

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 2, pp: 1-20

Simulation and Analysis of Land Subsidence Phenomenon Using Poroelasticity Theory (Case Study: Tehran-Shahriar Plain)

S. H. R. Hosseini¹, S. H. Mousavi Jahromi^{2*}, H. Mohammad Vali Samani³

1. PhD. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran
2. Prof., Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran
(Corresponding Author) H-Mousavi@srbiau.ac.ir
3. Prof., Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran

(Received Dec. 25, 2021 Accepted July 21, 2022)

To cite this article:

Hosseini, S. H. R., Mousavi Jahromi, S. H., Mohammad Vali Samani, H. 2023. "Simulation and analysis of land subsidence phenomenon using poroelasticity theory, case study: Tehran-Shahriar Plain" Journal of Water and Wastewater, 34(2), 1-20 Doi: 10.22093/wwj.2022.321484.3215. (In Persian)

Abstract

Indiscriminate extraction of underground water sources causes a drop in the water level and an increase in the stress on the soil particles, which leads to the subsidence of the earth's surface. Shahriar's critical plain has been affected by the phenomenon of subsidence for the past few years. The existence of vital arteries, economic, pilgrimage and military areas has turned it into a strategic area, which doubles the cost of the harmful consequences of subsidence. In this research, a new method is used to predict and analyze subsidence, under the title of Poroelasticity module of COMSOL software, which uses the simultaneous solution of equations related to fluid movement in porous media and mechanical deformation. The output of the numerical model was validated and compared between 2003 and 2019 at 24 points with the alignment observations, the Sentinel 1 radar interferometric images. The correlation coefficient of 0.97 indicates an acceptable correlation between the data values, the good matching of the interferometric images with the maps of the subsidence zones obtained from the software data and the approach of the squared values of the mean squared error and the efficiency coefficient towards zero and one was obtained. The general result of the finite element numerical modeling showed that the average rate of subsidence during the year 2031 due to the successive compression of the upper layers of the aquifer, with a lower rate, about 13.19 cm and in the places where the thickness of the fine-grained layers increased, He finds that it will reach 18.38 cm. Also, the range of changes in the underground water level in the period of time, the type of land and the number of geological units are among the factors affecting the subsidence pattern and rate.

Keywords: Subsidence, Shahriar Plain, Poroelasticity, Aquifer Level Changes, Type of Land.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۲، صفحه: ۲۰-۱

شبیه‌سازی و تحلیل پدیده فرونشست زمین با استفاده از نظریه Poroelasticity (مطالعه موردی: دشت تهران - شهریار)

سید حمیدرضا حسینی^۱، سید حبیب موسوی جهرمی^{۲*}، حسین محمد ولی سامانی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- 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
 (نویسنده مسئول) H-Mousavi@srbiau.ac.ir
 ۳- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی شهر قدس، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۴ پذیرش ۱۴۰۱/۴/۳۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

حسینی، س.ح.، موسوی جهرمی، س.ح.، محمد ولی سامانی، ح.، ۱۴۰۲، "شبیه‌سازی و تحلیل پدیده فرونشست زمین با استفاده از نظریه Poroelasticity (مطالعه موردی: دشت تهران - شهریار)" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۲)، ۲۰-۱. Doi: 10.22093/wwj.2022.321484.3215

چکیده

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث افت سطح آب و افزایش تنش وارده به ذرات خاک می‌شود که این موضوع منجر به فرونشست سطح زمین می‌شود. دشت بحرانی شهریار طی سالیان گذشته تحت تأثیر پدیده فرونشست بوده است. وجود شریان‌های حیاتی، مناطق اقتصادی، زیارتی و نظامی آن را به منطقه‌ای استراتژیک تبدیل کرده که هزینه عواقب زیان‌بار ناشی از فرونشست را دو چندان می‌کند. در این پژوهش، روش جدیدی به منظور پیش‌بینی و تحلیل فرونشست، تحت عنوان مازول Poroelasticity نرم‌افزار COMSOL که از حل هم‌زمان معادلات مربوط به حرکت سیال در محیط متخلخل و تغییر شکل مکانیکی بهره می‌برد، استفاده شد. خروجی مدل عددی طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در ۲۴ نقطه با برداشت‌های ترازیبی، تصاویر تداخل‌سنجی راداری Sentinel 1 صحت‌سنجی و مقایسه شد. ضریب تعیین ۰/۹۷ نشان‌دهنده هم‌بستگی قابل قبولی بین مقدار داده‌ها، تطابق خوب تصاویر تداخل‌سنجی با نقشه پهنه‌های فرونشست حاصل از داده‌های نرم‌افزار و نزدیک شدن مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی به سمت صفر و ۱ بود. نتیجه کلی مدل‌سازی عددی المان محدود نشان داد که نرخ متوسط فرونشست در طول سال ۱۴۱۰ به علت فشرده شدن متوالی لایه‌های بالایی سفره آبخوان، با آهنگ کمتری، حدود ۱۳/۱۹ سانتی‌متر و در نقاطی که ضخامت لایه‌های ریزدانه افزایش می‌یابد به ۱۸/۳۸ سانتی‌متر خواهد رسید. همچنین دامنه تغییرات تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی، جنس زمین و تعداد واحدهای زمین‌شناسی از جمله عوامل مؤثر بر الگو و نرخ فرونشست بودند.

واژه‌های کلیدی: فرونشست، دشت شهریار، Poroelasticity، تغییرات سطح آبخوان، جنس زمین

۱- مقدمه

پدیده فرونشست عبارت است از حرکت قائم یا نشست تدریجی و یا فرورفتن ناگهانی سطح و لایه‌های ساختمان زمین (Taheri Tizro, 2008) که به علل گوناگونی مانند انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات پوسته زمین و خروج گدازه‌ها از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و یا نفت رخ می‌دهد (Lashkaripour et al., 2009). این پدیده باعث بروز مسائل عدیده و مشکلاتی از جمله تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکستگی و یا بیرون‌زدگی لوله جدار و ماسه‌دهی چاه‌ها و تخریب در سازه‌ها می‌شود (Tran et al., 2022).

یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های ایجاد این پدیده پایین رفتن سطح ایستابی است، بنابراین خشک‌سالی‌های متوالی یا اضافه برداشت از آب زیرزمینی می‌تواند باعث پایین رفتن سطح ایستابی و ایجاد فرونشست شود (Papi et al., 2020).

