ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Research. 2024;39(2):149-159 10.58209/geores.39.2.149

Monitoring of the Rafsanjan City Subsidence and Its Possible Causes

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mehrabi A.[1]* *PhD*
Karimi S.[1] *PhD*
Mohammadi Lahijani A.[1] *MSc*

How to cite this article
Mehrabi A, Karimi S, Mohammadi Lahijani A. Monitoring of the Rafsanjan City Subsidence and Its Possible Causes. Geographical Research. 2024;39(2):149-159.

[1]Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Literature, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

***Correspondence**
Address: Faculty of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Pazhouhesh Square, Kerman, Iran
Postal Code: -
Phone: +98 (913) 1934256
Fax: +98 (34) 33257165
mehrabi@uk.ac.ir

Article History
Received: March 18, 2024
Accepted: May 7, 2024
ePublished: May 20, 2024

ABSTRACT

Aims Subsidence is a significant environmental risk in the country's plains. Urban areas located in the plains are at risk of subsidence, posing a hazard to many communities. Hence, this study was conducted to examine the subsidence of Rafsanjan city region in the plain and analyze the potential elements contributing to it.

Methodology This was a practical research study conducted in Rafsanjan, utilizing a specific approach. The research employed the technique of coherence pixels as its methodology. The utilized data from Sentinel 1 radar pictures pertain to the time period spanning from 2014 to 2022.

Findings Rafsanjan city has seen a progressive sinking phenomenon, with the rate of subsidence intensifying between 2014 and 2022. The annual subsidence rate has escalated from 11 cm to 13 cm throughout this period. Furthermore, the scope of the affected regions has expanded, resulting in the progression of the development process from the outskirts of the city to the center districts. The subsidence pattern of the city is influenced by the combination of fault maps, changes in subterranean water levels during a 10-year period, and the subsidence map.

Conclusion The city is experiencing a gradual sinking of the ground, which is spreading towards the inner areas and the center of the city. The uncontrolled extraction of subsurface water sources is a significant factor contributing to the sinking of the city of Rafsanjan. The subsidence of the city is mostly influenced by the Nogh fault.

Keywords Subsidence Rate; Spatial Relationship; Nogh Fault; Underground Water

CITATION LINKS

[Azarakhsh *et al.*, 2022] Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel-1 time series in Tehran-Shahriar plain: A ...; [Blanco-Sánchez *et al.*, 2008] The Coherent Pixels Technique (CPT): An advanced DInSAR technique for ...; [Cigna & Tapete, 2021] Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014-2020 ...; [Duque *et al.*, 2007] Application of the Coherent Pixels Technique (CPT) to urban monitoring. Proceedings ...; [El Kamali *et al.*, 2021] Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry ...; [Ghorbani *et al.*, 2022] Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater ...; [Han *et al.*, 2023] Monitoring and analysis of land subsidence in Jiaozuo City (China) based ...; [Hussain *et al.*, 2022] PS-InSAR based monitoring of land subsidence by groundwater extraction ...; [Lo *et al.*, 2022] Integration of numerical models and InSAR techniques to assess land ...; [Maghsoudi *et al.*, 2018] Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java ...; [Mahmoodinasab & Mohseni, 2021] A spatiotemporal analysis of the relationship between groundwater level and ...; [Navarro-Hernández *et al.*, 2020] Spatial analysis of land subsidence in the San Luis Potosi Valley ...; [Nazmfar & Shirzad Khrjan, 2022] Surface subsidence monitoring with radar interference technique (study ...; [Pawluszek-Filipiak & Borkowski, 2021] Monitoring mining-induced subsidence by integrating differential radar interferometry ...; [Ramirez & Kwon, 2022] Sentinel-1 persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) ...; [Ranjbar & Jafari, 2009] Investigating the effective factors in the subsidence ...; [Rashidi *et al.*, 2017] Estimation of the location of active faults in the south and west ...; [Salehi *et al.*, 2013] Evaluation of land subsidence in southern Mahyar ...; [Sharifikia, 2012] Determining the amount and range of land subsidence using radar ...; [Verberne *et al.*, 2023] Disentangling shallow subsidence sources by data assimilation in ...; [Xu *et al.*, 2023] Monitoring and analysis of land subsidence in Cangzhou based on small baseline ...; [Yuan *et al.*, 2021] Subsidence monitoring base on SBAS-InSAR and slope stability analysis method ...; [Zhang *et al.*, 2023] Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based ...;

Copyright© 2024, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

پایش فرونشست پهنه شهر رفسنجان و علل احتمالی آن

علی مهرابی* PhD
گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
صادق کریمی PhD
گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
علی محمدی لاهیجانی MSc
گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

اهداف: یکی از اصلی‌ترین مخاطرات محیطی دشت‌های کشور پدیده فرونشست است. با توجه به جای‌گیری بسیاری از پهنه‌های شهری در محدوده دشت‌ها، پدیده فرونشست بسیاری از شهرها را تهدید می‌کند. از این رو پژوهش حاضر، با توجه به قرارگیری پهنه شهر رفسنجان در محدوده دشت، با هدف بررسی پهنه شهر به لحاظ فرونشست و تحلیل عوامل احتمالی آن تدوین شد.

روش‌شناسی: پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و در سال ۱۴۰۲ در رفسنجان انجام شد. این پژوهش به روش تکنیک پیکسل‌های کوهرنس تصاویر راداری انجام شد و داده‌های مورد استفاده تصاویر راداری سنتینل ۱ مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ بود.

یافته‌ها: سطح شهر رفسنجان دچار فرونشست فزاینده‌ای بود که نرخ آن از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ در حال افزایش بود و مقدار آن از ۱۱ سانتی‌متر به ۱۳ سانتی‌متر در سال رسید. همچنین وسعت مناطق درگیر، افزایش یافت به طوری که روند توسعه از مناطق اطراف شهر به محدوده‌های مرکزی شهر در جریان بود. روی‌هم‌اندازی نقشه گسل‌ها و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی طی یک دوره ۱۰ساله با نقشه فرونشست پهنه شهر، نشان از تبعیت الگوی فرونشست از عوامل مذکور داشت.

نتیجه‌گیری: محدوده شهر دچار فرونشست پیشرونده‌ای است که به مرور زمان به سمت قسمت‌های داخلی و مرکز شهر کشیده می‌شود. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی یکی از عوامل تاثیرگذار در امر فرونشست سطح شهر رفسنجان است و گسل نوق فرونشست پهنه شهر را تحت کنترل دارد.

کلیدواژگان: نرخ فرونشست، ارتباط مکانی، گسل نوق، آب‌های زیرزمینی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸
*نویسنده مسئول: mehrabi@uk.ac.ir

