

Document Type

Applied Research Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Assessment of the Impact of Groundwater Decline on Land Subsidence Using Sentinel-1 Radar Images (Case Study: Sistan Region)

ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرسطحی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ (مطالعه موردی: منطقه سیستان)

S. A. Almodaresi^{1*}, L. Latifi², S. Fotouhi³, H. Siasar⁴

سید علی المدرسی^۱، لیلی لطیفی^۲، صمد فتوحی^۳، هادی سیاسی^۴

1- Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran.

۱- استاد، گروه سنجش از راه دور و GIS واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

2, 3- Ph.D. Candidate and Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

4- Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University of Tehran, Tehran, Iran.

۴- استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور تهران، تهران، ایران.

* Corresponding, Author Email: almodaresi@iau.ac.ir

*رایانامه نویسنده مسئول: almodaresi@iau.ac.ir

Received 17-11-2025

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

Revised 22-04-2026

تاریخ بازنگری ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

Accepted 23-04-2026

تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

Available online 15-06-2026

تاریخ انتشار ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

Abstract

چکیده

Land subsidence, as a creeping geomorphic hazard and a direct consequence of the overexploitation of groundwater resources, poses a serious threat to environmental sustainability and water security in arid and semi-arid regions. In this regard, the present study evaluates the impact of groundwater level decline on the rate of subsidence in the Sistan region using Sentinel-1 radar images. This research was conducted using a combined approach, utilizing 54 Sentinel-1 radar images (2014-2022), GRACE data, water level data from 29 piezometric wells, and Landsat 8 images of the Sistan region. The InSAR technique in SNAP software was employed to estimate subsidence, and the Random Forest algorithm (with a Kappa accuracy of 0.95) was used for land use classification. The findings indicate a direct and significant relationship between groundwater decline and subsidence. The average annual rate of groundwater decline increased from 6.5 cm/year in 2015 to 12.7 cm/year in 2017. Concurrently, the average subsidence rate increased from approximately -10 cm/year during 2014-2016 to more than -20 cm/year during 2020-2022. The highest subsidence rate (average -2.33 cm) was concentrated in the agricultural lands of the central and eastern parts of the Sistan Plain. A strong correlation coefficient of 0.82 between InSAR data and piezometric well observations confirms the accuracy of the method. Furthermore, the increase in barren land area between 2014 and 2024 indicates additional pressure on water resources. The overall results showed that the overextraction of water for agriculture is the main driver of subsidence in Sistan. This study demonstrates the effectiveness of integrating Sentinel-1 and GRACE data as an accurate and cost-effective tool for regional subsidence monitoring.

فرونشست زمین، یکی از مخاطرات ژئومورفیک خزنده و پیامد برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، تهدیدی جدی برای پایداری محیط‌زیستی و امنیت آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این راستا پژوهش حاضر به ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرسطحی بر میزان فرونشست منطقه سیستان با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱، پرداخته است. این پژوهش با رویکردی ترکیبی و با استفاده از ۵۴ تصویر راداری سنتینل-۱ (۲۰۱۴-۲۰۲۲)، داده‌های GRACE، تراز آب ۲۹ چاه پیزومتر و تصاویر لندست ۸ در منطقه سیستان انجام شد. برای برآورد فرونشست از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در نرم‌افزار SNAP و برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از الگوریتم جنگل تصادفی (با دقت کاپای ۰/۹۵) استفاده شد. یافته‌ها نشان‌دهنده رابطه مستقیم و معنادار بین افت آب زیرسطحی و فرونشست است. میانگین نرخ افت سالانه آب زیرزمینی از ۶/۵ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۵ به ۱۲/۷ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ افزایش یافت. هم‌زمان، میانگین نرخ فرونشست از حدود ۱۰- سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۶ به بیش از ۲۰- سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۲ رسید. بیشترین نرخ فرونشست (میانگین ۲/۳۳- سانتی‌متر) در اراضی کشاورزی مناطق مرکزی و شرقی دشت سیستان متمرکز بود. ضریب همبستگی قوی ۰/۸۲ بین داده‌های InSAR و مشاهدات چاه‌های پیزومتری، دقت روش را تأیید می‌کند. همچنین، افزایش سطح اراضی بایر در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ نشانه فشار مضاعف بر منابع آب است. نتایج کلی نشان داد برداشت بی‌رویه آب برای کشاورزی، محرک اصلی فرونشست در سیستان است. این مطالعه اثربخشی تلفیق داده‌های سنتینل-۱ و GRACE را به عنوان ابزاری دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای پایش منطقه‌ای فرونشست نشان می‌دهد.

Keywords: Land Subsidence, Subsurface Water Decline, InSAR Data Processing, Water Resource Management, Sistan Region.

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، افت آب‌های زیرسطحی، پردازش داده‌های تداخل سنجی راداری، مدیریت منابع آب، منطقه سیستان.

How to cite this article:

Almodaresi, S. A., Latifi, L., Fotouhi, S. & Siasar, H. (2026). Assessment of the Impact of Groundwater Decline on Land Subsidence Using Sentinel-1 Radar Images (Case Study: Sistan Region). Journal of Water and Sustainable Development, 13(1), 53-72.
<https://doi.org/10.22067/jwsd.v13i1.2511-1470>

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهم ژئومورفیک است که دارای حرکتی کند بوده و در بلندمدت آثار مخربی برجای می‌گذارد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). فرونشست زمین یک پدیده زمین‌شناسی محیط‌زیستی است که ناشی از عواملی مانند بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی است (Gumilar و همکاران، ۲۰۱۵). برداشت بی‌رویه از منابع آب باعث افت سطح آب و افزایش تنش وارده به ذرات خاک می‌شود که این موضوع منجر به فرونشست سطح زمین می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۴۰۲). در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی کم است، اکثر آب مورد نیاز از آب زیرزمینی و زیرسطحی و از طریق چاه‌ها تأمین می‌شود که این امر ممکن است موجب فرونشست زمین شود (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۴).

فرونشست باعث آسیب‌رسانی به نظام جمعیتی و سکونتگاه‌های انسانی و خسارت‌های محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی می‌شود (Goli و همکاران، ۲۰۱۹). پدیده فرونشست که ممکن است به صورت نشست تدریجی یا ناگهانی در سطح زمین ایجاد شود، به‌طور کلی ناشی از عوامل عمده‌ایی همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات و یا افت سطح سیالات زیرزمینی و همچنین عوامل تکتونیکی باشد (Chen و همکاران، ۲۰۱۶). اثرات فرونشست را می‌توان در چهار بعد دید: ۱- آسیب به زیرساخت‌ها، خطوم لوله، ساختمان‌ها و سدها (Tran و همکاران، ۲۰۲۲)، ۲- کاهش عملکرد جاده‌ها و راه‌ها به دلیل تغییر شکل سطح جاده و پایه ریلی، ۳- قرار گرفتن در معرض سیل را افزایش می‌دهد (Du و همکاران، ۲۰۱۹) و ۴- ممکن است یک کانالی برای منابع آلودگی زمینی شود و آب‌های زیرزمینی را آلوده کند (Zhang، ۲۰۱۹؛ Ma و همکاران، ۲۰۱۹).

در حال حاضر این پدیده یک مشکل جهانی بروز نموده است که در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک نمود بیشتری پیدا می‌کند (Hu و همکاران، ۲۰۰۴). بسیاری از شهرهای بزرگ جهان واقع در این مناطق به نحوی با این پدیده درگیر می‌باشند (Guo و همکاران، ۲۰۱۵). در ایران بررسی و مطالعه فرونشست، پیشینه حدود چهل ساله دارد (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸). در سال‌های نخستین مطالعه فرونشست در ایران، این پدیده بر اساس مشاهدات محلی و بررسی بریدگی‌های جداره چاه‌ها گزارش شده است. اولین بررسی‌های علمی فرونشست در دشت رفسنجان صورت گرفته است که فرونشست شدیدی داشته است. پس از آن در سایر دشت‌های ایران مانند اردبیل، هشتگرد، تهران، یزد، اردکان، کاشمر و مشهد نیز به دنبال مشاهده فرونشست، بررسی و مطالعات آن انجام شده است (Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۳).

حسین‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری (مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین)، پرداخته‌اند. نتایج نشان داد میزان فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است؛ به‌طوری‌که از ۲/۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ رسیده است. همچنین هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قاین نیز افت محسوسی داشته است؛ به‌طوری‌که میزان افت تراز آب در سطح دشت حدود ۱/۳۰ متر در طول ۵ سال از سال ۲۰۱۴ تا مارس ۲۰۲۰، بوده است؛ یعنی نزدیک به سالی ۲۶ سانتی‌متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته است. ضمن اینکه تحلیل خود همبستگی فضایی و شاخص موران ۰/۹۸۴، خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. نتایج همبستگی نیز نشان داد بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشت - $p=0.138$ که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود؛ اما با توجه به سطح معناداری $sig=0.585$ این ارتباط معنادار نیست. عمادالدین و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری در دشت فسا، پرداخته‌اند. طبق نتیجه به‌دست آمده یکی از دلایل اصلی فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است و در نهایت با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست مشخص شد که به‌طور کلی ۱۱۴۰۱ نفر در محدوده خطر فرونشست زندگی می‌کنند. ضروری است سازمان‌ها و نهادهای متولی با اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مناسب، پیش از وقوع بحران درصدد کاهش هرگونه آسیب به سکونتگاه‌های انسانی، جمعیت و زیرساخت‌های موجود در این مناطق باشند. حسینی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی عوامل موثر در پدیده فرونشست زمین در گستره غرب استان تهران، پرداخته‌اند. نتیجه کلی مدل‌سازی عددی المان محدود نشان داد، نرخ فرونشست محدود در طول سال ۱۴۱۰ به میزان ۱۲/۸ سانتیمتر و در نقاط بحرانی ۲۰/۹۸ سانتیمتر تخمین زده شد. بنابراین حداکثر نشست ناشی از افت سطح آب‌زیرزمینی در سال‌های ابتدایی با نرخ بالاتر در لایه بالایی سفره آبخوان ظاهر شده که به مرور زمان پس از پر شدن خلل و فرج بین ذرات خاک و باتوجه به ارتباط هیدرولیکی بین لایه‌ها با سرعت کمتری نسبت به گذشته در لایه‌های فوقانی سطح آبخوان و سطح زمین مشاهده می‌شود. بنابراین تغییرات تراز آب زیرزمینی، جنس زمین و فاصله از گسل نیز از جمله عوامل موثر بر الگوی و نرخ فرونشست بوده‌اند. شفیعی دارافشانی و شمسی‌اژیه (۱۴۰۳) در پژوهشی به بررسی میزان آسیب‌پذیری

و تاب‌آوری شهر اصفهان در برابر پدیده فرونشست پرداخته‌اند. نتایج بیانگر این است که نواحی از شمال شهر و قسمت‌هایی به‌صورت نواری به‌علت نزدیکی به عوامل خطرزا مانند گسل، مسیل، قنات‌های قدیمی، منابع ذخیره سوخت، لوله انتقال نفت به این مخازن و تغییر مداوم مسیر رود روی آنها هم موجب افزایش آسیب‌پذیری است. سایر نتایج نشان داد، بیشتر ساخت‌وسازهای موجود در منطقه غیراصولی و غیرمتناسب با شرایط مخاطره‌آمیز است. [گودرزی و همکاران \(۱۴۰۴\)](#) در پژوهشی به بررسی رابطه بین فرونشست زمین و مصرف آب در دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر سنتینل-۱، پرداخته‌اند. بر اساس نتایج، تصاویر سنتینل برای تخمین میزان فرونشست قابلیت خوبی دارند. باتوجه‌به بررسی آمار مصرف و برداشت آب زیرزمینی در سال‌های اخیر، دلایل احتمالی کاهش فرونشست در منطقه مورد مطالعه را می‌توان اقدامات مدیریتی انجام شده مانند انتقال آب به این حوضه، تغییر در شیوه‌های کشاورزی و کاهش برداشت آب زیرزمینی نسبت به سال‌های قبل در این منطقه بیان کرد. [Guo و همکاران \(۲۰۱۶\)](#) رابطه بین فرونشست زمین و تغییرات آب‌های زیرزمینی را بررسی کردند. در این مطالعه نرخ فرونشست با تکنیک تداخل سنجی راداری و با استفاده از ۱۸ تصویر ENVISAT ASAR بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ بررسی شد. میزان نرخ فرونشست حاصل از این مطالعات با دقت کمتر از ۵ میلی‌متر تایید شد. [Jeanne و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) به بررسی نقش فعالیت‌های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان خواکین در کالیفرنیا پرداختند. خشکسالی‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ موج افزایش شدید استفاده از آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه باعث فرونشست شد. یافته‌ها نشان داد در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیشتر باشد فرونشست زمین هم در منطقه زیاد می‌باشد. [Goorabi و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) تصاویر Sentinel-1 فرونشست زمین در کلانشهر اصفهان را بین ۵- تا ۱۰۰- میلی‌متر در سال برآورد کردند و نشان دادند نرخ فرونشست از جنوب به نواحی شمالی، شمال‌شرقی و شرقی افزایش می‌یابد. Duc-Huy و همکاران (۲۰۲۲)، در شبیه‌سازی سه بعدی فرونشست در سیستم آبخوان ناهمگن در شهر هووی تایوان نشان داد توزیع مواد هیدروژئولوژیکی تأثیر زیادی بر جریان آب زیرزمینی و نشست دارد. [Jiang و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) در مقاله‌ای با عنوان "آیا سیل با فرونشست زمین بدتر می‌شود"، به بررسی اثرات فرونشست زمین بر طغیان سیل از طوفان هاروی به این نتیجه رسیده است که تغییر کلی عمق سیل ناشی از فرونشست زمین با عمق شش سانتیمتری آب سیلاب به‌ازای هر یک متر از زمین فرونشسته در بدترین مکان تحت تأثیر، نسبتاً جزئی است. تأثیر فرونشست زمین بر عمق سیل، غیرخطی بودن شدیدی را در زمان نشان می‌دهد، جایی که اثرات ناشی از نقاط داغ فرونشست زمین قبلی می‌تواند با ادامه فرونشست زمین تغییر کند.

