Quantitative evaluation of land subsidence in the northern part of Kashmir aquifer using radar interferometry approach and PSI drought index

Amin Moslemzadeh[a*], Hadi Memarian[b], Seyed Mohammad Tajbakhsh[c], Moretza Akbari[d]

[a]*Amin Moslemzadeh: MS.c. Department of watershed, Faculty of Natural Resources. Birjand University. Birjand, Iran.*
[b]*Hadi Memarian: Associate professor, Department of watershed, Faculty of Natural. Birjand University. Birjand, Iran.*
[c]*Seyed Mohammad Tajbakhsh: Associate professor, Department of watershed, Faculty of Natural Resources. Birjand University. Birjand, Iran.*
[d]*Moretza Akbari: Associate professor, Department of Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Environment. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.*

Research Full Paper
Article History (Received: 2023/07/12 Accepted: 2024/02/8)

Extended abstract

1- Introduction

Land subsidence, as one of the environmental hazards, is happening in many countries of the world. This phenomenon, if not properly managed, can cause irreparable damage. In this regard, Iran, as one of the countries that has been facing the risk of land subsidence for several decades, will probably be affected by the damage of this phenomenon in the near future. Damages including; Damage to agricultural lands, buildings, roads, bridges, pipelines, etc. Various activities such as; Mining, excessive extraction of underground water, etc., have intensified the process of land subsidence to the point where it has become one of the most important hazards of geomorphology. Identifying the boundaries, the pattern of land subsidence and estimating its intensity will play a significant role in the management and control of this phenomenon. Therefore, it is necessary to take measures to prevent further problems. Therefore, the important goal of this research is to evaluate the subsidence of the Kashmer plain with the radar interferometry method and its relationship with the groundwater drought. Maybe the results of this research can help the executive managers and planners of land and soil resources in the field of protection and management of water resources to prevent land degradation.

2- Methodology

In this research, radar interferometry was used to monitor subsidence, and Kendall and Pettit's time series analysis tests were used to evaluate groundwater drought. Also, to calculate the density of wells, kernel density estimation was used, which transforms and determines the position of points in space in a continuous density function in the studied area. Finally, to determine the correlation coefficient and covariance between the existing rasters, as well as some statistical parameters such as the minimum, maximum, average and standard deviation values for each raster, Band Collection Statistic analyzer, which is considered a part of multi variate analyzers was used. Two SENTINEL satellite images were used to determine the amount of subsidence in the target area: 1- The Master image was taken on 04/04/2017. The variable image of 03/25/2021 Slav was also used with a time span of about 4 years and using Land subsidence was calculated from SNAP software. The PSI index was used to determine the level of groundwater drought. This index can be used for all piezometric levels.

3- Results

The results of the radar interferometric analysis showed that the subsidence in the studied area was due to excessive water withdrawal from wells and underground water sources. The cause of subsidence around the wells was due to the lack of equipment and the entry of particles into the well. The results of changes in the time series

* **Corresponding Author:** aminmoslemzadeh@yahoo.com

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

of the PSI index showed that it is insignificant at the probability level of 5% in Kalate Rahim and Khalil Abad wells and significant in the rest of the wells. In the studied area, the lowest water level drop is related to the wells of Khalil Abad, Kalate Rahim. Khalil Abad well has had a drop in water level from 1996 to 2006, and from 2006 to 2021, the PSI index had an upward trend. The analysis of PSI data up to 2019 showed that the groundwater drought in the Kashmir plain has reached its peak over time, and from 2019 to 2014, the conditions have somewhat returned to normal conditions. In addition, subsidence is developing from the western areas such as Khalilabad, which have been involved in this issue in the past, towards the central areas and the center of Kashmar plain. The highest density of wells in the study area is in the central areas towards the western areas of the plain. The study of the land use map of the region also showed that the majority of the density of wells is related to agriculture and irrigated agriculture, which includes 76% of the exploited wells.

4- Discussion & Conclusions

The obtained results showed that in different regions of Kashmir Plain, in the period of 4 years (2017 to 2021), there was about 46 to 84 cm of land subsidence, which means that annually in different areas between 11.5 and 21 cm of subsidence can be observed. On the other hand, the process of subsidence has reached the central areas from the west of the Kashmar plain, and the highest intensity of subsidence can be seen around the city of Kashmar. The time series of PSI groundwater drought index is insignificant in Kalate Rahim and Khalil Abad wells and significant in the rest of the wells. Regarding the relationship between the amount of land subsidence and the severity of groundwater drought, the highest amount of subsidence is located in the areas that are in the minimum historical conditions of the PSI index and include the highest fluctuation of subsidence in the region. As we approach the normal conditions of the region in terms of the PSI index, the amount of subsidence also decreases, which indicates a strong connection between groundwater drought and land subsidence. The future perspective of the dangers caused by this phenomenon is very difficult and even impossible, considering the vast dimensions of the damage it causes to the fields of natural resources. Therefore, the custodian bodies, including the country's natural resources and watershed management organization, the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management, the Jihad Agriculture Organization, the Regional Water Company of Khorasan Razavi Province, have a very heavy responsibility in managing the crisis and improving the conditions.

Keywords: Mann-Kendall test, Land use change, Climate change, Environmental hazards

Cite this article: Moslemzadeha, A., Memarian, H., Tajbakhsh, S.M. & Akbari, M. (2024). Quantitative evaluation of land subsidence in the northern part of Kashmir aquifer using radar interferometry approach and PSI drought index. *Journal of Environmental Erosion Research. 2024; 14 (1) :178-203*. http//doi.org/

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

ارزیابی کمّی فرونشست زمین در بخش شمالی آبخوان کاشمر با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و شاخص خشکسالی PSI

امین مسلم‌زاده*: *دانش‌آموخته گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران*
هادی معماریان خلیل آباد: *دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران*
سید محمد تاجبخش فخرآبادی: *دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران*
مرتضی اکبری: *دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹)
DOI: http//doi.org/

چکیده

فرونشست زمین، به عنوان یکی از مخاطرات محیطی، در بسیاری از کشورهای جهان در حال وقوع و رخ دادن است. این پدیده در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند خسارت جبران ناپذیر مالی و جانی ایجاد نماید. لذا، به دلیل اهمیت موضوع، این پژوهش با هدف ارزیابی فرونشست زمین طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ در شمال آبخوان کاشمر به عنوان بخشی از حوضه آبریز ایران مرکزی و با مساحتی در حدود ۶۳۴۰ هکتار انجام شد. جهت پایش تغییرات روند فرونشست زمین از تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص PSI و روند تغییرات خشکسالی با استفاده از آزمون‌های تحلیل سری زمانی من-کندال و پتیت به دست آمد. همچنین جهت محاسبه تراکم چاه‌ها (۱۷ حلقه چاه) از تابع تراکم کرنل و برای بررسی همبستگی مکانی-زمانی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی و میزان تغییرات فرونشست زمین از روش آماری-تحلیلی استفاده شد. نتایج بررسی تداخل سنجی راداری نشان داد که در مناطق مختلف شمال آبخوان کاشمر و در بازه زمانیسال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰، به میزان ۴۶ تا ۸۴ سانتیمتر فرونشست به وقوع پیوسته است. بررسی خشکسالی آب زیرزمینی نیز با استفاده از سری زمانی شاخص خشکسالی PSI نشان داد که تغییرات ناگهانی شاخص آب زیرزمینی PSI در چاه کلاته رحیم و خلیل آباد در سطح احتمال ۵ درصد غیرمعنی‌دار و در مابقی چاه‌های آبخوان معنی‌دار بوده است. بررسی روند همبستگی بین شاخص PSI و فرونشست زمین نشان دهنده ارتباط معنادار بین دو شاخص است. علاوه برآن، بررسی تراکم چاه‌ها نشان داد که بیشترین تراکم چاه در بخش‌های مرکزی و غربی شمال آبخوان کاشمر بوده که مربوط به اراضی زراعی است و یکی از دلایل مهم فرونشست زمین در بخش‌های مرکزی و غربی آبخوان، مربوط به تراکم چاه‌ها و برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی می‌باشد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، آزمون من-کندال، تغییر کاربری اراضی، تغییر اقلیم، مخاطرات محیطی.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر عوامل مختلف طبیعی و انسانی همچون تغییر اقلیم، خشکسالی‌های مستمر و طولانی مدت، برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و تغییر کاربری اراضی باعث تخریب سرزمین شده و خسارات محیطی فراوانی را در سراسر جهان ایجاد نموده است (Akbari et al, 2019; IPCC, 2021; Memarian et al, 2023). فرونشست زمین، به عنوان یکی از مخاطرات محیطی ژئومورفیک، روند تدریجی و آرامی داشته که در بسیاری از کشورهای جهان در حال وقوع و رخ دادن است. این پدیده در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند خسارت جبران ناپذیری را برای مناطق مبتلابه ایجاد نماید (UN-Water, 2021). فرونشست می‌تواند باعث تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکست و یا بیرون‌زدگی لوله جدار چاه‌ها، تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها، ایجاد اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از منابع مخازن آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و در ادامه آن گسترش پهنه‌های بیابانی (بیابان‌زایی) و سیلابی شده و در نهایت تخریب شریان‌های حیاتی، زیرساخت‌ها و سازه‌های مهم را موجب شود (Bozzano et al, 2015; Chen et al, 2010). فعالیت‌های مختلفی نظیر معدن‌کاوی، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، تغییر پارامترهای اقلیمی، خشکسالی، توسعه اراضی کشاورزی و غیره، روند فرونشست زمین را تشدید نموده تا جایی که به یکی از مخاطرات مهم محیطی (ژئومورفولوژی) تبدیل شده است (Zafor et al, 2017). پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی زمین می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود (Chen et al, 2010; Memarian et al, 2023). نتایج مطالعات Linhu و همکاران (۲۰۱۹)، در بررسی ارتباط فرونشست با میزان برداشت آب زیرزمینی در پکن نشان داد که به دلیل تغییرات هیدرولوژیک، حداکثر فرونشست در شرق پکن رخ داده و این میزان تا سال ۲۰۱۷ به بیش از ۱۱سانتیمتر در سال رسیده است. علاوه برآن، تغییرات آب و هوایی و تغییر اقلیم نیز بر مقدار آب‌های زیرزمینی و در نتیجه فرونشست زمین تاثیرگذار است. نتایج مطالعات Erler و همکاران (۲۰۱۹)، نیز در تجزیه و تحلیل اثرات تغییرات آب و هوایی و تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در حوضه دریاچه‌های بزرگ لوران نشان دادند که در مناطق خشک که در آن‌ها سطح آب‌های زیرزمینی عمیق و پائین است، حساسیت اراضی نسبت به تغییرات آب و هوایی و فرونشست زمین بالا خواهد بود.