مقدمه

پدیده فرونشست یکی از مشکلات اساسی و روزافزون در جوامع انسانی است. غالباً این پدیده در اثر فعالیت‌های بشری رخ می‌دهد. عوامل متعددی مانند فعالیت‌های انسانی و اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و عوامل مختلف طبیعی نظیر فعالیت گسل‌ها باعث فرونشست می‌شود. برداشت بی‌رویه از آب در مصارف کشاورزی و صنعتی باعث تاثیرات نامطلوب کیفی و کمّی در منابع آب شده است. همچنین اضافه برداشت آب از حوضه‌های با نهشته‌های دریاچه‌ای تحکیم‌نیافته، دریای کم‌عمق و آبرفتی، باعث تشدید فرونشست می‌شود [Lo *et al.*, 2022; Ramirez & Kwon, 2022; Han *et al.*, 2023]. اولین گام در راستای بررسی پدیده فرونشست، اندازه‌گیری دقیق نرخ فرونشست و شناخت گستره فضایی درگیر است. با شناسایی ویژگی‌های رفتار زمانی و مکانی این معضل، می‌توان ضمن ارایه مدل منطقه‌ای آن، راهکارهای اساسی و عملی به منظور کاهش اثرات سوء این پدیده ارایه کرد. روش‌های مختلف ژئودیتیکی و غیرژئودیتیکی برای محاسبه فرونشست زمین وجود دارد. استفاده از لیزر اسکنر، توتال استیشن و GPS جزء روش‌های ژئودیتیکی به حساب می‌آیند. با وجود اینکه در این روش‌ها، اندازه‌گیری‌های دقیقی انجام می‌گیرد، ولی توانایی تعیین الگوی فضایی و وسعت فرونشست وجود ندارد [Yuan *et al.*, 2021; Azarakhsh *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023]. ایجاد سنجنده‌های راداری، افقی تازه پیش روی پژوهشگران علوم محیطی قرار داد. یکی از ابزارهای کارآمد به منظور پایش نرخ جابه‌جایی در نتیجه پدیده‌های مختلفی نظیر فرونشست، آتشفشان، زمین‌لغزش و زلزله، روش اینترفرومتری راداری است [Yuan *et al.*, 2021; Cigna & Tapete, 2021; Hussain *et al.*, 2022; Verberne *et al.*, 2023]. در این روش می‌توان جابه‌جایی‌های با دقت بالا را به صورت پیوسته و در شرایط آب و هوایی مختلف مورد محاسبه قرار داد. در رابطه با پدیده فرونشست در دشت و ارتباط آن با اُفت سطح آب زیرزمینی، تاکنون مطالعات مختلفی، انجام گرفته است [Salehi *et al.*, 2013; Mahmoodinasab & Mohseni, 2021; Ghorbani *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023]. به طوری که *شریفی‌کیا* نرخ متوسط سالانه فرونشست دشت نوق-بهرمان را تا ۳۰ سانتی‌متر برآورد کرده است [Sharifikia, 2012]. *رنجبر* و *جعفری* عوامل موثر در فرونشست دشت اشتهارد را بررسی کرده و وجود سازندهای تبخیری و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را از عوامل مهم فرونشست منطقه دانسته است [Ranjbar & Jafari, 2009]. *نظم‌فر* و *شیرزادگرجان* با پایش فرونشست دشت مشگین استان اردبیل، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را عامل اصلی فرونشست دشت دانسته و نرخ آن تا ۳۵ سانتی‌متر در سال رسیده است [Nazmfar & Shirzad Khrjan, 2022]. *مقصودی* و همکاران نرخ فرونشست شهر جاوای اندونزی را ۴/۶ میلی‌متر در سال گزارش کرده‌اند [Maghsoudi *et al.*, 2018]. *پولیشیک فیلیپاک* و *بورکوسکی* در یکی از معادن قدیمی کشور لهستان نرخ فرونشست تجمعی ناشی از استخراج معدن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. روش مورد استفاده در این پژوهش روش پراکنش‌گرهای پایدار و روش تداخل‌سنجی تفاضلی بوده است که نتیجه آن نشان داد که حداکثر نشست زمین ۱۰ سانتی‌متر در سال بوده است [Pawluszek-Filipiak & Borkowski, 2021]. *ال کمالی* و همکاران، در محدوده ریماه، امارات متحده عربی، فرونشست زمین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داده است که نرخ فرونشست در این منطقه ۴۰ میلی‌متر در سال بوده است [El Kamali *et al.*, 2021].

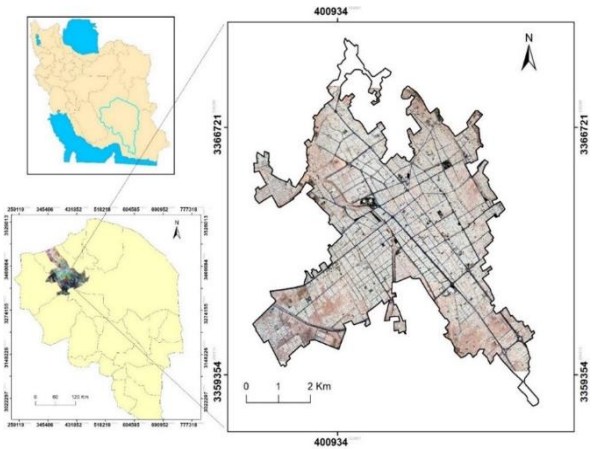
دشت رفسنجان، یکی از اولین دشت‌های کشور بوده که دچار

فرونشست شدید شده است، و از آنجایی که پهنه شهر رفسنجان در محدوده دشت قرار گرفته است، در نتیجه قاعدتاً نمی‌تواند تحت تاثیر این پدیده مخرب قرار نگیرد و مطمئناً با افزایش روند گسترش فرونشست، پهنه شهر نیز درگیر خواهد شد. بنابراین بررسی پهنه شهر رفسنجان به لحاظ رخداد فرونشست امری ضروری و غیرقابل اجتناب است. از این رو پژوهش حاضر با هدف پایش فرونشست پهنه شهر رفسنجان و تعیین وسعت و میزان فرونشست رخداده در محدوده شهر انجام گرفت، همچنین اثرات برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و توسعه گسل‌ها بر فرونشست پهنه شهر مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

روش‌شناسی

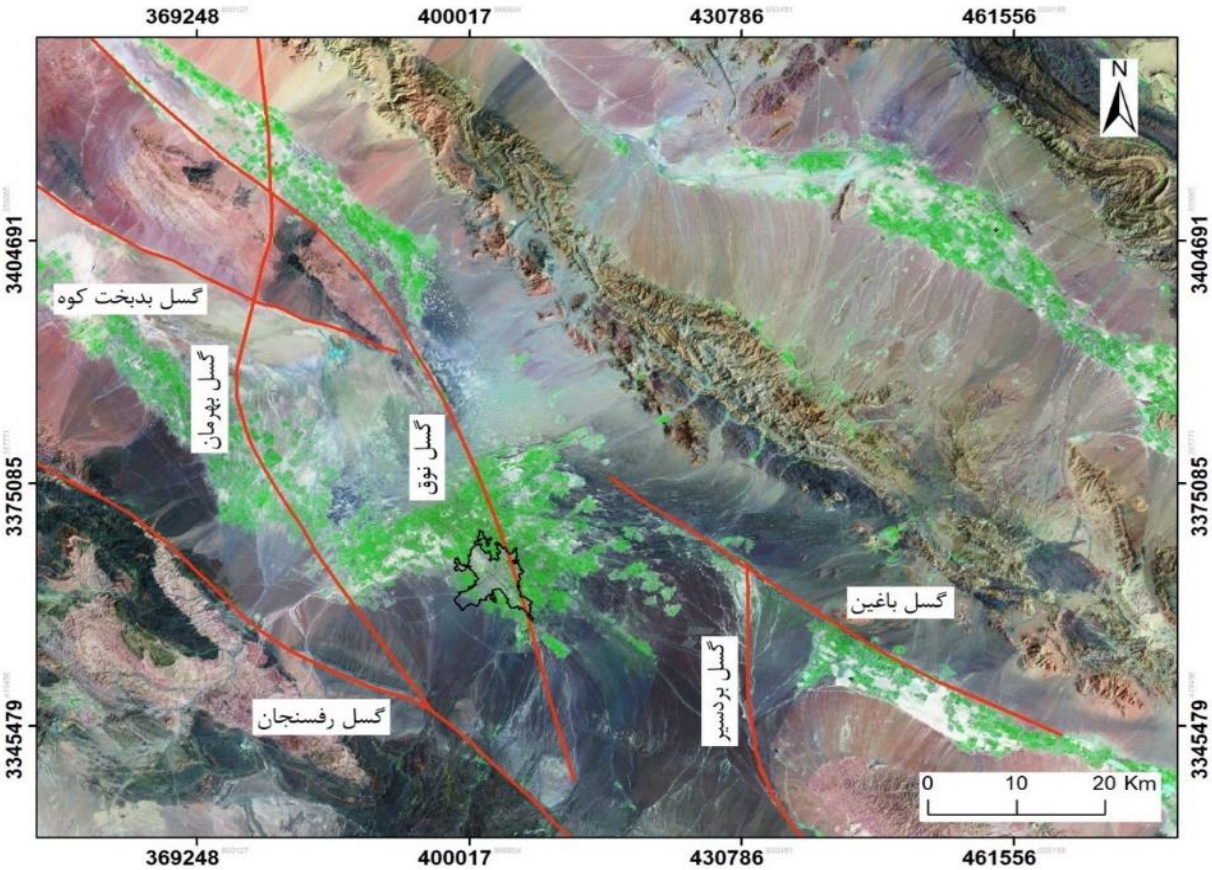
پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده که در سال ۱۴۰۲ در شهر رفسنجان انجام شد. در این پژوهش از ۷۳ تصویر سنتینل ۱ با پلاریزاسیون VV مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۴/۰۵/۱۷ و ۲۰۲۲/۰۴/۲۳ استفاده شد. مدل ارتفاع رقومی مورد استفاده در این پژوهش مدل ۳۰متری SRTM بود. به منظور بررسی منابع آب زیرزمینی دشت رفسنجان از چاه‌های منطقه تعداد ۴۰ نمونه آب جمع‌آوری و مورد مطالعه قرار گرفت.

