

RESEARCH ARTICLE

DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199

Open access

Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area)

Zahra Azarm^a, Hamid Mehrabi^{b*}, Saied Nadi^c

^aMA Student in Remote Sensing, Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^bAssistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of civil and transportation engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^cDepartment of Geomatics Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran; ^b Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada

Received: 4 April 2022

Revised: 22 May 2022

Accepted: 9 June 2022

Abstract

Land subsidence induced by soil consolidation is one of the natural hazards that occur gradually. This phenomenon has reached its critical state in most regions of Iran. Factors affecting subsidence are groundwater level depletion, land cover, soil type, elevation, slopes gradient, rock bed depth, etc. The causes of subsidence should be investigated so that decisions could be based on the real characteristics of the region. Decrease in groundwater level is one of the most important factors that influences subsidence but due to the complexity of the relationship between subsidence and other factors, a direct linear relationship between groundwater level and subsidence cannot be considered. The study aimed to investigate the relationship between subsidence and groundwater changes through relationship between the two parameters in the period 2014 to 2018 in Isfahan. In this regard, the time series of radar interferometry and the time series of water levels of piezometric wells in the Isfahan were studied. The results show that in 12% of the wells, no correlation exists, in 9%, poor positive ignorable correlation, in 12%, fair positive correlation, in 48%, significant positive correlation, in 6%, poor negative ignorable correlation, in 4% fair negative correlation and in 9% there is a strong and negative significant correlation between the subsidence rate and the groundwater level. Correlation values show the complexity of the relationship between subsidence and water level depletion. Therefore, the relationship between subsidence and its causative factors requires more detailed studies and comprehensive models.

Keywords: Subsidence, Radar Interferometry, Time Series Analysis, Groundwater Level, Piezometric Wells

*. Corresponding author: Hamid Mehrabi

Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

Tel: + 983137935297

How to cite this Article: Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2023). Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 173-191.

DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۴۴ و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۹۱-۱۷۳

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی

تداخل سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان)

زهرا آزر- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، گروه نقشه‌برداری، دانشکده حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

حمید مهربانی^۱ - استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان.

سعید نادی - استادیار سابق گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان. محقق دانشکده مهندسی عمران و

محیط زیست، دانشگاه کارلتون، اوتاوا، کانادا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۹

چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات طبیعی است که به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد، این پدیده در اکثر مناطق ایران به وضعیت بحرانی رسیده است. عوامل تأثیرگذار بر فرونشست شامل تغییرات سطح آب زیرزمینی، جنس خاک، عمق بستر سنگی و ... است. برای جلوگیری از پیشروی فرونشست باید علل رخداد آن بررسی شود تا با توجه به ویژگی‌های هر منطقه تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر واقعیت باشد. افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل مهم مؤثر بر فرونشست است ولی به دلیل پیچیدگی ارتباط فرونشست با عوامل تأثیرگذار دیگر، نمی‌توان به صورت عام یک رابطه خطی مستقیم بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست در نظر گرفت. این تحقیق با هدف بررسی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی به بررسی همبستگی بین دو پارامتر مذکور در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در منطقه اصفهان پرداخته است. در این راستا سری زمانی تداخل سنجی راداری و سری زمانی سطح آب چاه‌های پیرومتری در منطقه اصفهان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، در ۱۲٪ از چاه‌ها، عدم همبستگی،

Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

نحوه ارجاع به این مقاله:

آزر، زهرا؛ مهربانی، حمید؛ نادی، سعید؛ ۱۴۰۱. بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده

از آنالیز سری زمانی تداخل سنجی راداری (منطقه مطالعاتی اصفهان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۴). صص ۱۹۱-۱۷۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199>

در ۹٪ همبستگی ضعیف و مثبت، در ۱۲٪ همبستگی متوسط و مثبت، در ۴۸٪ همبستگی قوی و مثبت، در ۶٪ همبستگی ضعیف و منفی، در ۴٪ همبستگی متوسط و منفی و در ۹٪ همبستگی قوی و منفی بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی وجود دارد. مقادیر همبستگی پیچیدگی ارتباط میزان فرونشست و افت سطح آب را نشان می‌دهد. پیچیدگی ارتباط میزان فرونشست و عوامل ایجاد آن، نشان دهنده لزوم انجام بررسی‌های دقیق‌تر و ارائه مدل‌های جامع‌تر است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل‌سنجی راداری، تحلیل سری زمانی، سطح آب زیرزمینی، چاه‌های پیرومتری

۱-مقدمه

افت تدریجی ارتفاع سطح زمین که با جابه‌جایی‌های ناچیز افقی همراه است را فرونشست گویند. به دلیل تدریجی بودن آن و ایجاد خسارات غیرقابل جبران، این پدیده را زلزله خاموش می‌نامند. آب حاصل از بارندگی یا ذوب برف‌ها، در عمق خاک حرکت می‌کند تا به لایه‌های غیرقابل نفوذ می‌رسد، سپس تمام منافذ را پر می‌کند و منطقه اشباعی را به وجود می‌آورد که به آن آبخوان (لایه‌های آبدار یا آبخوانه) گفته می‌شود. برداشت آب زیرزمینی به علت افت سطح ایستابی و کاهش فشار سیال و افزایش فشار بین ذرات خاک، منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست می‌شود (علیزاده، ۱۳۶۷).

مشاهدات سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۱ و شبکه‌های ترازبایی دقیق دو روش ژئودتیکی برای پایش فرونشست است. هر دو این روش‌ها محدود به ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند و نیاز به حضور در منطقه، انجام مشاهدات میدانی، صرف وقت و هزینه زیاد دارند. از دیگر روش‌های ژئودتیکی پایش فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی راداری است، به دلیل تدریجی بودن پدیده فرونشست برای بررسی آن باید از روش‌های سری زمانی استفاده کرد، از جمله این روش‌ها، تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری بر پراکنشگرهای دائمی (PSInSAR) و تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری بر مبنای طول خط مبنای کوتاه (SBAS)^۲ هستند. در این تحقیق برای محاسبه فرونشست از روش PSInSAR استفاده شده است، این روش به دلیل استفاده از نقاط پراکنشگر دائمی قادر است فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقیمانده توپوگرافی و نویز را کاهش دهد. در تحقیقات متعددی نتایج این روش با مشاهدات GPS و ترازبایی دقیق مقایسه شده‌اند که نشان داده شده، دقت روش PSInSAR در حد میلی‌متر است (تامبورینی و همکاران، ۲۰۱۰)^۴، (روچی و همکاران، ۲۰۱۲)^۵. نتایج

