

Original Research Article

Detecting Land Subsidence in the Esfarayen Plain Aquifer Using Radar Remote Sensing

Behnam Besharatifard¹, Ehsan Behnamtalab², Mahdi Zarei^{3*}, Rahman Zandi⁴

¹PhD student, Department of Civil Engineering, Water Resources Engineering and Management, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran, Iran

²Assistant professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

³Associate professor, Research Center of Social Studies & Geographical Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

⁴Associate professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran.



10.22034/GRD.2025.23193.1660

Received:

June 01, 2025

Accepted:

August 03, 2025

Keywords:

Land subsidence,
Groundwater resources,
Esfarayen plain, Remote
sensing, Groundwater
management

Abstract

Land subsidence is a destructive phenomenon mainly caused by excessive groundwater extraction, leading to significant damage and losses. This phenomenon is prevalent worldwide, especially in arid regions of Iran, such as the Esfarayen plain which experiences a high subsidence rate. The present study analyzed the subsidence in the Esfarayen plain aquifer using 55 Sentinel-1A images from 2015 to 2022, using radar interferometry. The study also investigated groundwater level variations using the statistical data from piezometric wells. The results of radar interferometry showed that the central and northern parts of the Esfarayen aquifer experience the highest subsidence rates. The maximum subsidence rate (12.6 cm/year) occurred in an area of 80 square kilometers located in the central part of the aquifer, which includes the highest density of exploitation wells and the largest extent of agricultural land in the region. The average subsidence during the statistical period studied in the Esfarayen plain aquifer is 28 mm/year. On the other hand, the hydrograph of the Esfarayen aquifer indicates a decreasing trend in groundwater levels, showing an average drop of about 36 cm per year. In general, it can be concluded that excessive extraction from groundwater resources and the decline in the groundwater level of the Esfarayen plain aquifer may be one of the possible causes of land subsidence in the region.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



* Corresponding Author: Mahdi Zarei

Address: Research Center of Social Studies & Geographical Sciences, Hakim Sabzevari University

Email: m.zarei@hsu.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction

Land subsidence is a significant and often devastating geological phenomenon that can lead to severe consequences for both human societies and infrastructural stability. It refers to the gradual sinking or settling of the Earth's surface, which, if left unchecked, can cause irreparable financial losses, damage to critical infrastructure, and threats to human safety. The driving forces behind land subsidence are typically related to human activities, especially the excessive extraction of natural resources. Among these, the over-withdrawal from groundwater aquifers is one of the most prevalent and damaging causes. This phenomenon occurs worldwide, with water-scarce countries like Iran increasingly facing land subsidence issues. In Iran, the problem has become particularly pronounced in the eastern and central regions, where groundwater resources are heavily exploited to meet the demands of agriculture, industry, and urbanization. One such affected area is the Esfarayen plain, which suffers from rapid land subsidence rates. The Esfarayen plain, being one of these vulnerable zones, has drawn particular attention from researchers and policymakers due to its high rate of land sinking. This research aims to provide a detailed assessment of land subsidence in the Esfarayen aquifer, using advanced remote sensing technology, specifically radar interferometry, to evaluate its extent.

2. Research Methodology

The methodology employed in this study combines remote sensing techniques with hydrogeological data analysis. The primary data source consists of 55 Sentinel-1A satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) images, captured over seven years from 2015 to 2022. These images serve as the foundation for the land deformation analysis, providing high-resolution data capable of detecting even minor changes in ground elevation. The processing of these images was carried out using specialized software tools, primarily the Sentinel Application Platform (SNAP) and ArcGIS. The raw SAR data underwent a series of pre-processing steps, including calibration, and filtering, to prepare them for interferometric analysis. The key technique used is radar interferometry, also known as InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). This method involves comparing complex phase differences between pairs of SAR images to detect surface displacement with centimeter or even millimeter accuracy. The application of InSAR allowed us to estimate the amount and spatial distribution of land subsidence over the study period, resulting in a detailed and comprehensive map of subsidence zoning within the Esfarayen aquifer. To examine the relationship between groundwater extraction and land subsidence, the study also incorporated hydrogeological data. The changes in water table levels were monitored using the records from the existing piezometric wells and data on groundwater extraction. A groundwater level contour map was also constructed using ArcGIS, facilitating the visualization of water level declines and their correlation with the observed land subsidence patterns.

3. Results and discussion

The analysis of the InSAR data indicated that the central and northern parts of the aquifer are most affected, with the maximum subsidence rate reaching 12.6 centimeters annually within an 80-square-kilometer zone characterized by dense well exploitation and extensive agricultural activities located in the central part. The overall average subsidence rate in the area was found to be around 28 millimeters per year over the study period. These measurements suggest that the subsidence in these zones is continuous and relatively rapid, primarily driven by ongoing groundwater extraction. Furthermore, the hydrogeological data underscored a concerning trend; the water table in the aquifer has been steadily declining, with an average annual decrease of about 36 centimeters over the seven years. This decline is a clear indicator of overexploitation of groundwater resources, placing additional stress on the stability of the aquifer. A crucial finding from the correlation analysis suggests

that, for every meter of reduction in the groundwater level, the land surface subsides by around 8 centimeters. This relationship emphasizes the direct impact of groundwater withdrawal on land stability and underscores the importance of sustainable water management. The spatial analysis also highlighted that areas with the highest density of groundwater extraction wells coincide with the regions experiencing the most significant land subsidence. The distribution of these wells, often concentrated in agricultural zones, exacerbates the problem by extracting large volumes of water, reducing pore pressure within the soil, and causing it to compact. This compaction leads to permanent ground settlement, which, in turn, can damage infrastructure such as roads, pipelines, and buildings, and increase the risk of flooding and other land-related hazards. The findings of this research align with global observations that excessive groundwater pumping leads to land subsidence, a process that can become irreversible if not addressed promptly.

4. Conclusion

The comprehensive analysis conducted in this study confirms a strong link between groundwater extraction and land subsidence in the Esfarayen plain. The combination of remote sensing data and hydrogeological investigations revealed that the most significant land sinking occurs in zones with a high number of wells and a fast-declining groundwater level. The results show that land subsidence is an ongoing process with potentially severe consequences for infrastructure, agriculture, and, most importantly, the sustainability of groundwater resources. Given the multifaceted nature of land subsidence, which is influenced by various natural and anthropogenic factors, it is recommended that future research expand to include other potential causes such as mining activities and land-use changes. Moreover, establishing a sustainable groundwater management framework and taking measures to reduce excessive withdrawals are urgent tasks to mitigate future land subsidence. Proactive monitoring and enforcement of water use regulations, combined with efforts to improve water use efficiency, could significantly slow down or halt further subsidence and help secure the long-term vitality of the Esfarayen aquifer.



مقاله پژوهشی

آشکارسازی فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته سنجش‌ازدور راداری

بهنام بشارتی فرد^۱، احسان بهنام طلب^۲، مهدی زارعی^{۳*}، رحمان زندی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۳ دانشیار مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۴ دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

doi 10.22034/GRD.2025.23193.1660

چکیده

فرونشست زمین پدیده‌ای مخرب است که عمدتاً در اثر استخراج بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌شود و منجر به خسارات و تلفات قابل‌توجهی می‌شود. این پدیده در سراسر جهان، به‌ویژه در مناطق کم آب ایران مانند دشت اسفراین که نرخ فرونشست بالایی را تجربه می‌کند، شایع است. تحقیق حاضر با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، فرونشست در آبخوان دشت اسفراین را با استفاده از ۵۵ تصویر Sentinel-1A از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۰ تجزیه و تحلیل کرد. در این مطالعه همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های آماری چاه‌های پیژومتری موردبررسی قرار گرفت. نتایج تداخل‌سنجی راداری نشان داد که بخش‌های مرکزی و شمالی آبخوان اسفراین بیشترین نرخ فرونشست را تجربه می‌کنند. به‌طوری‌که حداکثر نرخ فرونشست (۱۲/۶ سانتی‌متر در سال) در منطقه‌ای به وسعت ۸۰ کیلومترمربع واقع در بخش مرکزی آبخوان رخ داده که بیشترین تراکم چاه‌های بهره‌برداری و بیشترین وسعت اراضی کشاورزی منطقه را شامل می‌شود. همچنین میانگین فرونشست طی دوره آماری مورد مطالعه در آبخوان دشت اسفراین ۲۸ میلی‌متر در سال است. از طرفی بررسی هیدروگراف آبخوان اسفراین حاکی از روند کاهشی سطح آب زیرزمینی بوده و به‌طور متوسط حدود ۳۶ سانتی‌متر افت سطح آب زیرزمینی در سال را نشان می‌دهد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اسفراین می‌تواند یکی از دلایل احتمالی فرونشست زمین در منطقه باشد.

