



Investigating the Effect of Aquifer Water Table Variation on the Subsidence Phenomenon and Balancing Strategies of the Aquifer (Case Study: Ali-Abad Plain, Qom)

A. Edalat¹, M. Khodaparast^{1*}, A. M. Rajabi²

¹ Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

² Department of Engineering Geology, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Ali-Abad Plain of Qom Province, located in the center of Iran, is among the areas recently affected by the subsidence phenomenon due to water overexploitation. In this research, using the differential radar interferometry and Sentinel-1 images, vertical land deformation was monitored for 18 months from March 2015 to September 2016. The results showed maximum subsidence of 240 mm. Moreover, it was found that subsidence in this plain is a progressive and continuous phenomenon with an almost constant spatial distribution. Next, groundwater table fluctuations were measured in Savch Plain for 14 years ranging from September 2002 to September 2016. The results showed a maximum water table decline of -44 m. Comparison of the ground deformation map with groundwater level fluctuation map revealed a direct relationship between spatial distribution and ground deformation intensity and groundwater drop. In addition, comparing the alluvium thickness variations with ground deformation indicates that the alluvium thickness of the Ali-Abad Plain varies from 20 m in its eastern part to 300 m in the western and central areas. The results do not show any significant relationship between these two parameters in the study area. Moreover, it was found that layering type and the presence of thick fine-grained formations are among other factors affecting the intensity and rate of subsidence in the plain. Regarding the direct relation between groundwater table fluctuations and subsidence rate in the study area, the water yield of the plain showed an annual deficit of 88.17 million cubic meters. Investigating the exploitation resources and the consumption type of groundwater resources in the study area showed that above 98% of the water extraction from the aquifer is through the wells, of which 92% is consumed for agricultural purposes. Hence, exploitation management of the wells, control of illegal exploitation, and revision of cultivation and irrigation are among the major strategies for restoration and balancing the groundwater resources in the study area.

Review History:

Received: Oct. 26, 2019

Revised: Dec. 25, 2019

Accepted: Jan. 05, 2020

Available Online: Feb. 02, 2020

Keywords:

Ubsidence

Differential Sar Interferometry

(Dinsar)

Groundwater

Balancing

Ali-Abad Plain.

1- Introduction

Over-pumping of groundwater increases the effective stress in the aquifer system. Changes in the effective stress also, in turn, cause the accumulation of fine sediments, and consequently, the aquifer system subsidence [1]. The phenomenon of land subsidence, if not properly managed to restore and balance the groundwater resources, can provide irreparable damages. Groundwater restoration and equilibrium refer to all activities aimed at improving the quality and quantity of groundwater aquifers and controlling groundwater levels and preventing its continued decline in the plain [2]. The first step in managing and controlling the subsidence phenomenon is to accurately identify the subsidence points and determine the annual rate of the subsidence. Radar interferometry is a useful tool for remote sensing. This technique measures ground surface

displacement with accuracy that is comparable to precise leveling measurements and the positioning system [3]. Ali-Abad Plain, located on the border between the provinces of Qom and Central (Central Iran), has been involved in the phenomenon of subsidence in recent years. Signs such as protruding wells and slits in the plain margins can be attributed to this phenomenon. In the present study, using remote sensing technology and geographic information system, the subsidence status in the Ali-Abad region and the influence of groundwater fluctuations and geological formations on land surface changes are investigated. Accordingly, in this paper, after presenting the geological and hydrological features of the study area, the relationship between spatial distribution and subsidence intensity over the 18 months (March 2015 to August 2016) and groundwater changes is investigated.

*Corresponding author's email: khodaparast@qom.ac.ir



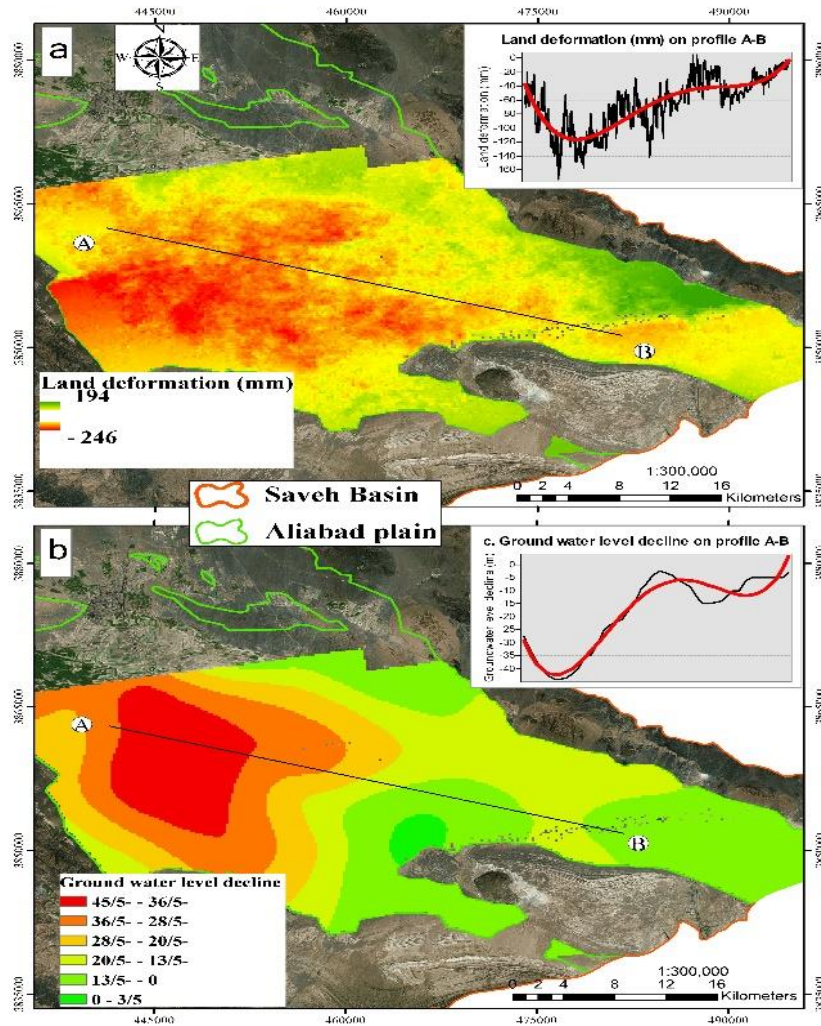


Fig. 1. (a) Ground deformation map and graph of landform changes on A-B profile over the total study period (t_{Total}), (b) Groundwater level change map and graph of changes in A-B profile over the inter-annual period of 2002 to 2016 in Ali-Abad Plain

2- Methodology

The study area, Ali-Abad plain, is part of the Savah basin and is located in Qom and central provinces (located in central Iran). Radar interferometry, because of its large coverage, low economic cost, and high accuracy in large areas, is one of the most suitable options among the subsidence monitoring and land deformation determining methods. For this purpose, Sentinel 1 satellite images were used in this study. In this study, the land subsidence in Ali-Abad Plain was investigated using radar image processing over 18 months (March 2015 to August 2016) (t_{Total}). Monitoring was also conducted at 4 time-intervals between March 2015 and August 2016 (t_1 to t_4) to evaluate the impact of study duration on the results of ground deformation. In this research, ENVI software and Sarscape plug-in [5] have been used to exploit raw data and satellite images. Other inputs include the map of groundwater level changes in the Savah plain from October 2002 to August 2016 and the values of the mechanical parameters of the geological formations in the various layers of boreholes.

3- Results and Discussion

Based on the results of radar interferometry analysis using the Sentinel 1 sensor, Ali-Abad Plain experienced maximum ground subsidence of 246 mm during the 506-day study period. Besides, the maximum subsidence values in the four studied periods (t_1 to t_4) were 171, 143, 142, and 104 mm, respectively. The ground deformation raster map for the total studied period (t_{Total}), along with the raster map of groundwater level changes for 2002 to 2016, is shown in Fig. 1. According to the figure, the spatial distribution of subsidence areas corresponds to the locations that experienced the greatest reduction in groundwater levels. To illustrate the relationship between these two effects, the diagram of the ground deformation compared to groundwater level decline in profile A-B, is shown in Fig. 1. The fitting curves of the two graphs (red line in Fig. 1a and b) have the same trend, with the highest subsidence occurring in the A-B profile where the greatest amount of groundwater level decline has occurred.

Table 1. Groundwater balance of the Ali-Abad Plain alluvial aquifer (million cubic meters per year)

Aquifer name	Balance Area (km ²)	Recharge volume						Discharge volume					Storage volume changes
		Input groundwater flow	Aquifer surface rainfall intrusion	Surface water flows intrusion	Agricultural water intrusion	Drinking and industrial water intrusion	Total recharge	Well, aqueduct, and spring discharge	Drainage	Aquifer evaporation	Transfer and underground output	Total discharge	
Saveh	1632.8	87.46	44.31	109.27	246.02	34.31	521.37	564.46	0	0	45.05	609.54	-88.17

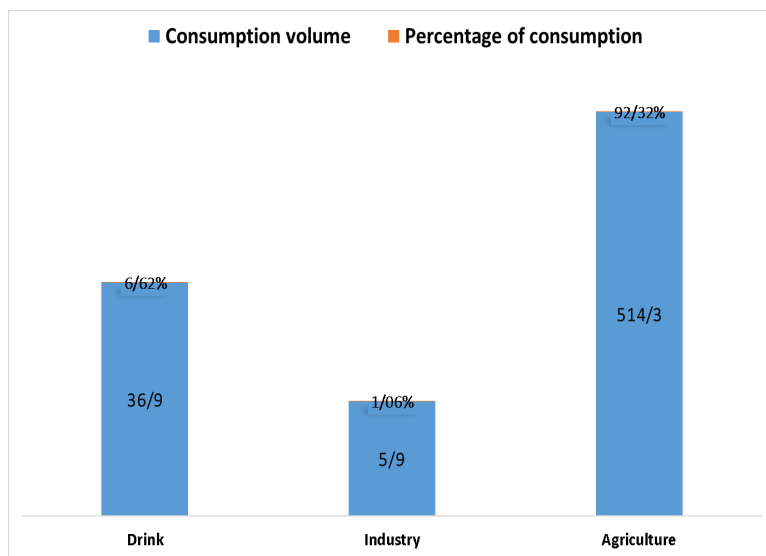


Fig. 2. The type of water consumption from the groundwater resources of Ali-Abad Plain

Table 2. Groundwater exploitation resources in Ali-Abad Plain (million cubic meters per year)

Resource type	Number	Discharge	Percent
Well	1334	557.10	98.69
Spring	2	0.06	0.01
Aqueduct	18	7.3	1.30
Total	1354	564.46	100

Regarding the direct relation between ground subsidence and groundwater depletion in Ali-Abad Plain, in another part of this study, the groundwater balance of the alluvial aquifer of this plain was investigated. The results of groundwater balance including the volumes of recharge and discharge components of the aquifer as well as the volume change of the alluvial aquifer storage are presented in Table 1. According to this table, the total volume of aquifer recharge and discharge components was 521.37 and 609.54 million cubic meters per year, respectively, which confirms the aquifer storage deficit of 88.17 million cubic meters per year. Groundwater

exploitation resources of Ali-Abad Plain aquifer, based on observational wells statistics in Qom province, are shown in Table 2. As shown in the table, more than 98% of Ali-Abad Plain aquifer is exploited from wells in this area, and springs and aqueducts account for a small percentage. Fig. 2 illustrates the type of exploited water from the Ali-Abad aquifer, based on the statistics of the wells. According to Fig. 2, a total of 557.10 million cubic meters per year of groundwater is extracted from Ali-Abad Plain wells. More than 92 percent of this amount (514.3 million cubic meters) is used for agriculture, 7 percent for drinking water, and 1 percent for industry.

4- Conclusion

The study of the ground deformation at different time intervals also shows that the subsidence in this region is a continuous phenomenon with a relatively constant spatial distribution. The results show that there is a direct relationship between these two factors in the study area. Besides, the studies show that the type of stratification and existence of layers including fine-grained thick formations are other influential factors on the intensity and rate of subsidence in the Ali-Abad Plain. The results of the groundwater balance survey of the Ali-Abad Plain aquifer revealed 88.77 million cubic meters of aquifer storage deficit per year. Groundwater exploitation resource survey of Ali-Abad Plain showed that organizing well utilization and control of unauthorized exploitation should be prioritized in updating the water resources balance plans. Also, considering that 92% of the plain groundwater is consumed in agriculture, a revision of the cultivation and irrigation pattern is recommended as the next necessary measure in restoring and balancing the groundwater resources of Ali-Abad Plain.