رفتار زمین در مقابل این کاهش سطح ایستابی می‌تواند بسیار پیچیده باشد، به طوری که مدل‌سازی رفتاری آن نیازمند استفاده از روش‌های دقیق مدل‌سازی ریاضی و عددی است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که اگر نرخ برداشت آب زیرزمینی زیاد باشد ولی تغییرات جابه‌جایی سطح زمین کم باشد، می‌توان رفتار زمین را از لحاظ ژئومکانیکی، الاستیک فرض کرد، به عبارتی تغییر شکل‌ها برگشت پذیر هستند. اما در صورتی که این نرخ تغییر شکل زیاد باشد، از محدوده رفتار الاستیک خارج شده و تغییر شکل‌ها به‌طور کامل برگشت پذیر نیستند. میزان تغییر شکل برگشت پذیر طبق نظریه Biot poroelasticity که از تلفیق دو فیزیک حرکت سیال در محیط متخلخل و مازول مکانیک جامدات بوده قابل محاسبه است (Biot, 1956).

امروزه پدیده شوم فرونشست به‌صورت مشکلی جهانی بروز کرده که در مناطق خشک و نیمه‌خشک نمود بیشتری پیدا می‌کند. هو و همکاران، حدود ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ جهان را به‌نحوی با این پدیده درگیر می‌دانند (Hu et al., 2004). این پدیده در بسیاری از کشورها مانند مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایتالیا، هلند، ونزوئلا، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، لهستان، سوئد و ایران گزارش شده است

(Guo et al., 2015).

نتایج بررسی و مطالعات ۴۲ منطقه فرونشست در ۱۵ کشور، توسط کارگروه فرونشست زمین مستقر در سازمان یونسکو و برخی از پژوهشگران، نشان داد در تمامی فرونشست‌هایی که در جهان رخ می‌دهد، استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل است (Mahmoudpour et al., 2013).

از جمله پژوهش‌هایی که در زمینه فرونشست انجام شده، بررسی فرونشست در دشت نوق- بهرمان به روش آزمایشگاهی- پیمایشی توسط شریفی‌کیا بوده است. در این پژوهش سری زمانی داده‌های راداری دو ماهواره اروپایی و ژاپنی توسط نرم‌افزار بررسی شدند و در نهایت نتایج حاصله با عملیات پیمایشی و میدانی ارزیابی شد. برای بررسی علل فرونشست، زمین‌شناسی سطحی و تحت‌الارضی، کاربری اراضی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد به‌ازای ۲/۳ متر افت آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، ۱ سانتی‌متر فرونشست حاصل شده که با توجه به تغییرات دامنه نشست، برداشت آب زیرزمینی به‌عنوان عامل ایجابی و همچنین بارش به‌عنوان عامل بهبوددهنده بوده است (Sharifi Kia, 2010, Sharifi Kia and Nikta, 2011).

همچنین ندیری و همکاران نیز به ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. در این پژوهش ۷ عامل هیدرولوژیکی و ژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست شامل افت آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، بررسی و ارزیابی شده و نقشه آسیب‌پذیری دشت در مقابل فرونشست حاصل شده است (Nadiri et al., 2018a, Nadiri et al., 2018b).

جانباژ فوتمی و همکاران، فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری را بررسی کردند و نتایج نشان داد که میانگین سالانه فرونشست سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در محدوده آبخوان قزوین ۳۹/۹ و استان قزوین کمتر، در حدود ۳۳ میلی‌متر بوده است. بررسی‌ها نشان داد بیشینه فرونشست‌ها در محدودهایی از آبخوان رخ داده که ضخامت لایه ریزدانه بیش از سایر مناطق بوده است. همچنین بیشینه نرخ فرونشست مربوط به مناطق بویین‌زهرا و تاکستان بوده که بیشترین تخلیه از منابع آب زیرزمینی را داشته



مدل‌سازی پدیده‌های مختلف چندفیزیکی دارد که ماژول *flow subsurface* در تلفیق با ماژول *solid mechanics* تحت عنوان ماژول *poroelasticity flow* در مدل‌سازی فرونشست زمین می‌تواند استفاده شود. 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 است. قانون اول، قانون داریسی بوده که بیانگر حرکت سیال و فشار در محیط متخلخل است و قانون دوم، جابه‌جایی و تغییر شکل اسکلت خاک است (Multiphysics, 2015) که استفاده هم‌زمان دو قانون در این پژوهش، فرایند جدیدی در شبیه‌سازی سه‌بعدی فرونشست است. المان‌های استفاده شده در نرم‌افزار COMSOL انواع مختلفی داشته که در مدل‌سازی دوبعدی از المان‌های مثلثی و مربعی و در مدل‌سازی سه‌بعدی می‌توان از المان مختلف در این نرم‌افزار استفاده کرد. همچنین می‌توان هندسه‌های پیچیده زمین‌شناسی با تعداد لایه‌های مختلف و دلخواه را تعریف و مدل‌سازی کرد (Xiong, 2010).

۲- معرفی محدوده مورد مطالعه

دشت تهران- شهریار واقع در استان تهران است. این دشت شامل بخش منتخبی از کل پهنه آبرفتی از شرق دشت تهران تا محدوده رودخانه کرج با مساحت حدود ۱۷۲۰ کیلومتر مربع است که در شکل ۱ با رنگ آبی نشان داده شده است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش قسمت مرکزی این دشت بود که با رنگ قرمز در شکل مشخص شده است. این محدوده به مساحت ۳۵۹/۶ کیلومتر مربع در حد فاصل ۵۲° و ۳۹° تا ۳۱° و ۳۹° طول شرقی و ۵۰° و ۵۳° تا ۵۰° عرض شمالی واقع شده است. بر اساس نتایج آخرین دوره آماربرداری سراسری منابع آب سال ۱۳۹۹ وزارت نیرو و طبق شکل ۲ تعداد چاه‌های مورد بهره‌برداری در محدوده مورد مطالعه حدود ۳۷۰۰ حلقه با میزان حجم تخلیه سالانه حدود ۱۷۰ میلیون مترمکعب است که بخش عمده این چاه‌های آب به مصارف کشاورزی می‌رسد (Tehran Regional Water Company, 2016) میانگین بارش سالانه دشت حدود ۲۰۰ میلی‌متر و میانگین تبخیر سالانه حدود ۲۵۰۰ میلی‌متر است. سطح آب زیرزمینی بر اساس برداشت ماهانه ۱۳۵ پیژومتر چاه‌های مشاهداتی از سال ۱۳۷۲ تا

است. در نهایت نتایج این پژوهش هم‌بستگی بین افت سطح ایستابی و ضخامت لایه ریزدانه را در میزان فرونشست استان قزوین نشان داده است (Janbaz Fotmi et al., 2020).