پهنه شهر رفسنجان در مرکز دشت با مساحت ۳۲۰۰ کیلومتر مربع در بخش شمالی استان کرمان قرار دارد. متوسط ارتفاع شهر از سطح دریا ۱۴۷۰ متر است. از سمت شمال و شمال شرقی به ارتفاعات داوران و سمت جنوب نیز به ارتفاع سرچشمه محدود می‌شود (شکل ۱). این منطقه از نظر آب و هوایی جزء مناطق نیمه‌خشک به شمار می‌آید و متوسط بارندگی سالانه آن در یک دوره درازمدت ۴۰ساله ۱۳۰ میلی‌متر است.



شکل ۱) نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه

دشت رفسنجان یک پهنه تکتونیکی فعال است که در زون ایران مرکزی قرار دارد. در این منطقه چندین گسل فعال وجود دارد. نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه در راستای تعیین ارتباط بین گسل‌ها و فرونشست تهیه شد [Rashidi *et al.*, 2017] (شکل ۲). شش گسل مهم رفسنجان، نوق، باغین، بردسیر، بهرمان و بدبخت کوه منطقه مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار داده است.



شکل ۲) گسل‌های محدوده مورد مطالعه

تکنیک پیکسل‌های منسجم (CPT)

تکنیک پیکسل‌های منسجم (CPT) الگوریتمی است که به عنوان یک تکنیک پیشرفته DInSAR و به منظور استخراج حرکت غیرخطی و خطی از تصاویر با کوهرنسی بالا و تداخل‌نگارهای تفاضلی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Duque *et al.*, 2007; Navarro-Hernández *et al.*, 2020]. تداخل‌نگاشت تفاضلی یک اینترفروگرام معمولی است که مولفه توپوگرافی آن حذف شده است. این قسمت با استفاده از داده‌های مداری و DEM خروجی به‌دست می‌آید. مولفه تداخلی اصلی یک پیکسل تک، علاوه بر نمایش تغییر شکل بین زمان‌های دریافت دو تصویر SAR، حاوی مولفه‌های دیگری است که قادر به پنهان‌کردن اطلاعات مختلفی است. هدف این الگوریتم جدایش مولفه جابه‌جایی از بقیه مولفه‌ها است و تمام فازهای تداخل‌سنجی نشان داده شده است (رابطه ۱) [Blanco-Sánchez *et al.*, 2008]:

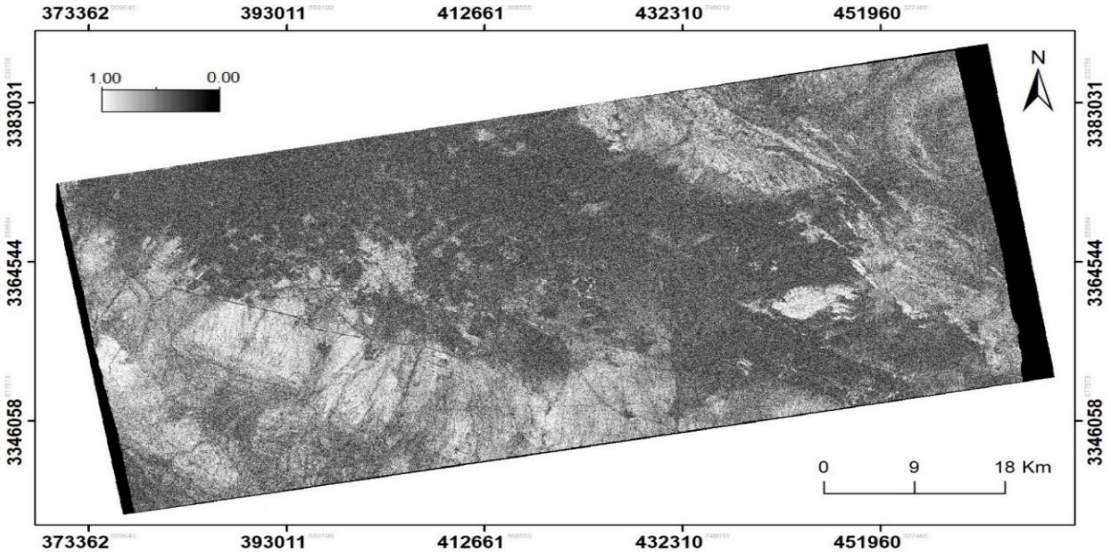
رابطه ۱)

$$\phi(T,B_n)=\frac{4\pi}{\lambda}.(v.T+\beta)+\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_n}{r_0 sin\theta}.\varepsilon+n_{atm}+n$$

که در آن λ طول موج، ϕ مولفه تداخل‌سنجی، (T,B_n) خطوط پایه زمانی و مکانی، β تغییر شکل غیرخطی، v نرخ خطی تغییر شکل، θ زاویه فرود محلی، r_0 فاصله سنسور، n_{atm} مربوط به مولفه اتمسفر، ε خطای DEM، و n نویز است.

مراحل روش CPT در چهار بخش خلاصه می‌شود. مرحله اول بهینه‌سازی انتخاب اینترفرومترها با توجه به خطوط پایه مکانی و زمانی مناسب در راستای تشخیص پیکسل‌ها، استخراج خطای تغییر شکل و کاهش داده‌ها است. در مرحله دوم پیکسل‌هایی که کیفیت فاز مطلوبی دارند انتخاب می‌شوند. در مرحله سوم فاز تغییر شکل تخمین زده می‌شود. بدین منظور، از طریق اعمال و تنظیم یک مدل خطی بر روی داده‌ها، الگوریتم، نرخ خطی تغییر شکل و خطای DEM در نظر گرفته می‌شود و تخمین فاز غیرخطی، آخرین مرحله تغییر شکل است. وقتی که خطای DEM و فاز خطی تغییر شکل تعیین شد و سهم هر یک از اینترفروگرام‌ها حذف شد، CPT با استفاده از رفتار مولفه غیرخطی تغییر شکل و پدیده‌های جوّی متفاوت، جداسازی سهم آنها از مولفه اصلی را به انجام می‌رساند. در این بخش، ترکیبی از فیلترهای مکانی و زمانی به منظور استخراج فاز غیرخطی تغییر شکل از فاز اتمسفر، اعمال می‌شود [Duque *et al.*, 2017]. قابل ذکر است که تصحیحات اتمسفری مورد نیاز با استفاده از الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار StaMPS انجام گرفته است. تولید اینترفروگرام‌های تفاضلی اولین مرحله پردازش CPT است. در ابتدا به منظور هم‌مرجع‌کرن دو به دو تصاویر، تداخل‌نگارهایی که دارای خطوط مبنای زمانی کوچک‌تر از ۳۶۵ و خطوط پایه مکانی کوچک‌تر از ۱۰۰ متر باشند، انتخاب می‌شوند. با توجه به موارد ذکر شده، ۷۲ اینترفروگرام تولید شد. همچنین نقشه‌های کوهرنسی مرتبط با تداخل‌نگارهای مختلف، تولید شد. از مقدار کوهرنسی می‌توان کیفیت فاز را تخمین زد و از آن در مرحله انتخاب پیکسل استفاده کرد. در مرحله بعد با پردازش تداخل‌نگارهای تفاضلی، سری‌های زمانی تغییر شکل به‌دست آمدند. از آنجایی که به دلیل عدم همبستگی، همه پیکسل‌های تصویر برای پردازش مناسب نبودند، از معیار مبتنی بر کوهرنسی از بین معیارهای متفاوت انتخاب پیکسل، استفاده شد. به طوری که پیکسل‌های با مقدار میانگین کوهرنسی زیر ۰/۶۵ مورد استفاده قرار نگرفت. نقشه کوهرنسی دشت رفسنجان با استفاده از روش CPT تهیه شد. در این شکل مناطق با کوهرنسی بالا روشن‌ترین مناطق بودند که منطبق با مناطق کوهستانی و مرتفع، مناطق مسکونی و زمین‌های بایر هستند چرا که این مناطق در طول زمان دچار تغییرات بسیار کمی شدند. علاوه بر این، مناطق تیره با محدوده‌های کشاورزی منطبق بود. از آنجایی که پوشش گیاهی در طول زمان متغیر است، باعث عدم همبستگی زمانی در مولفه تداخل‌سنجی شده و در نتیجه کمترین مقدار همدوسی را داشت (شکل ۳).

