



**Investigating the Amount of Ground Subsidence Using Radar Interferometric Technique (D- InSAR) in Mahshahr Port**

**Document Type**  
Research Paper

**Leila Ebrahimi<sup>1</sup>, Maryam Ilanloo<sup>2\*</sup>**

**Received** 2024/06/10

1. Assistant Professor, Department of Geography, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Iran
2. Assistant Professor, Department of Geography, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

**Accepted** 2024/09/23



DOI: 10.22034/eiap.2025.217506

**Abstract**

Land subsidence is one of the important geomorphic hazards that has a slow movement and leaves destructive effects in the long term. In this research, the data of centile A1 in the 8-year period from 2015 to 2023 has been used as a spatial analysis of displacement. And the software and radar interferometric method (SNAP), the changes of the saddle level have been extracted in the mentioned time period. In addition, field observations of validation and examination of research results were carried out. According to the results obtained during the period of 2015 to 2017, the amount of this subsidence was equal to 0.79 cm in the southwest part. In the northwestern parts of the region, there is a bulge. The amount of protrusion is about 1 meter and 32 centimeters. The largest increase occurred in this period. In the period from 2017 to 2018, the amount of subsidence is equal to 13 centimeters and the amount of elevation is about 68 centimeters. which was more than the period from 2015 to 2017. In this period, the extent of subsidence is greater and covers the entire southern region, which is due to the retreat of sea water and the phenomenon of tides. In the period from 2018 to 2020, the elevation is 0.089 centimeters in the southern regions and the subsidence is 39 centimeters in the northern regions. In this period, the most subsidence occurs, which corresponds to the deep wells of the region. In the period from 2020 to 2023, the elevation is equal to 16 centimeters, while the ratio and amount of subsidence is equal to 36 centimeters.

**Key words:** Uplift, Subsidence, Rice cultivation, Underground water, Mahshahr port

\* Corresponding author:

Email: [maryamilanloo@yahoo.com](mailto:maryamilanloo@yahoo.com)

## Introduction

Land subsidence is a geological hazard that occurs in urban areas around the world. Subsidence can be caused by either natural processes (eg, tectonic factors, soil consolidation, and physical and chemical weathering) or human activities (eg, underground construction, construction of tall buildings, and overexploitation of groundwater.) to be created

Mahshahr port is located on the southern coast of the country in Khuzestan province, which has a special position in terms of the development of petrochemical industry projects. One of the problems and problems of constructing structures in the petrochemical complex is the special area of root deposits and loose sediments with low load bearing capacity and settling ability. The thickness of these loose deposits, which are mainly composed of clay silt, clay and sometimes fine sand, varies in different places and in some areas it is accompanied by mud and salt. It is radar measurement.

## Methodology

This research is applied in terms of purpose, quantitative-qualitative in terms of data and descriptive-analytical and exploratory in terms of method. The working method in this research is analytical and field. In this research, radar data that includes Sentinel 1 images have been used to calculate the rate of subsidence in one month for the years 2019 to 2022, and after calculating the displacement rate of the ground surface for the studied area, in order to further investigate the effect of the drop in the underground water level on subsidence. In addition to the fluctuations of the water level of the piezometers, the effect of the sea tide was also investigated. In this research, radar interferometric studies were carried out by 24 sentinel images with the help of SNAP software. In order to reduce the noise and increase the temporal correlation of interferograms as much as possible, it has been tried to use a pair of radar images with a short time interval (about 90 days). Combining radar data from ascending and descending orbits can also be used to improve digital earth models by obtaining displacements in different directions and using interferometry. Considering that the purpose of this research is to monitor the displacement of the earth's surface, only ascending data has been used; Therefore, the basis of the number of 5 images related to the time period from 2015 to 2023 was used. To process satellite images in SNAP software environment, radar interferometry method with artificial aperture and radar interferometry technique (InSAR) have been used.

## Results and Discussion

Mahshahr Port is located at 49°13' to 50°15' east longitude and 30°30' to 30°45' north latitude in Khuzestan Province (Figure 1). Mahshahr Port extends from Abadan in the northwest, to Imam Khomeini Port in the southwest, to Handijan Port in the southeast, and to the Persian Gulf in the south. The Mahshahr Port extends to the south of the tip of the equator and forms a vast bay, the length between the two ends of the bay being about 55 km. In this part, the Bank Mountain, which is close to the coast and has an altitude of 3600 meters, is low and low in the rest of the area. Due to the low elevation of the coastal areas, the height of the tides and waves reaches 3 meters. The adjacent lands are subject to flooding and face agricultural and construction problems. Bandar Mahshahr currently consists of two main parts of the industrial city, the housing of company employees and government offices, which was built by the British in 1930, and the old Mahshahr, which includes the city's traditional and administrative markets.

The port of Mahshahr, where the industrial material transportation facilities are located, has a huge facility to receive oil tankers with a length of 250 meters and a draft of 12 meters. On the other hand, the petrochemical industry in Bandar Imam, the other pole of the regional economy, plays a vital role in the development and construction of the city. The two poles of the port and the petrochemical industry complement each other and

are the main elements of the life of the cities in the region. Bandar Mahshahr consists of 5 regions, 11 districts, and 32 neighborhoods (residential), where there is a clear difference in the living conditions of the residents. After preparing a series of radar images with a suitable spatial and temporal difference and creating a spatial and temporal graph between the images including 5 images, using the SBAS time series method, the amount of land surface changes in the scope of the study was calculated over a period of 8 years (2015-2023). After preparing the final map of land surface changes, the parts of the region that had significant amounts of subsidence were considered as target areas for further investigation. According to the results obtained during the period of 2015 to 2017, the amount of this subsidence was equal to 0.79 cm in the southwest part. In the northwestern part of the region, which is white in color, there is a bulge. The amount of protrusion is about 1 meter and 32 centimeters. The largest increase occurred in this period. In the period from 2017 to 2019, the amount of subsidence is equal to 13 centimeters and the amount of elevation is about 68 centimeters. Which was more than the period from 2015 to 2017. In this period, the extent of subsidence is greater and covers the entire southern region, which is due to the retreat of sea water and the phenomenon of tides. In the period from 2019 to 2021, the elevation is 0.089 centimeters in the southern regions and the subsidence is 39 centimeters in the northern regions. In this period, the most subsidence occurs, which corresponds to the deep wells of the region. In the period from 2021 to 2023, the elevation is equal to 16 centimeters, while the ratio and amount of subsidence is equal to 36 centimeters.

### Conclusion

Measuring the amount and range of land surface movement through satellite data is a new method of monitoring this phenomenon that has been proposed during the last decade. So far, radar interferometry is one of the most accurate and least expensive remote sensing methods for identifying and displaying displacements on the earth's surface. Also, due to the use of satellite data and its reproducibility, this method can be implemented easily and in the shortest time to monitor this phenomenon in the desired location. This method has made it possible to measure the displacement of the earth's surface in all the examined areas and has provided the possibility of monitoring it for all points for different periods of time. In this research, the radar interferometric method has been used to analyze and measure the ground surface displacement for Bandar Mahshahr city. Previous researches have emphasized the role and importance of using radar images of different sensors in the accurate identification of this phenomenon. The present research, like the studies of Imamoglu et al. (2018), Bai Lin et al. (2016), Liu et al. (2018), Osmano et al. (2016), and Qiu et al. shows the ground observations and confirms the suitability of this method in measuring the deformation of the earth's surface.