زنگ و همکاران، فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی را با استفاده از روش عددی در یک سیستم آبخوان چند لایه‌ای بررسی کردند و نتایج نشان داد که حداکثر نشست ناشی از افت سطح ایستابی آب در ابتدا در لایه بالای سفره آبخوان ظاهر می‌شود و سپس با توجه به ارتباط هیدرولیکی بین لایه‌ها، نشست با سرعتی متناوب به سمت لایه‌های بالاتر و زمین انتقال می‌یابد (Zeng et al., 2021).

تران و همکاران، در شبیه‌سازی سه‌بعدی فرونشست در سیستم آبخوان ناهمگن در شهر هووی تایوان نشان داد توزیع مواد هیدروژئولوژیکی تأثیر زیادی بر جریان آب زیرزمینی و فرونشست زمین دارد (Tran et al., 2022).

دشت تهران- شهریار به علت نزدیکی به پایتخت ایران یکی از مناطق استراتژیک است که از نظر صنعتی و کشاورزی نیز فعال است. وجود زیرساخت‌هایی مانند ۲۰۰ کیلومتر راه‌های اصلی مواصلاتی و اتوبان‌های بین شهری، ۱۲۰ کیلومتر راه آهن و ۲۵ کیلومتر خطوط مترو، ۲۳۰۰ کیلومتر راه‌ها و معابر شهری و بین شهری اصلی و فرعی، فرودگاه بین‌المللی، پالایشگاه نفت و ۳۰ کیلومتر خطوط انتقال نفت، ۷۰ کیلومتر خطوط انتقال برق فشار قوی و بیش از ۲۰۰ کیلومتر خطوط اصلی گاز و اماکن مذهبی و تاریخی مانند حرم شاه عبدالعظیم حسنی (ره) و امام خمینی (ره) اهمیت و جایگاه این دشت بحرانی را دوچندان کرده است. عوارض فرونشست از سال ۱۳۶۹ در اثر بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به‌طور مستمر در این دشت مشاهده شده است. این پدیده به دلیل ماهیت تدریجی و بطئی آن کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، اما از لحاظ اقتصادی و اجتماعی می‌تواند اثرات بسیار مخربی به همراه داشته باشد (Mohammad Khan, 2020).

به‌منظور پیش‌بینی فرایند انجام پدیده فرونشست و کمی کردن آن روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که بهترین آنها روش عددی است (Lashkaripour, 2009). این روش قادر به شبیه‌سازی فرونشست به شکل تک‌فیزیکی یا چندفیزیکی (کوپل شدن دو یا چند فیزیک) است. یکی از این نوع نرم‌افزارهای عددی، نرم‌افزار COMSOL است. این نرم‌افزار، ماژول‌های مختلفی برای



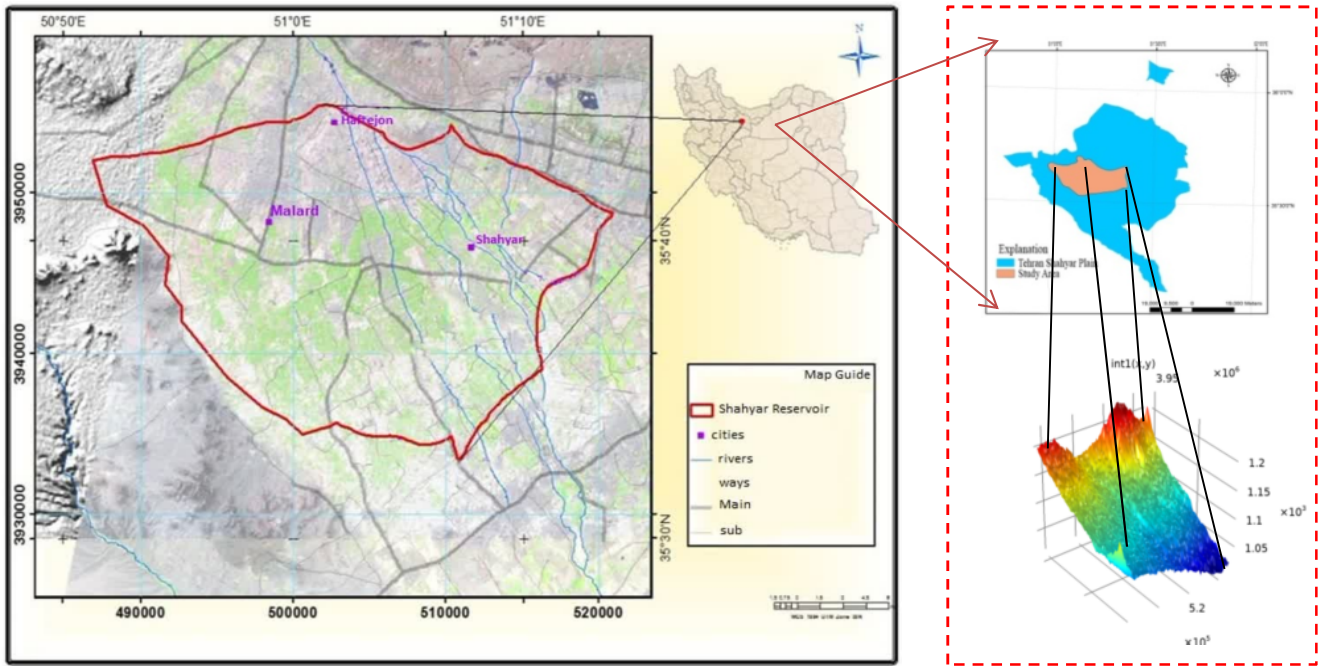


Fig. 1. View of Tehran-Shahriar plain and topography of the study area
 شکل ۱- نمایی از دشت تهران-شهریار و توپوگرافی محدوده مورد مطالعه

