



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Monitoring and Analysis of Land Subsidence in Eastern Shiraz Using the DInSAR Technique

P. Barzabadi, A. Razaghpour, M. Aslani, A. Sharifi *

Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 06 April 2025
 Reviewed: 17 May 2025
 Revised: 27 June 2025
 Accepted: 26 October 2025

KEYWORDS:

Subsidence
 Radar data
 Interferogram

* Corresponding author

✉ a_sharifii@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932477

Background and Objectives: Land subsidence is considered one of the most significant geomorphological hazards in arid and semi-arid regions, threatening groundwater resources, urban infrastructure, and agricultural lands for decades. In Iran, unregulated urban expansion and excessive groundwater extraction have intensified this phenomenon in major cities such as Tehran, Mashhad, Isfahan, and Shiraz. In particular, the eastern areas of Shiraz, characterized by alluvial soils, high building density, and sharp declines in groundwater levels, have become one of the primary hotspots of subsidence in southern Iran. Given the high potential of Sentinel-1 radar data for analyzing land deformation and the effectiveness of DInSAR in rapid monitoring, this study aims to analyze the spatiotemporal patterns of land subsidence in eastern Shiraz, investigate natural and anthropogenic contributing factors, and propose solutions for risk mitigation and support of sustainable urban development.

Methods: This study employed 24 Sentinel-1A SAR images (IW mode, VV polarization) from 2015 to 2025. Processing was conducted in SNAP software. Orbital corrections were applied using POD files, followed by radiometric calibration to extract Sigma⁰ values. A 7×7 Lee filter was used to reduce speckle noise. Fifteen image pairs with temporal baselines less than 365 days and perpendicular baselines below 150 meters were selected to generate interferograms. Phase unwrapping was performed using the SNAPHU algorithm with the Minimum Cost Flow (MCF) method. To minimize atmospheric effects, image pairs with similar humidity were chosen, and additional filtering included the Goldstein filter, topographic masking, and variogram analysis. The final phase data were analyzed statistically using mean, skewness, and kurtosis, as well as spatially through Moran's I. Multiple regression analysis was also conducted to evaluate the influence of groundwater extraction, soil type, building density, and slope on the observed subsidence rates.

Findings: The results showed an average subsidence rate of 18.4 mm/year with a standard deviation of 8.2 mm. Three main subsidence hotspots with rates of 25–45 mm/year were identified in the north, center, and south of the study area. Statistical analysis indicated a positively skewed distribution (1.23) with a kurtosis of 2.87. Multivariate regression analysis showed that groundwater extraction ($\beta = 0.78$, $p < 0.001$) was the most influential factor. Soil type (clay), building density, and slope also had significant effects, with positive and negative contributions. Moran's I test confirmed a clustered spatial pattern of subsidence ($I = 0.742$).

Conclusion: DInSAR proved to be an effective and relatively accurate tool for monitoring land subsidence, especially in regions with limited in-situ data. This study underscores the significant role of human activities in exacerbating land subsidence and highlights the need for continuous monitoring, smart supervisory systems, and a reassessment of urban development patterns. Suggested future directions include developing machine learning models with Sentinel-1 data, integrating GNSS observations to enhance accuracy, and conducting land use change analysis using Landsat and Sentinel-2 imagery. The main limitations of the study were the lack of up-to-date groundwater level data and the temporal sparsity of some satellite images.



NUMBER OF REFERENCES

28



NUMBER OF FIGURES

7



NUMBER OF TABLES

3

مقاله پژوهشی

تحلیل و پایش فرونشست زمین در نواحی شرقی شیراز با استفاده از تکنیک DInSAR

پرستو برزآبادی، افسانه رزاقپور، مهدی اصلانی، علیرضا شریفی*

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: در ایران، گسترش ناپایدار شهری و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب تشدید و گسترش پدیده فرونشست در کلان‌شهرهایی مانند تهران، مشهد، اصفهان و شیراز شده است. به‌ویژه نواحی شهری شیراز که دارای خاک‌های آبرفتی، تراکم بالای ساخت‌وساز و کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی هستند، به یکی از کانون‌های اصلی فرونشست در جنوب کشور تبدیل شده‌اند. با توجه به قابلیت بالای داده‌های راداری ماهواره Sentinel-1 در تحلیل تغییرات زمین و نقش مؤثر روش DInSAR در پایش سریع این پدیده، هدف این پژوهش، تحلیل الگوهای مکانی-زمانی فرونشست در نواحی شهری شیراز، بررسی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر و ارائه راهکارهایی برای کاهش مخاطرات و حمایت از توسعه پایدار شهری است.

روش‌ها: در این پژوهش از ۲۴ تصویر راداری Sentinel-1A در مد IW با پلاریزاسیون VV در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ استفاده شد. تمامی پردازش‌ها در نرم‌افزار SNAP انجام گرفت. ابتدا داده‌ها با استفاده از فایل‌های POD تصحیح مداری و سپس کالیبراسیون رادیومتریک برای استخراج σ^0 انجام شد. برای کاهش نویز اسپکل از فیلتر Lee با پنجره 7×7 استفاده شد. سپس با انتخاب ۱۵ جفت تصویر با خطای زمانی کمتر از ۳۶۵ روز و خطای مکانی عمودی زیر ۱۵۰ متر، اینترفروگرام‌ها تولید و فرآیند Unwrapping با الگوریتم MCF-SNAPHU اجرا گردید. برای کاهش خطاهای اتمسفری، تصاویر با شرایط رطوبتی مشابه انتخاب، فیلتر Goldstein اعمال، ماسک توپوگرافی استفاده و تحلیل واریوگرام اجرا شد. تحلیل‌های آماری (میانگین، چولگی، کشیدگی، تحلیل مکانی Moran's I و تحلیل رگرسیون چندمتغیره) برای بررسی اثر متغیرهای برداشت آب، نوع خاک، تراکم ساخت‌وساز و شیب زمین بر نرخ فرونشست انجام شد.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد میانگین نرخ فرونشست ۱۸.۴ میلی‌متر در سال با انحراف معیار ۸.۲ میلی‌متر است. سه کانون اصلی فرونشست با نرخ‌های ۲۵ تا ۴۵ میلی‌متر در سال در شمال، مرکز و جنوب محدوده مورد مطالعه شناسایی شد. تحلیل آماری نیز توزیع چولگی مثبت (۱.۲۳) و کشیدگی (۲.۸۷) را تأیید کرد. بررسی آماری چندمتغیره نشان داد برداشت آب زیرزمینی با ضریب $\beta = 0.78$ و سطح معناداری کمتر از ۰.۰۰۱، قوی‌ترین عامل فرونشست است.

نتیجه‌گیری: روش DInSAR به‌عنوان ابزاری سریع و نسبتاً دقیق در پایش فرونشست اثربخش است، به‌ویژه در مناطقی که داده‌های زمینی محدود هستند. این مطالعه ضمن تأکید بر نقش مؤثر عوامل انسانی در تشدید فرونشست، بر ضرورت نظارت پیوسته، بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند نظارتی، و بازنگری در الگوهای توسعه شهری تأکید می‌کند. از جمله پیشنهادها می‌توان به توسعه مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های Sentinel-1، تلفیق داده‌های GNSS برای افزایش دقت تحلیل، و تهیه تغییرات کاربری اراضی با تصاویر Landsat و Sentinel-2 اشاره کرد. محدودیت پژوهش شامل نبود داده‌های میدانی به‌روز از سطح آب زیرزمینی و پراکندگی زمانی برخی تصاویر بود.

