Research Paper

Investigation of effective factors in the phenomenon of land subsidence in the western area of Tehran province

Seyed Hamidreza Hosseini[1] , Seyed Habib Mousavi Jahormi[2*], Hossein Mohammad Vali Samani[3]

1.Ph.D. Student in Civil Engineering - Water Resources Management Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University,Shahr-e- Qods Branch, Tehran , Iran.
2*.Professor, Faculty of civil engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran,iran
3.Professor, Faculty of civil engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran,Iran.

Received: 2022/04/05
Revised: 2022/02/19
Accepted: 2022/02/14

Use your device to scan and read the article online

DOI:
10.30495/wej.2023.29602.2348

Keywords:
Earth subsidence, poroelasticity, aquifer, earth material, fault.

Abstract

Introduction: The phenomenon of subsidence is one of the geological hazards, which is mostly created and aggravated by human and natural activities such as long-term extraction of underground sources of water, oil and gas or the extraction of minerals from mines and the dissolution of subsurface formations and the collapse of karst. turns

Shahryar plain is one of the forbidden and critical plains of the country, which is also active in terms of industry and agriculture, this plain has been affected by land subsidence for the past several years. In this research, in order to analyze, investigate and predict the subsidence rate, the poroelasticity flow module was used in COMSOL software, which can determine the changes in the thickness of the soil sedimentary layer due to groundwater loss and also in the coming years. He nosed.

Methods: In this research, by coupling Darcy's law and changing the soil skeleton by COMSOL software, it was tried to calculate the subsidence in 22 selected points of the study area during the years 2003-2019 and after verifying and obtaining a high agreement with real data and images. Radar interferometry estimated the amount of subsidence until 2031.

Findings: The general result of finite element numerical modeling showed that the subsidence rate of the area during the year 2031 was estimated at 12.8 cm and at critical points 20.98 cm. Therefore, the maximum settlement caused by the drop in the underground water level in the early years appeared at a higher rate in the upper layer of the aquifer, which over time after filling the voids between the soil particles and due to the hydraulic connection between the layers It is observed at a slower rate than in the past in the upper layers of the aquifer surface and the ground surface. Therefore, changes in the groundwater level, soil type and distance from the fault have also been among the factors affecting the subsidence pattern and rate.

Citation: Hosseini S.H.R, Mousavi Jahromi S.H, Samani H.M.V. , Investigation of effective factors in the phenomenon of land subsidence in the western area of Tehran province Water Resources Engineering Journal. 2023; 16 (58): 69- 84

***Corresponding author:** Seyed Habib Mousavi Jahormi
Address: Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Islamic Azad University, Quds City Branch, Tehran, Iran.
Tell: +989127126513
Email: H-Mousavi@srbiau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The phenomenon of land subsidence includes the collapse or subsidence of the earth's surface, which may have a small horizontal displacement vector. Land subsidence is not limited to one point and one area in terms of the extent and width of the affected areas. In general, land subsidence is caused by major and identified reasons such as sediment accumulation due to the extraction of fluids and underground reserves, dissolution of subsurface formations and karst collapse, drainage of clay soils, land use change, loading of engineering structures and deformation of the earth's structure. Also, this phenomenon causes issues and problems such as uneven change in the height and slope of rivers and waterways and water transfer structures, breakage or protrusion of well wall pipes as a result of compressive stresses caused by From the compression of aquifers and disruption in the exploitation of underground water reservoirs and the sanding of wells, the irreversible reduction of all or part of the underground water reservoir as a result of the loss or reduction of the useful porosity of sediments, the reduction of productivity or the creation of destruction. It is found in structures.

Materials and Methods

Tehran-Shahriar plain is a part of Tehran-Karaj plain, which is located in Tehran province. This plain has a slope from north to south. which from the north to the southern slopes of the Alborz mountain range and from the south to the Arad and Fashafoyeh mountains, from the east to the heights of Three Bases, Quchak, Bibi Shahrbanu and from the west to the eastern range of the Karaj plain. That is, it ends with the Wordvard and Rabat Karim. The cities of Tehran, Islamshahr, Rabat Karim, Ray, Shahryar, Mallard and Shahr-Quds are located in this plain. Its area is about 1720 square kilometers. The area studied in this research is the central part of this plain, which is marked with yellow color in the figure. This area has an area of 307.2 square kilometers and is located between 39°,50' to 39°,30' east longitude and 50,°45' to 50°,15' north latitude.

In order to implement the model, the geological, geotechnical and hydrological data of the area were entered separately in the relevant part of the software. Then, three separate layers including the surface, middle and bottom layers were defined for the range, where the surface layer is free and the bottom layer is non-pervious in such a way that no seepage occurs from it. The middle layer is also largely non-permeable, which makes the upper table have a fixed head. Based on these data, land subsidence was estimated from 2012 to 2018 at 22 selected points (corresponding to the location of piezometers). Then the output of COMSOL software is entered into GIS software, based on the lowest and highest numerical values of subsidence, classification and related maps.
was drawn

Discussion

The results of this research showed that parameters such as changes in the aquifer level, soil type and distance from the fault have the greatest effect on land subsidence.

Conclusion

In this research, with the help of COMSOL software, the subsidence in the area is calculated and after verifying and obtaining a high agreement with real data and radar interferometric images, the amount of subsidence is estimated until the year 2031. The results showed that the subsidence of the land in the study area will be about 12.8 cm per year on average and in the critical points of the plain such as Shams-Abad and Ali-Abad Mokhtarani will be 20.98 and 20.34 cm, respectively. In other words, from 2003 to 2031, the cumulative subsidence in this area will reach 158 cm, and in the critical areas of Shams-Abad and Ali-Abad Mokhtarani, cumulative subsidence will be 251.7 and 244.1 cm, respectively.

Also, the parameters affecting subsidence and its changes have been investigated and analyzed. According to the results, the most important parameters affecting the subsidence of this area are the changes in

the aquifer level, the type of land and the distance from the fault. In the changes of the aquifer level, the increase or decrease of the water level, the range of changes and the time period of these changes are among the factors affecting the subsidence changes. The presence of fine-grained and clay layers, especially when they have a high thickness, is also an effective factor related to the parameter of the soil layers. Also, the closer we get to the faults, the more likely subsidence occurs. Of course, it seems that the changes in the level of the aquifer have a more direct and clear connection with the changes in the subsidence of the land in this area.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Seyed Hamidreza Hosseini , Seyed Habib Mousavi Jahormi

Methodology and data analysis: Seyed Hamidreza Hosseini , Seyed Habib Mousavi Jahormi, Hossein Mohammad Vali Samani

Supervision and final writing: Seyed Habib Mousavi Jahormi, Seyed Hamidreza Hosseini

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی عوامل موثر در پدیده فرونشست زمین در گستره غرب استان تهران

سیدحمیدرضاحسینی[۱]، سیدحبیب موسوی جهرمی[۲*]، حسین محمد ولی سامانی[۳]
۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران- ایران.
۲*. استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی شهر قدس، تهران- ایران.
۳. استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی شهر قدس، تهران- ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵
تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI: 10.30495/wej.2023.29602.2348

واژه‌های کلیدی:
نشست زمین، poroelasticity ، آبخوان، جنس زمین، گسل.

چکیده

مقدمه: پدیده فرونشست یکی از مخاطرات زمین‌شناسی می‌باشد، که بیشتر در اثر فعالیت‌های انسانی و طبیعی همچون برداشت درازمدت از منابع زیرزمینی آب، نفت و گاز یا استخراج مواد معدنی از معادن و انحلال تشکیلات زیر سطحی و ریزش کارست ایجاد و تشدید می‌گردد.
دشت شهریار یکی از دشت‌های ممنوعه و بحرانی کشور است که از نظر صنعتی و کشاورزی نیز فعال می‌باشد، این دشت طی چندین سال گذشته تحت تاثیر پدیده فرونشست زمین بوده است. در این پژوهش به منظور تحلیل، بررسی و پیش‌بینی نرخ فرونشست، از ماژول poroelasticity flow در نرم‌افزار COMSOL استفاده گردید، که توسط آن می‌توان تغییرات ضخامت لایه رسوبی خاک را در اثر افت آب زیرزمینی تعیین و همچنین در سنوات آتی پیش‌بینی نمود.

روش: جهت اجرای مدل، داده‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و آب‌شناسی ناحیه به تفکیک در قسمت مربوطه نرم‌افزار وارد گردید. سپس سه لایه مجزا شامل لایه های سطح، میانی و کف برای محدوده تعریف گردید که لایه سطح بصورت آزاد و لایه کف بصورت ناتروا می‌باشد بگونه‌ای که هیچ‌گونه تراوشی از آن صورت نمی-پذیرد. لایه میانی نیز تا حدود زیادی ناتروا بوده که باعث می‌شود سفره بالایی دارای هد ثابت باشد.

یافته‌ها: در این پژوهش سعی شده با کوپل نمودن قانون دارسی و تغییر اسکلت خاک توسط نرم-افزار COMSOL، فرونشست در ۲۲ نقطه منتخب منطقه مطالعاتی را طی سنوات ۹۸-۱۳۸۲ محاسبه و پس از صحت سنجی و کسب تطابق بالا با داده‌های واقعی و تصاویر تداخل سنجی راداری ، میزان فرونشست تا سال ۱۴۱۰ را تخمین زد.