در تحقیقات پیشین از تکنیک‌های متفاوتی، به صورت مستقل استفاده شده بود. این تحقیق با به‌کارگیری تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) بر روی داده‌های سنتینل-۱، به بررسی تغییرات سطح زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرسطحی می‌پردازد. یافته‌ها بر اهمیت استفاده از فناوری‌های پیشرفته سنجش از دور برای پایش منابع آب تأکید دارند و راهکارهایی مانند بهبود روش‌های آبیاری برای کاهش فرونشست ارائه می‌شود.

در سال‌های اخیر، فناوری‌های سنجش از دور به ویژه تصاویر راداری سنتینل-۱، به عنوان ابزارهای پیشرفته برای پایش و تحلیل تغییرات سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تکنیک تداخل سنجی راداری یکی از موثرترین روش‌ها برای شناسایی و تحلیل فرونشست زمین در مقیاس‌های بزرگ و با دقت بالا است ([Ferretti و همکاران، ۲۰۰۷](#)). این فناوری به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا با استفاده از داده‌های چندزمانی، نواحی در معرض خطر را شناسایی و روندهای فرونشست را به دقت بررسی نماید ([Zhang و همکاران، ۲۰۱۶](#); [Rott & Nagler، ۲۰۰۶](#)).

استفاده از داده‌های راداری سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری، امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تری از تغییرات سطح زمین را فراهم می‌کند. این تکنیک با ارائه نقشه‌های دقیق از جابه‌جایی‌های سطحی، به شناسایی مناطق بحرانی و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش خطرات ناشی از فرونشست کمک می‌کند ([Stramondo و همکاران، ۲۰۰۸](#)). به ویژه در مناطقی که به دلیل برداشت آب‌های زیرزمینی دچار کاهش سطح آب شده‌اند، این فناوری می‌تواند به عنوان یک ابزار کلیدی در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای استفاده شود ([Su و همکاران، ۲۰۲۱](#)). مطالعات انجام شده در مناطق مختلف جهان نشان داده است کاهش سطح آب‌های زیرزمینی به طور مستقیم با افزایش نرخ فرونشست زمین در ارتباط است. به عنوان مثال در بسیاری از مناطق ایران که با کمبود منابع سطحی آب مواجه هستند، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از چاه‌های ژرف منجر به فرونشست‌های قابل توجهی شده است. مطالعات مشابه در مناطق دیگر ایران نشان داده است که ارتباط مستقیمی بین کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست زمین وجود دارد ([امیری و مظاهری، ۱۴۰۲](#)). همچنین در مناطق دیگر جهان نیز، استفاده از تکنیک‌های راداری برای پایش فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی، نتایج موثری در پیش‌بینی و مدیریت این پدیده به همراه داشته است ([Ghorbani و همکاران، ۲۰۲۲](#)).

منطقه سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان، به دلیل شرایط اقلیمی خشک و وابستگی شدید به منابع آب زیرسطحی برای کشاورزی، یکی از مناطق بحرانی در مواجهه با پدیده فرونشست زمین است. برداشت بی‌رویه و گسترش حفر چاه‌های ژرف در سال‌های اخیر، سطح آب‌های زیرسطحی این منطقه را با افت شدید مواجه کرده و خطر فرونشست را

به یک تهدید جدی تبدیل کرده است. در پژوهش‌های پیشین، ارزیابی این پدیده اغلب متکی بر داده‌های نقطه‌ای (مانند ترازسنجی چاه‌های پیزومتری) یا تکنیک‌های سنجش از دوری با محدودیت‌های مکانی و زمانی بوده است. نوآوری اصلی این پژوهش در ادغام و تحلیل هم‌زمان دو دسته داده حیاتی برای درک دقیق‌تر رابطه علّی و مکانی بین برداشت آب و فرونشست است.

پایش پیوسته و گسترده تغییرات سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری پیشرفته (InSAR) بر روی تصاویر با فرکانس بالا و رایگان ماهواره سنتینل-۱ فراهم است. این روش امکان اندازه‌گیری نرخ فرونشست با دقت میلی‌متری را در گستره‌ای وسیع و با جزئیات مکانی مناسب فراهم می‌کند. استفاده هم‌زمان از داده‌های مکانی شده چاهک‌های (پیزومترهای) منطقه که نشان‌دهنده میزان و روند افت سطح آب زیرسطحی هستند. هدف این پژوهش، نه تنها شناسایی الگوهای مکانی و زمانی فرونشست، بلکه ارزیابی کمی و مکانی رابطه بین نرخ افت سطح آب زیرسطحی (مشقت شده از داده‌های چاهک‌ها) و نرخ فرونشست مشتق شده از داده‌های InSAR در منطقه سیستان است. این رویکرد تلفیقی، امکان شناخت دقیق‌تر مناطق بحرانی، برآورد حساسیت زمین به افت آب و در نهایت، ارائه نقشه‌های خطر مبتنی بر شواهد دقیق‌تر را فراهم می‌آورد. نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی علمی و نوین برای تصمیم‌گیران در جهت مدیریت هدفمند برداشت از چاه‌ها، اولویت‌بندی مناطق برای اقدامات حفاظتی و کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست در این منطقه حساس مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

دشت سیستان با مرکزیت شهر زابل در جنوب شرقی ایران و در مرز افغانستان واقع شده است. این منطقه از مشرق و شمال به کشور افغانستان و از جنوب به شهرستان نصرت آباد استان سیستان و بلوچستان و از مغرب به شهرستان نهبندان در استان خراسان جنوبی و کویر لوت محدود است (شکل ۱). در حدود ۱۵۰۰۰ هکتار از زمین‌های این دشت پتانسیل کشاورزی داشته و می‌تواند در چرخه تولید زارعی قرار گیرد. متوسط ارتفاع این دشت ۶۱۲ متر ارتفاع دارد. اقلیم منطقه سیستان براساس طبقه‌بندی کوپن اقلیم صحرایی با آب و هوای خیلی گرم و خشک بیابانی یعنی تابستان‌های طولانی و زمستان‌های ملایم قلمداد می‌شود. متوسط بارندگی سالانه در سیستان ناچیز بوده و بین ۵۰ تا ۷۰ میلی‌متر است که حدود ۷ درصد متوسط بارندگی در جهان است. میزان تبخیر سالانه، آن بسیار زیاد و در حدود ۴۸۰۰ میلی‌متر گزارش شده است. متوسط حداکثر درجه حرارت در این منطقه ۳۴/۵ سانتیگراد و متوسط حداقل درجه حرارت ۸/۵ درجه سانتیگراد می‌باشد.

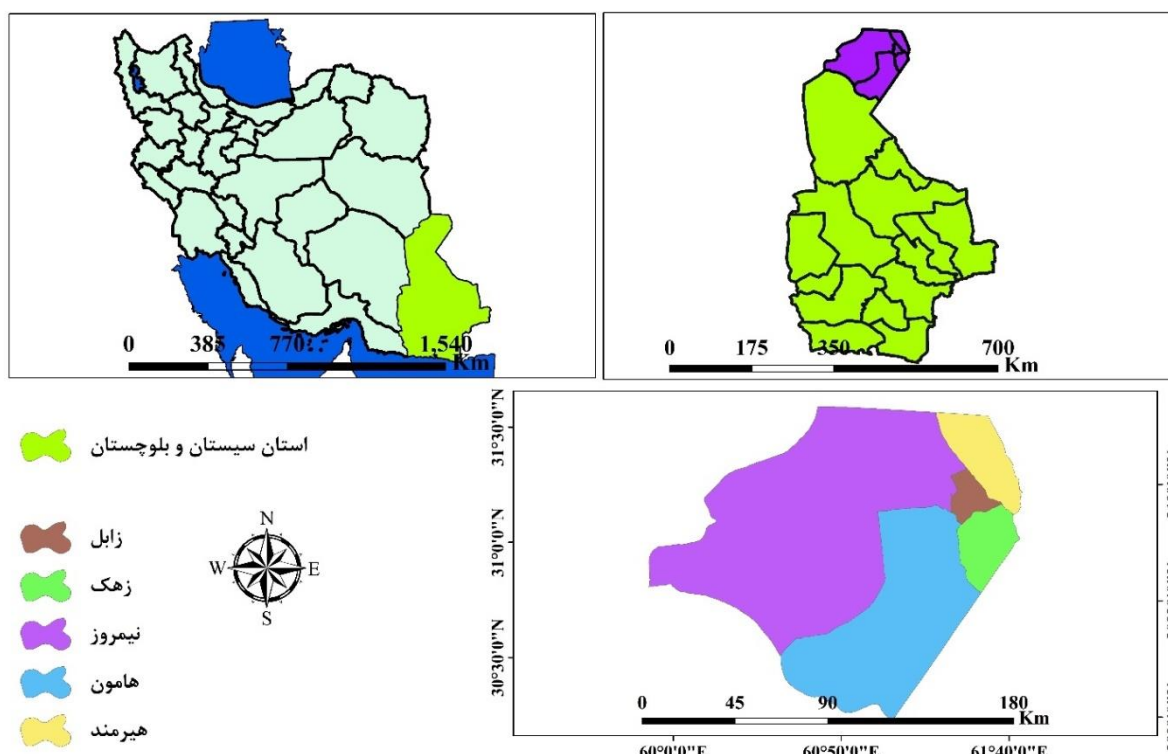
چاه نیمه‌ها یکی از منابع آب منطقه سیستان است که با عمق ۲۰ متر می‌باشد.

کلیات روش تحقیق

پدیده فرونشست زمین به عنوان یکی از پیامدهای اصلی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرسطحی، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌ها، کشاورزی و محیط‌زیست در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند شهرستان زابل به‌شمار می‌رود. این پژوهش به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر از مدل رقومی ۱۲/۵ متری ALOS Polar SAR، تصاویر راداری سنتینل ۱، داده‌های زمینی چاهک‌ها، داده‌های ماهواره‌ای GRACE و تصاویر لندست ۸ به عنوان داده‌های این پژوهش استفاده شده است. مهمترین ابزارهای این پژوهش عبارت از ARCGIS (به منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر)، SNAP (تهیه فرونشست زمین براساس روش سری زمانی InSAR)، SNAP (تهیه نقشه‌های کاربری اراضی) و Google Earth Engine (بررسی تغییرات کلی ذخیره آب) بوده است. این پژوهش به‌طورکلی در چهار مرحله انجام شده است که مرحله اول بررسی کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست ۸ سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ تهیه و تحلیل شد. مرحله دوم بر مبنای اطلاعات به‌دست آمده از چاهک‌های منطقه مورد مطالعه و بررسی میزان افت این چاهک‌ها است. مرحله سوم استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و روش سری زمانی InSAR، میزان فرونشست در طی دوره زمانی نه ساله (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲) محاسبه شد. مرحله چهارم تحلیل داده‌های GRACE در پلتفرم Google Earth Engine (GEE) انجام پذیرفت و میزان و تغییرات آب‌های زیرسطحی ارزیابی شد. در ادامه در شکل شماره (۲)، به تشریح مراحل این پژوهش پرداخته شده است.

مرحله اول (تهیه نقشه کاربری اراضی)

یکی از عوامل اصلی در ایجاد فرونشست، نوع کاربری اراضی منطقه می‌باشد. در این مرحله نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ با استفاده از روش الگوریتم جنگل‌های تصادفی تهیه شد (جدول ۱). مدل جنگل تصادفی برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، دسته‌بندی را با سرعت بالایی انجام می‌دهد. این الگوریتم از جمله دسته‌بندی‌هایی است که روش Bagging را به کار می‌گیرد. این روش ترکیبی از چند درخت تصمیم است که در ساخت آن چندین نمونه بوت استرپ از داده‌ها شرکت دارند در ساخت هر درخت به‌طور تصادفی تعدادی از متغیرهای ورودی شرکت می‌کنند. با استفاده از روش بوتاسترپ تعداد زیادی نمونه n تایی از مجموعه داده‌های مشاهداتی اولیه، نمونه‌برداری می‌شوند. هدف از اجرای بوت استرپ پیدا کردن خطای واریانس برآوردگر با استفاده از تکرار مراحل نمونه‌گیری و برآورد یابی است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعاتی



شکل ۲- فلوچارت مراحل اجرای کار

درصد واریانس داده ها را تبیین می کردند، برای طبقه بندی انتخاب شدند. همچنین، شاخص های گیاهی مانند NDVI و NDWI برای تقویت تمایز بین کلاس های مختلف محاسبه و به مجموعه داده ها اضافه شدند. همچنین ۱۵۰۰ نمونه آموزشی برای ۷ کلاس اصلی جمع آوری شد که شامل ۲۰۰

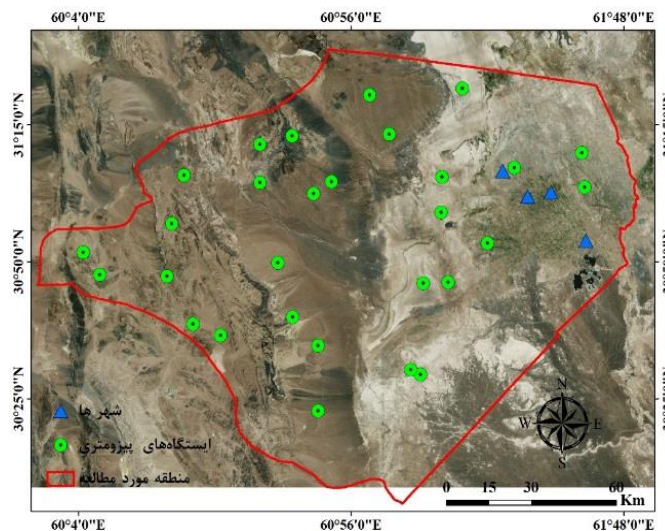
برای افزایش دقت طبقه بندی، تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) روی مجموعه باندهای ماهواره ای اجرا شد. این تکنیک با کاهش ابعاد داده ها و حذف همبستگی بین باندها، کارایی الگوریتم های یادگیری ماشین را به طور چشمگیری بهبود می بخشد. در این مطالعه، سه مؤلفه اول که بیش از ۹۵

نمونه برای هر کلاس به صورت متوازن بود. این نمونه‌ها به صورت تصادفی به دو مجموعه آموزشی (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شدند و در طبقه‌بندی کار استفاده شدند.

