



Research Article

Impact of groundwater drawdown on land subsidence and creation of vulnerable areas in Neyshabur plain

Seyed Mostafa Hasheminasab¹, Hamid Reza Nassery¹ * , Farshad Alijani¹

1-Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 06 Mar 2025 Accepted: 11 May 2025

Extended Abstract

Introduction

According to the definition of the American Geological Survey, the land subsidence Phenomenon is the collapsed or down warded settlement of the earth's surface, which can be had small displacement vector (Bates and Jackson, 1980). Land subsidence is a geological phenomenon caused to migrate slowly and horizontally part of the earth's surface layers (Hu et al, 2009). The subsidence phenomenon has the type of factors such as natural and unnatural factors which natural factors are included tectonic movements, limestone dissolution, karst sinkholes, magma discharge, organic soil oxidation, and natural soil compaction, which appear on a long time scale while unnatural factors are mainly caused by human activities. These factors like the severe and irreversible drop affected on groundwater level, oil and gas extraction created in a shorter period of time. The pore water pressure has been decreased by extraction of groundwater which is associated with pore water drainage. In other word, the stress caused to the weight of the upper layers gradually transferred the pore water to the grain structure. On the other hand, the influences of weight of sediments in the unsaturated zone will be increased when the submergence force of pore water is lost. Therefore, to compensate for this increase of pressure, the grain structure may change to accommodate this new stress situation. The porosity in the sediments is reduced to bear this additional pressure. This decrease in porosity is associated with a decrease in the volume of sediments, whose surface appearance is subsidence. The oldest known subsidence, based on information provided by UNESCO, has been occurred in Alabama (United States) in 1900. This phenomenon was along with the creation of cracks in the surface of the earth, has been observed in type of areas such as Italy, Japan, England, China, Thailand, Mexico and other parts of the world occurred with over-harvesting of ground water or oil wells. Due to many droughts in Iran (especially in the east and center), excessive exploitation of groundwater has increased that caused to increase the phenomenon of subsidence in many plains. Rahmanian (1986) prepared the first reports related to subsidence in Iran. The phenomenon of subsidence caused to the drop in the groundwater level has been reported in Rafsanjan plain in 1967 a longed with the phenomenon of tube formation in agricultural wells (Hosseini Milani, 1994). Komak-Panah (1997) considered the land subsidence in the Yazd-Ardakan plain as a result of excessive extraction of ground water, dissolution of salts in the soil, and washing of clay cement particles. Nassery (2005) has evaluated Hamedan Faminin plain that the average of annual drop of groundwater level during the nine-year (1991-1999) was about three meters and the amount of alluvial subsidence was different in parts of the plain which the average amount was 45 cm in the mentioned period. The most of these sinkholes of Faminin Plain was created where made from limestone bedrock and irrigation of agricultural lands was utilized by flooding method.

Citation: Hasheminasab, S.M. et al, 2025. Impact of groundwater drawdown on land subsidence and creation, *Res. Earth. Sci:* 16(2), (53-71) DOI: 10.48308/esrj.2025.105830

* Corresponding author E-mail address: h-nassery@sbu.ac.ir



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Moafi and Rahnama (2006) have estimated the amount of land subsidence in the Rafsanjan plain using geographic information system and remote sensing, after correcting and reconstructing the statistics related to the wells in different months. Salehi et al (2012) have estimated the maximum land subsidence in Mahyar plain of Isfahan using InSAR data in the period of 2003-2006 that the subsidence was reached to 8.6 cm per year. The related results confirmed that the subsidence of this area was belonged to the drop in the groundwater level. Tabatabai and Mohseni Nasab (2014) reported that groundwater withdrawal, tectonic factors were also the main causes of subsidence of the Rafsanjan Plain. Parhizkar et al. (2015) have simulated the water level and have evaluated the subsidence of Damghan aquifer using two GMS and GEP models. The related results were shown that there was a significant relationship between the reduction of the groundwater level and the amount of subsidence, and the amount of recent extraction of water resources. Determining the amount and manner of subsidence is very important in its assessment and management. In order to monitoring and measurement of the subsidence rate in the Neyshabour Plain during the period of 2016, there were various methods such as Spirit Level Global Positioning System (GPS) and Artificial Radar Interferometry (SAR).

Materials and Methods

In order to determine the relationship between the changes of the groundwater level and the subsidence phenomenon in the Neyshabur Plain, the geological and climatical conditions of the area were evaluated and interpreted. Then, the information related to 54 observation wells during 30-year of water period (1987 to 2017) was collected and their corresponding hydrograph have been prepared. The time period 2014/08 to 2018/12 has been prepared using GMTSAR software in Linux environment (Geological and Mineral Exploration Organization of the country, GMTSAR 2020). With comparing the position of the settlement zones with the map of the groundwater level, we have investigated the relationship between two parameters and have analyzed the evidence and consequences of this phenomenon in the studied area.

Results and Discussion

Information related to observation wells

According to the hydrograph of the observation wells, the fluctuations of the groundwater level in the observation wells can be classified into three groups: A, B, and C.

-In the observation wells of group A, the groundwater level did not fluctuate or its fluctuation was very low. This group of wells are located in the northwest area of the plain and they receive very good surface and ground nutrition, so that despite the significant extraction of ground water in their area, they do not show much drop.

-In the observation wells of group B, due to excessive withdrawal from the aquifer in their area, the level of ground water has been constantly falling and the decline was uniform. The observation well of South Hossein Abad Jangal is representative of this group of wells.

-In the observation wells of group C, the ground water level has a sinusoidal downward fluctuation, which means that their water level has decreased, but during the wet season, it has risen as a result of increasing the amount of feeding and reducing harvesting. During the dry period, with the increase in the amount of harvesting, the water level has fallen again, and the resulting drop is much more than the increase during the wet period. Therefore, the water level has dropped more in each water year than the previous year.

Information related to satellite images

The evaluation of subsidence maps prepared in Neyshabour plain have been shown that the highest rate of subsidence in the significant period (2014/08 to 2016/03) was 15.4 cm per year and it was 14.8 cm of subsidence during 2016/04 to 2018/12. It has been over the years. In order to investigate the phenomenon of subsidence more closely and to determine the area of the areas with high subsidence rate, the maps of the average subsidence rate obtained by the radar interferometry method have been classified. The distance between the ranks is considered to be three centimeters per year, based on which six ranks are defined.

The critical areas of subsidence in the Neyshabur Plain have been marked with black oval marks. According to the evaluation of this map, there were four areas with a high subsidence rate (more than 9 cm per year).

-The critical area in the northeast of the plain: this area is located in the east of Neyshabur city and there was the maximum subsidence rate of the plain (14.8 cm/year) where there are the main road and the national railway line of Mashhad-Tehran and also most of the industries area are located in the Neyshabur Plain.

-Central critical area: This area is placed in the west and southwest of Neyshabur city and there is the maximum subsidence rate of the plain as 12 cm per year. The main road, the national Mashhad-Tehran railway line and the most of the farm lands are located in this area.

-Western critical area: there is the maximum subsidence rate of the plain (12 cm per year) in the west of Neyshabur section. The main road and the national Mashhad-Tehran railway line have been shown there and the oldest traces of cracks caused by subsidence were shown in Bazoband village.

-South critical area: located in the south and southeast of Neyshabur Plain and the maximum subsidence amount is 12 cm per year. Agricultural activities have been grown up widely in this part of the plain.

Geomorphic implications of the study area


The subsidence related to exploration of groundwater resources can be caused to many of the economic, social, and environmental damages. The type, extent and severity of these damages depend on the amount of subsidence and the affected zone. As the annual surplus of water withdrawal of the non-renewable sources are more than its replacement by rains, this issue can be caused to the risk of spreading subsidence in other parts of the plain. One of the most important consequences of subsidence can be mentioned continuous longitudinal cracks, interrupted cracks, round holes, wide pits and sinkholes. Longitudinal cracks are observed in many parts of the Plain margin which were formed by the joining of discontinuous cracks with a definite extension. Discontinuous cracks which are continued in the initial steps of creation of longitudinal cracks. After rainfall and flooding create continuous longitudinal cracks (Rokni et al, 2015). Circular holes are the result of subsidence of the lower layers and can be seen in parts of the edge of the plain. The creation of countless cracks has created a very high vulnerability potential for transportation infrastructures, power transmission lines, industrial areas and even residential areas. According to the map of vulnerable areas, there are four areas with a high rate of subsidence and vulnerability potential in the northeastern, central, western and southern parts of Neyshabur Plain, and important infrastructures such as oil and gas transmission lines, railway lines, urban transmission lines and Intercity corresponds to these areas. It is obvious that if not controlled, it will impose life and financial risks in the not too distant future.

Conclusion

Generally, what emerges from the results of the studies of ground water level changes in observation wells and the satellite interferometric method in this research is that in the Neyshabur plain, there are four critical areas in the northeast, central critical, western critical and southern critical areas with high rates of subsidence (more than from 9 cm per year. The highest amount of subsidence has occurred in the east of Neyshabur city with the maximum rate of subsidence of the plain (14.8 cm per year), where the main road, the Mashhad-Tehran national railway line and the major part of the industries of the Neyshabur plain are located in this area. are located. In the other three critical areas, the maximum rate of subsidence is 12 cm per year. The graphs of the rate of groundwater level drop and the rate of subsidence of the plain show that the drop of the groundwater level has a significant effect on the land subsidence. In a large part of the Neyshabur Plain, the rate of drop 30 years has been more than 20 meters and the four subsidence zones correspond to the parts of the plain where the drop in the groundwater level has been more than 30 meters. The results of this research show that water withdrawal exceeds the recovery capacity of the aquifer as one It is one of the main reasons for subsidence in the plain, so it is necessary to pay special attention to the management of ground water resources. The consequences of the subsidence phenomenon in the plain have been the creation of continuous and interrupted longitudinal cracks, circular holes and wide pits. The expansion of these cracks to the main road, national railway line and oil and gas transmission lines may cause various risks.

Keywords: Groundwater, Neyshabur, Sentinel, Subsidence, Vulnerable areas.