### References

- Abidin, H.Z.; Andreas, H.; Gumilar, I., & Wibowo, I.R.R. 2015. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 370(4): 15–20.
- Akbari, A.; Javanshiri, M. & Mohammadpour, Z., 2019, investigation of land surface subsidence in Esfaden Plain. *Conference on Environment, Geography and Tourism of Bozormehr Qaenat University.* (In Persian)
- Bagheri, M. ; Hosseini, S.M.; Ataie-Ashtiani, B.; Sohani, Y.; Ebrahimi, H.; Morovat, F. & Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: a global challenge. *Sci. Total Environ.* 146193.
- Fath Elahi, N.; Akhundzadeh Hanzaei, M. & Bahrudi, A., 2019, Investigating land subsidence due to oil extraction using radar interferometric method, *Sepehr Journal*, 27(105): 23-43. (In Persian)

- Fatuhi, S.; Al-Madrasi, A. & Delaram, R., 2023. investigation of land subsidence using radar interferometric technique (D-InSAR) in Nehbandan-Sahlabad Plain, *Journal of Remote Sensing and Geographical Information System in Natural Resources*, 14(51): 1-19. (In Persian)
- Haghighi, M.H. & Motagh, M., 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sens. Environ.* 12(221): 534–550.
- Hasibuan, C.J.M.; Quinn, P.F.; Whitehead, P.G.; Heathwaite, A.L. & Flynn, N.J., 2023. Towards a nutrient export risk matrix approach to managing agricultural pollution at source. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 8 (4): 834–845.
- Zandi, R. & Shafiei, N. 2019. investigation of land surface subsidence in Dasht Jovin. *Environment, Geography and Tourism Conference of Bozormehr Qaenat University*. (In Persian)
- Zhao, F.; Wenping, G.; Huiming, T.; Shiva, P.; Pudasaini, T. & Zhan, C. 2023. An integrated approach for risk assessment of land subsidence in Xi'an, China using optical and radar satellite images, *Engineering Geology*, 12 (314): 106983.

## بررسی میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در بندر ماهشهر

لیلا ابراهیمی<sup>۱</sup>، مریم ایلانلو<sup>۲\*</sup>

۱. استادیار گروه جغرافیا، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
۲. استادیار گروه جغرافیا، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

### چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهم ژئومورفیک می‌باشد که دارای حرکتی کند بوده و در بلندمدت آثار مخربی برجای می‌گذارد. تکنیک تداخل‌سنجی راداری با دقت بالا از مناسب‌ترین و به روزترین روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری میزان فرونشست می‌باشد. این تکنیک فاز گرفته شده از دو مجموعه رادار در دو دوره زمانی مختلف از یک منطقه را مقایسه و با ایجاد اینترفروگرام، قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در بازه زمانی است. در این تحقیق از روش تداخل‌سنجی راداری و نرم‌افزار (SNAP)، به منظور تحلیل فضایی میزان جابه‌جایی از داده‌های سنتیل ۱ در بازه زمانی ۸ ساله ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۲ استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده در طی بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ میزان فرونشست برابر با ۰/۷۹ سانتی‌متر و در قسمت جنوب غرب بوده است. همچنین در قسمت‌های شمال غرب منطقه برآمدگی به میزان ۱ متر و ۳۲ سانتی‌متر به وجود آمده است. این برآمدگی نسبت به سایر دوره‌های مورد بررسی بیشتر است. در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ میزان فرونشست برابر با ۱۳ سانتی‌متر و میزان برآمدگی در حدود ۶۸ سانتی‌متر می‌باشد. که بیشتر از بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ بوده است. در این دوره وسعت فرونشست بیشتر است و کل منطقه جنوبی را در بر گرفته است که این مسئله به دلیل پسروی آب دریا و پدیده جزر و مد بوده است. در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ برآمدگی ۰/۰۸۹ سانتی‌متر در مناطق جنوبی و ۳۹ سانتی‌متر فرونشست در مناطق شمالی است. در این دوره بیشترین فرونشست اتفاق است که منطبق با چاه‌های عمیق منطقه می‌باشد. همچنین در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ برآمدگی و میزان فرونشست به ترتیب برابر با ۱۶ و ۳۶ سانتی‌متر است. به طور کلی براساس نتایج به دست آمده فرونشست در شهر بندر ماهشهر و بندر امام خمینی (ره) کمتر رخ داده و بیشتر فرونشینی در قسمت جنوبی منطقه واقع در منطقه صنعتی پتروشیمی و قسمت شمال غرب و شمال منطقه واقع در مزارع کشت برنج و چاه‌های عمیق منطقه رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: برآمدگی، فرونشست، کشت برنج، آب زیرزمینی، بندر ماهشهر

## سرآغاز

که مکانیسم‌های مختلف را شامل می‌شود، نسبتاً محدود است (Sundell et al., 2019).

(Zhao et al., 2023) به یک رویکرد یکپارچه برای ارزیابی خطر فرونشست زمین در شیآن، چین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نوری و راداری پرداختند. عناصری که به طور بالقوه تحت تأثیر فرونشست زمین قرار می‌گیرند، از طریق تجزیه و تحلیل طبقه‌بندی کاربری زمین، که بر اساس استفاده هم‌افزایی از تصاویر نوری و راداری با استفاده از رویکرد مبتنی بر شی است، شناسایی می‌شوند. در نهایت، ریسک ناشی از فرونشست زمین با استفاده از یک ماتریس ریسک که نشست تفاضلی، شکاف‌های زمین و نتایج طبقه‌بندی کاربری زمین را ادغام می‌کند، ارزیابی می‌شود. برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی، ارزیابی ریسک فرونشست زمین در شهر شیآن، چین انجام شده است. نتایج ما همچنین مزایای طبقه‌بندی هم‌افزایی کاربری زمین را نسبت به طبقه‌بندی مبتنی بر پیکسل نشان می‌دهد. (Hasibuan et al., 2023) به سیاست‌گذاری و ویژگی‌های فضایی فرونشست زمین در جا کارتای شمالی پرداختند. هدف این پژوهش ارائه تبیین آکادمیک پدیده فرونشست زمین از منظر نهادگرایی تاریخی است. با استفاده از تحلیل فضایی و بررسی‌های اسنادی، ما در مورد رابطه بین جهت‌گیری‌های سیاستی و اشکال فرونشست زمین در طول دهه‌ها بحث کردیم. این مقاله نشان داد که سیاست فضایی که شهرنشینی در شمال جا کارتا را تحت فشار قرار داده است، تأثیر قابل توجهی بر فرونشست زمین داشته است. ناتوانی سیاست دولت در پرداختن به بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی هم از سکونتگاه‌ها و هم از صنایع با تأمین دسترسی به آب سالم، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل آغاز کننده فرونشست زمین ظاهر شد. (Respini et al., 2022) به بررسی تداخل سنجی رادار ماهواره‌ای برای تجزیه و تحلیل فرونشست پرداختند. این بررسی نشان می‌دهد که ماهواره InSAR از یک موضوع خاص به یک ابزار عملیاتی با نقش عمده در مطالعات فرونشست تبدیل شده است. با وجود بیش از ۲۵ سال پیشرفت و پیشرفت، چالش‌های فنی و عملیاتی همچنان باقی مانده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل مرور ادبیات و تجربه نویسندگان، توصیه‌ها و دیدگاه‌ها برای استفاده موثرتر از داده‌های InSAR ارائه شده است. (Fotuhi et al., 2024) به بررسی میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نهبندان - سهل‌آباد پرداختند. نتایج حاصله از این فن نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست مربوط به

فرونشست زمین یک خطر زمین‌شناسی است که در مناطق شهری در سراسر جهان رخ می‌دهد. فرونشست می‌تواند در اثر هر یک از فرایندهای طبیعی (به عنوان مثال، عوامل تکتونیکی، تحکیم خاک و هوازدگی فیزیکی و شیمیایی) یا فعالیت‌های انسانی (مانند ساخت و ساز زیرزمینی، ساخت و ساز ساختمان‌های بلند، و بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی) ایجاد شود (Ciampalini et al., 2019).

فرونشست زمین ممکن است باعث ترک خوردگی سطحی، نشست تفاضلی، تخریب ساختمان و سایر اشکال آسیب به زیرساخت‌های شهری شود (Cigna & Tapete, 2021; Haghghi & Motagh, 2019). به این ترتیب، ارزیابی ریسک فرونشست زمین در مناطق شهری نقشی حیاتی در تصمیم‌گیری برای کاهش خطر و مدیریت دارد (Lyu et al., 2020; Fern'andez-Torres et al., 2020). نتایج ارزیابی ریسک فرونشست زمین می‌تواند بینش‌هایی را در مورد سطح خطر ناشی از فرونشست زمین فراهم کند و به برنامه‌ریزی و توسعه شهری کمک کند (Bagheri et al., 2021). ارزیابی ریسک فرونشست زمین در مناطق شهری از دیرباز یک چالش بزرگ در مهندسی زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و ژئوتکنیک بوده است. مکانیسم‌های وقوع، نظارت و اصلاح فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، نفت و گاز به طور گسترده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند (U et al., 2014; Figueroa Miranda et al., 2018).