جدول ۱- مشخصات تصاویر استفاده شده در کاربری اراضی

نوع ماهواره	سنجنده	سال	ماه
لندست ۸	OLI	۲۰۱۴	۶
لندست ۸	OLI	۲۰۲۴	۵

مرحله دوم (بررسی وضعیت افت منابع آب زیرسطحی)
در این قسمت به منظور بررسی وضعیت افت منابع آب زیرسطحی در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات به دست آمده از چاهک مشاهده‌ای در منطقه استفاده شده است (شکل ۳) و تغییرات صورت گرفته در سطح آب زیرسطحی این چاهک‌ها طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ محاسبه شده است. پس از بررسی و محاسبه وضعیت افت آب منطقه، ارتباط آن با میزان فرونشست، داده‌های ماهواره‌ای بررسی آب‌های زیرسطحی و کاربری اراضی منطقه تحلیل شد.



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های مشاهده‌ای

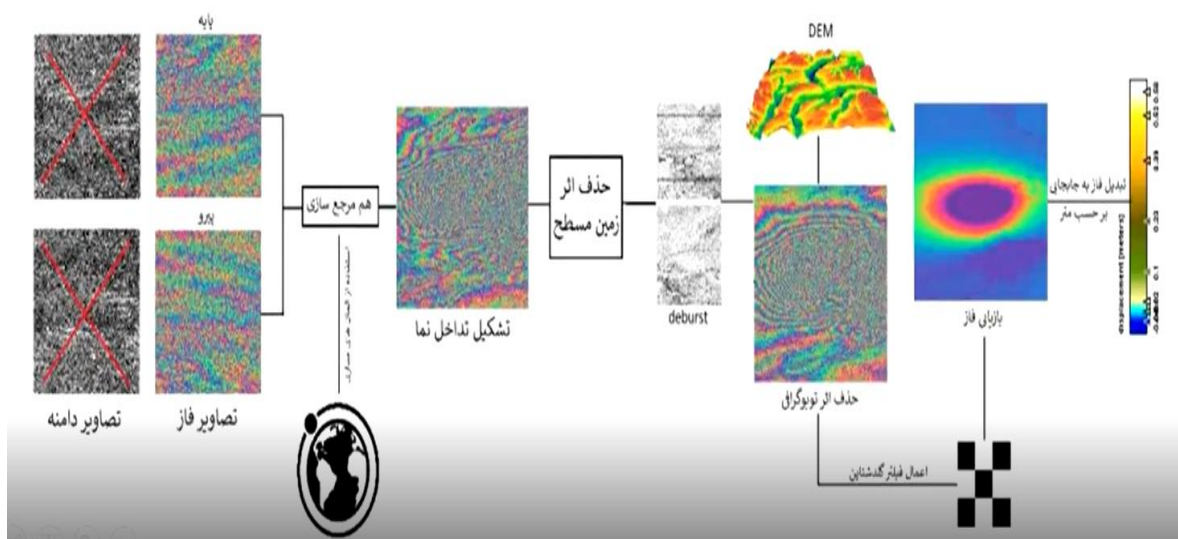
در مجموع ۹ اینترفروگرام مستقل حاصل شد، سپس در نرم‌افزار SNAP باهم موزاییک و در نهایت با ۳ اینترفروگرام به دست آمده، خروجی‌ها در نرم‌افزار ARCGIS و محیط ARC MAP به صورت نقشه ارائه شدند. تحلیل و پردازش داده‌های پس از فراخوانی به نرم‌افزار شامل ۶ مرحله به صورت زیر می‌باشد. گام اول ورود داده‌ها، که به صورت منفردنگر می‌باشد، در این مطالعه داده‌ها به صورت خام می‌باشد. گام دوم ثبت هندسی تصاویر، در این مرحله یک تصویر فرعی نسبت به تصویر مرجع توجیه می‌شود. گام سوم تهیه تداخل نما، تصاویر SLC تصاویر مختلطی هستند که شامل دامنه و فاز می‌باشند. مرحله چهارم حذف اثر توپوگرافی و فیلترگذار برای اینکه سطح زمین به صورت فرونشست نشان داده شود. مرحله پنجم بازیابی فاز پنهان شده تصاویر و مرحله آخر زمین مرجع کردن تصاویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاع می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۴).

مرحله سوم (محاسبه میزان فرونشست منطقه مورد مطالعه)

برای تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده (تصاویر ماهواره SENTINEL-۱) از روش تداخل سنجی راداری و مقایسات زوجی تصاویر در نرم‌افزار SNAP به منظور به تصویر کشیدن محدوده فرونشست و بررسی تغییرات آن کمک گرفته شد. به دلیل گستردگی منطقه مورد مطالعه به لحاظ طولی در هر سال ۳ تصویر SLC باند C و در مجموع ۵۴ تصویر مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲، از مرکز فضایی اروپا با گستره ۱۰۰×۱۰۰ کیلومتر مربع دریافت شد. یعنی برای هر بازه زمانی برای پوشش کل منطقه ۳ تصویر دریافت شد. سپس به منظور محاسبه تداخل سنجی راداری از نرم‌افزار SNAP استفاده شد. این نرم‌افزار برای کار با داده‌های Sentinel طراحی شده است. از پردازش تصاویر با اختلاف زمانی تقریباً یک ساله و کمتر از یک سال در هر دوره برای پوشش طول مسیر ۳ اینترفروگرام و

جدول ۲- تصاویر مورد استفاده این پژوهش

سال	ماه	روز	نوع ماهواره	پلاریزاسیون
۲۰۱۴	۶ و ۱۲	۱۲ و ۱۴	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۱۵	۱ و ۱۲	۱۱ و ۱۵	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۱۶	۱ و ۱۲	۱۲ و ۱۶	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۱۷	۱ و ۱۲	۱۲ و ۱۵	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۱۸	۱ و ۱۲	۱۴ و ۱۷	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۱۹	۱ و ۱۲	۱۱ و ۱۴	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۲۰	۱ و ۱۲	۱۳ و ۱۵	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۲۱	۱ و ۱۲	۱۵ و ۱۷	سنتینل ۱	HH-VH
۲۰۲۲	۱ و ۱۲	۱۲ و ۱۵	سنتینل ۱	HH-VH



شکل ۴- تصویر شماتیکی از مراحل تداخل سنجی به روش InSAR

به گونه ای باشد که نماینده شرایط پایدار و بدون رویدادهای شدید اقلیمی باشد.

$$\Delta S(t) = S(t) - S_{baseline} \quad \text{رابطه (۱)} \quad \text{که در آن}$$

$\Delta S(t)$ آنومالی تغییرات ذخیره آب در زمان t
 $S(t)$ از داده های t مقدار ذخیره آب مشاهده شده در زمان t (GRACE)
 $S_{baseline}$ میانگین بلندمدت ذخیره آب در دوره پایه (معمولاً ۵ تا ۱۰ سال)

محاسبه آنومالی برای هر تصویر

محاسبه آنومالی برای هر تصویر GRACE با مقایسه مقدار مشاهده شده در هر ماه با میانگین بلندمدت دوره پایه انجام می شود. ابتدا یک دوره پایه (معمولاً ۵ تا ۱۰ سال) به عنوان مرجع انتخاب می شود که نماینده شرایط نرمال سیستم است. برای هر پیکسل، میانگین مقادیر ماهانه در این دوره محاسبه شده و به عنوان مقدار پایه در نظر گرفته می شود. سپس آنومالی هر تصویر ماهانه از طریق تفریق مقدار مشاهده شده از میانگین دوره پایه به دست می آید ($\Delta X(t) = X(t) - X_{baseline}$). این روش امکان شناسایی انحرافات از

مرحله چهارم (بررسی افت آب های زیرسطحی با استفاده از داده های GRACE)

داده های GRACE برای دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ به صورت ماهانه، فصلی و سالانه پردازش شدند. این پردازش ها شامل ترکیب داده های GRACE به منظور ایجاد نقشه های تغییرات سطح آب زیرسطحی در منطقه سیستان است. داده های آب های زیرسطحی در محیط گوگل ارث انجین انجام شده است.

محاسبه آنومالی تغییرات آب

دوره پایه یک بازه زمانی مرجع است که برای محاسبه میانگین بلندمدت تغییرات ذخیره آب استفاده می شود. این دوره معمولاً ۵ تا ۱۰ سال (۲۰۱۴-۲۰۲۲) در نظر گرفته می شود تا اثرات نوسانات کوتاه مدت و فصلی کاهش یابد. میانگین بلندمدت برای هر ماه یا سال از این دوره به عنوان مقدار نرمال در نظر گرفته می شود. سپس، آنومالی های ماهانه یا سالانه با تفاضل مقدار مشاهده شده از این میانگین محاسبه می شود. این روش امکان شناسایی انحرافات از شرایط معمول و بررسی روندهای بلندمدت را فراهم می کند. انتخاب دوره پایه باید

شرایط نرمال و بررسی تغییرات زمانی ذخیره آب را فراهم می‌کند. دقت تحلیل به طول دوره پایه و یکنواخت بودن شرایط اقلیمی در این بازه زمانی بستگی دارد.

$$\Delta X(t) = X(t) - \bar{X}_{baseline} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن $\Delta X(t)$ آنومالی، $X(t)$ مقدار مشاهده شده در ماه t ، و $\bar{X}_{baseline}$ میانگین مقادیر ماهانه دوره پایه (معمولاً ۵ تا ۱۰ سال) است.

تجمیع زمانی داده‌ها

محاسبه میانگین فصلی/سالانه از آنومالی‌ها

برای کاهش نوسانات ماهانه و تقویت سیگنال‌های بلندمدت، آنومالی‌های محاسبه‌شده در مقیاس زمانی فصلی یا سالانه تجمیع می‌شوند. این کار از طریق محاسبه میانگین آنومالی‌های ماهانه در بازه‌های سه‌ماهه (فصلی) یا دوازده‌ماهه (سالانه) انجام می‌پذیرد. به‌ویژه در مناطق با تغییرات فصلی شدید، محاسبه میانگین فصلی (مثلاً بهار، تابستان، پاییز و زمستان) به درک بهتر الگوهای تناوبی سیستم کمک می‌کند، درحالی‌که میانگین‌گیری سالانه برای بررسی روندهای بلندمدت مفید است. این تجمیع زمانی نه تنها باعث کاهش حجم داده‌ها می‌شود، بلکه سیگنال‌های اقلیمی را از نویزهای کوتاه‌مدت متمایز می‌سازد. در نهایت، این مقادیر تجمیع شده مبنایی برای تحلیل‌های آماری بعدی، مانند برآورد روندهای خطی یا ارتباط با سایر متغیرهای هیدرواقلیمی، قرار می‌گیرند.

$$\Delta X_{seasonal} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta X_j \quad \text{رابطه (۳)}$$

میانگین فصلی آنومالی ΔS_{season}

آنومالی در گام ΔS_i

شمارنده از ۱ تا i

تعداد گام‌های زمانی در فصل (معمولاً ۳ ماه) k

محاسبه روند تغییرات با برازش رگرسیون خطی زمانی

برای شناسایی و کفی‌سازی روندهای بلندمدت در داده‌های GRACE، از روش رگرسیون خطی زمانی استفاده می‌شود. در این روش، یک خط روند به داده‌های آنومالی زمانی برازش داده می‌شود که شیب آن (α) نشان‌دهنده میزان و جهت تغییرات در واحد زمان (سانتی‌متر در سال) است. معادله رگرسیون به صورت $\Delta X(t) = \alpha t + \beta + \varepsilon$ تعریف می‌شود. میزان معنی‌داری روند نیز معمولاً با استفاده از آزمون‌های آماری مانند من-کندال ارزیابی می‌شود. این تحلیل امکان تشخیص مناطق با کاهش یا افزایش معنادار ذخیره آب زیرسطحی را فراهم کرده و به عنوان شاخصی برای ارزیابی تغییرات هیدرواقلیمی بلندمدت کاربرد دارد.

$$\Delta X(t) = \alpha t + \beta + \varepsilon \quad \text{رابطه (۴)}$$

$\Delta X(t)$ آنومالی ذخیره آب در زمان

α ، شیب روند

β عرض از مبدأ

ε خطای مدل

تحلیل مکانی

محاسبه میانگین مکانی برای مناطق مورد مطالعه (مثل حوضه‌های آبریز)