اثر افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین و ایجاد گستره‌های آسیب‌پذیر در دشت نیشابور

سید مصطفی هاشمی‌نسب^۱، حمیدرضا ناصری^{۱*} , فرشاد علیجانی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

چکیده گسترده

مقدمه

فرونشست زمین یک پدیده زمین‌شناسی است که موجب پایین رفتن آرام و افقی سطح زمین می‌شود (Hu et al, 2009). پدیده فرونشست ناشی از عوامل طبیعی و غیرطبیعی است. عوامل طبیعی شامل حرکات زمین‌ساختی، انحلال سنگ‌های آهکی، وجود فروچاله‌های کارستی، تخلیه ماگما، اکسیداسیون خاک‌های آلی و تراکم طبیعی خاک است که در مقیاس زمانی طولانی ظاهر می‌شوند، در حالی که عوامل غیرطبیعی عمدتاً ناشی از فعالیت‌های بشر می‌باشند (Poland, 1984). این عوامل همچون افت شدید و غیر قابل برگشت سطح آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، در فاصله زمانی کوتاه‌تری ایجاد می‌شوند. با برداشت آب زیرزمینی که با زهکشی آب منافذ همراه است، فشار آب منفذی کاهش می‌یابد. این عمل بدان معنی است که تنش ناشی از وزن مواد بالایی به صورت تدریجی از آب منفذی به ساختار دانه‌ها انتقال می‌یابد. از جهت دیگر، وزن موثر رسوبات در منطقه غیر اشباع زمانی که نیروی غوطه‌وری آب منفذی از بین می‌رود، افزایش می‌یابد. بنابراین برای جبران این افزایش فشار ممکن است ساختار دانه‌ها برای تعدیل این موقعیت تنش جدید تغییر کند. تخلخل موجود در رسوبات برای تحمل این فشار اضافی، کاهش می‌یابد. این کاهش تخلخل با کاهش حجم رسوبات همراه است که نمود سطحی آن به صورت فرونشست است (Bouwer, 1977). برای اندازه‌گیری فرونشست زمین از روش‌های مختلفی مانند ترازبایی دقیق، GPS و به‌ویژه تکنیک‌های سنجش از دور استفاده می‌شود. در این میان، تداخل‌سنجی راداری با استفاده از رادار با دریچه مصنوعی (InSAR) یکی از روش‌هایی است که در دو دهه اخیر تحول بزرگی در مطالعات مرتبط با تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرده است (Gabriel et al, 1989). با اینکه تداخل‌سنجی راداری اغلب به‌عنوان یک فناوری نوین در پایش دگرریختی‌های سطح زمین شناخته می‌شود، اما پتانسیل کامل این روش هنوز به‌طور دقیق از سوی مجامع علمی مشخص نشده و نتایج حاصل از آن در مواردی متعدد و پیچیده است (Ferretti et al, 2007) تکنیک تداخل‌سنجی راداری به دلیل داشتن ویژگی‌هایی چون قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب و هم‌چنین پوشش زمینی پیوسته به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش از دور در بررسی تغییرات سطحی زمین شناخته شده است (Rott and Nagler, 2014). در حال حاضر این روش به‌عنوان کارآمدترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (Mohammadimanesh et al, 2018).

استناد: هاشمی‌نسب، س.م. و همکاران، ۱۴۰۴. اثر افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین و ایجاد گستره‌های آسیب‌پذیر، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۲)، (۷۱-۵۳)، DOI: 10.48308/esrj.2025.105830

E-mail: h-nassery@sbu.ac.ir

* نویسنده مسئول:

در کشور ایران به دلیل خشکسالی‌های فراوان، به ویژه در شرق و مرکز آن، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و پدیده فرونشست در بسیاری از دشت‌ها رخ داده است. شفیعی و همکاران (Shafiei et al, 2020) در یک بازه زمانی ۱۲ ساله به بررسی فرونشست آبخوان دشت نور آباد پرداختند. نتایج نشان دهنده افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۲ متر در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان است. نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان دهنده فرونشست ۱۶ سانتی‌متری در بازه زمانی ۴ ساله می‌باشد. عابدینی و همکاران (Abedini et al, 2022) در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه به روش تکنیک تداخل سنجی راداری پرداختند. میزان افت سطح آب زیرزمینی در این بازه ۲/۲۸ است که پیامد آن سبب ایجاد فرونشست ۱۵ سانتی‌متری شده است. مهرابی و همکاران (Mehrabi et al, 2023) با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT) فرونشست دشت جیرفت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده افزایش نرخ نشست به طور فزاینده است به طوری که طی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ میزان فرونشست از ۱۱ سانتی‌متر به ۱۳ سانتی‌متر در سال رسیده است. علاوه بر برداشت بی‌رویه از آبخوان فرونشست تحت تاثیر گسل سبزوآران نیز قرار دارد. رجیبی و همکاران (Rajabi et al, 2024) میزان فرونشست دشت کرمانشاه را در یک بازه زمانی ۴ سال از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ با روش تداخل‌سنجی تفاضلی تعیین کردند. پیش‌بینی فرونشست در این پژوهش با استفاده از عوامل موثر و روش تحلیل سلسله مراتبی انجام شده است و انطباق مناطق دارای بیشینه فرونشست به دست آمده و مناطق با احتمال فرونشست زیاد در نقشه پیش‌بینی فرونشست نشان داده شده است. تعیین میزان و چگونگی فرونشست در ارزیابی، کنترل و مدیریت خسارات ناشی از آن بسیار مهم است. برای پایش و اندازه‌گیری نرخ فرونشست در دشت نیشابور در فاصله زمانی ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۸ روش‌های مختلفی از قبیل سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS)، ترازیبی (Spirit level) و روش تداخل‌سنجی راداری با دریچه مصنوعی (SAR) توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور تعیین ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین در دشت نیشابور، ابتدا شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گستره مطالعه شد. سپس اطلاعات مربوط به ۵۴ حلقه چاه مشاهده‌ای در یک دوره ۳۰ ساله آبی (۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶) جمع‌آوری و هیدروگراف مربوط به آن‌ها تهیه شد. برای بررسی فرونشست دشت نیشابور از تصاویر ماهواره Sentinel-1A (S-1A) برای بازه‌های زمانی ۲۰۱۴/۱۰ تا ۲۰۱۸/۱۰ استفاده شده است. برای پردازش تصاویر راداری از نرم‌افزار GMTSAR و از مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) با قدرت تفکیک ۹۰ متر برای حذف اثر توپوگرافی در طی فرآیند تداخل سنجی استفاده شده است. در زمان پردازش تصاویر ماهواره Sentinel-1A، دو شرط خط مبنای مکانی کمتر از ۱۲۵ متر و خط مبنای زمانی کمتر از ۷۵ روز برای تهیه تداخل‌نگارها در نظر گرفته شده است پس از تهیه تداخل‌نگارها و به منظور رفتارسنجی جابجایی سطح زمین در زمان، از تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی راداری استفاده شده که با استفاده از روش کمترین مربعات تداخل‌نگارها وارون شده و تغییر شکل در زمان‌های دریافت تصاویر محاسبه شده است. همچنین خطای مداری مربوط به عدم دقت در اندازه‌گیری طول خط مبنای مکانی که فاز تداخل‌نگارها را تحت تاثیر قرار می‌دهد در طی فرآیند مسطح‌سازی، حذف شده است در نهایت با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار Matlab و تمامی تداخل‌نگارهای تهیه شده نرخ متوسط فرونشست در جهت قائم تهیه شده است. به دلیل اینکه تصاویر از لحاظ زمانی پیوستگی ندارند، نقشه نرخ متوسط فرونشست برای دو بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۲۹ تا ۲۰۱۶/۴/۲۴ و بازه زمانی ۲۰۱۶/۰۵/۲۲ تا ۲۰۱۸/۱۰/۰۳ تهیه شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۹). در گام بعد نقشه‌های فرونشست دشت نیشابور حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 1-A مورد استفاده قرار گرفت و با مقایسه موقعیت پهنه‌های نشست با نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی، میزان ارتباط بین این دو پارامتر بررسی و شواهد و پیامدهای ناشی از این پدیده در گستره مورد مطالعه گردآوری شد.

نتایج و بحث

با توجه به هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای، نوسان‌های سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای را می‌توان در قالب سه گروه A، B و C دسته‌بندی کرد:

- در چاه‌های مشاهده‌ای گروه A سطح آب زیرزمینی در طول زمان نوسان خاصی نداشته و یا نوسان آن بسیار کم بوده است. این گروه از چاه‌ها در گستره شمال غرب دشت واقع شده‌اند و تغذیه سطحی و زیرزمینی بسیار مناسبی دریافت می‌کنند (شکل ۲ ب)، به طوری که با وجود برداشت قابل توجه از آب زیرزمینی در گستره آن‌ها، افت چندانی نشان نمی‌دهند.

- در چاه‌های مشاهده‌ای گروه B به دلیل برداشت بیش از حد از آبخوان در گستره آن‌ها، سطح آب زیر زمینی دچار افت دائم و سیر افت یکنواخت بوده است. چاه مشاهده‌ای جنوب حسین آباد جنگل معرف این گروه از چاه‌ها است.

- در چاه‌های مشاهده‌ای گروه C سطح آب زیرزمینی دارای نوسان کاهشی سینوسی بوده است، بدین معنی که سطح آب آن‌ها دارای افت بوده ولی در طول فصل مرطوب در نتیجه افزایش میزان تغذیه و کاهش برداشت دچار بالا آمدگی شده است. در طول دوره خشک با افزایش میزان برداشت مجدداً سطح آب دچار افت شده و افت به وجود آمده بسیار بیشتر از میزان بالا آمدگی در طول دوره مرطوب بوده است. بنابراین سطح آب در هر سال آبی نسبت به سال قبل افت بیشتری داشته است.

بررسی نقشه‌های فرونشست دشت نیشابور نشان می‌دهد که بیشترین نرخ فرونشست در دوره زمانی (۱۳۹۳/۰۶ تا ۱۳۹۵/۰۱)، ۱۵/۴ سانتی‌متر بر سال و در بازه زمانی (۱۳۹۵/۰۲ تا ۱۳۹۷/۱۰)، ۱۴/۸ سانتی‌متر بر سال بوده است. در دشت نیشابور چهار گستره با نرخ بالای فرونشست (بیشتر از ۹ سانتی‌متر بر سال) وجود دارد.