برای ارزیابی و تعیین میزان فرونشست زمین روش‌های مختلفی مانند؛ انبساط سنج‌ها، شکاف‌سنج‌ها، ترازیابی، شاخص‌های تکتونیکی، برآورد فرونشست سطح آب زیرزمینی، سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و روش‌های راداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری که در آن حداقل دو یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری، استفاده می‌شود، می‌توان تغییرات ارتفاعی رخ داده را در سطح زمین در بازه زمانی بین اخذ تصاویر با دقت کمتر از یک میلی‌متر آشکارسازی نمود. در حال حاضر این روش یکی از دقیق‌ترین و کم

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

هزینه‌ترین روش‌های سنجش از دور برای بررسی فرونشست زمین معرفی شده است (Gabriel et al, 1989; Rucci et al, 2012). همچنین این روش به واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهوارهای و قابلیت تکرارپذیری آن در پایش تغییرات، امکان ارزیابی کمی فرونشست زمین را در مکان‌های مختلف با سهولت و کوتاه‌ترین زمان فراهم می‌سازد (Hoseinzadeh et al, 2022). مطالعات Nur Khakim و همکاران (۲۰۱۴)، در بررسی فرونشست کنترل شده توسط لیتولوژی و پاسخ آبخوان فصلی در حوضه باندونگ کشور اندونزی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری نشان دادند که میزان فرونشست ۴۵سانتیمتر افزایش یافته است.

ایران نیز به عنوان یکی از کشورهایی که چندین دهه با انواع مخاطرات محیطی به خصوص فرونشست زمین روبروست (Akbari et al, 2023)، احتمالا در آینده‌ای نه چندان دور متاثر از خسارات مستقیم و غیرمستقیم این پدیده از جمله صدمات به اراضی کشاورزی، ساختمان‌ها، راه‌ها، پل‌ها، خطوط لوله و غیره مواجه خواهد شد (Chatrsimab et al, 2018). در کشور ایران و طبق نظر کارشناسان علوم زمینی، خشکسالی (Akbari et al, 2016; Memarian et al, 2023)، تغییرات کاربری اراضی (Akbari et al, 2023) و توسعه کشاورزی (Nasrian et al, 2019)، اصلی‌ترین دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی می‌باشند. به طوریکه، برداشت بیش از حد آب زیرزمینی در کشور از ۲۰ میلیارد مترمکعب در سال ۱۹۶۰ به بیش از ۵۳ میلیارد متر مکعب در سال ۲۰۰۲-۲۰۰۳، رسیده است (Shafiei et al, 2020). در سال‌های اخیر وسعت فرونشست زمین و خسارات ناشی از آن به اکثر مناطق مسکونی و پر جمعیت ایران، این پدیده را به یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی پس از زلزله تبدیل کرده است (Mohebbi Tafreshi et al, 2021; Bayat Varkeshi et al, 2018).

طی چهار دهه اخیر در ایران و به خصوص در استان خراسان رضوی فشار بسیار زیادی به منابع آب زیرزمینی وارد شده و این منابع تخلیه شده‌اند. تخلیه منابع آب زیرزمینی باعث ایجاد یک نوع خشکسالی، تحت عنوان خشکسالی هیدرولوژی شده که منجر به رخداد فرونشست زمین می‌شود. وقتی که منافذ لایه‌های رسوبی آبخوان‌ها بر اثر فرونشست زمین فشرده می‌شوند، دیگر قابلیت بازگشت به وضعیت اولیه را نداشته، از این رو فرونشست به عنوان یک مخاطره غیر قابل بازگشت محسوب می‌شود (National Cartographic Center, 2019). یافته‌های مطالعات Anderson و همکاران (۲۰۰۸)، نیز حاکی از وجود فرونشست در طول ضلع غربی-شرقی شمال آبخوان کاشمر بوده که در طی بازه زمانی (۲۰۰۶-۲۰۰۳ میلادی) مورد بررسی قرار گرفته است. رخداد فرونشست در سال انجام مطالعه، محدوده ۸۰۰-۷۵۰کیلومتر مربع را با نرخ ۱۵سانتیمتر در سال ثبت شده که نتیجه آن بهره‌برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی اعلام گردیده است (Anderson et al, 2008). برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی شمال آبخوان کاشمر سبب افت سالانه در حدود ۰/۸ متر سطح آب‌های زیرزمینی همراه با کسری مخزن بلند مدت به میزان ۳۶/۲۳- میلیون متر مکعب در سال شده است. طبق گزارشات رسمی موجود، در سال‌های اخیر افت سطح آب‌های

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

زیرزمینی باعث فرونشست زمین در شمال آبخوان کاشمر-بردسکن در استان خراسان رضوی شده است (Lashgaripour et al, 2006).

همچنین در حوزه آبخیز کشف‌رود دشت مشهد نیز با بررسی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی، نتایج نشان دهنده آن است که تغییرات تدریجی سری زمانی شاخص *PSI در چاه‌های مشاهداتی قاسم آباد، کلاته نادر، مسکران، نومهن و هاشم آباد غیرمعنی‌دار و در بقیه چاه‌ها این منطقه معنی‌دار بوده است (Nourmohamadi et al, 2017). براساس گزارش سازمان نقشه برداری کشور (۱۳۹۸)، مناطقی از دشت مشهد در اطراف زیارتگاه ویرانی، نقاطی از دشت رباط سنگ و مناطقی در شمال آبخوان کاشمر مانند اطراف قنات کسرینه، شدت فرونشست زمین بین ۲۲۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر در سال بوده است. آمار رسمی نشان می‌دهد دامنه فرونشست در دشت‌های خواف، باخرز و زاوه بین ۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در سال بوده است. دشت سبزوار نیز با میانگین سالانه ۱۰۰ میلیمتر فرونشست، وضعیت مشابهی دارد. سایر دشت‌ها از جمله، دشت مشهد-چناران، دشت نیشابور، شمال آبخوان کاشمر ، خلیل‌آباد، بردسکن، دشت رباط سنگ و دشت تربت جام- فریمان در وضعیت بحرانی قرار دارند. این بدان معنی است که در صورت تداوم خشکسالی اقلیمی و ادامه برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، روند فرونشست نیز تداوم داشته و منتهی به تخریب بدون بازگشت آبخوان‌ها (گسترش بیابان‌زایی) می‌گردد.

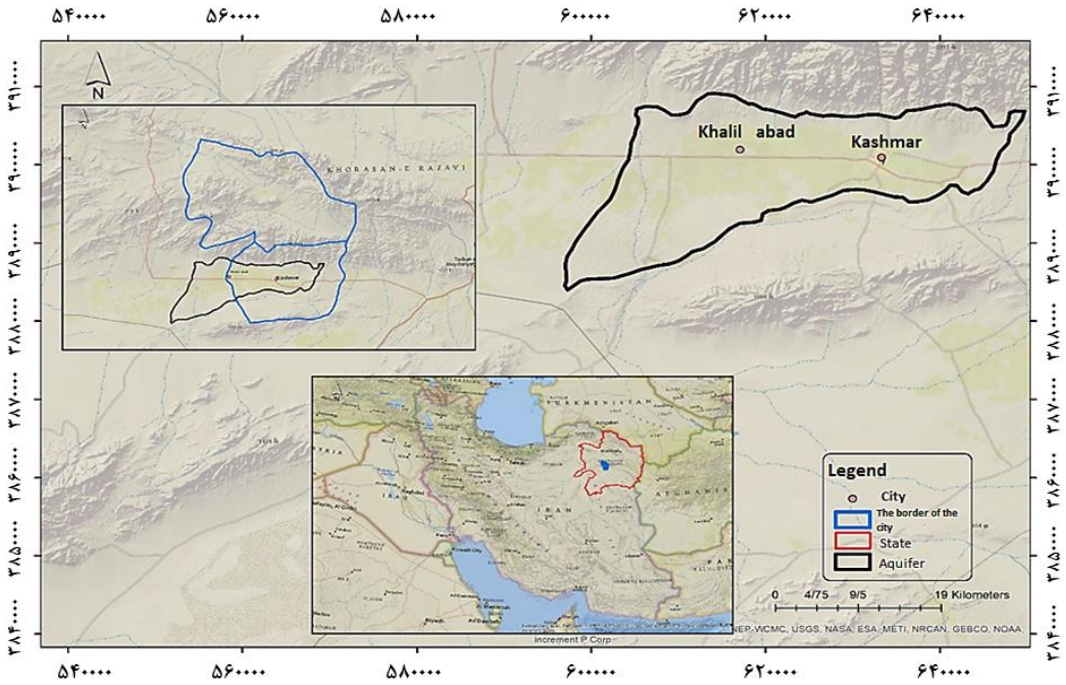
بنابراین، شناسایی محدوده‌ها، الگوی فرونشست و برآورد نرخ (شدت) آن نقش به سزایی در مدیریت وکنترل این پدیده خواهد داشت؛ و ضروری است تا اقداماتی جهت جلوگیری از مشکلات ناشی از وقوع خطر فرونشست زمین صورت پذیرد. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر ارزیابی فرونشست شمال آبخوان کاشمر با روش تداخل سنجی راداری و ارتباط آن با خشکسالی آب زیرزمینی است. شاید نتایج بدست آمده از این پژوهش، بتواند به مدیران سازمان و ادارت اجرایی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک در زمینهٔ حفاظت و مدیریت منابع آبی برای جلوگیری از تخریب سرزمین کمک درخور و مفیدی بنماید.

۲-معرفی منطقه مورد مطالعه

بخش شمالی آبخوان کاشمر به عنوان منطقه مورد مطالعه در شمال شرقی ایران در جنوب غربی استان خراسان رضوی و در فاصله ۲۴۰ کیلومتری شهر مشهد قرار دارد. (شکل۱). این منطقه به عنوان بخشی از حوضه آبریز ایران مرکزی در شمال کویر نمک با مختصات (35° 14′ 13.2″ N, 58° 28′ 12″ E) در جنوب استان خراسان رضوی واقع شده است. مساحت این دشت در حدود ۱۲۲۱/۱ کیلومتر مربع است شمال آبخوان کاشمر در بخشی از زون ایران مرکزی است (Nabavi et al, 1976).