تاریخ دریافت:

۱۱ خرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۲ مرداد ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

فرونشست زمین،
تداخل سنجی راداری،
آب‌های زیرزمینی،
آبخوان اسفراین،
چاه پیژومتری

۱ مقدمه

طی دهه‌های اخیر پدیده فرونشست زمین مشکلات فراوانی برای مناطق مسکونی، جاده‌ها، کانال‌های آبرسانی و اراضی کشاورزی در بسیاری از مناطق ایران ایجاد کرده است. خطرات و اثرات این پدیده همچون سیل و زلزله به‌وضوح قابل‌مشاهده نیست، اما می‌توان به‌جرت خطرات آن را بیشتر و حساس‌تر دانست (ملکی و همکاران، ۱۴۰۲).

* نویسنده مسئول: مهدی زارعی

Email: m.zarei@hsu.ac.ir

آدرس: مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری.

اگرچه میزان فرورنشست زمین معمولاً با نرخ چند سانتی‌متر در سال رخ می‌دهد، اما مخاطرات ناشی از آن از جمله آسیب به زیرساخت‌ها و تخریب خاک، امروزه موردتوجه ویژه کارشناسان قرارگرفته است (هولزر و همکاران، ۲۰۰۵؛ رنجر و همکاران، ۲۰۲۱). بنا به تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا، پدیده فرورنشست زمین عبارت است از فروریزش یا نشست تدریجی و رو به پایین سطح زمین که می‌تواند تحت تأثیر عوامل طبیعی و عوامل غیرطبیعی ایجاد شود (هوا^۱ و همکاران، ۲۰۰۹). طبق تعریف یونسکو فروریزش و نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ و به دو شکل تدریجی و ناگهانی رخ دهد را فرورنشست گویند. (پولند^۲، ۱۹۸۴). این پدیده تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی (عوامل انسانی) مانند ساختمان‌سازی، تونل‌سازی، معدن‌کاوی (مهرابی^۳ و همکاران، ۲۰۲۳)، استخراج آب‌های زیرزمینی، نفت، گاز انحلال املاح و فعالیت‌های طبیعی (عوامل طبیعی) همچون حرکت گسل‌ها و فعالیت آتشفشان‌ها به وجود می‌آید (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۱). در این بین، برداشت بی‌رویه‌ی آب از سفره‌های آب زیرزمینی از دلایل اصلی فرورنشست در سراسر جهان است (خامه‌چیان^۴، ۱۹۹۵) به طوری که می‌توان گفت، کاهش سطح آب زیرزمینی و برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین عوامل فرورنشست زمین می‌باشند (هانت^۵، ۲۰۰۷). تغییرات جمعیت شهرها و روستاها، افزایش زمین‌های کشاورزی و گسترش محیط‌های صنعتی و کارخانه‌ها و نیز خشک‌سالی‌های مداوم در اغلب مناطق گرم و خشک به‌ویژه در منطقه خاورمیانه باعث تشدید بحران کمبود آب مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون کشور ایران شده است. آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از مناطق ایران است، از طرفی روش‌های قدیمی و نامناسب کشاورزی منجر به افزایش نیاز به منابع آبی شده که خود منجر به بهره‌برداری بیش‌ازحد مجاز از منابع آب زیرزمینی می‌گردد؛ بنابراین افت سطح آب زیرزمینی باعث کاهش فشار منغذی و ایجاد تنش اضافه در لایه‌های زمین می‌شود، این افزایش فشار و تنش باعث فشردگی و در نتیجه فرورنشست زمین می‌شود (فرانچسکو^۶، ۲۰۱۳؛ محمدی و همکاران، ۱۴۰۰).

در گذشته مطالعات فرورنشست زمین محدود به مشاهدات میدانی و مدل‌سازی می‌شد، اما خصوصیات تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های دورسنجی منجر به توجه ویژه متخصصین به استفاده از این ابزارها برای اندازه‌گیری فرورنشست زمین شده است (خرمی^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). تصاویر راداری توانایی اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا را دارا بوده (جانباز فومنی و همکاران، ۱۳۹۹) و می‌توان از این تصاویر برای اعلام هشدار فرورنشست و در نتیجه مدیریت بحران فرورنشست و کاهش خسارات ناشی از آن استفاده نمود (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹). روش تداخل سنجی راداری یکی از مؤثرترین روش‌های سنجش‌ازدور در مطالعه و بررسی فرورنشست است که قابلیت برآورد فرورنشست زمین با دقت میلی‌متر در سطح وسیع و طی بازه‌های زمانی مختلف را دارا است (کروستو^۸ و همکاران، ۲۰۱۳؛ کوه‌بنانی و همکاران، ۱۳۹۸).

طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی در جهان و ایران به بررسی فرورنشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداخته‌اند. این پدیده در بسیاری از مناطق دنیا نظیر آریزونا و کالیفرنیا در کشور آمریکا، در شهرهای اوزاکا توکیو در کشور ژاپن و همچنین در کشور ایتالیا، در شهر بانکوک در کشور تایلند، در شهر

¹ Hu

² Poland

³ Mehrabi

⁴ Khamsehchiyan

⁵ Hunt

⁶ Francesco

⁷ Khorrami

⁸ Crosetto

جاکارتا در کشور اندونزی (برامانتو^۱ و همکاران، ۲۰۲۳)، در شهر کلکته در کشور هندوستان و نیز در شهر مکزیکوسیتی در کشور مکزیک بررسی و گزارش شده است (تیو و فردلند^۲، ۲۰۰۰). اسمیت^۳ و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی گسترده به بررسی و مطالعه شرایط خاک، نشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان دره ژواکین در ایالت کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد با توجه به اینکه خاک منطقه از لایه‌های ریزدانه رسی تشکیل شده، برداشت بیش از حد مجاز آب از آبخوان مذکور منجر به تحکیم خاک منطقه و در نتیجه فرونشست زمین می‌شود به طوری که آبخوان دیگر توانایی بازگشت به حالت قبلی خود را نداشته و قادر به جذب آب نخواهد بود.

مطالعات نشست زمین توسط لیویزیس^۴ (۲۰۱۸) در منطقه ال‌واگان، کشور امارات با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور Envisat ASAR، ALOS PALSAR و Sentinel-1 حاکی از همبستگی بالای نشست زمین در این کشور با تراز آب زیرزمینی است. نقش فعالیت‌های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان‌خوآکین کالیفرنیا توسط جین^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بهره‌برداری زیاد از منابع آب زیرزمینی طی خشک‌سالی‌های اتفاق افتاده در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ منجر به وقوع فرونشست در منطقه شده است. همچنین نشان دادند در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیشتر است فرونشست زمین نیز بیشتر اتفاق می‌افتد. دکلرک^۶ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش پراکنش‌گرهای دائمی به بررسی فرونشست زمین در اطراف رودخانه شلده واقع در شهر آنتروپ بلژیک پرداختند. طبق نتایج متوسط فرونشست در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۱ با استفاده از داده‌های ERS1/2 به میزان ۳/۴ میلی‌متر، در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده ENVISAT برابر با ۲/۷ میلی‌متر و طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های Sentinel-1A به میزان ۲/۱ میلی‌متر برآورد گردید.

صالحی معتمد^۷ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور و نیز داده‌های زمینی به مطالعه تغییرات سطح زمین در آبخوان دشت مشهد پرداختند. نتایج حاکی از نشست سالانه ۰/۲۹ متر طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳ و ۰/۳۲ متر در هر سال در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۸ است. همچنین نشان دادند به ازای هر یک متر تغییر در تراز سطح آب زیرزمینی، زمین به‌طور متوسط ۰/۱۴ متر نشست می‌کند. آقایی و همکاران (۱۴۰۱) طی مطالعه‌ای به ارزیابی فرونشست زمین دشت اردبیل با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداخته و نشان دادند طی بازه زمانی ۵ ساله در منطقه مطالعاتی ۲۲ میلی‌متر فرونشست زمین رخ داده است. عمادالدین و نظری (۱۴۰۲) به بررسی فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت مشهد طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ با استفاده از داده‌های Sentinel A1 پرداختند. بر اساس نتایج ۶۴ سانتی‌متر فرونشست در دشت مشهد طی دوره آماری مورد مطالعه رخ داده و نشان دادند بیشترین نرخ فرونشست در مناطقی از دشت که افت شدید سطح آب زیرزمینی را تجربه کرده، اتفاق افتاده است.