References

- [1] K. Terzaghi, Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay, *Engineering News-Record*, 95(3) (1925) 874-878.
- [2] R. Bonì, G. Herrera, C. Meisina, D. Notti, M. Béjar-Pizarro, F. Zucca, P.J. González, M. Palano, R. Tomás, J. Fernández, J.A. Fernández-Merodo, J. Mulas, R. Aragón, C. Guardiola-Albert, O. Mora, Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study, *Engineering Geology*, 198 (2015) 40-52.
- [3] W.-C. Hung, C. Hwang, J.-C. Liou, Y.-S. Lin, H.-L. Yang, Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan, *Engineering Geology*, 147 (2012) 78--90.
- [4] Sentinel-1 Scientific Data Hub, in: European Space Agency2016b, European Space Agency2016b, 2016.
- [5] Sarmap, ENVI SARscape 5.2, in, 2015.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Edalat, M. Khodaparast, A. M. Rajabi ., *Investigating the Effect of Aquifer Water Table Variation on the Subsidence Phenomenon and Balancing Strategies of the Aquifer (Case Study: Ali-Abad Plain, Qom)*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53 (5) (2021) 455-458

DOI: [10.22060/ceej.2020.17275.6511](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17275.6511)





بررسی اثرات تغییر تراز آب زیرزمینی آبخوان بر پدیده فرونشست و راهکارهای تعادل بخشی آبخوان (مطالعه موردی: دشت علی آباد قم)

علی عدالت^۱، مهدی خداپرست^{۱*}، علی محمد رجبی^۲

^۱ دانشکده مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

^۲ دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۴

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

فرونشست

داخل‌سنجی تفاضلی راداری

آب زیرزمینی

تعادل بخشی

دشت علی‌آباد

خلاصه: دشت علی آباد قم واقع در مرکز ایران یکی از مناطقی است که در سال‌های اخیر به سبب استخراج بیش از حد منابع آب زیرزمینی دچار پدیده فرونشست گردیده است. در این پژوهش با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به کمک تصاویر سنجنده سنتینل ۱ تغییر شکل عمودی زمین در دشت علی‌آباد در بازه زمانی ۱۸ ماهه از فروردین ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵ مورد پایش قرار گرفت و نتایج حداکثر میزان فرونشست حدود ۲۴۰ میلی‌متر را نمایان ساخت. همچنین نتایج نشان می‌دهد فرونشست در این دشت پدیده‌ای ادامه‌دار، پیش‌رونده و با توزیع مکانی نسبتاً ثابت است. در ادامه بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت ساوه از مهرماه سال ۱۳۸۱ لغایت شهریور سال ۱۳۹۵ نشان‌دهنده حداکثر افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۴۴- متر می‌باشد. مقایسه نقشه تغییر شکل زمین با نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد رابطه مستقیمی بین توزیع فضایی و شدت تغییر شکل زمین و افت آبهای زیرزمینی وجود دارد. از سوی دیگر نتایج مقایسه روند تغییرات ضخامت آبرفت در مقایسه با تغییر شکل زمین نشان می‌دهد که ضخامت آبرفت دشت علی‌آباد از حدود ۲۰ متر در شرق منطقه مورد مطالعه تا ۳۰۰ متر در غرب و مرکز متغیر می‌باشد و رابطه مستقیم معنی‌داری بین این دو پارامتر در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد. از سوی دیگر بررسی‌ها نشان دادند نوع لایه بندی و وجود لایه‌هایی از جمله سازندهای ریزدانه با ضخامت زیاد از عوامل دیگر تأثیرگذار در شدت و نرخ پدیده فرونشست در دشت علی‌آباد می‌باشد. در ادامه با توجه به وجود رابطه مستقیم تغییرات تراز آب زیرزمینی با میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه، بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت علی‌آباد کسری ذخیره آبخوان به میزان ۸۸/۱۷ میلیون مترمکعب در سال را آشکار نمود. در همین راستا بررسی منابع بهره‌برداري و نوع مصرف منابع زیرزمینی دشت نشان می‌دهد که بیش از ۹۸ درصد برداشت از آبخوان از طریق چاه‌ها صورت می‌گیرد که ۹۲ درصد آن برای مصارف کشاورزی می‌باشد. بر این اساس سامان‌دهی بهره‌برداري از چاه‌ها، کنترل بهره‌برداري‌های غیرمجاز و بازنگری در الگوی کشت و آبیاری به عنوان راهکارهای ضروری جهت احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی دشت پیشنهاد می‌گردد.

۱- مقدمه

گردد. مجموع فشار روباره در قسمت‌های اشباع و غیراشباع به وسیله ساختار دانه‌ای و آب منفذی تحمل می‌شود. زمانی که فشار آب منفذی بخاطر زهکشی کاهش می‌یابد، تنش وارده به صورت تدریجی از آب منفذی به ساختار دانه‌ای رسوبات انتقال می‌یابد؛ بطوری که وقتی سطح آب زیر زمینی به اندازه ۱ متر کاهش یابد، اسکلت خاک افزایش تنشی به اندازه ۱۰ کیلوپاسکال تحمل خواهد کرد. این افزایش

پمپاژ بیش از حد آبهای زیرزمینی باعث افزایش تنش مؤثر در سیستم آبخوان می‌شود. تغییرات در تنش مؤثر نیز به نوبه خود تراکم رسوبات ریزدانه و در نتیجه فرونشست^۱ سیستم آبخوان را سبب می‌-

1 Subsidence

* نویسنده‌دار مکاتبات: khodaparast@qom.ac.ir



بهترین منبع اندازه‌گیری مقادیر جابه‌جایی با قدرت تفکیک مکانی بالا و دقت مطلوب مورد استفاده قرار گیرد [۱۴].

بونی و همکاران (۲۰۱۵) دوره بیست ساله تکامل فرونشست شدید زمین در حوضه گوآدلتین آلتو (جنوب اسپانیا) را با استفاده تصاویر رادار روزنه مصنوعی^۲ و تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی^۳ آشکار نمودند. تصاویر رادار روزنه مصنوعی مورد استفاده در این مطالعه از چهار ماهواره ERS، ENVISAT، ALOS و COSMO-Sky بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲ به دست آمده بودند. نتایج، حداکثر جابه‌جایی ۲/۵ متر را در طول دوره ۲۰ ساله در این حوضه نشان دادند. همچنین نتایج حاصل از تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با نتایج پایش فرونشست از داده‌های سیستم موقعیت‌یابی جهانی که از دو ایستگاه مستقر در منطقه مورد مطالعه بدست آمده بودند، مقایسه شد و سازگاری خوب بین این دو روش مورد تأکید قرار گرفت. از سوی دیگر خطای متوسط $4 \pm 4/6$ میلی‌متر برای داده‌های ماهواره ALOS و $3/5 \pm 4/8$ میلی‌متر برای داده‌های ماهواره COMO-SkyMed قابلیت اطمینان تجزیه و تحلیل را تأیید کرد [۱۵].

شریفی و نیکتا (۱۳۹۰) برای کلان شهر تهران، نرخ و دامنه فضایی پدیده فرونشست را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری بررسی کردند. یافته‌های این بررسی مؤید تغییر در نرخ فرونشست و افزایش چشم‌گیر آن در سال ۱۳۸۹ است. بر پایه این یافته‌ها بیشینه نرخ نشست در یک دوره ۱۱۰ روزه از اواخر بهار تا انتهای تابستان سال ۱۳۸۹ حدود ۱۰۸ میلی‌متر گزارش شده است. همچنین نتایج نزدیکی نرخ نشست به رقم حداکثری یک میلی‌متر در روز و یا ۳۶ سانتی‌متر در سال را بیان می‌دارد که دو برابر ارقام معرفی شده در سال‌های گذشته می‌باشد. به لحاظ گسترش فضایی و اراضی در معرض تهدید پدیده نشست، بررسیها مؤید استقرار این پدیده در عمده اراضی نواحی جنوبی و غربی تهران از حوالی اتوبان نواب تا شهرک اندیشه در غرب است [۱۶].

عالم رجبی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهش خود به مطالعه خصوصیات و پارامترهای ژئوتکنیکی مؤثر در فرونشست شهر یزد با استفاده از بررسی داده‌های راداری پرداختند. در این پژوهش نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیک ۴۶ پروژه در مناطق مختلف شهر جمع‌آوری و در سیستم اطلاعات جغرافیایی وارد شده و مناطق دارای پتانسیل

تنش، ساختار خاک را جهت سازگاری با وضعیت جدید تنش تغییر می‌دهد. با تغییر ساختار خاک، نسبت تخلخل رسوبات و بنابراین حجم رسوبات کاهش می‌یابد و فرونشست زمین را به دنبال دارد [۱]. فرونشست زمین ناشی از استخراج بیش از حد آبهای زیرزمینی و پیامدهای محیطی آن یکی از مشکلات مهم در اکثر نقاط جهان است [۲-۵]. در کشور ایران، فرونشست در مناطق زیادی از جمله رفسنجان [۶]، مشهد [۷]، یزد [۸]، اراک [۹] و تهران [۱۰، ۱۱] گزارش شده است.

پدیده فرونشست زمین چنانچه با مدیریت صحیح در راستای احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی همراه نشود، میتواند خسارات جبران‌ناپذیری را فراهم سازد. احیاء و تعادل بخشی آبهای زیرزمینی به کلیه فعالیت‌هایی اطلاق می‌گردد که به منظور اصلاح و بهبود وضعیت کمی و کیفی سفره‌های آب زیرزمینی صورت و موجب کنترل سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از ادامه کاهش افت آن در دشت می‌گردد [۱۲].

با توجه به وسعت و تعدد زیاد مناطق درگیر فرونشست در ایران، مطالعات صحرایی و میدانی معمولاً با مشکلات و موانع بسیار زیادی روبرو است. گام نخست در مدیریت و کنترل پدیده فرونشست شناسایی دقیق نقاط در حال فرونشست و تعیین نرخ سالیانه این پدیده می‌باشد. تکنیک تداخل‌سنجی راداری از جمله ابزارهای سنجش از راه دور مفیدی است که جابه‌جایی سطح زمین را با دقتی قابل مقایسه با اندازه‌گیری‌های ترازبایی دقیق و سیستم مکانیابی^۱ در اختیار محققین قرار می‌دهد [۱۳].

در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در زمینه اندازه‌گیری میدان‌های جابه‌جایی ناشی از پدیده‌های مختلف در سطح زمین توسط محققین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری انجام گرفته است. به عنوان نمونه اطلاعات تداخل‌سنجی راداری از سال ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۹ فرونشستی را در منطقه‌ای به وسعت بیش از ۵۰ کیلومترمربع در کالیفرنیا غربی آشکار نمود. در این پروژه از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و داده‌های ماهواره‌های ERS جهت بررسی فرونشست استفاده شد. بیشینه نرخ فرونشست در این منطقه به ۳/۵ سانتی‌متر در سال و نرخ حجمی متوسط فرونشست به ۱۰۶ مترمکعب در سال می‌رسید. در تحقیق مذکور تداخل‌سنجی راداری توانست به عنوان

2 SAR
3 DInSAR

1 GPS

پیش‌بینی وضعیت و روند فرونشست دشت در آینده، می‌تواند در اتخاذ سیاست‌های صحیح مدیریت منابع آب مفید باشد. در پژوهش حاضر در نظر است با استفاده از فناوری سنجش از راه دور و به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی وضعیت فرونشست در منطقه علی آباد و تأثیر نوسانات آب‌های زیرزمینی و سازنده‌ای زمین‌شناسی بر تغییرات سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد. بر همین مبنا در این مقاله پس از ارائه ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه، رابطه بین توزیع فضایی و شدت فرونشست در دوره زمانی ۱۸ ماهه فروردین ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵ و تغییرات آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز با توجه به بیلان آب زیرزمینی دشت در مورد سیاست‌های مدیریتی آب‌های زیرزمینی با هدف احیاء و تعادل بخشی آبخوان دشت پیشنهادهایی ارائه می‌گردد.