تاریخ دریافت: ۱۷ فروردین ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۰۶ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۴ آبان ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

فرونشست

داده‌های راداری

اینترفروگرام

* نویسنده مسئول

a_sharifii@sbu.ac.ir

۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۷۷ ①

مقدمه

پدیده اغلب در نتیجه فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، استخراج هیدروکربن‌ها و توسعه ناپایدار شهری رخ می‌دهد و در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به‌ویژه در دشت‌های تهران، مشهد، اصفهان، کرمان و شیراز، شدت و گستره

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی و زمین‌ساختی، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های شهری، اراضی کشاورزی و منابع آب در بسیاری از مناطق جهان به‌شمار می‌رود. این

چین، ارزیابی نرخ فرونشست در شهرهای بزرگ انجام و نرخ‌های بالایی گزارش شد [۵]. در ایران نیز بررسی‌های متعددی با بهره‌گیری از داده‌های InSAR انجام گرفته است. در یکی از این مطالعات، نرخ فرونشست تا ۳۰ سانتی‌متر در سال در دشت رفسنجان اندازه‌گیری و ارتباط آن با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی تأیید شد [۶]. در پژوهشی دیگر، با استفاده از داده‌های Sentinel-1 و نرم‌افزار SNAP، فرونشست در دشت تهران-شهری مدل‌سازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهبود دقت نتایج به کار گرفته شد [۷]. بررسی‌های انجام‌شده در تهران نیز نقشه‌های دقیق تغییر شکل زمین را ارائه کردند [۸]. افزون بر آن، الگوهای فرونشست در شهر شیراز با روش SBAS-InSAR تحلیل و مناطق بحرانی شناسایی شده‌اند [۹]. مطالعات دیگری نیز در خارج از ایران انجام شده است. نتایج پژوهشی در فلات تبت، تغییر شکل‌های سطحی این منطقه را با استفاده از داده‌های Sentinel-1 نشان داد [۱۰]. در بررسی دیگری، ترکیب داده‌های راداری، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی برای تحلیل فرونشست در دشت هشتگرد به کار رفت و همبستگی بالایی میان برداشت آب و جابجایی سطح زمین مشاهده شد [۱۱]. الگوریتم ISBAS برای شناسایی تغییر شکل زمین در میدان نفتی تنگیز در قزاقستان به کار گرفته شد [۱۲]. تحلیل‌های عددی انجام‌شده در دشت رفسنجان نیز روند فعلی و آینده فرونشست را با دقت قابل‌توجهی شبیه‌سازی کردند [۱۳].

تحقیقات جدیدتر از ترکیب روش‌های InSAR و یادگیری ماشین برای تهیه نقشه‌های حساسیت فرونشست در مناطق نیمه‌خشک ایران استفاده کرده‌اند [۱۴]. در مطالعات دیگر نیز اثرات کاهش آبخوان‌ها بر فرونشست ایران تحلیل شد [۱۵]، و ترکیب داده‌های InSAR و GNSS برای تحلیل تغییر شکل سطح در منطقه آناتولی نتایج دقیقی ارائه داد [۱۶]. بررسی‌های دیگری نیز در تهران با استفاده از تصاویر راداری و داده‌های Landsat انجام و ارتباط مستقیم افت سطح آب زیرزمینی با نرخ فرونشست تأیید شد [۱۷]. همچنین، تحلیل تعامل آبخوان و فرونشست در دشت تهران با بهره‌گیری از داده‌های Sentinel-1 و روش DInSAR انجام شد [۱۸]. پایش تغییر شکل در شهرهای دلتای یانگ‌تسه نیز با روش SBAS-InSAR صورت گرفته است [۱۹]. در پژوهشی جامع، وضعیت فرونشست ایران با استفاده از داده‌های گرانش‌سنجی، GPS و InSAR تحلیل شد و نتایج حاکی از کاهش چشمگیر ذخایر آب زیرزمینی بود [۲۰]. همچنین مطالعات انجام‌شده در دشت اردبیل نشان دادند که برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی از عوامل اصلی وقوع فرونشست هستند [۲۱]. بررسی‌های جدید در استان خراسان رضوی نیز مدل‌های یادگیری عمیق را برای پیش‌بینی فرونشست توسعه داده‌اند [۲۲]. در حوزه بین‌المللی، تحلیل فرونشست در معادن زغال‌سنگ پاکستان با روش‌های SBAS-InSAR و Stacking-InSAR انجام شد [۲۳] و در ویتنام نیز با بهره‌گیری از روش PSInSAR میزان تغییر شکل سطحی ارزیابی گردید [۲۴]. نتایج پژوهشی دیگر تأیید کرد که نرم‌افزار SNAP توانایی بالایی در پردازش سریع و دقیق داده‌های راداری دارد [۲۵]. بررسی‌های صورت‌گرفته در دشت قم نیز با استفاده از روش

بیشتری دارد. سازندهای رس‌دار، خاک‌های آبرفتی غیرمتراکم و عدم تعادل در تراز ورودی و خروجی آبخوان‌ها از دیگر عوامل تشدیدکننده فرونشست در این نواحی محسوب می‌شوند.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فرونشست زمین می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری از جمله تخریب شبکه‌های انتقال آب و گاز، آسیب به ساختمان‌ها و جاده‌ها، کاهش بهره‌وری زمین‌های کشاورزی، و در نهایت تهدید توسعه پایدار مناطق شهری را به همراه داشته باشد. در برخی مناطق، میزان فرونشست سالانه به بیش از ۲۵ تا ۴۰ میلی‌متر رسیده که بیانگر یک بحران زیست‌محیطی در حال گسترش است.

با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های زمینی دقیق و گسترده، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، استفاده از روش‌های نوین سنجش از دور، به‌ویژه تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (DInSAR)، به‌عنوان ابزاری کارآمد، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای پایش تغییرات سطح زمین مورد توجه محققان قرار گرفته است. داده‌های ماهواره Sentinel-1 با قدرت تفکیک مکانی مناسب، تکرار زمانی بالا و دسترسی رایگان، یکی از منابع اصلی برای پایش پیوسته و گسترده فرونشست در سال‌های اخیر بوده‌اند. همچنین، ترکیب این داده‌ها با اطلاعات GNSS و سایر منابع مکانی می‌تواند به ارتقاء دقت و صحت تحلیل‌های مکانی-زمانی کمک شایانی نماید.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های راداری Sentinel-1 و به‌کارگیری تکنیک DInSAR در محیط نرم‌افزار اسنپ، به تحلیل الگوهای مکانی و زمانی فرونشست در نواحی شرقی شهر شیراز پرداخته شده است. منطقه مورد مطالعه به دلیل شرایط زمین‌شناسی خاص، خاک‌های آبرفتی حساس، توسعه شهری بی‌رویه و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، به یکی از کانون‌های اصلی فرونشست در جنوب کشور تبدیل شده است.

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی مناطق پرخطر، تحلیل عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر بروز و تشدید فرونشست، و در نهایت ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات این پدیده و حمایت از برنامه‌های توسعه پایدار شهری است.

پیشینه تحقیق

مطالعات متعددی پدیده فرونشست زمین را با استفاده از داده‌های راداری و تکنیک‌های تداخل‌سنجی (InSAR) بررسی کرده‌اند. در یکی از پژوهش‌ها، مدل‌سازی فرونشست در مناطق ساحلی انجام شد و بر اهمیت تحلیل سری‌زمانی برای پیش‌بینی دقیق این پدیده تأکید گردید [۱]. همچنین در مطالعه‌ای جهانی، نقشه تهدید فرونشست در مقیاس وسیع تهیه و مناطق پرخطر شناسایی شد [۲]. بررسی دیگری نیز گستردگی جهانی فرونشست را با داده‌های راداری تحلیل و نقش عوامل انسانی مانند سدسازی را مشخص کرده است [۳]. تحلیل داده‌های راداری نشان داد که روش aperture مصنوعی در ارزیابی نرخ فرونشست از دقت بالایی برخوردار است [۴]. افزون بر این، در یک مطالعه ملی در

بهره گرفته شد. این داده‌ها در مد Interferometric Wide Swath (IW) و با قطبش ۷۷ جمع‌آوری شده‌اند و بازه زمانی ده‌ساله از ژانویه ۲۰۱۵ تا ژانویه ۲۰۲۵ را پوشش می‌دهند. در مجموع، تعداد ۲۴ تصویر با رزولوشن مکانی ۵ متر در راستای برد (range) و ۲۰ متر در راستای آزیموت (azimuth) مورد استفاده قرار گرفتند. این تصاویر با توجه به تناوب پوشش (۶ تا ۱۲ روزه)، توان تفکیک مکانی مطلوب و دسترسی رایگان، برای مطالعات تداخل‌سنجی راداری در مقیاس منطقه‌ای بسیار مناسب هستند. جهت حذف اثرات توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. این مدل به‌عنوان مرجع توپوگرافی در تمام مراحل پردازش داده‌های تداخل‌سنجی به‌کار گرفته شد.