اخیراً هلالی و همکاران (۱۴۰۳) میزان فرونشست زمین دشت سمنان را با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ توسط تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 برآورد کردند. بر اساس نتایج بیشترین نرخ فرونشست طی دوره آماری مورد بررسی ۶ سانتی‌متر برآورد گردید، همچنین مقایسه نقشه هم‌افت سطح آب

⁹ Bramanto

¹ Thu and Fredlund

² Smith

³ Liosis

⁴ Jeanne

⁵ Declercq

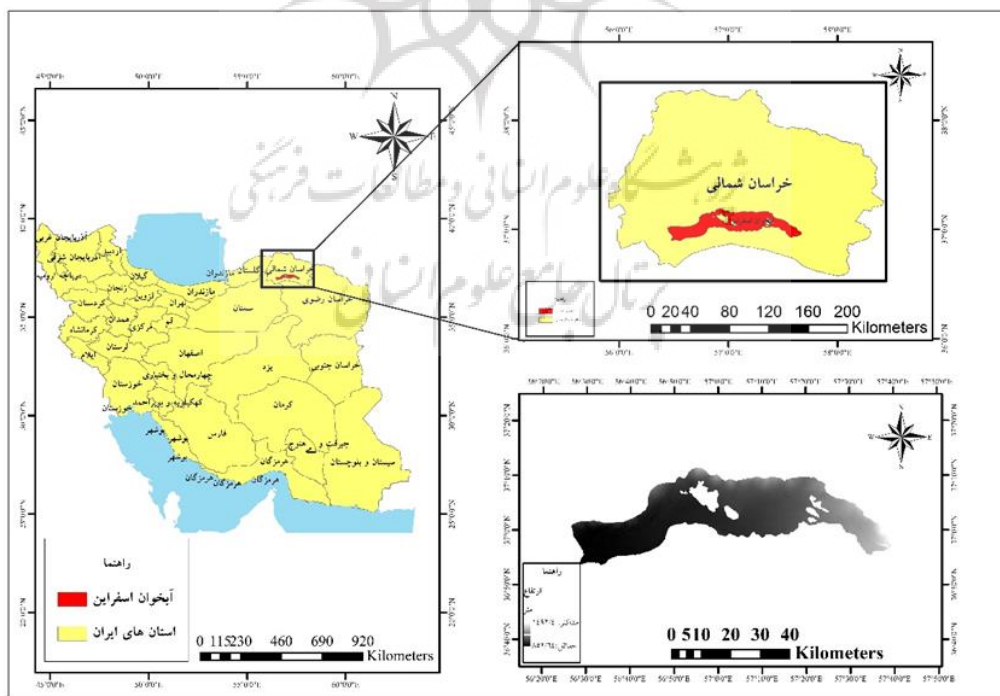
⁶ Salehi Moteahd

زیرزمینی منطقه با نقشه فرونشست منطقه حاکی از انطباق فرونشست با مناطق دارای بیشترین افت سطح آب بود. با توجه به اهمیت پایش فرونشست زمین، در این پژوهش، فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین که از دشت‌های ممنوعه بحرانی کشور است بررسی خواهد شد. بدین منظور از داده‌های سنجش‌ازدور راداری ماهواره Sentinel-1A در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۰ استفاده و مطالعات تداخل سنجی به روش InSAR با استفاده از نرم‌افزار SNAP انجام شده است.

۲ مواد و روش‌ها

۲٫۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

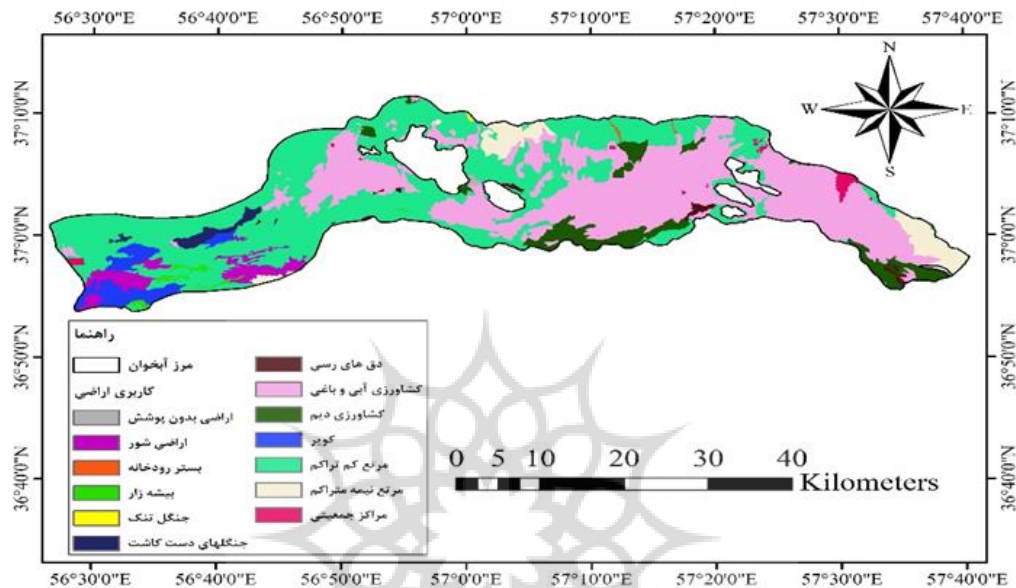
آبخوان اسفراین بین ۵۶ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (واسطه، ۱۳۹۲). این آبخوان در شمال شرقی کشور ایران و در جنوب استان خراسان شمالی قرار گرفته به طوری که بخشی از آن در شهرستان اسفراین و بخش دیگر آن در شهرستان جاجرم واقع گردیده است (شکل ۱). مساحت این آبخوان حدود ۱۵۱۶/۲۶ کیلومتر مربع و محیط آن برابر ۳۹۱/۶۶ کیلومتر است. آبخوان اسفراین دارای کشیدگی شرقی- غربی و فاصله‌ی بین مرزهای شرقی تا مرزهای غربی آن حدود ۱۰۷ کیلومتر است که بیشتر از فاصله بین مرزهای شمالی تا مرزهای جنوبی (۲۳ کیلومتر) آن است. آبخوان مذکور از جنوب با شهرستان‌های جویین و جغتای، از شرق با خوشاب و سبزوار، از شمال با شهرستان‌های شیروان، بجنورد و مانه-سملقان و از غرب با شهرستان گرمه همسایه است. آبخوان اسفراین در حاشیه جنوبی کوه‌های آلاداغ که خود در امتداد شرقی رشته‌کوه البرز قرار دارد، واقع شده است. با حرکت از نواحی شمالی و شرقی این آبخوان به سمت جنوب و غرب، از ارتفاع منطقه کم می‌شود تا اینکه در نواحی جنوب غربی به مناطق پست و هموار منتهی می‌گردد. قله شاه‌جهان در آلاداغ با ارتفاع ۳۰۸۰ متر از سطح دریای آزاد بلندترین قله حوزه آبریز اسفراین محسوب می‌شود (جداری، ۱۳۸۷).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی آبخوان اسفراین در ایران و استان خراسان شمالی.