۲- الگوسازی نظری و تجربی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

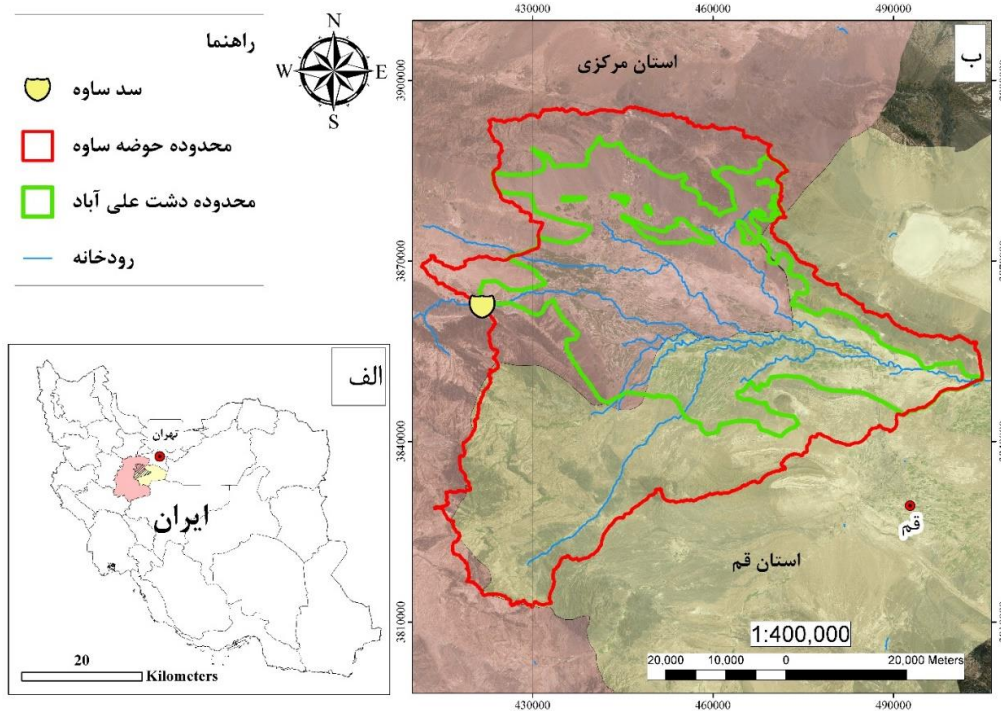
منطقه مورد مطالعه، دشت علی‌آباد، قسمتی از حوضه ساوه بوده و به طور مشترک در استان‌های قم و مرکزی (واقع در مرکز ایران) قرار دارد (شکل ۱). در سال‌های گذشته، در این محدوده رودخانه اصلی قره‌چای جریان داشته و رودخانه مزلقان نیز به آن می‌ریخته است. پس از آبرگیری سد ساوه در سال ۱۹۹۱ رودخانه قره‌چای، تنها رودخانه دائمی دشت، به رودخانه فصلی تبدیل شده و در اکثر اوقات سال کاملاً خشک است. همین موضوع باعث عدم تغذیه آبخوان دشت علی‌آباد از منابع آب رودخانه و در نتیجه افزایش تنش آبی این آبخوان شده است. در این بین در سال‌های اخیر افزایش برداشت آب زیرزمینی از آبخوان دشت علی‌آباد در نتیجه بالا رفتن نیاز آبی برای مصارف کشاورزی و آشامیدن، سبب افت پیش‌رونده تراز آب زیرزمینی و در نتیجه وقوع پدیده فرونشست در مناطقی وسیعی از دشت شده است. نقشه زمین‌شناسی حوضه ساوه و منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. از نقطه نظر زمین‌شناسی، رسوبات آبرفتی دشت ساوه حاصل فعالیت رسوبگذاری رودخانه‌های قره‌چای و مزلقان و دیگر رودخانه‌های موجود در این دشت می‌باشد. در نیمه غربی دشت علی‌آباد و در محل ورود رودخانه‌ها به دشت، آورد رودخانه قابل توجه بوده و با کاهش شیب حوضه رسوبات مخروط افکنه‌ای از نوع شن و ماسه ته نشین شده‌اند. بافت رسوبات آبرفتی به سمت شرق به

رهمبندگی، واگرایی و تورم مشخص گردیدند. همچنین نقشه تغییرات عدد نفوذ استاندارد^۱ در ترازهای ۳ و ۶ متری به منظور سنجش میزان تراکم خاک‌های منطقه ترسیم شد. پس از تلفیق نتایج حاصله، مناطق شرقی، جنوب شرقی و شمال یزد از لحاظ ژئوتکنیکی مستعد رخداد پدیده فرونشست تشخیص داده شدند و در نهایت نقشه پهنه‌بندی فرونشست در شهر یزد تهیه گردید [۱۷].

طاهری و همکاران (۲۰۱۸) به منظور تهیه مدل ریاضی فرونشست دشت اسدآباد همدان بین سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ از نرم‌افزار PMWIN استفاده نمودند. مقایسه خروجی مدل با داده‌های واقعی تغییرشکل زمین بین سالهای ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ صحت این مدل را تأیید کرده است. مطالعه عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست (افت سطح آب زیرزمینی، نوع آبخوان، ضخامت سفره آب و هوا) که نشان داد بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت آسیب‌پذیری بیشتری در مقابل پدیده فرونشست دارند [۱۸].

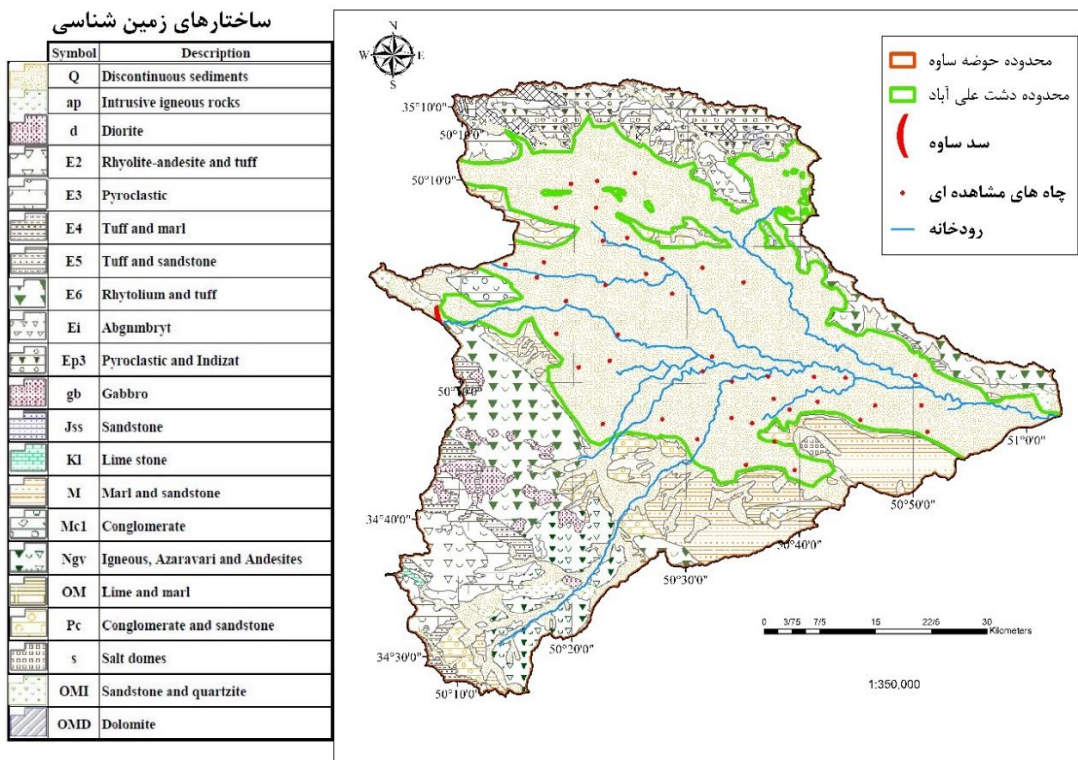
در یکی معدود پژوهش‌های صورت گرفته در دشت علی‌آباد، رجبی (۲۰۱۸) با استفاده از یک مدل عددی با در نظر گرفتن تغییرات فشار آبخوان، داده‌های هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی، فرونشست زمین در دشت علی‌آباد قم را مورد ارزیابی قرار داد. بررسی‌های ایشان نشان داد که از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳، میانگین کاهش سطح آب زیرزمینی ۲۶/۳۵ متر و حداکثر فرونشست مربوطه در دشت ۷۶ سانتی‌متر بوده است. همچنین نتایج تحقیق فوق نشان داد پاسخ واحدهای زمین‌شناسی اشباع به تغییرات سطح آب زیرزمینی بستگی به ویژگی‌های سازنده‌ای زمین‌شناسی آن واحد دارد [۱۹].

دشت علی‌آباد واقع در مرز بین استان‌های قم و مرکزی (مرکز ایران) یکی از دشت‌های ممنوعه از نقطه نظر برداشت منابع آب زیرزمینی است. وجود شواهدی از قبیل بیرون زدگی لوله‌های جدار چاه و شکاف‌های حاشیه این دشت در طی سال‌های اخیر، نشان‌دهنده فرآیند فرونشست پیش‌رونده در این منطقه است. فقدان پایش مستمر فرونشست، وسعت دشت، فاصله زیاد چاه‌های مشاهده‌ای و نبود مطالعات جامع از جمله موانع مواجهه و مدیریت صحیح پدیده فرونشست در دشت علی‌آباد می‌باشد. براین اساس، تحلیل دقیق وضعیت آب‌های زیرزمینی، ارزیابی پارامترهای تأثیرگذار بر میزان فرونشست و توزیع فضایی فرونشست در این دشت و ارائه مدلی جهت



شکل ۱. (الف) موقعیت استان‌های مرکزی و قم در ایران، (ب) موقعیت حوضه ساوه در استان‌های قم و مرکزی و موقعیت دشت علی آباد در حوضه ساوه [۲۰]

Fig. 1. (a) Position of central and Qom provinces in Iran, (b) Position of Saveh basin in Qom and central provinces and position of Ali Abad plain in Saveh basin



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۲۰]
Fig. 2. Geological characteristics of the study area

جدول ۱. دوره های زمانی انتخاب شده برای استخراج تغییرشکل زمین از تصاویر راداری
Table 1. Time periods selected for extraction of ground deformation from SAR images

فاصله زمانی (روز)	انتهای دوره	ابتدای دوره	نام دوره زمانی
۵۰۴	شهریور ۱۳۹۵	فروردین ۱۳۹۴	t _{Total}
۱۴۴	مرداد ۱۳۹۴	فروردین ۱۳۹۴	t _۱
۱۲۰	دی ۱۳۹۴	مرداد ۱۳۹۴	t _۲
۱۴۴	اردیبهشت ۱۳۹۵	دی ۱۳۹۴	t _۳
۹۶	شهریور ۱۳۹۵	اردیبهشت ۱۳۹۵	t _۴

مصنوعی را در چهار حالت مختلف ضبط میکند. در بین این حالات، نوع IW^۳ داده هایی با فاصله ۲۵۰ کیلومتری و رزولوشن ۵ × ۲۰ متر را فراهم میسازد.

در این پژوهش با استفاده از پردازش تصاویر راداری در دوره زمانی ۱۸ ماهه فروردین ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵ (t_{Total}) فرونشست زمین در دشت علی آباد قم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای ارزیابی تأثیر مدت زمان مطالعه بر نتایج تغییرشکل زمین در ۴ بازه زمانی بین فروردین ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵ (t_۱ تا t_۴) نیز پایش انجام گرفته است. در جدول ۱ دوره های زمانی انتخاب شده برای استخراج تغییر شکل زمین از تصاویر راداری نشان داده شده است.

همچنین در این پژوهش از نرم افزار انوی^۴ و افزونه ساراسکیپ^۵ [۲۱] جهت بهره برداری از داده های خام و تصاویر ماهواره های استفاده شده است. در شکل ۳ اطلاعات فراخوانی شده از سنجنده سنتینل ۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳، هر تصویر دانلود شده شامل سه زیرشاخه با نامهای IW_۱، IW_۲ و IW_۳ میباشد که همپوشانی تقریباً دو کیلومتری با همدیگر دارند. هر کدام از این زیرشاخه ها به ۹ بخش مساوی به نام برست^۶ تقسیم میگردد. یک برست در واقع تصویری است که قابلیت پردازش به صورت جداگانه و مستقل از دیگر برستها را دارا میباشد. به سبب اینکه منطقه مطالعاتی ساوه و دشت علی آباد