1 Global Positioning System

2 Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

3 small baseline subset

4 Tamburini et al.

5 Rucci et al.

این روش همبستگی بالایی با مشاهدات GPS و ترازیابی دقیق دارد (بیسواس و همکاران، ۲۰۱۸)^۱، (چانگ و همکاران، ۲۰۱۰)^۲، (خرمی و همکاران ۲۰۱۹)^۳. تداخل‌سنجی راداری در دهه اخیر به‌طور گسترده در زمینه مطالعات فرونشست زمین مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در تحقیقی جابه‌جایی‌های پل هنگ کنگ-ژوهای-ماکائو^۴ با استفاده از روش PSInSAR، با ۸۶ تصویر سنتینل^۵ از ۶ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۷ نوامبر با استفاده از ۲۰۲۰ محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که حداکثر نرخ سالانه فرونشست در این منطقه ۱۷ میلی‌متر است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱)^۶. در مقاله‌ای با استفاده از روش PS-InSAR و داده‌های Cosmo-skymed در بازه زمانی ۸ ژوئن ۲۰۱۱ تا ۱۵ نوامبر ۲۰۱۷، تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۱۸ دسامبر ۲۰۱۴ تا ۲۷ نوامبر ۲۰۱۸ و تصاویر ALOS PALSAR در بازه زمانی ۱۹ ژانویه ۲۰۰۷ تا ۲۰ ژانویه ۲۰۱۱ جهت محاسبه فرونشست منطقه دهلی^۷ استفاده شده است، در این مقاله میانگین جابه‌جایی‌های این منطقه را با داده Cosmo-skymed، ۱۵ میلی‌متر در سال، حداکثر جابه‌جایی محاسبه شده از تصاویر ALOS، ۱۰ تا ۱۸ میلی‌متر در سال و جابه‌جایی‌های حاصل از تصاویر سنتینل، ۲ تا ۱۶ میلی‌متر در سال آورده شده است (ملیک و همکاران، ۲۰۲۱)^۸. فرونشست شهر چانگچون جین را با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ محاسبه شده و نتایج این مقاله نشان داده است که حداکثر نرخ سالانه فرونشست این منطقه، ۲۰/۴۵ میلی‌متر و میانگین نرخ سالانه فرونشست ۲/۹۸ میلی‌متر است، همچنین در این تحقیق همبستگی بین نتایج PSInSAR و داده‌های ترازیابی درجه ۲، ۰/۶۷ به دست آمده که این مقدار همبستگی به قابل اطمینان بودن نتایج PSInSAR اشاره دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱)^۹. در تحقیقی دیگر نقشه فرونشست در جینگهای^{۱۰} چین را با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر تراسار^{۱۱} تهیه شده است، بیشترین مقدار فرونشست در سال ۲۰۰۹ در قسمت شرق منطقه مطالعاتی اتفاق افتاده که این مقدار بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر، در بخش شمالی حدود ۲۲ تا ۳۲ میلی‌متر و در مناطق مسکونی وسیع مقدار فرونشست بین ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر گزارش شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۰)^{۱۲}. فرونشست منطقه اولسان^{۱۳} با روش PSInSAR و SBAS در بازه ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ بررسی کرده‌اند نتایج این مقاله نشان داده است که حداکثر نرخ فرونشست به دست آمده از روش SBAS، ۴/۴

1 Biswas et al.

2 Chang et al.

3 Khorrani et al.

4 Hong Kong-Zhuhai-Macao

5 Sentinel-1A

6 Xiong et al.

7 Dehli NCR

8 Malik et al.

9 Wang et al.

10 Jinghai

11 TerraSAR-X

12 Liu et al.

13 Ulsan

سانتی متر در سال و از روش PSInSAR، ۴ سانتی متر است (جو و همکاران، ۲۰۱۱)^۱. نرخ فرونشست در مکزیک در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ با داده‌های ماهواره انویست^۲ با استفاده از روش PSInSAR، ۸ میلی متر در سال محاسبه کرده‌اند، نتایج نشان داده که حداکثر فرونشست در اطراف چاه‌ها است (بکسی و همکاران، ۲۰۱۹)^۳. تحقیقات متفاوتی جهت بررسی روابط بین فرونشست و عوامل تأثیرگذار بر آن انجام شده است، در بعضی از این تحقیقات تنها تأثیر عامل تغییرات سطح آب زیرزمینی بر پدیده فرونشست بررسی و بدون توجه به تأثیرات سایر عوامل، بین مقادیر فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی رابطه خطی ارائه شده است. در تحقیقی نرخ فرونشست در بندر اینچئون^۴ واقع در بوسان^۵ کره را با JERS-1^۶ با استفاده از روش PSInSAR، ۳۰ میلی متر در سال و در منطقه ایستگاه راه‌آهن ژوئان^۷، ۱۵ میلی متر در سال تخمین زده‌اند، در نهایت در این مقاله دلیل اصلی فرونشست در این منطقه ساحلی را افزایش سطح آب دریا دانسته‌اند (کیم و همکاران، ۲۰۰۷)^۸. در پژوهشی دیگر نقشه فرونشست دشت لیائوها^۹ در چین را با تصاویر ALOS/PALSAR با استفاده از روش PSInSAR در بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ تهیه شده است، طبق نقشه ارائه شده در این مقاله حداکثر نرخ فرونشست در این منطقه ۲۳۶ میلی متر در سال و کل مقدار فرونشست در ۴ سال، ۷۹۹ میلی متر است. همچنین در این تحقیق نتیجه‌گیری شده است که بین فرونشست و مناطق استخراج نفت همبستگی وجود دارد و کشف شده که مقادیر بالای فرونشست اکثراً در مناطقی است که چاه‌های نفت وجود دارند (سان و همکاران، ۲۰۱۷)^{۱۰}. همچنین تحقیقی ارائه شده است که حداکثر نرخ فرونشست در شهر پیزا^{۱۱} ایتالیا را با دو مجموعه داده‌ی ERS 1/2^{۱۲} و انویست با استفاده از روش PSInSAR در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰، ۲۰ میلی متر در سال برای هر دو داده به دست آورده‌اند، مطالعاتی که روی بخش شرق این منطقه انجام داده‌اند نشان داده است که بین قدمت ساختمان‌ها و نرخ فرونشست همبستگی وجود دارد، به این صورت که در ساختمان‌های با قدمت کمتر نرخ فرونشست کمتری تخمین زده شده است (سولاری و همکاران، ۲۰۱۶)^{۱۳}. در تحقیقی دیگر فرونشست در دشت بیجینگ^{۱۴} چین در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ با استفاده از روش PSInSAR به دست آورده شده و سپس ارتباط بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ در چهار آبخوان بررسی کرده‌اند. حداکثر مقادیر

1 Jo et al.

2 Envisat SAR

3 Békési et al.

4 Incheon

5 Busan

6 Japanese Earth Resource Satellite-1

7 Juan

8 Kim et al.

9 Liaohé

10 Sun et al

11 Pisa

12 European Remote-Sensing Satellite

13 Solari et al.

14 Beijing

کرولیشن ارائه شده در این مقاله برای این چهار آبخوان، ۰/۳۵، ۰/۳۳، ۰/۸ و ۰/۵ است (چن و همکاران، ۲۰۲۰).^۱ در مقاله‌ای فرونشست تایوان با جی‌پی‌اس محاسبه و سپس رابطه خطی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۶ را به دست آورده‌اند، در این مقاله بر اساس نتایج، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را تأثیرگذارترین عامل در رخداد فرونشست این منطقه دانسته‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۰). فرونشست سمارنگ^۲ را در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ را با استفاده از روش PSInSAR و تصاویر سنتینل محاسبه شده که حداکثر فرونشست در منطقه ۴/۵- سانتیمتر است، سپس همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را ۴۷/۵۸ درصد به دست آورده‌اند (فیرداوس و همکاران، ۲۰۱۸).^۳ در پژوهشی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را بررسی شده است، در این تحقیق ابتدا فرونشست را با استفاده از روش تداخل سنجی راداری محاسبه و سپس همبستگی بین نرخ فرونشست و نرخ افت سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ را محاسبه کرده‌اند (مقادیر همبستگی در این بازه زمانی بین ۰/۶ تا ۰/۹) و رابطه خطی بین این دو پارامتر را به دست آورده‌اند (زارعی و همکاران، ۱۳۹۹). بر خلاف مقالات ذکر شده که رابطه خطی و مستقیم بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ارائه داده‌اند، نتایج این تحقیق در مورد رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان نشان می‌دهد که در همه مناطق نمی‌توان رابطه خطی بین فرونشست و سطح آب زیرزمینی به دست آورد و مقادیر همبستگی بین این دو پارامتر با توجه به ویژگی‌های منطقه تغییر می‌کند. به دلیل اینکه فرونشست تحت تأثیر چندین عامل طبیعی و انسانی است نباید تنها اثر یک عامل بررسی شود.