۲,۲ نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه

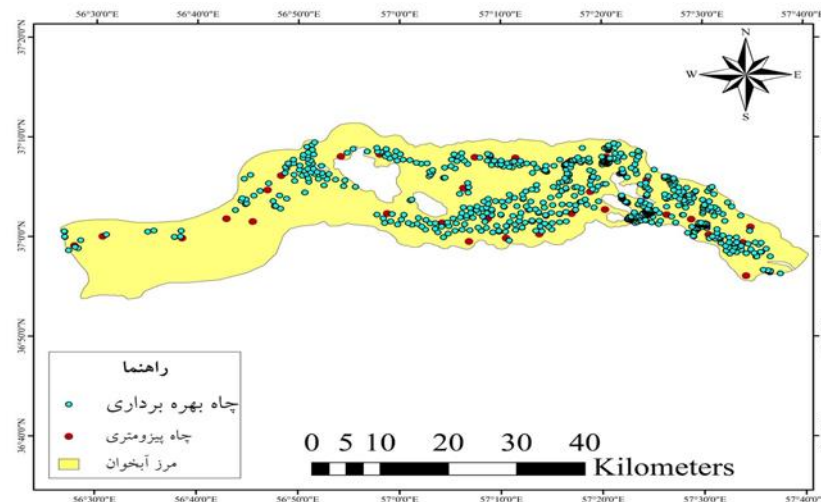
آبخوان دشت اسفراین از نظر کاربری اراضی دارای ۱۳ طبقه اراضی فاقد پوشش، اراضی شور، بستر رودخانه، بیشه‌زار، جنگل‌های دست‌کاشت، جنگل تنک، دق‌های رسی، کشاورزی آبی و باغی، کشاورزی دیم، کویر، مرتع کم تراکم، مرتع نیمه متراکم و مراکز جمعیتی است. کاربری کشاورزی آبی و باغی با مساحت حدود ۵۷۳ کیلومترمربع و کاربری جنگل تنک با وسعت حدود ۱ کیلومترمربع به ترتیب بیشترین و کمترین وسعت منطقه را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی آبخوان دشت اسفراین (مستخرج از نقشه کاربری اراضی استان خراسان شمالی)

۲,۳ داده‌های مورد نیاز

روش استفاده‌شده در این تحقیق، تحلیلی و کاربردی است. در تحقیق حاضر از داده‌های آب زیرزمینی شامل ۳۱ چاه پیزومتری و ۸۷۵ چاه بهره‌برداری (شکل ۳) به منظور پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی و از تصاویر ماهواره Sentinel-1A جهت محاسبه تداخل‌سنجی راداری استفاده گردید. در این پژوهش به منظور محاسبه جابجایی عمودی سطح زمین (فرونشست) از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1A با فرمت SLC (تک منظر) با پلاریزاسیون VV+VH استفاده شد. تداخل‌سنجی راداری تکنیکی برای ترکیب تصاویر SAR گرفته‌شده، توسط سنجنده‌های راداری نصب‌شده در ماهواره؛ به منظور تهیه نقشه‌های ارتفاعی، جابجایی و تغییرات سطح زمین و نیز تعیین سرعت حرکت است (۸). دو تصویر SAR قبل و بعد از ایجاد جابجایی از سطح زمین گرفته می‌شود. هرگونه جابجایی در سطح زمین سبب تغییر فاز در تصاویر SAR گرفته‌شده می‌شود. در این پژوهش مطالعات تداخل‌سنجی راداری به روش InSAR و با نرم‌افزار SNAP صورت گرفت.



شکل ۳. پراکنش چاه‌های پیزومتري و بهره‌برداري در آبخوان اسفراين

جدول ۱ مشخصات تعدادی از اینترفروگرام‌های پردازش‌شده در محدوده مورد مطالعه را با توجه به خط مبنای زمانی و مکانی نشان می‌دهد. به منظور کاهش نویز و افزایش همبستگی و همدوسی اینترفروگرام‌ها حتی‌الامکان سعی شد از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی کوتاه حدود ۴۵ روز استفاده شود. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی نیز جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین با به دست آوردن جابجایی در جهات مختلف با استفاده از اینترفرومتری مورد استفاده قرار گرفت. تعداد تصاویر راداری به کار برده شده در این تحقیق شامل ۵۵ تصویر SLC و ۵۴ اینترفروگرام است و نیز بازه زمانی در نظر گرفته شده در این پژوهش دوره هفت‌ساله، از سال ۱۳۹۳ تا سال ۱۴۰۰ است.

جدول ۱. مشخصات تعدادی از تصاویر راداری مورد استفاده در این تحقیق

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	فاصله زمانی (روز)	فاصله مداری (متر)
۱	۱/۹/۲۰۱۵	SLC	IW	۰	۰
۲	۲/۲۶/۲۰۱۵	SLC	IW	۴۷	۲۳۲
۳	۴/۱۵/۲۰۱۵	SLC	IW	۴۸	۱۶۰
۴	۶/۲/۲۰۱۵	SLC	IW	۴۸	۱۱۷
۵	۷/۲۰/۲۰۱۵	SLC	IW	۴۸	۸۷
۶	۹/۶/۲۰۱۵	SLC	IW	۴۸	۴۶
۷	۱۰/۲۴/۲۰۱۵	SLC	IW	۴۷	۳
۸	۱۱/۱۷/۲۰۱۵	SLC	IW	۲۳	۵۸
۹	۱/۴/۲۰۱۶	SLC	IW	۴۷	۲۸
۱۰	۲/۲۱/۲۰۱۶	SLC	IW	۴۷	۷۳
۱۱	۴/۹/۲۰۱۶	SLC	IW	۴۸	۳۰
۱۲	۵/۲۷/۲۰۱۶	SLC	IW	۴۸	۷۵
۱۳	۷/۱۴/۲۰۱۶	SLC	IW	۴۸	۴۲
۱۴	۸/۳۱/۲۰۱۶	SLC	IW	۴۸	۱۲

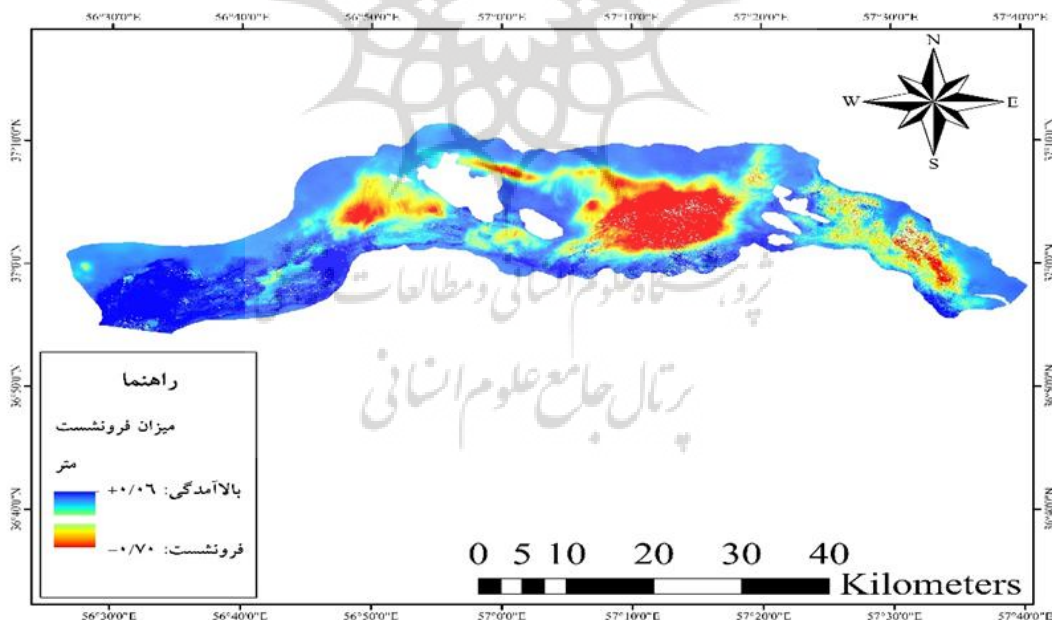
۲٫۴ محاسبه میزان فرونشست با استفاده از تداخلسنجی راداری

یکی از اهداف این پژوهش تخمین میزان فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین با استفاده از تکنیک تداخلسنجی راداری است، لذا برای این منظور ابتدا ماهواره‌ای که می‌تواند داده‌های موردنیاز برای این منظور را تولید کند، انتخاب شد و تصاویر راداری مربوط به منطقه‌ی موردنظر را با کمترین مبنای زمانی و مکانی از طریق فرآیند سفارش در سایت این ماهواره دانلود و برای پردازش‌های بعدی ذخیره گردید. پردازش بر روی تصاویر راداری در محیط نرم‌افزار SNAP صورت گرفت. پردازش تصاویر راداری در ۱۰ گام به صورت ورود داده‌های خام و نیز ورود تصاویر راداری به نرم‌افزار و تبدیل آن‌ها به تصاویر مختلط (SLC)، ثبت و تصحیح هندسی تصاویر، تهیه تداخل‌نما، حذف اثر توپوگرافی و فیلترگذاری، بازیابی فازو زمین مرجع نمودن تصویر نهایی تداخل‌نما، صورت پذیرفت (زندی و همکاران، ۱۴۰۰).