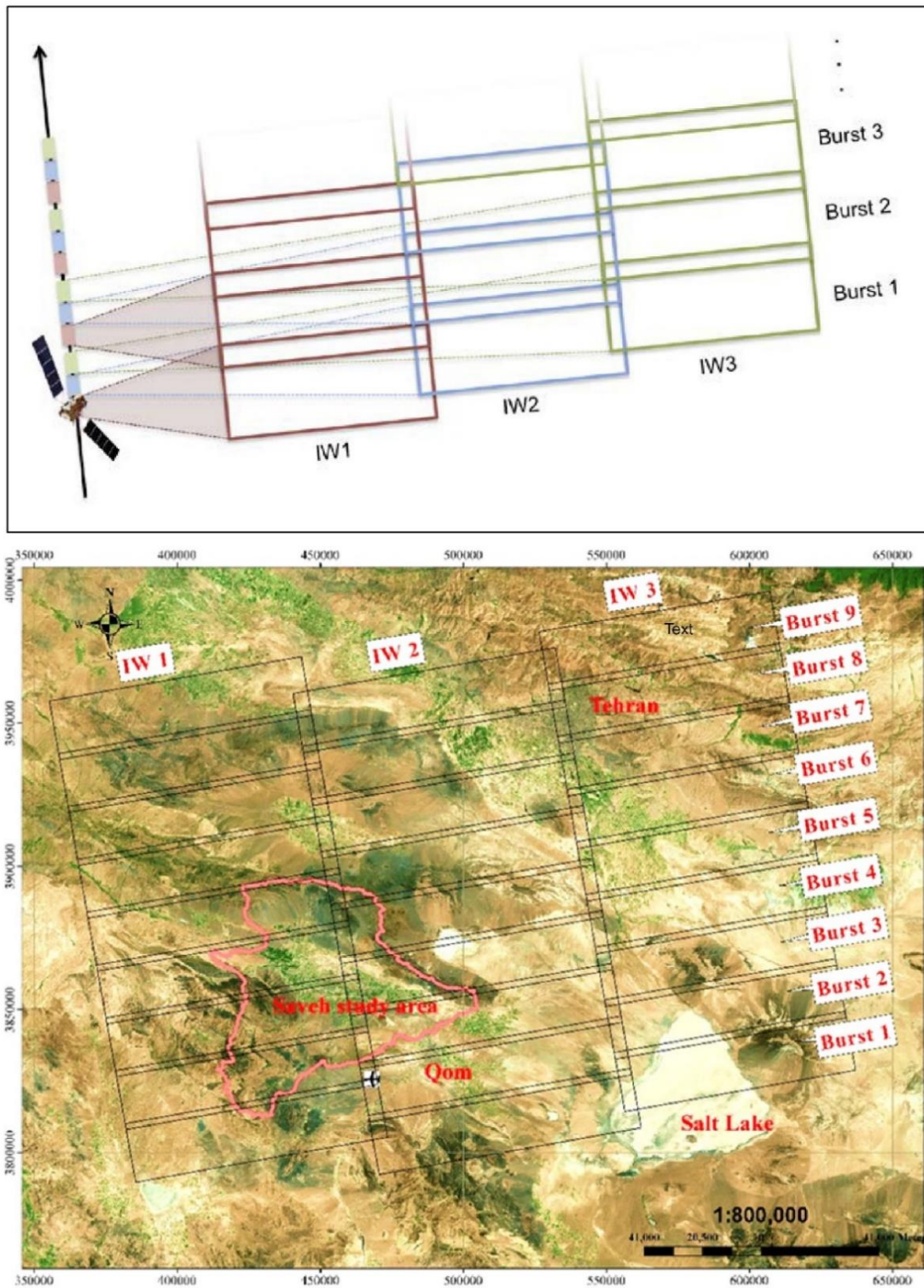
واسطه کم شدن قدرت آبدهی رودخانه ریزدانه می باشد. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت از غرب به شرق بوده و از مهم ترین عوامل تغذیه کننده آبخوان آبرفتی دشت ساوه نفوذ آب از بستر رودخانه های قره چای و مزلقان می باشد. مصالح زمین شناسی موجود در دشت مورد مطالعه، آبرفت کواترنر بوده و بیرون زدگی زمین شناسی خاصی در دشت وجود ندارد و عمدتاً از رسوبات سست سیلت و رس تشکیل شده است. هرچند در ارتفاعات جنوبی منطقه کنگلومرا با میان لایه های میکروکنگلومرای دیده می شود. درجه ماتریکس شدگی این لایه ها متوسط بوده و از جنس رس و ماسه با ابعاد مختلف تشکیل شده است. در محدوده مورد مطالعه آثار و نشانه هایی از گسل های اصلی مشهود نیست [۲۰].

۲-۲- داده های سنجنده سنتینل ۱^۱

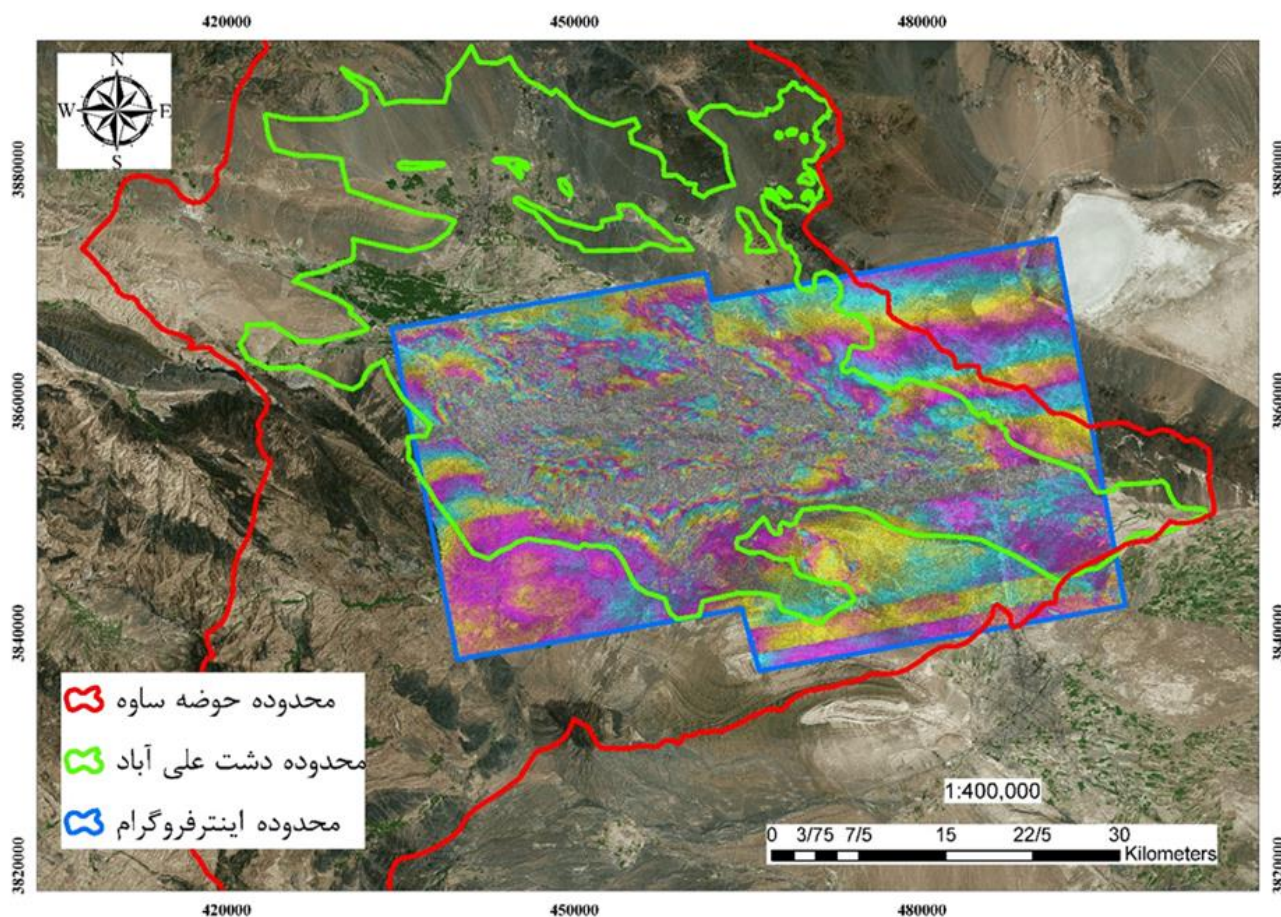
در میان روشهای پایش فرونشست و تعیین تغییر شکل زمین، روش تداخل سنجی راداری به علت پوشش وسیع، صرفه اقتصادی و دقت مناسب در مناطق با وسعت زیاد یکی از مناسب ترین گزینه ها می باشد. بدین منظور در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ استفاده گردیده است. سنتینل ۱ یک ماموریت فضایی است که توسط آژانس فضایی اروپا^۲ در چهارچوب برنامه کپرنیک توسعه داده شده است. سنتینل ۱ بسته به هدف و نوع پژوهش تصاویر رادار روزنه

3 Interferometric wide
4 Envi
5 SARscape
6 burst

1 Sentinel-1A
2 ESA



شکل ۳. تصویر اطلاعات فراخوانی شده از سنجنده سنتینل ۱ و منطقه مورد مطالعه
Fig. 3. Sentinel-1 SLC image and position of study area.



شکل ۴. اینترفروگرام تفاضلی مربوط به بازه زمانی Total t و موقعیت اینترفروگرام در منطقه مطالعاتی

Fig. 4. Differential interferograms during t1 time periods and the location of the selected region for differential interferograms relative to the Savah study area

اثر مؤلفه نوفه یا نویز میباشد. هدف اصلی تداخلسنجی تفاضلی استخراج میزان تغییر شکل پوسته زمین با حذف یا کمینه کردن اثر دیگر مؤلفه هاست. در این میان اثر مؤلفه حاصل از نوفه معمولاً ناچیز انگاشته می شود و اثر جوی نیز تصحیح می گردد. بنابراین اطلاعات اصلی حاصل از اثر توپوگرافی و تغییرشکل زمین می باشد. در نتیجه با معلوم بودن توپوگرافی میتوان تغییرشکل زمین را تعیین کرد. روشی که در آن سیگنالهای مربوط به توپوگرافی از فاز تداخلسنجی حذف می شود، تداخلسنجی تفاضلی نام دارد. این فرآیند یا با استفاده از دو تصویر راداری خام^۲ و مدل ارتفاعی رقومی^۳ منطقه مورد مطالعه و یا با استفاده از سه تصویر راداری انجام می شود.

در بیشتر از یک برست واقع شده است. ضروری است با انجام فرایند همگون سازی^۱، برستهای دربرگیرنده این منطقه ترکیب شده تا یک تصویر واحد با پوشش کل منطقه بدست آید.

اینترفروگرام تصویری است که اختلاف فاز بین دو تصویر راداری را در یک منطقه مشخص نشان می دهد. در واقع فاز نهایی اینترفروگرام مجموعی از اجزای رابطه (۱) می باشد:

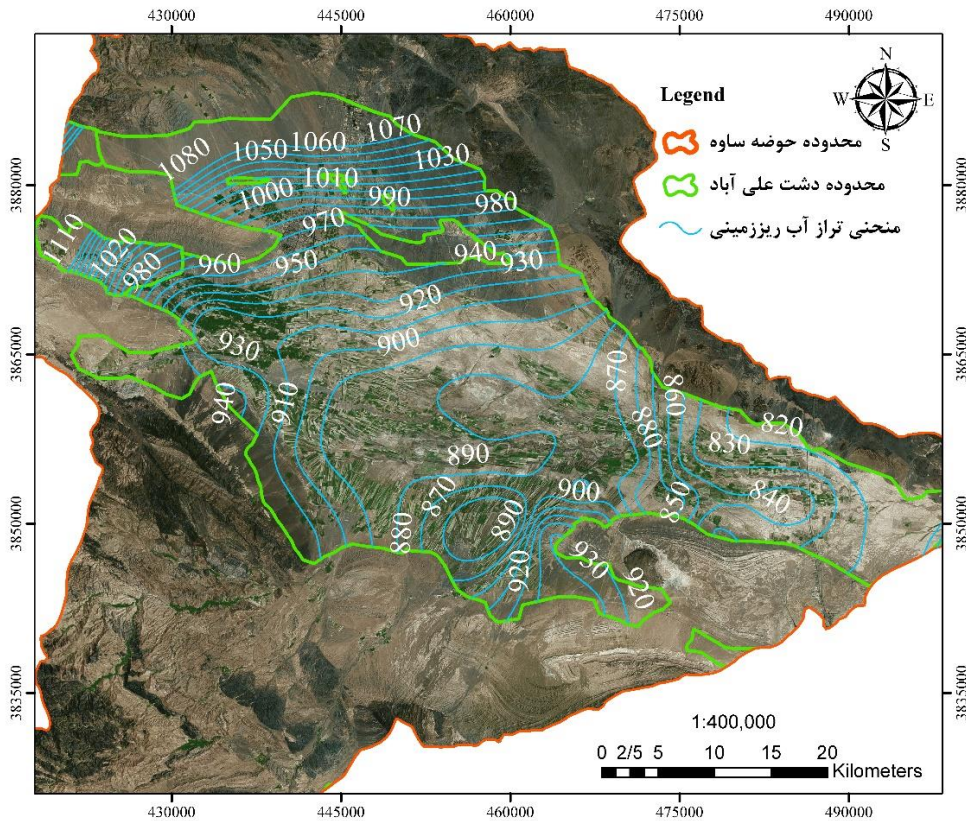
$$\phi_{int} = \phi_{Topography} + \phi_{Change} + \phi_{Movement} + \phi_{Atmosphere} + \phi_{Noise} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ϕ_{int} فاز نهایی، $\phi_{Topography}$ اثرات توپوگرافی،

$\phi_{Movement}$ حرکت پوسته زمین، $\phi_{Atmosphere}$ اثرات متغیر اتمسفر و ϕ_{Noise}

2 SLC
3 DEM

1 Coregistration



شکل ۵. منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در دشت علی آباد
Fig. 5. Groundwater level contour line in Aliabad plain