۲- منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان در مرکز ایران واقع شده است، این استان با مساحتی حدود ۱۰۵۹۳۷ کیلومتر مربع بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، این استان دارای ۱۷ شهرستان، ۶۰ شهر، ۳۷ بخش و ۱۱۶ دهستان و مرکز آن اصفهان است. اصفهان منطقه‌ای خشک و کم باران است که مستعد وقوع فرونشست است که دو دلیل مهم تأثیرگذار عدم مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و عدم جریان دائمی زاینده‌رود باعث تشدید آن شده است. حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۹ درجه سانتی‌گراد است که تابستان‌هایی گرم و خشک را می‌سازد و در زمستان حداکثر به ۱۸- درجه می‌رسد. اصفهان یکی از کلان‌شهرهای ایران است و به دلیل بناهای تاریخی متعدد دارای شهرت جهانی است. برای حفظ و مراقبت از بناهای تاریخی و به دلیل اهمیت و وسعت و جمعیت این منطقه، بررسی و مطالعه‌ی فرونشست و جلوگیری از پیشروی آن در مناطق مسکونی حیاتی است. البته

1 Chen et al.

2 Semarang City, Indonesia

3 Firdaus et al.

در سال‌های اخیر مشاهداتی از وجود فرونشست در نزدیکی آثار تاریخی وجود دارد و در آینده آثار تاریخی در معرض خطر جدی فرونشست قرار خواهد گرفت. مساحت کل منطقه مورد مطالعه این تحقیق ۷۵۱۶ کیلومتر مربع است (شکل ۱).

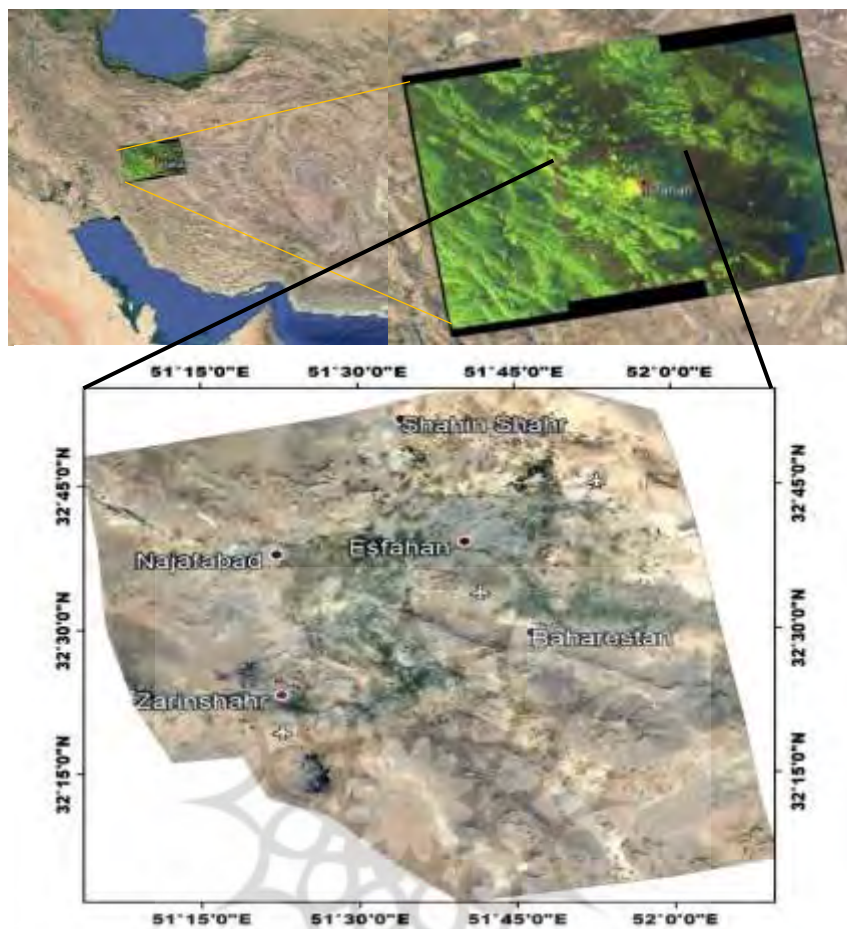
۳- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ۷۳ تصویر راداری سنتینل با فرمت SLC در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ در عبور بالاگذر^۱ در مسیر^۲ شماره ۲۸ ماهواره است، این تصاویر در باند C معادل طول موج ۵/۵۴ سانتی‌متر و فرکانس ۵/۴۰۵ گیگا هرتز، با زاویه فرود $39/5058^\circ$ با دو پلاریزاسیون VV, VH در مد IW^۳ و عرض تصویربرداری ۲۵۰ کیلومتر با قدرت تفکیک مکانی $13/95 \times 3/67$ متر اخذ شده‌اند. از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی سه ثانیه (۹۰ متر) در روند پردازش PSInSAR، برای محاسبه فرونشست استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده در پژوهش

| داده | تعداد تصاویر | بازه زمانی تصاویر | فرمت داده | مدت تصویربرداری | شماره مسیر | جهت مدار | قدرت تفکیک در جهت آزمون (متر) | قدرت تفکیک در جهت رنج (متر) |
|----------|--------------|-------------------|-----------|-----------------|------------|----------|-------------------------------|-----------------------------|
| سنتینل ۱ | ۷۳ | ۲۰۱۴-۲۰۲۰ | SLC | IW | ۲۸ | بالا گذر | ۱۳/۹۵ | ۳/۶۷ |

1 Ascending
2 Track
3 Interferometric Wide



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه پژوهش

برای حذف اثرات فصلی در همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در این تحقیق تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان‌ها و فرونشست در ماه شهریور سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ استفاده شده است. در شهریور ماه مقدار بارندگی منطقه مورد مطالعه و برداشت از آبخوان حداقل است، بنابراین این ماه بهترین ماه برای بررسی سطح آب زیرزمینی است. از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه اصفهان برای بررسی خصوصیات جنس خاک منطقه و تأثیر آن بر فرونشست استفاده شد. با توجه به این نقشه جنس خاک در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش آبرفت، شیل، تراس و سنگ‌آهک است. تمام چاه‌های پیزومتری مورد استفاده در این تحقیق در مناطق با جنس آبرفت و تراس واقع شده‌اند.