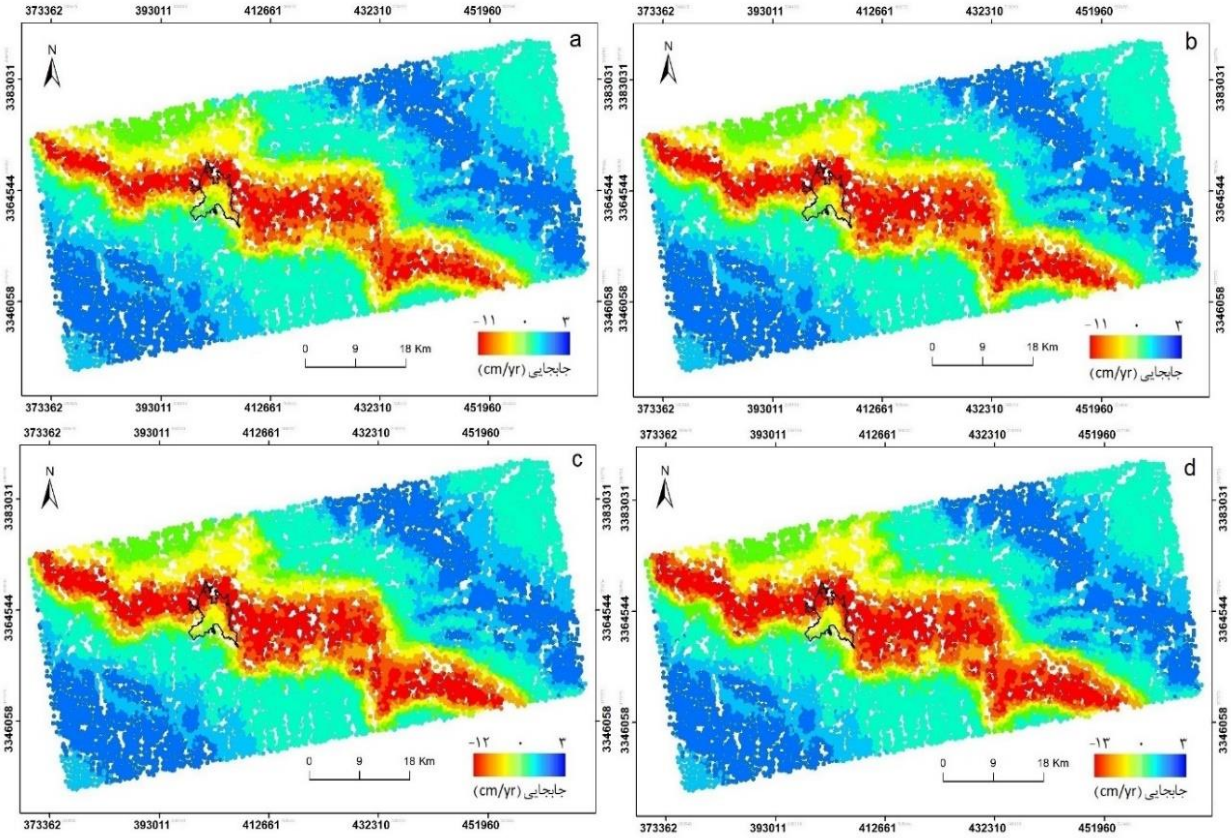
به منظور تجزیه و تحلیل‌های لازم از نرم‌افزارهای SNAP ArcGIS 10.3 و StaMPS 4 استفاده شد.



شکل ۳) نقشه کوهرنسی محدوده مورد مطالعه مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲

یافته‌ها

مقادیر جابه‌جایی‌های شکل‌گرفته در راستای خط دید ماهواره نتیجه پردازش داده‌های سنتینل ۱ از تاریخ ۱۷ می ۲۰۱۴ تا ۲۳ آوریل ۲۰۲۲ بود (شکل ۴). از مجموعه داده‌های سنتینل ۱ محاسبه‌شده توسط تکنیک CPT، تعداد ۳۱۹۶ پیکسل مشخص شد. در نواحی مرکزی دشت رفسنجان، در فاصله سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ نرخ تغییر شکل در راستای دید ماهواره با حداکثر سرعت ۱۳- سانتی‌متر در سال رخ داد. برای پیکسل‌های انتخابی، جابه‌جایی بین ۳+ سانتی‌متر تا ۱۳- سانتی‌متر متغیر بود (شکل ۴). مثبت و منفی‌بودن اعداد به‌ترتیب نشانگر بالاآمدگی یعنی نزدیک‌شدن سطح زمین به ماهواره و فروافتادگی یعنی فاصله‌گرفتن سطح زمین از ماهواره است. بیشتر مقادیر مثبت در مناطق کوهستانی اطراف دشت قرار داشت که این بالاآمدگی سطح زمین می‌تواند ناشی از فرآیند ایزوستازی و عوامل تکتونیکی ناحیه باشد. همچنین، مقادیر منفی که نشانگر فرونشست هستند، عمدتاً بر نواحی مرکزی دشت متمرکز بودند. بنابراین مناطق قرمز رنگ بیش از ۱۱ تا ۱۳ سانتی‌متر در طول یک سال، درگیر فرونشست شدند. علاوه بر این، محدوده فرونشست طی گذر زمان در دشت رفسنجان به طور فزاینده‌ای رو به افزایش بود. به طوری که وسعت مناطق درگیر پدیده فرونشست از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ از ۱۲۰۰ کیلومتر مربع به ۱۳۰۰ کیلومتر مربع رسید. علاوه بر آن، نرخ فرونشست نیز از ۱۱ سانتی‌متر به ۱۳ سانتی‌متر در سال افزایش یافت.



شکل ۴) نقشه تغییرات سطح دشت رفسنجان مربوط به دوره زمانی، a: ۲۰۱۶-۲۰۱۴؛ b: ۲۰۱۸-۲۰۱۶؛ c: ۲۰۲۰-۲۰۱۸؛ d: ۲۰۲۲-۲۰۲۰

نقشه جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر رفسنجان طی ۴ دوره مطالعاتی نشان داد که فرونشست از سمت شمال و شرق وارد محدوده شهر شده و پهنه‌های شهری را تحت تاثیر قرار داد؛ این گسترش از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲، روند فزاینده‌ای داشت و بیشتر شد (شکل ۵).

اعتبارسنجی

اعتبارسنجی روش تحقیق بر مبنای اندازه‌گیری دقیق GPS واقع در شهر رفسنجان که مربوط به مرکز نقشه‌برداری ایران است، انجام شد. برداشت‌های جی پی اس این نقطه از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ انجام گرفت. سری زمانی تغییر شکل حاصل از برداشت‌های جی پی اس و روش سی پی تی در نقطه A ترسیم شد و مقایسه نمودار سری زمانی نشان داد که نتایج حاصل از این دو روش نزدیک بودند به طوری که مقدار خطای RMSE، ۰/۱۳۶ میلی‌متر محاسبه شد (شکل ۶).