نتیجه‌گیری: نتیجه کلی مدل‌سازی عددی المان محدود نشان داد: که نرخ فرونشست محدوده در طول سال ۱۴۱۰ به میزان ۱۲/۸ سانتی‌متر و در نقاط بحرانی ۲۰/۹۸ سانتی‌متر تخمین زده شد. بنابراین حداکثر نشست ناشی از افت سطح آب‌زیرزمینی در سال‌های ابتدایی با نرخ بالاتر در لایه بالایی سفره آبخوان ظاهر شده که به مرور زمان پس از پر شدن خلل و فرج بین ذرات خاک و با توجه به ارتباط هیدرولیکی بین لایه‌ها با سرعت کمتری نسبت به گذشته در لایه‌های فوقانی سطح آبخوان و سطح زمین مشاهده می‌گردد. بنابراین تغییرات تراز آب‌زیرزمینی، جنس زمین و فاصله از گسل نیز از جمله عوامل موثر بر الگوی و نرخ فرونشست بوده‌اند.

* **نویسنده مسئول:** سیدحبیب موسوی جهرمی
نشانی: گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس ، تهران، ایران.
تلفن: ۰۹۱۲۷۱۲۶۵۱۳
پست الکترونیکی: H-Mousavi@srbiau.ac.ir

مقدمه

پدیده فرونشست زمین شامل فرو ریزش یا نشست به سمت پایین سطح زمین بوده که امکان دارد بردار جابجایی افقی اندکی نیز داشته باشد(۱۹). نشست زمین از نظر میزان و پهنای مناطق تحت تاثیر خود، محدود به نقطه و یک منطقه نمی باشد. به طور کلی نشست زمین ناشی از دلایل عمده ای و شناسایی شده ای هم چون تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی، انحلال تشکیلات زیرسطحی و ریزش کارست، زهکشی خاک های رسی، تغییر کاربری زمین، بارگذاری سازه های مهندسی و دگرشکلی زمین ساختی می باشد(۱۰). همچنین این پدیده باعث بروز مسائل و مشکلاتی از قبیل تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکستگی و یا بیرون‌زدگی لوله جدار چاه‌ها در نتیجه تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها و ایجاد اختلال در بهره-برداری از منابع آب زیرزمینی و ماسه‌دهی چاه‌ها، کاهش برگشت ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید رسوبات، کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در سازه‌ها می‌گردد(۳). یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد این پدیده نقصان سطح تراز آب زیرزمینی می‌باشد(۱۳). بنابراین بروز خشک‌سالی‌های متمادی و اضافه برداشت هایی دراز مدت از آبخوان می‌تواند باعث پایین رفتن سطح ایستابی و ایجاد فرونشست گردد(۹). رفتار زمین در مقابل این کاهش سطح ایستابی می‌تواند بسیار پیچیده و دارای شرایط خاص باشد به‌نحویکه که مدل‌سازی رفتاری آن نیازمند استفاده از روش‌های دقیق مدل‌سازی ریاضی و عددی می‌باشد(۱۴). به‌طور خلاصه می‌توان اشاره کرد که اگر نرخ برداشت منابع آب زیرمینی زیاد باشد ولی تغییرات جابه‌جایی سطح زمین کم و ناچیز باشد می‌توان رفتار زمین را از لحاظ ژئومکانیکی الاستیک فرض کرد، به‌عبارتی تغییر شکل‌ها برگشت پذیر می‌باشند. اما در صورتی که این نرخ تغییر شکل زمین زیاد باشد از محدوده رفتار الاستیک خارج شده و تغییر شکل‌ها به‌طور کامل برگشت پذیر نیستند. تعیین نرخ فرونشست که ناشی از کوپل نمودن دو ماژول مکانیک سیالات و جامدات است، طبق نظریه poroelasticity، Biot قابل محاسبه است(۱).

در حال حاضر این پدیده یک مشکل جهانی بروز نموده است که در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک نمود بیشتری پیدا می‌کند(۶). بسیاری از شهرهای بزرگ جهان واقع در این مناطق به‌نحوی با این پدیده درگیر می‌باشند(۷). کشور عزیزمان ایران نیز از این قاعده مستثناء نبوده، در مناطق شهری مانند تهران، ورامین، رفسنجان، یزد، کاشان و کاشمر و هم در دشت هایی که بیش از حد مجاز از سفره های آب زیرزمینی برداشت می گردد این پدیده نامیمون به وضوح مشاهده می شود. در شهرهای استان تهران که از نظر صنعتی و کشاورزی از مناطق فعال کشورمان می‌باشد این پدیده از سال ۱۳۷۰ به طور مستمر رویت شده است.

قدیمی‌ترین کارگروه فرونشست در سازمان یونسکو در سال ۱۹۰۰ میلادی تشکیل گردید. اساس مطالعات آن بررسی‌های تفضیلی بر روی ۴۲ مورد فرونشست در ۱۵ کشور جهان بوده است. از حدود سال ۱۹۶۵، یونسکو اولین برنامه جهانی خود را برای چرخه‌های آب شناختی تحت عنوان دهه جهانی آب‌شناسی آغاز نمود که در سال‌های بعد مطالعه فرونشست‌ها به یکی از موضوعات اصلی آن تبدیل گشت. در آوریل ۱۹۷۵ کارگروهی در پاریس شکل گرفت که کار آن بررسی ارتباط این پدیده با تغییرات آب زیرزمینی بود.(۴) تمامی بررسی‌های در کشورهای جهان نشان داده است کنترل شدید مصرف آب و تغییر در الگوی مصرف آب می تواند منجر به توقف فرونشست زمین گردد(۱۲).

در ایران بررسی و مطالعه فرونشست، پیشینه حدود چهل ساله دارد(۱۴). در سال‌های نخستین بر اساس مشاهدات محلی و بریدگی-های جداره چاه فرونشست گزارش شده است. اولین بررسی‌های علمی فرونشست در دشت رفسنجان صورت گرفته است که فرونشست شدیدی داشته است. پس از آن در سایر دشت‌های ایران نظیر اردبیل، هشتگرد، تهران، یزد، اردکان، کاشمر و مشهد نیز به دنبال مشاهده فرونشست، بررسی و مطالعات آن انجام شده است(۱۱). طبق مطالعات انجام شده، در همه فرونشست‌هایی که در ایران رخ می‌دهد، استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل فرونشست است(۱۳). از جمله مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته است، مدل‌سازی فرونشست دشت ایذه را با استفاده از کد ریاضی MODFLOW توسط رجبی و همکاران بوده است. در این مطالعه بارش سالانه حوزه در دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف با ۷/۲، ۱۸/۷۱ و ۲۳/۷ درصد کاهش مواجه بوده که به‌صورت کاهش تغذیه سطحی آبخوان نمود پیدا می‌نماید. جریان آب زیرزمینی هم واسنجی و تحلیل حساسیت شد. نتیجه حاکی از آن است که مدل ریاضی استفاده شده جهت شبیه‌سازی آبخوان ایذه دارای خطای ۱۶ درصد می‌باشد. بررسی تغییرات ساختار زمین نشان داده است در طول بلند مدت ۲۰ ساله سطح آبخوان حداکثر تا ۱/۵ و حداقل ۰/۹ متر کاهش می‌یابد(۱۷).

دهقان فاروجی و همکارانش در مطالعه‌ای با عنوان بررسی و تحلیل اثرات اجرای طرح شبکه آب جمع آوری فاضلاب بر منابع آب و نشست زمین در شهر تهران، که با همکاری شرکت آب منطقه ای تهران انجام یافته است، حاکی از آنست که در سال های اخیر نرخ فرونشست در مناطق ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ شهرداری تهران افزایش یافته و در برخی مناطق نیز گسترش پهنه ی فرونشست به سمت مناطق ۱۰ و ۲۰ شهرداری مشاهده می‌شود. همچنین شهرهای اسلامشهر، شهریار، چهاردانگه، نسیم‌شهر، صباشهر و کهریزک تحت تاثیر فرونشست دشت تهران قرار دارند. بیشینه مقدار فرونشست در برخی از مناطق دشت تهران، ۳۶ سانتی‌متر در سال را نشان می-دهد(۸).

مطالعاتی نیز در دشت نوق- بهرمان توسط شریفی‌کیا به روش آزمایشگاهی- پیمایشی انجام شده است. در این مطالعه سری زمانی داده‌های راداری دو ماهواره اروپایی و ژاپنی توسط نرم‌افزار بررسی شده‌اند و در نهایت نتایج حاصله با عملیات پیمایشی و میدانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت بررسی علل فرونشست، زمین‌شناسی سطحی و تحت الارضی،کاربری اراضی، هیدرولوژی و هیدروژلوژی

مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد به ازای ۲/۳ متر افت آب زیرزمینی در محدوده، ۱ سانتیمتر فرونشست حاصل شده است که با توجه به تغییر پذیری و دامنه نشست، برداشت آب زیرزمینی به عنوان عامل ایجابی و همچنین بارش به‌عنوان عامل بهبود دهنده بوده است(۱۸).