در همین حال، اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی فرونشست زمین، مانند آسیب‌های ساختمانی و زیرساختی، نیز به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Abidin et al., 2015; Suganthi & Elango, 2020; Hiatt et al., 2019). با این حال، مطالعات موجود اغلب با موارد فرونشست زمین در مقیاس محلی سروکار دارند که مکانیسم‌های وقوع خاصی را نشان می‌دهند (Huang et al., 2012). آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر (مانند ساختمان‌ها، زیرساخت‌های شهری و زمین‌های کشاورزی) در برابر فرونشست زمین، با آسیب‌های جدی مواجه هستند (Ma et al., 2019; Lyu et al., 2020). بیشتر مطالعات موجود فقط با ارزیابی خطر فرونشست زمین ناشی از مکانیسم‌های خاص در مقیاس محلی سروکار دارند. در حالی که، مطالعات در مورد ارزیابی ریسک فرونشست زمین در مقیاس بزرگ (به عنوان مثال، در سطح وسیع)

### موقعیت منطقه مورد مطالعه

بندر ماهشهر در ۴۹ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی در استان خوزستان واقع شده است (شکل ۱). بندر ماهشهر از شمال غربی به آبادان، از جنوب غربی به بندر امام خمینی، از جنوب شرقی به بندر هندیجان و از طرف جنوب به خلیج فارس منتهی می‌گردد. امتداد بندرماهشهر تا جنوب رأس القطب کشیده شده و یک خلیج پهناوری را تشکیل می‌دهد که طول بین دو رأس خلیج در حدود ۵۵ کیلومتر است. در این قسمت به جر کوه بنک که نزدیک کرانه است و ارتفاع آن ۳۶۰۰ متر می‌باشد، الباقی همه پست و کم ارتفاع هستند. به علت ارتفاع اندک نقاط ساحلی، ارتفاع امواج جذر و مدگاه به ۳ متر می‌رسد. اراضی مجاور دستخوش پیش‌آمدگی آب بوده و با مشکلات کشاورزی و ساختمانی روبه‌رو هستند. بندرماهشهر در حال حاضر از دو قسمت عمده شهر صنعتی، محل منازل کارمندان شرکت و ادارات دولتی که در سال ۱۹۳۰ میلادی توسط انگلیسی‌ها ساخته شده و ماهشهر قدیم که در مرکزیت بازارهای سنتی و اداری شهر را در برمی‌گیرد، تشکیل شده است.

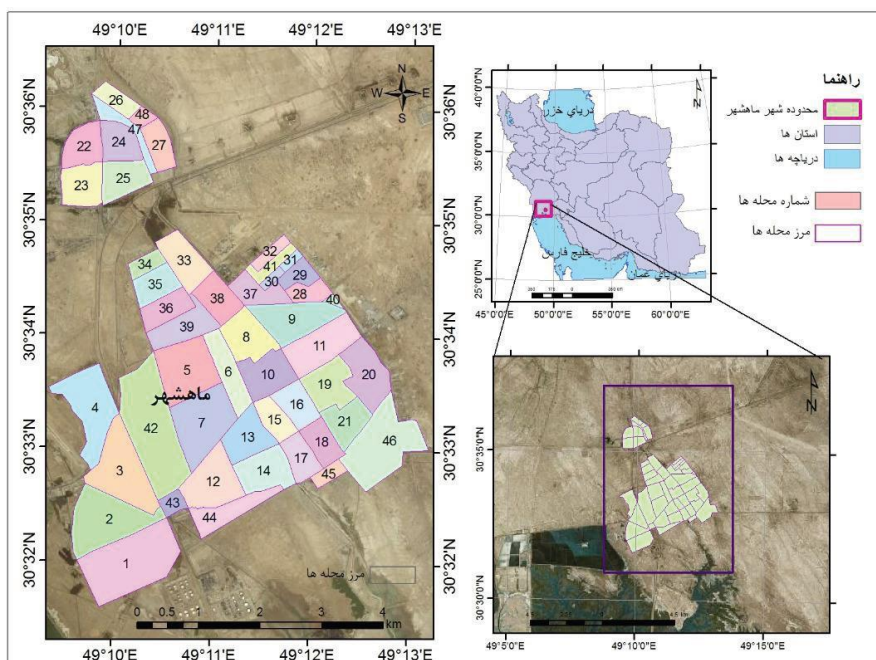
بندر ماهشهر که تأسیسات حمل مواد صنعتی در آنجا قرار دارد، دارای تأسیساتی عظیم جهت پذیرش کشتی‌های نفتکش با طول ۲۵۰ متر و آب‌خور ۱۲ متر است و از طرف دیگر صنایع پتروشیمی در بندر امام، قطب دیگر اقتصاد منطقه نقشی حیاتی در توسعه و عمران شهر دارد. دو قطب بندر و صنعت پتروشیمی به صورت مکمل یکدیگر عناصر اصلی حیات شهرهای منطقه هستند. بندرماهشهر شامل ۵ منطقه، ۱۱ ناحیه و ۳۲ محله (مسکونی) است که تفاوت آشکاری از نظر شرایط زندگی ساکنان مشاهده می‌شود.

### روش تحقیق

این تحقیق به لحاظ هدف کاربردی، به لحاظ داده کمی- کیفی و به لحاظ روش از نوع توصیفی- تحلیلی و میدانی است. در این تحقیق از داده‌های راداری که شامل تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه نرخ فرونشست در بازه زمانی یک ماه برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۲ استفاده شده است و پس از محاسبه نرخ جابه‌جایی سطح زمین برای منطقه مورد مطالعه به منظور بررسی بیشتر تأثیر افت تراز آب زیرزمینی بر فرونشست علاوه بر نوسانات تراز آب پیژومترها، تأثیر جزر و مد دریا، نیز مورد بررسی قرار گرفت.

محدوده زمین‌های کشاورزی در مرکز و شمال دشت، حدود ۱۳/۴ سانتی‌متر در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ است و همچنین در بازه ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۵ حدود ۱۳/۱ سانتی‌متر فرونشست را شاهد هستیم. این محدوده در بررسی جدید تصاویر ماهواره Sentinel1 در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹ نیز فرونشست ۵/۹ سانتی‌متر را تجربه کرده است که نشان‌دهنده تداوم فرونشست در این منطقه است. برای صحت‌سنجی نتایج از آمار مربوط به چاه‌های پیژومتر استفاده گردید و نتایج نشان‌دهنده افت سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در بازه ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ است. (Shafiee et al., 2020) به بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. حاصل از همبستگی ضریب R2 برابر ۷۲ درصد و سطح معناداری ۹۹ درصد به دست آمد و نشان داد که ارتباط مستقیمی بین افت و میزان فرونشست وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد که، در محدوده دشت در بازه زمانی ۱۲ ساله بیشترین میزان افت آب زیرزمینی حدود ۲۲ متر در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان واقع در چاه‌ها پیژومتری اسکان عشایر، حومه، شهرک صنعتی، تل مشکی و شور می‌باشد. نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان داد که نرخ نشست در هر سال میانگین ۴ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ۴ ساله حدود ۰/۰۱۶ متر (۱۶ سانتی‌متر) می‌باشد. (Fatholahi et al., 2018) به بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار پرداختند. در این مطالعه دو میدان بزرگ نفتی یکی واقع در منطقه جنوب غربی ایران و دیگری در کالیفرنای مرکزی توسط تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر کارایی مناسب این روش به منظور بررسی جابه‌جایی ناشی از فرونشست در میداین مذکور می‌باشد.