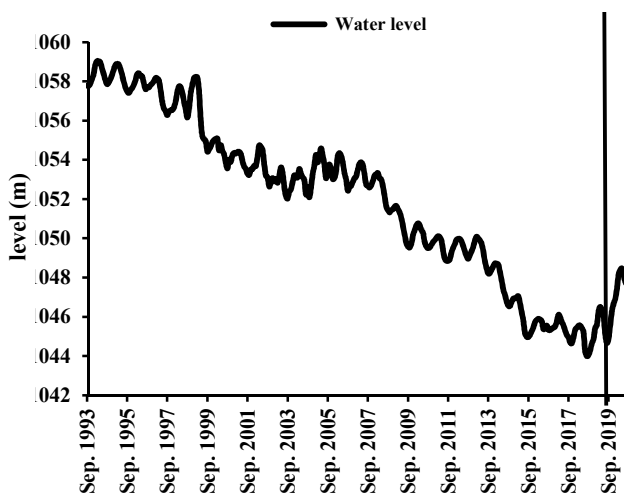


Fig. 3. Unit hydrograph of groundwater in Tehran-Shahriar plain, 1993-2019

شکل ۳- هیدروگراف واحد آب زیرزمینی در دشت تهران-شهریار
 ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۸

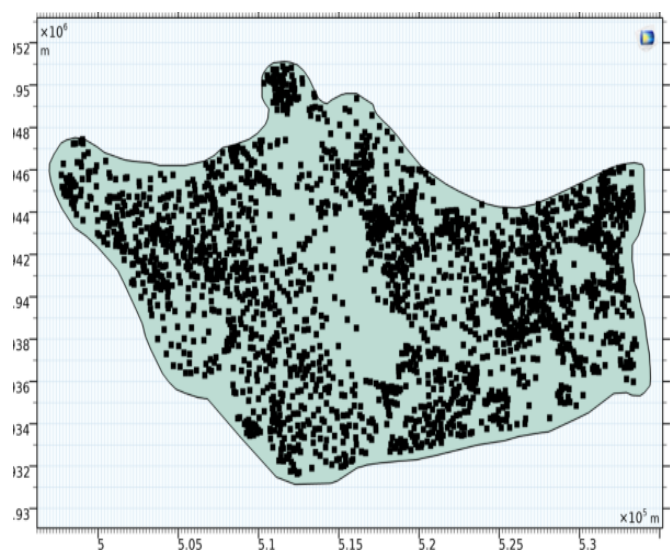


Fig. 2. Spatial distribution of extracted wells in the study area

شکل ۲- توزیع فضایی چاه‌های مورد بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی

شهریار در ۵ سال انتهایی حدود ۲۲ میلیون مترمکعب است (Tehran Regional Water Company, 2016).

گستره مورد مطالعه در کوهپایه جنوبی کوه‌های البرز مرکزی قرار گرفته و شمالی‌ترین فرونشست ایران مرکزی محسوب می‌شود. ناحیه شمالی گستره مورد مطالعه، واحد ساختمانی البرز و

در نمودار هیدروگراف شکل ۳ نمایش داده شده است (Tehran Regional Water Company, 2016).

طبق شکل ۳ متوسط تراز آب زیرزمینی از سطح دریا طی سال‌های ۱۳۷۲ لغایت ۱۳۹۷، سالیانه به میزان ۵۴ سانتی‌متر سیر نزولی و افت داشته است. کمبود حجم سالانه آبخوان دشت تهران -



غیرالاستیک خاک می نامند (Hsieh, 1996).

۲-۳- معادلات حاکم

مدل ریاضی Biot برای استفاده در محیط اشباع و مدل سازی فرونشست حاصل از برداشت آب زیرزمینی از سفره آبخوان است. این نظریه برای محاسبه فشار آب منفذی و تغییر شکل اسکلت خاک کاربرد دارد. در استفاده از این نظریه باید فرضیات زیر را در نظر گرفت:

۱- در مقیاس دانه های تشکیل دهنده خاک، اصل تنش مؤثر ترزاقی باید بین دانه ها برقرار باشد.
۲- تغییر شکل در اسکلت خاک به علت تغییر در فضاهای حفره ای خاک اتفاق می افتد و دانه های خاک تراکم ناپذیر در نظر گرفته می شود.

۳-۲-۱- ریاضی حاکم بر مسئله

در این بخش شرح مختصری از تئوری و معادلات ریاضی حاکم در مدل سازی عددی پدیده فرونشست ارائه می شود (Verruijt, 2018, Biot, 1956).

بر طبق نظریه ترزاقی تنش مؤثر بین ذرات خاک از معادله ۱ محاسبه می شود (Biot, 1962)

$$\sigma' = \sigma - p \quad (1)$$

که در آن

مؤلفه p فشار حفره ای آب و σ' تنش مؤثر است.
فشار حفره ای p طبق معادله ۲ تعریف می شود

$$p = p_s + p_e = (H - Ele) \gamma_w \quad (2)$$

که در آن

p_e فشار فزاینده، p_s فشار استاتیک، H هد کل، Ele هد ارتفاعی و γ_w وزن واحد مخصوص آب است.

با فرض سه بعدی بودن مسئله مطابق شکل ۵، معادله ۱ را می توان به صورت ماتریسی به شکل معادله ۳ نوشت

ناحیه جنوبی آن ساختمان ایران مرکزی را تشکیل می دهد که بین رودخانه های کن و کرج واقع شده است. توپوگرافی این محدوده هموار است. بیشینه اختلاف ارتفاعی به ۳۵ متر می رسد. سطح دشت شامل آبرفت های جوان مخروط افکنه ای با نهشته های سیلابی و رودخانه ای جور نشده با سیمان سست و ضخامت حدود ۶۰ متر است. سه بخش در آبرفت های این سری قابل تشخیص است، بخش بالایی آن متشکل از رس و خاک قرمز رنگ، بخش میانی آن شامل قلوه سنگ های گرد و بخش زیرین متشکل از قلوه شن و ریگ با مقداری رس در بین آنها است. به عبارت دیگر عمده دشت از رسوبات ریزدانه با قابلیت ذخیره سازی زیاد همراه با مقداری رسوبات درشت دانه با قابلیت نفوذپذیری زیاد تشکیل شده است (Tehran Regional Water Company, 2020).