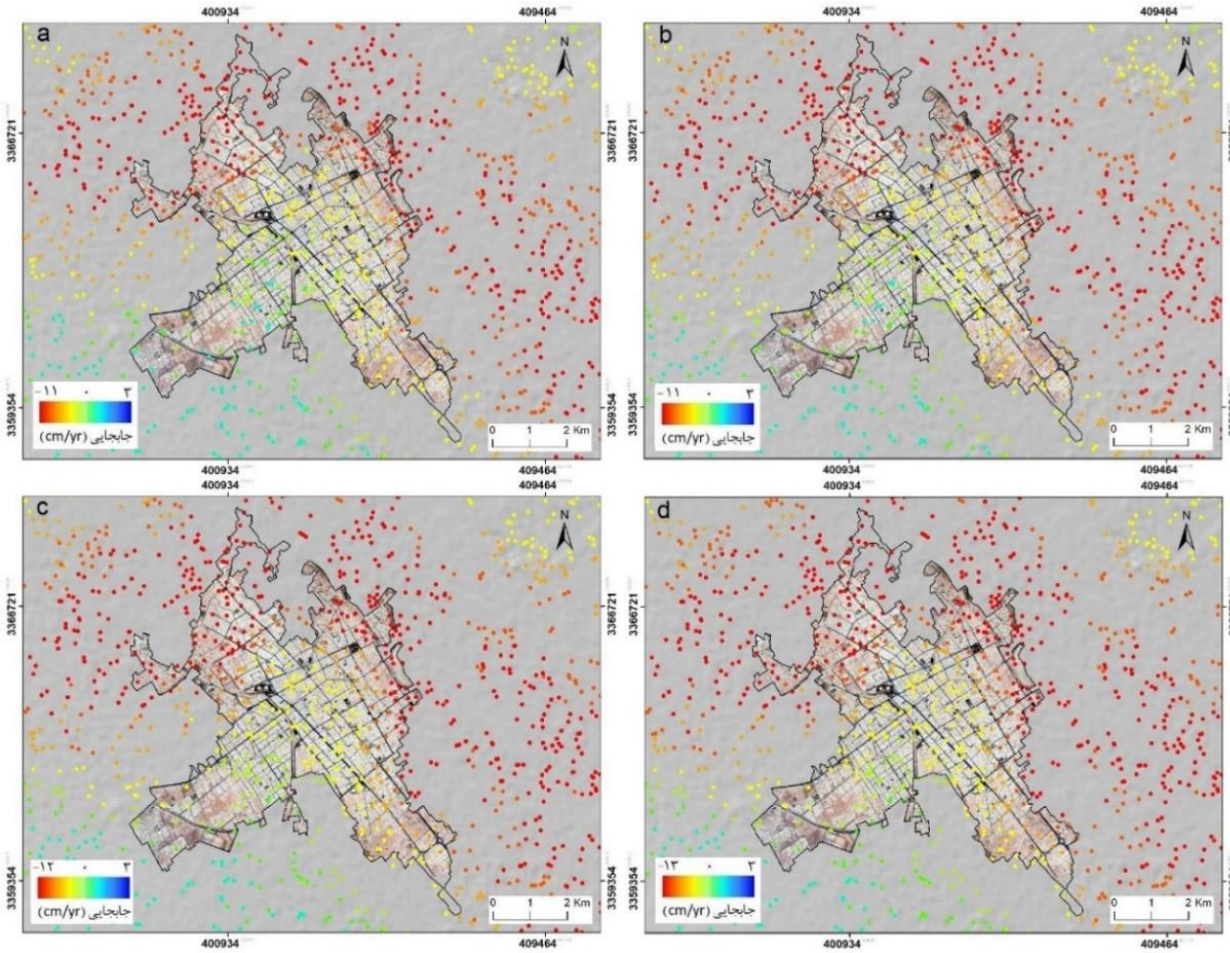
تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی

در راستای بررسی وضعیت آبخوان دشت رفسنجان از داده‌های هیدرولوژی ۴۰ چاه مورد بهره‌برداری در عرض یک دوره ۱۰ساله آماری استفاده شد. در قسمت‌هایی از محدوده مورد مطالعه، میزان اُفت سطح آب به طور متوسط به ۲ متر در سال نیز رسیده بود. بنابراین نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت رفسنجان در طول سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ ترسیم شد (شکل ۷). بیشترین اُفت آب در بخش‌های

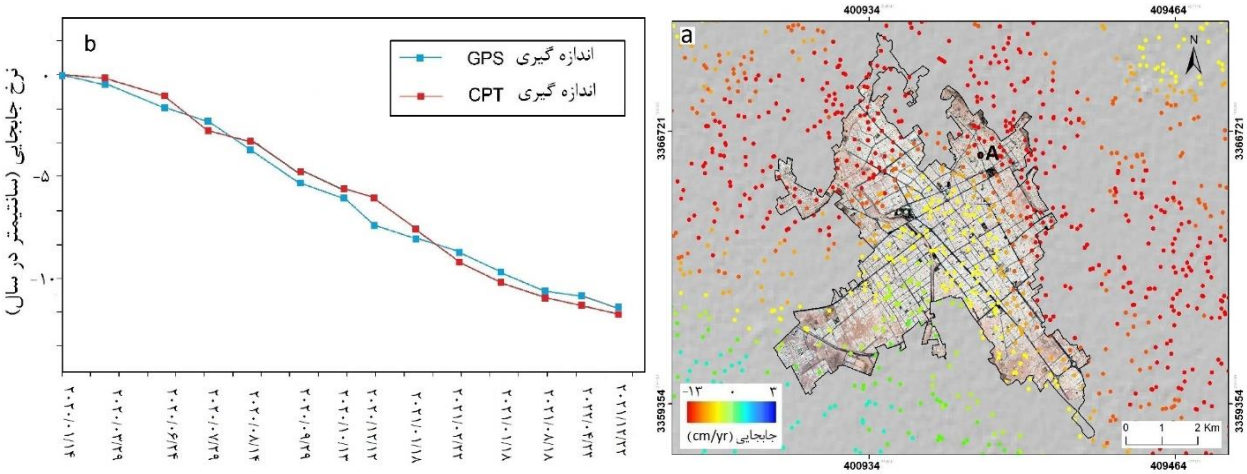
مرکزی و غربی دشت رخ داد. به دلیل تغذیه کم و برداشت زیاد در بخش‌های مرکزی و غربی دشت نسبت به قسمت‌های شمالی و شرقی، اُفت این مناطق بیشتر رخ داد. البته در قسمت‌های کوچکی از دشت، سطح آب‌های زیرزمینی بالاآمدگی نشان داد (شکل ۷).

ارتباط بین فرونشست و میزان اُفت سطح آب زیرزمینی

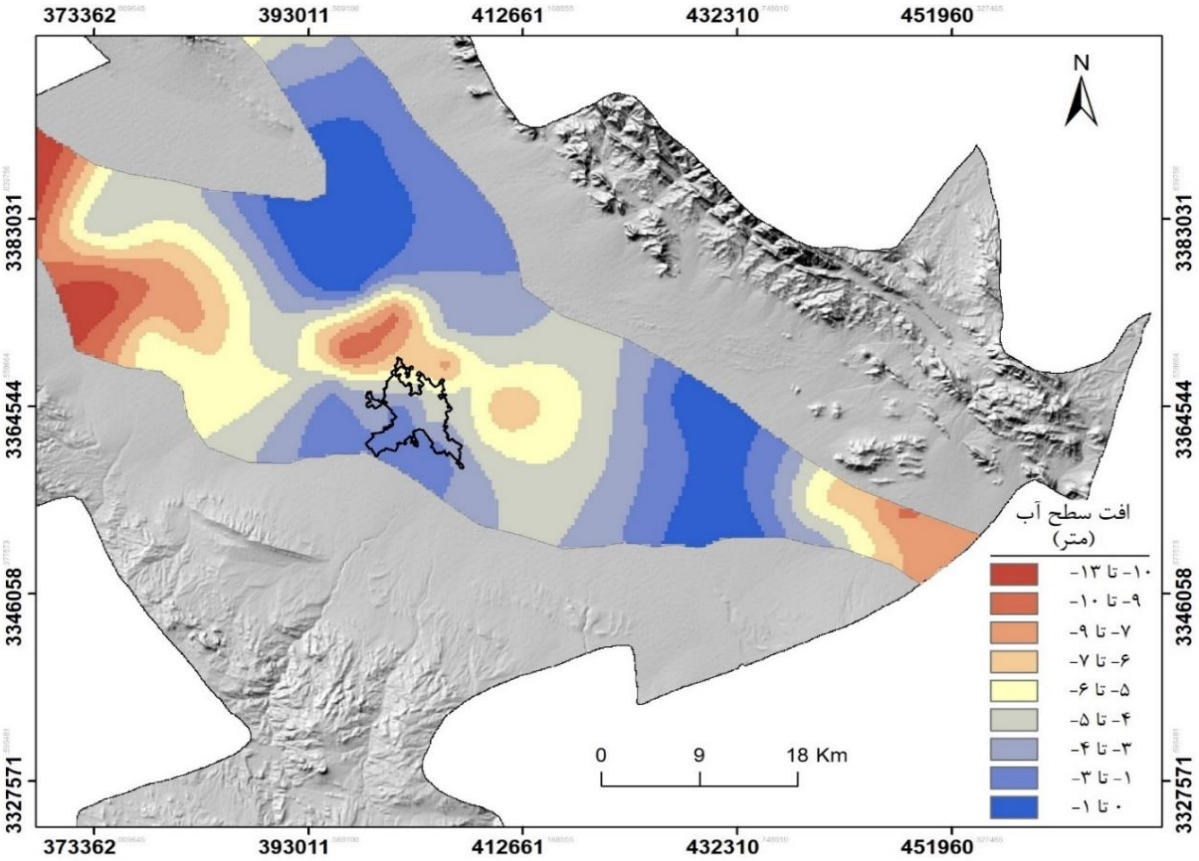
در راستای تعیین ارتباط بین مقدار جابه‌جایی‌ها و میزان اُفت سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعه‌شده، نقشه فرونشست با نقشه تغییرات سطح آب به شکل منحنی‌های هم‌تراز اُفت (شکل ۷) در محیط GIS روی‌هم‌اندازی (Overlay) شد (شکل ۸). مناطق با نرخ فرونشست بالا بر نواحی که دارای میزان اُفت آب بالاتری بودند منطبق بود. و همچنین در مناطقی که سطح آب افزایش یافته و یا مقدار اُفت آب تغییری نداشته است (بخش حاشیه شمالی و جنوب غربی دشت رفسنجان)، سطح زمین بدون جابه‌جایی بوده و یا دچار بالاآمدگی شده بود (شکل ۸).