* _ Piezometric State Index

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

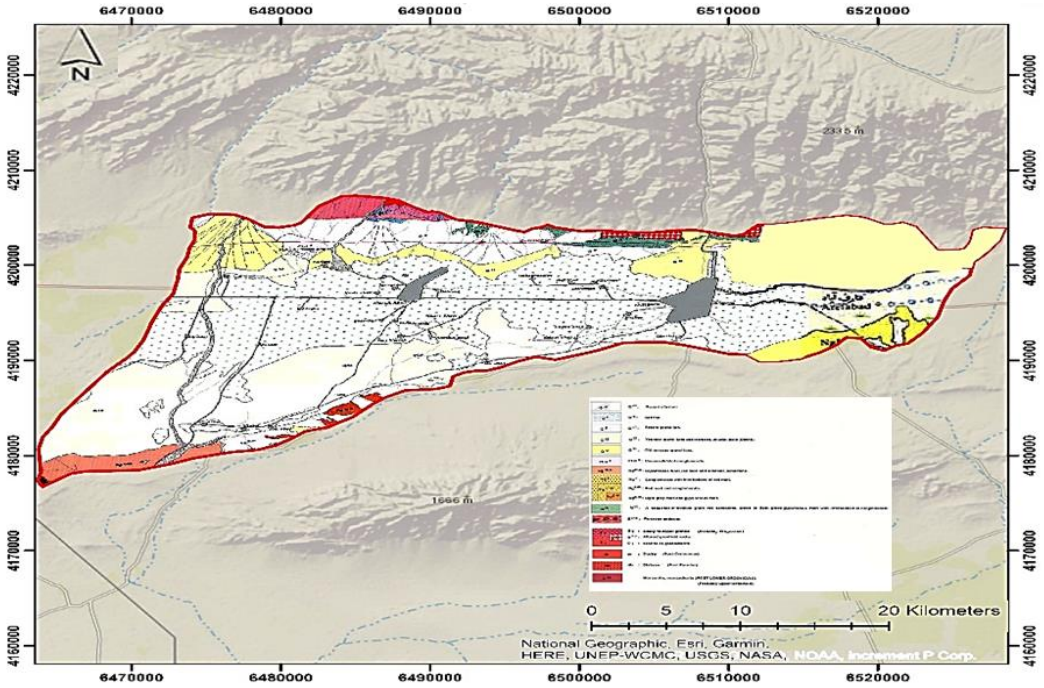


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان خراسان رضوی

ضخامت رسوبات آبرفتی در محدوده مطالعاتی بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری پیزومترها بین چند تا ۳۰۰ متر در نوسان است به طوری که به سمت شمال و در حد فاصل روستاهای محمودآباد و ایرج آباد مقدار ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد. این در حالی است که در سمت ارتفاعات جنوبی با بالا آمدن تدریجی سنگ کف از ضحامت آبرفت کاسته شده و در ضلع شرقی ضخامت آبرفت بین ۷۰ تا ۱۵۰ متر در نوسان است (Moslemzadeh *et al*., 2021).

شکاف‌های کششی در دشت کاشمر به دو صورت وجود دارد: ۱- ترک‌های کوچک شعاعی در نزدیکی محل چاه‌های بهره برداری آب کشاورزی ۲- شکاف های کششی طولی با درازای زیاد که گاهی اندازه آنها به چند صدمتر میرسد. این شکاف ها دارای راستای کلی غربی ــ شرقی تا شمال غربی ـ جنوب شرقی می‌باشند. گسترش آنها در نزدیکی روستاهای عظیم‌آباد، ظاهرآباد و کندر به حداکثر مقدار خود می‌رسد (Lashgaripour *et al*., 2019). اولین بازشدگی ترک‌ها از حدود ۲۰ سال پیش شروع به شکل‌گیری نموده و سپس به دو طرف گسترش یافته است و در انتهای این ترک‌ها حفره‌های متعددی با عمق زیاد وجود دارد که به وسیله آنها می‌توان جهت پیشروی شکاف‌ها را تشخیص داد. این نوع شکاف‌ها تمایل به گسترش دارند و در ابعاد و تعداد افزایش می‌یابند (Lashgaripour et al, 2019).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی شمال آبخوان کاشمر

همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود یکی از مهم‌ترین عوارض منطقه گسل درونه به طول تقریبی ۷۰۰ کیلومتر در حد فاصل سازندهای سنگی نواحی شمالی و دشت واقع‌شده است. این گسل نقش مهمی در تغذیه و تشکیل سفره آب زیرزمینی با افق‌های آبرفتی ضخیم فراهم نموده است. از جمله عوامل تأثیر گذار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب زیر زمینی هر منطقه، جنس و نوع لایه های آبدار، خصوصیات زمین‌شناسی و تکتونیکی است (Chitsazan et al, 2009). بر اساس تقسیمات دومارتن این دشت در اقلیم گرم و خشک قرار دارد. بارندگی در این دشت در فصل زمستان و بهار به همراه ایجاد رگبار، رعد و برق و سیلاب است. از رودخانه‌های مهم این‌دشت می‌توان به ششطراز اشاره نمود. بیشتر بارندگی‌ها جبهه‌ای است، بهره برداری از سفره های آب زیرزمینی عمدتاً توسط حفر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق، قنات و چشمه صورت می‌گیرد که این آمار در سال ۱۳۷۴ به میزان ۳۷۷ میلیون متر مکعب و در سال ۱۳۸۷ حدود ۱۹۱/۸میلیون متر مکعب و در سال ۱۳۹۶ حدود ۱۳۶/۲ میلیون متر مکعب بوده است. بر اساس آماربرداری سال ۹۷-۱۳۹۶ تعداد ۵۰۷ چاه عمیق و نیمه عمیق در این محدوده حفر شده است که میزان برداشت سالیانه از منابع آب زیرزمینی آن در حدود ۱۳۴/۳ میلیون متر مکعب می‌باشد. به عبارتی ۸۲ درصد از منابع تأمین کننده آب زیرزمینی مربوط به چاه‌ها است که حجم برداشت سالیانه از چاه‌ها ۹۸/۵ درصد خواهد بود (Water of Studies Basic of Bureau, 2021).

براساس آمار موجود در دفتر مطالعات پایه منابع آبی شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی (۱۴۰۰)، تا سال ۱۳۹۶-۹۷ تعداد ۴۶ قنات با برداشت سالانه ۱/۳میلیون متر مکعب موجود بوده است. به عبارتی ۷ درصد از منابع آب زیرزمینی را قنات‌ها تشکیل می‌دهند که ۱ درصد نیز حجم برداشت از قنوات در سال می‌باشد. باتوجه به آمار

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

سال ۹۷-۱۳۹۶ در منطقه مورد مطالعه تعداد ۶۶ دهانه چشمه با تخلیه سالیانه ۰/۷میلیون مترمکعب وجود دارد که میانگین آبدهی این‌چشمه‌ها برابر ۱ لیتر بر ثانیه است. درواقع در شمال آبخوان کاشمر ، چشمه‌ها ۱۱ درصد از منابع آب زیرزمینی با برداشت سالانه ۰/۵ درصد را تشکیل می‌دهند (of Studies Basic of Bureau, 2021 Water).

۳- مواد و روش

۳-۱- تداخل سنجی راداری

در پژوهش حاضر از روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی راداری برای ارزیابی میزان فرونشست زمین استفاده شده است. تداخل سنجی تفاضلی راداری با بررسی تفاضل فاز در دو تصاویر برداشتی از منطقه خاص و حذف عواملی چون اثر توپوگرافی قادر به اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین در زمان برداشت دو تصویر است که این مطالعات را سریع تر، دقیق‌تر و با هزینه‌های بسیار کمتر امکان‌پذیر نموده است. در پژوهش حاضر از دو تصویر ماهواره سنتینل ۱ استفاده شد:۱- تصویر مبنا (master) در تاریخ ۲۰۱۷/۰۴/۰۴ ؛ ۲-تصویر متغیر (slave) مربوط به تاریخ ۲۰۲۱/۰۳/۲۵ می‌باشد.

هر تداخل‌نما شامل اطلاعات فازی است که مستقیما مرتبط با توپوگرافی و جابجایی می‌باشد. برای پی بردن به میزان جابجایی باید اثر توپوگرافی را حذف نمود (رو گولز و همکاران، ۲۰۰۳) در این‌روش با استفاده از اختلاف فاز دو تصویر اول و دوم و تداخل‌نمای دوم نیز از اختلاف فاز در تصویر دوم و سوم ایجاد می‌شود. سپس، دو تداخل‌نمای حاصل از هم تفریق می‌شوند تا تداخل‌نمای تفریقی حاصل گردد. در انتهای این‌مرحله جهت کاهش نویز تداخل‌نماها از فیلتر تطبیقی گلداشتاین* استفاده می‌شود.به دلیل طبیعت تصویربرداری رادار با دریچه مصنوعی این‌تصاویر دارای اطلاعات مربوط به مقدار مطلق فاز نمی‌باشند، و داده‌های فاز موجود به صورت نهان‌شده در بازه ۰ تا ۳۶۰ درجه است. در حقیقت مقدار یا زاویه فاز (در نتیجه اختلاف فاز در یک تداخل‌نما) کاملا مشخص نیست، ولی مقدار آن از ۰ تا ۳۶۰ درجه تغییر می‌کند در این‌مرحله بازیابی مقدار مطلق فاز با استفاده از فاز نهان‌شده که بازیابی فاز نامیده می‌شود، انجام می‌گیرد. در انتها تصویر بازیابی‌شده در مرحله قبل توسط مدل ارتفاعی رقومی، زمین مرجع می‌شود (Zandi *et al*, 2019).

۳-۲- سری‌های زمانی

سری زمانی، مجموعه‌ای از مشاهدات x_t است که در زمان مشخص t ثبت شده باشد. سری زمانی $x_t , t \in \tau$ مشخص می‌کند که در آن τ مجموعه‌ی اندیس‌های زمان است. اگر τ پیوسته باشد، سری زمانی نیز پیوسته است. اگر τ گسسته باشد، سری زمانی گسسته خواهد بود. مراحل تحلیل سری‌های زمانی به شرح زیر می‌باشد:

بررسی خود همبستگی درسری‌های زمانی در این پژوهش با تحلیل روند داده‌هایی که دارای خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی می‌باشند، به روش Hamed and Rao (1998)، انجام شد. در روش حامد و رائو (۱۹۹۸)، اثرات همه

* Goldstein

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

ضرایب خود همبستگی معنی‌دار از داده‌ها حذف می‌شود و برای سری‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که ضرایب خود همبستگی آن‌ها در یک یا چند مورد معنی‌دار باشد (Torabi Poudeh et al, 2019).