تمامی مراحل پیش‌پردازش داده‌ها در محیط نرم‌افزار SNAP (نسخه ESA 9.0) انجام گرفت. در نخستین گام، تصحیح مداری با استفاده از فایل‌های Precise Orbit Determination (POD) با دقت حدود ۵ سانتی‌متر برای ارتقاء دقت هندسی تصاویر اعمال شد. سپس کالیبراسیون رادیومتریکی با اعمال ضرایب کالیبراسیون مطلق برای تبدیل مقادیر DN به σ^0 انجام گرفت. جهت کاهش نویز اسپیکل، از فیلتر Lee Sigma با پنجره 7×7 پیکسل و آستانه واریانس ۰.۵ بهره گرفته شد.

برای تولید اینترفروگرام‌ها، ۱۵ جفت تصویر بر اساس معیارهایی چون اختلاف زمانی کمتر از ۳۶۵ روز و خط مبنای عمودی کمتر از ۱۵۰ متر انتخاب شدند. هدف از این انتخاب، به حداقل رساندن خطاهای فازی و افزایش همبستگی زمانی و مکانی تصاویر بود. در ادامه، داده‌های آماده‌شده وارد مراحل تولید اینترفروگرام، بازگشایی فاز (Unwrapping) و تصحیح اتمسفری شدند که در بخش بعدی شرح داده خواهند شد.

مراحل پردازش DinSAR در محیط SNAP

در این پژوهش، جهت استخراج نرخ فرونشست زمین از داده‌های راداری Sentinel-1A، تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) به‌صورت جفتی (pair-wise) پیاده‌سازی شد. پردازش‌ها در نرم‌افزار SNAP (Sentinel Application Platform) با استفاده از ابزارهای مرتبط با ماژول S-1 Toolbox انجام شد. در گام نخست، تصاویر راداری مورد نظر در قالب فرمت SLC (Single Look Complex) وارد محیط SNAP شده و از میان آن‌ها، ۱۵ جفت تصویر با خط مبنای عمودی کمتر از ۱۵۰ متر و فاصله زمانی کمتر از ۳۶۵ روز به‌عنوان ترکیب‌های مستر-اسلیو انتخاب شدند. این انتخاب با هدف کاهش خطای ناشی از دکوریلیشن زمانی و فضایی صورت گرفت. پارامترهای دقیق پردازشی در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱ نیز روند کلی تحقیق نشان داده شده است که در ادامه جزئیات آن مطرح گردیده است.

مراحل کلیدی تولید اینترفروگرام

- هم‌ترازی دقیق تصاویر (Coregistration)

در اولین مرحله از فرآیند پردازش داده‌های DInSAR، هم‌ترازی دقیق تصاویر مستر و اسلیو انجام گرفت. هدف اصلی این مرحله، انطباق کامل

PSInSAR و داده‌های Sentinel-1 نرخ فرونشست سالانه تا بیش از ۷۰ میلی‌متر را گزارش کرده‌اند [۲۶]. در مطالعات جدید، از ترکیب داده‌های SBAS-InSAR و GNSS برای شناسایی نواحی گسلی و شکستگی‌های زیرسطحی در محدوده شهر هانگژو در چین استفاده شده است [۲۷]. این پژوهش‌ها نشان دادند که نقشه‌های حاصل از ترکیب داده‌های راداری و GNSS می‌توانند در برنامه‌ریزی توسعه شهری و مدیریت مخاطرات ژئوتکنیکی کاربرد فراوانی داشته باشند. همچنین در مطالعه‌ای نوآورانه، داده‌های DInSAR با مدل‌های یادگیری عمیق ترکیب شدند تا الگویی برای پیش‌بینی سریع و دقیق فرونشست شهری توسعه یابد [۲۸]. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب ویژگی‌های فیزیکی زمین با داده‌های راداری می‌تواند دقت پیش‌بینی را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش دهد.

اگرچه در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی از تکنیک‌های پیشرفته InSAR مانند PS-InSAR و SBAS-InSAR برای تحلیل دقیق و بلندمدت فرونشست در ایران و سایر نقاط جهان استفاده کرده‌اند، اما هنوز چالش‌های مهمی در پایش سریع و به‌روز پدیده فرونشست با استفاده از تکنیک DInSAR باقی مانده است. بیشتر مطالعات پیشین بر تحلیل‌های سری‌زمانی متمرکز بوده‌اند که علی‌رغم دقت بالا، به داده‌های پرتعداد، زمان پردازش طولانی و نرم‌افزارهای پیشرفته‌تر نیاز دارند که در بسیاری از سازمان‌های اجرایی یا در محیط‌های پژوهشی با امکانات محدود، دسترس‌پذیر نیستند.

از سوی دیگر، اغلب تحقیقات قبلی بر روی مناطق خاصی از ایران مانند تهران، رفسنجان، کرمان و شیراز متمرکز بوده‌اند و مناطقی که ترکیبی از ریسک بالای فرونشست و کمبود داده‌های زمینی دارند، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، به‌رغم اثبات کارایی نرم‌افزار SNAP برای پردازش داده‌های Sentinel-1، تعداد کمی از مطالعات به‌طور سیستماتیک کل مراحل پردازش DInSAR از هم‌ترازی تا بازگشایی فاز و تصحیح اتمسفری را در یک محیط این‌سورس استانداردسازی کرده‌اند و این فرآیندها را به‌صورت مستند و قابل تکرار گزارش داده‌اند.

در نهایت، بررسی بازه زمانی بلندمدت (۲۰۱۵-۲۰۲۵) با دقت مکانی بالا (۲۰×۵ متر) با استفاده از Sentinel-1 و رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی در بسیاری از مناطق ایران هنوز انجام نشده یا به‌صورت کامل مستند نشده است. به‌ویژه، مطالعات اندکی به بررسی پویایی سالانه تغییر شکل زمین در بازه‌های بلندمدت با تمرکز بر مناطق بدون داده‌های زمینی پرداخته‌اند. از این‌رو، این تحقیق می‌کوشد تا با تمرکز بر تحلیل DInSAR در یک بازه زمانی ده‌ساله، و پیاده‌سازی دقیق مراحل پردازش در نرم‌افزار SNAP، بخشی از این خلأ علمی و کاربردی را پوشش دهد.

روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده و پیش‌پردازش

در این پژوهش، به‌منظور پایش و تحلیل مکانی-زمانی فرونشست زمین در نواحی شرقی شهر شیراز، از داده‌های راداری ماهواره Sentinel-1A

این الگوریتم با استفاده از نقاط کنترل زمینی و تطبیق ویژگی‌های مکانی تصویر، دقت هم‌ترازی را به سطحی نزدیک به دقت پیکسلی افزایش داد. نتیجه هم‌ترازی با کیفیت بالا، امکان تولید اینترفروگرام‌های معتبر و با حداقل خطا را فراهم ساخت که پایه و اساس سایر مراحل تحلیل محسوب می‌شود.