در شکل ۴ اینترفروگرام تولید شده مربوط به بازه زمانی t_{Total} و محدوده این اینترفروگرام در دشت علی‌آباد و حوضه ساوه نشان داده شده است. در مرحله بعد فازهای اینترفروگرام تبدیل به جابه‌جایی شده و همزمان می‌تواند منجر به نقشه جابه‌جایی در زمین مرجع^۲ گردد. نتیجه این فرآیند یک رستر^۳ زمین مرجع است که تغییرات ارتفاعی را در هر نقطه از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

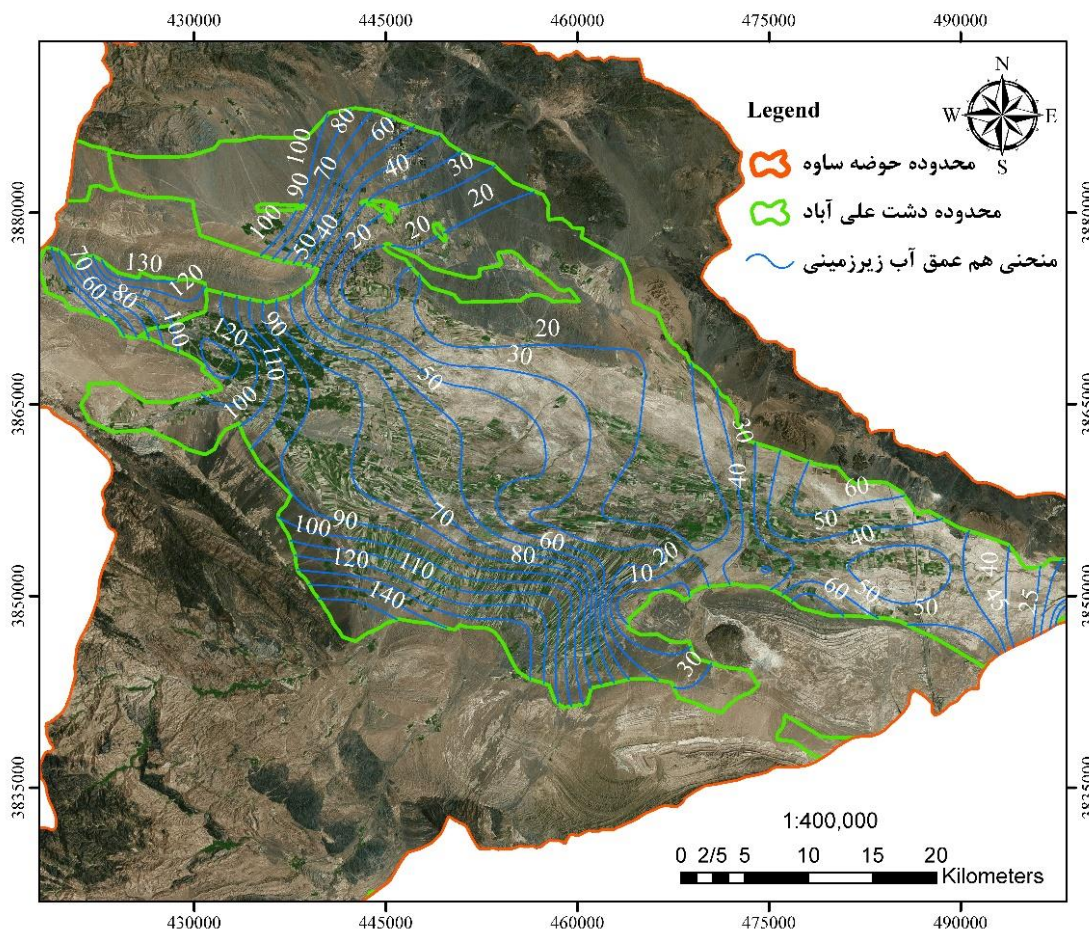
۲-۳- داده‌های تغییرات آب زیرزمینی

براساس اطلاعات حاصل از شبکه چاه‌های مشاهده‌ای دریافت شده از شرکت سهامی آب منطقه ای قم [۲۳]، نقشه تراز آب

در این تحقیق از روش دو تصویر راداری و مدل ارتفاعی رقومی منطقه موردنظر استفاده شده است که با حذف اثر توپوگرافی منطقه، تداخل فازها مشخص شده و نتیجه به صورت لبه‌های رنگی یا فرینج^۱ نمایان می‌گردد. بعد از تولید اینترفروگرام اولیه لازم است عمل فیلتر کردن انجام گردد. فیلتر کردن به منظور تولید محصول خروجی با نویز کمتر انجام می‌پذیرد. این عمل می‌تواند به روشهای مختلف صورت پذیرد. در این پژوهش از فیلتر گلدشتاین [۲۲] به منظور کاهش نویز فاز اینترفروگرام خروجی استفاده شده است. این رویکرد فیلترینگ، به طور قابل توجهی قابلیت دیده شدن فرینجها را در اینترفروگرام افزایش داده و نویز ایجاد شده به وسیله ناهمبستگی‌های زمانی و مکانی را کاهش می‌دهد.

2 Georeference
 3 Raster

1 Fringe

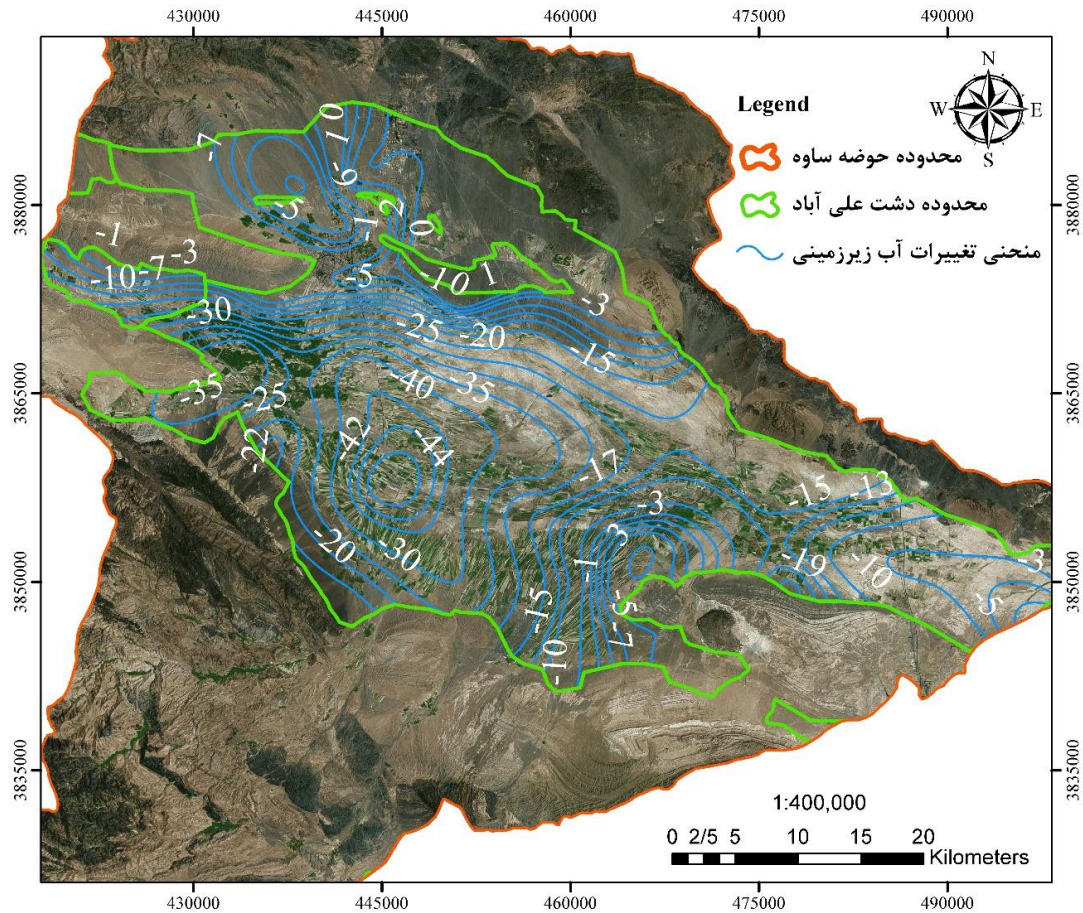


شکل ۶. منحنی‌های هم عمق آب زیرزمینی در دشت علی آباد
 Fig. 6. Groundwater depth contour line in Aliabad plain

هیدرولیکی آب زیرزمینی در اراضی مخروط افکنه‌ای ۱۵ در هزار، در اراضی میان‌دشتی ۳ در هزار و در اراضی پایاب‌دشتی کمتر از ۱ در هزار می‌باشد. در اراضی مخروط افکنه‌ای تحدب منحنی‌های تراز آب زیرزمینی به سمت اراضی پایین‌دست رودخانه‌های مزلقان، قره‌چای و نورآباد بوده و خطوط جریان نسبت به محور رودخانه واگرا می‌باشد. همچنین به سمت مرکز دشت تحدب منحنی‌ها به سمت بالادست رودخانه بوده و خطوط جریان نسبت به محور رودخانه‌ها همگرا می‌باشد. رودخانه قره‌چای در اراضی پایاب دشت، زهکش سفره سطحی دشت ساوه است. خاطر نشان می‌سازد در اراضی ساوه خطوط جریان آب زیرزمینی شرقی- غربی بوده و رقوم آنها از شمال به سمت جنوب کاهش می‌باشد.

در دشت ساوه رقوم منحنی‌های هم عمق آب زیرزمینی (شکل

شکل ۵)، نقشه هم‌عمق سطح آب (شکل ۶) و نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی (شکل ۷) رسم شده است. در دشت ساوه رقوم منحنی‌های تراز آب زیرزمینی (شکل ۵) بین ۸۰۰ تا ۱۰۸۰ متر متغیر می‌باشد. روند عمومی منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در نیمه شمالی دشت شرقی- غربی بوده و رقوم آنها از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. در بخش مرکزی و نیمه جنوبی دشت، روند منحنی‌های تراز آب زیرزمینی بطور کلی شمالی جنوبی بوده و رقوم آنها از غرب به شرق کاهش می‌یابد. بیشینه تراز آب زیرزمینی با رقم ۱۰۸۰ متر مربوط به اراضی محمود آباد واقع در شمال ساوه و کمینه آن در دهانه خروجی دشت ساوه به شریف آباد ۸۲۰ متر می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت در دو بخش اخیر به ترتیب از غرب به شرق و از شمال به سمت جنوب می‌باشد. شیب



شکل ۷. نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت علی آباد
 Fig. 7. Groundwater level changes in Aliabad plain

رقوم منحنی‌های هم‌اختلاف سطح آب زیرزمینی در این دشت بین ۳+ تا ۴۴- متر متغیر می‌باشد. گسترش منحنی ۳+ مربوط به اراضی حیدرآباد واقع در ناحیه جنوبی دشت که وسعت کمی را در بر گرفته، می‌باشد و در سایر نقاط دشت، سطح آب زیرزمینی اُفت نموده است. در ناحیه شمالی شهر ساوه منحنی‌های ۲+ تا ۱۳- دیده می‌شود.

۴-۲- اطلاعات چاه پیمایی و عمق رسوبات دشت علی آباد

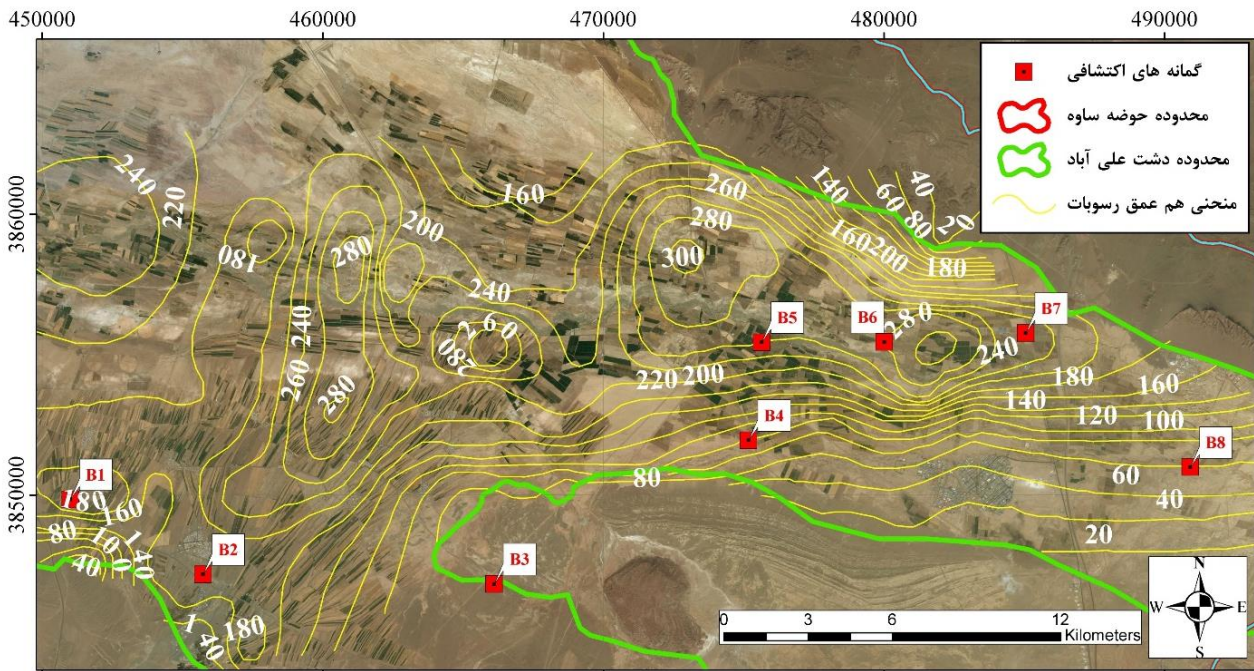
مقادیر پارامترهای مکانیکی سازندهای زمین‌شناسی در لایه-های مختلف گمانه‌های اکتشافی در جدول ۲ ارائه شده است. محل قرارگیری این گمانه‌ها که اطلاعات آن از شرکت آب منطقه استان قم [۲۳] اخذ گردیده، در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه عمدتاً ریزدانه همراه با شن و ماسه است. علاوه بر موارد فوق در شکل ۸، نقشه «هم‌عمق