مشخصات زمین شناسی محدوده مدنظر و رشته گسل ها نیز مطابق شکل ۴ در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است (Iran, 2005).

۳- روش پژوهش

۳-۱- مدل سازی فرونشست

فرونشست زمین طبق نظریه poroelasticity در سال ۱۹۴۱ توسط Biot ارائه شده است. این نظریه بیان کننده رفتار الاستیک مواد دارای تخلخل در صورت کم شدن سیال موجود در فضاهای بین ذرات است (Biot, 1955).

اولین بار مدل سازی پدیده فرونشست با استفاده از مفهوم تنش مؤثر توسط ترزاقی مطرح شد. برداشت بی رویه آب زیرزمینی می تواند باعث کاهش فشار حفره ای و زیاد شدن تنش مؤثر شود. این از دیاد تنش مؤثر باعث فشرده شدن طبقات زمین می شود. در لایه هایی از زمین که تراوی کمی دارد و از رس و سیلت بیشتری تشکیل شده، مقدار این تراکم پذیری و تحکیم یافتگی بیشتر از مناطقی است که متشکل از دانه های ماسه می باشد (Terzaghi, 1925).

هر گاه تنش مؤثر بیش از میزان بیشینه تنش مؤثر وارده بر خاک باشد، ذرات خاک برای پایداری در مقابل این اضافه تنش، آرایش قرارگیری خود را تغییر می دهند که این خود باعث کاهش برگشت پذیری حجم فضاهای خالی خاک شده که تراکم پذیری



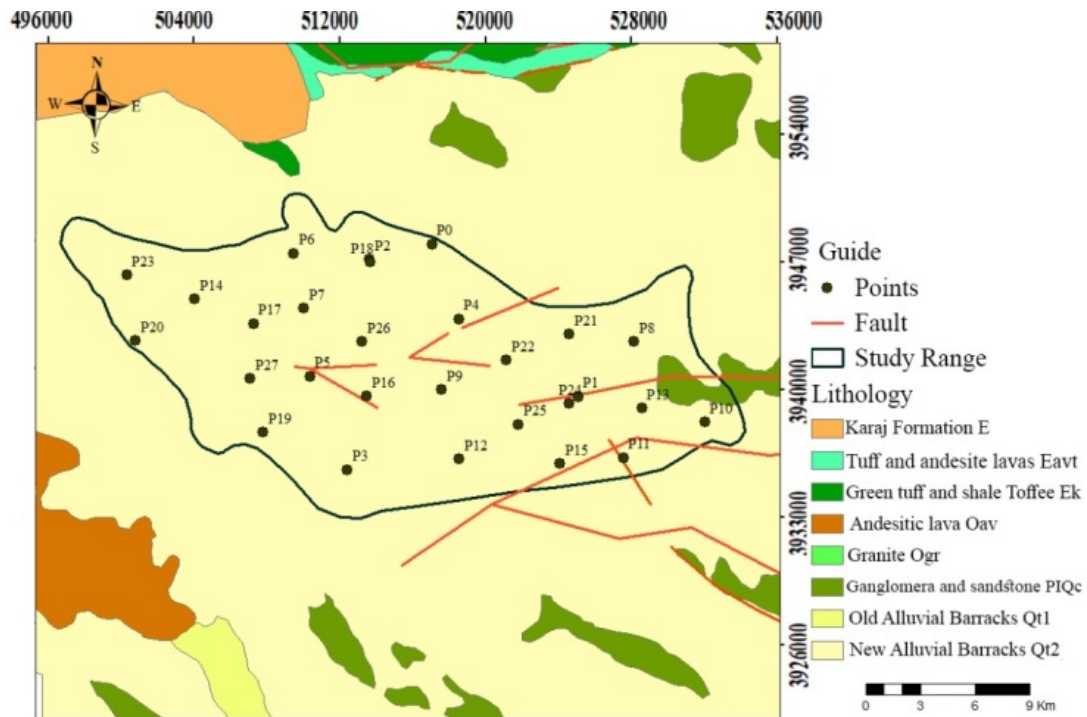


Fig. 4. Geological characteristics and faults map in model

شکل ۴- نقشه مشخصات زمین‌شناسی و گسل‌های محدوده مدل

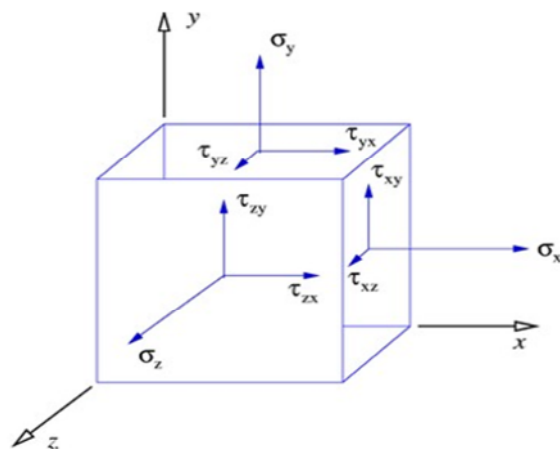


Fig. 5. Stress components in the three-dimensional model

شکل ۵- اجزای تنش در مدل سه‌بعدی

$$\begin{pmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_z \\ \tau'_{xy} \\ \tau'_{xz} \\ \tau'_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha p \\ \alpha p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha(H - Ele)\gamma_w \\ \alpha(H - Ele)\gamma_w \\ \alpha(H - Ele)\gamma_w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

که در آن

α ضریب Biot و σ_{ij} مؤلفه‌های تنش است.