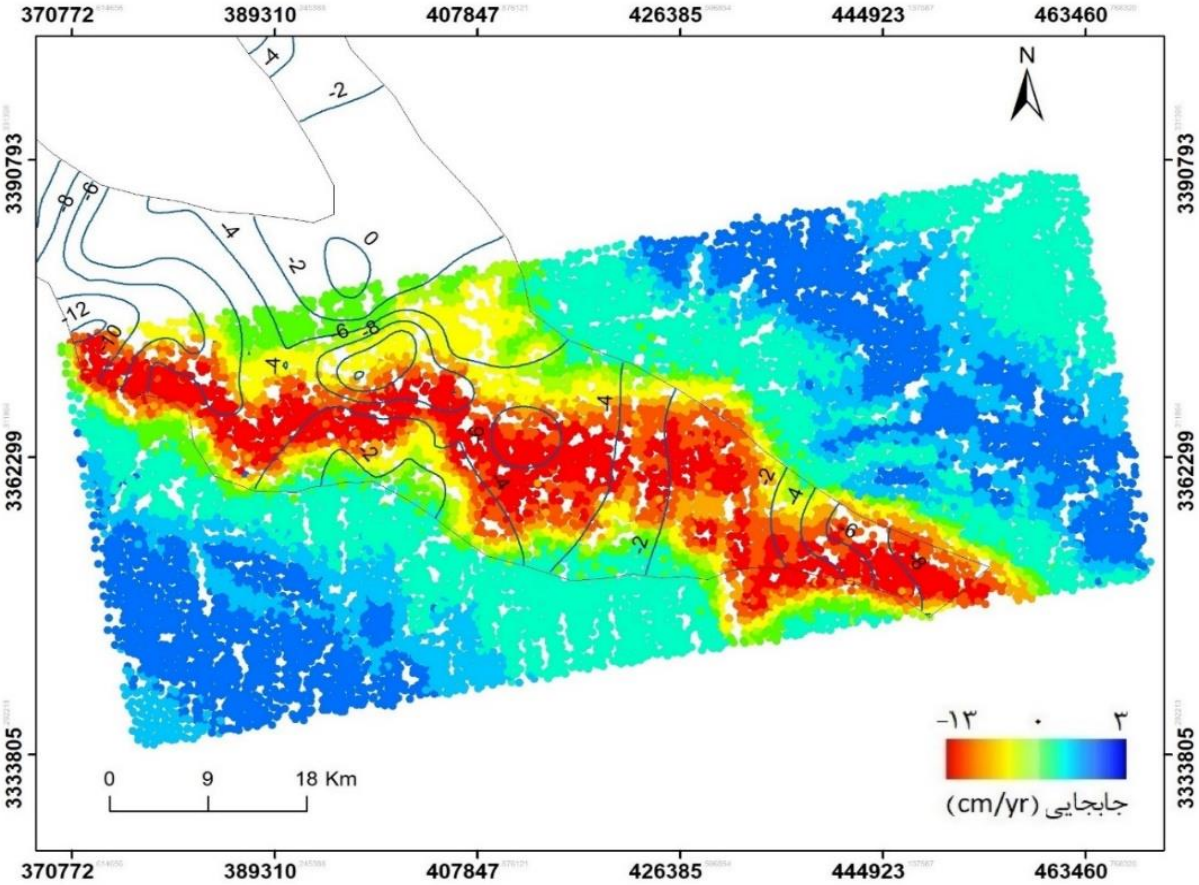
شکل ۵) نقشه جابه‌جایی محدوده شهر رفسنجان مربوط به دوره زمانی، a: ۲۰۱۶-۲۰۱۴؛ b: ۲۰۱۸-۲۰۱۶؛ c: ۲۰۲۰-۲۰۱۸؛ d: ۲۰۲۲-۲۰۲۰ (موقعیت گسل نوق با خط قرمز مشخص شده است)



شکل ۶) اعتبارسنجی نقشه جابه‌جایی



شکل۷) نقشه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

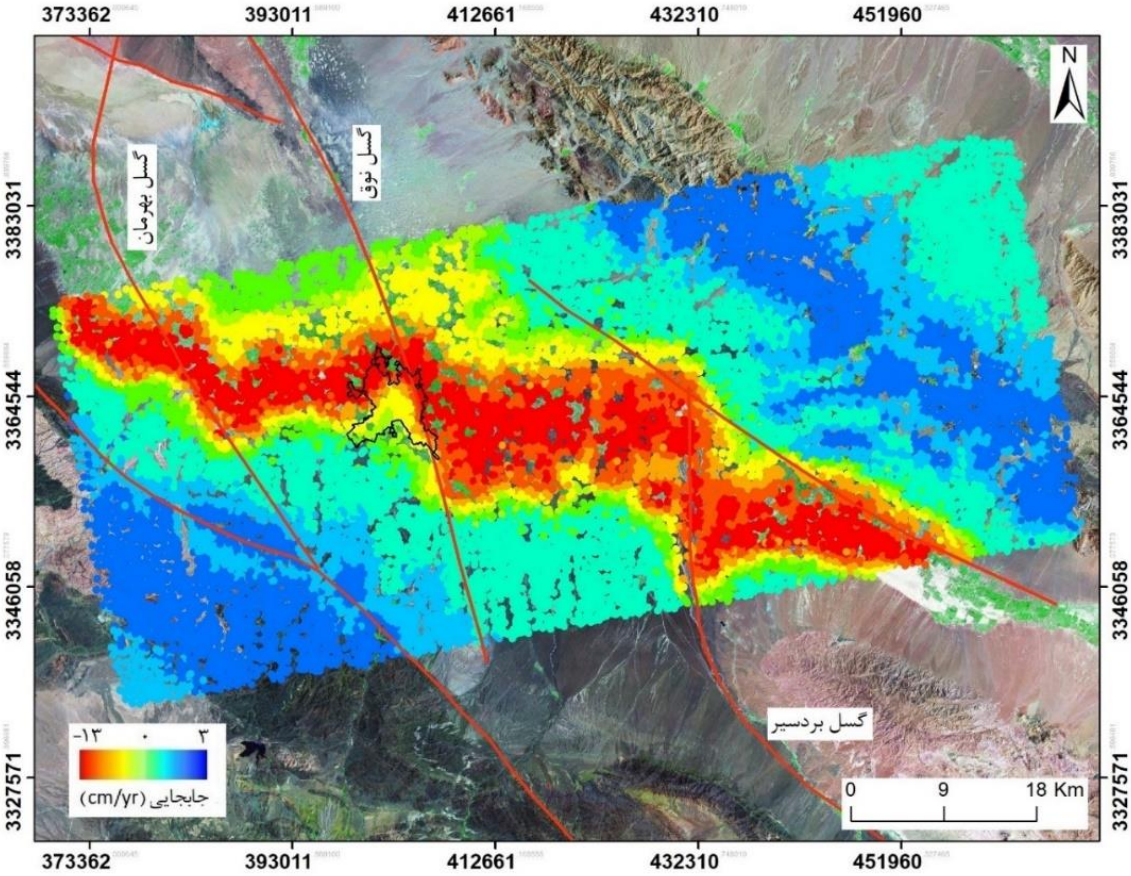


شکل ۸) ارتباط بین فرونشست زمین و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی

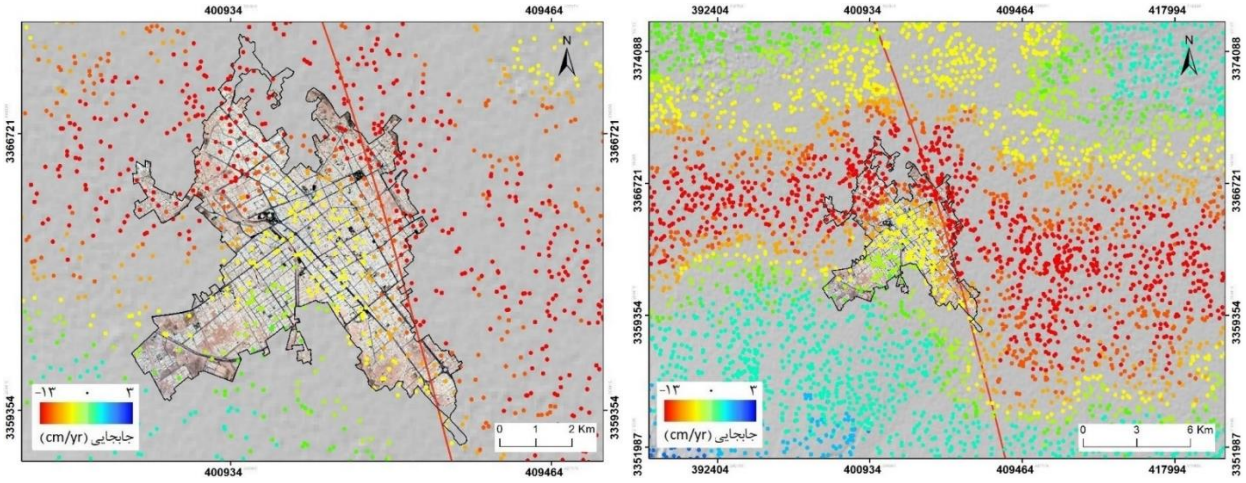
ارتباط بین گسل‌ها و فرونشست

با روی‌هم‌اندازی نقشه جابه‌جایی و نقشه موقعیت گسل‌ها در محیط GIS، ارتباط بین این دو پدیده مورد بررسی قرار گرفت. نقشه تغییر شکل CPT با گسل‌های محدوده مورد مطالعه همبستگی فضایی بالایی نشان داد (شکل ۹).

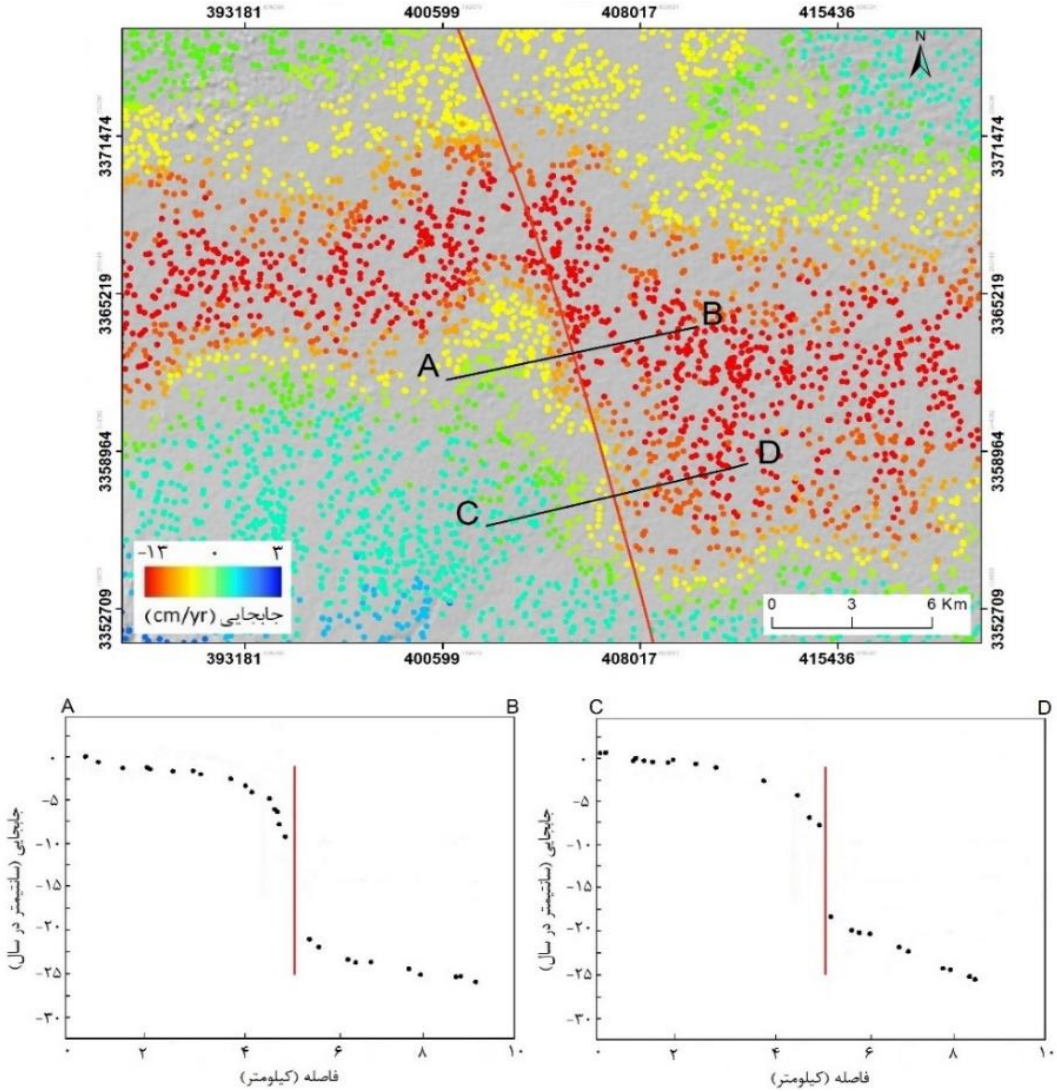
به منظور بررسی بیشتر تاثیر عامل گسل در فرونشست پهنه شهر رفسنجان، نقشه واضحی از محدوده شهر و گسل نوق ترسیم شد (شکل ۱۰). با توجه به شواهد اولیه وجود ارتباط بین فرونشست و گسل‌های موجود در دشت و پهنه شهر رفسنجان و در راستای تحلیل بیشتر این ارتباط، نیم‌رخ جابه‌جایی در راستای عمود بر گسل نوق ترسیم شد. بنابراین نیم‌رخ جابه‌جایی در راستای دو پاره خط CD و AB ترسیم شد (شکل ۱۱). نتایج حاکی از تاثیر عامل گسل نوق در فرونشست پهنه شهر رفسنجان بود. نتایج حاصل از یافته‌های میدانی نیز به نمایش گذاشته شده است (شکل ۱۲). همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فرونشست خیابان به صورت خطی اتفاق افتاده است.



شکل ۹) روی‌هم‌اندازی نقشه فرونشست و گسل‌های منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۰) ارتباط بین فرونشست با گسل نوق در پهنه شهر رفسنجان



شکل ۱۱) نیم‌رخ جابه‌جایی‌های انجام‌گرفته در راستای عمود بر گسل نوق

شکل ۱۲) تصاویری از فرونشست زمین در سطح شهر رفسنجان

بحث

پژوهش حاضر با هدف پایش فرونشست پهنه شهر رفسنجان و تعیین وسعت و میزان فرونشست رخداده در محدوده شهر انجام گرفت، همچنین اثرات برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و توسعه گسل‌ها بر فرونشست پهنه شهر مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. فرونشست به وقوع‌پیوسته در سطح شهر رفسنجان را می‌توان نتیجه دو عامل برداشت بی‌رویه از سفره‌های منابع زیرزمینی آب دشت و تاثیر و عملکرد گسل‌ها در نظر گرفت. موقعیت نواحی‌ای با میزان اُفت آب زیاد منطبق بر مناطق با نرخ فرونشست بالا بود و در نواحی با افزایش سطح آب و یا مقدار اُفت آب ثابت، سطح زمین بدون جابه‌جایی و یا دچار بالاآمدگی شده بود. که این شواهد نشان‌دهنده وجود ارتباط مستقیم بین فرونشست زمین و برداشت بی‌رویه از سفره‌های منابع زیرزمینی آب دشت بود. در نتیجه می‌توان این طور استنباط کرد، که برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی یکی از عوامل مهم فرونشست در این محدوده است.