۳ نتایج و بحث

۳٫۱ پهنه‌بندی فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین

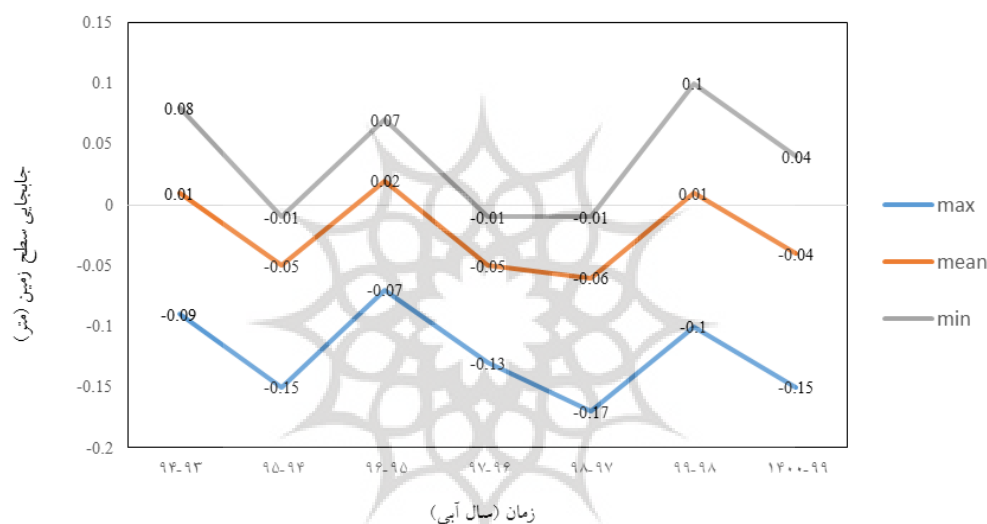
پس از انجام پردازش‌های لازم بر روی تصاویر راداری گرفته‌شده از محدوده مورد مطالعه در نرم‌افزارهای SNAP و Arc map در نهایت نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین (شکل ۴) تهیه شد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین بیشترین میزان فرونشست در مناطق مرکزی، جنوب شرقی و بخش‌هایی از اراضی غربی آبخوان متمایل به مرکز رخ داده و در بخش‌هایی از جنوب غربی آبخوان جابجایی قائم به سمت بالا مشاهده می‌شود.



شکل ۴. پهنه‌بندی فرونشست زمین در آبخوان اسفراین از سال ۱۳۹۳ تا سال ۱۴۰۰

بر اساس نتایج در ۲۵۵ کیلومترمربع از اراضی آبخوان اسفراین فرونشست زمین مشاهده می‌شود که از این میزان حدود ۸۰ کیلومترمربع واقع در مرکز آبخوان مقدار بیشینه فرونشست را به خود اختصاص داده است. همچنین حدود ۶۹ کیلومترمربع دیگر از اراضی واقع در نواحی مرکزی آبخوان نیز شاهد فرونشست سطح زمین

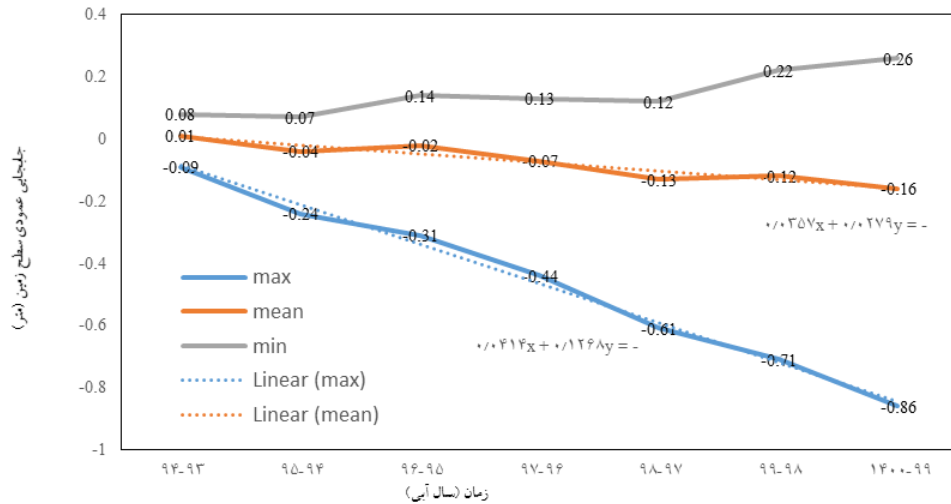
به مقدار کمتر بوده است. از طرفی اراضی واقع در بخش شرقی آبخوان (۵۷ کیلومترمربع)، نواحی شمالی (تقریباً ۱۰ کیلومترمربع) و اراضی واقع در نواحی غربی نزدیک به مرکز آبخوان (حدود ۳۹ کیلومترمربع) نیز دارای فرونشست سطح زمین می‌باشند. در قسمتی از اراضی مناطق غربی آبخوان اسفراین به مساحت تقریباً ۳۳ کیلومترمربع، نه‌تنها فرونشستی رخ نداده بلکه در این نواحی جابجایی قائم به سمت بالا قابل‌رؤیت است. بیشترین میزان فرونشست زمین در ناحیه‌ی مرکزی این آبخوان و مقدار آن طی ۷ سال آماری موردبررسی تقریباً ۷۰ سانتی‌متر است. به‌عبارت‌دیگر در این منطقه از آبخوان، سطح زمین سالانه حدود ۱۰ سانتی‌متر به‌طور متوسط نشست می‌کند. در نقاط محدودی از آبخوان اسفراین که در غرب این آبخوان واقع شده‌اند، جابجایی سطح زمین قائم به سمت بالا را شاهد هستیم که مقدار آن طی ۷ سال دوره‌ی آماری مورد مطالعه برابر ۶ سانتی‌متر، به عبارتی به‌طور متوسط کمتر از یک سانتی‌متر در سال است. با استفاده از اطلاعات حاصل از پیکسل‌های نقشه فرونشست زمین، مقادیر بیشینه، متوسط و کمینه نرخ فرونشست در سال‌های مختلف دوره آماری موردبررسی برای کل آبخوان محاسبه شد (شکل ۵).



شکل ۵. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر جابجایی سطح زمین در آبخوان اسفراین از سال آبی ۱۳۹۳ تا سال آبی ۱۴۰۰

شکل ۵ میزان جابجایی سالانه سطح زمین در کل آبخوان اسفراین را نشان می‌دهد. بر این اساس میزان نشست زمین از سال ۱۳۹۳ تا سال ۱۴۰۰ افزایشی است. به‌منظور درک بهتر جابجایی سطح زمین در آبخوان مورد مطالعه مقادیر تجمعی جابجایی سطح زمین نیز ترسیم شد (شکل ۶).

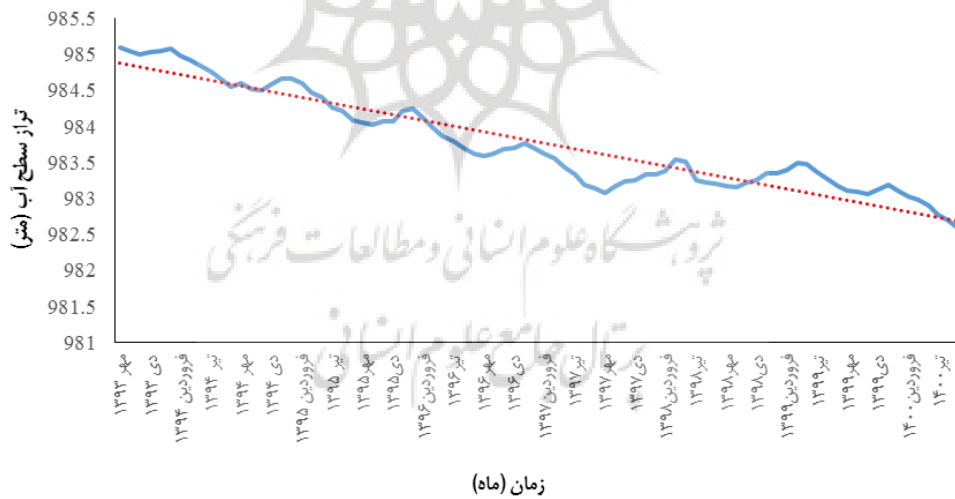
بر اساس شیب نزولی جابه‌جایی سطح زمین (شکل ۶) می‌توان نتیجه گرفت که آبخوان دشت اسفراین به‌طور متوسط در هر ۲۸ میلی‌متر (شیب خط میانگین در شکل ۶) و در هر سال حداکثر ۱۲۶ میلی‌متر (شیب خط حداکثر در شکل ۶) فرونشست را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر جابجایی تجمعی زمین در آبخوان اسفراین از سال آبی ۱۳۹۳ تا سال آبی ۱۴۰۰