اگر تراکم‌پذیری ذرات مجزای خاک و محیط متخلخل برابر با C_m و C_s و تراکم‌پذیری سیال برابر با C_f باشد، ضریب Biot توسط معادله ۴ محاسبه می‌شود. اگر C_s به‌طور تقریبی برابر با صفر باشد بنابراین معادله ۳ همان رابطه ترزاقی خواهد شد

$$\alpha = 1 - \frac{C_s}{C_m} \quad (4)$$

از طرفی رابطه بین تنش‌ها و کرنش‌ها توسط قانون هوک طبق معادله ۵ به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند



خطی در نرم افزار COMSOL حل شده است و میزان تغییر شکل و هد هیدرولیکی کل برای هر بازه زمانی به دست می آید

(۱۰)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + S \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0$$

که در آن

S نشان دهنده ضریب ذخیره است که توسط معادله ۱۱ محاسبه می شود. n میزان تخلخل سازند در نظر گرفته می شود، k_i میزان هدایت هیدرولیکی سازند در جهت های مختلف و H هد هیدرولیکی کل است

$$S = nC_f + (\alpha - n)C_s \quad (11)$$

با اعمال تقریب المان محدود Biot در نهایت دستگاه معادله ۱۲ به دست می آید

(۱۲)

$$\begin{bmatrix} [A] & [B] & [C] & [D] \\ [E] & [F] & [G] & [H] \\ [I] & [J] & [L] & [M] \\ [N] & [O] & [P] & [Q] + \Delta t[R] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{u_1\} \\ \{v_1\} \\ \{w_1\} \\ \{H_1\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{F_{x1}\} + [D]\{H_{ini}\} \\ \{F_{y1}\} + [G]\{H_{ini}\} \\ \{F_{z1}\} + [I]\{H_{ini}\} \\ \{QQ\} \end{pmatrix}$$

که در آن

بردارهای u_1, v_1, w_1 و H_1 میزان جابه جایی در جهات x, y, z است و F میزان نیروی وارد بر المان بوده و H میزان هد هیدرولیکی در ابتدای شروع مدل سازی بوده و Δt میزان گام های زمانی را نشان می دهد. دستگاه معادله ۱۲ را می توان با استفاده از روش های مختلف عددی و با اعمال شرایط مرزی مناسب در مورد جریان آب زیرزمینی حل کرد. از میان روش های مختلف، روش المان محدود تناسب بیشتری با این پژوهش دارد چون نسبت به روش تفاضل محدود انعطاف پذیری بیشتری دارد. بنابراین در این پژوهش از نرم افزار COMSOL که بر اساس روش المان محدود کار می کند، استفاده شد.

(۵)

$$\begin{aligned} \sigma'_{xx} &= - \left(K + \frac{4}{3}G \right) \varepsilon_{xx} - \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{yy} - \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{zz} \\ \sigma'_{yy} &= - \left(K + \frac{4}{3}G \right) \varepsilon_{yy} - \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{xx} - \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{zz} \\ \sigma'_{zz} &= - \left(K + \frac{4}{3}G \right) \varepsilon_{zz} - \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{xx} - \left(K - \frac{2}{3}G \right) \varepsilon_{yy} \end{aligned}$$

با فرض اینکه معادله ۶ نیز برقرار باشد

$$\begin{aligned} \sigma'_{xz} = \sigma'_{zx} = 2G\varepsilon_{xz} \quad \text{و} \quad \sigma'_{xy} = \sigma'_{yx} = 2G\varepsilon_{xy} \quad (6) \\ \sigma'_{yz} = \sigma'_{zy} = 2G \quad \text{و} \end{aligned}$$

که در آن

ε_{xx} مؤلفه های کرنش، K مدول یانگ و G مدول برشی اند که همگی توسط معادلات ۷ و ۸ محاسبه می شوند

$$K = \frac{1}{C_m} \quad (7)$$

$$G = \frac{3K(1-2\mu)}{2(1+\mu)} \quad (8)$$

مطابق با معادله ۵ تغییر در میزان تنش مؤثر باعث تغییر شکل محیط متخلخل می شود. به عبارتی با افزایش میزان تنش مؤثر محیط متخلخل فشرده شده و فرونشست اتفاق می افتد. افزایش میزان تنش مؤثر و تراکم خاک توسط سه مکانیسم در آبخوان ممکن است اتفاق رخ دهد: افزایش میزان تنش کل، کاهش فشار حفره ای آب و تلفیق دو مکانیسم قبلی.

در سفره آزاد با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی مطابق با معادله ۹ میزان تنش مؤثر افزایش یافته و باعث ایجاد فرونشست در محیط متخلخل می شود. در سفره محبوس نیز مکانیسم مشابهی وجود دارد که باز هم توسط همین معادله می توان کاهش فشار حفره ای آب و به دنبال آن افزایش تنش مؤثر را محاسبه کرد

$$\Delta \sigma'_A = -\Delta p_A = \gamma_w \Delta H \quad (9)$$

حال با در نظر گرفتن معادله تعادل Biot مطابق معادله ۱۰ و اعمال تقریب المان محدود به یک دستگاه معادله خطی خواهیم رسید که این دستگاه معادله با روش های تکراری حل معادلات



۳-۳- اجرای مدل

باید اعمال شود. به این منظور کف مدل که به عنوان سنگ کف در مدل تعریف شد که با میزان جابه‌جایی صفر مقید شد و سطح بالایی مدل به عنوان یک سطح آزاد که می‌تواند جابه‌جایی در همه جهات داشته باشد در نرم‌افزار تعریف شد. مرزهای جانبی مدل نیز صرفاً در جهت جابه‌جایی عمودی آزاد هستند و در جهت جابه‌جایی افقی مقید شدند.

۳-۴- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی از روش مجذور میانگین مربعات خطا معادله ۱۳ و ضریب کارایی معادله ۱۴ با استفاده از داده‌های ترازیبی و محاسباتی نرم‌افزار برای ۸ نقطه بحرانی و غیربحرانی مدل در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ که در ادامه تحلیل شده‌اند استفاده شد. طبق جدول ۲ مقدار مجذور میانگین مربعات خطا به سمت صفر و مقدار ضریب کارایی بزرگتر از ۰/۵ و به سمت ۱ نزدیک می‌شود که می‌توان گفت مدل اجرا شده صحت‌سنجی و تدقیق خوبی دارد (Zhang et al., 2010)

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{obsi} - X_{modeli})^2}}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obsi} - X_{modeli})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obsi} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (14)$$

که در آنها

X_{obs} و $X_{model,i}$ مقدار محاسبه شده در زمان یا مکان i و X_{obs} مقدار میانگین مشاهده شده است.

برای اجرای مدل، داده‌های زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و آب‌شناسی ناحیه مورد مطالعه به تفکیک در قسمت مربوطه نرم‌افزار وارد شد. منطقه مورد مطالعه شامل شش واحد زیرسطحی جدا از هم است که سه واحد آبخوان و سه واحد دیگر شامل لایه‌های رسی ریزدانه با هدایت هیدرولیکی ناچیز دارد.