- تولید اینترفروگرام (Interferogram Formation)

پس از انجام هم‌ترازی، مرحله بعدی تولید اینترفروگرام‌ها بود که از طریق عملیات ضرب کانژوگه بین تصاویر مستر و اسلیو انجام شد. این عملیات فاز نسبی برگشتی بین دو برداشت راداری از یک ناحیه مشترک را استخراج می‌کند. فاز به دست آمده شامل اطلاعاتی از تغییرات ارتفاعی، جابجایی سطح و اثرات اتمسفری است. در این پژوهش، از نوع اینترفروگرام تفاضلی (Differential Interferogram) استفاده شد که با حذف مؤلفه توپوگرافی تنها جابجایی‌های سطح زمین را نشان می‌دهد. تولید اینترفروگرام در نرم‌افزار SNAP و با ماژول اختصاصی آن صورت گرفت و داده‌ها برای پردازش‌های بعدی آماده شدند. کیفیت و دقت این مرحله تأثیر مستقیمی بر صحت برآورد فرونشست دارد.

- حذف فاز توپوگرافی (Topographic Phase Removal)

برای تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین، لازم است که تأثیر توپوگرافی از فاز اینترفروگرام جدا شود. این کار با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال SRTM 1Sec بر زولوشن ۳۰ متر انجام گرفت. ابتدا مدل ارتفاعی با تبدیل به سیستم مختصات تصویر راداری، نقشه فاز توپوگرافی را تولید کرد که میزان تأثیرات ارتفاع بر فاز را نشان می‌داد. سپس این نقشه از کل اینترفروگرام تفریق شد تا تنها فاز مربوط به جابجایی واقعی سطح زمین باقی بماند. این فرآیند تحت عنوان «Topo Phase Removal» در نرم‌افزار SNAP اجرا شد و به طور قابل توجهی موجب افزایش دقت تفسیری فاز و کاهش خطاهای ناشی از ناهمواری‌های زمین گردید.

- تخمین و ارزیابی همبستگی (Coherence Estimation)

کیفیت فاز استخراج شده در اینترفروگرام با محاسبه نگاشت همبستگی (Coherence Map) مورد سنجش قرار گرفت. همبستگی شاخصی از میزان تطابق آماری بین تصاویر مستر و اسلیو در هر پیکسل است و نشان‌دهنده قابلیت اعتماد به داده‌های فاز آن ناحیه است. در این تحقیق، آستانه همبستگی برابر ۰.۳ تعیین شد. بدین معنی که پیکسل‌هایی با مقدار همبستگی کمتر از این آستانه حذف یا ماسک شدند. این گام از اهمیت بالایی برخوردار بود، زیرا پیکسل‌های با همبستگی پایین معمولاً به دلیل تغییرات سریع پوشش زمین، نویز یا عوامل دیگر، داده‌های فازی نامعتبر تولید می‌کنند. حذف این نقاط باعث افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج نهایی شد.

- فیلتر کردن نویز فاز (Phase Filtering)

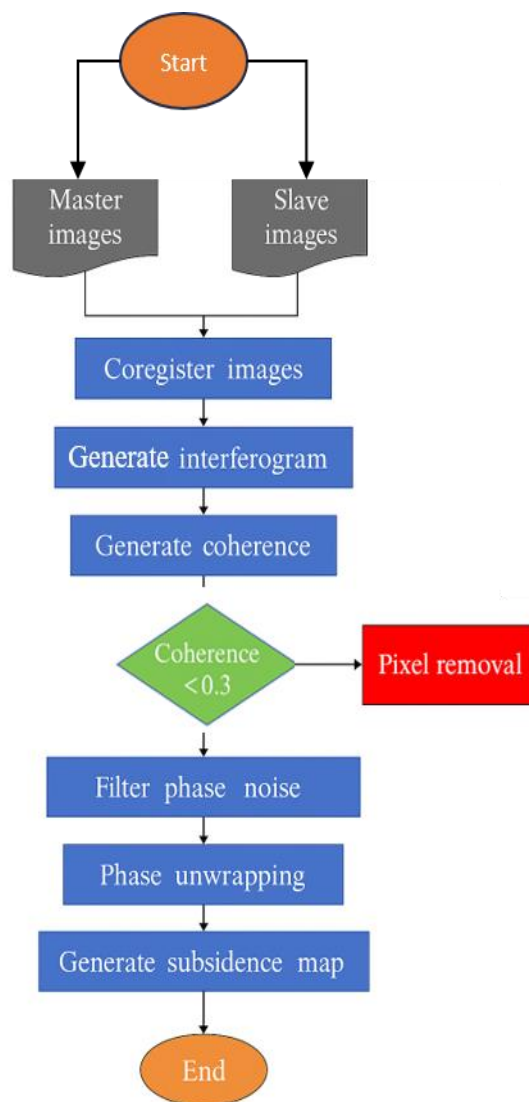
نقشه فاز حاصل از اینترفروگرام معمولاً حاوی نویزهای پراکنده است که می‌توانند منجر به اشتباه در برآورد تغییرات سطح زمین شوند. برای

و دقیق پیکسل‌های دو تصویر راداری است به گونه‌ای که هر پیکسل در موقعیت مکانی مشابه روی سطح زمین در هر دو تصویر قرار داشته باشد. این امر ضروری است تا تحلیل تغییرات زمانی در موقعیت‌های یکسان زمین قابل انجام شود. برای این منظور، از ماژول S-1 Back Geocoding در نرم‌افزار SNAP به منظور هم‌راستاسازی دقیق تصاویر استفاده شد و الگوریتم Enhanced Spectral Diversity (ESD) به منظور بهبود دقت ثبت و کاهش خطای جابه‌جایی فضایی میان سکانس‌های راداری به کار گرفته شد.

جدول ۱: پارامترهای دقیق پردازش DInSAR

Table 1: Detailed Parameters of DInSAR Processing

Step	Settings
Noise Filtering	Lee Filter, 7x7
DEM	SRTM 1Sec (30 m)
Unwrapping Method	SNAPHU – Minimum Cost Flow
Coherence Threshold	0.3
Interferogram Type	Differential, Master-Slave Pairs



شکل ۱: روند کلی تحقیق

Fig. 1: Overall Research Workflow

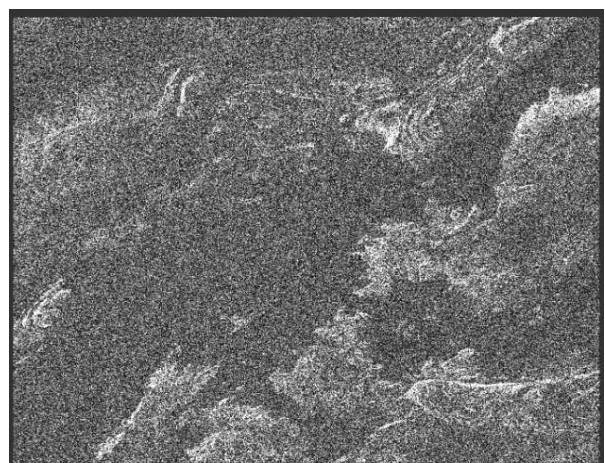
برخورد دارند؛ بنابراین، داده‌های آن‌ها برای تولید اینترفروگرام‌های با کیفیت و تحلیل تغییر شکل زمین از جمله برآورد نرخ فرونشست، قابل اطمینان‌تر محسوب می‌شوند. در مقابل، نواحی با شدت کم و متغیر اغلب دچار دکوریلیشن شدید و نویز بالا می‌شوند، که این موضوع در نقشه کوهرنسی نیز به‌وضوح قابل مشاهده و تأیید است.



شکل ۲: نقشه شدت بازتاب امواج راداری
Fig. 2: Radar backscatter intensity map

نقشه کوهرنسی (Coherence Map)

در شکل ۳، نقشه کوهرنسی بین دو تصویر راداری مشاهده می‌شود. کوهرنسی شاخصی است برای سنجش میزان همبستگی آماری بین دو تصویر در هر پیکسل و بیانگر کیفیت داده‌های اینترفروگرام است. دامنه مقادیر کوهرنسی بین ۰ (فاقد همبستگی) تا ۱ (همبستگی کامل) است. در این نقشه، مناطق روشن‌تر دارای کوهرنسی بالا و مناطق تیره دارای کوهرنسی پایین هستند.