۳-۳- آزمون من کندال

جهت تحلیل روند سری‌های زمانی، آزمون من کندال در بین روش‌های ناپارامتری از کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشد. مطالعاتی که با این آزمون انجام‌شده است بیانگر اهمیت و کاربرد فراوان آن در تحلیل سری‌های زمانی می‌باشد. نتایج به دست آمده در این آزمون نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود روند در سری‌های زمانی، معنی‌داری یا غیرمعنی‌داری آن و بصورت کلی در صورت وجود روند، مثبت یا منفی بودن روند می‌باشد. در این آزمون فرض صفر به معنی عدم وجود روند در داده‌ها و فرض یک از وجود روند (رد فرض صفر) در سری داده‌ها خبر می‌دهد. طبق این‌آزمون هر داده با تمامی داده‌های بعد از خود مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

الف) محاسبه اختلاف بین تک تک داده‌ها و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر S به شرح زیر (Memarian *et al*, 2020):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(X_J X_K)$$ رابطه ۱

که: n تعداد مشاهدات سری، x_kو x_j به ترتیب داده‌های kام و jام سری می‌باشند. تابع علامت نیز به شرح زیر قابل محاسبه است.

$$Sgn\ (x)=\begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$ رابطه ۲

ب) محاسبه واریانس با کمک دو رابطه زیر صورت می‌گیرد:

۱. اگر n بزرگتر از ۱۰ باشد:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^{n} t_i i(i-1)(2i+5)}{18}$$ رابطه ۳

۲. اگر n کوچک از ۱۰ باشد:

$$var\ (s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$ رابطه ۴

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

که در این‌رابطه n تعداد داده‌ها، m تعداد سری‌هایی که در آن حداقل یک داده تکراری باشد و t فراوانی داده‌های با ارزش یکسان می‌باشد.

پ) با استفاده از رابطه ۵ آماره z محاسبه می‌شود:

$$Z=\begin{cases}\frac{s-1}{\sqrt{var\,(s)}} & if \quad s>0\\ 0 & if \quad s=0\\ \frac{s+1}{\sqrt{var\,(s)}} & if \quad s<0\end{cases}$$ رابطه ۵

در یک آزمون دارای دو دامنه جهت روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر درصورتی قابل قبول است که رابطه زیر برقرار باشد.

$$|Z| \le Z\frac{\alpha}{2}$$ رابطه ۶

در این‌روابط α سطح معنی‌داری، و $Z\alpha$ اماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد. در این آزمون سطح معناداری ۹۵٪ و۹۹٪ در نظر گرفته شده است (Zare Abyaneh et al, 2012).

۳-۴-تعیین نقطه تحول با استفاده از آزمون پتیت

در میانگین سری‌زمانی به خصوص هنگامی که هیچ گونه فرضی درباره مکان نقطه تغییر وجود ندارد برای تعیین تغییرات معنی‌دار آماری از آزمون ناپارامتری پتیت استفاده می‌شود (Sobhani et al., 2016).

در تعیین نقطه تحول با استفاده از آزمون پتیت با جامعه آماری از نرم افزار XLSTAT استفاده شده است و آماره آزمون Ut,N می‌باشد که آزمون می‌کند آیا دو مجموعه نمونه X1,…..,Xt و Xt+1,……,XN از یک جامعه آماری هستند و به صورت رابطه زیر برقرار است:

$$U_{t,N}=U_{t+1}+\sum_{j=1}^{N}\mathrm{sgn}(X_t-X_j)\text{for}\quad t=2,\ldots\ldots,N$$ رابطه ۷

در رابطه فوق، n تعداد کل مشاهدات، X_t مجموعه اول و X_j مجموعه دوم می‌باشد. تابع علامت نیز از همین رابطه به دست می‌آید.

آماره آزمون K_N و احتمال وقوع مرتبط با آن توسط روابط ۸ و ۹ محاسبه خواهند شد (Memarian *et al*, 2012).

$$K_N=max1\le t\le N\left|U_{t,N}\right|$$ رابطه ۸

$$P\cong 2exp\left\{-6\frac{(K_N^2)}{(N^3+N^2)}\right\}$$ رابطه ۹

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

۳-۵- تجزیه و تحلیل داده‌های رادار برای محاسبه میزان فرونشست زمین

برای تعیین میزان فرونشست در بخش شمالی آبخوان کاشمر نیز از دو تصویر ماهواره سنتینل ۱ استفاده شد: ۱- تصویر مبنا (Master) مربوط به تاریخ ۲۰۱۷/۰۴/۰۴ (سال ۱۳۹۶ شمسی) ۲-تصویر متغیر یا (slv) مربوط به تاریخ ۲۰۲۱/۰۳/۲۵ (سال ۱۴۰۰ شمسی) که منبع تهیه‌ی تصاویر ماهواره‌ای سایت https://scihub.copernicus.eu است که پس از اخذ داده‌ها، به بررسی اختلافات دو تصویر پرداخته شد.

در پژوهش حاضر از روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی راداری برای پایش فرونشست استفاده شد. تراکم چاه‌ها نیز با استفاده از برآورد روش تحلیل تراکم نقطه‌های کرنل از جمله تحلیل‌های آنالیز فضایی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی است که تحت عنوان تخمین تراکم برای عوارض خطی و نقطه های به کار گرفته می‌شود. این تحلیل یکی از بهترین روش‌های شناسایی نقاط داغ به شمار می‌رود. این تابع موقعیت نقاط در فضا را در یک تابع تراکم ممتد در محدوده مورد مطالعه تبدیل و تعیین می‌نمایید. در این روش از مدل‌سازی داده‌های نقطه‌ای، یک ساختار رستری ایجاد می‌شود که هر سلول رستری شامل خصوصیت یک مقدار و اندازهء تراکم بر طبق توزیع مقادیر (نقاط) خواهد بود (Seydai et al, 2020).

۳-۶- استفاده از شاخص (PSI) برای تعیین میزان خشکسالی آب زیر زمینی

برای تعیین شدت خشکسالی آب زیرزمینی از شاخص PSI استفاده شد.. همچنین این شاخص از مقادیر میانگین، بیشترین و کمترین داده‌های سطح آب زیرزمینی استفاده می‌کند و به دو شکل ارائه شده است (Saez et al, 2009).

$$P_i = \left[\frac{1}{2}\right]\left[\frac{V_i - V_{min}}{V_{mean} - V_{min}}\right] \quad V_i < V_{Mean}$$ رابطه ۱۰

$$P_i = \left[\frac{V_i - V_{mean}}{V_{max} - V_{mean}} + 1\right] \quad V_i \geq V_{Mean}$$ رابطه ۱۱

در این‌روابط :

V_{Max}: بیشترین مقدار داده‌های سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای،

V_{Min}: کمترین مقدار داده‌های سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای،

V_{Mean} : میانگین داده‌های سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای

لازم به توضیح است که مقادیر شاخص حالت مشاهده‌ای بین یک و صفر قرار دارد. جدول یک طبقات مختلف شاخص وضعیت مشاهده‌ای را نشان می‌دهد.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

جدول ۱: طبقات مختلف شاخص حالت مشاهده‌ای (Memarian et al., 2020)

شدت خشکسالی	مقادیر PSI (متر)
شرایط نرمال	۰/۵ – ۱
شرایط هشدار	۰/۳ – ۰/۵
شرایط خطرناک	۰/۳ – ۰/۱۵
شرایط حداقل تاریخی	۰/۱۵ – ۰

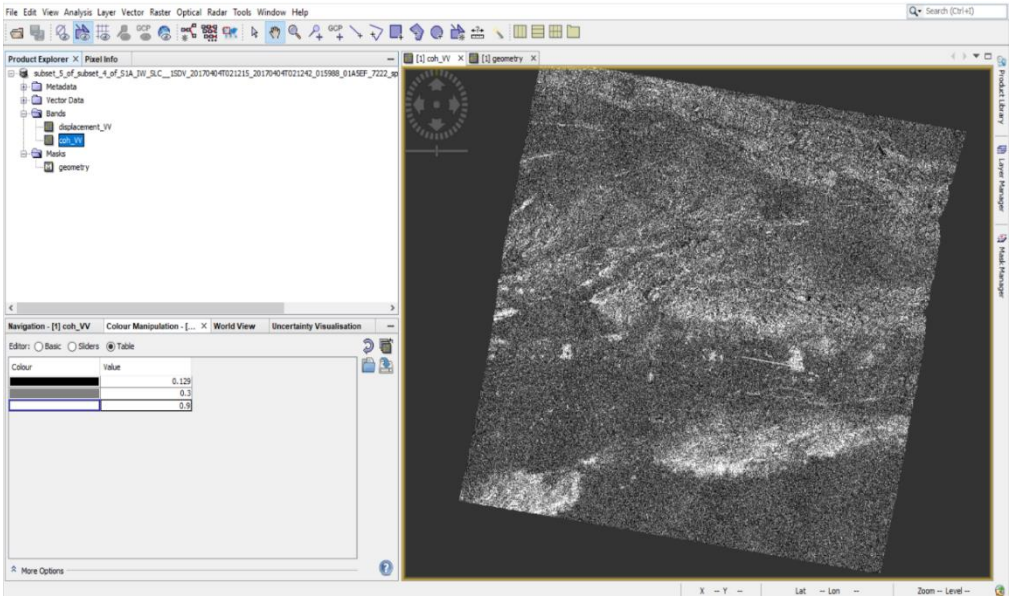
در این‌پژوهش برای بررسی همبستگی مکانی و زمانی شاخص آب زیرزمینی با نرخ فرونشست و ارتباط آن با تراکم چاه‌ها، از روش تحلیلی استفاده شده است. در این‌روش از آنالیز زمین آماری و تحلیل مکانی و تکنیک‌هایی مانند Extract by Mask و Raster Calculator و تابع تراکم کرنل و همچنین تکنیک Band Collection Statistics استفاده شده است.

۴- یافته‌ها (نتایج)

همانطور که اشاره شد برای تعیین میزان فرونشست در شمال آبخوان کاشمر از دو تصویر ماهواره SENTINEL استفاده شد: ۱- تصویر مبنا(Master) در تاریخ ۲۰۱۷/۰۴/۰۴ برداشت‌شده است. تصویر متغیر ۲۰۲۱/۰۳/۲۵ (Slav) با بازه زمانی حدود ۴ سال استفاده و با استفاده از نرم افزار SNAP میزان فرونشست محاسبه شد.