برای تحلیل تغییرات مکانی ذخیره آب در مناطق خاص مانند حوضه‌های آبریز، از میانگین‌گیری مکانی پیکسل‌های واقع در محدوده مورد نظر استفاده می‌شود. این فرآیند با اعمال عملیات zonal statistics بر روی داده‌های آنومالی GRACE انجام می‌پذیرد که در آن مقادیر تمام پیکسل‌های داخل مرزهای حوضه محاسبه و میانگین آن‌ها به عنوان نماینده تغییرات کل منطقه در نظر گرفته می‌شود. این روش امکان مقایسه سیستماتیک بین حوضه‌های مختلف و نیز بررسی تغییرات زمانی ذخیره آب در سطح حوضه را فراهم می‌کند. دقت نتایج به وضوح مکانی داده‌های GRACE (حدود ۱ درجه) و دقت مرزهای حوضه بستگی دارد. میانگین‌گیری مکانی به ویژه برای مطالعات هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب ضروری است.

$$\bar{\Delta S}_{region} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta S_j \quad \text{رابطه (۵)}$$

میانگین مکانی آنومالی در کل ΔS_{region} منطقه،

مقدار آنومالی در پیکسل یا سلول ΔS_j

شمارنده پیکسل‌ها از ۱ تا j

تعداد کل پیکسل‌های درون منطقه مورد مطالعه N ، و N_j (حوضه آبریز)

محاسبه تغییرات تجمعی

تغییرات تجمعی ذخیره آب با جمع‌پذیری آنومالی‌های ماهانه GRACE از ابتدای دوره مطالعه محاسبه می‌شود که به صورت $CWSC(t) = \sum \Delta X(t)$ برای هر گام زمانی تعریف می‌شود. این شاخص نمایانگر تغییرات خالص ذخیره آب در طول زمان بوده و انحراف تدریجی سیستم از شرایط تعادلی اولیه را نشان می‌دهد. محاسبه $CWSC$ به ویژه در پایش پیامدهای بلندمدت خشکسالی‌ها، تغییرات آب زیرسطحی و ارزیابی اثرات فعالیت‌های انسانی بر منابع آب اهمیت دارد. این روش با یکپارچه‌سازی تغییرات ماهانه، امکان تشخیص بهتر روندهای تجمعی و نقاط عطف در سیستم هیدرولوژیکی را فراهم می‌سازد. دقت محاسبات به قوام داده‌های اولیه و طول دوره مطالعاتی بستگی داشته و معمولاً همراه با تحلیل عدم قطعیت ارائه می‌شود.

$$CWSC(t) = \sum_{t=1}^T \Delta X(t) \quad \text{رابطه (۶)}$$

تغییرات تجمعی ذخیره آب در زمان $CWSC(t)$

عملگر جمع (مجموع) $\sum$

$\Delta X(t)$ آنومالی (ناهنجاری) ذخیره آب در زمان t

اعتبارسنجی و مقایسه

مقایسه با داده‌های بارش مثل CHIRPS یا GPM با محاسبه همبستگی

برای ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌های GRACE و تحلیل روابط هیدرواقليمی، مقایسه آماری با داده‌های بارش ماهواره‌ای مانند CHIRPS یا GPM انجام می‌شود. این فرآیند مبتنی بر محاسبه ضرایب همبستگی (Pearson یا Spearman) بین آنومالی‌های ذخیره آب و مقادیر بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف (ماهانه، فصلی یا سالانه) است. همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان‌دهنده پاسخ هیدرولوژیکی منطقه به نوسانات بارش است، درحالی‌که همبستگی ضعیف یا منفی ممکن است بیانگر تأثیر عوامل دیگری مانند برداشت آب زیرسطحی یا تغییرات کاربری اراضی باشد. این تحلیل به تفکیک فضایی (پیکسل به پیکسل یا حوضه‌ای) و با در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی احتمالی بین بارش و تغییرات ذخیره آب انجام می‌شود. نتایج این مقایسه نه تنها اعتبارسنجی داده‌های GRACE را ممکن می‌سازد، بلکه بینش ارزشمندی درباره مکانیسم‌های حاکم بر چرخه آب منطقه ارائه می‌دهد.

مقایسه با داده‌های مشاهداتی چاه‌های مشاهده‌ای یا مدل‌های

هیدرولوژیکی

برای ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان داده‌های GRACE، مقایسه سیستماتیک با مشاهدات مستقیم از چاه‌های مشاهده‌ای و خروجی مدل‌های هیدرولوژیکی انجام می‌شود. این فرآیند شامل تحلیل همبستگی بین تغییرات ارتفاع سطح آب زیرسطحی (از چاه‌های مشاهده‌ای) یا برآوردهای مدل‌های آب زیرسطحی با آنومالی‌های ذخیره آب GRACE است. نتایج این مقایسه امکان ارزیابی میزان انطباق تغییرات مشاهده شده در داده‌های ماهواره‌ای با واقعیت‌های زمینی را فراهم می‌کند. درعین حال، اختلاف‌های مشاهده شده می‌تواند نشان‌دهنده محدودیت‌های ذاتی هر روش (مانند تفاوت در مقیاس مکانی یا عمق نمونه‌برداری) یا تأثیر عوامل دیگری مانند فشردگی منابع آب باشد. این مرحله از تحلیل به ویژه در مطالعات کمپایی آب و مدیریت منابع آب زیرسطحی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا امکان واسنجی غیرمستقیم داده‌های GRACE و بهبود تفسیر تغییرات مشاهده شده را فراهم می‌سازد.

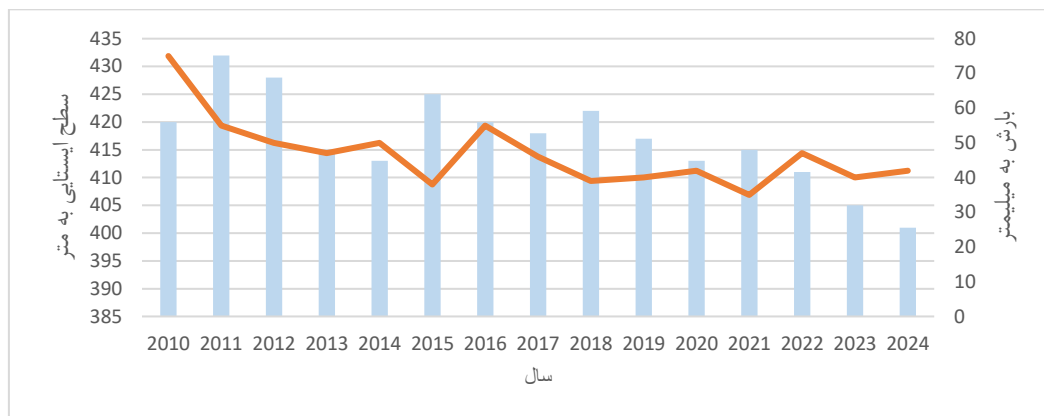
نتایج و بحث

بررسی داده‌های زمینی

با بررسی داده‌های سطح آب ۲۹ چاه پیژومتری و همچنین اطلاعات بارش در ایستگاه‌های هواشناسی زابل، زهک، هیرمند و نیمروز در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴، روند نگران‌کننده‌ای در افت کمی و کیفی منابع آب زیرسطحی منطقه سیستان مشهود است (شکل ۵). سطح آب زیرسطحی از حداکثر ۴۳۵ متر در اوایل دوره مطالعه، به حداقل ۴۰۱ متر

در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است که نشان‌دهنده افت حدود ۳۴ متری طی یک دهه و نیم است. این افت معادل میانگین سالانه حدود ۲/۵ متر کاهش سطح ایستابی است که در نواحی با تراکم بالای چاه‌های کشاورزی شدیدتر نیز می‌باشد. هم‌زمان، داده‌های بارش سالانه در ایستگاه‌های بیان شده نیز روند کاهشی محسوسی را نشان می‌دهند، به‌طوری‌که مقدار بارش از حدود ۷۵ میلی‌متر در سال‌های ابتدایی به ۳۵ میلی‌متر در سال‌های اخیر (مانند سال ۲۰۲۴) رسیده است. این کاهش بیش از ۵۰ درصدی در بارش، به‌وضوح نشان‌دهنده تشدید شرایط خشکسالی در منطقه است.

تجزیه و تحلیل ماهانه این داده‌ها نشان می‌دهد بیشترین نرخ افت سطح آب در ماه‌های گرم سال (اردیبهشت تا شهریور) رخ می‌دهد که هم‌زمان با اوج فصل کشاورزی و نیاز آبیاری است. در این ماه‌ها، حتی در صورت وقوع بارش‌های پراکنده، تغذیه منابع آبی جوابگوی برداشت‌های سنگین نیست. از سوی دیگر، کاهش بارش و افزایش دما منجر به کاهش تغذیه طبیعی سفره و افزایش تبخیر و تعرق شده و تراز آب را با کسری مضاعف مواجه می‌سازد. این افت مداوم و شدید سطح آب زیرسطحی رابطه مستقیم و معناداری با پدیده فرونشست زمین در منطقه دارد. خالی شدن خلل و فرج خاک از آب، سبب افزایش تنش مؤثر بر ذرات خاک و در نهایت فشردگی و تراکم لایه‌های منابع آب می‌شود. داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) این پژوهش نشان داد که بیشترین نرخ فرونشست (تا ۲۰- سانتی‌متر در سال) دقیقاً در مناطقی رخ داده که هم افت سطح آب بیشتر بوده و هم تراکم چاه‌های بهره‌برداری به‌ویژه در اراضی کشاورزی شرق و مرکز دشت سیستان بالا است. این همپوشانی مکانی-زمانی، شاهدی قوی بر نقش عامل افت آب زیرسطحی به عنوان محرک اصلی فرونشست در این منطقه است. بنابراین، تداوم روند کنونی برداشت آب و کاهش بارش، نه تنها بحران کم‌آبی را تشدید می‌کند، بلکه از طریق تشدید پدیده فرونشست، به تهدیدی برای پایداری فیزیکی زمین، سازه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی منطقه تبدیل خواهد شد.



شکل ۵- بررسی تغییرات سطح آب و بارش در منطقه سیستان

پدیده فرونشست تأثیر گذاشته است. داده‌های تداخل‌سنجی راداری این پژوهش نشان می‌دهد بیشترین نرخ فرونشست (با میانگین ۲/۳۳- سانتی‌متر) در اراضی کشاورزی و نیز حاشیه مناطق توسعه یافته مسکونی رخ داده است. کاهش سطح آب زیرسطحی ناشی از برداشت بی‌رویه (که خود حاصل نیاز اراضی کشاورزی و مسکونی است) و هم‌زمان کاهش توان تغذیه طبیعی به دلیل از بین رفتن مراتع، سبب فشردگی لایه‌های خاک و نشست زمین شده است. بنابراین، الگوی تغییر کاربری اراضی مشاهده شده، نه تنها نشانه‌ای از تخریب محیط‌زیست، بلکه یک عامل کلیدی در تشدید بحران فرونشست در منطقه سیستان محسوب می‌شود و لزوم بازنگری در مدیریت یکپارچه زمین و آب را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

ارزیابی عملکرد RF

در این مطالعه، عملکرد مدل جنگل تصادفی (RF) با بهره‌گیری از معیارهای سنجش دقیق و متعددی ارزیابی جامع شد. همان‌طور که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، خروجی‌های مدل از دقت و قابلیت اطمینان بسیار بالایی برخوردار بوده‌اند. ضریب کاپا که معیاری برای سنجش توافق بین پیش‌بینی و واقعیت است، عدد قابل‌توجه ۰/۹۵ برای سال ۲۰۲۴ را ثبت کرده که نشان‌دهنده عملکرد تقریباً عالی و توافق بسیار قوی مدل است. همچنین، خطای مربعات میانگین (RMSE) با مقدار پایین ۰/۱۲ محاسبه شده که بیانگر پراکندگی کم خطاها و دقت بالای مدل در پیش‌بینی مقادیر است. یکی دیگر از شاخص‌های کلیدی، سطح زیر منحنی ویژگی عملیاتی گیرنده (ROC-AUC) است که مقدار ۰/۹۸ به دست آمده و این میزان به‌طور روشن حاکی از قدرت تمایز فوق‌العاده مدل در طبقه‌بندی صحیح مناطق است. مجموعه این ارقام شامل کاپای بالا، RMSE پایین و AUC نزدیک به یک همگی به صورت هم‌سو و هماهنگ، گواه محکمی بر دقت، استحکام و اعتبار بالای خروجی‌های نقشه نهایی طبقه‌بندی هستند. بنابراین، می‌توان با اطمینان از نتایج در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود.