میزان ضخامت لایه‌های رسی نیز در گستره مورد مطالعه متفاوت است. این شش لایه مجزا از هم بر اساس اطلاعات حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی گرفته شده از سازمان زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌ها مطابق با جدول ۱ وارد نرم‌افزار شده است (Mahmoudpour, 2015).

همچنین مطابق با شکل ۶-a توپوگرافی سطحی و لایه‌بندی در نرم‌افزار COMSOL تولید شده و در نهایت طبق شکل ۶-b به منظور حل معادلات حاکم بر هندسه موردنظر در نرم‌افزار COMSOL گسسته‌سازی انجام شده است. تعداد کلی المان‌های سه‌بعدی پس از گسسته‌سازی هندسه مدل بالغ بر ۱۷۵۲۵۸ المان است. میزان بزرگ‌نمایی مدل در جهت عمود بر لایه‌ها (Z) ۲۰ برابر بزرگتر ترسیم شده است.

در خصوص اعمال شرایط مرزی مسئله در ابتدا قرائت‌های میزان هد هیدرولیکی از ابتدای زمان شبیه‌سازی در سال ۱۳۸۲ توسط پیژومترهای منصوبه در محدوده مطالعاتی تهیه و به نرم‌افزار وارد شد. در مورد تعداد چاه‌ها و میزان تخلیه آنها نیز با استفاده از شرط well در نرم‌افزار COMSOL وارد مسئله شد. با توجه به چند فیزیکی بودن مسئله فرونشست، شرایط مرزی مکانیکی مدل نیز

جدول ۱- مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های زمین‌شناسی

Table 1. Geomechanical characteristics of geological layers

Model layers	Density	Young's modulus Gpa	Bulk modulus Gpa	Poisson's ratio	Porosity	Horizontal hydraulic conductivity (m/s)	Horizontal hydraulic conductivity (m/s)
First fine-grained clay	16.55	0.41	0.42	0.35	0.1	5.10×10^{-10}	3.40×10^{-10}
First aquifer	16.45	0.35	0.32	0.34	0.5	4.83×10^{-6}	3.86×10^{-6}
Second fine-grained clay	16.88	0.83	1.27	0.34	0.8	3.30×10^{-10}	2.20×10^{-10}
Second aquifer	19.87	3.36	4.63	0.34	0.5	1.17×10^{-5}	9.36×10^{-6}
Third fine-grained clay	20.51	4.37	9.14	0.41	0.9	2.09×10^{-10}	1.40×10^{-10}
Third aquifer	21.76	9.1	10.18	0.38	0.5	2.61×10^{-5}	2.08×10^{-5}



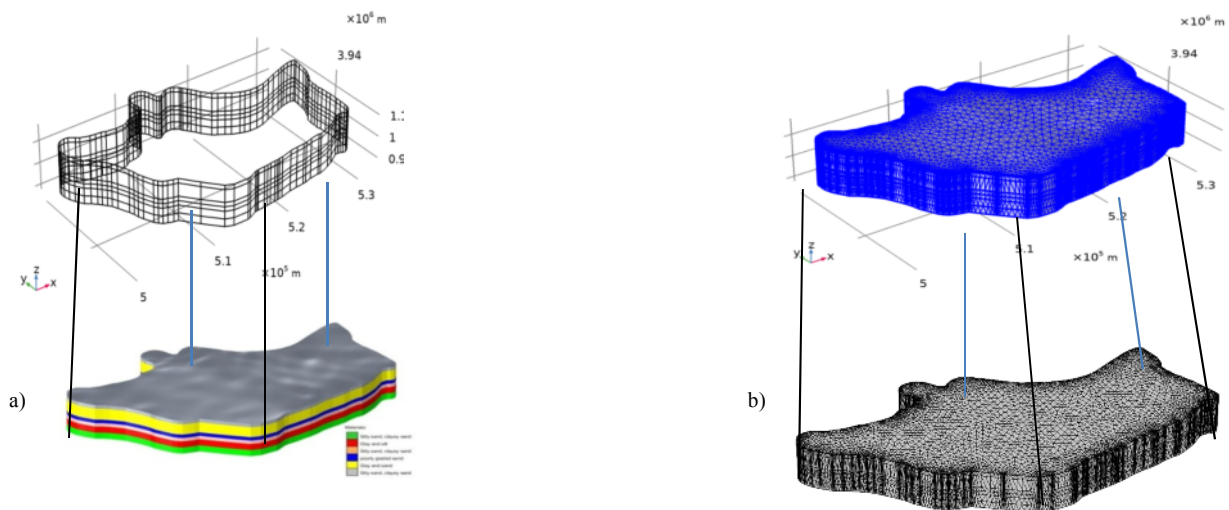


Fig. 6. a) Geological and topographic model and b) Three-dimensional discretization model

شکل ۶- a) مدل زمین‌شناسی و توپوگرافی و b) مدل گسسته‌سازی سه‌بعدی

جدول ۲- مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی نقاط منتخب در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵

Table 2. The square of the mean squares of the error and the efficiency coefficient of the selected points in the years 2006, 2011 and 2016

Location	Name	X(m)	Y(m)	RMSE			Efficiency coefficient		
				2006	2011	2016	2006	2011	2016
P3	Ahmad Abad Jan Separ	5131100	3934910	0.1294	0.0923	0.0845	0.9665	0.8696	0.9792
P4	Ahmad Abad Mostofi	518996	3943371	0.0258	0.0746	0.0713	0.9996	0.9835	0.8662
P5	Eskman	510900	3939980	0.0509	0.1061	0.0229	0.9993	0.9988	0.9441
P7	Balaban	510460	3943700	0.1043	0.0580	0.1821	0.9556	0.9984	0.9517
P10	Pelain	536265	3938078	0.0417	0.0824	0.1570	0.9613	0.9498	0.9111
P11	Jafarabad Jangal	528264	3936008	0.286	0.272	0.211	0.9988	0.9978	0.8813
P18	Shahed Shahr	508416	3936834	0.0601	0.1464	0.0753	0.9985	0.9964	0.9987
P19	Shams Abad	525068	3942697	0.0322	0.0042	0.368	0.9985	0.9999	0.9990

بر این اساس ضریب تعیین برابر ۰/۹۷ است که نشان‌دهنده تطابق بالا و هم‌بستگی بین مقدار داده‌های حاصل از نرم‌افزار با داده‌های ترازیبی است. همچنین برای صحت‌سنجی، تصاویر تداخل‌سنجی راداری 1 Sentinel محدوده مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ طبق شکل ۸ تهیه شده است (Tehran Regional Water Company, 2020)

روش معمول در ارائه نتایج واسنجی مدل، نمودار پراکنندگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی فرونشست است (Mahmoudpour, 2015).