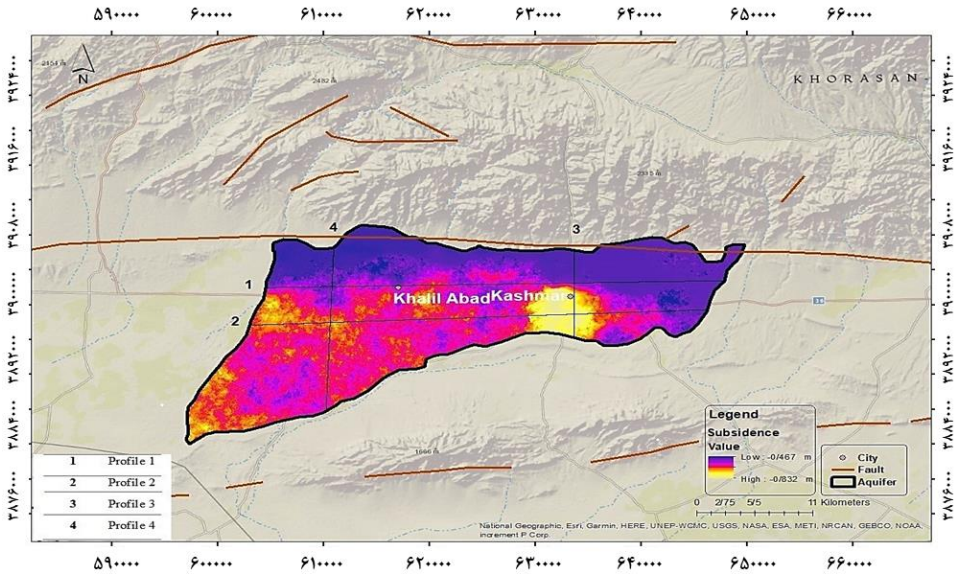
تصویرکوهرنسی زیر نشان دهنده تطابق سیگنال‌های دو تصویر (Master) و(slav) و دقّت محاسبات در مناطق که دچار فرونشست شده‌اند، خواهد بود؛که معمولا مقدار آن بین صفر و یک است و هرچه ضریب کوهرنسی به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده دقت محاسبات بیشتر در این مناطق است. در این پژوهش مقدار ضریب کوهرنسی بین ۰/۱۲۴ تا ۰/۹ به دست آمد. (شکل۳).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]



شکل ۳: تصویر کوهرنسی منطقه

در واقع هر گونه جابجایی از منظر راداری، به صورت یک اختلاف فاز میان دو تصویر قبل و بعد از تغییر شکل سطحی زمین نمایان می‌شود که در نقشه فرونشست (شکل ۴) مشاهده می‌شود.



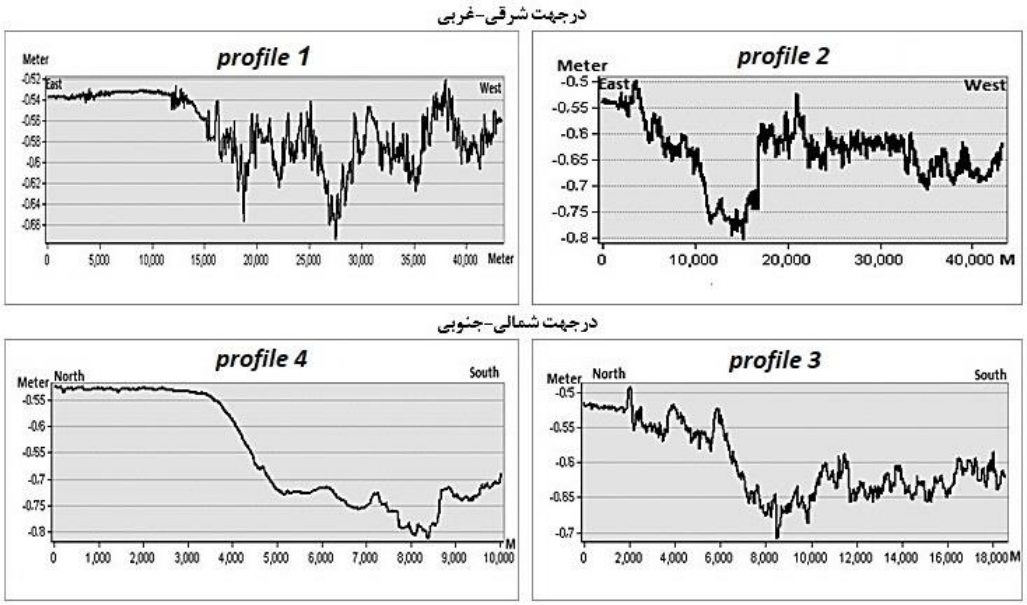
شکل ۴ : نقشه شدت فرونشست زمین در شمال آبخوان کاشمر

فرونشست در بخش شمالی آبخوان کاشمر در مقیاس محلی به دلیل برداشت بی‌رویه از چاه‌ها و منابع آب زیرزمینی بوده است که می‌توان گفت فرونشست در اطراف چاه‌ها نتیجه کمبود و یا نبود تجهیزات و ورود ذرات به داخل چاه می‌باشد که در انتها موجب فرونشست زمین در اطراف چاه‌ها خواهد شد.

علاوه بر آن، نتایج نشان داد که در مناطق مختلف شمال آبخوان کاشمر و در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰، در حدود ۴۶ تا ۸۴ سانتیمتر فرونشست رخ داده است؛ این بدان معنی است که سالانه در مناطق مختلف بین ۱۱/۵

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

تا ۲۱ سانتیمتر فرونشست به وقوع پیوسته است. الگوی کامل فرونشست شمال آبخوان کاشمر با پردازش تصاویر سنتینل و بررسی پروفیل‌ها (شکل ۴) در جهات مختلف مشخص شد.



شکل ۵: نمودارهای بررسی روند فرونشست زمین در راستای جهات جغرافیایی

نتایج نشان داد که روند تغییرات فرونشست زمین جهتی شرقی-غربی و شمالی- جنوبی داشته است. به طوریکه حداکثر فرونشست مربوط به بخش‌های مرکزی و اطراف شهر کاشمر می‌باشد.

جهت بررسی شاخص حالت مشاهده ای از ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای با دوره آماری ۲۵ ساله استفاده شد. نتایج PSI نشان داد که نمودارهای حاصل از آزمون خود همبستگی جزئی در همه چاه‌های مشاهداتی در سری سالانه شاخص دارای خودهمبستگی معنی‌داری بوده است که اثر آن به روش حامد و رائو قبل از تحلیل روند حذف گردید. روند سری زمانی پیوسته شاخص مشاهده‌ای چاه‌های مشاهداتی در جدول (۱) در سطح پنج درصد نشان داده‌شده است. در بین تمام چاه‌ها، دو چاه کلاته رحیم و خلیل‌آباد غیرمعنی‌دار و مابقی دارای روندی معنی‌دار می‌باشند. جدول (۱) نشان داد که به جز چاه خلیل‌آباد تمامی چاه‌ها دارای روندی کاهشی می‌باشند، روند چاه خلیل‌آباد احتمالا به دلیل عملیات پخش سیلاب و عملکرد پروژه‌های آبخوانداری افزایشی‌شده است.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

جدول ۱: نتایج تحلیل روند سری زمانی پیوسته شاخص PSI چاه‌های مشاهداتی مورد مطالعه در شمال آبخوان کاشمر

ایستگاه	دوره آماری	تست روندMK		
		Tau	P	Trend
امام زاده محمد	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۷۲۳	۰/۰۰۲	↓
ارغا	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۱	↓
عشرت آباد	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۴۸	۰/۰۰۰۱	↓
جنوب فدافن	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*- ۰/۹۱۳	۰/۰۰۰	↓
جنوب کهه	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۳۹	۰/۰۰۰۱	↓
جردوی	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۷۴۰	۰/۰۰۰	↓
کلاته بختیاری	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۳۷	۰/۰۰۰۱	↓
کلاته شادی	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۸۹۶	۰/۰۰۰۱	↓
کلاته رحیم	۱۴۰۰-۱۳۷۵	-۰/۲۶۴n.s.	۰/۱۸۳	↓
کلاته شور	۱۴۰۰-۱۳۷۵	-۰/۸۶۱*	۰/۰۰۰۱	↓
خلیل آباد	۱۴۰۰-۱۳۷۵	۰/۱۲۶n.s.	۰/۶۰۰	↑
رزق آباد	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۸۵	۰/۰۰۰۱	↓
سرحوضک	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۱	↓
سید مرتضی	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	↓
شرق ایرج آباد	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۱	↓
شمال کهه	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	↓
تکمار	۱۴۰۰-۱۳۷۵	*-۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	↓

*معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و N.S. غیرمعنی‌دار

جدول (۲) نتایج به دست آمده از تحلیل آزمون همگنی پتیت جهت تشخیص نقاط تغییر در سری زمانی شاخص PSI چاه‌های شمال آبخوان کاشمر را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که تغییرات ناگهانی سری زمانی شاخص PSI در چاه کلاته رحیم و خلیل‌آباد در سطح احتمال ۵ درصد غیرمعنی‌دار و در مابقی چاه‌ها معنی‌دار است.