دوک و همکاران، در شبیه‌سازی سه‌بعدی فرونشست در سیستم آبخوان ناهمگن در شهر هووی تایوان نشان داد توزیع مواد هیدروژئولوژیکی تاثیر زیادی بر جریان آب زیرزمینی و نشست دارد (۱۵).

به‌منظور پیش‌بینی فرآیند فرونشست و کمی کردن آن روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که بهترین آنها روش‌های عددی هستند. (۱۳) یکی از نرم‌افزارهایی که به روش‌های عددی قادر به پیش‌بینی فرونشست می‌باشد، نرم‌افزار COMSOL است. این نرم‌افزار دارای ماژول‌های مختلفی برای مدل‌سازی پدیده‌های مختلف چند فیزیکی می‌باشد که ماژول subsurface flow در تلفیق با ماژول solid meckanics تحت‌عنوان ماژول poroelasticity flow در مدل‌سازی فرونشست زمین می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. از عبارت poroelasticity برای جریان سیال و تغییر شکل‌های ایجاد شده در محیط متخلخل استفاده می‌شود. بنابراین مدل‌سازی poroelasticity در نرم‌افزار COMSOL نیازمند کوپل کردن دو قانون می‌باشد، قانون دارسی که بیانگر حرکت سیال در محیط متخلخل است و قانون جا به‌جایی و تغییر اسکلت خاک است(۲).

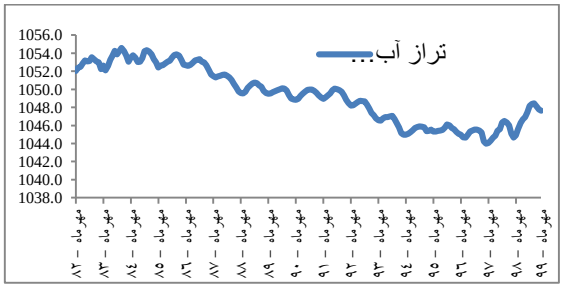
مواد و روش‌ها

دشت تهران- شهریار بخش از دشت تهران- کرج است که در استان تهران واقع می‌باشد. این دشت دارای شیبی از سمت شمال به‌سمت جنوب می‌باشد. که از سمت شمال به سلسله دامنه های جنوبی رشته کوه‌های البرز و از سمت جنوب به کوه‌های آراد و فشافویه، از سمت شرق به ارتفاعات سه پایه، قوچک، بی‌بی شهربانو و از سمت غرب به محدوده خاوری دشت کرج، یعنی به وردآورد و رباط کریم ختم می‌گردد. شهرهای تهران، اسلامشهر، رباط کریم، ری، شهریار، ملارد و شهرقدس در این دشت واقع می‌باشند. مساحت آن حدود ۱۷۲۰ کیلومتر مربع می‌باشد که در شکل۱ با رنگ سبز نشان داده شده است محدوده مورد مطالعه در این پژوهش قسمت مرکزی این دشت می‌باشد که با رنگ زرد در شکل مشخص شده است. این محدوده به مساحت ۳۰۷/۲ کیلومتر مربع در حد فاصل ’ ۵۰ و °۳۹ تا ’۳۰و °۳۹ طول شرقی و ’۴۵ و °۵۰ تا ’۱۵ و °۵۰ عرض شمالی واقع شده است.

شکل ۱- نمایی از دشت تهران- شهریار و محدوده مورد مطالعه

براساس آخرین آماربرداری سراسری سال ۱۳۹۹ وزارت نیرو و طبق شکل۹ تعداد کل چاه‌های موجود آب مورد بهره‌برداری شامل چاه‌های مجاز و غیرمجاز در محدوده مورد مطالعه حدود ۳۲۵۰ حلقه با تخلیه حجم آب سالانه حدود ۱۵۰ میلیون متر مکعب می‌باشد(۲۱).

میانگین بارش و تبخیر سالانه دشت به ترتیب حدود ۲۰۰ و ۲۵۰۰ میلی‌متر است. سطح آب زیرزمینی بنابر گزارش شرکت آب منطقه‌ای تهران، بر اساس برداشت ماهانه ۱۳۵ پیزومتر چاه مشاهده‌اتی از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در نمودار هیدروگراف شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲- هیدروگراف آبخوان تهران-شهریار (شرکت آب منطقه ای تهران – ۱۳۹۹)

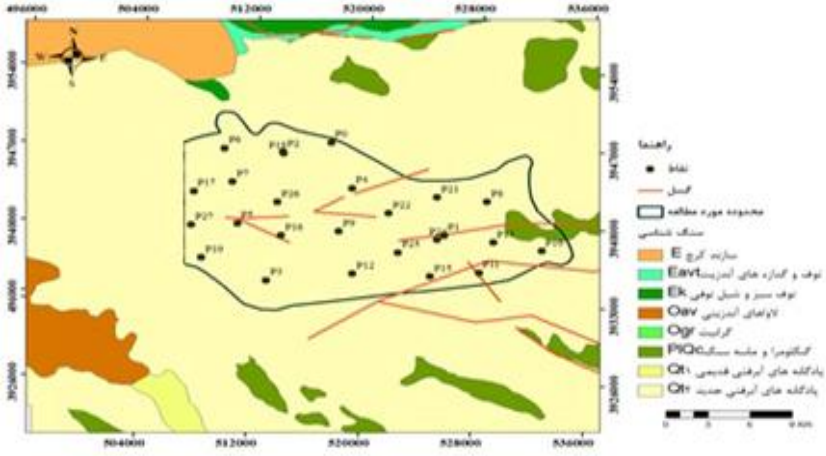
طبق شکل۲ متوسط تراز آب‌زیرزمینی از طی سال ۱۳۸۲ لغایت ۱۳۹۹، سالیانه به میزان ۳۴ سانتی‌متر سیر نزولی داشته است(۲۱).

یکی از بخش‌های مهم و اصلی شناسایی روند فرونشست زمین در یک منطقه مطالعاتی مطالعه و بررسی لایه‌های زیرسطحی زمین

بر پایه داده‌های حفاری ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در اعماق زمین می‌باشد. در این مطالعه از نتایج منتج شده از مراحل آزمایشگاهی و مدل‌های نمونه‌برداری شده لایه‌های مختلف زمین، که توسط تعدادی گمانه ژئوتکنیکی در اعماق ۴۲ تا ۱۰۰ متری واقع در دشت تهران- شهریار انجام گردیده که منطبق با ناحیه مطالعاتی می‌باشد استفاده گردیده است.

واحدهای آب زمین‌شناسی آبخوان دشت تهران- شهریار به ۳ واحد آبخوان و ۳ واحد رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم تقسیم می‌شود. سه واحد آبخوان به‌طور عمده از ماسه‌های سیلتی تا ماسه‌های دانه ریز به همراه شن تشکیل شده‌اند. واحد آبخوان ۱ در حال حاضر خشک می‌باشد و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی از آبخوان‌های ۲ و ۳ انجام می‌پذیرد. ستبرای این واحدها (به‌ویژه واحدهای رسی ریزدانه رسی) متغیرند. پارامترهای ژئوتکنیکی مانند پلاستیسیته رس‌های ریزدانه نیز از باختر به سوی خاور افزایش می‌یابند(۲۰).

مشخصات زمین‌شناسی محدوده و رشته گسل‌ها نیز مطابق شکل۳ در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۳- نقشه مشخصات زمین شناسی و گسل‌های محدوده

تاکنون محیط متخلخل اشباع، به‌شکل ترکیبی از فازهای جداگانه سیال و جامد و توسط معادلات حاکم جداگانه‌ی مدل‌سازی گردیده است. تئوری ریاضی تحکیم، توضیح دهنده رفتار وابسته به زمان کاهش فشار آب حفره‌ای در سیال واقع در منافذ، و تغییر شکل اسکلت جامد خاک است. کارل‌ترازقی در سال ۱۹۲۳ این تئوری را در مقیاس یک بعدی براساس اتخاذ اصول تنش موثر بیان کرده است. بعدها معادله حاکم بر محیط متخلخل اشباع با در نظر گرفتن تعامل جامد و سیال در سال ۱۹۶۱ توسط بایوت ارائه شد(۱). که بعد از آن او معادلات عمومی پاسخ محیط اشباع متخلخل را در محیطی با رفتار کشسان و تحت بارگذاری دینامیکی توسعه داد. پس از آن تویس‌دل در سال ۱۹۶۲ (تئوری ترکیبی) را برای فرمول‌بندی کردن این معادلات کوپل شده معرفی کرد. متعاقباً این فرمول‌بندی برای در نظر گرفتن رفتار تغییر شکل غیر خطی بسط داده شد بنابراین با وابستگی به حرکت سیال موجود در منافذ و اسکلت جامد و نیز نفوذپذیری محیط متخلخل استخراج فرمول بندی‌های متفاوت امکان‌پذیر گردید(۳).

