysical Journal International*, vol. 178, no. 1, pp. 47-56, 2009.
- [۹] S. Mahoozi, "Iran Faces Widespread Land Subsidence Amid Escalating Water Emergency," *Forbes*, 2025.
- [۱۰] M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetzell, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, vol. 168, no. 2, pp. 518-526, 2007.

- [۱۱] J. A. Payne *et al.*, "Widespread extent of irrecoverable aquifer depletion revealed by country-wide analysis of land surface subsidence hazard in Iran, 2014–2022, using two component Sentinel-1 InSAR time series," *Authorea Preprints*, 2024.
- [۱۲] D. L. Galloway, *Measuring land subsidence from space*. US Geological Survey, 2000.
- [۱۳] G. W. Bawden, M. Sneed, S. V. Stork, and D. L. Galloway, "Measuring human-induced land subsidence from space," US Geological Survey, 2327-6932, 2003 .
- [۱۴] T. Times, "A Crisis Deeper Than War." [Online]. Available: https://www.realcleardefense.com/articles/2025/06/16/a_crisis_deeper_than_war_1116811.html
- [۱۵] C. S. Portal, *Welcome to the COMET-LiCS Land Subsidence Portal*, Retrieved 29 August 2025 ed.
- [۱۶] A. Sepehr, V. Shafaie, N. Kariminejad, and M. R. Rashti, "Susceptibility mapping for land subsidence and collapsed pipes in north-east Iran," in *Advanced Tools for Studying Soil Erosion Processes*: Elsevier, 2024, pp. 579-594.
- [۱۷] H. Gharechae *et al.*, "Land subsidence susceptibility mapping using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and machine learning models in a semiarid region of Iran," *Land*, vol. 12, no. 4, p. 843, 2023.
- [۱۸] Z. Ghorbani, A. Khosravi, Y. Maghsoudi, F. F. Mojtahedi, E. Javadnia, and A. Nazari, "Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 13998, 2022.
- [۱۹] M. H. Haghighi and M. Motagh, "Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping," *ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, no. zfv 4/2017, 2017.
- [۲۰] F. Nilfouroushan, "Ground movements in the Zagros fold-thrust belt of SW Iran measured by GPS and InSAR compared to Physical models," 2007 .
- [۲۱] D. Ma, R. Zhao, Y. Li, and Z. Li, "Land subsidence assessment of an Archipelago based on the InSAR time series analysis method," *Water*, vol. 15, no. 3, p. 465, 2023.
- [۲۲] F. Rafiei, S. Gharechelou, S. Golian, and B. A. Johnson, "Aquifer and land subsidence interaction assessment using sentinel-1 data and DInSAR technique," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, no. 9, p. 495, 2022.
- [۲۳] M. Khorrami, S. Abrishami, Y. Maghsoudi, B. Alizadeh, and D. Perissin, "Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 11357, 2020.
- [۲۴] S. M. J. Mirzadeh *et al.*, "Characterization of irreversible land subsidence in the Yazd-Ardakan plain, Iran from 2003 to 2020 InSAR time series," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, no. 11, p. e2021JB022258, 2021.
- [۲۵] L. S. Othman, J. Majidi, and A. Amini, "Land Subsidence Assessment in the Darab Plain, Fars Province, Iran: Integrating Sentinel-1 InSAR and Groundwater Level Data," *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, vol. 2, no. 1, pp. 57-61, 2025.