بندر ماهشهر در سواحل جنوبی کشور در استان خوزستان واقع شده که از نظر توسعه پروژه‌های صنایع پتروشیمی از جایگاه خاصی برخوردار است. یکی از مسایل و مشکلات احداث سازه‌ها در مجتمع پتروشیمی منطقه ویژه نهشته‌های جذر و مدی با مقاومت باربری کم و قابلیت نشست‌پذیری است. ضخامت این نهشته‌های سست که عمدتاً از سیلت رسی، رس و بعضاً ماسه ریزدانه تشکیل شده‌اند، در نقاط مختلف متغیر بوده و در برخی مناطق همراه با لجن و نمک می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی میزان فرونشست زمین در بندر ماهشهر با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی است.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

آوردن جابه‌جایی‌ها در جهات مختلف و با استفاده از اینترفرومتری مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این که در این تحقیق هدف پایش میزان جابه‌جایی‌های سطح زمین است، تنها از داده‌های صعودی استفاده شده است؛ بنابراین اساس از تعداد ۵ تصویر مربوط به دوره زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۲ مورد استفاده قرار گرفت که در جدول (۱) اطلاعات ثبت شده است.

مطالعات تداخل‌سنجی راداری در این تحقیق توسط ۵ تصویر سنتینل و به کمک نرم‌افزار SNAP انجام گرفته است. برای کاهش نویز و افزایش همبستگی زمانی اینترفروگرام‌ها تا حد امکان سعی شده، از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی کوتاه (حدود ۹۰ روز) استفاده شود. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای سعودی و نزولی نیز می‌تواند جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین با به دست

جدول (۱): تصاویر ماهواره‌ای به کار رفته در پژوهش

	Acquisition Date	Beam mode	path	Ascending/Descending	Polarization	Absolute Orbit	Frequency	Mission
1	2023/04/10	IW	86	Ascending	VV-HV	16093	C-Band	Sentinel-1
2	2021/06/09	IW	86	Ascending	VV-HV	16758	C-Band	Sentinel-1
3	2019/07/03	IW	86	Ascending	VV-HV	17508	C-Band	Sentinel-1
4	2017/09/25	IW	86	Ascending	VV-HV	18433	C-Band	Sentinel-1
5	2015/10/7	IW	86	Ascending	VV-HV	18308	C-Band	Sentinel-1

تخمین زده شد. رابطه فاز اینترفرومتری براساس رابطه (۱) محاسبه شد.

رابطه (۱)

$$Y_1 = [Y_1] \exp(i\varphi_1)$$

$$Y_2 = [Y_2] \exp(i\varphi_2)$$

$$y_1 y_2 = |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2))$$

در این رابطه  $y_1$  و  $y_2$  سیگنال‌های دو پیکسل متناظر است که اولی تصویر اصلی (master) و دومی تصویر فرعی (slave) است. پس از ضرب مختلط این دو سیگنال، رابطه دیگری به دست

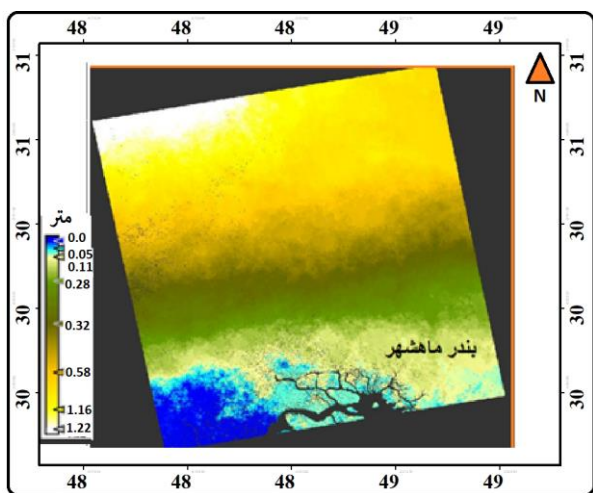
برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم افزار SNAP از روش تداخل‌سنجی راداری با دریچه مصنوعی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) استفاده شده است. در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه شد. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر اینترفروگرام تولید شد.

پس از تشکیل تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل

هیدرواستاتیک و خروج آب از خاک که مشتمل بر لایه‌های ریز در قسمت‌های جنوبی و لایه‌های درشت‌تر در قسمت‌های شمالی است، می‌شود، این امر منجر به تحکیم و کاهش حجم خاک و در نهایت وقوع نشست تدریجی زمین است.

### بررسی الگوی فرونشست زمین ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶

با استفاده از مراحل مختلف و پیچیده نقشه فرونشست منطقه در طی بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ تهیه گردید. که در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد قسمت‌های جنوب غرب که به رنگ آبی هستند دچار فرونشست و جابه‌جایی شده‌اند. میزان این فرونشست ۰/۷۹ سانتی‌متر است. در قسمت‌های شمال غرب منطقه که به رنگ سفید نمایش داده شده است. برآمدگی وجود دارد. در شکل (۴) میزان جابه‌جایی به متر نشان داده شده است. میزان برآمدگی در حدود ۱ متر و ۳۲ سانتی‌متر است.



شکل (۲): نقشه فرونشست بندر ماهشهر در طی بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶

شکل (۴) پروفایل جابه‌جایی سطح زمین در بازه زمین ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۴ در بندر ماهشهر را نشان می‌دهد. برای این که مشخص شود که این مناطق منطبق با کدام مناطق بر روی سطح زمین است، تصویر ماهواره لندست ۱۳۹۴ را تهیه کرده و نقشه فرونشست زمین منطبق با آن داده شد (شکل ۵). همان‌طور که بر روی نقشه مشخص است در قسمت‌های شمال غرب که منطقه دچار برآمدگی شده است طی بررسی‌های میدانی در این منطقه برنج کشت شده است. در قسمت‌های جنوبی پسروی آب دریا و

می‌آید که این رابطه  $|y_1| |y_2|$  دامنه  $\varphi_1 - \varphi_2$  و برابر فاز اینترفروگرام است. در این رابطه، تغییر فاز به اندازه  $2\pi$  معادل جابه‌جایی به اندازه نصف طول موج مورد استفاده توسط ماهواره است که نشان‌دهنده یک فرینج کامل در اینترفروگرام است (Akbari et al., 2019).

فاز اینترفروگرام ایجاد شده ناشی از مولفه‌هایی مانند مولفه مداری، توپوگرافی، جابه‌جایی، اتمسفر و نویز است که هر یک از این پارامترها سبب تغییر فاز می‌شود. ارتباط اختلاف فاز ایجاد شده در تداخل سنجی راداری و مولفه‌های ذکر شده، براساس رابطه (۲) تعیین می‌شود.

رابطه (۲)

$$\Delta\varphi_{Deformation} + \Delta\varphi_{Atmosphere} + noise \Delta\varphi_2 = \varphi_{21} - \varphi_2 = \Delta\varphi_{Topography}$$

موقعیت نسبی تعدادی از عوارض زمینی در بازه زمانی بین دو تصویربرداری SAR به صورت جزئی تغییر می‌کند. این تغییرات ناشی از پدیده‌هایی نظیر فرونشست، زمین لرزه، زمین لغزش و یا حرکت گسل‌های است. این اثر تغییر فازی را مستقل از خط مبنا ایجاد می‌کند که از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad \text{رابطه (۳)}$$

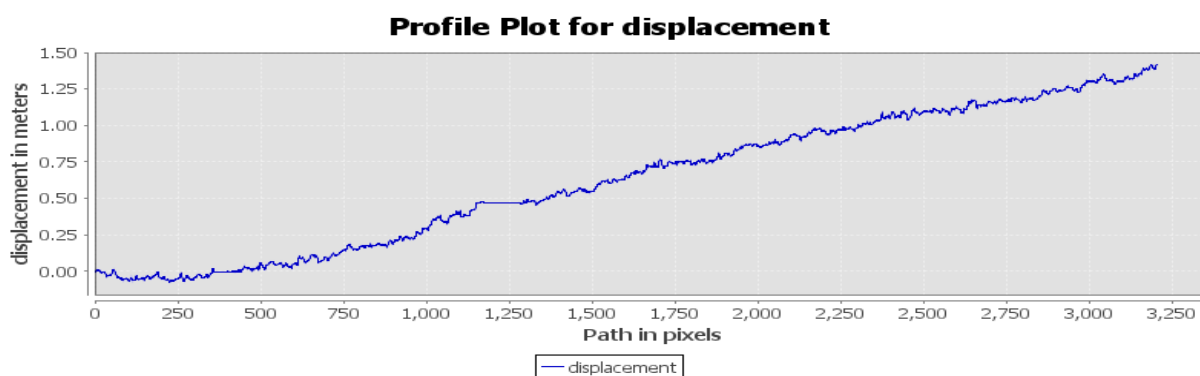
در این رابطه،  $d$  تصویر جابه‌جایی نسبی عارضه در راستای رنج مایل است. پس از مسطح‌سازی اینترفروگرام، فاز تداخل سنجی شامل هر دو اثر ارتفاعی و جابه‌جایی خواهد بود، بنابراین تداخل سنجی در این حالت مطابق رابطه ۴ تعیین می‌شود (Zandi et al., 2019).