در رابطه با ارتباط بین فرونشست و فعالیت گسل‌ها، بین موقعیت گسل‌ها و الگوی کلی فرونشست همبستگی فضایی وجود داشت به طوری که محدوده فرونشست در راستای گسل‌های نوق، بهرمان و بردسیر دچار کشیدگی و امتدادیافتگی شده بود. این مورد می‌تواند نشانگر این مساله باشد که در اینجا پدیده فرونشست تحت تاثیر و کنترل گسل‌های مذکور قرار گرفته بوده است. مرز مناطق با نرخ فرونشست بالا در مناطق غربی شهر از مرز گسل تبعیت می‌کرد. علاوه بر این، نیم‌رخ جابه‌جایی ترسیم‌شده در راستای دو پاره خط عمود بر گسل نوق، به‌خوبی نشانگر تاثیر گسل نوق در کنترل الگوی فرونشست پهنه شهر رفسنجان بود. در امتداد گسل نوق نرخ تغییر شکل نقاط تغییر ناگهانی پیدا کرده بود و این تغییر در نرخ تغییر شکل در دو طرف گسل مشخص بود مشاهدات میدانی انجام‌گرفته در سطح شهر رفسنجان نیز تاثیر گسل مذکور را به‌خوبی نشان می‌داد. فرونشست خیابان و بلوار به صورت خطی انجام گرفته بود. آزیموت راستای مورد نظر ۱۶۰ درجه به‌دست آمد که تقریباً با راستای گسل نوق مطابقت دارد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش و مطالعات مشابه [Hussain *et al.*, 2022; Lo *et al.*, 2022; Ghorbani *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2023] نشان داده است که برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی یکی از عوامل مهم و معمول در فرونشست زمین در سطح شهرها است. علاوه بر این، مطالعات *سیگنا* و *تاپته*، و *ژانگ* و همکاران نیز به مانند نتایج حاصل از این پژوهش، علاوه بر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به تاثیر عامل گسل در امر فرونشست در پهنه‌های شهری اشاره کرده‌اند [Cigna & Tapete, 2021; Zhang *et al.*, 2023].

نتیجه‌گیری

محدوده شهر دچار فرونشست پیشرونده‌ای است که به مرور زمان به سمت قسمت‌های داخلی و مرکز شهر کشیده می‌شود. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی یکی از عوامل تاثیرگذار در امر فرونشست سطح شهر رفسنجان است. گسل‌های نوق، بهرمان و بردسیر پدیده فرونشست دشت رفسنجان را کنترل می‌کنند و گسل نوق فرونشست پهنه شهر را تحت کنترل دارد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.
تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.
تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.
سهم نویسندگان: علی مهرابی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ صادق کریمی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ علی محمدی لاهیجانی (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری (۱۰٪)
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Azarakhsh Z, Azadbakht M, Matkan A (2022). Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel-1 time series in Tehran-Shahriar plain: A machine learning-based investigation. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 25:100691.
- Blanco-Sánchez P, Mallorquí JJ, Duque S, Monells D (2008). The Coherent Pixels Technique (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring. Pure and Applied Geophysics. 165(6):1167-1193.
- Cigna F, Tapete D (2021). Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014-2020 Sentinel-1 IW InSAR. Remote Sensing of Environment. 253:112161.
- Duque S, Mallorqui JJ, Blanco P, Monells D (2007). Application of the Coherent Pixels Technique (CPT) to urban monitoring. Proceedings of the 2007 Urban Remote Sensing Joint Event. Paris: IEEE.
- El Kamali M, Papoutsis I, Loupasakis C, Abuelgasim A, Omari K, Kontoes C (2021). Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. Science of the Total Environment. 776:145946.
- Ghorbani Z, Khosravi A, Maghsoudi Y, Mojtahedi FF, Javadnia E, Nazari A (2022). Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. Scientific Reports. 12(1):13998.
- Han Y, Liu G, Liu J, Yang J, Xie X, Yan W, et al (2023). Monitoring and analysis of land subsidence in Jiaozuo City (China) based on SBAS-InSAR Technology. Sustainability. 15(15):11737.
- Hussain MA, Chen Z, Zheng Y, Shoaib M, Ma J, Ahmad I, et al (2022). PS-InSAR based monitoring of land subsidence by groundwater extraction for Lahore Metropolitan City, Pakistan. Remote Sensing. 14(16):3950.
- Lo W, Purnomo SN, Dewanto BG, Sarah D, Sumiyanto (2022). Integration of numerical models and InSAR techniques to assess land subsidence due to excessive groundwater abstraction in the Coastal and Lowland regions of Semarang City. Water. 14(2):201.
- Maghsoudi Y, Meer F, Hecker C, Perissin D, Saepuloh A (2018). Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 64:386-396.

west of Lut Block. Geosciences. 26(104):211-222. [Persian]
- Salehi R, Ghafoori M, Lashkaripour GR, Dehghani M (2013). Evaluation of land subsidence in southern Mahyar Plain using radar interferometry. Journal of Irrigation and Water Engineering. 3(3):47-57. [Persian]
- Sharifikia M (2012). Determining the amount and range of land subsidence using radar interferometric method in Noug-Bahrman Plain. Journal of Spatial Planning. 16(3):55-77. [Persian]
- Verberne M, Koster K, Lourens A, Gunnink J, Candela T, Fokker A (2023). Disentangling shallow subsidence sources by data assimilation in a reclaimed urbanized coastal plain, South Flevoland polder, the Netherlands. JGR Earth Surface. 128(7):e2022JF007031.
- Xu X, Zhou C, Gong H, Chen B, Wang L (2023). Monitoring and analysis of land subsidence in Cangzhou based on small baseline subsets interferometric point target analysis technology. Land. 12(12):2114.
- Yuan M, Li M, Liu H, Lv P, Li B, Zheng W (2021). Subsidence monitoring base on SBAS-InSAR and slope stability analysis method for damage analysis in mountainous mining subsidence regions. Remote Sensing. 13(16):3107.
- Zhang Z, Hu C, Wu Z, Zhang Z, Yang S, Yang W (2023). Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies. Scientific Reports. 13(1):8031.
- Mahmoodinasab F, Mohseni N (2021). A spatiotemporal analysis of the relationship between groundwater level and ground surface displacement using Sentinel-1 SAR data. Arabian Journal of Geosciences. 14(12):1106.
- Navarro-Hernández MI, Tomás R, Lopez-Sanchez JM, Cárdenas-Tristán A, Mallorquí JJ (2020). Spatial analysis of land subsidence in the San Luis Potosi Valley induced by aquifer overexploitation using the Coherent Pixels Technique (CPT) and Sentinel-1 InSAR observation. Remote Sensing. 12(22):3822.
- Nazmfar H, Shirzad Khrjan M (2022). Surface subsidence monitoring with radar interference technique (study area: Meshgin plain). Journal of Natural Environment Hazards. 11(31):25-48. [Persian]
- Pawluszek-Filipiak K, Borkowski A (2021). Monitoring mining-induced subsidence by integrating differential radar interferometry and persistent scatterer techniques. European Journal of Remote Sensing. 54(Suppl 1):18-30.
- Ramirez RA, Kwon TH (2022). Sentinel-1 persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) for long-term remote monitoring of ground subsidence: A case study of a port in Busan, South Korea. KSCE Journal of Civil Engineering. 26(10):4317-4329.
- Ranjbar M, Jafari N (2009). Investigating the effective factors in the subsidence of the Eshtehard plain. Journal of Geography. 6(19):155-166. [Persian]
- Rashidi A, Khatib MM, Mousavi SM, Jamour Y (2017). Estimation of the location of active faults in the south and