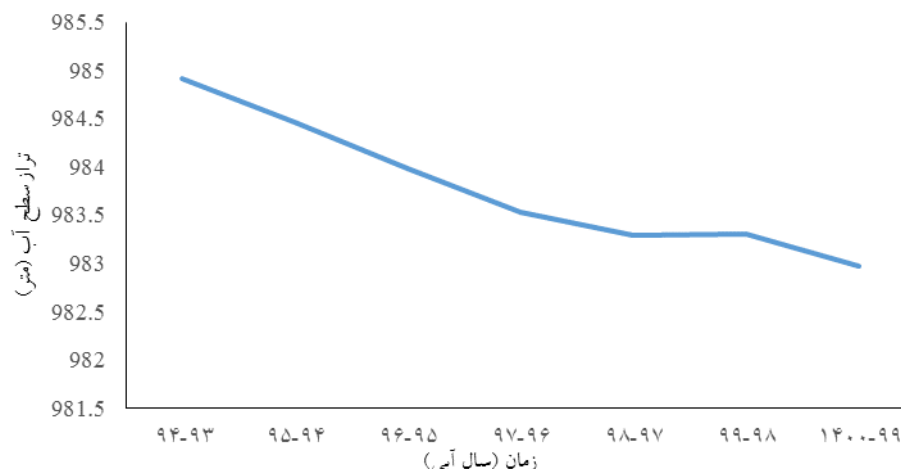
۳٫۲ تحلیل داده‌های چاه‌های پیزومتری و بهره‌برداری

به‌منظور بررسی ارتباط میان فرونشست زمین و برداشت آب زیرزمینی و تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه، از اطلاعات چاه‌های پیزومتری و بهره‌برداری استفاده شد. هیدروگراف آبخوان اسفراین در بازه‌ی زمانی ۷ ساله، از ابتدای سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ با استفاده از اطلاعات سطح آب چاه‌های پیزومتری و تراز نقطه نشانه چاه‌های پیزومتری به‌دست‌آمده از نقشه مدل رقوی ارتفاع، ترسیم شد (شکل ۷).



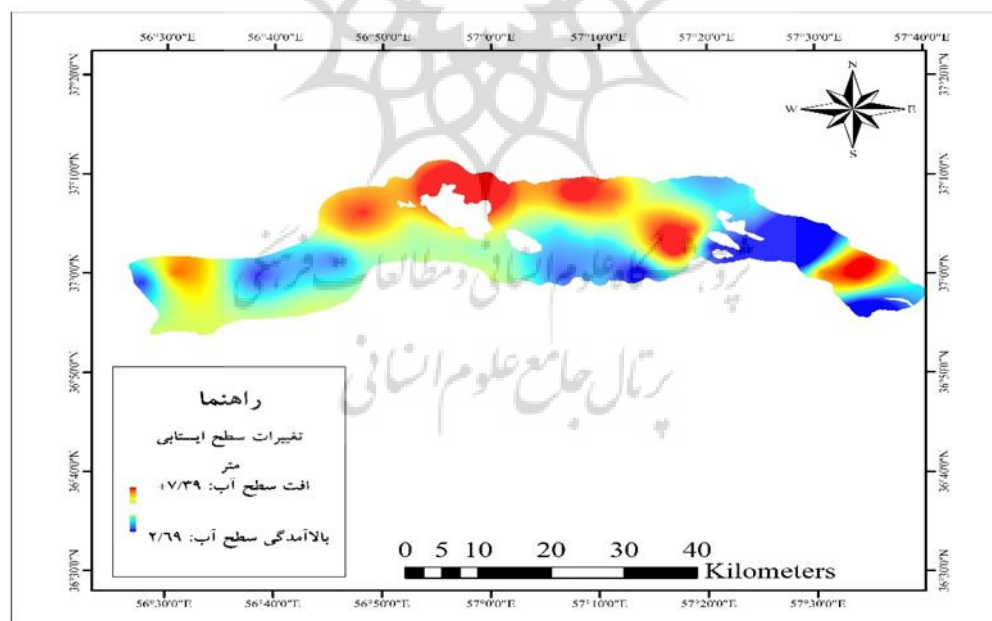
شکل ۷. هیدروگراف آبخوان اسفراین از سال آبی ۱۳۹۳ تا سال آبی ۱۴۰۰

بر اساس نتایج، تراز سطح ایستابی آبخوان اسفراین از سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ ۲/۵ متر کاهش نشان می‌دهد، به عبارتی سطح آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه، سالانه به‌طور متوسط ۳۶ سانتی‌متر افت نشان می‌دهد. شکل ۸ تغییرات سطح ایستابی آبخوان اسفراین به‌صورت سالانه را نشان می‌دهد (شکل ۸).



شکل ۸. تغییرات سطح ایستابی سالانه آبخوان اسفراین از سال آبی ۱۳۹۳ تا سال آبی ۱۴۰۰

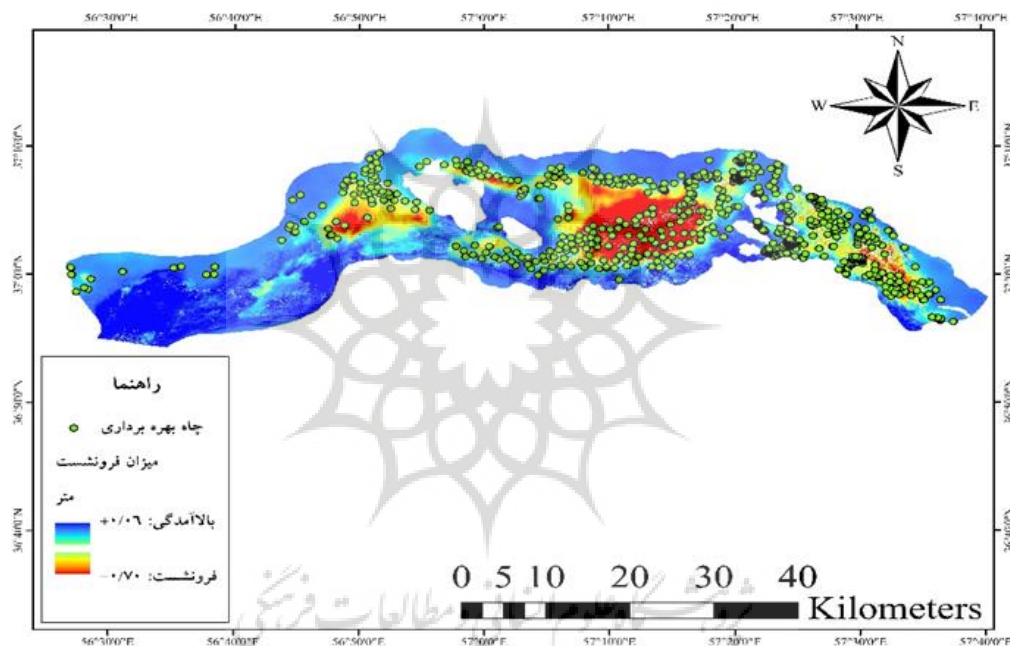
پس از ترسیم نمودارهای تغییرات سطح ایستابی کل آبخوان، نقشه‌ی هم افت آب‌های زیرزمینی آبخوان اسفراین توسط اعداد به‌دست‌آمده از نمودارهای تغییرات سطح ایستابی کل آبخوان تهیه گردید. بررسی نقشه‌های فرونشست زمین، هم افت (شکل ۹)؛ و کاربری اراضی حاکی از این است که مقدار بیشینه میزان فرونشست در قسمت مرکزی آبخوان رخ داده که این بخش دارای بیشترین وسعت اراضی کشاورزی بوده و بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در همین منطقه اتفاق افتاده است؛ بنابراین می‌توان گفت بهره‌برداری بیش‌ازحد آب زیرزمینی در دشت اسفراین می‌تواند یکی از دلایل مؤثر در وقوع فرونشست زمین باشد.