۴- تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری تکنیکی است که از تداخل امواج الکترومغناطیس جهت رسیدن به اطلاعات مفید مانند تهیه مدل رقومی ارتفاعی، میزان جابه‌جایی زمین و ... استفاده می‌کند. این تکنیک از اختلاف فاز زوج تصویر راداری استفاده می‌کند، بنابراین پارامتر فاز امواج نقش اساسی را در این تکنیک دارند. روش تداخل سنجی تفاضلی مرسوم^۱ و روش‌های تحلیل سری زمانی مانند طول خط مبنای کوتاه^۲ و تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی از روش‌های تداخل سنجی تفاضلی است. با وجود اینکه روش تداخل سنجی تفاضلی مرسوم^۳ جابه‌جایی‌های زمین را با دقت خوبی اندازه‌گیری می‌کند، نمی‌تواند نقاطی را که بازپراکنش آن‌ها با زمان تغییر می‌کند به دلیل عدم همبستگی‌های زمانی مورد بررسی قرار دهد. مناطق پوشیده از برف، زمین‌های با پوشش گیاهی و جنگل‌ها از جمله مناطق با مشکل عدم همبستگی هستند. با توجه به اینکه در روش‌های تحلیل سری زمانی از مجموعه‌ای از تداخل‌نماها در یک بازه زمانی استفاده می‌شود، عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثرات اتمسفر کاهش می‌یابد بنابراین این دسته از روش‌ها از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی مرسوم دقیق‌تر هستند.

۴-۱- تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم (PSInSAR)

از جمله محدودیت‌های روش تداخل سنجی راداری مرسوم، عدم هم‌دوسی تصاویر مانع از تولید تداخل‌نماهای تفاضلی می‌شود، خطای توپوگرافی باقیمانده در تداخل‌نما (بزرگی این خطا به کیفیت DEM و خط مبنای قائم وابسته است) می‌باشد که این محدودیت‌ها سبب توسعه روش PSInSAR شده است. روش PSInSAR استاندارد را اولین بار فرتی و همکاران (۲۰۰۱) مطرح کردند، این روش با هدف غلبه بر محدودیت‌های تکنیک تداخل سنجی معمول (عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثر اتمسفر) با استفاده از نقاط هم‌دوس در بازه زمانی آنالیز به دقت پایش میلی‌متری فرونشست می‌رسد. در صورتی که تراکم نقاط پراکنشگر کم باشد، تخمین فاز اتمسفر و حذف آن امکان‌پذیر نیست (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱)^۴. روش PSInSAR به‌عنوان یک ابزار قوی برای تخمین جابه‌جایی‌های کوچک در مناطق شهری بزرگ مقیاس در طول بازه‌ی زمانی‌های بلندمدت یا کوتاه‌مدت شناخته شده است. پراکنشگرهای دائمی نقاطی است که در طول زمان فاز آن‌ها ثابت می‌ماند، با استفاده از این پراکنشگرهای دائمی فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقیمانده توپوگرافی و نویز حذف می‌شود. اشکال این روش فقدان پیوستگی بین داده‌هاست، داده‌ها مجموعه‌ای از نقاط است که پراکنندگی آن‌ها به شکل و کاربری منطقه بستگی دارد، این نقاط در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ فراوان ولی در مناطق با پوشش گیاهی اندک است، در نتیجه روش

1 Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)

2 Small Baseline Subset (SBAS)

3 Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)

4 Ferretti et al.

PSInSAR بهترین عملکرد را در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ دارد (اوستیر و همکاران، ۲۰۰۷)^۱. داده‌های مورد نیاز، $n+1$ تصویر راداری منطقه با فاصله زمانی‌های مناسب است که یک تصویر به‌عنوان تصویر پایه (master) و n تصویر به‌عنوان تصاویر پیرو (slave) در نظر گرفته می‌شوند. تصویر پایه بر این اساس انتخاب می‌شود که عدم همبستگی مکانی و زمانی تصاویر مینیمم شود به‌عبارت‌دیگر به ازای تداخل‌نماهای تشکیل شده بر مبنای آن، مقدار هم‌دوسی جمع‌ی آن بیشینه شود. بعد از انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی در مجموعه تداخل‌نماها با یکی از سه روش پراکندگی دامنه بر مبنای شاخص پراکندگی دامنه، روش مبتنی بر پایداری فاز و روش مبتنی بر همبستگی، بین این نقاط شبکه‌ای با استفاده از روش مثلث‌بندی دلونی^۲ تشکیل می‌شود. این شبکه اساس تخمین فاز ناشی از اتمسفر و افزایش نقاط PS است، به علت مجاور بودن نقاط در شبکه و همبسته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین دو پیکسل همسایه فاز اتمسفر حذف خواهد شد (هانسن^۳، ۲۰۰۱). در مثلث‌بندی بین نقاط اگر طول اتصالی از همبستگی اتمسفر بیشتر باشد آن اتصال حذف می‌شود تا افزونگی اتصالات کاهش یابد و دقت تخمین جابه‌جایی زمین افزایش یابد.

۵- نتایج تحقیق

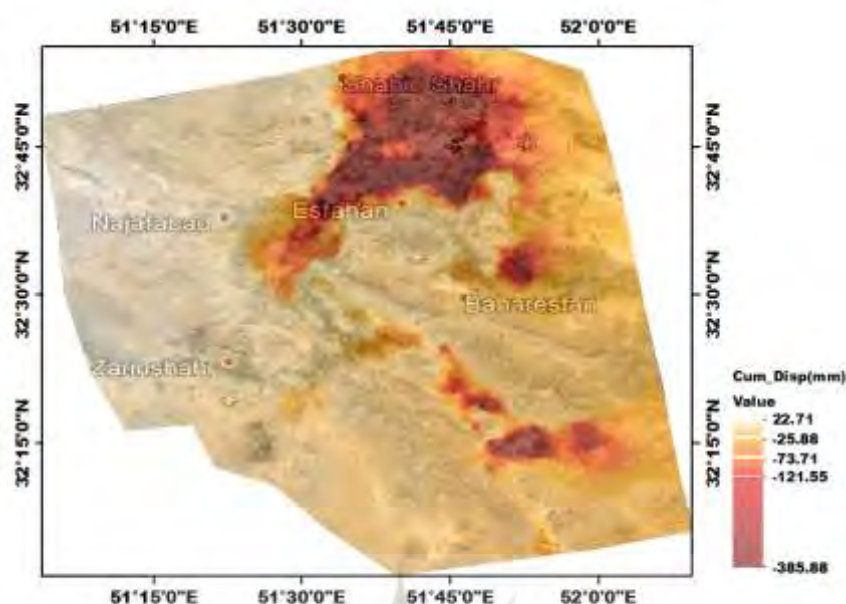
به‌منظور بررسی جابه‌جایی‌های زمین در اصفهان و چند منطقه اطراف آن، نقشه جابه‌جایی با ۷۳ تصویر Sentinel-A از روش PSInSAR تهیه شد. حداکثر مقدار جمع‌ی فرونشست منطقه اصفهان در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، تقریباً به ۴۰ سانتی‌متر رسیده است؛ با توجه به نقشه زمین‌شناسی و نقشه فرونشست جمع‌ی منطقه، مشخص است که فرونشست در مناطق با جنس آبرفت و تراس اتفاق افتاده است و در مناطق با جنس شیل و سنگ‌آهک فرونشست مشاهده نشده است (شکل ۲).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1 Oštir et al.