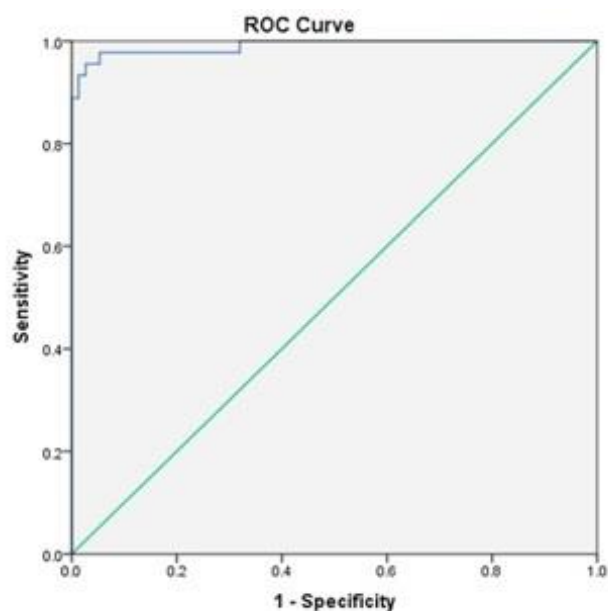
بررسی تغییرات کاربری اراضی (۲۰۱۴ و ۲۰۲۴)

بررسی و تحلیل تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴) در منطقه سیستان، که وسعتی بیشتر از ۱۶۴۸۶ کیلومترمربع دارد، گویای تحولات نگران‌کننده‌ای است که ارتباط مستقیمی با افت آب‌های زیرسطحی و تشدید پدیده فرونشست زمین دارد. نتایج طبقه‌بندی دقیق تصاویر ماهواره‌ای (با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و دقت کاپای ۰/۹۵) نشان می‌دهد که مساحت اراضی بایر از ۷,۶۰۶ کیلومترمربع در سال ۱۳۹۳ به ۸,۹۶۲ کیلومترمربع در سال ۱۴۰۳ افزایش یافته است؛ رشدی معادل ۱۳۵۶ کیلومترمربع (حدود ۱۸ درصد). در مقابل، سطح مراتع از ۶۷۶۳ کیلومترمربع به ۵۳۶۳ کیلومترمربع کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش ۱۴۰۰ کیلومترمربعی (حدود ۲۱ درصد) است. این تغییر چشمگیر بیانگر تخریب پوشش گیاهی طبیعی و کاهش ظرفیت نفوذپذیری و تغذیه سفره‌های آب زیرسطحی است. هم‌زمان، اراضی کشاورزی با وسعت ۱۹۷۵ کیلومترمربع نسبتاً پایدار مانده، اما احتمالاً با افزایش فشار برداشت آب برای حفظ بهره‌وری مواجه بوده است. همچنین، وسعت مناطق مسکونی از ۳۱ به ۱۱۸ کیلومترمربع افزایشی نزدیک به چهار برابری داشته که نشان‌دهنده توسعه فیزیکی شهرها و روستاها و افزایش تقاضا برای آب شرب و خدمات است.

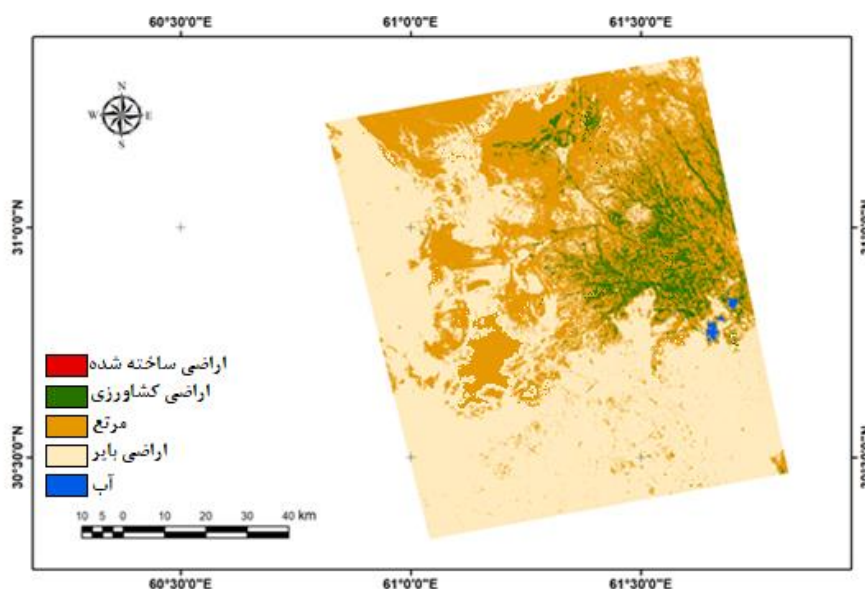
این تغییرات کاربری، پیوند عمیقی با چرخه آب و پایداری زمین در منطقه دارند. تبدیل مرتع به اراضی بایر ظرفیت نگهداشت آب باران را کاهش داده و موجب افزایش رواناب و کاهش تغذیه طبیعی می‌شود. از سوی دیگر، توسعه اراضی مسکونی و فشار مداوم بر اراضی کشاورزی موجود، منجر به برداشت بیشتر از منابع آب زیرسطحی برای تأمین نیازهای شرب و آبیاری شده است. این افزایش برداشت در شرایطی رخ داده که منبع اصلی تغذیه (بارش) روندی کاهشی داشته و پوشش گیاهی حافظ خاک نیز تخریب شده است. در نتیجه، این تغییرات کاربری اراضی به‌صورت زنجیره‌ای و تشدیدکننده، بحران آب زیرسطحی را بیشتر کرده و مستقیماً بر تشدید

جدول ۳- دقت در مدل RF

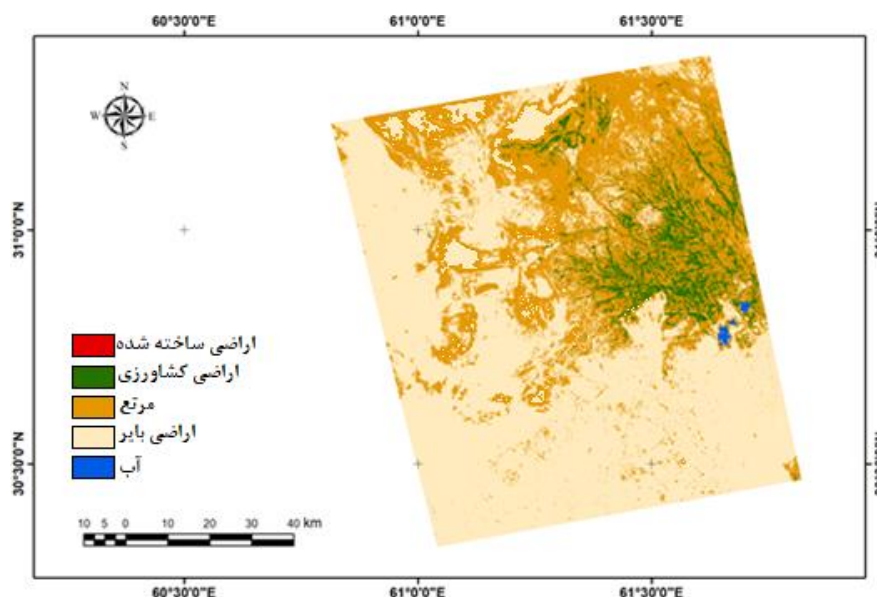
ردیف	عامل ارزیابی	میزان دقت سال ۲۰۱۴	میزان دقت سال ۲۰۲۴
۱	kappa	۰/۹۲	۰/۹۵
۲	MAE	۰/۰۸	۰/۰۶
۳	RMSE	۰/۱۴	۰/۱۲
۴	ROC Area	۰/۹۴	۰/۹۸



شکل ۶- منحنی ROC برای مدل RF



شکل ۷- نقشه پوشش زمین بر اساس تصاویر لندست ۸ برای سال ۲۰۱۴



شکل ۸- نقشه پوشش زمین بر اساس تصاویر لندست ۸ برای سال ۲۰۲۴

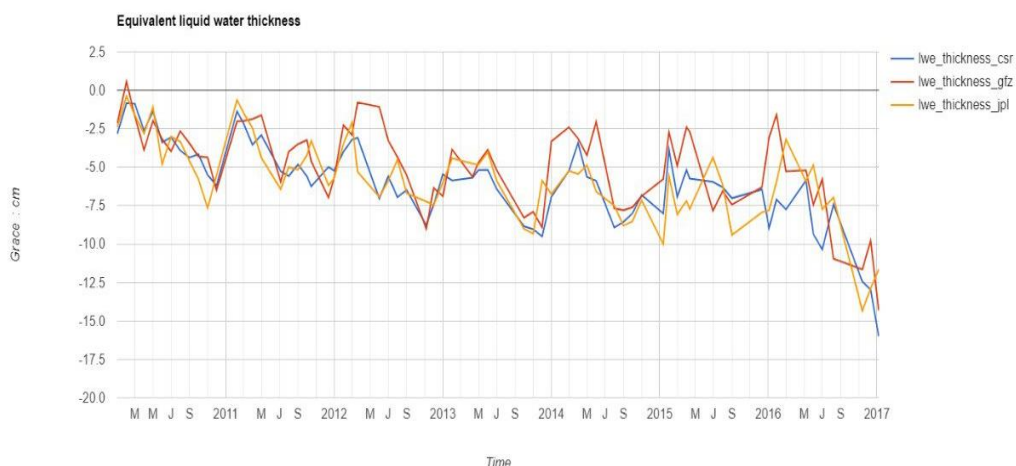
توجهی در سطح آب‌های زیرسطحی منطقه سیستان به میزان میانگین ۱۱/۵۴ سانتی‌متر گزارش کردند. بر اساس سه مدل مختلف شامل مدل CSR، GFZ، و JPL، این افت منابع آب زیرسطحی با نتایج متفاوتی ثبت شده است. مدل CSR بیشترین افت را با ۱۳/۱۸ سانتی‌متر نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده بحران جدی در مدیریت منابع آب منطقه سیستان است. این کاهش شدید به احتمال زیاد ناشی از برداشت بی‌رویه آب برای مصارف کشاورزی بوده است. مدل GFZ نیز افت ۱۲/۱۸ سانتی‌متری را ثبت کرده، که هرچند کمتر از مدل CSR است، اما همچنان تأییدکننده کاهش منابع آب زیرسطحی در منطقه است. مدل JPL با ثبت ۹/۲۵ سانتی‌متر افت، کمترین میزان کاهش را نشان داده، اما این مقدار نیز همچنان نگران‌کننده است و تأثیرات منفی بر زیرساخت‌های منطقه دارد.

تحلیل و بررسی میزان تغییرات آب‌های زیرسطحی با تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه، تأثیر افت آب‌های زیرسطحی بر میزان فرونشست زمین در منطقه سیستان، استان سیستان و بلوچستان، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و تصاویر راداری Sentinel-1 بررسی شد. تحلیل‌های صورت گرفته با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای، و همچنین تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری نشان داد افت منابع آب زیرسطحی به‌طور قابل توجهی با پدیده فرونشست زمین در منطقه سیستان ارتباط دارد.

تحلیل داده‌های زمینی و ماهواره‌ای

شکل (۹) داده‌های ماهواره‌ای GRACE، که تغییرات ضخامت معادل آب را از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهند، افت قابل

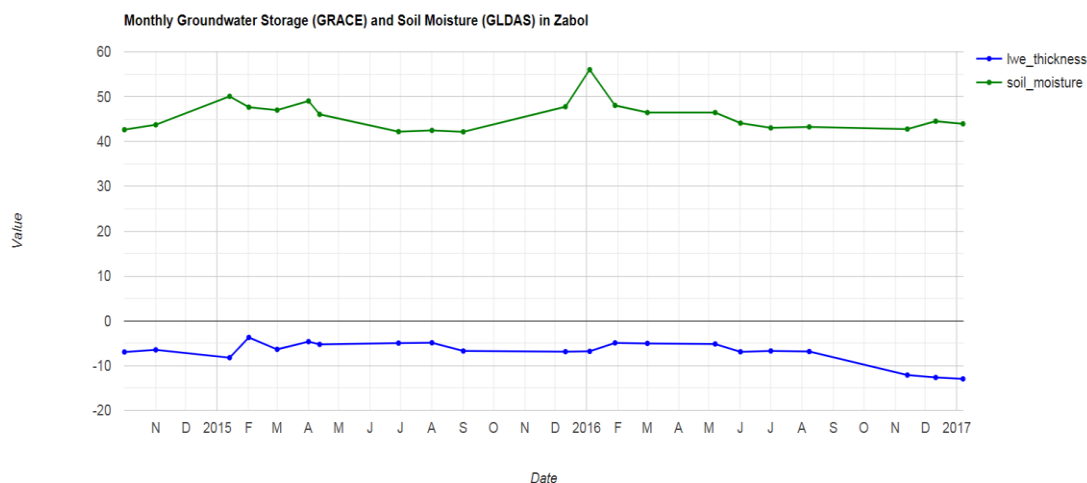


شکل ۹- نمودار افت آب‌های زیرسطحی بر اساس ماهواره GRACE و سه مدل مختلف آن

تحلیل‌های ماهانه، فصلی و سالانه

تحلیل ماهانه: در تحلیل ماهانه در شکل (۱۰) که با استفاده از داده‌های GRACE و Sentinel-1 انجام شد، تغییرات ضخامت معادل آب مایع و میزان فرونشست زمین به‌طور دقیق بررسی شد. نتایج نشان داد در طول دوره مطالعه، میزان افت آب‌های زیرسطحی در هر ماه به‌طور قابل ملاحظه‌ای

نوسان داشته است. به‌طور متوسط، افت ماهانه در حدود ۷/۵- سانتی‌متر ثبت شده است که هم‌زمان با این افت، میزان فرونشست زمین در ماه‌های مختلف متغیر بوده و به‌طور متوسط ۲/۳- سانتی‌متر بوده است. این تغییرات ماهانه به‌ویژه در دوره‌های زمانی که نیاز آبیاری کشاورزی بیشتر است، شدت بیشتری پیدا کرده است.