شکل ۹. پهنه‌بندی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان اسفراین (نقشه‌ی هم افت) از سال ۱۳۹۳ تا سال ۱۴۰۰

درنهایت نقشه پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری با نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی موردنظر تلفیق گردید که با دید بهتری به تحلیل میزان ارتباط میان دو مؤلفه بهره‌برداری آب زیرزمینی و فرونشست زمین پرداخته شود (شکل ۱۰). انطباق نقشه‌ی نهایی فرونشست زمین دوره آماری و نقشه‌ی پراکندگی

چاه‌های بهره‌برداری واقع در منطقه، نشان می‌دهد که بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن بیشترین میزان فرونشست زمین اغلب در مناطق با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری (بخش‌های مرکزی و شمالی آبخوان) و کمترین آن در نواحی جنوب غربی آبخوان که دارای کمترین تعداد چاه بهره‌برداری است، اتفاق افتاده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت همبستگی میان دو مؤلفه‌ی برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین وجود دارد و به ازای هر ۱ متر افت سطح آب زیرزمینی، حدود ۸ سانتی‌متر فرونشست زمین رخ می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش در مطالعات قبلی که در این زمینه صورت گرفته است به‌وفور دیده می‌شود از جمله می‌توان به مطالعات اسمیت و همکاران (۲۰۱۷)، لیویس و همکاران (۲۰۱۸) و صالحی معتمد و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. همچنین محمدی و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی و صنعتی مهم‌ترین عامل فرونشست زمین در دشت سمنان بوده است. تحقیقات دیگری همچون جین و همکاران (۲۰۱۹)، عبدالمهی و همکاران (۱۳۹۸) و عمادالدین و همکاران (۱۴۰۲) نیز به نتیجه مشابه با پژوهش حاضر دست یافتند.



شکل ۱۰. موقعیت مکانی و پراکنندگی چاه‌های بهره‌برداری واقع در آبخوان اسفراین

۴ نتیجه‌گیری

مطالعات در زمینه فرونشست در ایران اغلب از روش تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای (InSAR) استفاده می‌کنند، این روش به محققان امکان می‌دهد تا تغییرات سطح زمین را با دقتی بالا اندازه‌گیری نمایند. یکی از دلایل اصلی وقوع این پدیده در دشت‌های ایران برداشت بی‌رویه و فزاینده آب‌های زیرزمینی است که عمدتاً برای کشاورزی انجام‌شده و منجر به افت سطح آب زیرزمینی و در نتیجه فرونشست زمین می‌شود. نرخ فرونشست در مناطق مختلف ایران متفاوت است، اما در برخی مناطق به مقادیر قابل‌توجهی می‌رسد. برای مثال میزان فرونشست دشت مشهد ۶۴ سانتی‌متر (عمادالدین و نظری، ۱۴۰۲)، در شهرستان لردگان بین ۱۴ تا ۱۸ سانتی‌متر (امیری و همکاران، ۱۴۰۲)، بیشینه نرخ فرونشست در دشت سمنان ۶ سانتی‌متر (هلالی و همکاران، ۱۴۰۳)، در آبخوان هومند-آبسر ۱۱ میلی‌متر (فیجانی و زارعی، ۱۴۰۳) و در دشت سلماس میانگین جابجایی ناشی از

فرونشست ۵ سانتی‌متر (نجفی ایگدیر و همکاران، ۱۴۰۳) گزارش شده است. دشت‌های دارای کاربری غالب کشاورزی، مناطق شهری و مناطق صنعتی که با برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی روبرو هستند دارای بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر فرونشست می‌باشند. این پدیده پیامدهای جدی برای زیرساخت‌ها، ساختمان‌ها، شبکه‌های حمل‌ونقل و کشاورزی داشته و می‌تواند منجر به آسیب به سازه‌های عمرانی، اختلال در شبکه‌های آبیاری و افزایش خطر سیل شود. راه‌کارهایی همچون مدیریت صحیح و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی، اصلاح الگوی کشت، اعمال محدودیت بر برداشت آب، استفاده از روش‌های نوین آبیاری و کاربرد عملیات تغذیه مصنوعی در دشت‌های مختلف می‌تواند به‌منظور مقابله با پدیده فرونشست و کاهش خسارات ناشی از آن بکار گرفته شود. به‌طورکلی، فرونشست زمین یک چالش جدی در ایران است که نیازمند توجه فوری و اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب است. این پدیده نه‌تنها تهدیدی برای زیرساخت‌ها و اقتصاد کشور محسوب می‌شود، بلکه می‌تواند منجر به مشکلات اجتماعی و زیست‌محیطی جدی‌تری نیز شود.

به‌طورکلی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری بر روی ۵۵ تصویر SLC و تولید ۵۴ تداخل‌نما و به دنبال آن ترسیم نقشه‌ی پهنه‌بندی فرونشست سطح زمین نشان داد که میانگین سالانه فرونشست زمین در دشت اسفراین ۲۸ میلی‌متر است که حداکثر آن غالباً در نواحی مرکزی به مساحت تقریباً ۸۰ کیلومترمربع و با نرخ سالانه ۱۲۶ میلی‌متر رخ داده است. همچنین هیدروگراف آبخوان طی دوره آماری مورد مطالعه حاکی از افت متوسط سالانه به میزان ۳۶ سانتی‌متر در آبخوان دشت اسفراین است که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی (با نرخ متوسط سالانه بین ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر) مربوط به نواحی مرکزی و شمالی این آبخوان است. بر اساس نقشه‌ی کاربری اراضی آبخوان دشت اسفراین، بیشترین کاربری در منطقه مربوط به زمین‌های کشاورزی است که تراکم این زمین‌های کشاورزی در نواحی مرکزی و شمالی آبخوان بیشتر از سایر مناطق است که در آن بیشترین میزان فرونشست زمین رخ داده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان چنین بیان کرد که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی برای مصارف گوناگون به‌ویژه مصارف کشاورزی در آبخوان دشت اسفراین می‌تواند یکی از علل اصلی و مهم افت شدید سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن رخداد پدیده‌ی فرونشست سطح زمین در نواحی مرکزی و شمالی این آبخوان باشد. درنهایت باهدف کاهش روند فرونشست وافت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت اسفراین پیشنهاد می‌شود به‌منظور افزایش دقت نتایج در تحقیقات آتی از روش PS-INSAR در فرآیند تداخل‌سنجی تصاویر راداری استفاده شود. نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات محققانی همچون شفیعی و همکاران (۱۴۰۰)، زنگنه اسدی و همکاران (۱۴۰۲) و فرزین کیا و همکاران (۱۳۹۸) هم‌خوانی دارد. همچنین در این پژوهش به بررسی همبستگی بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین پرداخته شد اما از آنجاکه فرونشست زمین تحت تأثیر عوامل گوناگونی است لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی به بررسی همبستگی فرونشست زمین با علل دیگر (همچون بررسی همبستگی بین معدن‌کاوی و فرونشست زمین) در منطقه مورد مطالعه پرداخته شود اقدامات مختلف اجرایی همچون جلوگیری از حفر چاه بهره‌برداری جدید، استفاده از روش‌های تغذیه‌ی مصنوعی، هوشمند سازی کنتورهای چاه‌های بهره‌برداری، استفاده از روش‌های آبیاری مدرن، کشت گلخانه‌ای، تغییر الگوی کشت و استفاده از گیاهان کم‌آب می‌تواند از فشار وارده به منابع آبی آبخوان کاسته و مانع گسترش پدیده فرونشست زمین و در نتیجه توسعه اراضی بیابانی در منطقه مورد مطالعه شود.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان "تخمین فرونشست زمین در آبخوان دشت اسفراین با استفاده از سنجش‌ازدور و بررسی همبستگی آن با اطلاعات چاه‌های پی‌زومتری" باراهنمایی

نویسنده‌های دوم و سوم بوده و از طرف استانداری خراسان شمالی مورد حمایت مالی قرار گرفته که بدین وسیله از استانداری و شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی جهت حمایت مادی و معنوی و همچنین از دانشگاه حکیم سبزواری بابت حمایت معنوی تشکر و قدردانی می‌نماییم.