شکل ۳: نقشه کوهرنسی
Fig. 3: Coherence map

بر اساس بررسی نقشه کوهرنسی:

- نواحی مرتفع و کوهستانی یا مناطق با پوشش زمین پایدار، معمولاً دارای کوهرنسی بالا هستند که این امر تحلیل تغییر شکل را در این مناطق امکان‌پذیر می‌کند.

کاهش این نویزها، در دو مرحله فیلترگذاری انجام شد. ابتدا، فیلتر فضایی Lee با اندازه پنجره 7×7 پیکسل به کار رفت. این فیلتر با میانگین‌گیری وزن‌دار و حفظ لبه‌ها، نویزهای تصادفی را کاهش داد و ساختارهای فضایی مهم را حفظ نمود. سپس فیلتر فرکانسی Goldstein با پارامتر تنظیم $\alpha=0.5$ اعمال شد که به ویژه در حذف نویزهای با فرکانس بالا در نواحی همبستگی بالا مؤثر است. ترکیب این دو فیلتر موجب بهبود کیفیت کلی نقشه فاز و افزایش دقت فرآیند بازگشایی فاز شد.

- بازگشایی فاز (Phase Unwrapping)

فاز اینترفروگرام‌ها به صورت محدود و حلقوی بین $-\pi$ تا $+\pi$ اندازه‌گیری می‌شود که برای تعیین تغییرات واقعی جابجایی باید به مقادیر پیوسته تبدیل شود. این کار با فرآیند بازگشایی فاز انجام می‌گیرد. در این تحقیق، الگوریتم Minimum Cost Flow (MCF) در نرم‌افزار SNAPU برای بازگشایی فاز استفاده شد. این الگوریتم یکی از پیشرفته‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای بازیابی پیوستگی فاز است که به ویژه در محیط‌های شهری و کوهستانی پیچیده عملکرد خوبی دارد. داده‌ها ابتدا برای SNAPU آماده و پس از اجرای الگوریتم، نتایج به محیط SNAP بازگردانده شدند. دقت این مرحله مستقیماً بر صحت برآورد نرخ فرونشست زمین تأثیرگذار است.

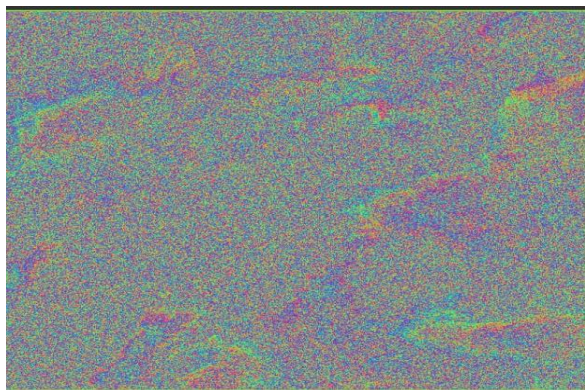
- تصحیح خطاهای اتمسفری (Atmospheric Correction)

خطاهای ناشی از تغییرات فضایی و زمانی شرایط جوی، به ویژه بخار آب، یکی از منابع مهم خطا در داده‌های DinSAR هستند. برای کاهش این خطاها، در ابتدا تصاویر انتخاب شدند که شرایط جوی مشابهی داشته و رطوبت نسبی آنها کمتر از ۶۰ درصد بود. سپس، فیلتر مکانی Goldstein بار دیگر به منظور حذف نوسانات فضایی پرنوسان و مؤلفه‌های اتمسفری به کار گرفته شد. علاوه بر این، ماسک توپوگرافی برای حذف نواحی مرتفع و حساس به تغییرات اتمسفری اعمال گردید. در نهایت، تحلیل واریوگرام برای شناسایی ساختارهای فضایی پایداری که ناشی از خطاهای سیستماتیک بود، انجام و اصلاحات لازم اعمال شدند. این مراحل موجب بهبود کیفیت داده‌ها و کاهش خطاهای سیستماتیک شد.

یافته‌ها و تحلیل نتایج

تولید نقشه شدت (Intensity Map)

در شکل ۲، نقشه شدت تصویر راداری نمایش داده شده است که میزان بازتاب امواج راداری از سطح زمین را نشان می‌دهد. در این نقشه، نواحی با روشنایی بیشتر بیانگر بازتابنده‌های قوی‌تر نظیر سازه‌های مصنوعی، صخره‌های سخت و مناطق شهری هستند، در حالی که نواحی تیره‌تر به بازتاب ضعیف‌تر مرتبط بوده و معمولاً شامل سطوح نرم، اراضی کشاورزی و پوشش‌های گیاهی می‌باشند. نقشه شدت از آن جهت حائز اهمیت است که نواحی با شدت بازتاب بالاتر معمولاً از همبستگی زمانی بیشتری



شکل ۴: اینترفروگرام تولید شده
Fig. 4: Generated interferogram

تحلیل آماری فرونشست

تحلیل کمی بر اساس نمودار displacement_VV با بررسی دقیق این نمودار: ویژگی مقدار تقریبی تحلیل بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ (۱۰ سال) نشان‌دهنده تغییر بلندمدت است مقدار نشست کل حدود ۱.۱۵ متر نشست شدید در یک دهه روند نشست افزایشی یکنواخت با نوسان‌های موضعی یعنی فرونشست مداوم با نرخ نسبتاً پایدار شیب بیشتر از سال ۲۰۱۹ به بعد دیده می‌شود احتمال افزایش برداشت آب یا خشک‌سالی بیشتر. نرخ فرونشست سالانه (میانگین): اگر جابه‌جایی ۱.۱۵ متر در مدت ۱۰ سال اتفاق افتاده باشد: نرخ میانگین سالانه = ۱.۱۵ متر در ۱۰ سال اتفاق افتاده است که نشانگر ۱۱.۵ سانتی‌متر در سال است این مقدار بسیار بالا است. نرخ بالاتر از ۴ سانتی‌متر در سال معمولاً بحرانی محسوب می‌شود

نتایج پردازش ۲۴ تصویر Sentinel-1 نشان‌دهنده توزیع غیریکنواخت فرونشست در نواحی شرقی شیراز است. تحلیل آماری توصیفی نشان می‌دهد (جدول ۲، شکل ۵):

○ مناطق دارای کوه‌ررسی پایین، مانند بخش‌های دارای پوشش گیاهی متراکم، مناطق کشاورزی، بافت‌های شهری متراکم یا مناطقی که تغییرات سریع سطح زمین رخ داده است، قابلیت اعتماد به داده‌های فاز را کاهش می‌دهند.

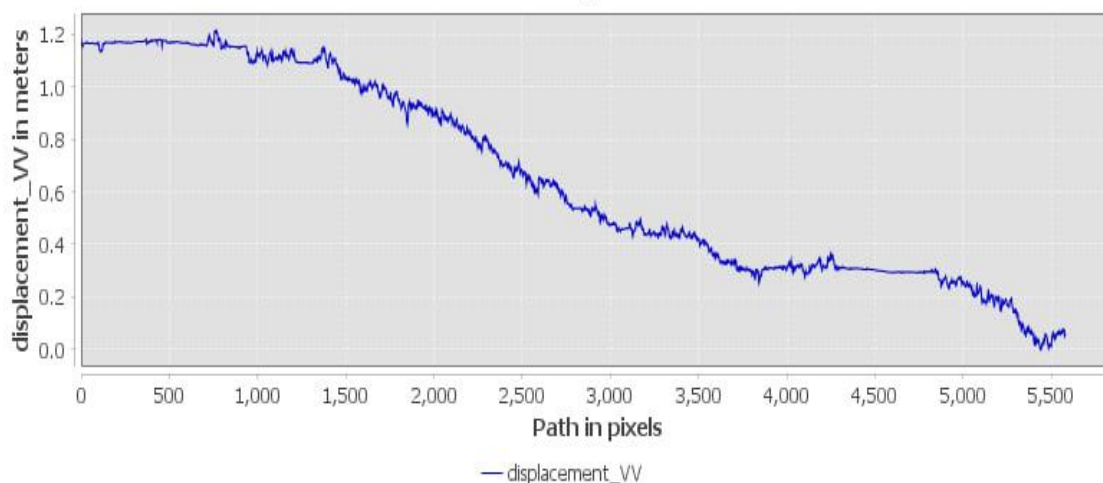
در این تحقیق، آستانه کوه‌ررسی ۰.۳ در نظر گرفته شد. بنابراین، پیکسل‌هایی با مقدار کمتر از این عدد در مراحل بعدی تحلیل حذف شدند تا دقت نتایج فرونشست افزایش یابد.