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad \text{رابطه (۴)}$$

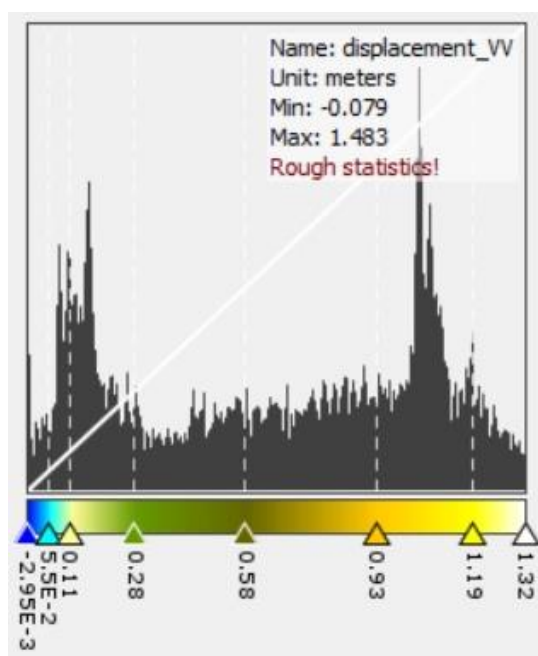
### یافته‌های تحقیق

پس از تهیه سری تصاویر راداری با اختلاف مکانی و زمانی مناسب و تشکیل گراف مکانی و زمانی بین تصاویر شامل ۵ تصاویر، با استفاده از روش سری زمانی SBAS میزان تغییرات سطح زمین در محدوده مورد مطالعه طی بازه زمانی ۸ سال (۱۳۹۴-۱۴۰۲) محاسبه شد. پس از تهیه نقشه نهایی تغییرات سطح زمین، بخش‌هایی از منطقه که دارای مقادیر قابل توجه فرونشست بودند به عنوان مناطق هدف برای بررسی بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. استخراج آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی و همچنین وجود جزر و مد در قسمت‌های جنوبی منطقه سبب کاهش فضای

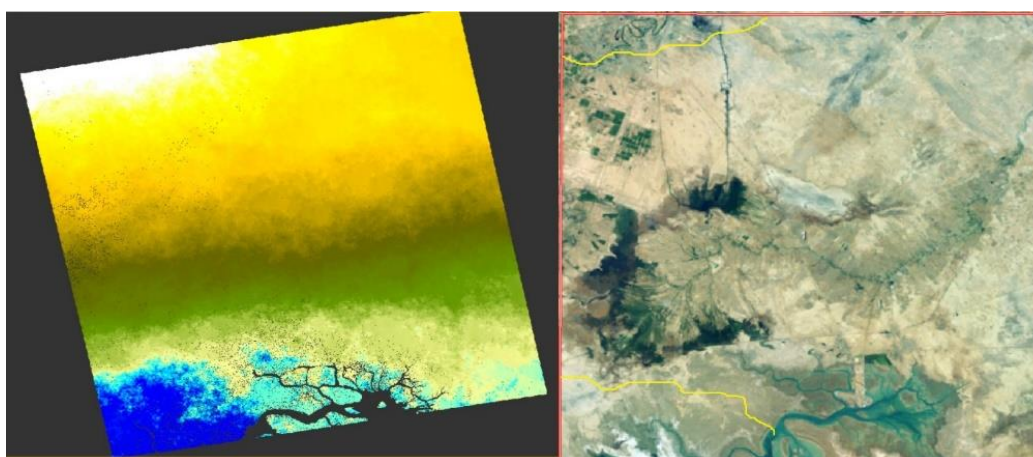
برداشت آب زیرزمینی و جزرو مد در منطقه باعث به وجود آمدن فرو نشست در منطقه شده است.



شکل (۳): پروفایل جابه‌جایی سطح زمین در بازه زمین ۱۳۹۶ تا ۲۰۱۵ در بندر ماهشهر

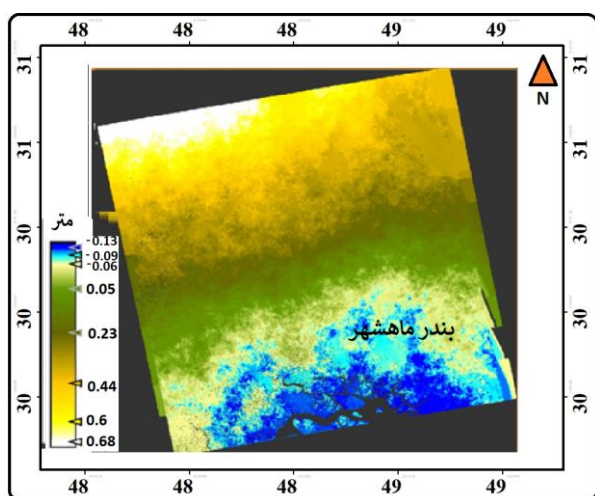


شکل (۴): میزان جابه‌جایی سطح زمین به متر در بندر ماهشهر در بازه زمانی ۱۳۹۶-۲۰۱۵



شکل (۵): انطباق نقشه فرونشست ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ با نقشه لندست ۱۳۹۴

منطقه ویژه پتروشیمی از جمله این شهرها هستند. خاک این مناطق سست و شور است. همچنین از نظر توپوگرافی، هموار و کم ارتفاع و کم شیب هستند. جزر و مد در این مناطق به دلیل قرار گرفتن در کنار خلیج دوبر در طی روز اتفاق می افتد. در مجموع این عوامل سبب فرونشست در این قسمت ها شده است. البته شدت فرونشست چندان زیاد نیست.



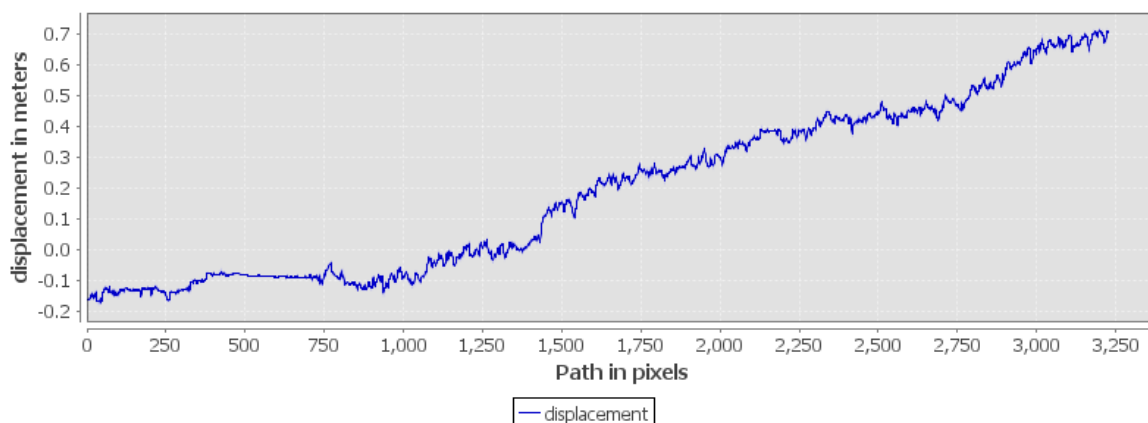
شکل (۶): نقشه فرونشست بندر ماهشهر در طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۶