جدول ۲: تغییرات ناگهانی در میانگین سری پیوسته شاخص PSI چاه‌های مشاهداتی مورد مطالعه در سطح معنی‌داری

ایستگاه	T	K_T	P	Shift
امام زاده محمد	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
ارغا	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
عشرت آباد	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
جنوب فدافن	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
جنوب کهه	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
جردوی	۸۵-۱۳۸۴	۰۰۰/۱۱۸	۰/۰۰۰۱*	↓
کلاته بختیاری	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

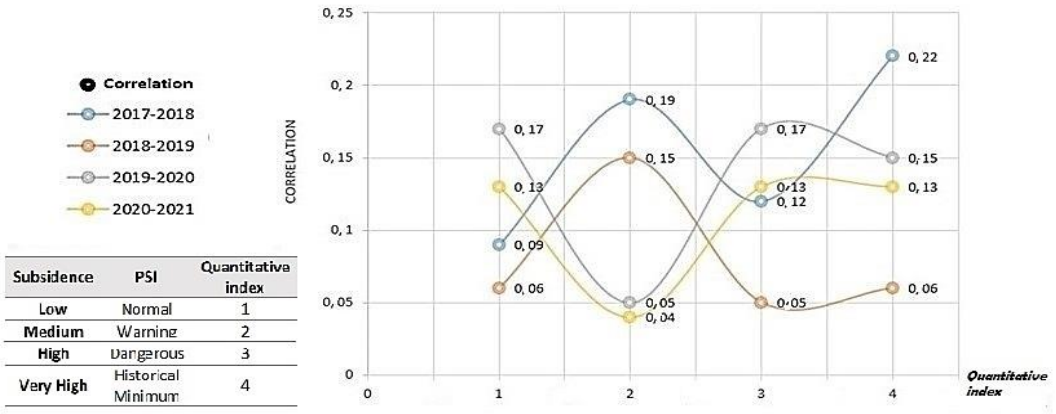
کلاته شادی	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
کلاته رحیم	-	۰۰۰/۵۶	۰/۲۲۶n.s.	-
کلاته شور	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
خلیل آباد	-	۰۰۰/۶۳	۰/۱۲۶n.s.	-
رزق آباد	۱۳۸۲-۸۳	۰۰۰/۷۲	۰/۰۰۰۱*	↓
سرحوضک	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
سید مرتضی	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
شرق ایرج آباد	۸۶-۱۳۸۵	۰۰۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۱*	↓
شمال کهه	۱۳۸۲-۸۳	۰۰۰/۷۲	۰/۰۰۰۱*	↓
تکمار	۸۴-۱۳۸۳	۰۰۰/۸۱	۰/۰۰۰۱*	↓

*معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و N.S. غیرمعنی‌دار

علاوه برآن، در شمال آبخوان کاشمر، کمترین میزان افت سطح آب مربوط به چاه‌های خلیل‌آباد، کلاته رحیم و جردوی می‌باشد. چاه خلیل‌آباد از سال ۱۳۷۵ تا سال ۱۳۸۵ افت سطح آب داشته و از تاریخ ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ شاخص PSI روندی صعودی داشته است. در چاه کلاته رحیم نیز افت سطح آب فقط تا سال ۱۳۸۴ رخ داده و از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۹۰ شاخص PSI روندی رو به بالا داشته و از سال ۱۳۹۰ تا الان دچار کاهش سطح آب‌شده است.

کاهش سطح آب در چاه جردوی به گونه‌ای است که این‌چاه از سال ۱۳۷۵ تا سال ۱۳۹۰ روندی نزولی داشته است. این‌روند از سال ۱۳۹۰ به بعد روند صعودی داشته است. نتایج نشان داد که بیشترین میزان افت سطح آب نیز مربوط به چاه‌های جنوب کهه و کلاته شادی می‌باشد که احتمالاً به دلیل برداشت بیش از حد از این دو حلقه چاه در محدوده مورد مطالعه بوده است. بصورت کلی شاخص PSI در اکثر چاه‌ها روندی کاهشی داشته است. بنابراین، آنچه که بیشترین تأثیر را بر خشکسالی آب‌زیرزمینی شمال آبخوان کاشمر می‌گذارد استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. آنالیز داده‌های PSI تا سال ۹۷ نشان داد که خشکسالی آب زیرزمینی در شمال آبخوان کاشمر باگذر زمان به اوج خود رسیده است و از سال ۹۷ تا ۱۴۰۰ شرایط تاحدودی در مناطقی مانند ارغا، خلیل آباد و جردوی به سمت شرایط نرمال می‌رود که تاثیرات روند مثبت آن در کاهش روند فرونشست منطقه در سالیان بعد نمایان خواهد شد. به دلیل ماهیت کمّی شاخص‌ها، همبستگی پیرسون بین نقشه شاخص PSI و نقشه فرونشست بررسی و مشاهده شد که در اکثر حالت‌ها همبستگی معنی‌دار است (شکل ۶).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]



Subsidence	PSI	Quantitative index
Low	Normal	1
Medium	Warning	2
High	Dangerous	3
Very High	Historical Minimum	4

شکل۶: نمودارهای بررسی روند همبستگی فرونشست زمین و PSI

همانطور که ملاحظه می‌شود ما در جدول شکل (۶) به بررسی کمی طبقات همسان در فرونشست و خشکسالی آب زیرزمینی پرداخته و روند همبستگی نقشه فرونشست و نقشه PSI براساس طبقات این دو شاخص در شکل (۶) بررسی شد. نتایج همبستگی بین فرونشست زمین و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی نشان داد ارتباط معناداری بین دو شاخص وجود دارد.

جدول ۳: مشخصات آماری نقشه فرونشست زمین در طبقات مختلف شاخص PSI (واحدها براساس متر)

طبقه PSI	مساحت (km2)	حداکثر	حداقل	دامنه	میانگین	انحراف معیار
حداقل تاریخی	۲۴۳/۳۵	۰/۸۳۱-	۰/۴۷۳-	۰/۳۵۸	۰/۶۰۳-	۰/۰۷۰
خطرناک	۲۹۳/۲۹	۰/۷۵۳-	۰/۴۷۲-	۰/۲۸۱	۰/۶۰۴-	۰/۰۴۶
هشدار	۶۳/۰۷۵	۰/۷۴۶-	۰/۴۶۷-	۰/۲۷۸	۰/۵۷۶-	۰/۰۵۳
نرمال	۳۰/۹۴	۰/۶۹۲-	۰/۴۶۹-	۰/۲۲۴	۰/۵۴۸.	۰/۰۳۴

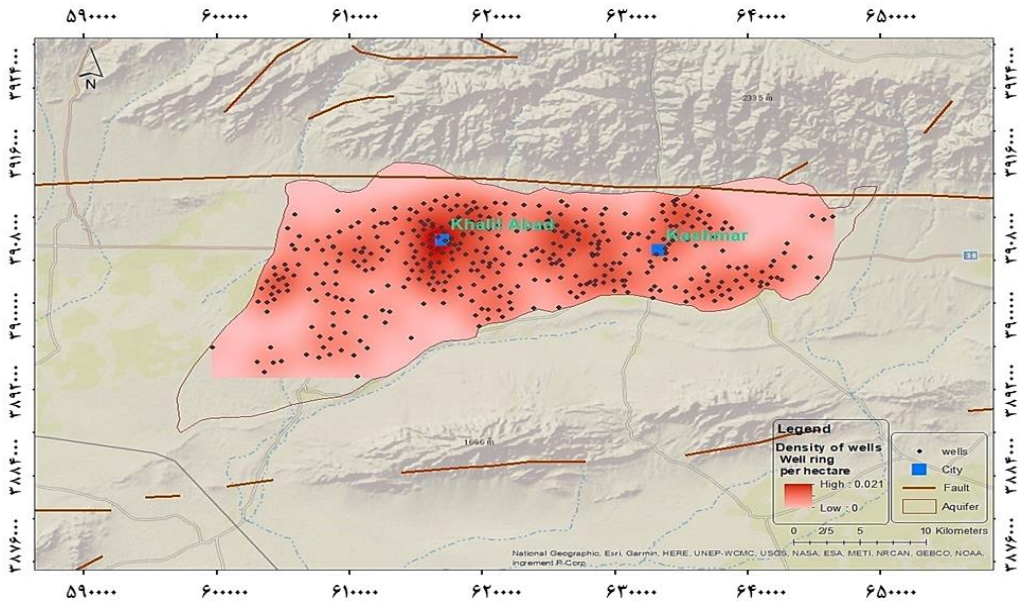
همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود در مناطقی که در طبقه‌بندی شاخص PSI در شرایط حداقل تاریخ قرار گرفته‌اند، بیشترین میزان فرونشست مشاهده می‌شود که این‌نشان دهنده ارتباط شاخص PSI و فرونشست در منطقه مورد مطالعه است و هرچه که به سمت شرایط نرمال می رویم مشاهده می‌شود که تغییرات فرونشست در منطقه مورد نظر کمترشده از میزان فرونشست نیز کاسته‌شده است که این‌مورد نیز به خوبی نشان دهنده ارتباط فرونشست و خشکسالی آب زیرزمینی در منطقه است.

بررسی روند حفر چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی منطقه نشان داد که تا سال ۹۷-۱۳۹۶، این روند افزایشی بوده، بطوری که تعداد ۵۰۷ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق در شمال آبخوان کاشمر حفر شده است و میزان برداشت سالیانه از منابع آب زیرزمینی این‌دشت ۱۳۴/۳ میلیون متر مکعب می‌باشد.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

به عبارتی ۸۲ درصد از منابع آب زیرزمینی منطقه به چاه‌های عمیق و نیمه عمیق حفرشده در شمال آبخوان کاشمر تعلق می‌گیرد (Bureau of Basic Studies of Water Resources, 2021). همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود بررسی چاه‌های موجود در منطقه (۵۰۷ حلقه) نشان داد که بیشترین تراکم چاه‌ها در شمال آبخوان کاشمر در بخش‌های مرکزی به سمت مناطق غربی دشت می‌باشد.

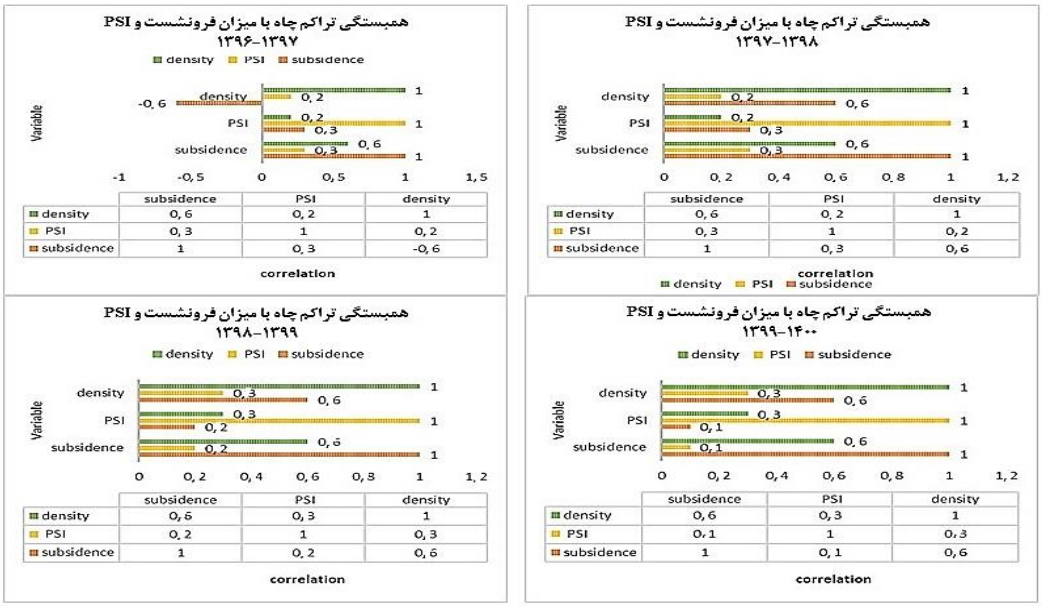
در بالاترین میزان تراکم چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه ۰.۰۲۱ حلقه چاه در هکتار بوده که برای این دشت عدد نسبتاً بالایی است.