مدل ریاضی Biot برای استفاده در محیط متخلخل، به‌شکل ترکیبی از فازهای سیال و جامد کاربرد دارد و توسط معادلات حاکم جداگانه‌ی مدل سازی می‌گردد. تئوری ریاضی تحکیم، توضیح دهنده رفتار وابسته به زمان کاهش فشار آب حفره‌ای در سیال واقع در منافذ، و تغییر شکل اسکلت جامد خاک است. کارل‌ترازقی در سال ۱۹۲۳ این تئوری را در مقیاس یک بعدی براساس اتخاذ اصول تنش موثر بیان کرده است. بعدها معادله حاکم بر محیط متخلخل اشباع با در نظر گرفتن تعامل جامد و سیال در سال ۱۹۶۱ توسط بایوت ارائه شد که بعد از آن او معادلات عمومی پاسخ محیط اشباع متخلخل را در محیطی با رفتار کشسان و تحت بارگذاری دینامیکی توسعه داد. این نظریه برای محاسبه فشار آب منفذی که بیانگر حرکت سیال و جابجایی و تغییر شکل اسکلت خاک در حالت اشباع کاربرد دارد.

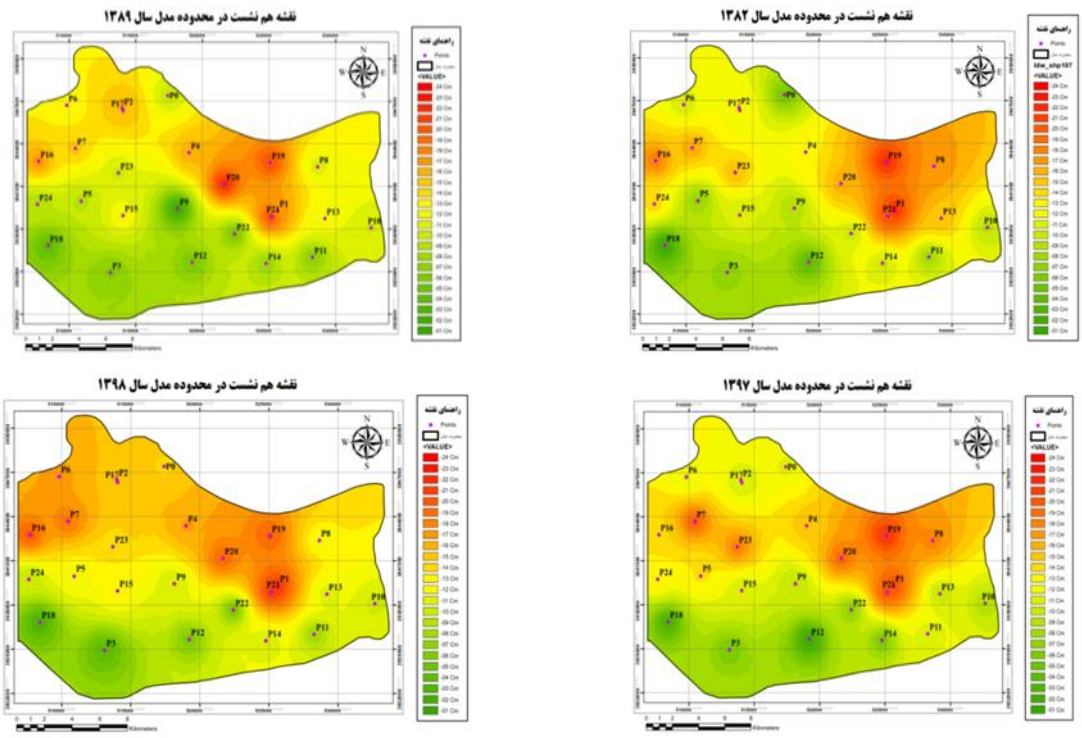
با فرض سه بعدی بودن مسئله و اینکه کرنش حجمی در ماتریکس خاک به وسیله ε نشان داده می‌شود، معادله جریان در یک محیط متخلخل تغییر شکل‌پذیر با فرض قابل تراکم پذیر بودن سیال توسط معادله ۱ بیان می‌شود(۳).

$$\frac{1}{\gamma}\vec{\nabla}.(K\vec{\nabla}P)=[n\beta+C_{gr}(1-n)]\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+Q,(x,y,z)\in\Omega;t\geq 0 \qquad (۱)$$

$$\vec{\nabla}\ is\ gradient\ operator\left(\nabla=\left(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y},\frac{\partial}{\partial z}\right)\right)$$

$$\varepsilon=\vec{\nabla}.\vec{d}=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z} \qquad (۲)$$

در معادله ۱، t زمان، γ و β به ترتیب معرف وزن مخصوص و مقدار تراکم پذیری آب K نشان دهند تانسور هدایت‌پذیری هیدرولیکی، p فشارهیدرولیکی، n مقدار تخلخل، C_{gr} مقدار تراکم پذیری ذرات خاک و سنگ، ε مقدار کرنش، Q نشان دهنده ترم پمپاژ آب و Ω معرف فضای هندسی که معادله دیفرانسیل روی آن حل



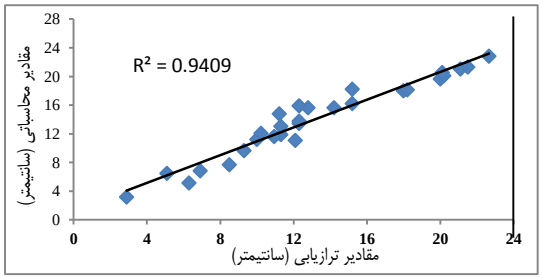
شکل٤- نقشه فرونشست سالهای ۸۲، ۸۹، ۹۷، ۱۳۸۹

می‌شود، می‌باشد. ε توسط معادله ۲ محاسبه می‌شود که در آن $\vec{d}$ بردار جابه جایی و u, v, w به ترتیب مولفه‌های جابه‌جایی در جهات X, Y, Z می‌باشد. معادله ۱ را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف عددی و با اعمال شرایط مرزی مناسب در مورد جریان آب زیرزمینی و با توجه به شرایط زمین‌شناسی موجود حل کرد. از میان روش‌های مختلف، روش المان محدود تناسب بیشتری با تحقیق حاضر دارد چرا که نسبت به روش تفاضل محدود از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است. نرم افزار COMSOL مورد استفاده در این پژوهش براساس روش المان محدود عمل می‌کند. همچنین قابلیت اعمال شرایط پیچیده زمین‌شناسی را نیز دارد.

روش کار

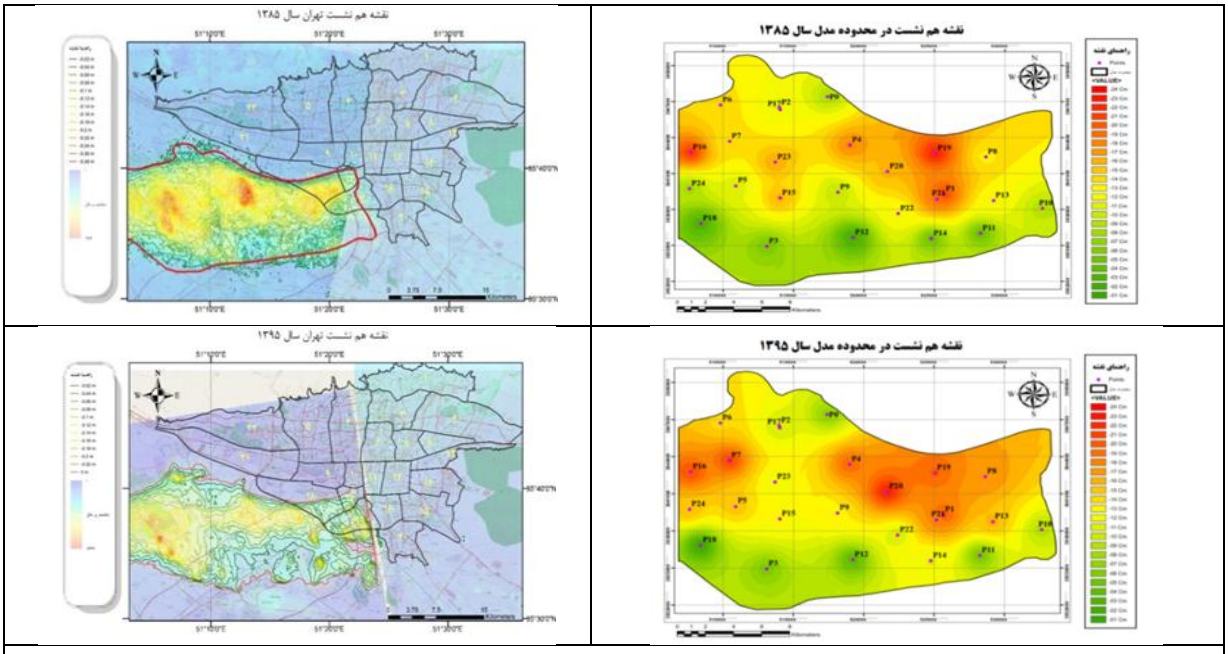
جهت اجرای مدل داده‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و آب‌شناسی ناحیه به تفکیک در قسمت مربوطه نرم‌افزار وارد گردید. سپس سه لایه مجزا شامل لایه های سطح، میانی و کف برای محدوده تعریف گردید که لایه سطح بصورت آزاد و لایه کف بصورت ناتروا می‌باشد بگونه‌ای که هیچ‌گونه تراوشی از آن صورت نمی‌پذیرد. لایه میانی نیز تا حدود زیادی ناتروا بوده که باعث می‌شود سفره بالایی دارای هد ثابت باشد. بر اساس این داده‌ها فرونشست زمین از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در ۲۲ نقطه انتخابی (منطبق بر محل پیزومترها) تخمین زده شد. سپس خروجی نرم افزار COMSOL وارد نرم‌افزار GIS شده، براساس کمترین و بیشترین مقدار عددی فرونشست، دسته بندی و نقشه‌های آن رسم شد. شکل۴ نقشه فرونشست مربوط به سنوات ۸۲، ۸۹، ۹۷ و ۱۳۹۸ را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