### بررسی الگوی فرونشست زمین در بازه زمانی ۱۳۹۶-۱۳۹۸

با استفاده از مراحل مختلف و پیچیده نقشه فرونشست منطقه در طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۶ تهیه گردید (شکل ۶). همان طور که شکل (۶) نشان می دهد قسمت های جنوبی که به رنگ آبی هستند دچار فرونشست و جابه جایی شده اند. میزان این فرونشست ۱۳ سانتی متر است. در قسمت های شمال غرب منطقه که با رنگ سفید نشان داده شده است دارای برآمدگی است. در شکل (۸) میزان جابه جایی به متر نشان داده شده است. میزان برآمدگی در حدود ۶۸ سانتی متر است. همان طور که در شکل مشخص است میزان فرونشست نسبت به بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ افزایش یافته است به طوری که فرونشست به مناطق شهری بندر ماهشهر و بندر امام خمینی (ره) رسیده است. این مسئله در ارتباط با خشکسالی های منطقه و پایین رفتن سطح آب های زیرزمینی و پسروی آب دریا است. شکل (۷) پروفایل جابه جایی منطقه را نشان می دهد.

در قسمت های جنوبی منطقه، مناطق مسکونی و شهرها واقع شده اند. شهرهای بندر ماهشهر، بندر امام خمینی (ره)، شهر چمران،

### Profile Plot for displacement

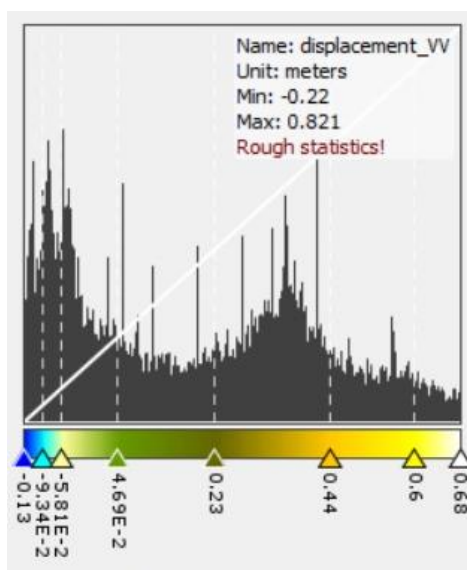


شکل (۷): پروفایل جابه جایی سطح زمین در بازه زمین ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ در بندر ماهشهر

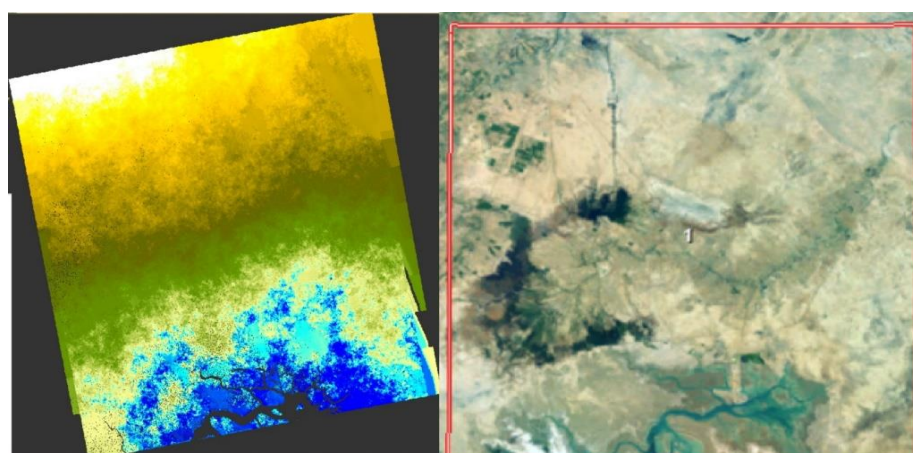
بودند در طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ دچار فرونشست شده اند. در حالی که قسمت های جنوبی منطقه که قبلا دچار فرونشست شده بودند در طی این بازه زمانی دچار برآمدگی شده اند که میزان این جابه جایی برابر با برآمدگی ۰/۰۸۹ سانتی متر در مناطق جنوبی و ۳۹ سانتی متر فرونشست در مناطق شمالی است (شکل ۱۱).

### بررسی الگوی فرونشست زمین در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۸

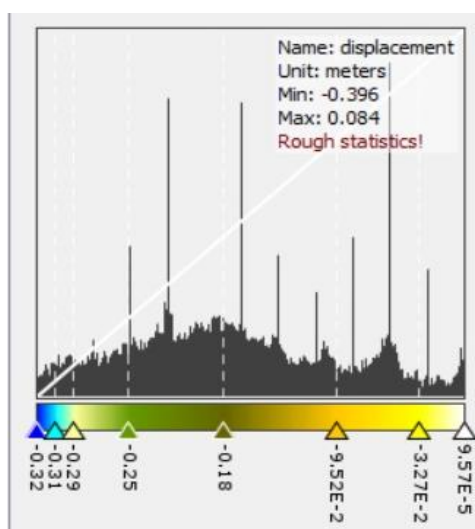
فرونشست منطقه در طی بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۳۹۸ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۰) جهت فرونشست و برآمدگی جابه جا شده است. که این اتفاق بعد از سیل ۱۳۹۸ اتفاق افتاده است. قسمت های شمال منطقه که قبلا دچار برآمدگی شده



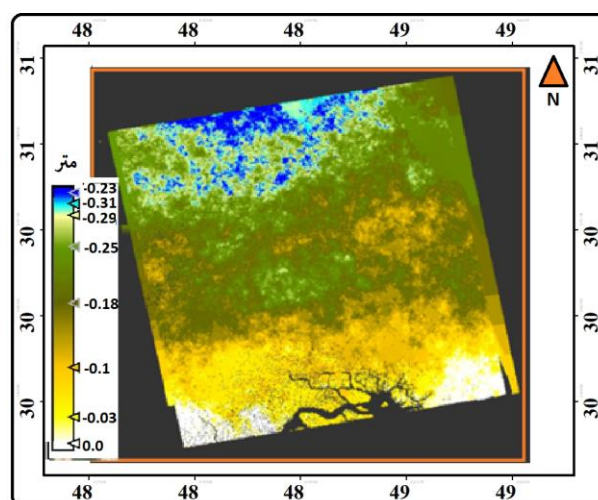
شکل (۸): میزان جابه‌جایی سطح زمین به متر در بندر ماهشهر در بازه زمانی ۱۳۹۶-۱۳۹۸



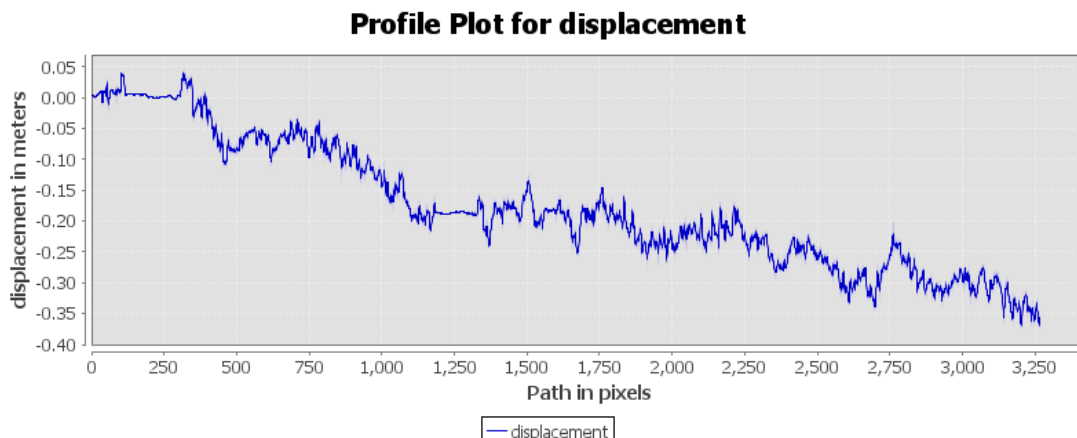
شکل (۹): انطباق نقشه فرونشست ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ با نقشه لندست ۱۳۹۸