شکل ۷: نقشه تراکم چاه‌ها در شمال آبخوان کاشمر

نتایج همبستگی تراکم چاه‌ها با میزان فرونشست و شاخص خشکسالی آب‌های زیرزمینی (شکل ۸) نشان داد که همبستگی زیادی بین فرونشست زمین و تراکم چاه‌ها وجود دارد؛ به طوریکه تراکم چاه‌ها در مرکز دشت یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرونشست زمین در شمال آبخوان کاشمر و البته رسیدن شدت فرونشست به بخش‌های مرکزی دشت بوده است.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]



شکل ۸: همبستگی تراکم چاه‌ها با میزان فرونشست و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی (PSI)

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که در مناطق مختلف شمال آبخوان کاشمر در بازه زمانی ۴ سال (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰)، در حدود ۴۶ تا ۸۴ سانتیمتر فرومشاهده ای زمین را وجود داشت یعنی بصورت سالانه در مناطق مختلف بین ۱۱.۵ تا ۲۱ سانتیمتر فرومشاهده ای قابل مشاهده است. از طرفی روند فرو مشاهده‌ای از غرب شمال آبخوان کاشمر به مناطق مرکزی رسیده که بیشترین مقدار شدت فرومشاهده‌ای را در اطراف شهر کاشمر می‌توان مشاهده نمود.

نتایج مطالعات Lashkaripour و همکاران (۲۰۱۹)، بر اساس آزمایش سونداژ الکتریکی، ضخامت رسوبات یا عمق سنگ کف در آبخوان کاشمر در اکثر نقاط بین ۵۰ تا ۱۵۰ متر است. اطلاعات لاگ‌های حفاری نیز نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد از رسوبات آبخوان در این مناطق از ذرات ریزدانه تشکیل شده است. متوسط فرونشست شمال آبخوان کاشمر حدود ۱۵ سانتیمتر در سال در این مناطق است. در برخی منابع اشاره شده است که با ده تا بیست سانتیمتر فرونشست حداقل یک تا دو متر از ذخیره مفید آبخوان را از دست خواهیم داد یعنی دیگر مخزنی استراتژیک برای جمع آوری رواناب‌ها نخواهیم داشت.

نتایج مطالعات Anderson و همکاران (۲۰۰۸)، نیز حاکی از وجود فرو مشاهده‌ای در طول ضلع غربی-شرقی شمال آبخوان کاشمر بوده که در طی بازه زمانی (۲۰۰۶-۲۰۰۳ میلادی) مورد بررسی قرار گرفته است. رخداد فرومشاهده ای در سال انجام مطالعه، محدوده ۸۰۰-۷۵۰کیلومتر مربع را با نرخ ۱۵سانتیمتر در سال ثبت شده که نتیجه آن بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی اعلام گردیده است.یافته‌های مطالعات Lashgaripour و همکاران (۲۰۰۶)، نیز بیانگر برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی شمال آبخوان کاشمر سبب افت سالانه در حدود ۰/۸ متر سطح آب‌های زیرزمینی همراه با کسری مخزن بلند مدت به میزان ۳۶/۲۳- میلیون متر مکعب در سال

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

شده است. طبق گزاشات رسمی موجود، در سال‌های اخیر افت سطح آب‌های زیرزمینی باعث فرونشست زمین در شمال آبخوان کاشمر -بردسکن در مناطق غربی دشت شده است و انطباق مکانی بالایی بین محل درز و شکاف‌ها با مناطق درگیر فرونشست دیده می‌شود. که نتایج به دست آمده که بین این پژوهش با نتایج این محققان از نظر میزان فرونشست و مناطق درگیر مشابهت بسیاری دارد. سری زمانی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی PSI از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۷ محدوده مورد مطالعه بیشتر در شرایط هشدار و از ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۳ از قسمت غرب به شرق شمال آبخوان کاشمر به سمت شرایط نرمال و از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ به طور تدریجی در شرایط خطرناک و حداقل تاریخی و از ۱۳۹۶-۱۴۰۰به سمت کاهش مساحت مناطق بحرانی پیش می‌رود که تاثیر بارندگی‌های مناسب سالیان اخیر و تاثیر مثبت عملیات آبخوانداری صورت گرفته، مشهود است. از طرف دیگر با بررسی شاخص فرونشست زمین می‌توان به این نتیجه رسید که فرونشست از مناطق غربی مانند خلیل‌آباد که در گذشته درگیر این موضوع بوده‌اند، به تدریج به سمت مناطق مرکزی و به مرکز شهر کاشمر در حال توسعه است. ولی همچنان مناطق غربی دشت نیز درگیر پدیده فرونشست هستند.

همچنین مقایسه نتایج این پژوهش با بررسی خشکسالی آب زیر زمینی حوزه کشف رود دشت مشهد با مطالعات Nourmohamadi و همکاران (2017)، نشان داد که نتایج تغییرات تدریجی سری زمانی شاخص PSI در چاه‌های مشاهداتی قاسم‌آباد، کلاته نادر، مسکران، نومهن و هاشم‌آباد غیرمعنی‌دار و در بقیه چاه‌ها (۳۵ چاه) معنی‌دار می‌باشند. علاوه برآن، نتایج بیانگر آن بوده است که شاخص PSI در دشت مشهد از سال‌های ۱۳۶۳-۶۴ تا ۱۳۷۸-۷۹ بیشتر در شرایط نرمال قرار داشته و از سال‌های ۱۳۷۸-۷۹ تا سال ۱۳۹۶ شدت فرونشست نیز شدت یافته است. روند افزایشی شدت فرونشست زمین در نتیجه افزایش خشکسالی PSI، با نتایج این پژوهش نیز همخوانی دارد.

ارتباط فرونشست و خشکسالی آب زیرزمینی در شمال آبخوان کاشمر ، نشان داد که بیشترین میزان فرونشست در مناطقی رخ داده است که در طبقه‌بندی شاخص PSI در شرایط حداقل تاریخی بوده و بیشترین نوسان فرونشست زمین را نیز شامل می‌شوند و هرچه به سمت شرایط نرمال دشت از نظر شاخص PSI نزدیک می‌شویم از میزان فرونشست نیز کاسته می‌شود که این موضوع، نشان دهنده ارتباط معنادار بین شدت خشکسالی آب زیرزمینی و فرونشست زمین است.

علاوه برآن، نتایج این پژوهش نشان داد بیشترین تراکم مربوط به بخش‌های مرکزی و غربی شمال آبخوان کاشمر قرار دارند و شاید بتوان به جرات گفت که یکی از دلایل مهم فرونشست بخش‌های مرکزی و غربی شمال آبخوان کاشمر تراکم چاه‌ها بوده است.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

زیرا، کاربرد بیشتر چاه‌های این منطقه در امور کشاورزی و زراعت آبی بوده که حفر چاه‌ها هرچند سبب افزایش محصولات کشاورزی شده است ولی به دلیل عدم توجه به نحوه برداشت آب وتعداد چاه‌ها در مناطق خاص، تعادل بین تغذیه و تخلیه‌ی چاه‌ها به هم خورده که در نتیجه، فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است. همچنین گسل درونه، از جمله ساخت‌های مهم زمین شناسی منطقه است که موجب تغییر رخساره رسوبی در محل تشکیل شکاف ها گردیده است. به طوریکه در بخش‌هایی از دشت که به طور عمده سیلت و رس تشکیل شده، تغییر رخساره رسوبی از مواد دانه درشت به مواد ریز تشخیص داده شده است. لذا، برداشت اندک آب‌های زیرزمینی در این بخش سبب فرونشست بیشتری نسبت به سایر مناطق شده است. علاوه بر آن، به علت تغییر رخساره و در نتیجه تغییر در میزان نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی، تغییرات عمق سنگ کف به ویژه نقش گسل درونه در زهکشی آب‌های زیرزمینی منطقه، آب زیرزمینی به سمت این گسل متمایل شده، به نحوی که در غرب آن جهت جریان به طور محلی از غرب به سمت شرق است. لذا در حاشیه جنوبی گسل درونه و محل شکاف‌ها در غرب دشت، محدوده‌ای وجود دارد که سهم ورودی آب زیرزمینی به آن بسیار کم است. بنابراین، حتی بهره‌برداری کم از سفره در این محدوده می‌تواند سبب افت شدید در سطح آب زیرزمینی شود و همانطور که در نقشه فرونشست مشاهده کردیم فرآیند فرونشست در غرب بیشتر از شرق است و روند شرق به غرب را داراست که البته درحال حاضر بیشترین نقاط درگیر به سمت شهر کاشمر متمایل شده است. که می‌توان این‌روند را منطبق با گسل‌های قدیمی دوران کرتاسه دانست که در زیر یا درون نقاط رسوبی کشیده شده‌اند.

در نهایت، اگرچه برای کنترل و مدیریت این بحران، فرصت‌های مناسب از دست رفته است، امّا هر گونه اقدام برای کاهش برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی می‌تولند از بروز یک فاجعه عظیم محیط‌زیستی و یک زلزله خاموش جلوگیری نماید. چشم‌انداز آینده مخاطرات ناشی از این پدیده، با توجه به ابعاد وسیع خساراتی که به عرصه‌های منابع طبیعی وارد می‌سازد، با تخریب آبخوان‌ها، مسیر بازگشت و بهبود را بسیار مشکل و حتی غیر ممکن می‌سازد. دستگاه‌های متولی از جمله سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان، سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی مسئولیت بسیار سنگینی در مدیریت بحران و بهبود شرایط را دارند. با توجه به اینکه پدیده فرونشست زمین در نتیجه برداشت بدون تغذیه سفره آب‌های زیرزمینی است و مشکلات حادث شده تا این لحظه، در نتیجه سوء مدیریت در برداشت از منابع آب زیرزمینی است.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

۶- سپاس گزاری

این پژوهش ارائه نتایج بخشی از طرح پژوهشی در گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی بیرجند بوده است. لذا، صمیمانه از همکاری و حمایت تمام کسانی که که ما را در به سرانجام رساندن این پژوهش یاری نمودند، کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم.