روش معمول در ارائه نتایج واسنجی مدل، نمودار پراکندگی بین داده-های است(۱۷). داده‌های خروجی نرم‌افزار در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در ۲۲ نقطه انتخابی (منطبق بر محل پیزومترها) و برداشت-های ترازیابی سالانه نقاط متناظر آنرا در شکل۵ نشان داده شده است. بر این اساس ضریب تعیین برابر ۰/۹۴ است. که نشان دهنده تطابق بالا و همبستگی بین مقادیر داده‌های حاصل از نرم‌افزار با داده‌های ترازیابی است.



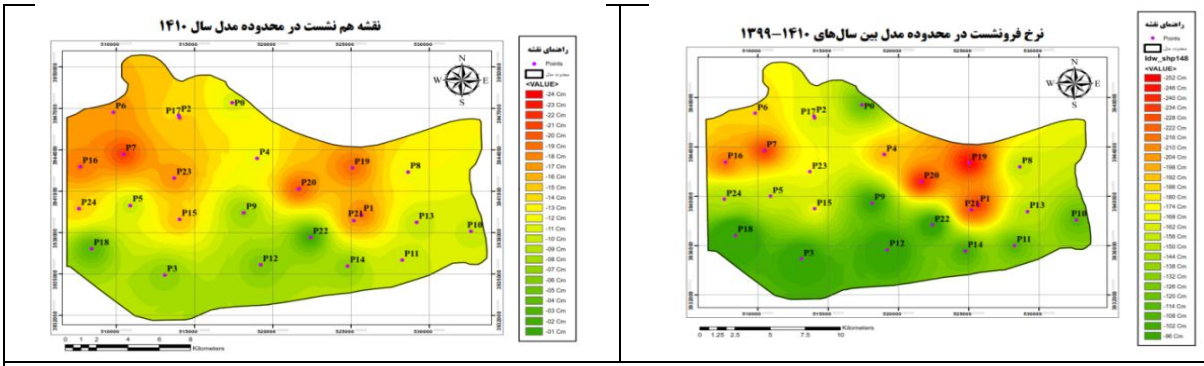
شکل۵- نمودار برازش مقادیر مشاهداتی بر اساس مقادیر محاسباتی فرونشست

مجددا جهت صحت‌سنجی، تصاویر تداخل‌سنجی راداری Sentinel 1 محدوده در سال‌های سال ۹۵-۱۳۸۲، در شکل۷ ، با نقشه‌های متناظر هم‌نشست خروجی نرم‌افزار COMSOL در شکل۶ مقایسه گردید. در این تصاویر و نقشه‌ها پهنه‌بندی فرونشست و مقادیر آن که به‌صورت منحنی‌های هم‌نشست نشان داده شده است از مقایسه آنها تطابق قابل قبولی از نظر پهنه‌ی فرونشست بین نقشه‌ها ملاحظه - گردید.



شکل ٦- نقشه فرونشست محدوده با استفاده از تصاویر راداری در سالهای ۸۲، ۸۵، ۸۹ و ۱۳۹۵

همانطورکه در نتایج صحت سنجی ملاحظه شد تطابق خوبی بین داده‌های واقعی و محاسباتی وجود دارد، بنابراین با اطمینان کافی می‌توان فرونشست در سال‌های آتی را توسط همین نرم‌افزار تخمین زد. در این پژوهش با فرض ادامه شرایط کنونی برای تغییرات آبخوان، فرونشست از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۱۰ پیش‌بینی گردیده است. نتایج حاصله نشان داد فرونشست در محدوده مورد مطالعه بطور متوسط سالانه حدود ۱۲/۸ سانتی‌متر و در نقاط بحرانی دشت مثل شمس‌آباد و علی‌آباد مختارانی به‌ترتیب به ۲۰/۹۸ و ۲۰/۳۴ سانتی‌متر خواهد بود. طبق شکل۷ نرخ فرونشست تجمعی از ۱۳۹۹ تا سال ۱۴۱۰ در این محدوده به ۱۵۸ سانتی‌متر خواهد رسید که در مناطق بحرانی شمس‌آباد و علی‌آباد مختارانی به‌ترتیب شاهد ۲۵۱/۷ و ۲۴۴/۱ سانتی‌متر می باشد. نتایج نشان می دهد و در طول سال ۱۴۱۰ بعلت فشرده شدن متوالی لایه‌های بالایی سفره آبخوان، با آهنگ کمتری، رخ می‌دهد و در نقاطی که ضخامت لایه‌های ریزدانه افزایش می‌یابد نرخ فرونشست بیشتر می‌باشد.



شکل۷- نقشه‌های فرونشست سال ۱۳۹۹-۱٤۱۰

بررسی پارامترهای موثر بر فرونشست

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در فرونشست زمین پارامترهایی نظیر تغییرات سطح آبخوان، جنس زمین و فاصله از گسل بیشترین تاثیر را دارند. در ادامه به تحلیل رابطه فرونشست با هریک از این پارامترها پرداخته می‌شود.

بررسی همزمان تاثیر ضخامت رس و برداشت آب زیرزمینی

وجود لایه‌های رسی تراکم‌پذیر در یک سیستم آبخوان و ضخامت آن‌ها از مهمترین عوامل ایجاد و کنترل کننده فرایند فرونشست زمین در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی می‌باشد(۲۱).

در راستای انجام این بررسی طبق جدول۱ تعداد ۱۰ حلقه از چاه‌های آب در محدوده مطالعاتی که دارای موقعیت مکانی مناسب بودند و نیز از پراکندگی خوبی در راستای غربی- شرقی و راستای شمالی- جنوبی بوده‌اند انتخاب شدند. بیشترین مقدار تخلیه سالیانه به‌ترتیب مربوط به چاه‌های آب اسکمان(P5)، سعیدآباد(P0) و نصیرآباد(P26) می‌باشد.

کمترین مقدار تخلیه سالیانه نیز مربوط به چاه آب چیچکلو(P12) در جنوب ناحیه مطالعاتی است.

جدول۱- میزان تخلیه چاه‌های منتخب داخل محدوده مطالعاتی(شرکت آب منطقه‌ای تهران)

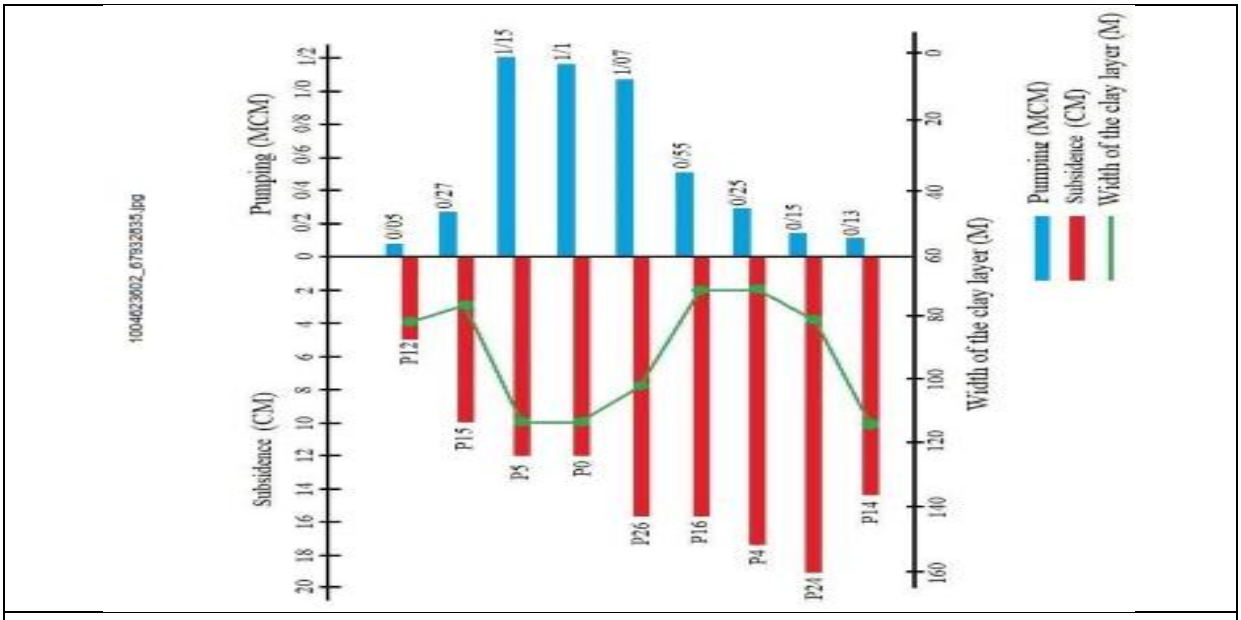
تخلیه سالیانه(MCM)	عمق (M)	UTM (Y)	UTM (X)	نام	شماره چاه
131400	140	3944040	504450	حصارک زیرک	P14
815994	150	3939750	507610	ویره	P27
1072224	180	3941960	513698	نصیرآباد	P26
249796	160	3943371	518996	احمدآباد	P4
54432	120	3935664	519219	چیچکلو	P12
1095573	180	3947425	517404	سعیدآباد	P0
544262	130	3938959	514035	دهشاد پایین	P16
162913	110	3939284	525650	گلدسته	P24
1151781	150	3939980	510900	اسکمان	P5
278208	150	3938959	524769	ده عباس	P15

جدول شماره۲ منتج شده از مشخصات لایه‌های حفاری چاه‌های پیزومتری دشت می‌باشد که صرفا ضخامت لایه رس را در نقاط منتخب را نشان می‌دهد(حق شناس، ۱۳۹۵).