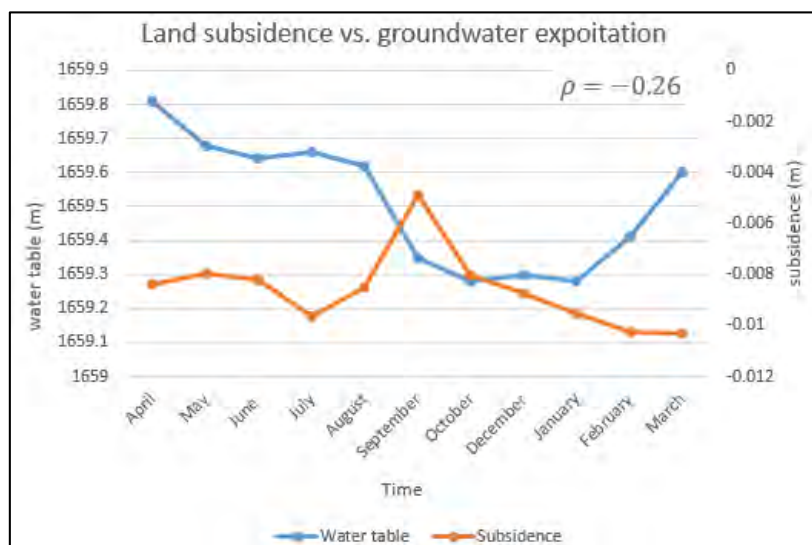
2 Delaunay triangulation

3 Hanssen

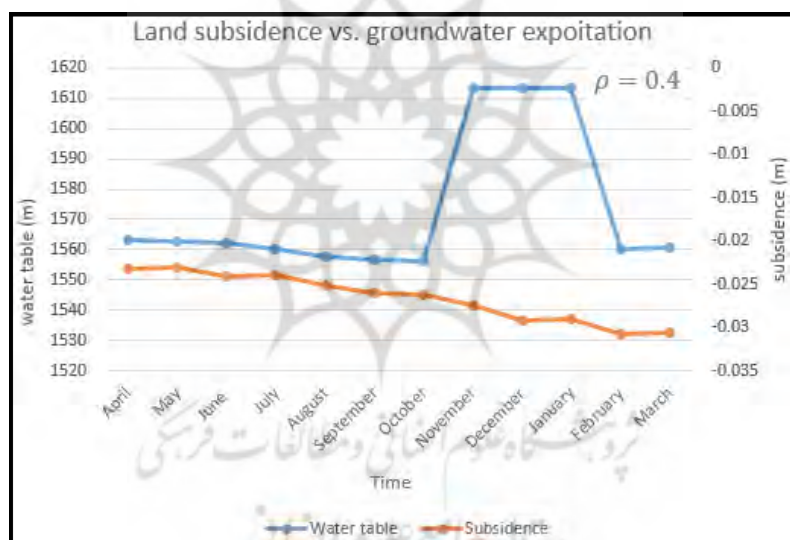


شکل ۲- مقادیر تجمعی فرونشست منطقه مورد مطالعه در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

سری زمانی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۷ در چاه جاده پرزان در دشت مهبیار جنوبی - دشت آسمان و کروچ و شرودان دشت فلاورجان رسم شده است (شکل ۳ و شکل ۴)، همبستگی این دو پارامتر در چاه جاده پرزان در طول یک سال ۰/۲۶- و در کروچ و شرودان ۰/۴ است که این نشان می‌دهد در این بازه یک ساله این دو پارامتر رفتار مستقلی دارند. به ازای افت سطح آب زیرزمینی در یک چاه، ممکن است فرونشست با تأخیر زمانی اتفاق بیفتد و دقیقاً همزمان با افت آب، فرونشست مشاهده نشود که البته در این مسئله جنس خاک منطقه در رخداد فرونشست تأثیرگذار است. نوسانات سطح آب در ماه‌های مختلف به دلیل برداشت‌ها و بارندگی نیز در این همبستگی تأثیرگذار است، بنابراین بازه زمانی یک سال برای بررسی رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی مناسب نیست.



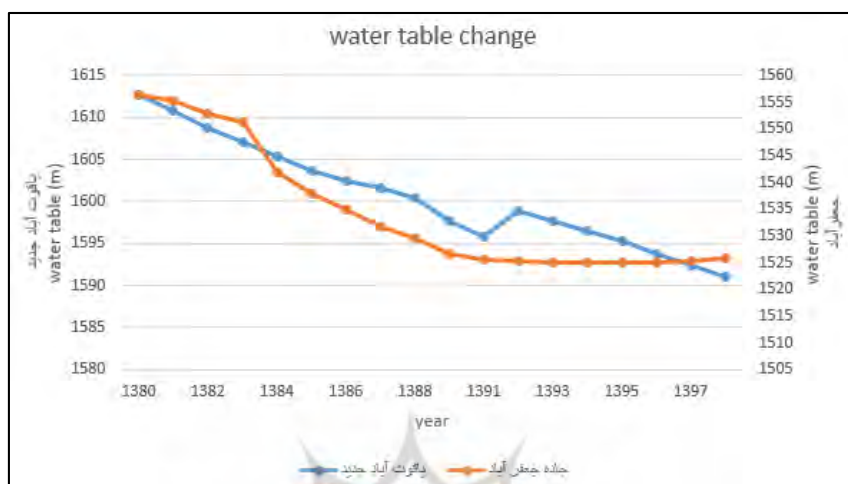
شکل ۳- سری زمانی تغییرات فرونشست و سطح آب زیرزمینی چاه پرزان در سال ۱۳۹۷



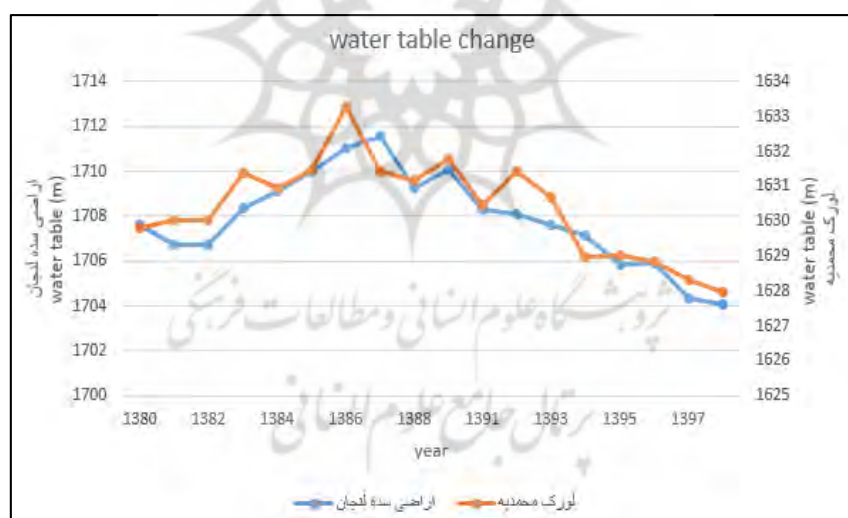
شکل ۴- سری زمانی تغییرات فرونشست و سطح آب زیرزمینی چاه کروچ و شروان در سال ۱۳۹۷

برای بررسی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری، نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی چند نمونه چاه در دشت‌های منطقه مورد مطالعه رسم شد. نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه یاقوت آباد جدید و چاه جاده جعفرآباد در محدوده اصفهان-برخوار و چاه لورک محمدیه و اراضی سده لنجان در دشت لنجان در شکل ۵ و شکل ۶ آورده شده است، نمودارها بیانگر روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها است، مقدار

کاهش سطح آب زیرزمینی چاه جاده جعفرآباد ۲۰/۲۶- متر و در یاقوت آباد جدید ۳۱/۱۱- متر، در لورک محمدیه ۱/۸۲- متر و در اراضی سده لنجان ۳/۵۵- متر در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ است.