منابع

1. Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016). Drought Monitoring Based on the SPI and RDI Indices under Climate Change Scenarios (Case Study: Semi-Arid Areas of West Golestan Province). *ECOPERSIA*, 4(4), 1585-1602. http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-7974-en.html.
2. Akbari, M., Neamatollahi, E., & Neamatollahi, P. (2019). Evaluating land suitability for spatial planning in arid regions of eastern Iran using fuzzy logic and multi-criteria analysis, *Ecological Indicators*, 98, 587-598. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.035
3. Akbari, M., Neamatollahi, E., Memarian, H., & Alizadeh Noughani, M. (2023). Assessing impacts of floods disaster on soil erosion risk based on the RUSLE-GloSEM approach in western Iran. *Natural Hazards*, 117, 1689–1710. https://doi.org/10.1007/s11069-023-05925-y
4. Anderssohn, J., & Wetzel, H. (2008). Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: Results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International*, 174 (1), 287–294,
5. Bureau of Basic Studies of Water Resources. (2021). *Floods of Khorasan Razavi 1995-2020. Regional Water Company of Khorasan Razavi*. First edition. https://www.khrw.ir/?l=EN
6. Behrouzi, A., Nazem Al Sadat, S.M., & Pishvaei, M. (2023). Evaluating the trend of rainfall changes in the long-term time series of Shiraz. *JOURNAL OF DROUGHT AND CLIMATE CHANGE RESEARCH*, 1(1), 19-32. https://sid.ir/paper/1051127/en. (In Persian)
7. Bayat Varkeshi, M., Farahani Dastjani, M., & Ghabaei Sough, H.M. (2018). EFFECT OF METEOROLOGICAL DROUGHT ON GROUNDWATER RESOURCES (CASE STUDY: KOMIJAN AQUIFER IN MARKAZI PROVINCE). *IRAN-WATER RESOURCES RESEARCH*, 14(1), 114-124. https://sid.ir/paper/100311/en. (In Persian)
8. Bozzano, F., Esposito, C., Franchi, S., Mazzanti, P., Perissin, D., & Rocca, A. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: the acque albule plain case study. *Remote Sensing of Environment*, 168, 219–238. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.010
9. Bureau of Basic Studies of Water Resources. (2013). *report on the extension of the ban on the study area of Kashmar Plain*, Khorasan Razavi Regional Water Company. https://www.khrw.ir/uploaded_files/DCMS/
10. Chatrsimab, Z., Alesheikh, A., & Vosoghi, B.M. (2018). Surveying subsurface abandonment due to groundwater irregular removal using radar interferometry technique, Marvdasht Aquifer. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 114-125. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.116621.1400
11. Chen. C., Wang. C., & Chen Kuo, L. (2010). Correlation between groundwater level and variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan. Taiwan.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

Engineering Geology, 115(2), 122–131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011
12. Childs, C. (2004). *Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst*. ArcUser, July-September, 32-35.
13. Chit Sazan, M., Mirzae, S.Y., Mohammadi, B., & Shaban, M. (2009). *The effect of drought on the quantity and quality of underground water resources (a case study of Khois Plain in North Khuzestan)*. National conference on the effects of drought and its management solutions, 2, 551-558. https://sid.ir/paper/464944/fa. (In Persian)
14. Erler, A.R., Frey, S.K., Khader, O., d'Orgeville, M., Park, Y.J., Hwang, H.T., & Sudicky, E.A. (2019). Evaluating Climate Change Impacts on Soil Moisture and Groundwater Resources within a Lake-Affected Region. *Water Resources Research*, 55(10), 8142-8163.
15. Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., & Zebker, H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: *Solid Earth*, 94(7), 9183-9191. https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183
16. Guo, L. (2014). Evaluation of PS-DInSAR technology for subsidence monitoring caused by repeated mining in mountainous area. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3309-3315.
17. Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998) A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated. *Journal of Hydrology*, 204, 182-196. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125
18. Hosseinzadeh, S.R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 99-126. https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169 (in Persian)
19. Https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021
20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/.
21. Lashkaripour, G., Ghafouri, M., & Rostami Barani, H. (2008). Investigating the causes of cracks and land subsidence in the west of Kashmir plain. *Geological Studies*, 1(1), 95-111. https://sid.ir/paper/467853/fa. (in Persian)
22. Lashgaripour, G., Ghafouri, M., Swayzi, Z., & Takhni, Z. (2006). *Groundwater level drop and ground subsidence in Mashhad plain.* Conference of Geological Associations of Iran. https://sid.ir/paper/805058/fa. (In Persian)
23. Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Volume 2*: Spatial Measurements & Statistics.
24. Mohebbi Tafreshi, M., & Nakhaei, R. (20210) Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *Geo journal*, 86, 1203-1223.
25. Memarian Khalilabad, H., Azadi Shibkooh, S., Pourreza Beilandi, M., Abedinpour, M., & Akbari, M. (2020). Evaluation of temporal-spatial changes of groundwater resources in Kashmar plain based on time series analysis of precipitation and drought data. *JOURNAL OF RAINWATER CATCHMENT SYSTEMS*, 8(24), 55-69. https://sid.ir/paper/961650/en. (In Persian)
26. Memarian, H., Abdi Bastami, S., Akbari, M., Tajbakhsh, S.M., & Azamirad, M. (2023). An integrative approach of the physical-based stability index mapping with the maximum entropy stochastic model for risk analysis of mass movements. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 2808–2830. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02165-1

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

27. Memarian Khalilabad, H., Balasundram, S.K., Talib, J.B., Sood, A.M., & Abbaspour, K.C. (2012). Trend analysis of water discharge and sediment load during the past three decades of development in the Langat basin, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1207-1222.
28. Moslemzadeh, A., Memarian Khalilabad, H., Tajbakhsh, S.M., & Akbari, M. (2021). Land Subsidence Assessment in Kashmar Plain Using the Sentinel-1Radar Interferometry techniques. *2nd International* Conference on Geographic Information Science of Interdisciplinary Foundations and Applications, Mashhad. https://civilica.com/doc/1383892l, 57(6), 1207-1222.
29. Mohammadi, S., Naseri, F., & Nazariour, H. (2018). Investigating the temporal variation and meteorological drought effect on groundwater resources in Kerman plain using SPI and GRI indices. *IRANIAN JOURNAL OF ECOHYDROLOGY*, 5(1), 11-22. https://sid.ir/paper/253985/en. (In Persian)
30. Nabavi, M, 1976. "*Introductory book on the geology of Iran"*, Publisher: Geological Organization of the country, (1976) edition. Iranian Fisheries Research Organization. (In Persian)
31. Nasrian, A., Akbari, M., Faridhosseini, A., Neamatollahi, E., & davari, S. (2019). Quantitative Assessment of Desertification Intensity Indices in the Agricultural Lands of Dargaz Plain, Khorasan Razavi Province. *Desert Management*, 7(13), 149-170. https://doi.org/10.22034/jdmal.2019.36537
32. Nourmohamadi, S., Tajbakhsh, S.M., & Memarian, H. (2017). A Study on the Impact of Climatic Factors on Groundwater Resources Using Spatio-Temporal Analysis of Statistical Time Series (Case Study: Mashhad Plain, Kasahfroud Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), 19-44. https://doi.org/10.22067/geo.v6i3.60760 (In Persian)
33. National Cartographic Center. 2019. *Atlas and maps of land subsidence*. https://en.ncc.gov.ir
34. Nur Khakim, M., Tsuji, T., & Toshifumi, M. (2014). Lithology-controlled subsidence and seasonal aquifer response in the Bandung basin, Indonesia, observed by synthetic aperture radar interferometry. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 199-207.
35. Rucci, A., Ferretti, A.M., & Rocca, F. (2012). "Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements," *Remote Sensing of Environment*, 120, 156-163, https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030.
36. Sabaghian Javidi, R., & Sharifi, M. (2009). The use of stochastic models in the simulation of river flow and forecasting the average annual flow of the river by analyzing time series. *Iran Water Resources Management Conference*, 1(1), 95-111. https://sid.ir/paper/489064/fa. (In Persian)
37. Sáenz, M.C., Montoya, F.F., & De Mingo, R.G. (2009). *The role of groundwater during drought. In Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems* (221-241). Springer, Dordrecht.
38. Seydai, E., Jahangir, E., Darabkhani, R., & Panahi, A. (2020). Recognizing the Eventful points of the axes of Alborz province using the kernel density method. *HUMAN GEOGRAPHY RESEARCH QUARTERLY*, 52(3), 939-951. https://sid.ir/paper/370398/en. (In Persian)
39. Shafiei, N., Golimokhtari, L., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2020). Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method. *QUANTITATIVE GEOMORPHOLOGICAL RESEARCHES*, 8(4), 93-111. https://sid.ir/paper/377960/en. (In Persian)

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]

40. Sobhani, M., Memarian, H., & Tajbakhsh, S.M. (2015). *Investigating the influencing factors on the sedimentation process of Bar Neyshabur using time series analysis*. Iran hydraulic conference. https://sid.ir/paper/863650/fa. (In Persian)
41. Torabi poudeh, H., & Dehghani, R. (2019). Assessment Mann-Kendall and Spearman Test Nonparametric in Trends of Groundwater Quality (Case Study: Mazandaran Plain). *GEOGRAPHIC SPACE*, 18(64), 201-214. https://sid.ir/paper/91440/en. (In Persian)
42. World Bank. 2005. *Cost Assessment of Environmental Degradation*, Islamic Republic of Iran. Report No. 32043-IR, Washington, DC.
43. Yousefi, A., Nasiri, B., Karampour, M., & Malekian, A. (2017). Investigating the effect of climate change on changes in the groundwater level of dry areas, a case study: Bagh Desert. *Natural Geography*, 11(42), 97-112. https://sid.ir/paper/515385/fa. (In Persian)
44. Zafor, M., Alam, M., Bin, J., Rahman, M., Amin, M.N., Zafor, M.A., & Amin, M.N. (2017). The analysis of groundwater table variations in Sylhet region, Bangladesh. *Environmental Engineering Research*, 22(4), 369-376.
45. Zare Abyaneh, H., Bayat Varkeshi, M., & Bayat Varkeshi, J. (2012). APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE EVALUATION OF EKBATAN WASTEWATER TREATMENT PLANT. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL STUDIES*, 38(63), 22-24. https://sid.ir/paper/401837/en. (In Persian)
46. Zandi, R., Farzin Kia, R., & Shafiei, N. (2019). *Radar interferometry. 2nd edition. Satellite publications*. Book of ground subsidence and radar interferometer. 1st edition. Geography and geology books. 82-129. (In Persian)

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.178]