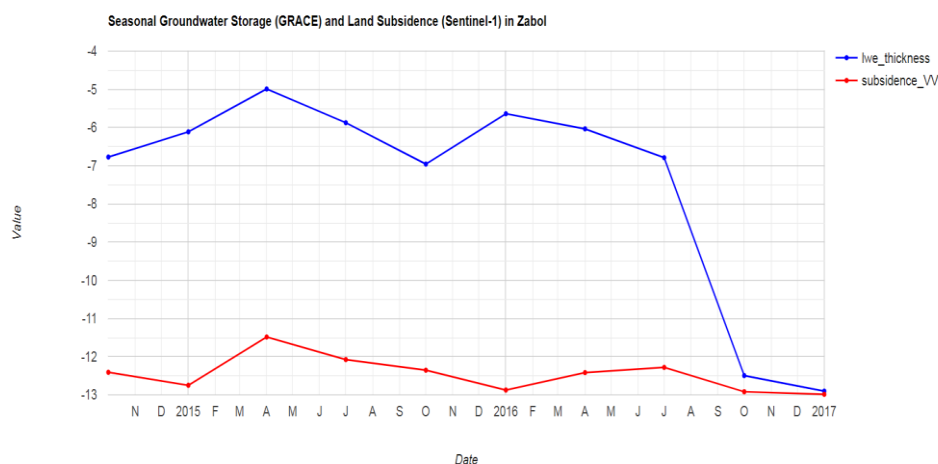


شکل ۱۰- تحلیل ماهانه، روند کلی کاهش ضخامت معادل آب مایع و میزان فرونشست زمین

تحلیل فصلی

در مقیاس فصلی، در شکل (۱۱) نتایج نشان داد که افت آب‌های زیرسطحی و فرونشست زمین در فصل‌های بهار و تابستان بیشتر از فصل‌های پاییز و زمستان بوده است. در بهار، با شروع فعالیت‌های کشاورزی و نیاز به آب برای آبیاری،

میزان افت منابع آب زیرسطحی به‌طور میانگین به ۶/۷- سانتی‌متر رسید، که به دنبال آن فرونشست زمین با مقدار میانگین ۳/۰- سانتی‌متر رخ داد. این امر نشان‌دهنده وابستگی شدید منطقه به منابع آب زیرسطحی و تأثیر مستقیم آن بر فرونشست زمین است.

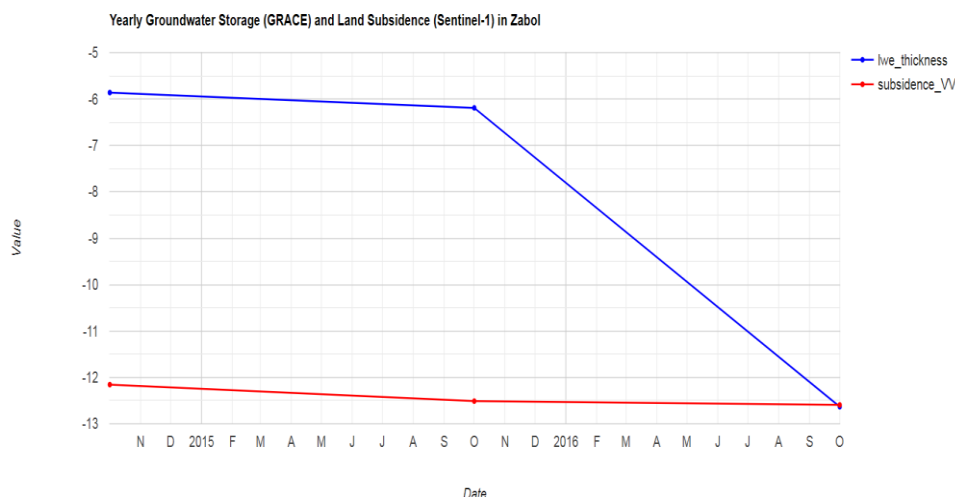


شکل ۱۱- تحلیل فصلی، روند کلی کاهش ضخامت معادل آب مایع و میزان فرونشست زمین

تحلیل سالانه

در تحلیل سالانه، روند کلی کاهش ضخامت معادل آب مایع و میزان فرونشست زمین بررسی شد (شکل ۱۲). داده‌ها نشان دادند در طول سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، افت آب‌های زیرسطحی به‌طور مداوم افزایش یافته و به دنبال آن، میزان فرونشست زمین نیز به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در سال

۲۰۱۵، افت منابع آب زیرسطحی به‌طور متوسط ۶/۵- سانتی‌متر بود، درحالی‌که در سال ۲۰۱۷ این مقدار به ۱۲/۷- سانتی‌متر افزایش یافت. این افزایش در میزان افت، همراه با افزایش فرونشست زمین به‌طور میانگین ۲/۸- سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷، نشان‌دهنده شرایط بد هیدرولوژیکی منطقه است.



شکل ۱۲- تحلیل سالانه، روند کلی کاهش ضخامت معادل آب مایع و میزان فرونشست زمین

۲/۳۱- سانتی‌متر در رتبه بعدی قرار دارند. هرچند دامنه تغییرات در این مناطق کمتر، حدود ۰/۹۶ سانتی‌متر است، اما این ارقام نشان‌دهنده این است که فعالیت‌های انسانی مانند ساخت‌وسازها و توسعه زیرساخت‌ها، هرچند کمتر از کشاورزی، همچنان بر فرونشست زمین تأثیرگذار بوده‌اند.

در مقایسه با سایر کلاس‌های کاربری زمین، مناطق مرتعی و خاکی نیز تحت تأثیر فرونشست قرار داشته‌اند، اما میزان این تغییرات در مقایسه با مناطق کشاورزی و شهری کمتر است. میانگین فرونشست در این نواحی به ترتیب ۱/۵۴- و ۱/۳۵- سانتی‌متر بوده و دامنه تغییرات بیشتری را نشان می‌دهند که می‌تواند به دلیل شرایط طبیعی و استفاده‌های کمتر متمرکز از زمین باشد. در نهایت، مناطق آبی با میانگین فرونشست ۲/۲۶- سانتی‌متر و دامنه تغییرات ۳/۱۰- سانتی‌متر نسبت به سایر کاربری‌ها از پایداری بیشتری برخوردار بوده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت مدیریت دقیق‌تر منابع آب و نظارت مستمر بر فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه است.

به‌طورکلی تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که فعالیت‌های کشاورزی و توسعه شهری به عنوان عوامل اصلی فرونشست زمین در منطقه سیستم شناخته می‌شوند. افزایش شدت فرونشست در سال‌های اخیر، به ویژه در مناطق کشاورزی، نشان‌دهنده این است که برداشت بی‌رویه آب‌های زیرسطحی عامل اصلی این پدیده است. مدیریت بهینه‌تر منابع آب، نظارت دقیق‌تر بر توسعه زیرساخت‌ها و افزایش آگاهی عمومی می‌تواند از تشدید فرونشست زمین در این منطقه جلوگیری کند و پایداری بیشتری برای آینده منطقه به ارمغان آورد. این تحلیل‌ها به وضوح نشان می‌دهند که برای جلوگیری از اثرات منفی بیشتر فرونشست بر محیط‌زیست و زیرساخت‌های منطقه، برنامه‌ریزی‌های آینده باید مبتنی بر داده‌های دقیق زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی باشد.

تحلیل و بررسی تغییرات فرونشست زمین در منطقه سیستان (دربازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲)

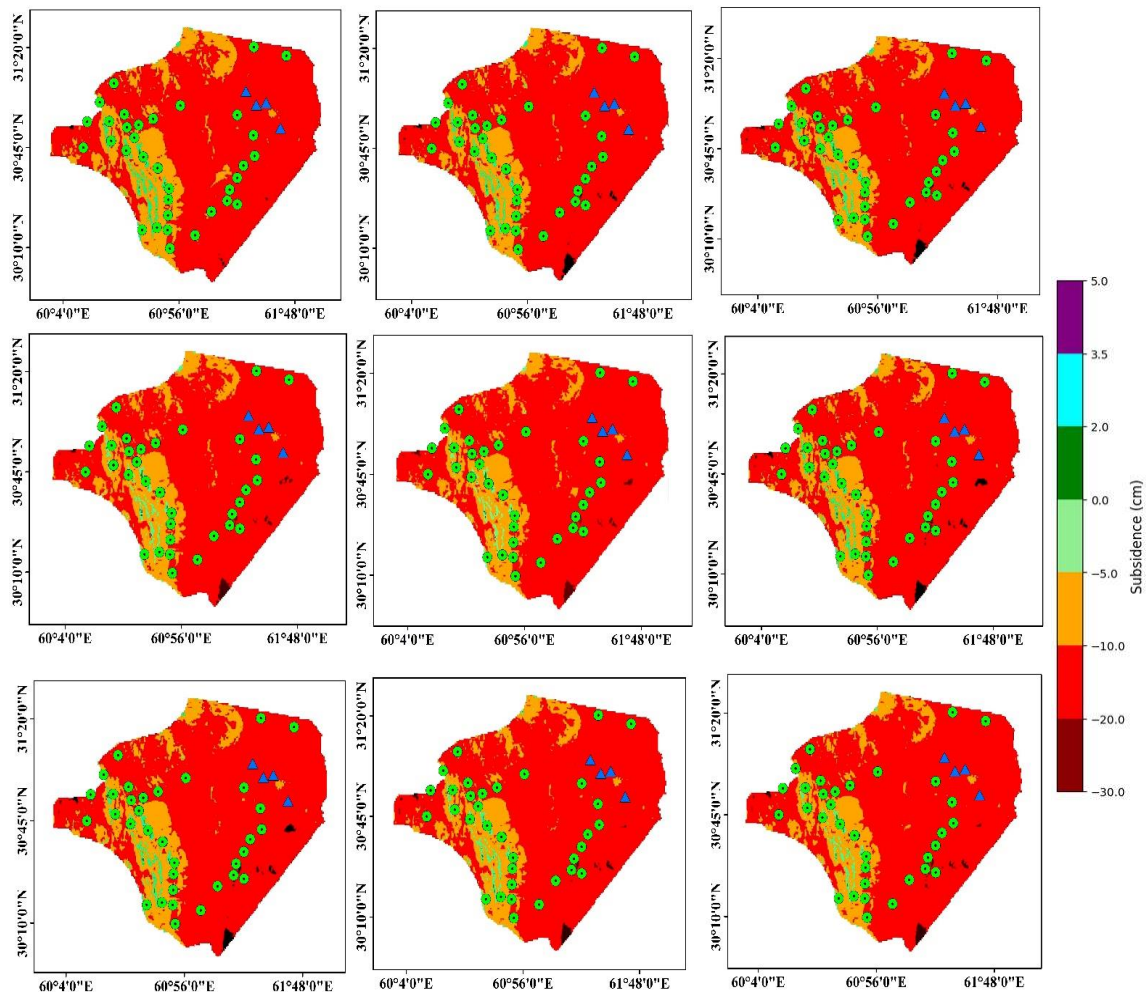
نقشه‌های ارائه شده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری مربوط به منطقه سیستان در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲، نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در سطح زمین این منطقه است (شکل ۱۳). این نقشه‌ها که محدوده‌ای از فرونشست (تا ۳۰- سانتی‌متر) تا بالا آمدگی (تا ۵ سانتی‌متر) را پوشش می‌دهند، بیانگر وقوع پدیده‌های فرونشست و بالا آمدگی زمین در طول این دوره زمانی هستند. بررسی کلی نقشه‌ها نشان می‌دهد که عمده‌ترین تغییرات به صورت فرونشست زمین در نواحی مرکزی و شرقی منطقه سیستان رخ داده است، درحالی‌که برخی نواحی در شمال غربی منطقه بالا آمدگی سطح زمین را تجربه کرده‌اند.

تحلیل دقیق‌تر نقشه‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اولیه (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶)، میزان فرونشست کمتر بوده و مقادیر آن بیشتر در بازه ۱۰- تا ۰ سانتی‌متر قرار داشته است. اما از سال ۲۰۱۷ به بعد، شدت فرونشست به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این سال‌ها، مناطقی که پیش‌تر تحت تأثیر فرونشست قرار داشتند، همچنان فرونشست‌های شدیدتری را تجربه کرده‌اند، به‌طوری‌که در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲، برخی نواحی بیش از ۲۰ سانتی‌متر فرونشست داشته‌اند. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش فشار بر منابع زمین و افزایش بهره‌برداری از منابع زیرسطحی، به ویژه آب، در منطقه است.

بر اساس تحلیل‌های تکمیلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، مشخص شد که بیشترین میزان فرونشست در مناطق کشاورزی رخ داده است. این مناطق که بیشتر در نواحی مرکزی و شرقی منطقه سیستان قرار دارند، به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرسطحی، با میانگین فرونشست ۲/۳۳- سانتی‌متر و دامنه تغییرات ۴/۳۶- سانتی‌متر، بیشترین آسیب را دیده‌اند. مناطق شهری نیز با میانگین فرونشست

نتایج حاصل از تحلیل جابه‌جایی‌های سطح زمین در منطقه سیستان نشان می‌دهد که در این منطقه دو نوع جابه‌جایی سطحی، یعنی بالا آمدگی و فرورفتگی، رخ داده است. این تغییرات به صورت مقادیر مثبت و منفی "بر حسب سانتی‌متر"، اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. جابه‌جایی‌های مثبت که نشان‌دهنده بالا آمدگی سطح زمین هستند، بیشتر در نواحی غربی و شمال غربی منطقه سیستان مشاهده شده‌اند. بیشترین میزان این بالا آمدگی ها ۲۷/۰ سانتی‌متر بوده که در نواحی غربی و شمال غربی ثبت شده است. در مقابل،

جابه‌جایی‌های منفی که بیانگر فرورفتگی سطح زمین هستند، به‌ویژه در نواحی شرقی و شمال شرقی منطقه سیستان دیده می‌شوند. این نواحی که بیشتر شامل مناطق کشاورزی هستند، بیشترین میزان فرورفتگی را با ۴/۱۲ سانتی‌متر تجربه کرده‌اند. این تفاوت در جابه‌جایی‌های سطحی نشان می‌دهد که فرونشست زمین به‌ویژه در نواحی با فعالیت‌های کشاورزی بیشتر به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرسطحی رخ داده است.