اینترفروگرام (Interferogram)

باتوجه به شکل ۴، نقشه فاز اینترفروگرام حاصل از دو تصویر راداری Sentinel-1 مربوط به تاریخ‌های ۱۱ ژوئن ۲۰۱۵ و ۶ فوریه ۲۰۲۵ نمایش داده شده است. این نقشه حاصل تفاضل فاز دو تصویر هم‌پوشان بوده و حاوی اطلاعات دقیق از تغییرات نسبی فاز در سطح زمین طی بازه زمانی مذکور است. الگوهای رنگین‌کمانی مشاهده‌شده در قالب نوارهای متوالی (interferometric fringes) نشانگر تغییرات فاز هستند که می‌توانند ناشی از جابجایی سطح زمین (مانند فرونشست)، پستی‌بلندی‌های زمین (توپوگرافی)، یا نویزهای اتمسفری و دکوریلیشن باشند.

تحلیل کیفی این نقشه امکان شناسایی نواحی با الگوی منظم نوارهای فاز را فراهم می‌سازد که احتمالاً بیانگر تغییر شکل واقعی سطح زمین هستند. در مقابل، مناطق دارای الگوهای نامنظم، پراکنده یا نویز بالا نشان‌دهنده دکوریلیشن شدید بوده و قابلیت اعتماد تحلیلی پایینی دارند. بر اساس وضعیت اینترفروگرام، بخشی از منطقه مورد مطالعه دارای همبستگی مکانی مناسب و فاز قابل استفاده است، اما نواحی با نویز بالا نیازمند فیلترگذاری، حذف یا اعمال ماسک در مراحل بعدی پردازش داده‌ها می‌باشند.

Profile Plot for displacement_VV

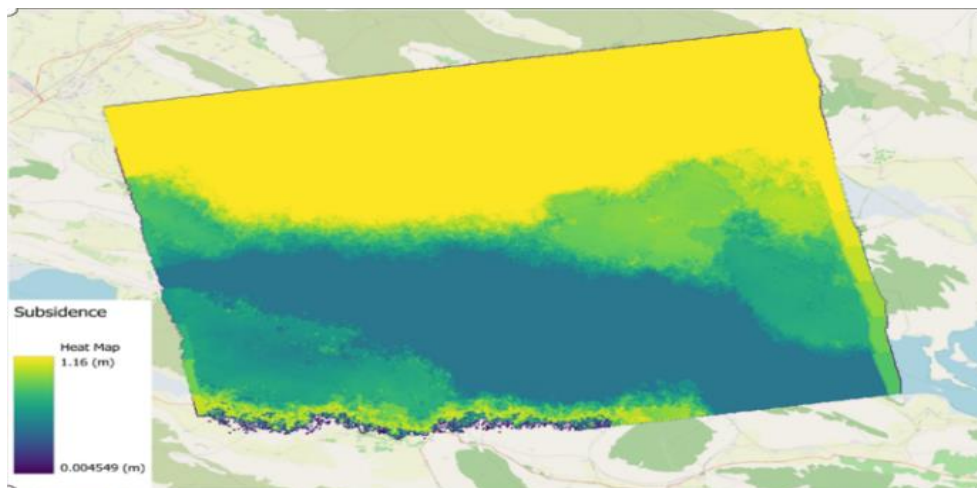


شکل ۵: نرخ فرونشست
Fig. 5: subsidence rate

جدول ۲: آمار توصیفی نرخ فرونشست (mm/year)

Table 2: Descriptive Statistics of Subsidence Rate (mm/year)

Statistical Index	Value
Mean	18.4 ± 8.2
Median	16.7
Mode	12.3
Range	2.1 – 47.8
Skewness	1.23
Kurtosis	2.87
Coefficient of Variation	44.6%



شکل ۶: نقشه نرخ فرونشست در نواحی شرقی شیراز

Fig. 6: Subsidence Rate Map in the Eastern Regions of Shiraz

ساخت‌وسازهای شهری وجود دارد که در کنار کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی، منجر به شدت گرفتن فرونشست شده است.

– کانون مرکزی: این کانون با وسعتی معادل ۳۸ کیلومتر مربع و نرخ متوسط فرونشست 28.7 ± 5.4 میلی‌متر در سال، در محدوده مرکزی شهر و اطراف آن قرار دارد. با توجه به تراکم بالای ساختمان‌های مسکونی و تجاری، ضعف خاک‌های زیرسطحی و توسعه سریع شهری بدون در نظر گرفتن مطالعات ژئوتکنیکی، این منطقه به یکی از کانون‌های فرونشست تبدیل شده است. وجود زیرساخت‌های حیاتی مانند خطوط انتقال گاز، آب و مخابرات در این ناحیه، خطرات ناشی از فرونشست را دوچندان می‌کند.

– کانون جنوبی: در جنوب محدوده مورد مطالعه، منطقه‌ای به وسعت ۲۹ کیلومتر مربع با نرخ متوسط فرونشست 25.1 ± 7.2 میلی‌متر در سال شناسایی شد. این ناحیه عمدتاً شامل اراضی کشاورزی و حاشیه‌های توسعه شهری است که برداشت بی‌رویه آب برای مصارف کشاورزی در کنار افت سطح ایستابی و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، از مهم‌ترین دلایل وقوع فرونشست در این بخش محسوب می‌شود.

نقشه تغییر شکل زمین در نواحی شرقی شیراز (شکل ۶) این کانون‌های فرونشست را به‌خوبی نمایش می‌دهد. این نقشه نشان می‌دهد که الگوی فرونشست در منطقه کاملاً همگن نیست و مناطق دارای نرخ بالا به‌صورت خوشه‌ای و متمرکز در نقاط خاصی توزیع شده‌اند، درحالی‌که

تحلیل مکانی نتایج فرونشست در نواحی شرقی شهر شیراز نشان می‌دهد که این پدیده نه‌تنها به صورت پراکنده و تصادفی رخ نداده، بلکه دارای یک الگوی مشخص و خوشه‌ای است که بیانگر وجود مناطق بحرانی و کانون‌های تمرکز فرونشست است. نتایج تحلیل خوشه‌ای با استفاده از شاخص موران (Moran's I) که یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های آماری برای بررسی خودهمبستگی فضایی داده‌هاست، گویای این مسئله است. مقدار به‌دست‌آمده برای شاخص موران معادل 0.742 با سطح معناداری کمتر از 0.001 است که این مقدار نشان‌دهنده وجود خودهمبستگی فضایی مثبت قوی در نرخ فرونشست می‌باشد. به بیان ساده‌تر، مناطقی که دارای نرخ بالای فرونشست هستند، تمایل دارند در کنار یکدیگر قرار بگیرند و به شکل خوشه‌ای یا کانونی در سطح منطقه گسترش یابند.