۶) بین ۱۰ تا ۱۲۰ متر متغیر می‌باشد. در اراضی غرب دولو واقع در جنوب غربی دشت، عمق سطح آب بیش از ۱۰۰ متر است و به طرف مرکز دشت کاهش یافته و در اراضی مرکزی دشت به ۲۰ متر می‌رسد. منحنی هم‌عمق ۲۰ متر به موازات رودخانه قره‌چای کشیده شده و قسمت اعظم نیمه مرکزی دشت را فرا گرفته است. از مرکز به سمت ارتفاعات، عمق سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و رقوم منحنی‌های هم‌عمق آب زیرزمینی به ۷۵ و ۱۰۰ متر می‌رسد. در اراضی ورودی رودخانه قره‌چای به دشت ساوه عمق سطح آب بیش از ۸۰ متر است که به سمت مرکز دشت عمق سطح آب کاهش می‌یابد. در اراضی حیدرآباد عمق سطح آب در سفره سطحی منطقه کمتر از ۱۰ متر بوده و منحنی ۱۰ متری در این اراضی ظاهر گشته است.

نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت ساوه (شکل ۷) مربوط به مهرماه سال ۱۳۸۱ لغایت شهریور سال ۱۳۹۵ می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات لایه های خاک در گمانه های اکتشافی [۱۹]
 Table 2. The specifications of soil layers in the study area

شماره	پارامترهای مکانیکی					عمق (متر)	نوع خاک*	لایه ها	نام گمانه
	σ_c (kN/m ²)	ϕ	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (N/mm ²)				
0.15	30	20	14.7	17.3	2	0-17	PC	1	B1
0.2	10	22	17.5	21.2	25	17-24	C.S	2	
0.2	40	22	14.5	17.3	2	24-30	C	3	
0.2	15	20	16-18	21	30	30-78	C.S	4	
0.35	50	23	16-18	20.3	20	78-120	C.S	5	
0.3	30	24	17.3	20.9	50	120-	S.C	6	
0.3	33	24	16.9	21	25	138-	C.S	7	
0.35	30	30	17.5	21.7	48	166-	G.S.C	8	
0.2	0.2	25	19.3	21	120	0-39	G.S.C	1	B2
0.3	76	23	16	19.7	32	39-49	S.C	2	
0.35	0.2	32	18.7	20.3	48	49-54	S.C	3	
0.15	0.2	35	17	19.9	48	54-69	G.S.C	4	
0.3	7	23	16-17	18.3	25	69-84	C.S	5	
0.2	32	25	16	17	26	84-93	C.S	6	
0.3	0.2	30	19	21	28	93-114	G.S.C	7	
0.3	75	27	17	19.8	26	114-	C.S	8	
0.3	35	30	17	19	45	126-	S.C	9	
0.3	0.2	35	18	19	48	0-12	G.S.C	1	B3
0.3	7	25	14	17	70	12-15	CS	2	
0.2	1	20	18.7	20.6	120	15-27	G	3	
0.35	0.2	35	19	21.05	150	27-30	C.G	4	
0.3	0.2	32	18	19.8	148	30-46	G.S.C	5	
0.3	5	35	19	22	78	46-50	C.G	6	
0.35	0.2	35	17.7	19.8	120	50-53	G.S	7	
0.35	0.2	32	18.3	21.1	117	53-71	G.S.C	8	
0.25	100	30	19	21.6	20	0-11	C.M	1	B4
0.3	10	27	17	19.8	8	11-25	C.M	2	
0.15	0.2	32	18.5	20.7	40	14-25	G.M.C	3	
1	0.22	38	18-19	21.3	43	25-30	G.M	4	
1	0.2	32	18-20	21.8	50	30-33	G	5	
0.2	0.2	35	18-20	22.3	96	33-36	G	6	
0.2	0.2	30	19.2	22	47	36-63	G	7	
0.35	107	20	17	20.5	2	63-66	PC	8	
0.25	60	30	17.5	20.3	26	0-12	C.S	1	
0.35	120	20	14	20.7	20	12-21	C.S	2	
0.27	70	30	16.07	18.8	32	21-30	CS	3	
0.2	25	30	14.5	17.7	48	30-38	CS	4	
0.3	5	36	17.4	22.5	45	38-56	CG	5	
0.2	70	25	19.5	23.2	56	56-75	CG	6	
0.22	0.2	27	18.1	23.66	8	75-80	C	7	
0.3	10	29	15.8	20.7	25	80-91	C.S	8	
0.3	0.2	20	14.7	20.8	48	91-130	CG	9	
0.3	23	26	14.3	17.3	38	0-9	S.C	1	B6
0.3	32	32	17	18	32	9-17	S	2	
0.3	0.2	30	19	21	48	17-30	G	3	
0.2	88	26	14	17	8	30-39	C	4	
0.3	76	22	16	18	45	39-45	CS	5	
0.2	90	26	16	18	68	45-48	CS	6	
0.25	120	22	16	18.95	120	48-55	PC	7	
0.3	7	25	14	17.3	67	55-64	S.C	8	
0.3	22	32	18	19	65	64-87	S	9	
0.2	120	20	14	17	25	87-100	C	10	
0.2	75	28	17	20.2	28	0-6	C.S	1	B7
0.3	100	27	17	19.6	24	6-27	M.S	2	
0.3	0.2	32	18	22.3	27	27-45	G.S.C	3	
0.2	75	23	16.5	18.3	8	45-51	MC	4	
0.32	100	24	16-18	19.8	25	51-57	S.C	5	
0.2	80	24	16.2	18.9	26	57-63	C.S	6	
0.2	84	25	16.6	19.2	26	63-72	S.C	7	
0.3	32	32	18	20.3	81	72-77	S	8	
0.3	7	25	14.2	17.3	40	0-12	CS	1	
0.15	6	35	17	18.96	48	12-24	G.S.C	2	
0.25	125	30	15.7	18.02	25	24-45	PC	3	
0.2	0.2	36	19.2	21.8	96	45-60	PG	4	
0.3	75	34	17.7	19.9	26	60-63	CS	5	
0.2	0.2	22	18.5	20.02	48	63-69	G.S.C	6	
0.15	0.2	30	19	21.54	90	69-75	G	7	
0.2	1	21	18.3	20.4	40	75-81	G.S	8	
0.2	0.5	22	19.5	23.27	50	81-89	GC	9	



شکل ۸. موقعیت گمانه های اکتشافی و منحنی های هم عمق رسوبات در دشت علی آباد
Fig. 8. Location of boreholes and thickness of alluvium contour line in Aliabad plain

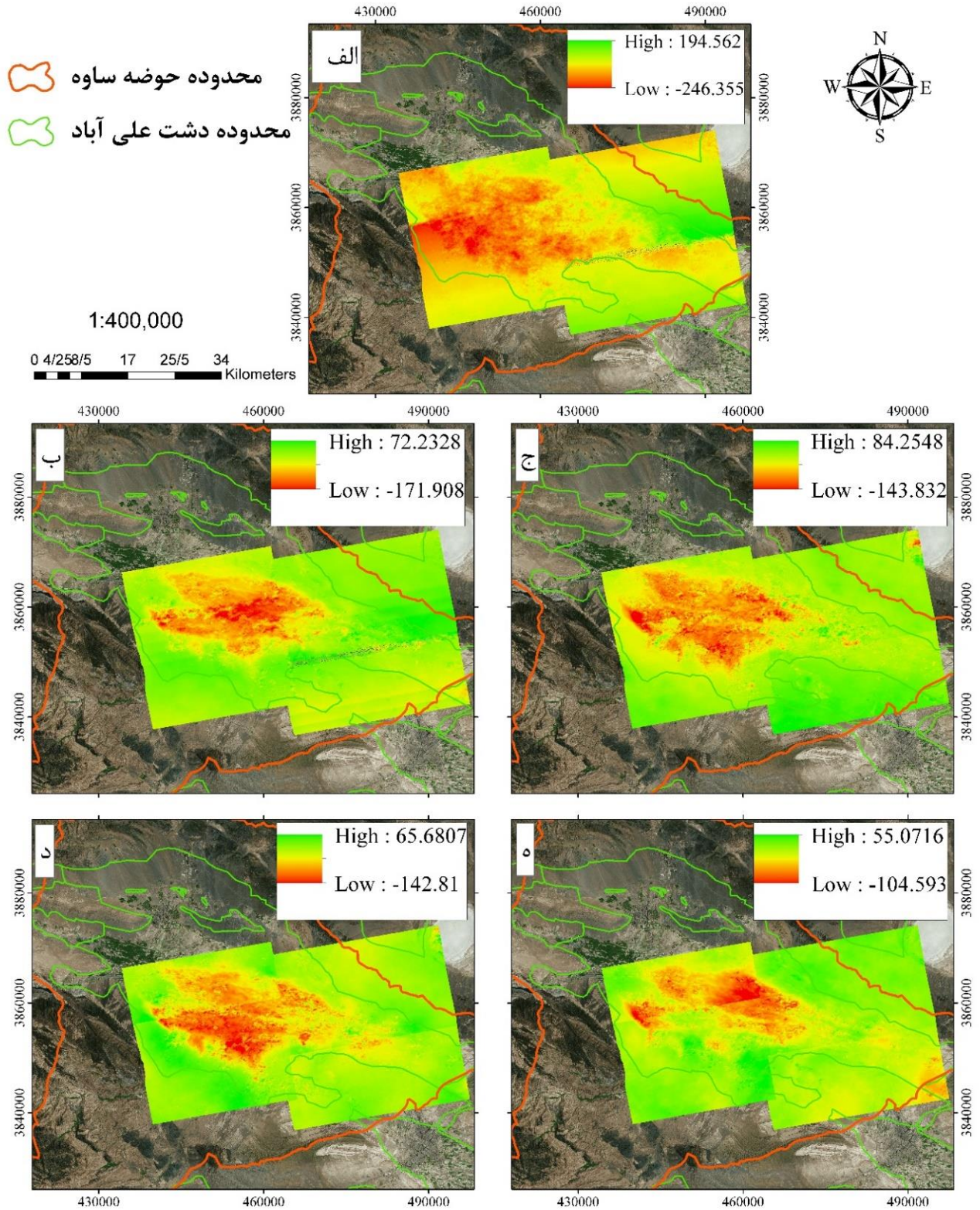
تجربه کرده است. همچنین مقادیر فرونشست زمین در غرب منطقه بیشتر از شرق می باشد. علاوه بر این مقادیر بیشینه فرونشست در چهار دوره زمانی مورد مطالعه (t_1 تا t_4) به ترتیب ۱۷۱، ۱۴۳، ۱۴۲ و ۱۰۴ میلی متر بدست آمده است. تفاوت مقادیر فرونشست در دوره های زمانی مختلف را می توان به اختلاف فواصل زمانی مطالعه، اثر فعالیتهای انسانی مانند کشاورزی و تغییر فصول نسبت داد. همچنین این نتایج نشان می دهد که فرونشست در دشت علیآباد پدیده های مستمر و پیشرونده است که باید مورد توجه قرار گیرد.

نقشه رستر تغییرشکل زمین در کل دوره زمانی مورد مطالعه (t_{Total}) همراه با نقشه رستر تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی بین سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۰، توزیع مکانی نواحی دارای فرونشست با مکانهایی که بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی را تجربه کرده است، تا حد

رسوبات» که از گزارش مطالعات ژئوتکنیک دشت علی آباد [۲۴] رقومی و زمین مرجع گردید، نشان داده شده است. مطابق شکل، ضخامت آبرفت در این منطقه از حدود ۲۰ متر در شرق منطقه مورد مطالعه تا ۳۰۰ متر در غرب و مرکز متغیر می باشد.