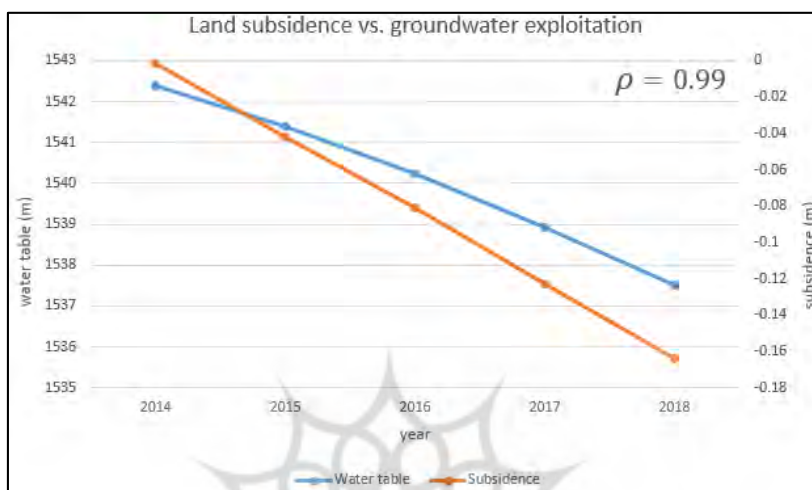
شکل ۵- تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه جاده جعفرآباد و یاقوت آباد جدید



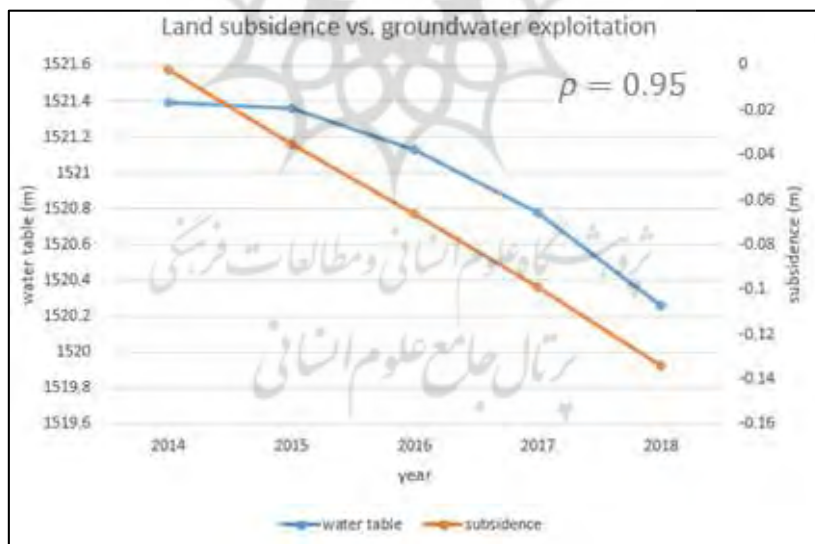
شکل ۶- تغییرات سطح آب زیرزمینی لورک محمدیه و اراضی سده لنجان در دشت لنجان

برای مقایسه روند تغییر سطح آب زیرزمینی و فرونشست برای نمونه در محدوده اصفهان-برخوار چاه یونارت و چاه سه راهی سهل آباد، رفتار افت سطح آب زیرزمینی و رفتار فرونشست در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۷ و شکل ۸ آورده شده است، نمودارها نشان می دهند که در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در یونارت به ازای ۴/۸۹ متر افت سطح آب

زیرزمینی ۱۶ سانتیمتر فرونشست و در سه راهی سهل آباد به ازای ۱/۱۳ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۱۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در یونارت ۰/۹۹ و در سه راهی سهل آباد ۰/۹۵ است.



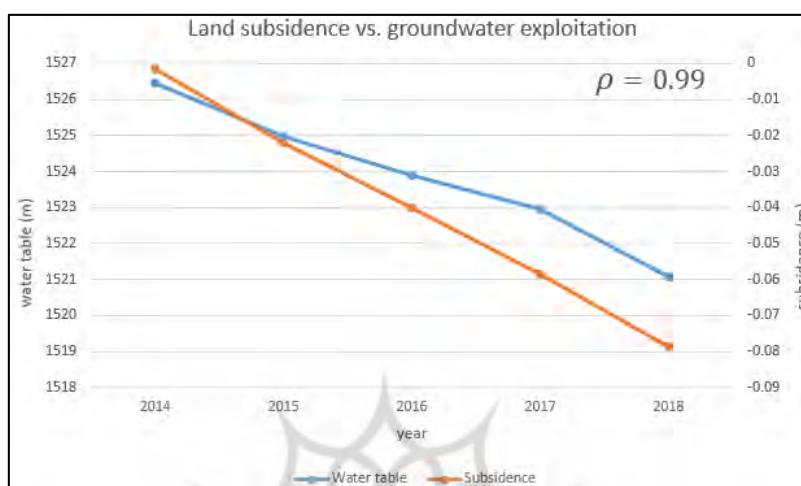
شکل ۷- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان برخوار (یونارت)



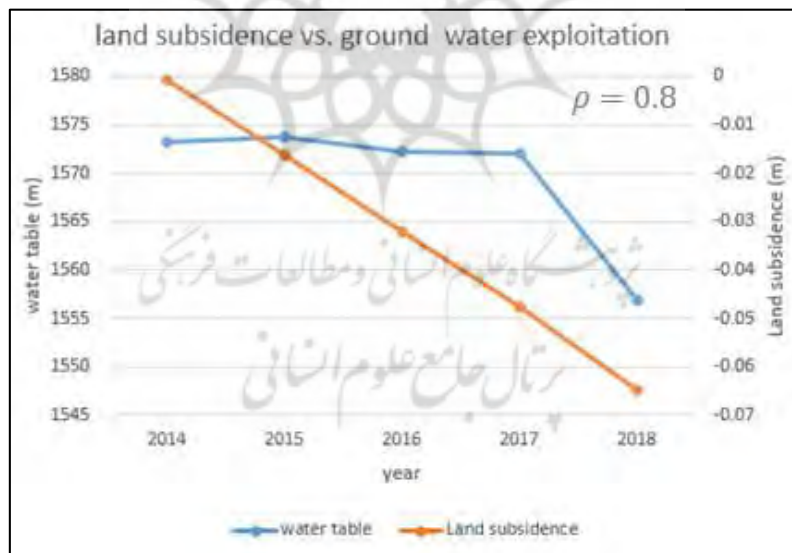
شکل ۸- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان برخوار (سه راهی سهل آباد)

در محدوده اصفهان کوهپایه سگری (جوزدان) و محدوده فلاورجان (کروچ و شروان) رفتار تغییرات سطح آب زیرزمینی و رفتار فرونشست در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است، نمودارها نشان

می‌دهند که در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در جوزدان به ازای ۵/۳۹ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۸ سانتیمتر فرونشست، در کروچ و شروان به ازای ۱۶/۲۵ متر افت آب زیرزمینی، ۷ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ و در کروچ و شروان ۰/۸ است.