شکل ۱۳- نقشه‌های ارائه شده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری مربوط به منطقه سیستان در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲

بررسی عوامل محیطی و ارتباط آن با فرونشست زمین در منطقه سیستان

تحلیل مکانی عوامل محیطی مؤثر بر پدیده فرونشست در منطقه سیستان، با بررسی چهار لایه کلیدی ارتفاع، بارش، زمین‌شناسی و آسیب‌پذیری خاک، نشان می‌دهد که فرونشست تنها تابعی از افت آب زیرسطحی نیست، بلکه در بستر خاص طبیعی منطقه رخ داده و توسط این عوامل تشدید می‌شود (جدول ۴). ناهم‌واری‌های منطقه سیستان از ارتفاع ۴۰۰ متر در نواحی پست شرق و مرکز، تا ۲۰۱۹ متر در

ارتفاعات غربی گسترده است. تحلیل همبستگی نشان می‌دهد فرونشست بیشترین رابطه را با مناطق کم‌ارتفاع (زیر ۵۰۰ متر) دارد. این همبستگی (ضریب همبستگی قابل توجه) به دلیل تجمع رسوبات آبرفتی جوان، سست و ضخیم در دشت‌های پست است. این رسوبات در مقابل فشردگی ناشی از خالی شدن از آب، بسیار حساس‌تر از سازندهای سخت و قدیمی مناطق مرتفع هستند. بنابراین، توپوگرافی پایین نه تنها محل تجمع منابع آب اصلی است، بلکه به دلیل جنس مواد، به کانون اصلی فرونشست تبدیل شده است (شکل ۱۴). پراکنش مکانی بارش در منطقه سیستان ناهمگون است،

به طوری که میزان آن از حدود ۷۰ میلی متر در غرب به کمتر از ۲۰ میلی متر در مرکز و شرق دشت کاهش می یابد. همبستگی نسبتاً خوب بین کاهش بارش و افزایش نرخ فرونشست، به ویژه در بخش های مرکزی و شرقی، نشان می دهد که کمبود بارش به عنوان یک عامل تشدیدکننده عمل می کند. در این مناطق، کاهش تغذیه طبیعی منابع آب به دلیل خشکسالی های ممتد، توأم با برداشت مداوم آب، باعث افت سریع تر سطح ایستابی و در نتیجه، تسریع در نرخ فرونشست شده است. این موضوع یک چرخه معیوب ایجاد کرده است: فرونشست شدیدتر، افت بیشتر آب، برداشت بیشتر و در نهایت خشکی (شکل ۱۵).

زمین شناسی منطقه سیستان با وجود حوضه های رسوبی قدیمی و گسترش رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی، بستر مستعدی برای فرونشست فراهم کرده است. علاوه بر این وجود لایه ها و لتهای نمکی (هالیت) و گچی در زیر سطح، عامل حساسیت زای دیگری محسوب می شود. افت سطح آب زیرسطحی می تواند منجر به حل شدن این رسوبات تبخیری و ایجاد حفره های زیرسطحی (پدیده کارست) شود که در نهایت به صورت فرونشست ناگهانی یا گسیختگی های سطحی ظاهر می شود. بنابراین، زمین شناسی نه تنها زمینه را فراهم کرده، بلکه نوع و مکانیسم فرونشست را نیز تحت تأثیر قرار می دهد (شکل ۱۶). این لایه که ترکیبی از عوامل مختلفی مانند بافت خاک (عمدتاً رسی)، شوری بالا، عمق آب زیرسطحی و نوسانات آن است، قوی ترین همبستگی را با نرخ فرونشست نشان می دهد. خاک های رسی و شور منطقه سیستان، هنگامی که از آب اشباع باشند، مقاومت به نسبی دارند، اما با کاهش سطح آب، منقبض شده و تراکم می یابند. همچنین، شوری بالا می تواند با تشدید فرآیندهای شیمیایی، به تخریب ساختار خاک کمک کند. نواحی با بیشترین آسیب پذیری خاک (با ضریب ۰/۷۰) دقیقاً با کانون های اصلی فرونشست شناسایی شده توسط تصاویر راداری همپوشانی دارند (شکل ۱۷). این چهار عامل به صورت سیستماتیک و تعاملی بحران فرونشست را در سیستان شکل می دهند. زمین شناسی حساس و آسیب پذیری بالای خاک، بستر ذاتی منطقه را مستعد فرونشست کرده اند. توپوگرافی پایین محل تجمع این مواد حساس و همچنین تمرکز بهره برداری از آب را مشخص می کند. در نهایت، کاهش بارش به عنوان یک عامل فشار بیرونی، با محدود کردن تغذیه، سیستم را به سوی آستانه بحران سوق می دهد. برداشت بی رویه آب زیرسطحی

به عنوان عامل محرک اصلی، مانند جرقه ای عمل می کند که این مواد و شرایط مستعد را به حرکت درمی آورد و پدیده فرونشست را با ابعاد و نرخ مشاهده شده پژوهشگر می سازد. بنابراین، مدیریت فرونشست در سیستان نیازمند نگاهی همه جانبه است که علاوه بر کنترل برداشت آب، حفاظت از پوشش گیاهی برای بهبود نفوذ، و برنامه ریزی توسعه بر اساس نقشه های آسیب پذیری زمین شناسی و خاک را نیز در بر می گیرد.

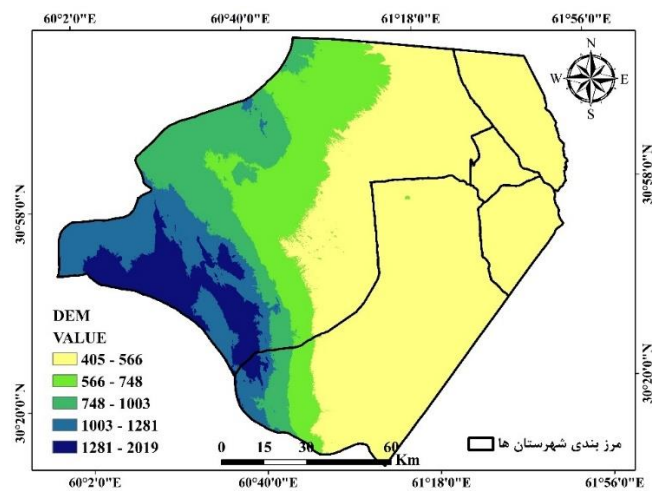
بررسی میزان تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرونشست در منطقه سیستان

برای تحلیل دقیق تر و جامع تر، از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ برای سال های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ استفاده شد (جدول ۵). این تصاویر برای تهیه نقشه های کاربری زمین شامل کلاس های مختلفی مانند آب، خاک، مرتع، کشاورزی و مناطق شهری به کار گرفته شدند. پس از پردازش تصاویر در نرم افزار ENVI و استفاده از تکنیک های طبقه بندی نظارت شده، نقشه های کاربری زمین تهیه و کلاس های مختلف شناسایی شدند. تحلیل این نقشه ها نشان داد بیشترین میزان فرونشست در مناطق کشاورزی با میانگین ۲/۳۳- سانتی متر و دامنه تغییرات ۴/۳۶- سانتی متر رخ داده است. این نتایج تأکید می کنند که فعالیت های کشاورزی نقش عمده ای در تشدید فرونشست زمین در این منطقه داشته اند. مناطق شهری با میانگین فرونشست ۲/۳۱- سانتی متر و دامنه تغییرات ۰/۹۶- سانتی متر نیز در رتبه بعدی قرار دارند. این امر نشان می دهد فعالیت های انسانی مانند ساخت وسازها و توسعه زیرساخت ها، هرچند کمتر از کشاورزی، اما همچنان بر فرونشست زمین تأثیرگذار بوده اند. در مقابل، مناطق مرتعی و خاکی به ترتیب با میانگین های ۱/۵۴- و ۱/۳۵- سانتی متر، نوسانات بیشتری در فرونشست زمین داشته اند. این مناطق نیز تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی، دچار فرونشست شده اند.

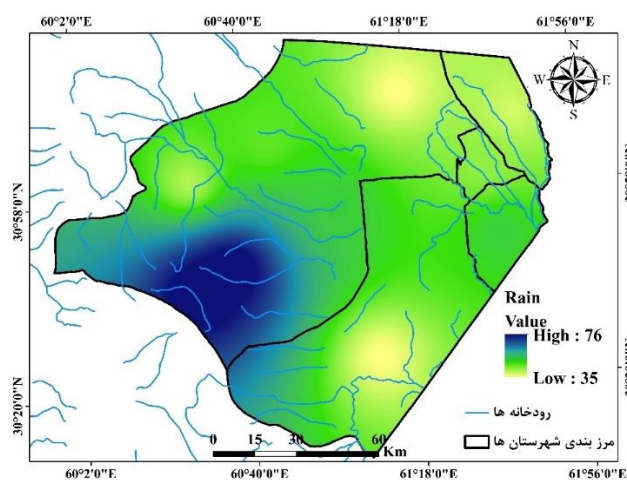
در نهایت، مناطق آبی با میانگین فرونشست ۲/۲۶- سانتی متر و دامنه تغییرات ۳/۱۰- سانتی متر نسبتاً پایدارتر از سایر کاربری ها بوده و تغییرات کمتری در این مناطق مشاهده شده است. این تحلیل ها به وضوح نشان می دهد مدیریت دقیق تر و کارآمدتر منابع آب به ویژه در مناطق کشاورزی ضروری است تا از تشدید فرونشست و پیامدهای منفی آن بر محیط زیست و زیرساخت های منطقه جلوگیری شود.

جدول ۴- همبستگی شاخص های محیطی با میزان فرونشست در منطقه سیستان

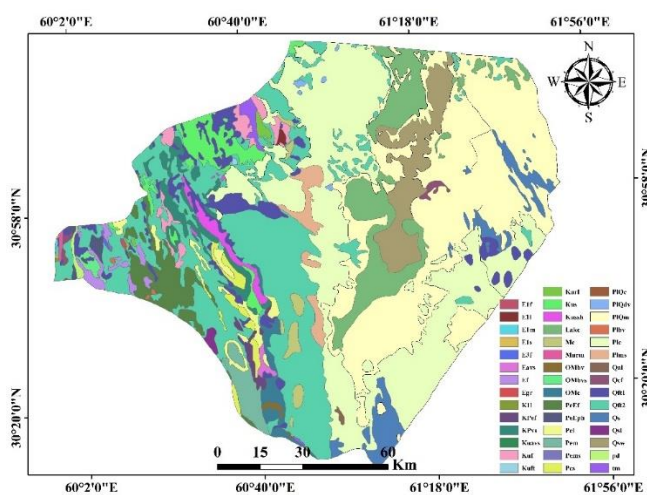
ضریب همبستگی	لایه ها
۰/۶۵	ارتفاع
۰/۵۵	بارش
۰/۶۰	زمین شناسی
۰/۷۰	آسیب پذیری



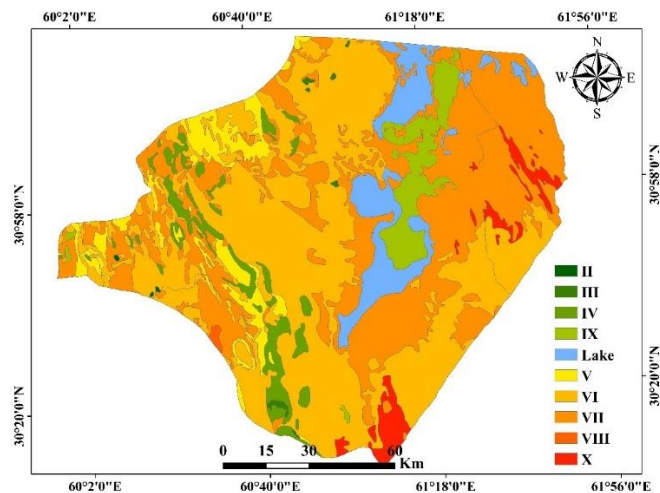
شکل ۱۴- نقشه مدل رقومی ارتفاع



شکل ۱۵- میزان بارش در سطح منطقه



شکل ۱۶- نقشه زمین شناسی منطقه (۱/۵۰۰۰۰)



شکل ۱۷- نقشه میزان آسیب‌پذیری خاک در منطقه سیستان

جدول ۵- نتایج پوشش زمین بر اساس تصاویر لندست ۸

کلاس	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD
آب	-۳/۷۹	-۰/۶۸	۳/۱۰	-۲/۲۶	۰/۱۹
خاک	-۴/۰۸	۰/۲۷	۴/۳۵	-۱/۳۵	۰/۹۹
مرتج	-۴/۱۳	۰/۲۸	۴/۴۰	-۱/۵۴	۱/۱۴
کشاورزی	-۴/۱۰	۰/۲۶	۴/۳۶	-۲/۳۳	۰/۷۱
شهری	-۲/۷۰	-۱/۷۵	۰/۹۶	-۲/۳۱	۰/۰۶

جدول ۶- همبستگی و ارزیابی نتایج InSAR و GRACE با داده‌های زمینی (چاه‌های مشاهده‌ای) در منطقه سیستان (۲۰۱۴-۲۰۲۲)

منبع داده	میانگین تغییرات (سانتی‌متر/سال)	دامنه تغییرات	ضریب همبستگی (r) با داده‌های زمینی	خطای RMSE
InSAR	۲/۳۳- فرونشست	۴/۳۶	۰/۸۲	۰/۴۵
GRACE	۱۱/۵۴- افت آب زیرسطحی	۱۳/۱۸	۰/۷۵	۱/۲۰
چاه‌های مشاهده‌ای	۱۲/۱۰- افت سطح آب	۱۵/۳۰	۱	-

(۳/۱۵ سانتی‌متر) گسترده‌تر از داده‌های GRACE (۱۸/۱۳ سانتی‌متر) است که احتمالاً به دلیل تفاوت در تعداد چاه‌های نمونه‌برداری و تغییرپذیری محلی آنها می‌باشد. همچنین، مناطق کشاورزی که بیشترین میزان فرونشست را در داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهند، با چاه‌های دارای افت شدید سطح آب مطابقت دارند که این موضوع تأثیر مستقیم برداشت آب بر فرونشست زمین را تأیید می‌کند (جدول ۴).