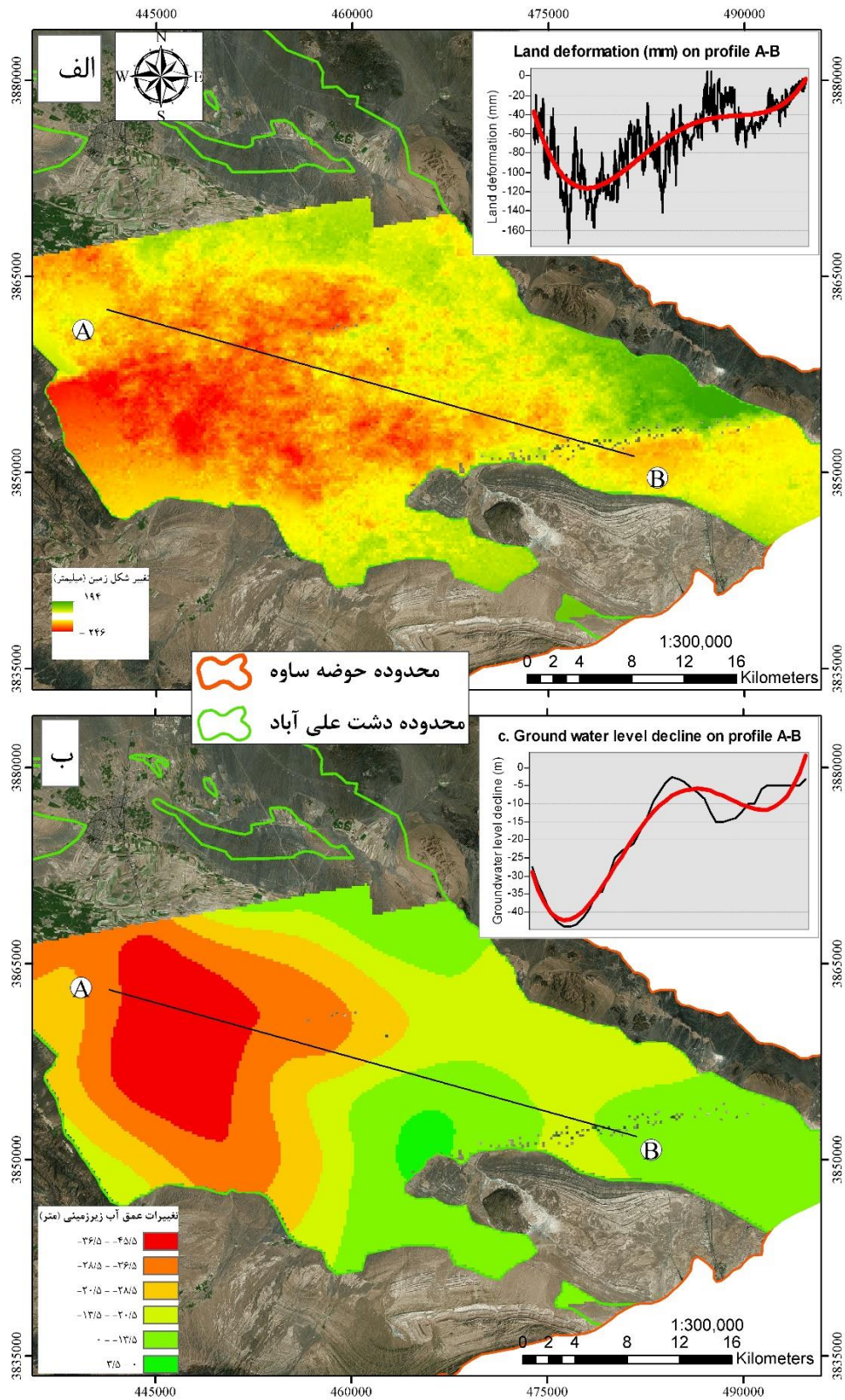
۳- نتایج و بحث

بعد از انجام کلیه مراحل ذکر شده در بخش های قبل، در نهایت شکل ۸ تغییرات شکل زمین در منطقه دشت علی آباد را با استفاده از تحلیل تداخل سنجی تفاضلی راداری با تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و در پنج دوره زمانی مورد مطالعه (t_1 تا t_4 و t_{Total}) بدست آمده است، نشان می دهد. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است دشت علی آباد در دوره ۵۰۶ روزه مطالعه، بیشینه فرونشست زمین ۲۴۶ میلی متر را



شکل ۹. تغییر شکل زمین به دست آمده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ در دشت علی آباد در دوره های زمانی: (الف) tTotal، (ب) t1، (ج) t2، (د) t3، (ه) t4.

Fig. 9. Displacement map (mm) obtained from unwrapped interferograms, during time periods (a) ttotal, (b) t1, (c) t2, (d) t3, (e) t4.



شکل ۱۰. الف) نقشه تغییرشکل زمین و گراف تغییرات شکل زمین روی پروفیل A-B در کل دوره زمانی مطالعه (Total) و ب) نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی و گراف تغییرات روی پروفیل A-B در دوره زمانی بین سال های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ در دشت علی آباد

Fig. 10. (a) Ground deformation map and graph of landform changes on A-B profile over the total study period (tTotal) and (b) Groundwater level change map and graph of changes in A-B profile over the interannual period of 2002 to 2016 in Aliabad plain

را باید در میان خصوصیات ژئوتکنیکی سازندهای زمین‌شناسی به عنوان یکی از عوامل اصلی پدیده فرونشست زمین جستجو نمود. لایه‌های خاک تشکیل دهنده سیستم آبخوان نقش زیادی در میزان تراکم دارد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، لایه‌های شامل سازندهای ریزدانه با ضخامت زیاد در پروفیل بسیاری از چاه‌های منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است. زمانی که خاک ریزدانه اشباع، تحت افزایش تنش فشاری ناشی از اعمال بار قرار گیرد، اسکلت خاک تغییر شکل داده و متحمل کرنش میشود. نتیجه این کرنش کاهش نسبت پوکی یا حجم حفره‌ها می‌باشد که فقط در صورتی می‌تواند رخ دهد که سیال منفذی جابه‌جا شود. از آنجا که ضریب نفوذپذیری خاکهای ریزدانه کم است، جابه‌جایی سیال منفذی فرآیندی وابسته به زمان خواهد بود. در یک لایه زمین دارای فضای حفرهای اشباع شده با آب، تنش کل بین اسکلت جامد خاک و آب تقسیم می‌شوند. چنانچه به دلایلی مانند پمپاژ، فشار آب کاهش داده شود، بخش بیشتری از تنش کل (که همواره ثابت است) بوسیله اسکلت جامد خاک تحمل می‌شود. نتیجه حاکم شدن شرایط جدید تنش در توده خاک و تغیر حجم خاک و در نتیجه نشست خواهد بود. علاوه بر این، وجود لایه‌های ضخیم ناتراوا^۱ که جداکننده آبخوان آزاد

زیادی منطبق است. توزیع مکانی فرونشست نشان می‌دهد که مقادیر فرونشست از غرب به شرق کاهش می‌یابد. به همین ترتیب مقادیر کاهش آب زیرزمینی در غرب دشت بیشتر از شرق آن می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده ارتباط مستقیم توزیع فضایی و شدت فرونشست با تغییرات آب زیرزمینی در دشت علی‌آباد می‌باشد. به منظور تشریح ارتباط بین این دو اثر، نمودار تغییرات شکل زمین در مقایسه با کاهش آب زیرزمینی در پروفیل A-B در شکل ۱۰ نشان داده شده است. پروفیل A-B یک پروفیل غربی - شرقی است و به نحوی انتخاب گردیده است که کل محدوده دشت را پوشش دهد و روند تغییرات در آن معنادار باشد. منحنی برازش این دو گراف (خط قرمز در شکل ۱۰ الف) و (ب)) روند یکسانی دارند و بیشترین فرونشست در مسیر پروفیل A-B جایی رخ داده که بیشترین میزان کاهش آب زیرزمینی در آن محل رخ داده است. این موضوع نشان‌دهنده این است که پمپاژ بیش از حد منابع آب زیرزمینی و متعاقب آن افت سطح آب دلیل اصلی فرونشست زمین است. همچنین نتایج مقایسه روند تغییرات ضخامت آبرفت (شکل ۸) در مقایسه با تغییر شکل زمین حاکی از عدم وجود رابطه مستقیم معنی‌دار بین این دو پارامتر در منطقه مورد مطالعه است و مناطقی با ضخامت بالای آبرفت در منطقه مورد مطالعه لزوماً فرونشست بیشتر را تجربه نکرده‌اند. دلیل این امر

1 aquitard

جدول ۳. بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت علی‌آباد (احجام به میلیون مترمکعب در سال) [۲۵]

Table 3. Groundwater balance of the Ali Abad plain alluvial aquifer (million cubic meters per year)

تغییرات حجم ذخیره	حجم تخلیه				حجم تغذیه					وسعت محدوده بیلان (کیلومتر مربع)	نام آبخوان		
	جمع تخلیه	خروجی زیرزمینی و انتقال	تبخیر از آبخوان	زهکشی	تخلیه از چاه و قنات و چشمه	جمع تغذیه	نفوذ از آب شرب و صنعت	نفوذ از آب زراعی	نفوذ از جریان‌های سطحی			نفوذ از بارندگی سطح آبخوان	جریان زیرزمینی ورودی
-۸۸/۱۷	۶۰۹/۵۴	۴۵/۰۵	۰	۰	۵۶۴/۴۶	۵۲۱/۳۷	۳۴/۳۱	۲۴۶/۰۲	۱۰۹/۲۷	۴۴/۳۱	۸۷/۴۶	۱۶۳/۲۸	ساوه

جدول ۴. منابع بهره برداری از آب های زیرزمینی دشت علی آباد (احجام به میلیون مترمکعب در سال)
Table 4. Groundwater exploitation resources in Aliabad plain (million cubic meters per year)

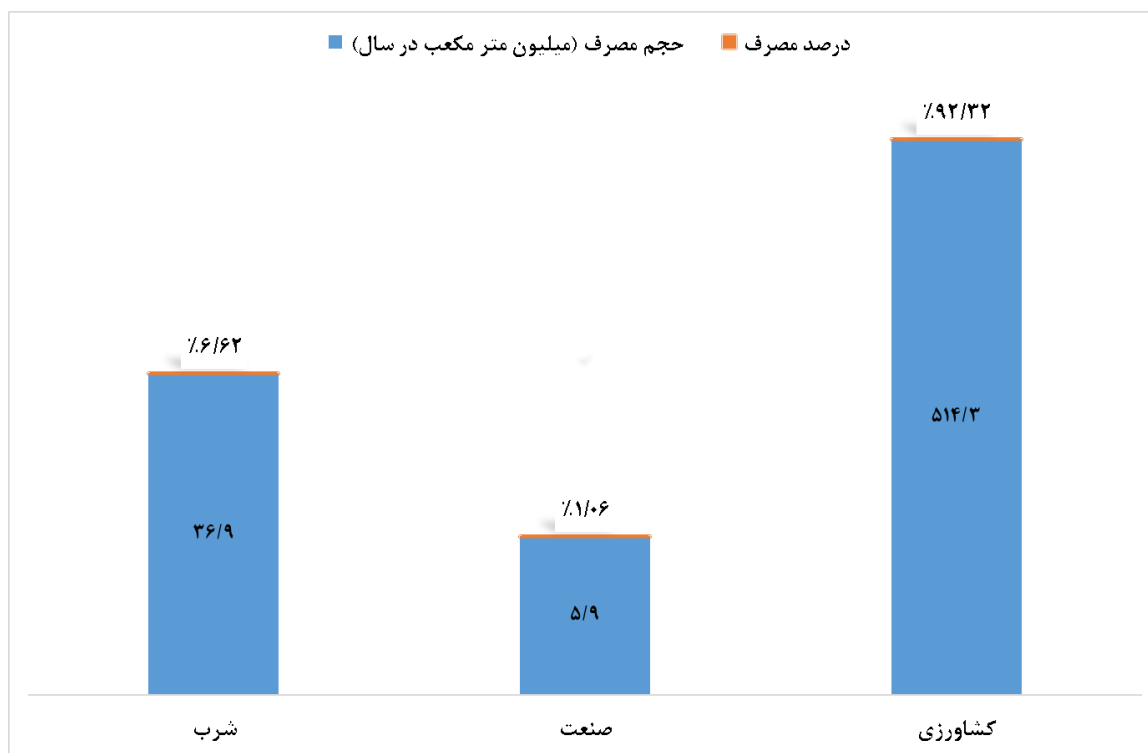
نوع منبع	تعداد	تخلیه	درصد
چاه	۱۳۳۴	۵۵۷/۱۰	۹۸/۶۹
چشمه	۲	۰/۰۶	۰/۰۱
قنات	۱۸	۷/۳	۱/۳۰
جمع	۱۳۵۴	۵۶۴/۴۶	۱۰۰

کم عمق و آبخوان عمیق تحت فشار میباشند، در اکثر مکانها می تواند یک تراکم باقیمانده ایجاد کنند که به نوبه منجر به فرونشست با تأخیر در این منطقه گردد [۱۹].