- گستره بحرانی شمال شرق دشت: این گستره بحرانی در شرق شهر نیشابور واقع شده است و حداکثر نرخ فرونشست دشت (۱۴/۸ سانتی‌متر بر سال) در آن قرار دارد. در این گستره، جاده اصلی و خط آهن سراسری مشهد-تهران و همچنین بخش عمده صنایع دشت نیشابور قرار دارند.

- گستره بحرانی مرکزی: این گستره در غرب و جنوب غرب شهر نیشابور واقع شده و حداکثر نرخ فرونشست دشت در آن ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. در این گستره نیز جاده اصلی و خط آهن سراسری مشهد-تهران واقع شده است و بخش عمده کشاورزی دشت نیشابور در این گستره صورت می‌گیرد.

- گستره بحرانی غربی: این گستره در غرب دشت نیشابور واقع شده و حداکثر نرخ فرونشست دشت در آن ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. در این گستره نیز جاده اصلی و خط آهن سراسری مشهد-تهران واقع شده است و قدیمی‌ترین آثار شکاف‌های ناشی از فرونشست در دشت نیشابور-روستای بازوبند در این گستره قرار دارد.

- گستره بحرانی جنوبی: این گستره در جنوب و جنوب شرق دشت نیشابور واقع شده و حداکثر نرخ فرونشست در آن ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. در این بخش از دشت نیز کشاورزی به صورت گسترده صورت می‌گیرد.

در دشت نیشابور بهره‌برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی در طی ۵۰ سال گذشته باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است. بررسی انطباق منحنی‌های هم افت ۳۰ ساله دشت نیشابور و نقشه فرونشست تهیه شده دو ساله ۱۳۹۷-۱۳۹۵ نشان می‌دهد که تقریباً در بخش بزرگی از دشت میزان افت ۳۰ ساله بیش از ۲۰ متر بوده است و گستره‌های فرونشست چهارگانه منطبق بر مناطقی است که افت سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بیش از ۳۰ متر است.

از مهم‌ترین پیامدهای فرونشست در گستره دشت نیشابور می‌توان به شکاف‌های طولی ممتد، شکاف‌های منقطع، حفره‌های مدور، چاله‌های وسیع و فروچاله‌ها اشاره کرد. شکاف‌های طولی ممتد در بخش‌های زیادی از حاشیه دشت نیشابور مشاهده می‌شوند که از بهم پیوستن شکاف‌های منقطع و دارای یک امتداد مشخص به وجود می‌آیند. شکاف‌های منقطع که در مرحله ابتدایی ایجاد شکاف‌های طولی ممتد هستند، پس از بارش باران و وقوع سیلاب شکاف‌های طولی ممتد را به وجود می‌آورند (Rokni et al, 2016). حفرات مدور حاصل فرونشینی طبقات زیرین می‌باشند و در بخش‌هایی از حاشیه دشت دیده می‌شوند. علاوه بر این، نشست زمین شکاف‌های بزرگ کششی ایجاد کرده است که طول برخی از آن‌ها به چندین کیلومتر و عمق آن‌ها به بیش از ۱۰ متر می‌رسد. این شکاف‌ها که به آهستگی و در مواردی به طور ناگهانی گسترش می‌یابند، گاهی ترمیم‌ناپذیر و مخرب هستند و خسارت‌های عمده‌ای بر تاسیسات سطحی شامل خطوط نفت و گاز، جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و بناها وارد می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در دشت نیشابور چهار گستره بحرانی شمال شرق، بحرانی مرکزی، بحرانی غربی و بحرانی جنوبی با نرخ بالای فرونشست (بیش از ۹ سانتی‌متر بر سال) وجود دارد. بیشترین میزان فرونشست در شرق شهر نیشابور با حداکثر نرخ فرونشست دشت (۱۴/۸)

سانتی‌متر بر سال) رخ داده است که جاده اصلی، خط آهن سراسری مشهد-تهران و بخش عمده صنایع دشت نیشابور در این گستره قرار دارند. در سه گستره بحرانی دیگر حداکثر نرخ فرونشست ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. نمودارهای میزان افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست سطح دشت نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی بر نشست زمین تاثیر به‌سزایی دارد. در بخش بزرگی از دشت نیشابور میزان افت ۳۰ ساله بیش از ۲۰ متر بوده است و پهنه‌های فرونشست چهارگانه منطبق بر بخش‌هایی از دشت است که افت سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بیش از ۳۰ متر بوده است. دستاوردهای حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که برداشت آب بیش از توان بازیابی آبخوان یکی از علت‌های اصلی فرونشست در سطح دشت است. بنابراین توجه ویژه به مدیریت منابع آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست در گستره دشت ایجاد شکاف‌های طولی ممتد و منقطع، حفره‌های مدور و چاله‌های وسیع بوده‌اند. گسترش این ترک‌ها تا جاده اصلی، خط راه آهن سراسری و خطوط انتقال نفت و گاز ممکن است خطرهای گوناگونی را در پی داشته‌باشد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، سنتینل، فرونشست، گستره‌های آسیب‌پذیر، نیشابور.

مقدمه

طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، پدیده فرونشست زمین (land subsidence) فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی اندکی باشد (Bates and Jackson, 1980). فرونشست زمین یک پدیده زمین‌شناسی است که موجب پایین رفتن آرام و افقی سطح زمین می‌شود (Hu et al, 2009). پدیده فرونشست ناشی از عوامل طبیعی و غیرطبیعی است. عوامل طبیعی شامل حرکات زمین‌ساختی، انحلال سنگ‌های آهکی، وجود فروچاله‌های کارستی، تخلیه ماگما، اکسیداسیون خاک‌های آلی و تراکم طبیعی خاک است که در مقیاس زمانی طولانی ظاهر می‌شوند، در حالی که عوامل غیرطبیعی عمدتاً ناشی از فعالیت‌های بشر می‌باشند (Poland, 1984). این عوامل همچون افت شدید و غیر قابل برگشت سطح آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، در فاصله زمانی کوتاه‌تری ایجاد می‌شوند. با برداشت آب زیرزمینی که با زهکشی آب منافذ همراه است، فشار آب منفذی کاهش می‌یابد. این عمل بدان معنی است که تنش ناشی از وزن مواد بالایی به صورت تدریجی از آب منفذی به ساختار دانه‌ها انتقال می‌یابد. از جهت دیگر، وزن موثر رسوبات در منطقه غیر اشباع زمانی که نیروی غوطه‌وری آب منفذی از بین می‌رود، افزایش می‌یابد. بنابراین برای جبران این افزایش فشار ممکن است ساختار دانه‌ها برای تعدیل این موقعیت تنشی جدید تغییر کند. تخلخل موجود در رسوبات برای تحمل این فشار اضافی، کاهش می‌یابد. این کاهش تخلخل با کاهش حجم

رسوبات همراه است که نمود سطحی آن به صورت فرونشست است (Bouwer, 1977). برای اندازه‌گیری فرونشست زمین از روش‌های مختلفی مانند ترازبایی دقیق، GPS و به‌ویژه تکنیک‌های سنجش از دور استفاده می‌شود. در این میان، تداخل‌سنجی راداری با استفاده از رادار با دریچه مصنوعی (InSAR) یکی از روش‌هایی است که در دو دهه اخیر تحول بزرگی در مطالعات مرتبط با تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرده است (Gabriel et al, 1989). با اینکه تداخل‌سنجی راداری اغلب به‌عنوان یک فناوری نوین در پایش دگرریختی‌های سطح زمین شناخته می‌شود، اما پتانسیل کامل این روش هنوز به‌طور دقیق از سوی مجامع علمی مشخص نشده و نتایج حاصل از آن در مواردی متعدد و پیچیده است (Ferretti et al, 2007). تکنیک تداخل‌سنجی راداری به دلیل داشتن ویژگی‌هایی چون قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب و هم‌چنین پوشش زمینی پیوسته به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش از دور در بررسی تغییرات سطحی زمین شناخته شده است (Rott and Nagler, 2014). در تکنیک تداخل-سنجی راداری، فاز تصاویر برداشت شده در زمان‌های مختلف از یک منطقه پیکسل به پیکسل مقایسه و از هم کم می‌شود (Ferretti et al, 2007). در حال حاضر این روش به‌عنوان کارآمدترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (Mohammadimanesh et al, 2018). تداخل‌سنجی راداری تا حد زیادی پی‌جویی فرونشست

سال گزارش کرده‌اند. خلیفی و همکاران (Khalifi et al, 2017) در پژوهشی نرخ فرونشست در دشت اردبیل حدود ۷۴ تا ۱۱۰ میلی‌متر در سال برآورد کردند. مرسلی (Morsali, 2017) فرونشست زمین در دشت ورامین به دلیل کاهش سطح آب‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد. مقصودی و همکاران (Maghsoudi et al, 2019) در یک بازه زمانی ۲ساله با استفاده از ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل به بررسی رفتار فرونشست در غرب تهران پرداختند که نتایج نشان دهنده میزان جابجایی سالانه ۱۱ سانتی‌متر در جنوب منطقه مورد مطالعه است این جابجایی نه تنها محدود به مناطق دشتی و غیرشهری بلکه در مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. شفیعی و همکاران (Shafiei et al, 2020) در یک بازه زمانی ۱۲ ساله به بررسی فرونشست آبخوان دشت نور آباد پرداختند. نتایج نشان دهنده افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۲ متر در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان است. نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان دهنده فرونشست ۱۶ سانتی-متری در بازه زمانی ۴ ساله می‌باشد. عابدینی و همکاران (Abedini et al, 2022) در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه به روش تکنیک تداخل سنجی راداری پرداختند. میزان افت سطح آب زیرزمینی در این بازه ۲/۲۸ است که پیامد آن سبب ایجاد فرونشست ۱۵ سانتی‌متری شده است. مهرابی و همکاران (Mehrabi et al, 2023) با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT) فرونشست دشت جیرفت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده افزایش نرخ نشست به طور فزاینده است به طوری که طی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ میزان فرونشست از ۱۱ سانتی‌متر به ۱۳ سانتی-متر در سال رسیده است. علاوه بر برداشت بی‌رویه از آبخوان فرونشست تحت‌تاثیر گسل سبزواران نیز قرار دارد. رجبی و همکاران (Rajabi et al, 2024) میزان فرونشست دشت کرمانشاه را در یک بازه زمانی ۴ سال از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ با روش تداخل‌سنجی تفاضلی تعیین کردند. پیش‌بینی فرونشست در این پژوهش با استفاده از عوامل موثر و روش تحلیل سلسله مراتبی انجام شده است و انطباق مناطق دارای بیشینه فرونشست به دست آمده و مناطق با احتمال فرونشست زیاد در نقشه پیش‌بینی فرونشست نشان داده شده است. تعیین میزان و چگونگی فرونشست در