جدول۲- ضخامت لایه رس در محدوده مطالعاتی(حق شناس،۱۳۹۱)

عمق نمونه(متر)	بافت	نام	شماره چاه
110-120	CL	حصارک زیرک	P14
120-135	CL	ویره	P27
110-135	CL	اسکمان	P5
110-150	CL	سعیدآباد	P0
100-150	CL	نصیرآباد	P26
70-100	CL	دهشاد	P6
70-80	CL	احمدآباد	P4
80-90	CL	چیچکلو	P12
80-90	CL	گلدسته	P24
75-80	CL	ده عباس	P15

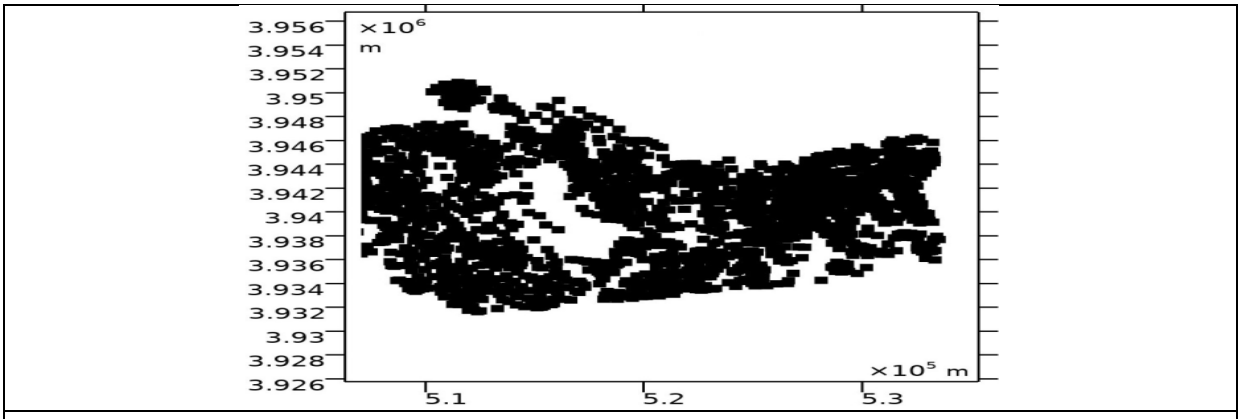
همانطور در شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش برداشت آب زیرزمینی در نقاط چیچکلو(P12)، ده عباس(P15) و اسکمان(P5) میزان فرونشست افزایش پیدا می‌کند. در سعیدآباد(P0) و اسکمان(P5) که برداشت یکسانی دارند فرونشست یکسانی دیده می‌شود اما در نصیرآباد(P26) علیرغم برداشت یکسان با سعیدآباد(P0) و اسکمان(P5) میزان فرونشست بالاتر است این اتفاق بدلیل فاصله کمتر لایه رسی از سطح زمین در نصیرآباد(P26) است. همین تاثیر در دهشاد هم دیده می‌شود که با وجود برداشت کمتر نسبت به نصیرآباد(P26)، سعیدآباد(P0) و اسکمان(P5) میزان فرونشست بالاتر است چراکه فاصله رس از سطح زمین به میزان قابل توجهی نسبت به نقاط یاد شده کمتر است. در احمدآباد(P4) علیرغم برداشت کمتر نسبت به دهشاد(P6) و فاصله لایه رس یکسان تا سطح زمین شاهد فرونشست بیشتری هستیم به نظر می‌رسد این اتفاق بدلیل نزدیکی احمدآباد(P4) به گسل باشد چنین شرایطی در گلدسته(P24) نیز مشاهده می‌شود که علی‌رغم برداشت کم و فاصله ی بسیار کمتر لایه رسی از سطح زمین نسبت به سعیدآباد(P0)، نصیرآباد(P26) و اسکمان(P5)، فرونشست به میزان قابل توجهی بیشتر است، چراکه گلدسته(P24) نیزبر روی گسل قرار دارد. در حصارک زیرک(P14) شرایط کمی متفاوت است یعنی با میزان برداشت کم و جنس زمین مناسب‌تر(فاصله بیشتر لایه رسی از سطح زمین نسبت به اکثر مناطق) فرونشست قابل توجهی دیده می‌شود از آنجایکه گسلی هم در نزدیکی حصارک زیرک(P14) وجود ندارد به نظر می‌رسد دلیل فرونشست زیاد بالا بودن سنگ بستر باشد، که باعث تحکیم سریعتر لایه‌های فوقانی می‌گردد. بنابراین فرونشست زمین، در کنترل رفتار واحدهای لیتولوژیکی و تغییرات آنها در سیستم آبخوان و فاصله لایه رسی از سطح زمین می‌باشد. فلذا در مناطقی که زمین دارای درصد رس و سیلت بسیار بالای است، افزایش تراز سطح آبخوان موجب تغییرات چشم‌گیری در کاهش فرونشست حداقل در بازه زمانی کوتاه نخواهد شد. بنابراین اجرای روش‌های تغذیه مصنوعی در چنین مناطقی اولویت پایین‌تری دارد.



شکل۸- نرخ تخلیه، فرونشست و ضخامت رس در تعدادی از چاه‌های منتخب محدوده مطالعاتی

بررسی توزیع مکانی چاه‌های برداشت آب زیرزمینی

توزیع پراکندگی و تمرکز چاه‌های برداشت آب زیرزمینی و منحنی هم ارزش نرخ فرونشست زمین نشان دهنده ارتباط معنی داری بین برداشت آب زیرزمینی و رخداد فرونشست می‌باشد. شکل۹ تمرکز چاه‌ها در مناطق شمالی، شمال‌غربی و شمال‌شرقی که توسعه زمین-های کشاورزی و نیاز به آب بیشتر دارند بالاتر است. این مناطق دارای نرخ فرونشست بالاتری نیز می‌باشد. این حالت برای نواحی جنوبی نیز مشاهده می‌شود. از سوی دیگر در نواحی جنوبی محدوده مطالعاتی نیز که تمرکز چاه‌ها کمتر و پراکندگی آنها بیشتر است. نرخ فرونشست کمتر است. وضعیت موجود نشان دهنده آن است که برداشت آب زیرزمینی به‌عنوان عامل محرک پدیده فرونشست در منطقه و الگوی آن موثر است.

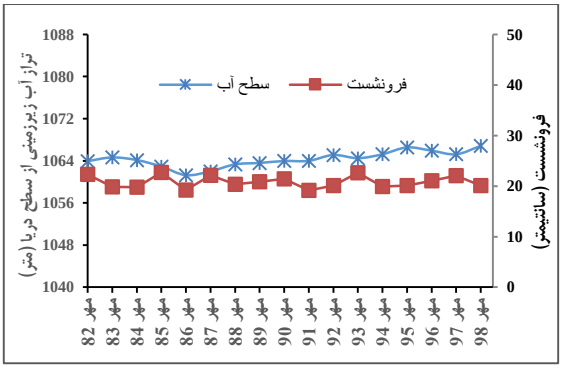


شکل ۹- توزیع فضایی چاه‌های مورد بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی

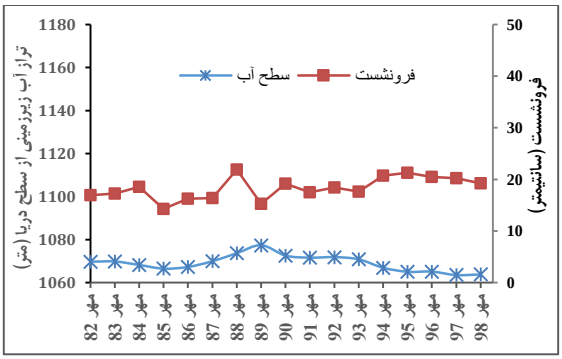
بررسی تحکیم لایه‌های زمین

در مناطقی که جنس زمین به گونه ای است که لایه‌های حاوی رس بیشتر و عمیق تر است، شیب تند فرونشست در سنوات اولیه به‌علت خالی شدن حجم زیادی از آب داخل خلل و فرج بین دانه‌ی و فشرده شدن سریع لایه‌ها بالایی سفره آبخوان است. که با ادامه کاهش سطح و عمق آبخوان و شرایط اتصال هیدرولیکی بین لایه‌ها ملایم‌تر می شود، چرا که در این شرایط حجم خلل و فرج کاهش می‌یابد تا جایی که با پدیده تحکیم مواجه می‌شویم، در این حالت آهنگ تغییرات فرونشست نیز کاهش می‌یابد. این اتفاق در شمس آباد، کردزار و بالابان قابل مشاهده است.