نتیجه‌گیری

مطالعه تأثیر افت آب‌های زیرسطحی بر فرونشست زمین در منطقه سیستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و Sentinel-1 در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ نشان داد که بین کاهش سطح آب‌های زیرسطحی و فرونشست زمین ارتباط مستقیم و معناداری وجود دارد. بر اساس داده‌های GRACE، میانگین افت سالانه آب‌های زیرسطحی از ۶/۵ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۵ به ۱۲/۷ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ افزایش یافته و این

نتایج جدول (۶) نشان داد همبستگی قوی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی وجود دارد، به‌طوری‌که ضریب همبستگی ۰/۸۲ بین داده‌های تداخل‌سنجی راداری و مشاهدات چاه‌های مشاهده‌ای، دقت بالای روش تداخل‌سنجی را در شناسایی فرونشست زمین تأیید می‌کند. همبستگی ۰/۷۵ بین داده‌های GRACE و افت سطح آب‌های زیرسطحی نیز نشان می‌دهد که افت آب‌های زیرسطحی عامل اصلی فرونشست در منطقه سیستان است. مقادیر پایین خطای RMSE (۰/۴۵ سانتی‌متر) برای داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشانگر قابلیت اطمینان بالای این روش است، درحالی‌که تفاوت جزئی بین داده‌های GRACE و مشاهده‌ای (RMSE=1.20 سانتی‌متر) احتمالاً ناشی از تفاوت مقیاس مکانی داده‌های GRACE (۱°×۱°) در مقایسه با داده‌های نقطه‌ای چاه‌ها است. هر سه منبع داده روند کاهشی مشابهی را در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۲۲ نشان می‌دهند، به‌ویژه پس از سال ۲۰۱۷ که داده‌های GRACE کاهش ۱۲/۷ سانتی‌متری سطح آب و داده‌های تداخل‌سنجی راداری فرونشست تا ۲۰ سانتی‌متر در برخی نقاط را ثبت کرده‌اند. دامنه تغییرات در داده‌های زمینی

روند کاهشی تا سال ۲۰۲۲ ادامه داشته است. تحلیل‌های InSAR نیز نشان داد فرونشست زمین از ۱۰- سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۶ به بیش از ۲۰- سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۲ رسیده که بیشترین میزان آن در مناطق مرکزی و شرقی منطقه سیستان، به‌ویژه در اراضی کشاورزی (با میانگین فرونشست ۲/۳۳- سانتی‌متر) مشاهده شد. این پدیده بیشتر ناشی از برداشت بی‌رویه آب برای مصارف کشاورزی است که در فصل‌های گرم سال تشدید می‌شود. نتایج با ضریب همبستگی ۰/۸۲ بین داده‌های InSAR و مشاهدات زمینی از چاه‌های مشاهده‌ای در تمامی سال‌های مورد مطالعه (۲۰۱۴-۲۰۲۲) تأیید شدند. این یافته‌ها هشداردهنده وضعیت بحرانی منابع آب و تشدید فرونشست زمین در طول سال‌های اخیر است که ضرورت مدیریت بهینه آب‌های زیرسطحی برای جلوگیری از خسارات بیشتر به زیرساخت‌ها و محیط‌زیست منطقه را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مشابه در دیگر مناطق ایران نیز همخوانی و تطابق بالایی نشان داده‌دهد. پژوهش‌های حسین‌زاده و همکاران (۱۴۰۱)، عمادالدین و همکاران (۱۴۰۲)، حسینی و همکاران (۱۴۰۲)، شفیعی دارافشانی و شمسی‌اژیه (۱۴۰۳)، گودرزی و همکاران (۱۴۰۴)، Guo و همکاران (۲۰۱۶)، Jeanne و همکاران (۲۰۱۹)، Goorabi و همکاران (۲۰۲۰) و Duc-Huy و همکاران (۲۰۲۲) به وضوح نشان می‌دهند که برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و زیرسطحی، اصلی‌ترین و مؤثرترین عامل در پدیده فرونشست زمین در مناطق مختلف ایران و جهان است. تمامی این مطالعات، با وجود تفاوت در مناطق مورد بررسی (از دشت قاین، فسا، و غرب تهران گرفته تا اصفهان، یزد-اردکان)، بر ارتباط مستقیم بین افت تراز آب‌های زیرزمینی و زیرسطحی و افزایش نرخ فرونشست تأکید دارند.

علاوه بر این، نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که فرونشست یک پدیده چندعاملی است و عوامل زمین‌شناسی و جغرافیایی مانند جنس زمین، نزدیکی به گسل‌ها، مسیل‌ها و حتی قنات‌های قدیمی نیز در الگوی و نرخ فرونشست مؤثر هستند. نکته قابل توجه دیگر، همسویی پژوهش‌ها در استفاده از تکنیک‌های نوین سنجش از دور، به ویژه تداخل‌سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای، به عنوان ابزاری کارآمد و دقیق برای پایش و تخمین میزان فرونشست است.

در نهایت این پژوهش تأکید می‌کند که اختیار کردن تدابیر مناسب، مانند کاهش برداشت آب‌های زیرسطحی، استفاده از روش‌های آبیاری بهینه و افزایش آگاهی عمومی در خصوص خطرات ناشی از افت آب‌های زیرسطحی و فرونشست زمین، ضروری است. تنها با فراهم کردن چنین تدابیری می‌توان از تشدید این پدیده‌های مخرب جلوگیری کرده و زیرساخت‌ها و محیط‌زیست منطقه را برای نسل‌های آینده حفظ کرد. این اقدامات نه تنها برای حفظ پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی منطقه، بلکه برای جلوگیری از بروز بحران‌های اجتماعی و اقتصادی در آینده ضروری است. در نهایت، پژوهش حاضر

نشان داد مدیریت صحیح و برنامه‌ریزی دقیق بر اساس داده‌های علمی و معتبر می‌تواند به عنوان راهکاری کارآمد برای جلوگیری از بحران‌های ناشی از فرونشست زمین و افت آب‌های زیرسطحی در منطقه سیستان و سایر مناطق مشابه عمل کند.

منابع

امیری، سیامک، و مظاهری، مهدی. (۱۴۰۲). چالش‌های ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در کشور، بررسی شرایط فعلی و بحران فرونشست زمین. (e18884). ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۱(۲)، [20.1001.1.29809525.1402.1402.1.15.9](https://doi.org/10.1001.1.29809525.1402.1402.1.15.9)

حسین‌زاده، سیدرضا، اکبری، ابراهیم، جوانشیری، مهدی، و محمدپورسنگانی، زینت. (۱۴۰۱). تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴)، ۹۹-۱۲۶. [10.22067/geoeh.2022.75138.1169](https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169)

حسینی، سید حمیدرضا، موسوی جهرمی، سیدحبیب، و محمدولی سامانی، حسین. (۱۴۰۲). شبیه‌سازی و تحلیل پدیده فرونشست زمین با استفاده از نظریه پوروالاستیسیته (مطالعه موردی: دشت تهران-شهریار). مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۲)، ۱-۲۰. [doi: 10.22093/wwj.2022.321484.3215](https://doi.org/10.22093/wwj.2022.321484.3215)

حسینی، سیدحمیدرضا، موسوی جهرمی، سیدحبیب، و محمد ولی سامانی، حسین. (۱۴۰۲). بررسی عوامل مؤثر در پدیده فرونشست زمین در گستره غرب استان تهران. فصلنامه علمی مهندسی منابع آب، ۱۶(۵۸)، ۶۹-۸۴. [doi:10.30495/wej.2023.29602.2348](https://doi.org/10.30495/wej.2023.29602.2348)

شفیعی دارافشانی، علی، و شمسی‌اژیه، علی. (۱۴۰۳). بررسی میزان آسیب‌پذیری و تاب‌آوری شهر اصفهان در برابر پدیده فرونشست زمین. منظر، ۱۶(۶۹)، ۲۴-۳۷. [doi:10.22034/manzar.2024.457486.2285](https://doi.org/10.22034/manzar.2024.457486.2285)

عمادالدین، سمیه، محمد قاسمی، مسعود، و قریشی، دانیال. (۱۴۰۲). بررسی فرونشست زمین به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت فسا. مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۷(۴)، ۷۷۸-۷۶۷. [doi:10.22034/jget.2024.148385](https://doi.org/10.22034/jget.2024.148385)

گودرزی، محمدرضا، صباغ‌زاده، مریم، و رجب‌پور، نیکنام امیررضا. (۱۴۰۴). رابطه بین فرونشست زمین و مصرف آب در دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۵ (۷۶)، ۱۶۱-۱۴۴. [doi:10.61186/jgs.25.76.13](https://doi.org/10.61186/jgs.25.76.13)

محمدخان، شیرین، گنجائیان، حمید، گروسی، لیلا، و زنگنه تبار، زهرا. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱؛

- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., & Wang, S. J. (2004). Review on current Status and challenging issues of and subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1), 65-77.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.006>
- Jeanne, P., Faar, T. G., Rutqvist, J., & Vasco, D. W. (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the Jouquin Valley, California, *Journal of Hydrology*, 569, 462-469.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>
- Jiang, H., Zhang, J., Liu, Y., Li, J., & Fang, Z. N. (2023). Does flooding get worse with subsiding land? Investigating the impacts of land subsidence on flood inundation from Hurricane Harvey. *Science of The Total Environment*, 865, 161072.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161072>
- 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 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China. *Remote Sensing Environment*, 232.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111282>
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikoudel, M.R., & Ghassemi, M.R. (2013). Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran, *JGeope* 3(2), 49-62.
https://journal.ut.ac.ir/article_36014.html
- Rott, H., & Nagler, T. (2006). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4), 710-719.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>
- Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, R., Marra, F.U., Wegmuller, R.F., Cinti, M., Moro, M., & Saroli, M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160-3172.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.008>
- Su, G., Wu, Y., Zhan, W., Zheng, Zh., Chang, L., & Wang, J. (2021). Spatiotemporal evolution characteristics of land subsidence caused by groundwater depletion in the North China plain during the past six decades, *Journal of Hydrology*, 600, 126678.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126678>
- Tran, D. H., Wang, S. J., & Nguyen, Q. C. (2022). Uncertainty of heterogeneous hydrogeological models in groundwater flow and land subsidence simulations—a case study in Huwei Town, Taiwan. *Engineering Geology*, 298, 106543.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106543>
- Zhang, L. (2019). Big Data, Knowledge Mapping for Sustainable Development: A Water Quality Index Case Study. *Emerging Science Journal*, 3(4), 1-12.
<https://doi.org/10.28991/esj-2019-01187>
- Zhang, Y., Wu, H. A., Kang, Y., & Zhu, C. (2016). Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1992 to 2014 revealed by multiple sar stacks. *Remote Sensing*, 8(8), 675.
<https://doi.org/10.3390/rs8080675>
- محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۸ (۱۱۲)، ۲۱۹-۲۲۹. [doi: 10.22131/sepehr.2020.38617](https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617)
- Chen, M., Tomás, R., Li, Zh., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., & Gong, X. (2016). Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, *Remote Sens*, 8(6), 320-348.
<https://doi.org/10.3390/rs8060468>
- Du, Z., Ge, L., Ng, A., Zhu, Q., Yang, X., & Li, L. (2018). Correlating the subsidence pattern and land use in Bandung, Indonesia with both Sentinel -1/2 and ALOS -2 satellite images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 54 -68.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.001>
- Duc-Huy, T., Shih-Jung, W., & Quoc Cuong, N. (2022). Uncertainty of heterogeneous hydrogeological models in groundwater flow and land subsidence simulations – A case study in Huwei Town, Taiwan, *Engineering Geology*, 298, 34-56.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106543>
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., & Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142-1153. DOI: [10.1109/TGRS.2007.894440](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.894440)
- Ghorbani, Z., Khosravi, A., Maghsoudi, Y., Fazel Mojtahedi, F., Javadnia, E., & Nazari, A. (2022). Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran, *Sci Rep*, 17;12(1), 73-98. DOI: [10.1038/s41598-022-17438-y](https://doi.org/10.1038/s41598-022-17438-y)
- Goli, A., Moradi, M., & Dehghani, M. (2019). Land Subsidence Vulnerability Assessment of Rural Settlements in Fars Province, *Journal of Research and Rural Planning*, 8(4), 91-106.
[0.22067/jrrp.v8i4.78463](https://doi.org/10.22067/jrrp.v8i4.78463)
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, 181, 104238.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238>
- Gumilar, I., Abidin, H.Z., Hutasoit, L.M., Hakim, D.M., Sidiq, T.P., & Andreas, H. (2015). Subsidence in Bandung Basin and its Possible Caused Factors, *Procedia Earth and Planetary Science*, 12, 47-62.
<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.03.026>
- Guo, H., Wang, L., Cheng, G., & Zhang, Z. (2015). Groundwater- abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain, *Proc. IAHS*, 372, 17–21, <https://doi.org/10.5194/piahs-372-17-2015>.
- Guo, J., Zhou, L., Yao, Ch., & Hu, J. (2016). Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing, *Sensors*, 19(19), 1-18. <https://doi.org/10.3390/s16091495>