زمین در مناطق شهری را تسهیل کرده است (Castellazzi et al, 2016). نخستین تلاش‌ها برای نقشه‌برداری از پدیده فرونشست زمین در مقیاس‌های بسیار بزرگ و در بازه‌های زمانی طولانی، در کشور چین صورت گرفته است (Zhang et al, 2016). در کشور ایران نیز به دلیل خشکسالی‌های فراوان، به ویژه در شرق و مرکز آن، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و پدیده فرونشست در بسیاری از دشت‌ها رخ داده است. از آن جمله می‌توان به دشت‌های گرگان (Tourani et al, 2018)، زاگرس (Mehrabi, 2019)، میناب (Arvin et al, 2019)، اصفهان (Goorabi et al, 2020)، کرج (Ranjbar Barough and Fathallahzadeh, 2022)، جیرفت (Mehrabi et al, 2022)، قائن (Hosseinzadeh et al, 2023) اشاره کرد. پدیده فرونشست ناشی از افت تراز سطح آب زیرزمینی اولین بار در ایران در دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ همراه با پدیده لوله‌زایی در چاه‌های کشاورزی گزارش شده است (Hosseini Milani, 1994). مطالعات انجام شده در مناطق مختلف ایران نشان می‌دهد که پدیده فرونشست در اغلب دشت‌ها طی چند دهه اخیر روندی افزایشی داشته است، صالحی و همکاران (Salehi et al, 2012) با استفاده از داده‌های InSAR در دوره ۲۰۰۳-۲۰۰۶ حداکثر فرونشست زمین در دشت مهیار اصفهان را ۸/۶ سانتی‌متر در سال برآورد کردند. نتایج مطالعه و هم‌پوشانی با نقشه‌های گردآوری شده با موقعیت ویژگی‌های رخداد فرونشست این مقاله که فرونشست در این منطقه در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی است را تایید کرد. طباطبایی عقدا و محسنی نسب (Tabatabaei Aghda and Mohseni Nasab, 2014) گزارش کردند که علاوه بر برداشت آب زیرزمینی عوامل تکتونیکی نیز از جمله علل اصلی فرونشست در دشت رفسنجان به شمار می‌آیند. معافی و راهنما (Moafi and Rahnama, 2015) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، بعد از تصحیح و بازسازی داده‌های مربوط به چاه‌ها در ماه‌های مختلف و با توجه به نقشه‌های موجود، میزان فرونشست زمین در دشت رفسنجان را تخمین زدند. بابایی و همکاران (Babae et al, 2016) در پژوهش دیگری، با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، بیشینه نرخ فرونشست در دشت قزوین حدود ۳۱ تا ۳۴ میلی‌متر در

ارزیابی، کنترل و مدیریت خسارات ناشی از آن بسیار مهم است. برای پایش و اندازه‌گیری نرخ فرورفت در دشت نیشابور در فاصله زمانی ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۸ روش‌های مختلفی از قبیل سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS)، تراز یابی (Spirit level) و روش تداخل‌سنجی راداری با دریچه مصنوعی (SAR) توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون سه مرحله مطالعه تداخل‌سنجی راداری در این دشت انجام شده است (جدول ۱).

جدول ۱: مطالعات تداخل‌سنجی راداری انجام شده در دشت نیشابور

Table 1: Subsidence rates of Neyshabur plain has been classified as area of sections

Source	Image's Type	Time Range	Software	Maximum Range of Annual Subsidence (cm per year)
(Dehghani et al., 2009)	GAMMA	2003-2006	ENVISAT	19
(Almodaresi and Heshmati, 2015)	Sarscape	2003-2010	ENVISAT	18
National Cartography Center of Iran, 2019	GAMMA	2014-2017	Sentinel-1A	20

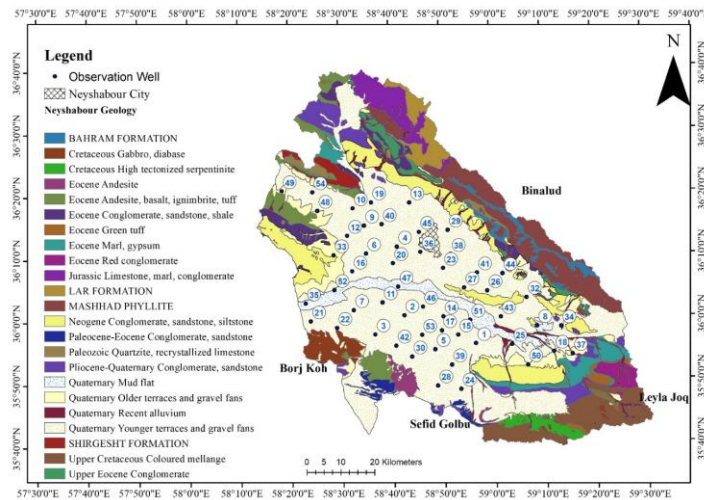
به‌ویژه بستر مسیل‌های اصلی، درشت دانه می‌باشند و از نفوذپذیری بالایی برخوردارند. اما با فاصله گرفتن از ارتفاعات به سمت بخش میانی و پایانی دشت، به دلیل کاهش شیب سطح زمین، انرژی جریان‌های سطحی کاهش یافته و رسوبات ریزدانه در حد لای و رس نهشته شده است. زمین ساخت فعال منطقه، وجود رودخانه‌های متعدد با رژیم آبدهی متفاوت، تنوع جنس سازندهای زمین‌شناسی در ارتفاعات مشرف به پهنه دشت، همگی موجب تنوع ویژگی‌های ساختاری و هیدروژئولوژیک آبخوان آبرفتی نیشابور شده است به‌گونه‌ای که گاهی در فاصله‌ای اندک، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در ضخامت آبرفت و عمق سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود (Khorasan Razavi Regional Water Company, 2015). علاوه بر این، توسعه مراکز جمعیتی و زمین‌های کشاورزی در سطح دشت نیشابور و هماهنگ با آن توسعه بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی با حفر چاه‌های عمیق، همگی بر تغییر شرایط هیدروژئولوژیک آبخوان افزوده است. گستره آبخوان آبرفتی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق بخشی از حوضه آبریز نیشابور است. مساحت آبخوان نیشابور که گستره مطالعاتی این پژوهش را شامل می‌شود ۲۸۳۳ کیلومتر مربع است. طبق آخرین داده برداری انجام شده در گستره مطالعاتی نیشابور که در فاصله شهریور ماه ۱۳۹۶ تا آبان ماه ۱۳۹۸ انجام شده است تعداد ۲۱۳۲ حلقه چاه بهره‌برداری با مجموع تخلیه ۶۰۶ میلیون مترمکعب در سال، تعداد ۳۲ رشته قنات با مجموع تخلیه چهارمیلیون مترمکعب در سال و تعداد چهار دهانه چشمه با مجموع تخلیه ۹۶ هزارمترمکعب در سال در گستره آبخوان آبرفتی قرار دارند (Khorasan Razavi Regional

منطقه مورد مطالعه

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی گستره مطالعاتی نیشابور گستره مطالعاتی نیشابور از نظر موقعیت جغرافیایی در حد فاصل ۵۸° ۱۳' تا ۵۹° ۳۰' طول شرقی و ۳۵° ۴۰' تا ۳۶° ۳۹' عرض شمالی واقع شده است. این گستره از شمال به رشته کوه بینالود با امتداد شمال غرب- جنوب شرق، از شرق به ارتفاعات کوه دونخ تا سیرزار و لیلا جوق، از جنوب به رشته کوه قطار اولنگ تا کوه‌های سفید گلبو و سفید کمر و از غرب به کوه‌های جنگو، برج کوه تا معدن محدود شده است. گستره مطالعاتی نیشابور به لحاظ قرارگیری در پهنه‌های ساختاری ایران، در حد فاصل دو پهنه بینالود در شمال و نیمه شمالی و پهنه ایران مرکزی در جنوب واقع شده است. البته بخش جنوب شرقی این گستره را واحدهای افیولیتی پوشش داده‌اند (شکل ۱). به طور کلی، مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه عبارت‌اند از: تشکیلات کربناته-دگرگونی کامبرین و پرکامبرین در ارتفاعات بینالود، رسوبات آواری، شیمیایی و بیوشیمیایی پالئوزوئیک، واحدهای دگرگونی، رسوبات شیمیایی و بیوشیمیایی و افیولیت ملانژهای مزوزوئیک در ارتفاعات بینالود در شمال و ارتفاعات جنوب و جنوب‌شرقی گستره، رسوبات تخریبی-آواری سنوزوئیک و نهشته‌های کواترنر که عمدتاً تحکیم نیافته‌اند و حاصل فرسایش و رسوب‌گذاری سازندهای قدیمی‌تر می‌باشند و عمده آبخوان دشت نیشابور را تشکیل می‌دهند. به واسطه تکتونیک فعال و مورفولوژی ناهموار سنگ کف، رسوبات کواترنر در پهنه دشت نیشابور از جنس و ضخامت یکسانی برخوردار نیستند (Aghanabati, 2004). این رسوبات در حاشیه ارتفاعات و

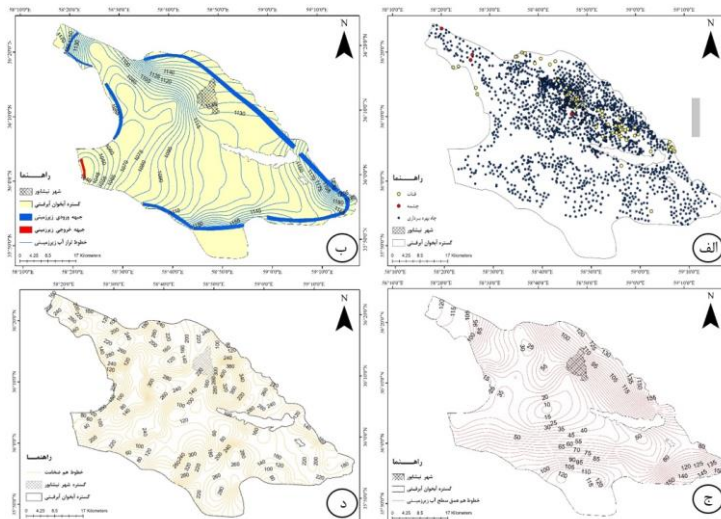
آبخوان در فاصله اندکی تغییرات شدیدی در عمق به وجود آید. روند منحنی‌های هم عمق سطح آب زیرزمینی به طور تقریبی از توپوگرافی تبعیت می‌کند و عمق سطح آب زیرزمینی به سمت مرکز دشت کاهش می‌یابد (شکل ۲ ج). نقشه هم‌ضخامت آبرفت تهیه شده دلالت بر وجود ناهمواری قابل توجه سنگ کف دارد به طوری که ضخامت آبرفت از چند متر در مجاورت رخنمون‌های سنگی تا بیش از ۴۰۰ متر در شرق شهر نیشابور تغییر می‌کند (شکل ۲ د).