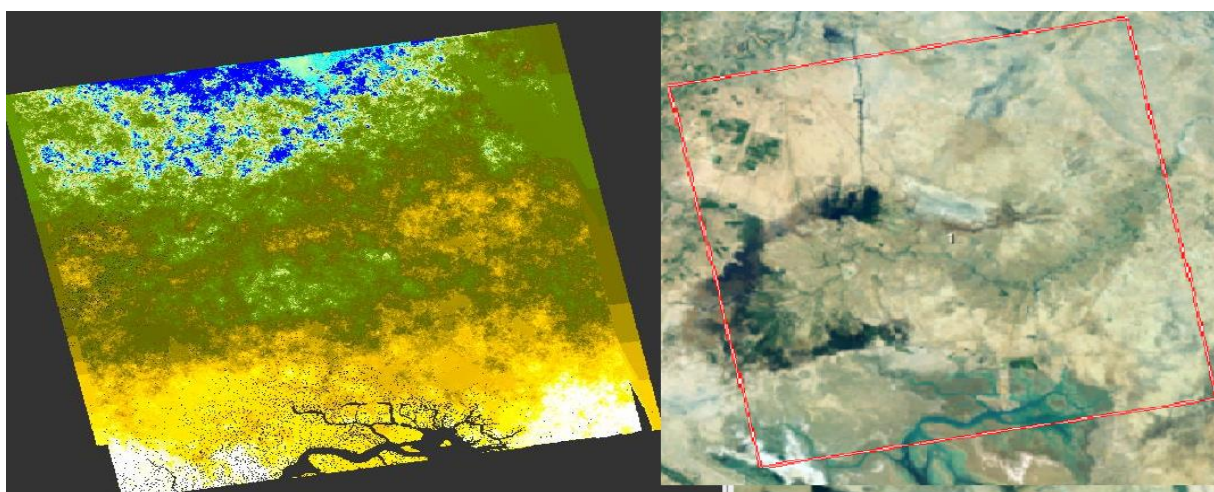
شکل (۱۱): میزان جابه‌جایی سطح زمین به متر در بندر ماهشهر در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۴۰۰



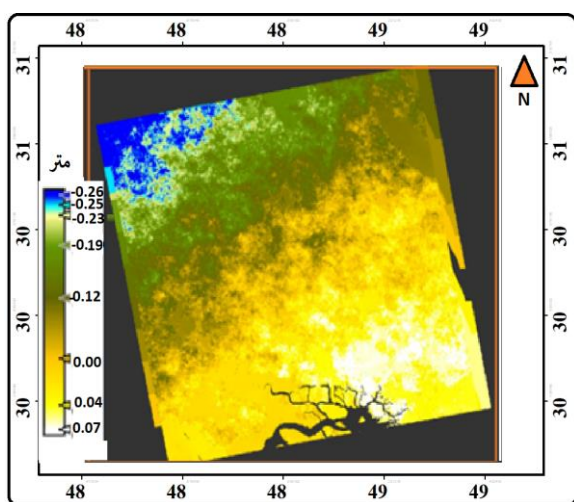
شکل (۱۰): نقشه فرونشست بندر ماهشهر در طی بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰



شکل (۱۲): میزان جابه‌جایی سطح زمین به متر در بندر ماهشهر در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۴۰۰



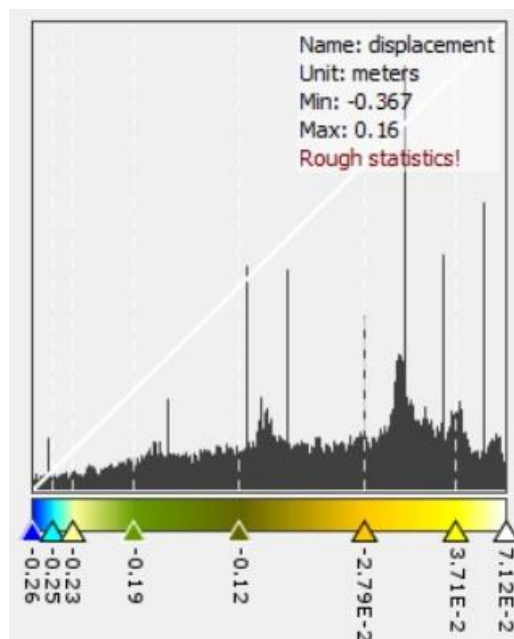
شکل (۱۳): انطباق نقشه فرونشست ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ با نقشه لندست ۱۴۰۰



شکل (۱۴): نقشه فرونشست بندر ماهشهر در طی بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲

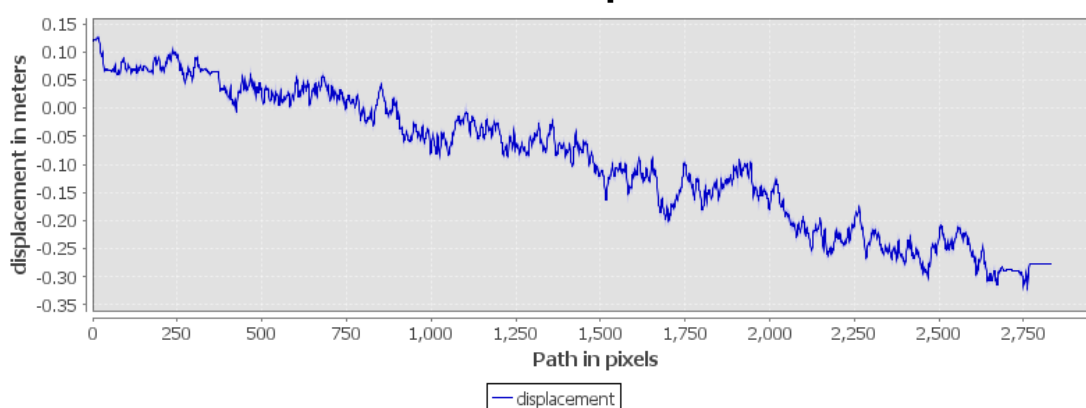
### بررسی الگوی فرونشست زمین در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۴۰۲

نقشه فرونشست منطقه در طی بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل، میزان فرونشست در قسمت شمال غرب منطقه (رنگ آبی) است. در حالی که برآمدگی (رنگ سفید) در قسمت جنوب و جنوب شرق مشاهده می‌شود. میزان برآمدگی برابر با ۱۶ سانتی‌متر است که نسبت به بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ این میزان بیشتر شده است و میزان فرونشست برابر با ۳۶ سانتی‌متر است که میزان فرونشست نیز نسبت به بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ بیشتر است این مسئله به دلیل حفر چاه‌های عمیق در مناطق شمالی منطقه به دلیل کشت برنج می‌باشد. منطقه برآمده منطبق با شهرهای بندر ماهشهر، بندر امام خمینی (ره) و منطقه ویژه پتروشیمی می‌باشد و منطقه فرونشست منطبق با منطقه کشت برنج و چاه‌های عمیق منطقه می‌باشد.