References

- Abdollahi, S., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A., & Safaeian, R. (2019). Spatial simulation and land-subsidence susceptibility mapping using maximum entropy model. *Journal of Watershed Management Research*, 10(20), 133-144. <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.10.20.133>
- Aghayary, L., Abedini, M., Asghari, S. (2022). Estimation of subsidence rate using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: Ardabil plain). *Quantitative Geomorphological Research*. Page 117-132. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.304999.1302>
- Ahmadi, n., mousavi, z., & masoumi, z. (2018). Khoramdarreh Subsidence Estimation Using SAR Interferometry and Investigation its Risks. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(3), 33-52. https://gisj.sbu.ac.ir/article_96591_9ca242cc61814e24ae015314fcb4bc45.pdf
- Amiri, F., Momeni, M., & Mirassi, S. (2023). Assessing subsidence risk of Lordegan county using radar interferometry technique. *Quantitative Geomorphological Research*. 12(2): 230-244. [In Persian]. [10.22034/gmpj.2023.405603.1443](https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.405603.1443)
- Bramanto, B., Gumilar, I., Sidiq, T. P., Rahmawan, Y. A., & Abidin, H. Z. (2023). Geodetic evidence of land subsidence in Cirebon, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100933>
- Crosetto, M., Gili, J.A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., Serral, D (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, No 4, 923-933. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238>
- Declercq, P. Y., Gérard, P., Pirard, E., Walstra, J., & Devleeschouwer, X. (2021). Long-term subsidence monitoring of the alluvial plain of the scheldt river in antwerp (Belgium) using radar interferometry. *Remote Sensing*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/rs13061160>
- Ebrahimi, A, Gahsemi, A., & Ganjaeian, H. (2020). Monitoring the Subsidence Rate of Pakdasht Urban Area Using Radar interferometry method. *Geomorphology and Human Relationships*. 2(4). Pages: 29-41. [In Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1>
- Emadodin, S., & Nazari Gazik, Z. (2023). Estimation of Subsidence Rate and Groundwater Level Changes in Mashhad Plain. *Geography and Development*. 21(73): 221-239. [In Persian]. <https://doi.org/10.22111/gdij.2023.8029>

- Farzinkia, R., Zanganeasadi, M.A., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2019). The Relationship between Tectonic Activity and Its Impact on Land Subsidence in the Jovein Basin. *Hydrogeomorphology*. 6(20): 165-185. [In Persian].
- Fijani, E., & Zarei, P. (2024). Evaluation of land subsidence potential in Humand-Absard aquifer using remote sensing methods and its relationship with groundwater abstraction. *Hydrogeology*. 9(1): 1-15. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/hydro.2024.60463.1312>
- Francesco, R.D. (2013). Principles of soil mechanics. IV. Settlement and consolidation of clay. *Engineering News-Record*, 95, 874. <https://doi.10.4236/am.2013.44099>
- Helali, L., Bagheri, R., & Momeni, A. (2024). Investigation of land subsidence using radar interferometry technique (Case study: Semnan plain). *Hydrogeology*. 9(1): 86-100. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/hydro.2024.56752.1290>
- Ho Tong Minh, D., Hanssen, R., & Rocca, F. (2020). Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives. *Remote Sensing*, 12(9), 1364. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/9/1364>
- Holzer, T. L., & Galloway, D. L. (2007). Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States. *Humans as Geologic Agents*. [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(08\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(08))
- Hu, B., Zhou, J., Wang, J. Chen, Z., Wang, D., & Xu, S. (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environ Earth Sciences*. 59, 269-276. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6>
- Hunt, R. E. (2007). *Geologic hazards: a field guide for geotechnical engineers*. CRC press.
- Janbaz fotamy, M., Kholghi, M., Abdeh Kolahchi, A., & Roostaei, M. (2020). Land Subsidence Assessment due to Groundwater Exploration by using Differential Radar Interferometry Technique, Case Study: Qazvin province, *Journal of Iran-Water Resources Research*, Vol.16, N.3, 133-147. [In Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8>
- 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*, Vol. 569, 462 -469. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418309661>
- Jedari E. (2004). *Geomorphology of Iran, Tehran*, Payam Noor University Publications, 7th edition. [In Persian].
- Khomehchiyan M. (1995). Study on geotechnical and Quaternary geo-environmental aspects of land subsidence due to withdrawal of ground water.
- Khorrarni, M., Alizadeh, B., Ghasemi Tousi, E., Shakerian, M., Maghsoudi, Y., & Rahgozar, P. (2019). How Groundwater Level Fluctuations and Geotechnical Properties Lead to Asymmetric Subsidence: A PSInSAR Analysis of Land Deformation over a Transit Corridor in the Los Angeles Metropolitan Area. *Remote Sensing*, 11(4), 377. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/4/377>

- Kohbanani, H., Yazdani, M.R., & Hosseini, S.K. (2019). Mapping Land Subsidence Hazard through InSAR (Case study: Kashmar and Khalil Abad plain). 7(13): 65-76. [In Persian].<https://doi.org/10.22034/jdmal.2019.36526>
- Li, Z., Chen, Q., Xue, Y., Qiu, D., Chen, H., Kong, F., & Liu, Q. (2023). Numerical investigation of processes, features, and control of land subsidence caused by groundwater extraction and coal mining: a case study from eastern China. *Environmental Earth Sciences*, 82(3), 82. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10779-5>
- Liosis, N., Marpu, P. R., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. B. (2018). Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100933>
- Maleki, R., Khavaruan, H., & Asghari, S. (2023). Measuring the amount of land subsidence using radar interferometry technique (Case study: Earthquake-affected areas west of Kermanshah). *Journal of Natural Environmental Hazards*, Vol.12, Issue 38. [In Persian]. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42823.1911>
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.
- Mehrabi, A., Derakhshani, R., Nilfouroushan, F., Rahnamarad, J., & Azarafza, M. (2023). Spatiotemporal subsidence over Pabdana coal mine Kerman Province, central Iran using time-series of Sentinel-1 remote sensing imagery. *Episodes Journal of International Geoscience*, 46(1), 19-33. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2022/022009>
- Mohammady, M., Pourghasemi, H., & Mojtaba, M. (2021). Investigation of Subsidence Susceptibility in the Semnan Plain Using Entropy Model. *Journal of Watershed Management Research*, 12(23), 75-85. <http://dx.doi.org/10.52547/jwmr.12.23.75>
- Najafi Igdir, A., Choubin, B., & Shirani, K. (2024). Estimation of Land Subsidence in Salmas Plain Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar Algorithm. *Watershed Management Research*. 37(1): 98-113. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.361200.1521>
- Poland, J. F. (1984). Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.
- Ranjgar, B., Razavi-Termeh, S. V., Foroughnia, F., Sadeghi-Niaraki, A., & Perissin, D. (2021). Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and optimized hybrid machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/rs13071326>
- Salehi Moteahd, F., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G. R., & Dehghani, M. (2019). Geological parameters affected land subsidence in Mashhad plain, north-east of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(14), 405. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8413-y>
- Shafiei, N., Golimokhtari, L., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2021). Spatial analysis of land subsidence and groundwater loss using the GWR model (Case study: Noorabad Mamasani

- aquifer,). Journal of Geography and Palnning. 25(76): 159-171. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.11306>
- Smith, R. G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J., Zebker, H., Farr, T., & Liu, Z. (2017). Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California. Water Resources Research, 53(3), 2133-2148. <https://doi.org/10.1002/2016WR019861>
 - Thu, T. M., & Fredlund, D. G. (2000). Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. Canadian Geotechnical Journal, 37(3), 621-637. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-37-3-621>
 - Vaseteh, V. (2013). Management of groundwater level reduction in Esfrain Plain. National conference of non-operating defense in the agricultural sector. [In Persian].
 - Zandi R, Nasiri A, Shafiei N, & Farzin Kia R. (2019). The application of remote sensing in environmental sciences (principles and techniques). Greenery Hakim Sabzevari University.[In Persian].
 - Zanganeasadi, M.A., Zandi, R., & Shafiei, N. (2023). Measurement and evaluation of rice and summer crops on the amount of land subsidence (case study: Noorabad Reservoir, Fars Province, Iran). Quantitative Geomorphological Research. 12(2): 184-199. [In Persian]. [10.22034/gmpj.2023.393690.1432](https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.393690.1432)