در شکل ۲ الف موقعیت منابع آبی موجود در گستره مطالعاتی نشان داده شده است. جهت حرکت جریان آب زیرزمینی در گستره آبخوان آبرفتی در بخش شمالی ابتدا شمالی - جنوبی است که با نزدیک شدن به مرکز دشت جهت شرقی - غربی به خود می‌گیرد (شکل ۲ ب). تغییرات عمق آب سطح آب زیرزمینی در آبخوان نیشابور متأثر از عواملی چون مورفولوژی و توپوگرافی سطح زمین، مورفولوژی سنگ بستر و بهره‌برداری از آبخوان است. تاثیر این عوامل سبب شده است که در برخی از نقاط



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه نیشابور (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی مشهد (۱۳۶۵)، سبزوار (۱۳۷۱)، تربت حیدریه (۱۳۷۰) و کاشمر (۱۳۵۴) سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

Fig. 1: Geological map of Neyshabur plain (collected by geological maps of Mashhad (1986), Sabzevar (1992), Torbat-e-Heydarieh (1991) and Kashmar (1975) geological survey and mineral exploration of Iran).



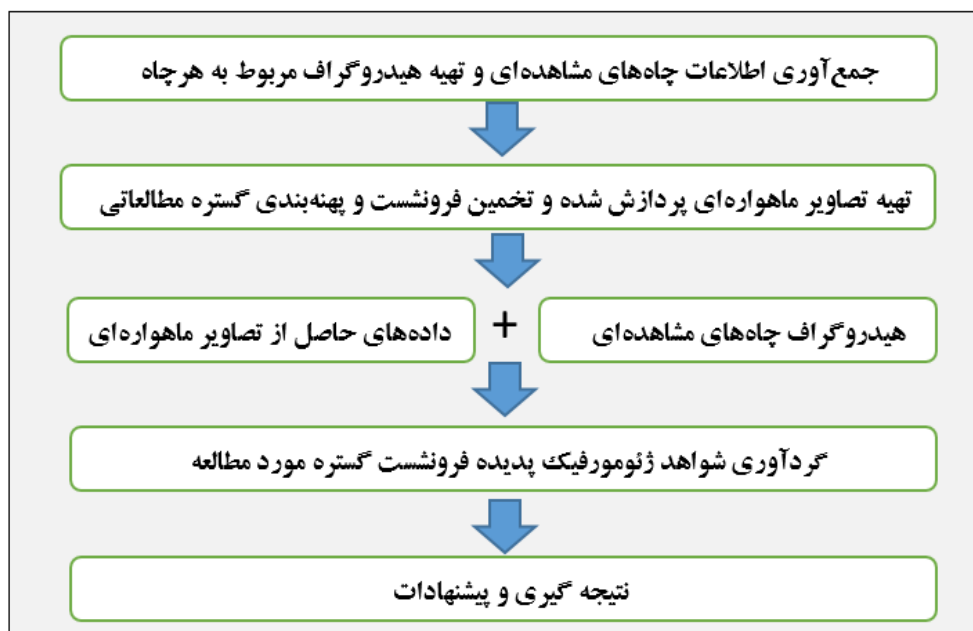
شکل ۲: الف: موقعیت منابع آبی موجود در گستره مطالعاتی، ب: نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی (شهریورماه ۱۳۹۸)، ج: نقشه هم عمق سطح آب زیرزمینی (شهریورماه ۱۳۹۸)، د: نقشه هم ضخامت آبرفت.

Fig. 2: A: Location of the existing water resources within the study area, B: Groundwater level map (September 2019), C: Groundwater Depth Contour Map (September 2019), D: Alluvial Thickness Contour Map.

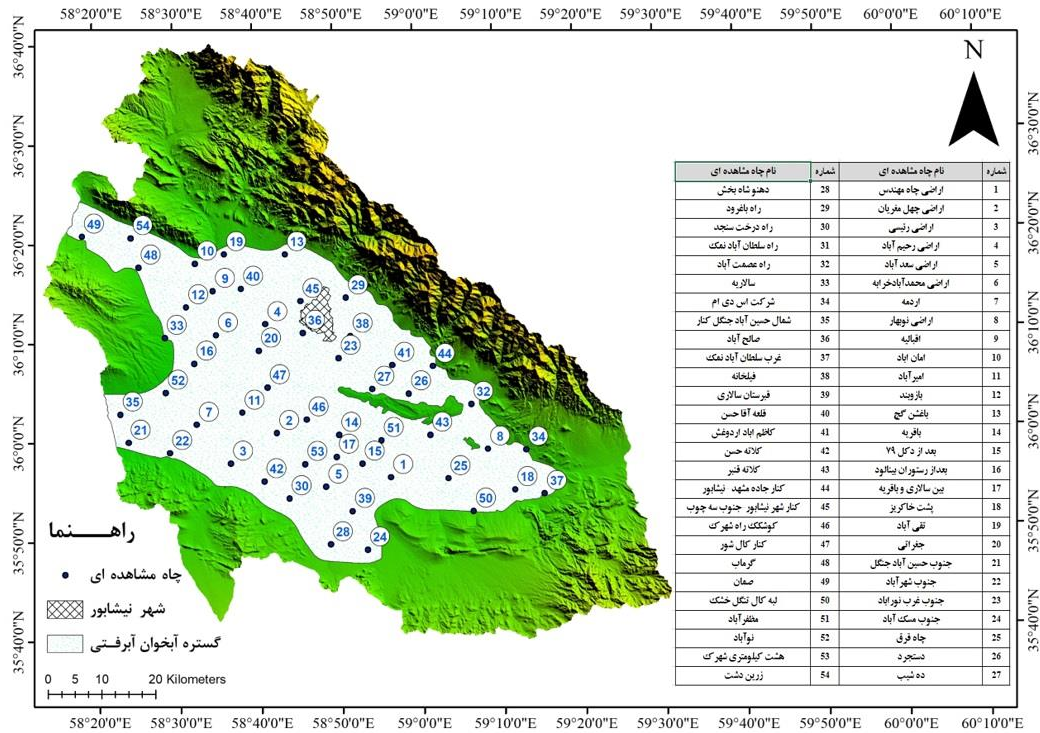
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور تعیین ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین در دشت نیشابور، ابتدا شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گستره مطالعه شد. سپس اطلاعات مربوط به ۵۴ حلقه چاه مشاهده‌ای (شکل ۴) در یک دوره ۳۰ ساله آبی (۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶) جمع‌آوری و هیدروگراف مربوط به آن‌ها تهیه شد. برای بررسی فرونشست دشت نیشابور از تصاویر ماهواره Sentinel-1A (S-1A) برای بازه‌های زمانی ۲۰۱۴/۱۰ تا ۲۰۱۸/۱۰ استفاده شده است. برای پردازش تصاویر راداری از نرم‌افزار GMTSAR و از مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) با قدرت تفکیک ۹۰ متر برای حذف اثر توپوگرافی در طی فرآیند تداخل‌سنجی استفاده شده است. در زمان پردازش تصاویر ماهواره Sentinel-1A، دو شرط خط مبنای مکانی کمتر از ۱۲۵ متر و خط مبنای زمانی کمتر از ۷۵ روز برای تهیه تداخل‌نگارها در نظر گرفته شده است. پس از تهیه تداخل‌نگارها و به منظور رفتارسنجی جابجایی سطح زمین در زمان، از تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی راداری استفاده شده که با استفاده از روش کمترین مربعات تداخل‌نگارها وارون شده و تغییر