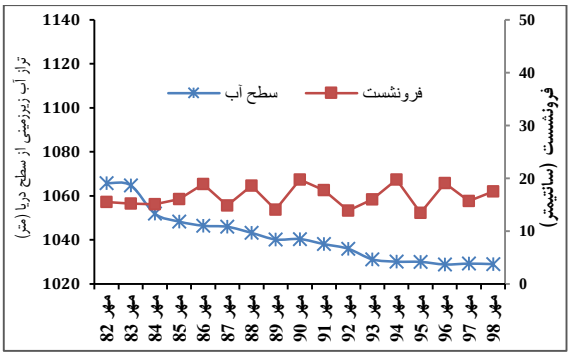
همانطور که در شکل۱۰ دیده می شود در کردزار علی رغم روند کاهش سطح آب الگوی افزایشی متناظری در فرونشست دیده نمی-شود مستقلی را طی می کند. در شمس آباد نیز افزایش سطح آب در سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵، با وجود روند کاهشی متناسبی در فرونشست مشاهده نمی‌شود. این پدیده در بالابان از سال ۱۳۸۹ به بعد قابل مشاهده است. در این سال‌ها علی‌رغم کاهش سطح آب فرونشست نه تنها افزایش نیافته بلکه روند کاهشی نیز نشان داده است. به نظر می-رسد دلیل این رفتارهای فرونشستی، تحکیم لایه های زمین و متعاقبا عدم رخداد فرونشست متناظر با تغییرات سطح آب می‌باشد.



الف)



ب)

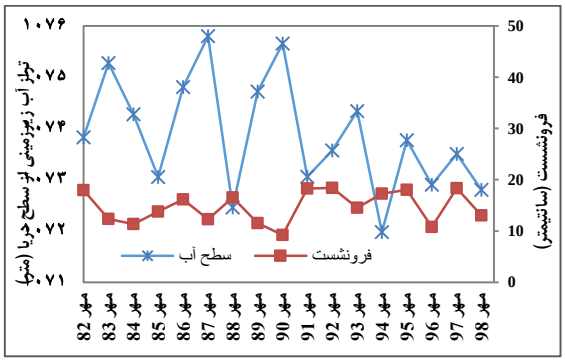


ج)

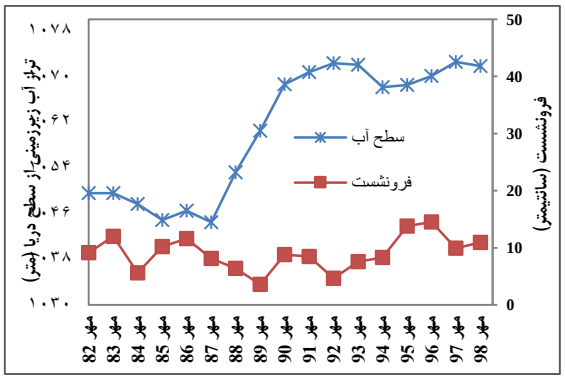
شکل ۱۰- فرونشست تجمعی و تغییرات آبخوان الف) شمس آباد ب)بالابان ج) کردزار

بررسی فاصله از گسل

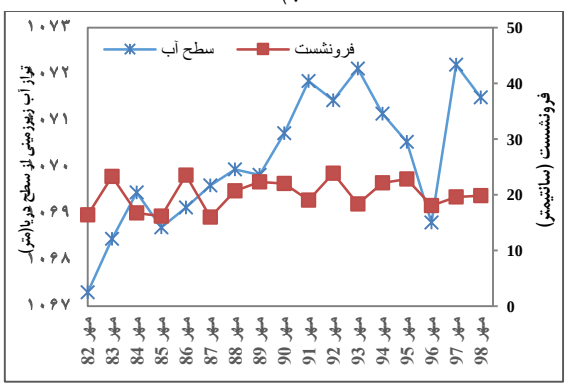
یکی از عوامل طبیعی موثر بر تشدید وقوع فرونشست نزدیکی به گسل‌هاست. ایجاد گسل ناشی از حرکات تکنوتیکی زمین است که با جابه جایی مواد ریزدانه و درشت دانه در محل شکاف ها باعث تشدید پدیده فرونشست می‌شود. هرچه به محل گسل نزدیک تر می‌شویم احتمال وقوع فرونشست بیشتر خواهد شد. مطالعه پژوهشی ندیری و همکاران که در سال ۱۳۹۷ انجام شده است و روی فاصله گسل از نقاط فرونشستی همین منطقه کار کرده نیز این مطلب را نشان می‌دهد(۱۴). در منطقه مورد مطالعه در نقاط علی‌آباد مختارخانی، بهمن‌آباد و ویره شاهد فرونشست قابل ملاحظه‌ای می-باشیم که متناسب با تغییرات سطح آبخوان نمی‌باشد. شکل۵ نشان می‌دهد که این نقاط (به ترتیب P20، P9 و P24) در نزدیکی گسل قرار دارند. همانطور که در نمودار شکل۱۱ هم دیده می‌شود در علی-آباد مختارخانی علی‌رغم افزایش روند کلی سطح آب تا سال ۱۳۹۳ کاهش فرونشست متناظری دیده نمی‌شود و فرونشست منطقه هم چنان با نرخ زیاد می‌باشد. در بهمن‌آباد این عدم تناسب دیده می‌شود حتی از سال ۱۳۸۷ که روند کلی تغییرات سطح آب افزایشی بوده نه تنها شاهد کاهش فرونشست متناسب نبوده‌ایم بلکه افزایش قابل توجهی در فرونشست نیز دیده می‌شود. در ویره نیز همین روند مشاهده می‌شود. به‌علاوه با مقایسه نقاط بنزخاور و علی‌آباد مختارخانی مشاهده می‌کنیم که هر دو نقشه فرو نشستی نسبتا مشابهی دارند اما با دو هیدروگراف متفاوت. در بنزخاور تغییرات سطح آبخوان تناسب قابل قبولی با تغییرات فرونشست، با در نظر گرفتن زمان تاخیر دارد، اما در علی‌آباد نه تنها میزان فرونشست بیشتر است، این تناسب هم دیده نمی‌شود، که به نظر می‌رسد به دلیلی فاصله کم با گسل منطقه باشد.



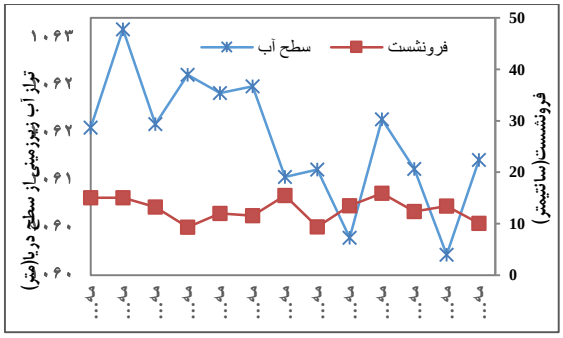
الف)



ب)



ج)



د)

شکل ۱۱- نمودار ترکیبی فرونشست و هیدروگراف در الف) بنزخاور ب) بهمن آباد ج) علی آباد مختارانی د) ویره

نتایج

با توجه به مطالعات انجام شده، محدوده مورد مطالعه در دشت تهران- شهریار که از نظر زمین‌شناسی دارای مصالح زیرسطحی با قابلیت فرونشست (سفتی کم و ریزدانه) و از نظر تغییر تراز آب دارای افت شدید تراز آب می‌باشد، از مناطق بحرانی یا نسبتا بحرانی پدیده فرونشست محسوب می‌گردد، چرا که هر دو شرط لازم برای وقوع و ادامه فرونشست (وجود مصالح با سفتی کم و ریزدانه و کاهش تراز آب زیرزمینی) را دارد.

در این تحقیق به کمک نرم‌افزار COMSOL، فرونشست در منطقه محاسبه و پس از صحت سنجی و کسب تطابق بالا با داده‌های واقعی و تصاویر تداخل سنجی راداری ، میزان فرونشست تا سال ۱۴۱۰ تخمین زده شود. نتایج حاصله نشان داد فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه بطور متوسط سالانه حدود ۱۲/۸سانتی‌متر و در نقاط بحرانی دشت مثل شمس‌آباد و علی‌آباد مختارانی به ترتیب به ۲۰/۹۸ و ۲۰/۳۴ سانتی‌متر خواهد بود. به عبارت دیگر از سال ۱۳۸۲ لغایت ۱۴۱۰ فرونشست تجمعی در این محدوده به ۱۵۸ سانتی‌متر خواهد رسید که در مناطق بحرانی شمس‌آباد و علی‌آباد مختارانی به ترتیب شاهد ۲۵۱/۷ و ۲۴۴/۱ سانتی‌متر فرونشست تجمعی خواهد بود.