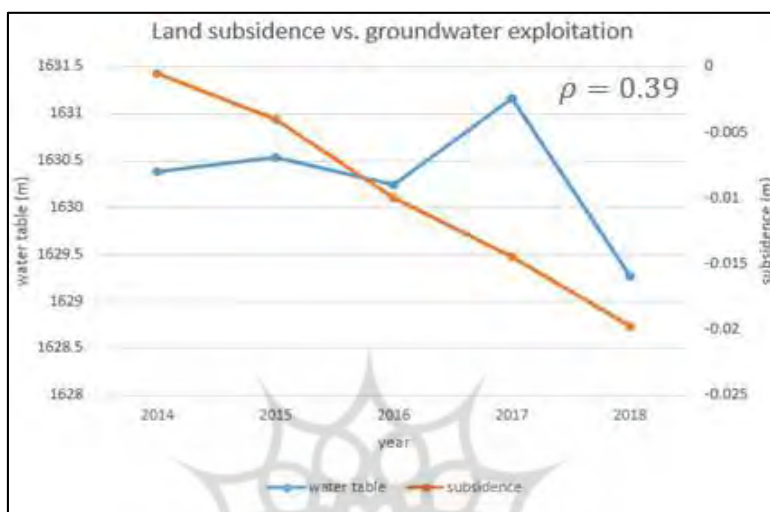
شکل ۹- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه کوهپایه سگزی (جوزدان)



شکل ۱۰- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در کروچ و شروان

در محدوده مهیار جنوبی-دشت آسمان (شمال آجر تاکی) و محدوده نجف‌آباد (غرب درچه) نمودار خطی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ رسم شده است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲). در شمال

آجر تاکی به ازای ۱/۱۳ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۲ سانتیمتر فرونشست و در غرب درچه به ازای ۶ سانتیمتر افت سطح آب زیرزمینی، ۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در منطقه شمال آجر تاکی ۰/۳۹ و در غرب درچه ۰/۰۸ است.



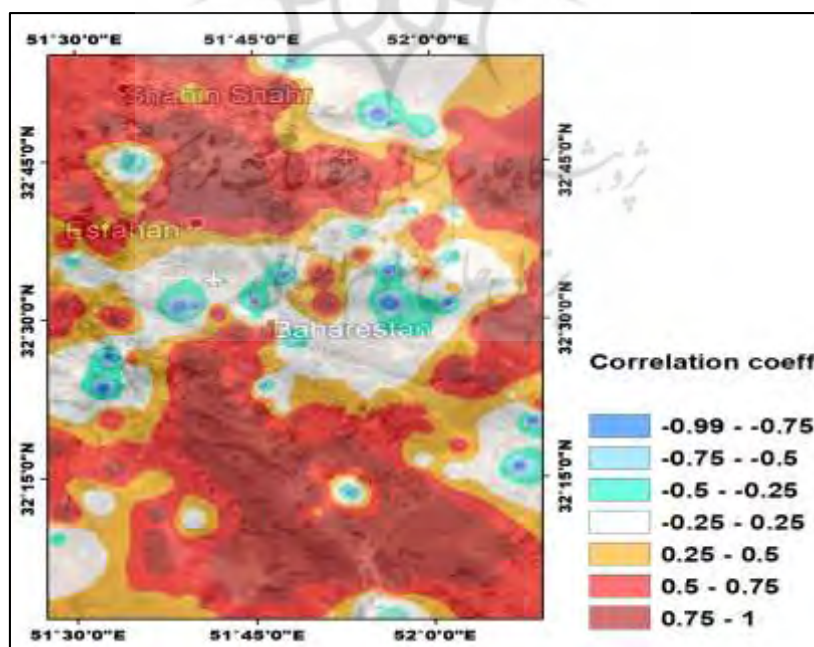
شکل ۱۱- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مهبیار جنوبی-دشت آسمان (شمال آجر تاکی)



شکل ۱۲- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه نجف آباد (غرب درچه)

تمام پیزومترها در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در مناطق با خاک آبرفت و تراس هستند به همین دلیل افت سطح آب زیرزمینی باعث می شود، آب از بین ذرات خاک برداشته شده و تنش مؤثر وارد بر ذرات خاک افزایش یافته

و خاک متراکم می‌شود در نتیجه فرورانشست در مناطق با خاک آبرفتی و تراس مشاهده شده است ولی در مناطق با جنس شیل و سنگ آهک به دلیل تحکیم و تراکم‌پذیری پایین آن‌ها فرورانشست در این مناطق مشاهده نشده است. مقادیر همبستگی فرورانشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۱۳ شکل ۱۳ آورده شده است، طبق این نقشه ۱۲٪ همبستگی‌های بین ۰/۲۵- تا ۰/۲۵+ که در این بازه همبستگی بین دو پارامتر وجود ندارد، بنابراین در این مناطق علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی عوامل دیگری مثل جنس خاک، شیب، جهت شیب گسل و ... در رخداد فرورانشست تأثیرگذار هستند. ۹٪ همبستگی ضعیف و مثبت (همبستگی‌های بین ۰/۲۵+ تا ۰/۵+)، ۱۲٪ همبستگی متوسط و مثبت (همبستگی بین ۰/۵+ تا ۰/۷۵+) و ۴۸٪ همبستگی قوی و مثبت (همبستگی بین ۰/۷۵+ تا ۱+)، ۶٪ همبستگی ضعیف و منفی (۰/۵- تا ۰/۲۵-)، ۴٪ همبستگی متوسط و منفی (۰/۷۵- تا ۰/۵-) و ۹٪ همبستگی قوی و منفی (۱- تا ۰/۷۵-) بین فرورانشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهند. محدوده‌ها با همبستگی قابل توجه مثبت (۰/۵+ تا ۱) به این معنی است که در این مناطق به ازای افت سطح آب زیرزمینی فرورانشست در منطقه اتفاق افتاده است و جنس خاک منطقه هم آبرفت و رس بوده است که باعث شده است با تخلیه آب از منافذ خاک، خاک متراکم شده و فرورانشست اتفاق بیفتد. در صورتی که خاک منطقه از نوع کانی رس باشد بنابراین رس فعال است در صورت متراکم شدن غیرقابل نفوذ می‌شوند و آبخوان قابلیت احیا نخواهد داشت ولی در صورتی که از نظر دانه‌بندی، رس گفته شود، ممکن است خاک ریزدانه باشد ولی از نوع کانی رس نباشد و غیرفعال باشد در این صورت ممکن است قابلیت نفوذپذیری داشته باشد و دوباره آب در آن نفوذ کند.