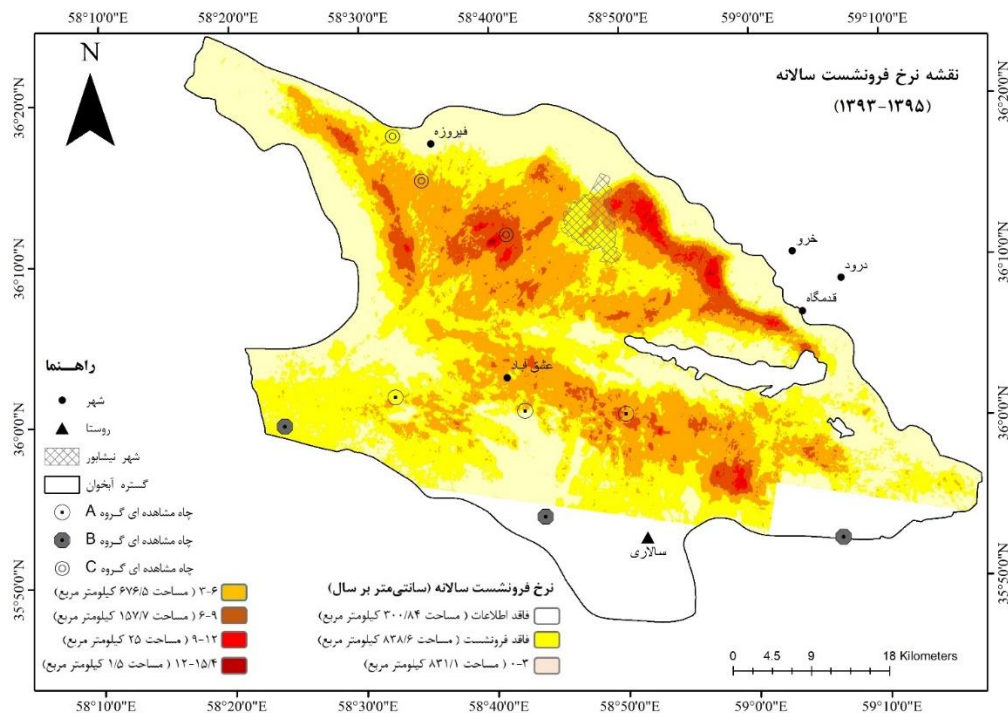
شکل در زمان‌های دریافت تصاویر محاسبه شده است. همچنین خطای مداری مربوط به عدم دقت در اندازه‌گیری طول خط مبنای مکانی که فاز تداخل‌نگارها را تحت تاثیر قرار می‌دهد در طی فرآیند مسطح‌سازی، حذف شده است. در نهایت با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار Matlab و تمامی تداخل‌نگارهای تهیه شده نرخ متوسط فرونشست در جهت قائم تهیه شده است. به دلیل اینکه تصاویر از لحاظ زمانی پیوستگی ندارند، نقشه نرخ متوسط فرونشست برای دو بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۲۹ تا ۲۰۱۶/۴/۲۴ و بازه زمانی ۲۰۱۶/۰۵/۲۲ تا ۲۰۱۸/۱۰/۰۳ تهیه شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۹). در گام بعد نقشه‌های فرونشست دشت نیشابور حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 1-A مورد استفاده قرار گرفت و با مقایسه موقعیت پهنه‌های نشست با نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی، میزان ارتباط بین این دو پارامتر بررسی و شواهد و پیامدهای ناشی از این پدیده در گستره مورد مطالعه گردآوری شد (شکل ۳). نقشه هم‌ارزش فرونشست دشت نیشابور برای دوره‌های زمانی (۱۳۹۳/۰۶ تا ۱۳۹۵/۰۱) و (۱۳۹۵/۰۲ تا ۱۳۹۷/۱۰) در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.



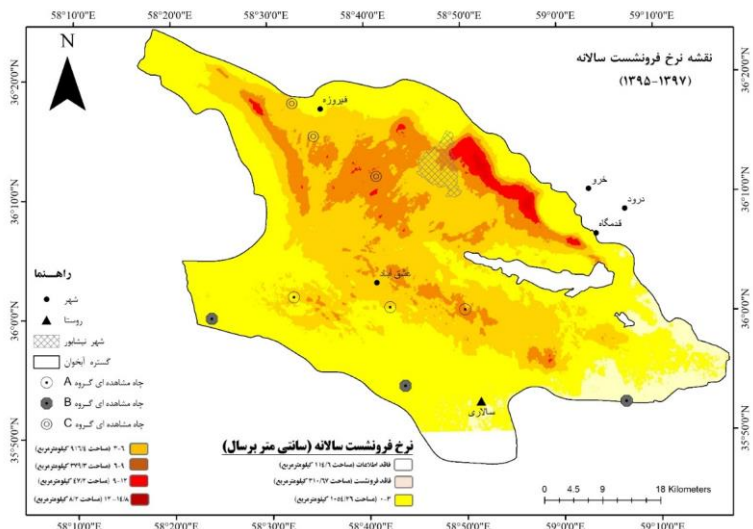
شکل ۳: فلوجارت مراحل پژوهش
Fig. 3: Flowchart of research steps



شکل ۴: پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای در گستره دشت نیشابور
 Fig. 4: Distribution of observation wells in Neyshabur plain



شکل ۵: نقشه نرخ متوسط فرورفتگی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 2020)
 Fig. 5: Subsidence rate map 2014-2016 (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 2020)



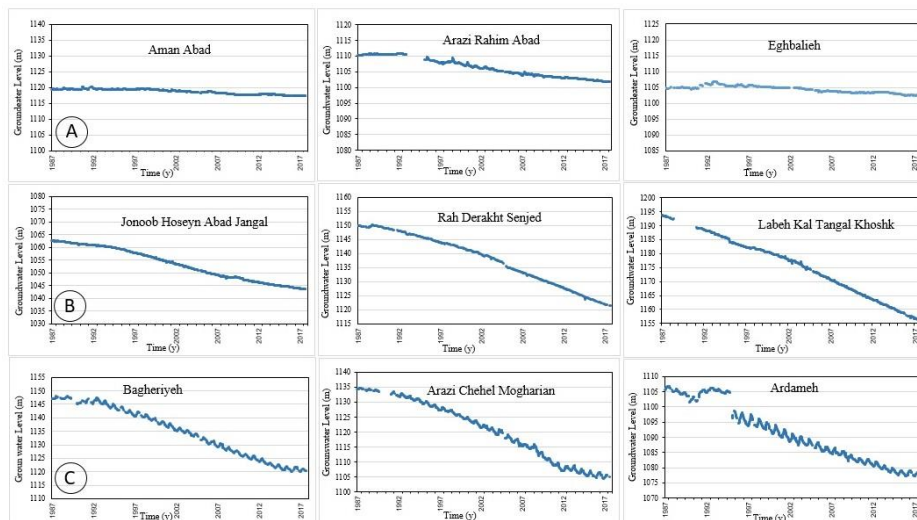
شکل ۶: نقشه نرخ متوسط فرونشست سالانه ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۵ (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 2020)
 Fig. 6: Subsidence rate map 2016-2018 (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 2020)

نتایج

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از چاه‌های مشاهده‌ای

با توجه به هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای، نوسان‌های سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای را می‌توان در قالب سه گروه A، B و C دسته‌بندی کرد (شکل ۷):



شکل ۷: نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای دشت نیشابور
 Fig. 7: Diagram of groundwater rate in some of the observed wells of Neyshabur plain

- در چاه‌های مشاهده‌ای گروه B به دلیل برداشت بیش از حد از آبخوان در گستره آن‌ها، سطح آب زیر زمینی دچار افت دائم و سیر افت یکنواخت بوده‌است. چاه مشاهده‌ای جنوب حسین آباد جنگل معرف این گروه از چاه‌ها است.
 - در چاه‌های مشاهده‌ای گروه C سطح آب زیرزمینی دارای نوسان کاهشی سینوسی بوده است، بدین معنی که سطح آب آن‌ها دارای افت بوده ولی در طول فصل مرطوب در

- در چاه‌های مشاهده‌ای گروه A سطح آب زیرزمینی در طول زمان نوسان خاصی نداشته و یا نوسان آن بسیار کم بوده است. این گروه از چاه‌ها در گستره شمال غرب دشت واقع شده‌اند و تغذیه سطحی و زیرزمینی بسیار مناسبی دریافت می‌کنند (شکل ۲ ب)، به طوری که با وجود برداشت قابل توجه از آب زیرزمینی در گستره آن‌ها، افت چندانی نشان نمی‌دهند.

- گستره بحرانی شمال شرق دشت: این گستره بحرانی در شرق شهر نیشابور واقع شده است و حداکثر نرخ فرونشست دشت (۱۴/۸ سانتی‌متر بر سال) در آن قرار دارد. در این گستره، جاده اصلی و خط آهن سراسری مشهد-تهران و همچنین بخش عمده صنایع دشت نیشابور قرار دارند.

- گستره بحرانی مرکزی: این گستره در غرب و جنوب غرب شهر نیشابور واقع شده و حداکثر نرخ فرونشست دشت در آن ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. در این گستره نیز جاده اصلی و خط آهن سراسری مشهد-تهران واقع شده است و بخش عمده کشاورزی دشت نیشابور در این گستره صورت می‌گیرد.

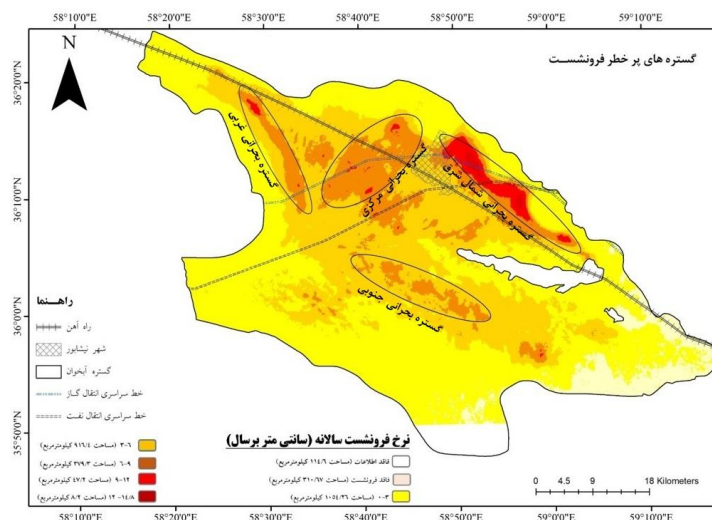
- گستره بحرانی غربی: این گستره در غرب دشت نیشابور واقع شده و حداکثر نرخ فرونشست دشت در آن ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. در این گستره نیز جاده اصلی و خط آهن سراسری مشهد-تهران واقع شده است و قدیمی‌ترین آثار شکاف‌های ناشی از فرونشست در دشت نیشابور-روستای بازویند در این گستره قرار دارد.

- گستره بحرانی جنوبی: این گستره در جنوب و جنوب شرق دشت نیشابور واقع شده و حداکثر نرخ فرونشست در آن ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. در این بخش از دشت نیز کشاورزی به صورت گسترده صورت می‌گیرد.

نتیجه افزایش میزان تغذیه و کاهش برداشت دچار بالا آمدگی شده است. در طول دوره خشک با افزایش میزان برداشت مجدداً سطح آب دچار افت شده و افت به وجود آمده بسیار بیشتر از میزان بالاآمدگی در طول دوره مرطوب بوده است. بنابراین سطح آب در هر سال آبی نسبت به سال قبل افت بیشتری داشته است.

داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای

بررسی نقشه‌های فرونشست دشت نیشابور (شکل‌های ۴ و ۵) نشان می‌دهد که بیشترین نرخ فرونشست در دوره زمانی (۱۳۹۳/۰۶ تا ۱۳۹۵/۰۱)، ۱۵/۴ سانتی‌متر بر سال و در بازه زمانی (۱۳۹۵/۰۲ تا ۱۳۹۷/۱۰)، ۱۴/۸ سانتی‌متر بر سال بوده است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر پدیده فرونشست و تعیین مساحت مناطق با نرخ بالای فرونشست، فاصله رده‌ها سه سانتی‌متر بر سال در نظر گرفته شده است که بر این اساس شش رده تعریف شده است. مقایسه نقشه‌های یاد شده نشان می‌دهد که در تمامی رده‌های فرونشستی مساحت گستره فرونشست با گذشت زمان افزایش یافته است. مناطق بحرانی فرونشست در دشت نیشابور بر روی شکل ۸ با علامت بیضی مشکی رنگ مشخص شده است. بررسی این نقشه نشان می‌دهد که در دشت نیشابور چهار گستره با نرخ بالای فرونشست (بیشتر از ۹ سانتی‌متر بر سال) وجود دارد.



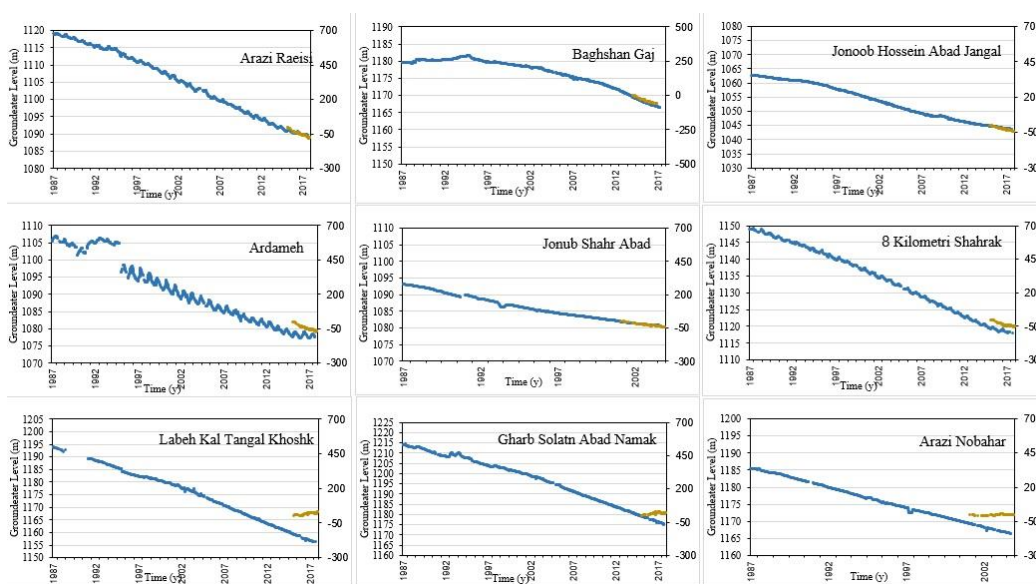
شکل ۸: گستره‌های بحرانی فرونشست دشت نیشابور
Fig. 8: Critical subsidence rate of Neyshabur plain

بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در دشت نیشابور بهره‌برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی در طی ۵۰ سال گذشته باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است.

تلفیق داده‌های حاصل از روش تداخل‌سنجی ماهواره‌ای و چاه‌های مشاهده‌ای: ارتباط بین فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلفی از دنیا به وسیله پژوهشگران

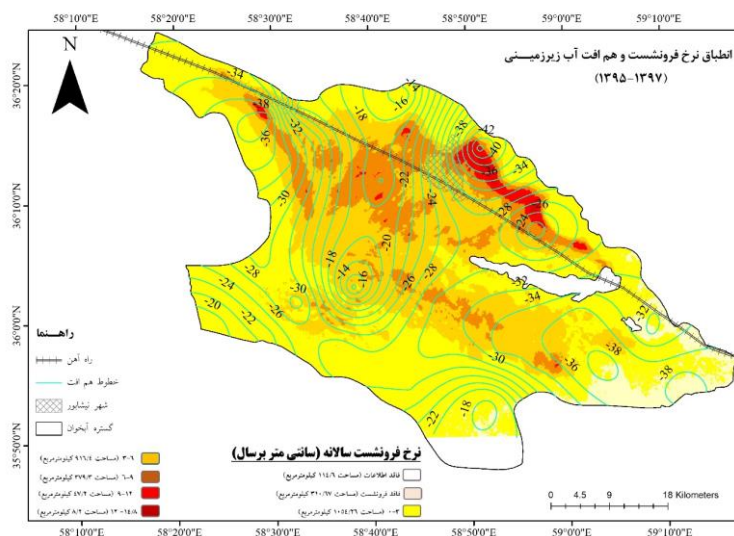
این نمودارها، رابطه بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در چاه‌های مشاهده‌ای را می‌توان در قالب دو گروه دسته‌بندی کرد. در اغلب چاه‌های مشاهده‌ای دشت نیشابور بین میزان افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست رابطه مستقیمی وجود دارد. در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای مانند چاه قرق، اراضی نوبهار، شرکت SMD، راه سلطان آباد نمک، غرب سلطان آباد نمک و لبه-کال تنگل خشک علی‌رغم وجود افت بالای سطح آب زیرزمینی، نرخ فرونشست سطح زمین بسیار پایین و یا برابر صفر است.

بررسی انطباق منحنی‌های هم‌افت ۳۰ ساله دشت نیشابور و نقشه فرونشست تهیه شده دو ساله ۱۳۹۷-۱۳۹۵ (شکل ۹) نشان می‌دهد که تقریباً در بخش بزرگی از دشت میزان افت ۳۰ ساله بیش از ۲۰ متر بوده است و گستره‌های فرونشست چهارگانه منطبق بر مناطقی است که افت سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بیش از ۳۰ متر است. با استفاده از پردازش تصاویر راداری، سری زمانی فرونشست در چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت نیشابور استخراج شده و همراه تغییرات تراز آب زیرزمینی در این چاه‌ها رسم شده است. تعدادی از نمودارها در شکل ۱۰ ارائه شده است. با بررسی



شکل ۹: نقشه انطباق منحنی‌های هم‌افت ۳۰ ساله و مناطق فرونشست

Fig. 9: Subsidence region map and merged map assigned to the water table changes during 30 years



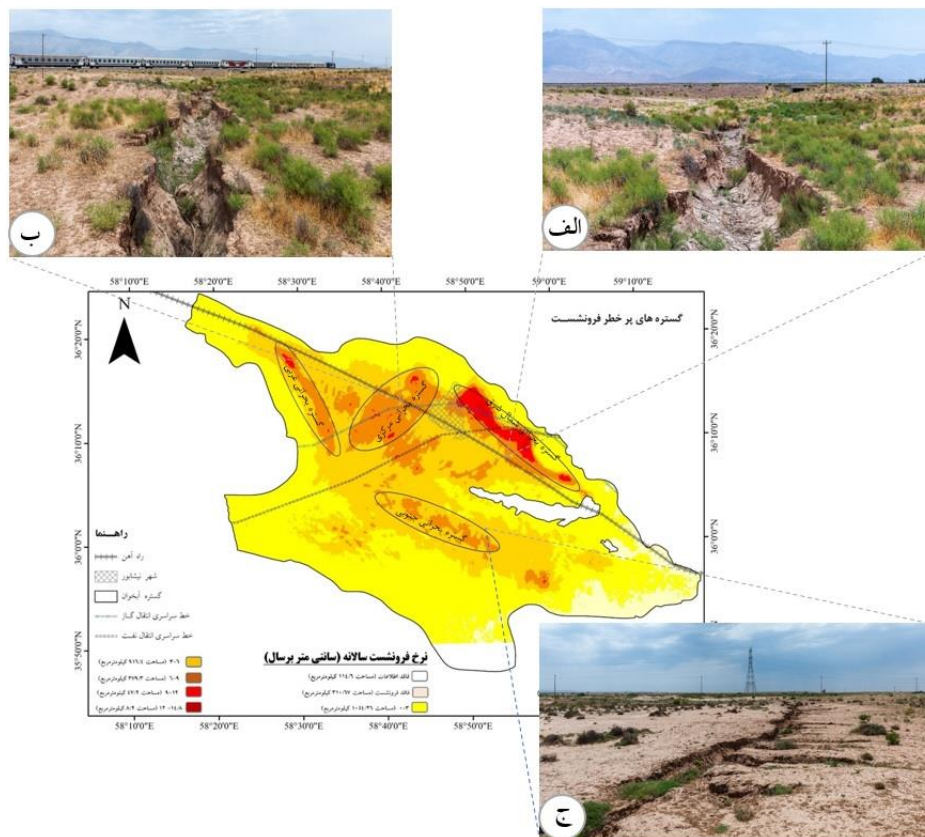
شکل ۱۰: نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست سطح دشت حاصل از تصاویر SAR در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای

Fig. 10: Map of groundwater drawdown and subsidence rate

پیامدهای ژئومورفیک گستره مورد مطالعه

فرونشست ناشی از استخراج منابع آب زیرزمینی می‌تواند خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی بسیاری را در پی داشته باشد. نوع، وسعت و شدت این خسارت‌ها بستگی به میزان فرونشست و منطقه تحت تاثیر دارد. با توجه به اینکه مازاد برداشت سالانه آب از منابع تجدیدناپذیر دشت نیشابور به بیش از میزان جایگزین آن از طریق بارش‌ها می‌رسد، این مسئله می‌تواند سبب تشدید خطر گسترش فرونشست در بخش‌های دیگر دشت شود (Khorasan Razavi Regional Water Company, 2020). از مهم‌ترین پیامدهای فرونشست در گستره دشت نیشابور می‌توان به شکاف‌های طولی ممتد، شکاف‌های منقطع، حفره‌های مدور، چاله‌های وسیع و فروچاله‌ها اشاره کرد. شکاف‌های طولی ممتد در بخش‌های زیادی از حاشیه دشت نیشابور مشاهده می‌شوند که از بهم پیوستن شکاف‌های

منقطع و دارای یک امتداد مشخص به وجود می‌آیند. شکاف‌های منقطع که در مرحله ابتدایی ایجاد شکاف‌های طولی ممتد هستند، پس از بارش باران و وقوع سیلاب شکاف‌های طولی ممتد را به‌وجود می‌آورند (Rokni et al, 2016). حفرات مدور حاصل فرونشینی طبقات زیرین می‌باشند و در بخش‌هایی از حاشیه دشت دیده می‌شوند. علاوه بر این، نشست زمین شکاف‌های بزرگ کششی ایجاد کرده است که طول برخی از آن‌ها به چندین کیلومتر و عمق آن‌ها به بیش از ۱۰ متر می‌رسد. این شکاف‌ها که به آهستگی و در مواردی به‌طور ناگهانی گسترش می‌یابند، گاهی ترمیم‌ناپذیر و مخرب هستند و خسارت‌های عمده‌ای بر تاسیسات سطحی شامل خطوط نفت و گاز، جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و بناها وارد می‌کنند. در شکل ۱۰ بعضی از این عوارض نشان داده شده است.