۳-۱- بیان آب زیرزمینی دشت علی آباد و راهکارهای تعادل بخشی آبخوان

با توجه به ارتباط مستقیم فرونشست زمین با کاهش آب زیرزمینی در دشت علی آباد، در بخش دیگری از این مطالعه، بیان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی این دشت مورد بررسی قرار گرفت. بیان آب زیرزمینی شکل ویژه ای از بیان است که در آن عوامل ورودی و خروجی و تغییرات ذخیره مخزن آب زیرزمینی (آبخوان) مورد بررسی قرار میگیرد. برآورد این عوامل پیچیدهتر از عوامل بیان عمومی آب است، زیرا تعداد کمی از این عوامل بطور مستقیم قابل اندازه گیری و یا محاسبه هستند. تغییرات ذخیره آبخوان براساس اختلاف ورودیها و خروجیها و از طریق نوسانات سطح آب زیرزمینی و لحاظ کردن ضریب ذخیره و مقایسه این دو، مشخص میشود. افزایش سطح آب زیرزمینی و یا افزایش آبدهی چشمه ها و قنات بیانگر افزایش تغذیه و برعکس کاهش آبدهی قنات و چاه های بهره برداری و افت سطح آب بیانگر افزایش تخلیه و کاهش تغذیه آبخوان در یک دوره مشخص است. بهترین شرایط پایداری آبخوان، تعادل بین تغذیه و تخلیه آبخوان می باشد. نتایج بیان آب زیرزمینی شامل حجم مربوط به هر یک از مؤلفه های تغذیه و تخلیه آبخوان و نیز تغییر حجم ذخیره آبخوان آبرفتی در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق این جدول مجموع حجم مؤلفه های تغذیه و تخلیه آبخوان به ترتیب برابر با ۵۲۱/۳۷ و ۶۰۹/۵۴ میلیون مترمکعب در سال بوده و مؤید کسری ذخیره

آبخوان به میزان ۸۸/۱۷ میلیون مترمکعب در سال می باشد. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، نرخ سالیانه تخلیه از چاه، قنات و چشمه ۵۶۴/۴۶ میلیون مترمکعب می باشد. این در حالی است که با توجه به کسری ذخیره آبخوان به میزان ۸۸/۱۷ میلیون مترمکعب، میزان برداشت مجاز از آبخوان آبرفتی این محدوده ۴۸۶/۸۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد می گردد. این موضوع ضرورت کاهش تخلیه از چاهها و اجرای طرح احیاء و تعادلبخشی منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر مورد تأکید قرار می دهد. از سوی دیگر هرگونه برنامه ریزی جهت استفاده بهینه و پایدار از آب تنها در سایه شناخت جامع و همه جانبه از منابع و مصارف امکان پذیر می باشد. با توجه به این نکته منابع بهره برداری آب های زیرزمینی آبخوان دشت علی آباد برگرفته از آمار چاه های مشاهده ای استان قم [۲۳] در جدول ۴ نشان داده شده است. همان طور که در جدول نشان داده شده است، بیش از ۹۸ درصد بهره برداری از آبخوان دشت علی آباد از چاه های این محدوده صورت می گیرد و بهره برداری از چشمه ها و قنات ها درصد کمی را به خود اختصاص داده اند. بنابراین اقداماتی نظیر پایش برداشت از چاه های مجاز از طریق نصب کنتورهای هوشمند، خرید چاه های کم بازده کشاورزی، اصلاح قوانین در رابطه با قیمت گذاری واقعی آب و اصلاح تأسیسات و تجهیزات و ترویج استفاده از تجهیزات کاهنده مصرف موجبات کاهش برداشت از چاه های مجاز محدود را فراهم می آورد. علاوه بر این با توجه به اینکه ۵ درصد از تخلیه از منابع آب زیرزمینی دشت از طریق چاه های غیرمجاز صورت میگیرد، اقداماتی نظیر استقرار گروه های گشت و بازرسی و مسدود نمودن چاه های غیرمجاز از جمله اقداماتی است که در تأثیرات مفیدی را در پی خواهد داشت.



شکل ۱۱. نوع مصرف آب های زیرزمینی بهره‌برداری شده از منابع آب زیرزمینی دشت علی‌آباد
Fig. 11. The type of water consumption from the groundwater resources of Aliabad Plain

و تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی و سپس تزریق آن به سیستم آب‌های زیرزمینی از جمله طرح‌هایی است که به عنوان راه‌حل نهایی جهت بهنگام سازی بیلان منابع آب زیرزمینی دشت علی‌آباد توصیه می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری در دوره زمانی ۱۸ ماهه فروردین ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۵، فرونشست زمین در دشت علی‌آباد قم بررسی شده است. نتایج بدست آمده حداکثر میزان فرونشست ۲۴۰ میلی‌متر را در دوره زمانی ۱۸ ماهه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین بررسی تغییرشکل زمین در بازه‌های زمانی مختلف مطالعه نشان می‌دهد فرونشست در این منطقه یک پدیده مستمر و با توزیع مکانی نسبتاً ثابت است. نتایج حاصل از مقایسه تغییرشکل زمین در دشت علی‌آباد با اطلاعات تغییرات آب زیرزمینی در بازه زمانی سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که ارتباط مستقیمی بین این دو عامل در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. از سوی دیگر بررسیها نشان می‌دهند نوع لایه بندی و

در شکل ۱۱ نوع مصرف آب بهره‌برداری شده از آبخوان دشت علی‌آباد برگرفته از آمار چاه های بهره برداری دشت نشان داده شده است [۲۳]. مطابق شکل ۱۱، از مجموع ۵۵۷/۱۰ میلیون مترمکعب در سال، آب زیرزمینی برداشت شده از چاه های دشت علی‌آباد بیش از ۹۲ درصد معادل ۵۱۴/۳ میلیون متر مکعب برای کشاورزی، ۷ درصد برای آب شرب و ۱ درصد برای صنعت مصرف می‌شوند. با توجه به اینکه اکثر برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت صرف مصارف کشاورزی می‌گردد، اقداماتی مانند اجرای سیستم نوین آبیاری، تجهیز و نوسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، تهیه الگوی کشت زراعی و باغی، جایگزینی و توسعه کشت محصولات کشاورزی با مصرف آب کمتر و درآمدزایی بیشتر سبب افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی می‌گردد. علاوه بر موارد بالا با توجه به اینکه ۱۰۹/۲۱ میلیون مترمکعب از حجم تغذیه آبخوان از طریق جریان‌های سطحی تأمین می‌گردد، اقداماتی نظیر مهار آب‌های سطحی به واسطه احداث و بهره‌برداری از سدهای مخزنی، تغذیه‌ای و انحرافی و طرح‌های انتقال آب از خارج محدوده می‌تواند افزایش تغذیه آبخوان را سبب گردد. در نهایت تغذیه مصنوعی آبخوان به وسیله سیلاب‌های فصلی

- [7] M. Motagh, Y. Djamour, T.R. Walter, H.-U. Wetzel, J. Zschau, S. Arabi, Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran. Results from InSAR, levelling and GPS, *Geophysical Journal International*, 2(168) (2007) 526-518.
- [8] M. Amighpey, S. Arabi, Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements, *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, (2016).
- [9] M. Amighpey, S. Arabi, Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements, *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, (2016).
- [10] M.a. Dehghani, Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79 (2013) 157--170.
- [11] M. Mahmoudpour, M. Khomehchiyan, M.R. Nikudel, M.R. Ghassemi, Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran, *Engineering geology*, 201 (2016) 28-6.
- [12] D.L. Galloway, T.J. Burbey, Review. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction, *Hydrogeology Journal*, 8(19) (2011) 1459--1486.
- [13] W.-C. Hung, C. Hwang, J.-C. Liou, Y.-S. Lin, H.-L. Yang, Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan, *Engineering Geology*, 147 (2012) 78--90.
- [14] A.M. Wamalwa, K.L. Mickus, L.F. Serpa, D.I. Doser, A joint geophysical analysis of the Coso geothermal field, south-eastern California, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 214 (2013) 34-25.
- [15] R. Bonì, G. Herrera, C. Meisina, D. Notti, M. Béjar-Pizarro, F. Zucca, P.J. González, M. Palano, R. Tomás, J. Fernández, J.A. Fernández-Merodo, J. Mulas, R. Aragón, C. Guardiola-Albert, O. Mora, Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence. The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study, *Engineering Geology*, 198 (2015) 52-40.

وجود لایه های شامل سازندهای ریزدانه با ضخامت زیاد از عوامل دیگر تأثیرگذار در شدت و نرخ پدیده فرونشست در دشت علیآباد بوده است. در ادامه نتایج بررسی بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت علیآباد کسری ذخیره آبخوان به میزان ۸۸/۱۷ میلیون مترمکعب در سال را آشکار ساخت. بررسی منابع بهره‌برداری از آب زیرزمینی دشت علی‌آباد نشان دادند که ساماندهی بهره‌برداری از چاه‌ها و کنترل بهره‌برداری‌های غیرمجاز باید در اولویت طرح‌های بهنگام‌سازی بیلان منابع آب دشت قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه ۹۲ درصد آب زیرزمینی دشت در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، بازنگری در الگوی کشت و آبیاری به عنوان اقدامات ضروری بعدی در احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی دشت علی‌آباد توصیه می‌گردد.

مراجع

- [1] Terzaghi, Principles of soil mechanics, IV—Settlement and consolidation of clay, *Engineering News-Record*, 3(95) (1925) 874--878.
- [2] G. Bajni, T. Apuani, G.P. Beretta, Hydro-geotechnical modelling of subsidence in the Como urban area, *Engineering Geology*, 257 (2019) 105144.
- [3] L. Hu, K. Dai, C. Xing, Z. Li, R. Tomás, B. Clark, X. Shi, M. Chen, R. Zhang, Q. Qiu, Y. Lu, Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82 (2019) 101886.
- [4] P. Jeanne, T.G. Farr, J. Rutqvist, D.W. Vasco, Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California, *Journal of Hydrology*, 569 (2019) -462 469.
- [5] P. Ma, W. Wang, B. Zhang, J. Wang, G. Shi, G. Huang, F. Chen, L. Jiang, H. Lin, Remotely sensing large- and small-scale ground subsidence. A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China, *Remote Sensing of Environment*, 232 (2019) 111282.
- [6] M.B. Rahnama, H. Moafi, Investigation of land subsidence due to groundwater withdraw in Rafsanjan plain using GIS software, *Arabian Journal of Geosciences*, 3(2) (2009) 241--246.

- [20] Water resources report of Saveh study area Abkhan consulting engineers (in Persian), Iran Water Resources Management, Water utility company in Qom, 2013.
- [21] Sarmap, ENVI SARscape 5.2, in, 2015.
- [22] R.M. Goldstein, C.L. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical research letters*, 21(25) (1998) 4035--4038.
- [۲۳] اطلاعات چاه های مشاهده ای و چاه های بهره برداری دشت علی آباد قم (منطقه مطالعاتی ۴۱۱۲)، استان قم، ۱۳۹۸.
- [۲۴] بررسی ژئوفیزیک استان قم، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب منطقه ای قم، ۱۳۸۰.
- [۲۵] برنامه احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور، وزارت نیرو، معاونت آب و آبفا، دفتر نظام های بهره برداری و حفاظت آب و آبفا، ۱۳۹۳.
- [۱۶] م. شریفی، م. نیکتا، سنجش و استخراج مخاطرات حاصل از پدیده نشست در اراضی مسکون تهران بزرگ، in. اولین همایش ملی تحلیل فضایی مخاطرات محیطی کلان شهر تهران، دانشکده علوم جغرافیایی، تهران، ۱۳۹۰.
- [۱۷] م. عالم رجیبی، م. آریامنش، ح. مهرنهاد، پهنه بندی پتانسیل وقوع زمین نشست در شهر یزد بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی، in. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ۱۳۹۲.
- [18] TAHERI TIZRO, S.A. HOSSEINI, M. KAMALI, Modeling Alluvial Aquifer Using PMWIN software and Evaluation of Subsidence Phenomenon in Asadabad plain, Hamedan Province, Iran, *JOURNAL OF NATURAL ENVIRONMENT HAZARDS*, 17(7) #r00360 (2018) -.
- [19] A.M. Rajabi, A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom-Iran, *Natural Hazards*, 2(93) (2018) 1085--1103.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Edalat, M. Khodaparast, A. M. Rajabi ., (2021). Investigating the Effect of Aquifer Water Table Variation on the Subsidence Phenomenon and Balancing Strategies of the Aquifer (Case Study: Ali-Abad Plain, Qom). *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 2023-2042.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17275.6511](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17275.6511)