مطابق با نتایج این تحلیل، سه کانون اصلی فرونشست در محدوده شرقی شهر شیراز شناسایی شد که هرکدام دارای ویژگی‌های خاص خود هستند:

– کانون شمالی: این منطقه با مساحتی حدود ۴۵ کیلومتر مربع و نرخ متوسط فرونشست 31.2 ± 6.8 میلی‌متر در سال، شدیدترین نرخ فرونشست در کل محدوده مورد مطالعه را تجربه می‌کند. بررسی‌های میدانی و داده‌های جانبی نشان می‌دهد که در این ناحیه، تمرکز بالایی از چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی، خاک‌های رسی آبرفتی و

جدول ۳: ضرایب رگرسیون عوامل مؤثر بر فرونشست

Table 3: Regression Coefficients of Factors Affecting Land Subsidence

Variable	β Coefficient	Standard Error	R ²	p-value	t-value
Groundwater Extraction	0.78	0.12	6.45	<0.001	0.61
Soil Type (Clay)	0.34	0.08	4.23	<0.01	0.18
Building Density	0.28	0.09	3.11	<0.05	0.12
Slope	-0.19	0.06	-3.17	<0.05	0.08

- نوع خاک (رس): ضریب β برابر با ۰.۳۴ نشان‌دهنده تأثیر مثبت نوع خاک بر فرونشست است. خاک‌های رسی به دلیل خاصیت فشردگی بالا، در برابر برداشت آب زیرزمینی حساس‌تر هستند.

- تراکم ساختمانی: با ضریب β برابر با ۰.۲۸، این متغیر نشان‌دهنده تأثیر مثبت تراکم ساختمانی بر فرونشست است. افزایش ساخت و ساز در نواحی شهری می‌تواند به فرونشست کمک کند.

- شیب زمین: ضریب β منفی (۰.۱۹) نشان‌دهنده تأثیر منفی شیب زمین بر فرونشست است. به این معنی که در نواحی با شیب بیشتر، احتمال فرونشست کمتر است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج این پژوهش به روشنی نشان می‌دهد که نواحی شرقی شهر شیراز با نرخ‌های بالای فرونشست زمین مواجه هستند؛ به‌ویژه در مناطق شهری متراکم، اراضی کشاورزی و نواحی با خاک‌های رسی آبرفتی، شدت فرونشست قابل توجه‌تر است. نرخ اندازه‌گیری شده فرونشست در این مناطق بین ۲۵ تا ۴۵ میلی‌متر در سال متغیر بوده که این منطقه را در زمره پهنه‌های بحرانی کشور قرار می‌دهد.

سایر نواحی دارای نرخ فرونشست پایین‌تر و پراکندگی محدودتری هستند.

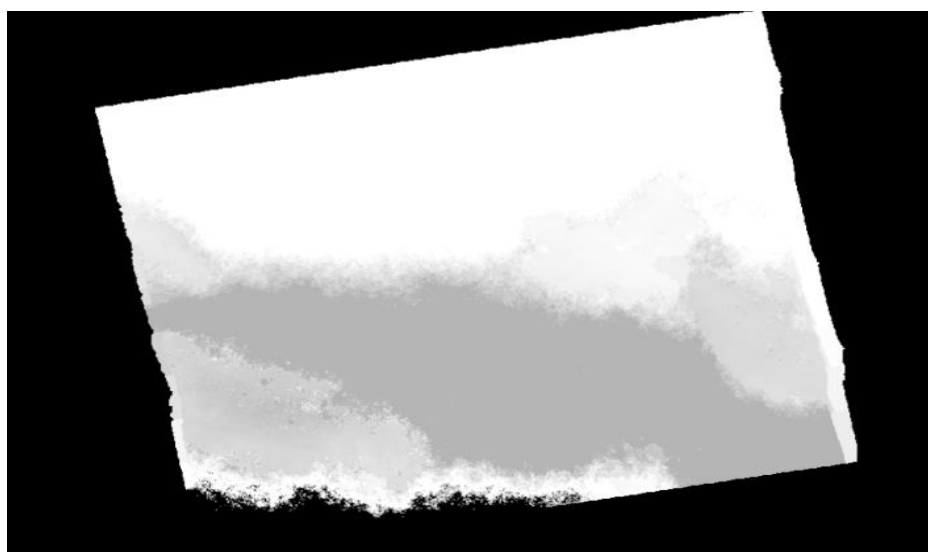
علاوه بر سه کانون اصلی، تحلیل فضایی نشان می‌دهد که در اطراف این کانون‌ها نوارهای انتقالی مشاهده می‌شود که دارای نرخ فرونشست متوسط بین ۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر در سال هستند. این مناطق به‌عنوان مناطق مستعد توسعه پدیده فرونشست در آینده شناسایی شده‌اند و لازم است در طرح‌های توسعه شهری و مدیریت منابع آب، توجه ویژه‌ای به آن‌ها شود.

در مجموع، تحلیل مکانی فرونشست در این مطالعه علاوه بر شناسایی دقیق مناطق بحرانی، نشان می‌دهد که این پدیده ارتباط تنگاتنگی با الگوی فضایی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، نوع خاک و توسعه شهری دارد. وجود الگوی خوشه‌ای قوی نیز بیانگر آن است که در صورت عدم مداخله و اعمال مدیریت صحیح، احتمال گسترش این کانون‌ها و افزایش نرخ فرونشست در آینده بسیار زیاد است. لذا نتایج این بخش می‌تواند مبنای علمی و کاربردی مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست در شرق شهر شیراز باشد.

تحلیل علل فرونشست

تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که عوامل زیر بیشترین تأثیر را بر نرخ فرونشست دارند:

- برداشت آب زیرزمینی: با ضریب β برابر با ۰.۷۸، این متغیر نشان‌دهنده تأثیر قوی برداشت آب زیرزمینی بر فرونشست است. این رابطه معنادار ($p < 0.001$) نشان می‌دهد که افزایش برداشت آب زیرزمینی به‌طور مستقیم با افزایش نرخ فرونشست مرتبط است.



شکل ۷: نقشه تغییر شکل سطح زمین در نواحی شرقی شیراز

Fig. 7: Ground Deformation Map in the Eastern Regions of Shiraz

فعلی، احتمال بروز خسارات گسترده به زیرساخت‌ها، محیط‌زیست و منابع حیاتی در شرق شیراز وجود دارد که نیازمند اقدامات پیشگیرانه، فوری و مبتنی بر شواهد علمی است.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Shirzaei M, Bürgmann R, Fielding EJ. Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nat Rev Earth Environ*. 2021;2(1):40–58. doi:10.1038/s43017-020-00115-x.
- [2] Herrera-García G, et al. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*. 2021;371(6524):34–36. doi:10.1126/science.abb8549.
- [3] Davydzhenka T, Tahmasebi P, Shokri N. Unveiling the global extent of land subsidence: The sinking crisis. *Geophys Res Lett*. 2024;51(4):e2023GL104497. doi:10.1029/2023GL104497.
- [4] Bokhari R, et al. Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. *Heliyon*. 2023;9(3): e14690. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14690.
- [5] Ao Z, et al. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. *Science*. 2024;384(6693):301–306. doi:10.1126/science.adl4366.
- [6] Motagh M, et al. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng Geol*. 2017;218:134–151. doi:10.1016/j.enggeo.2017.01.011.
- [7] Azarakhsh Z, Azadbakht M, Matkan A. Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel-1 time series in Tehran-Shahriar plain: A machine learning-based investigation. *Remote Sens Appl Soc Environ*. 2022;25:100691. doi:10.1016/j.rsase.2021.100691.
- [8] Moradi A, et al. Assessments of land subsidence in Tehran metropolitan, Iran, using Sentinel-1A InSAR. *Environ Earth Sci*. 2023;82(23):569. doi:10.1038/s41598-022-25659-4.
- [9] Karami E, et al. Monitoring of land surface displacement based on SBAS-InSAR time-series and GIS techniques: A case study over the Shiraz Metropolis, Iran. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2023;10:371–378. doi:10.1007/s10040-023-02657-y.
- [10] Ou Q, et al. Large-scale interseismic strain mapping of the NE Tibetan Plateau from Sentinel-1 interferometry. *J Geophys Res Solid Earth*. 2022;127(6):e2022JB024176. doi:10.1007/s12665-023-11225-2.