شکل ۱۱: الف: شکاف‌های طولی ایجاد شده در نزدیکی روستای جیلو، ب: شکاف‌های ایجاد شده در مجاورت خط آهن، ج: یکی از طولانی‌ترین شکاف‌های ایجاد شده حدفاصل جاده روح آباد به نوروز آباد (Ghasemi zarnoushe, 2020).

Fig. 11: A: Cracks created nearby Jilo village, B: cracks created in vicinity of the rail road, C: one of the longest cracks formed between the road from Ruhabad to Nowruzabad (Ghasemi zarnoushe, 2020).

صنایع دشت نیشابور در این گستره قرار دارند. در سه گستره بحرانی دیگر حداکثر نرخ فرونشست ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. نمودارهای میزان افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست سطح دشت نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی بر نشست زمین تأثیر به‌سزایی دارد. در بخش بزرگی از دشت نیشابور میزان افت ۳۰ ساله بیش از ۲۰ متر بوده است و پهنه‌های فرونشست چهارگانه منطبق بر بخش‌هایی از دشت است که افت سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بیش از ۳۰ متر بوده است. دستاوردهای حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که برداشت آب بیش از توان بازیابی آبخوان یکی از علت‌های اصلی فرونشست در سطح دشت است. بنابراین توجه ویژه به مدیریت منابع آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست در گستره دشت ایجاد شکاف‌های طولی ممتد و منقطع، حفره‌های مدور و چاله‌های وسیع بوده‌اند. گسترش این ترک‌ها تا جاده اصلی، خط راه آهن سراسری و خطوط انتقال نفت و گاز ممکن است خطرهای گوناگونی را در پی داشته باشد.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

ایجاد شکاف‌های بی‌شمار، پتانسیل آسیب‌پذیری بسیار بالایی برای زیر ساخت‌های حمل و نقل، خطوط انتقال نیرو، مناطق صنعتی و حتی مسکونی به وجود آورده است. با توجه به نقشه گستره‌های آسیب‌پذیر (شکل ۱۰)، چهارگستره با نرخ بالای فرونشست و پتانسیل آسیب‌پذیری در بخش شمال شرقی، مرکزی، غربی و جنوبی دشت نیشابور وجود دارد و زیرساخت‌های مهم نظیر خطوط انتقال نفت و گاز، خط آهن، خطوط انتقال شهری و بین‌شهری منطبق بر این مناطق است. بدیهی است که در صورت عدم کنترل در آینده نه چندان دور خطرات جانی و مالی را به همراه خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی آنچه که از نتایج مطالعه تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای و روش تداخل‌سنجی ماهواره‌ای در این پژوهش بر می‌آید آن است که در دشت نیشابور چهار گستره بحرانی شمال شرقی، بحرانی مرکزی، بحرانی غربی و بحرانی جنوبی با نرخ بالای فرونشست (بیش از ۹ سانتی‌متر بر سال) وجود دارد. بیشترین میزان فرونشست در شرق شهر نیشابور با حداکثر نرخ فرونشست دشت (۱۴/۸ سانتی‌متر بر سال) رخ داده است که جاده اصلی، خط آهن سراسری مشهد-تهران و بخش عمده

References

- Abedini, M., Ebady, E. and Ghale, E., 2022. Investigation of subsidence of Mahidasht plain of Kermanshah Province using radar interferometry method. *Journal of Geography and Planning*, v. 26(79), p. 207-220 (In Persian).
- Almodaresi, S.A. and Heshmati, Sh., 2015. Modeling the subsidence of the Neyshabur plain by using time series and DINSAR. *Geography and Environmental Planning*, v. 26(1), p. 67-84 (In Persian).
- Aqanabati, S.A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran Publications.
- Arvin, A., Vahabzadeh, G., Mousavi, S.R. and Bakhtyari Kia, M., 2019. Geospatial modeling of land subsidence in the south of the Minab watershed using remote sensing and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, v. 3(10), p. 19-34 (In Persian).
- Babae, S.S., Mousavi, Z. and Roostaei, M., 2016. Time series analysis of SAR images using small baseline subset (SBAS) and persistent scatterer (PS) approaches to determining subsidence rate of Qazvin plain. *Journal of Geomatics Science and Technology*, v. 5(4), p. 95-111 (In Persian).
- Bates, R.L. and Jackson, J.A., 1980. *Glossary of geology* (2nd ed.). American Geological Institute.
- Bouwer, H., 1977. Land subsidence and cracking due to ground-water depletion. *Ground Water*, v. 15, p. 358-364.
- Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A.I., Normand, J.C., Gárfias, J. and Rivera, A., 2016. Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 47, p. 102-111.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M.J., Entezam, I., Mansourian, A. and Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabur, northeast Iran. *GJL*, v. 178, p. 47-56.
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F. and Rocca, F., 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series:

- Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45(5), p. 1142-1153.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. and Zebker, H.A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 94(B7), p. 9183-9191.
- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1975. Geological map of Kashmar area with a scale of 1:250000.
- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1986. Geological map of Mashhad area with a scale of 1:250000.
- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1991. Geological map of Torbat-e Heydarieh area with a scale of 1:250000.
- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1992. Geological map of Sabzevar area with a scale of 1:250000.
- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 2019. Subsidence monitoring studies of 6 critical plains of Razavi Khorasan province - Neyshabur plain subsidence.
- Ghasemi Zarnoushe, R., 2019. Land subsidence of the Neyshabur Plain. ISNA. Retrieved from <https://www.isna.ir>
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., Perissin, D., 2020. Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, v. 181, p. 104194.
- Hosseini Milani, M., 1994. Overdraft of groundwater resources and their influences. The Conference of Groundwater Resources, p. 91-98 (In Persian).
- Hosseinzadeh, S.R., Akbari, E., Javanshiri, M. and Mohammadpour, Z., 2023. Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central plain of Ghaen city). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, v. 11(4), p. 99-125 (In Persian).
- Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z. and Dongqi, W., 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences*, v. 59, p. 269-276.
- Khalifi, P., Esfandiari Novinpour, A., Nadiri, A. and Gharekhani, M., 2017. Assessment of land subsidence in the Ardabil plain using GIS. Paper presented at the Second National Conference on Hydrology of Iran, Shahrekord, Iran (In Persian).
- Khorasan Razavi Regional Water Company, 2015. Feasibility report of the prohibition of Neyshabur plain.
- Khorasan Razavi Regional Water Company, 2020. Feasibility report of the prohibition of Neyshabur plain.
- Maghsoudi, Y., Amani, R. and Ahmadi, H., 2019. A study of land subsidence in west of Tehran using Sentinel-1 images and permanent scatterers interferometry. *Iran-Water Resources Research*, v. 15(1), p. 299-313 (In Persian).
- Mehrabi, A., 2019. Identification of the new and active buried salt dome evidences in the Zagros region using interferometry method of SENTINEL-1 and ASAR radar images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, v. 4(9), p. 90-101 (In Persian).
- Mehrabi, A., Karimi, S. and Khalesi, M., 2023. Spatial analysis of Jiroft plain subsidence using the coherence pixel technique (CPT). *Geography and Environmental Planning*, v. 34(1), p. 99-116 (In Persian).
- Moafi, H. and Rahnama, M.B., 2015. Groundwater study and land subsidence investigation in Rafsanjan plain using geographic information system and remote sensing. The First Regional Conference on Exploitation of Karun and Zayandeh-Roud Resources, Shahrekord (In Persian).
- Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., Brisco, B. and Motagh, M., 2018. Wetland water level monitoring using interferometric synthetic aperture radar (InSAR): A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 44(4), p. 247-262.
- Morsali, M., 2017. Land subsidence due to the drop in the groundwater level in the north of Varamin Plain (Master's thesis). Department of Geology-Hydrology, Shahid Beheshti University, Tehran (In Persian).
- Poland, J.F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal (323 p.). UNESCO.
- Rajabi, M., Roustaie, S. and Mataee, S., 2024. Risk assessment of land subsidence in Kermanshah plain using remote sensing and geographic information system. *Journal of Geography and Planning*, v. 28(88), p. 308-328 (In Persian).
- Ranjbar Barough, Z. and Fathallahzadeh, M., 2022. Investigation of land subsidence, using time series of radar images and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj metropolis). *Quantitative Geomorphological Research*, v. 10(4), p. 138-155 (In Persian).
- Rokni, J., Hosseinzadeh, R., Lashkaripour, G.R. and Velayati, S.A., 2016. Survey of land subsidence, perspective and geomorphology developments in the denser plains (Neyshabur plain). *Arid Regions Geographic Studies*, v. 7(24), p. 21-38 (In Persian).
- Rott, H. and Nagler, T., 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, v. 37(4), p. 710-719
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R. and Dehghani, M., 2012. Investigation of land subsidence in southern Mahyar plain in Isfahan province, Iran. *International Journal of Emerging*

- Technology and Advanced Engineering, v. 2(9), p. 389-394 (In Persian).
- Shafiei, N., Mokhtari, L., Amir Ahmadi, A. and Zandi, R., 2020. Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method. Quantitative Geomorphological Research, v. 8(4), p. 93-111 (In Persian).
- Tabatabaei Aghda, S.T. and Mohseni Nasab, H., 2014. Land subsidence in Rafsanjan plain due to the drop in groundwater level. The Second National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Qom University of Technology (In Persian).
- Tourani, M., Agh-Atabai, M. and Roostaei, M., 2018. Study of subsidence in Gorgan using InSAR method. Geographical Planning of Space, v. 8(27), p. 117-128 (In Persian).
- Zhang, Y., Wu, H.A., Kang, Y. and Zhu, C., 2016. Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1992 to 2014 revealed by multiple SAR stacks. Remote Sensing, v. 8(8), 675 p.