همچنین پارامترهای موثر بر فرونشست و میزان تغییرات آن بررسی و تحلیل شده است. بر اساس نتایج حاصل مهم‌ترین پارامترهای موثر بر فرونشست این منطقه، تغییرات سطح آبخوان، جنس زمین و فاصله با گسل بوده است. در تغییرات سطح آبخوان، افزایش یا کاهش سطح آب، دامنه تغییرات و بازه زمانی این تغییرات از جمله عوامل موثر بر تغییرات فرونشست بوده‌اند. وجود لایه‌های ریز دانه و رسی بخصوص زمانی که ضخامت بالایی هم داشته باشند نیز عاملی موثر و مرتبط به پارامتر جنس لایه‌های زمین است. همچنین هر چه به گسل‌ها نزدیک‌تر شویم احتمال وقوع فرونشست هم بیشتر می‌شود. البته به نظر می‌رسد تغییرات سطح تراز آبخوان ارتباط مستقیم‌تر و واضح‌تری با تغییرات فرونشست زمین این منطقه داشته باشد.

به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که فرونشست زمین باعث از بین رفتن فضاهای خالی و نابودی آبخوان می‌گردد، لذا پایین رفتن سالانه تراز آب زیرزمینی باعث از بین رفتن بخشی از ظرفیت آبخوان شده که امکان احیای آن وجود ندارد و یا بسیار زمان‌بر خواهد بود.

بنابراین حد پایداری آبخوان برای امروز حداقل حفظ تراز آب در وضعیت فعلی و جلوگیری از هر گونه کاهش بیشتری از تراز آن است این امر باعث می‌شود پس از گذشت زمان مشخصی فرونشست زمین متوقف شده و امکان احیای حداقل بخش‌هایی از آن که هنوز فرونشست کامل در آن اتفاق نیفتاده است، وجود داشته باشد. بنابراین برای جلوگیری از بیشتر شدن فرونشست زمین در این مناطق لازم است، تراز آب زیرزمینی در مناطق مذکور تثبیت شده و از هرگونه اضافه برداشتی که باعث کاهش بیشتر آن شود جلوگیری گردد. در این صورت می‌توان انتظار داشت که با گذشت زمان، نرخ فرونشست در مناطق مذکور کاهش و متوقف شود. بنابراین بخش‌هایی از دشت تهران-شهریار که دارای مصالح درشت دانه بوده و دارای سختی بالایی هستند با کاهش تراز آب در مقابل فرونشست مقاومت کرده و فضاهای خالی بین دانه‌ها حفظ می‌شود، بنابر این مدیریت برداشت در مناطقی که مصالح درشت دانه وجود دارد می‌تواند بصورت کنترل شده انجام شود. لیکن در مناطق نیمه جنوبی شهر دشت بایستی تراز آب در وضعیت فعلی حفظ گردد.. همچنین در مناطقی که دقیقا منطبق بر بالای گسل و روی سطح زمین می‌باشد مکان‌های فوق العاده مستعد جهت فرونشست زمین و گسیختگی خاک بوده، لذا می‌بایست از عوامل تحریک کننده پیدایش و یا افزایش دهنده نرخ فرونشست از قبیل افزایش بی‌رویه مصارف منابع آب زیرزمینی و بارگذاری‌های حجیم به شدت اجتناب نمود. زیراکه تلفیق دو پدیده فرونشست و گسیختگی خاک که توامان حرکت لایه‌های زمین در جهات افقی و عمودی را داراست بی نهایت خطرناک می‌باشد و می بایست در اجرای سازه‌های زیربنایی و حیاتی تمهیدات و راهکارهای لازم فنی و مهندسی را باید به خدمت گرفت.

پیشنهادات

نتایج این مطالعه نشان داد مهم‌ترین عامل ایجاد فرونشست زمین، استخراج بی‌رویه منابع آب‌های زیرزمینی است. بنابراین راهکارهای ذیل جهت مدیریت مصرف بهینه منابع آب و جلوگیری از تداوم فرونشست زمین پیشنهاد می‌گردد:

۱- توجه جدی به موضوع آمایش سرزمین در استان.
۲- اصلاح الگوی مصرف و بکارگیری روش‌های نوین مصرف آب در همه بخش‌ها به ویژه مصارف شرب و کشاورزی.
۳- مساعدت و همکاری تمامی دستگاه‌ها به منظور انسداد چاه‌های غیرمجاز و جلوگیری از بهره برداری بیش از توان آبخوان.
۴- توجه به موضوع استفاده از پساب و آب‌های نامتعارف به عنوان یک منبع جایگزین.
۵- با توجه به تغییرات اقلیم ترویج و تحقق موضوع سازگاری با کم آبی.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: سیدحمیدرضاحسینی، سیدحبیب موسوی جهرمی

روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: سیدحبیب موسوی جهرمی، حسین محمد ولی سامانی، سیدحمیدرضاحسینی

نظارت و نگارش نهایی: سیدحبیب موسوی جهرمی، سیدحمیدرضاحسینی

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys. 12,155–164.
2. Comsol Multiphysics, Software Guide Version 5.1.
3. Gambolati, G, Gatto, P, Freeze, R.A.,1974,۲۰۰۵ Mathematical simulation of the subsidence of Venice. Results: American Geophysical Union, Water Resources Research, v. 10, no. 3, p. 563–577.
4. Geological Survey of Iran., 2005, study of land subsidence in Tehran-Shahriar plain, Tehran.[In Persian]
5. Hsieh, P.A., 1996. Deformation-induced changes in hydraulic head during ground-water withdrawal. Ground Water 34,6: 1082-1089. doi:10.1111/j.1745-6584.1996.tb02174.
6. Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., & Wang, S.J.,2004. Review on current Status and challenging issues of and subsidence in China. Engineering Geology, 76:6577.
7. H.Guo,(2015) , Groundwater-abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain, piahs- 372
8. Baitullahi, A, Dehghan, F. 2019. Investigating the risk of subsidence in the southwest region of tehran.Disaster prevention and management knowledge. Vol,9,No,2 Serial 32.[In Persian]
9. H.Guo, Wang,G. Cheng Zhang,Z, I., 2015, Groundwater- abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North china plain. PIAHS,372,17-21.,
10. Lashkaripour, G, Ghafouri, M, Rostami Barani, H., 2009, Investigation of the causes of fissure formation and subsidence in the west of Kashmar plain, Geological Studies, 1(1):111-95.[In Persian]
11. Mahmoudpour, M., Khamehchiyan, M., Nikoudel, M.R., Ghassemi, M.R.,2013, Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran, JGeope 3(2): 49-62.
12. Mahmoudpour, M., 2015, The role of interaction of engineering geological features and groundwater abstraction in the mechanism and pattern of land subsidence in the southwest of Tehran, PhD thesis in Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran.[In Persian]
13. Mohammad Khan, S, Ganjian, H, Grossi , L, Zanganeh Tabar, Z., 2020, Evaluation of the effect of groundwater depletion on subsidence using radar images, study area, Qorveh plain, Geographical Data Quarterly 112(28) : 229-220.[In Persian]
14. Nadiri, A, Habibi,M,H , Asghari,A., 2016, Spatio-temporal groundwater level prediction using hybrid geneti-kriging model, Journal of Water Resources Research, 11(3):85-99.[In Persian]
15. Duc-Huy Tran, Shih-Jung Wang, Quoc Cuong Nguyen., 2022, Uncertainty of

heterogeneous hydrogeological models in groundwater flow and land subsidence simulations – A case study in Huwei Town, Taiwan,Engineering Geology,Volume 298,

16. Azar, A, Khamehchian, M., 2018, Comparison of aquifer subsidence vulnerability in southwestern Tehran plain with simple weighting model and genetic algorithm, Journal of Kharazmi Earth Sciences, 4(2): 212-199.[In Persian]
17. Rajabi Khamseh, k, Nikbakht Shahbazi, A, Fatahhayan, H, Zahrabi, N., 2021,modeling of Izeh plain subsidence using MODFLOW mathematical code, Journal of Water Resources Research iran, 16(4): 112-126.[In Persian]
18. Sharifi Kia, M , Nikta, M., 2011, Measurement and extraction of hazards resulting from subsidence in residential lands of Greater Tehran, the first seminar on spatial analysis of environmental hazards in Tehran, Tarbiat Moallem University.[In Persian]
19. Terzaghi K,(1925), principles of soil mechanics, IV-settlement and consolidation of clay. Engineeing News-Record, 95 (3): 874-878
20. Taheri Tizro, Abdullah., 2008, Groundwater, Razi University Press, second edition.
21. Tehran Regional Water Company., 2020, inventory of the third period of piezometers and wells in operation of Tehran-Shahriar aquifer, Tehran.[In Persian]