شکل (۱۵): میزان جابه‌جایی سطح زمین به متر در بندر ماهشهر در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۰

### Profile Plot for displacement



شکل (۱۶): میزان جابه‌جایی سطح زمین به متر در بندر ماهشهر در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۰

### بحث و نتیجه‌گیری

این روش به واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت تکرارپذیری آن پایش این پدیده در مکان موردنظر با سهولت و کوتاه‌ترین زمان امکان اجرا دارد. این روش بررسی میزان جابه‌جایی سطح زمین را در تمام محدوده مورد بررسی امکان‌پذیر کرده است و امکان پایش آن را برای تمام نقاط برای دوره‌های زمانی مختلف فراهم نموده است. در این تحقیق از روش تداخل‌سنجی راداری برای تحلیل و اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی سطح زمین برای شهرستان بندر ماهشهر استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه در دهه‌های اخیر رشد جمعیت را در کنار توسعه کشاورزی تجربه کرده است. بارش کم سال‌های اخیر و خشک سالی‌های متوالی، محدودیت منابع آب سطحی، روش‌های نادرست

پژوهش‌های پیشین، بر نقش و اهمیت استفاده از تصاویر راداری سنجنده‌های مختلف در شناسایی دقیق این پدیده تأکید داشته‌اند. تحقیق حاضر همانند مطالعات (Imamoglu et al., 2018; Bai) Lin et al., 2016; Liu et al., 2018; Osmanu et al., 2014; Qiu et al., 2016)، از سازگاری بسیار بالای نتایج تداخل‌سنجی راداری با مشاهدات زمینی را نشان می‌دهد و مناسب بودن این روش در اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین را تایید می‌کند. اندازه‌گیری میزان و دامنه جابه‌جایی سطح زمین از طریق اطلاعات ماهواره‌ای، روشی نوین در پایش این پدیده است که طی شناسایی و نمایش جابه‌جایی به وجود آمده در سطح زمین است. همچنین

طی بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ میزان این فرونشست برابر با ۰/۷۹ سانتی متر و در قسمت جنوب غرب بوده است. در قسمت‌های شمال غرب منطقه که به رنگ سفید می‌باشد برآمدگی به وجود آمده است. میزان برآمدگی در حدود ۱ متر و ۳۲ سانتی متر می‌باشد. بیشترین برآمدگی در این دوره رخ داده است. در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ میزان فرونشست برابر با ۱۳ سانتی متر می‌باشد و میزان برآمدگی در حدود ۶۸ سانتی متر می‌باشد. که بیشتر از بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ بوده است. در این دوره وسعت فرونشست بیشتر است و کل منطقه جنوبی را در بر گرفته است که این مسئله به دلیل پسروری آب دریا و پدیده جزر و مد بوده است.

در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ برآمدگی ۰/۰۸۹ سانتی متر در مناطق جنوبی و ۳۹ سانتی متر فرونشست در مناطق شمالی است. در این دوره بیشترین فرونشست اتفاق است که منطبق با چاه‌های عمیق منطقه می‌باشد. در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ برآمدگی برابر با ۱۶ سانتی متر است که نسبت و میزان فرونشست برابر با ۳۶ سانتی متر است.

آبیاری در بخش کشاورزی در منطقه مطالعاتی، به همراه الگوی کشت نامناسب، موجب حفر بی‌رویه چاه‌های آب در منطقه شده است. برداشت بی‌رویه از این چاه‌های و منابع آب زیرزمینی، موجب عدم تعادل آبخوان منطقه شده و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است. بندر ماهشهر بر روی نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر قرار گرفته است که با توجه به توسعه منطقه و عدم رعایت مسایل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، مشکلات فنی، مهندسی و اقتصادی زیادی را برای سازه‌های و جاده‌های موجود در این منطقه به همراه داشته است که این خسارات به علت وجود لایه‌های خاک سست با مقاومت باربری کم و قابلیت نشست‌پذیری زیاد در این منطقه می‌باشد. ضخامت این لایه‌های که عمدتاً از سیلت رسی، رس و گاهی ماسه ریزدانه تشکیل شده، در نقاط مختلف تغییر می‌نماید و در برخی مناطق همراه با لجن و نمک می‌باشند. با توجه به گستردگی و اهمیت ساخت انواع سازه‌های و تاسیسات در این مناطق به خصوص مناطق جنوبی، بهسازی و اصلاح خاک اجتناب‌ناپذیر بوده چرا که همیشه امکان استفاده از پی سطحی یا عمیق وجود ندارد. براساس نتایج به دست آمده در

## منابع

- Abidin, H.Z.; Andreas, H.; Gumilar, I., & Wibowo, I.R.R. 2015. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta. Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. 370(4): 15–20.
- Akbari, A.; Javanshiri, M. & Mohammadpour, Z. 2019. investigation of land surface subsidence in Esfaden Plain. Conference on Environment, Geography and Tourism of Bozormehr Qaenat University. (In Persian)
- Bagheri, M. .; Hosseini, S.M.; Ataie-Ashtiani, B.; Sohani, Y.; Ebrahimian, H.; Morovat, F. & Ashrafi, S. 2021. Land subsidence: a global challenge. Sci. Total Environ. 146193.
- iampalini, A.; Solari, L.; Giannecchini, R.; Galanti, Y. & Moretti, S. 2019. Evaluation of subsidence induced by long-lasting buildings load using InSAR technique and geotechnical data: the case study of a Freight Terminal (Tuscany, Italy). Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 82(12): 101925.
- Fern´andez-Torres, E.; Cabral-Cano, E.; Solano-Rojas, D.; Havazli, E. & Salazar-Tlaczani, L. 2020. Land Subsidence risk maps and InSAR based angular distortion structural vulnerability assessment: an example in Mexico City. Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. 12(382): 583–587.
- Fath Elahi, N.; Akhundzadeh Hanzaei, M. & Bahrudi, A. 2019. Investigating land subsidence due to oil extraction using radar interferometric method, Sepehr Journal, 27(105): 23-43. (In Persian)
- Fatuhi, S.; Al-Madrsi, A. & Delaram, R. 2023. investigation of land subsidence using radar interferometric technique (D-InSAR) in Nehbandan-Sahlabad Plain, Journal of Remote Sensing and Geographical Information System in Natural Resources, 14(51): 1-19. (In Persian)
- Haghighi, M.H. & Motagh, M. 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. Remote Sens. Environ. 12(221):

534–550.

- Hasibuan, C.J.M.; Quinn, P.F.; Whitehead, P.G.; Heathwaite, A.L. & Flynn, N.J. 2023. Towards a nutrient export risk matrix approach to managing agricultural pollution at source. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 8 (4): 834–845.
- Hiatt, M.; Snedden, G.; Day, J.W.; Rohli, R.V.; Nyman, J.A.; Lane, R. & Sharp, L.A. 2019. Drivers and impacts of water level fluctuations in the Mississippi River delta: Implications for delta restoration. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 16(224): 117–137.
- Huang, B.; Shu, L. & Yang, Y.S. 2012. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling. *Water Resour. Manag.* 26 (14): 4225–4239 .
- Lyu, H.M.; Shen, S.L.; Zhou, A. & Yang, J. 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Sci. Total Environ.* 44 (717): 135310 .
- Ma, P.; Wang, W.; Zhang, B.; Wang, J.; Shi, G.; Huang, G. & Lin, H. 2019. Remotely sensing large-and small-scale ground subsidence: a case study of the GuangdongHong Kong-Macao Greater Bay Area of China. *Remote Sens. Environ.* 15(23): 111282 .
- Qu, F.; Zhang, Q.; Lu, Z.; Zhao, C.; Yang, C. & Zhang, J. 2014. Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005-2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. *Remote Sens. Environ.* 27(155): 366–376.
- Raspini, S.; Hassanzadeh, Y.; Nadiri, A.A. & Khatibi, R. 2016. Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. *Environ. Earth Sci.* 75 (7):1–19.
- Shafiei, N.; Mokhtari, L.; Amir Ahmadi, A. & Zandi, R. 2019. Investigating the subsidence of Noor Abad Plain aquifer using radar interferometry method, *Quantitative Geomorphology Research*, 8(4): 111-93. (In Persian)
- Suganthi, S. & Elango, L. 2020. Estimation of groundwater abstraction induced land subsidence by SBAS technique. *J. Earth Syst. Sci.* 129 (1): 1–13 .
- Sundell, J.; Haaf, E.; Norberg, T.; Al'en, C.; Karlsson, M. & Ros'en, L. 2019. Risk mapping of groundwater-drawdown-induced land subsidence in heterogeneous soils on large areas. *Risk Anal.* 39 (1): 105–124.
- Zandi, R. & Shafiei, N. 2019. investigation of land surface subsidence in Dasht Jovin. *Environment, Geography and Tourism Conference of Bozormehr Qaenat University.* (In Persian)
- Zhao, F.; Wenping, G.; Huiming, T.; Shiva, P.; Pudasaini, T. & Zhan, C. 2023. An integrated approach for risk assessment of land subsidence in Xi'an, China using optical and radar satellite images, *Engineering Geology*, 12 (314): 106983.