شکل ۱۳- ضریب همبستگی بین فرورانشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

در این تحقیق تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری دشت‌های اصفهان-برخوار، لنجانان، مهیار جنوبی، فلاورجان، نجف‌آباد و کوهپایه سگزی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ و همچنین همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در منطقه اصفهان آورده شد. مقادیر همبستگی بین این دو پارامتر نشان می‌دهد که با توجه به اینکه عوامل مختلفی مثل جنس خاک منطقه، شیب، جهت شیب، ارتفاع و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و ... در رخداد پدیده فرونشست دخالت دارند، بررسی تنها یک عامل روش صحیحی برای پی بردن به علل به وجود آمدن فرونشست نیست. ارائه روابط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست ممکن است برای یک منطقه خاص قابل قبول باشد ولی در حالت کلی باید خصوصیات ویژه هر منطقه مثل جنس خاک، گسل، شیب و ... هم در کنار تغییرات سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شود، برای مثال در منطقه‌ای که جنس خاک، خاک ریزدانه باشد، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب فرونشست می‌شود و ممکن است همبستگی بین این دو پارامتر بالا و رابطه خطی به دست آید ولی در منطقه‌ای با جنس خاک درشت دانه، ممکن است در صورت افت زیاد سطح آب زیرزمینی فرونشست کمتری مشاهده شود. رابطه خطی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین فقط در حالت تئوری امکان‌پذیر است ولی در واقعیت رابطه فرونشست با چندین عامل مؤثر بر آن پیچیده‌تر از رابطه خطی است و عوامل مختلف مؤثر بر فرونشست باید همزمان بررسی شوند. تأخیر زمانی بین افت سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست هم در همبستگی بین این دو پارامتر مؤثر است، بنابراین رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی باید در بازه زمانی طولانی مدت بررسی شود. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، در مناطقی که همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ضعیف است یا همبستگی وجود ندارد، عوامل تأثیرگذار دیگر باید مورد بررسی قرار گیرند تا با احتمال بیشتری بتوان دلیل فرونشست در این مناطق را شناسایی کرد. همان‌طور که در نتایج هم آورده شده است در بعضی از این مناطق با وجود افزایش سطح آب همچنان فرونشست زمین ادامه داشته است که این می‌تواند نشان‌دهنده‌ی عدم برگشت‌پذیر بودن منطقه نسبت به فرونشست باشد به عبارت دیگر حتی با احیای مجدد منابع آب زیرزمینی در این مناطق نمی‌توان شاهد بهبود وضعیت فرونشست بود. در این موارد باید دانه‌شناسی خاک و کانی‌شناسی انجام شود به‌طور مثال در صورتی که خاک منطقه از نظر کانی‌شناسی، رس باشد، این رس فعال است بنابراین در صورت برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی خاک متراکم شده و قابلیت جذب آب را نخواهد داشت و فرونشست رخ می‌دهد. در صورتی که از نظر دانه‌بندی، منطقه از رس باشد، این رس غیرفعال است و نسبت به خاک رس فعال، قابلیت جذب آب بیشتری دارد. در این تحقیق نشان داده شد که بررسی رابطه فرونشست و تنها یک عامل تأثیرگذار بر آن، صحیح نیست و در یافتن علت رخداد فرونشست کمکی نمی‌کند، زیرا پدیده فرونشست همزمان ممکن است تحت تأثیر چند عامل در منطقه مورد نظر به وجود آید. پیشنهاد می‌شود برای

پی بردن به دلایل رخداد فرونشست از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس بالاتر و اطلاعات مربوط به کانی‌شناسی و دانه‌بندی خاک منطقه استفاده و همچنین تأثیر عوامل دیگر مثل گسل و شیب، ارتفاع منطقه و ... همزمان بررسی شوند.

کتابنامه

زارعی، زاده رسول، صدیقی و همکاران؛ ۱۳۹۹. «تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب‌زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس)». نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، صص ۱۶۸-۱۸۲.

علیزاده، امین؛ ۱۳۶۷. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات آستان قدس رضوی، بنیاد فرهنگی رضوی.

- A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca., 2001. "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
- A. Rucci, A. Ferretti, A. M. Guarnieri, and F. Rocca., 2012. "Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements," *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 156-163, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030>.
- A. Tamburini, M. Bianchi, C. Giannico, and F. Novali., 2010. "Retrieving surface deformation by PSInSAR™ technology: A powerful tool in reservoir monitoring," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, pp. 928-937.
- B. Chen, H. Gong, Y. Chen, X. Li, C. Zhou, K. Lei, L. Zhu, L. Duan, and X. Zhao., 2020. "Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China," *Science of the Total Environment*, vol. 735, pp. 139111.
- C. H. Chen, C.-H. Wang, Y.-J. Hsu, S.-B. Yu, and L.-C. Kuo., 2010. "Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan," *Engineering Geology*, vol. 115, no. 1-2, pp. 122-131.
- Chung-Pai Chang, Jiun-Yee Yen, Andrew Hooper, Fong-Min Chou, Yi-An Chen, Chin-Shyong Hou, Wei-Chia Hung, and Ming-Sheng Lin. 2010. "Monitoring of Surface Deformation in Northern Taiwan Using DInSAR and PSInSAR Techniques," *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, doi: 10.3319/TAO.2009.11.20.01(TH).
- E. Békési, P. A. Fokker, J. E. Martins, J. Limberger, D. Bonté, and J.-D. Van Wees., 2019. "Production-induced subsidence at the Los Humeros geothermal field inferred from PS-InSAR," *geofluids*.
- H. S. Firdaus, Y. Prasetyo, and D. Diyanah., 2018. "Spatial Correlation Analysis of Land Subsidence and The Water Table Changes in Unconfined Aquifers Using Sentinel 1-SAR Image and Geographic Information Systems (Case Study: Semarang City-Indonesia)." pp. 03022.
- H. Sun, Q. Zhang, C. Zhao, C. Yang, Q. Sun, and W. Chen., 2017. "Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique," *Remote sensing of environment*, vol. 188, pp. 73-84.
- H. Wang, J. Mao, S. Zhao, X. Ning, and Q. Wu., 2021. "PS-InSAR based surface subsidence analysis in Changchun metropolitan area," in *E3S Web of Conferences*.
- J.-s. Kim, D.-J. Kim, S.-W. Kim, J.-S. Won, and W. M. Moon., 2007. "Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR," *Geosciences Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 59.

- Jo, M.J., Won, J.S. and Kim, S.W., 2011, September. A time-series observation of ground subsidence at Ulsan area using SAR interferometry. In *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)* (pp. 1-3). IEEE.
- K. Biswas, D. Chakravarty, P. Mitra, and A. Misra., 2018. "Spatial Correlation Based Psinsar Technique to Estimate Ground Deformation in las Vegas Region, Us," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2251-225.
- K. Malik, D. Kumar, D. Perissin, and B. Pradhan., 2021. "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data," *Advances in Space Research*.
- K. Oštir, and M. Komac., 2007. "PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations a case of NW Slovenia," *Geologija*, vol. 50, no. 1, pp. 77-96.
- L. Solari, A. Ciampalini, F. Raspini, S. Bianchini, and S. Moretti., 2016. "PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, pp. 120.
- Liu, G., Jia, H., Zhang, R., Cen, M. and Zhang, T., 2010. Subsidence detection by PSInSAR based on high resolution TerraSAR-X images. *Progress In Electromagnetics Research*, 11.
- M. Khorrami, B. Alizadeh, E. Ghasemi Tousi, M. Shakerian, Y. Maghsoudi, and P. Rahgozar. 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*, vol. 11, p. 377.
- R. F. Hanssen., 2001. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*: Springer Science & Business Media.
- S. Xiong, C. Wang, X. Qin, B. Zhang, and Q. Li., 2021. "Time-Series Analysis on Persistent Scatter-Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) Derived Displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A Observations," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, pp. 546.