مطابقت کامل نتایج با مطالعات پیشین از جمله تحقیقات Karami et al. (۲۰۲۳) و Gharechaei et al. (۲۰۲۳)، نقش بارز برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های فشرده‌پذیر را در تشدید این پدیده تأیید می‌کند. نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که برداشت آب زیرزمینی با ضریب β برابر با ۰.۷۸ قوی‌ترین متغیر تأثیرگذار بر نرخ فرونشست است. سایر عوامل نظیر نوع خاک، تراکم ساختمانی و شیب زمین نیز اثر معناداری دارند. همچنین آزمون Moran's I نشان‌دهنده یک الگوی خوشه‌ای و متمرکز از فرونشست در سطح منطقه بوده که ضرورت نظارت هدفمند و منطقه‌محور را برجسته می‌سازد.

در این تحقیق، از تکنیک DInSAR مبتنی بر داده‌های Sentinel-1 برای پایش تغییر شکل زمین استفاده شد. این روش علیرغم دقت کمتر نسبت به تکنیک‌های پیشرفته‌تری مانند PSInSAR یا SBAS-InSAR، به دلیل سادگی، سرعت پردازش و دسترسی رایگان به داده‌ها، گزینه‌ای مؤثر برای ارزیابی سریع مناطق مستعد فرونشست به‌شمار می‌آید. با توجه به روند صعودی فرونشست و شناسایی نواحی پرخطر، اتخاذ اقدامات مدیریتی فوری و سیاست‌گذاری بلندمدت ضروری است. در این راستا، پیشنهاد‌های زیر ارائه می‌شود:

پیشنهاد‌های اجرایی:

- محدودسازی برداشت منابع آب زیرزمینی در مناطق بحرانی با اعمال ضوابط قانونی و نظارتی؛
- راه‌اندازی سامانه‌های پایش مستمر بر مبنای داده‌های راداری و ماهواره‌ای؛
- بازنگری در طرح‌های توسعه شهری و کاربری اراضی در راستای کاهش آسیب‌پذیری؛
- بهسازی ژئوتکنیکی خاک در نواحی حساس با استفاده از تکنیک‌های مقاوم‌سازی زیرساخت.
- پیشنهاد‌های پژوهشی:
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی فرونشست با استفاده از یادگیری ماشین و ترکیب داده‌های InSAR و هیدروژئولوژیکی؛
- ادغام داده‌های GNSS و InSAR برای افزایش دقت پایش‌های زمانی و مکانی؛
- بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی با بهره‌گیری از تصاویر Landsat و Sentinel-2؛
- اجرای مطالعات طولانی‌مدت با تکنیک‌های SBAS-InSAR و PSInSAR برای تحلیل روندهای پایدار؛
- ارزیابی اثرات فرونشست بر زیرساخت‌های حیاتی برای برنامه‌ریزی مقاوم‌سازی شهری.

در مجموع، نتایج این پژوهش با تأکید بر نقش پررنگ فعالیت‌های انسانی در تسریع پدیده فرونشست، بر لزوم بازنگری در مدیریت منابع، توسعه پایدار و راهکارهای پایش مستمر زمین تأکید دارد. در صورت تداوم روند

[24] Nguyen TT, Tran HT. Analyzing of land subsidence by Sentinel-1 time-series images using PSInSAR method: A case study of Thai Nguyen, Vietnam. *Remote Sens Appl Soc Environ*. 2023;32:100987.

[25] Sadeghi M, Rahimi A, Hosseini M. High-resolution PSInSAR mapping of land subsidence in the Qom Plain and integration with groundwater data. *J Remote Sens Hydrol*. 2025;12(1):45–62.

[26] Zhang Y, Liu X, Wang J. 3D fault zone detection via SBAS-InSAR and GNSS in the Hangzhou urban and rural area. *Remote Sens Environ*. 2024;297:113873.

[27] He S, Li K, Chen Q. Deep learning-enhanced hybrid DInSAR for rapid urban subsidence prediction. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*. 2025;198:100–113.

[28] Zhang L, Lai Z, Syvitski J. Variation of material fluxes in a large heterogenic subtropical river: A combination of climate change and human damming influences. *J Hydrol Reg Stud*. 2023;50:101560. doi:10.1016/j.ejrh.2023.101560.

[11] Khoshlahjeh Azar M, Shami S, Nilfouroushan F. Integrated analysis of Hashtgerd plain deformation using Sentinel-1 SAR, geological and hydrological data. *Sci Rep*. 2022;12:21522. doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-371-2023.

[12] Grebby S, et al. Delineating ground deformation over the Tengiz oil field, Kazakhstan, using the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2019;81:37–46.

[13] Bockstiegel M, 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. *Hydrogeol J*. 2024;32(1):289–305.

[14] Gharechae H, et al. Land subsidence susceptibility mapping using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and machine learning models in a semiarid region of Iran. *Land*. 2023;12(4):843.

[15] Haghshenas Haghighi M, Motagh M. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Sci Adv*. 2024;10(19):eadk3039. doi:10.3390/ijgi11090495.

[16] Weiss JR, et al. High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data. *Geophys Res Lett*. 2020;47(17):e2020GL087376.

[17] Babae S, et al. Spatiotemporal characterization of the subsidence and change detection in Tehran plain (Iran) using InSAR observations and Landsat 8 satellite imagery. *Remote Sens Appl Soc Environ*. 2024;36:101290.

[18] Rafiei F, et al. Aquifer and land subsidence interaction assessment using Sentinel-1 data and DInSAR technique. *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2022;11(9):495. doi:10.1038/s41598-022-17438-y.

[19] Wang R, et al. Large-scale surface deformation monitoring using SBAS-InSAR and intelligent prediction in typical cities of Yangtze River Delta. *Remote Sens*. 2023;15(20):4942. doi:10.3390/rs15204942.

[20] Hinderer J, et al. Water depletion and land subsidence in Iran using gravity, GNSS, InSAR and precise levelling data. In: *Beyond 100: The Next Century in Geodesy*. Proc IAG Gen Assem; 2019 Jul 8–18; Montreal, Canada. Cham: Springer; 2020. p.153–159.

[21] Ghorbani Z, et al. Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. *Sci Rep*. 2022;12(1):13998.

[22] Kariminejad N, et al. Deep learning-based predictive models of land subsidence and collapsed pipes in Razavi Khorasan Province, Iran. *Earth Sci Inf*. 2024;17(4):3529–3545. doi:10.1007/s12145-024-01349-9.

[23] Ashraf T, Yin F, Liu L, Zhang Q. Land subsidence detection using SBAS- and Stacking-InSAR with zonal statistics and topographic correlations in Lakhra Coal Mines, Pakistan. *Remote Sens*. 2024;16(20):3815.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



پرستو برزآبادی دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی و زمینه‌های زیرساخت داده‌های مکانی، کاداستر سه بعدی و سیستم‌های مدیریت زمین شده‌اند.

Barzabadi, P. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ p.borzabadi@mail.sbu.ac.ir



افسانه رزاقپور دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی در زمینه‌های زیرساخت داده‌های مکانی، کاداستر سه بعدی شده‌اند.

Razaghpour, A. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ a.razaghpour@mail.sbu.ac.ir



کاربرد یادگیری عمیق در پردازش تصویر فراطیفی و همچنین کاربردهای سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، کشاورزی، مدیریت جنگل‌ها، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل‌سازی محیطی با استفاده از کلان

داده‌های سنجش از دور می‌باشد. در حال حاضر ایشان بیش از ۱۰۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری بیش از ۴۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: پردازش تصاویر فراطیفی و راداری، هوش مصنوعی در اطلاعات مکانی، توسعه کاربردهای سنجش از دور.

Sharifi, A. Associate Professor at the Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ a_sharifii@sbu.ac.ir



مهدی اصلانی دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی در زمینه‌های زیرساخت داده‌های مکانی، کاداستر سه بعدی شده‌اند.

Aslani, M. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ m.aslaniaslmarz@mail.sbu.ac.ir

علیرضا شریفی دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری - سنجش از دور بترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه

Citation (Vancouver): Sharifi A. [Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 3(2): 321-332

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12229.1105>



COPYRIGHTS

© 2025 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)