داده‌های خروجی نرم‌افزار در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در ۲۴ نقطه انتخابی (منطبق بر محل پیزومترها) و برداشت‌های ترازیبی سالانه نقاط متناظر آن در شکل ۷ نشان داده شده است.



هم‌نشست آن، خروجی از نرم‌افزار COMSOL که در شکل ۹ به صورت منحنی‌های هم‌نشست مشخص است، تطابق قابل‌قبولی از نظر پهنه فرونشست بین تصاویر و نقشه‌ها ملاحظه شد.

در ادامه به منظور صحت‌سنجی بیشتر مدل، مطابق شکل ۱۰ منحنی تراز آب زیرزمینی در دو حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده پیزومترهای منصوبه در سال آبی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵ با هم مقایسه شد که اختلاف معناداری مشاهده نشد.

همچنین برای بررسی و نشان دادن هم‌خوانی جزئی‌تر داده‌های مشاهداتی و محاسباتی مدل، طبق شکل ۱۱ هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دو نقطه احمدآباد مستوفی (P3) و اسکمان (P5) در طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ با یکدیگر مقایسه شدند که تفاوت زیادی مشاهده نشد.

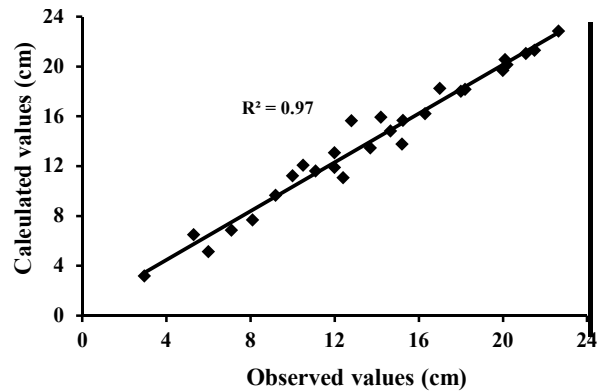
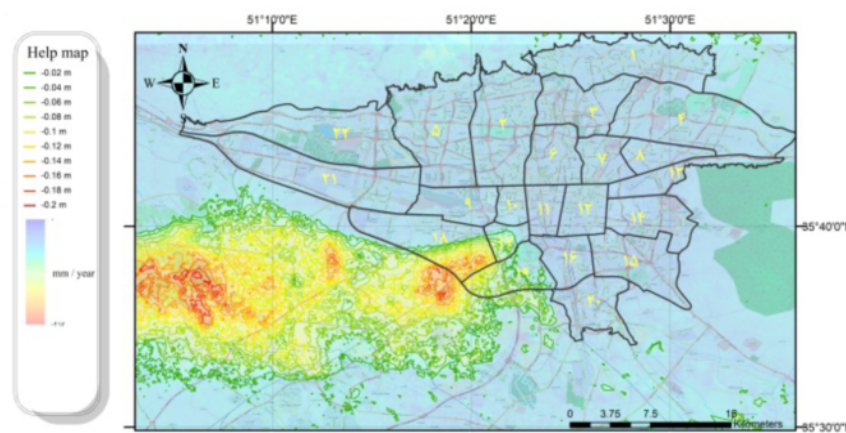


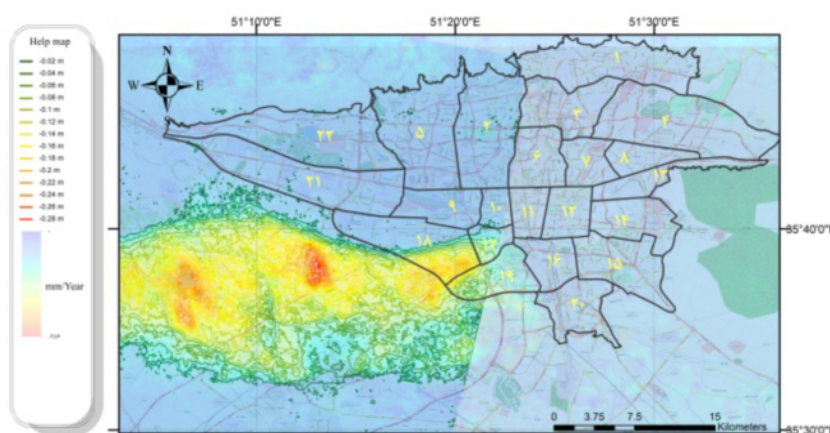
Fig. 7. Fitting diagram of observed values based on calculated subsidence values

شکل ۷- نمودار برازش مقدار مشاهداتی بر اساس مقدار محاسباتی فرونشست

با مقایسه تصاویر تداخل‌سنجی راداری و نقشه‌های متناظر

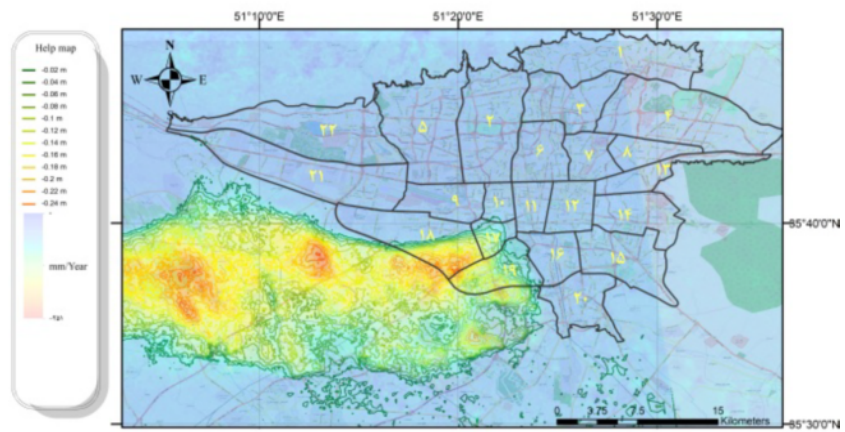


a)

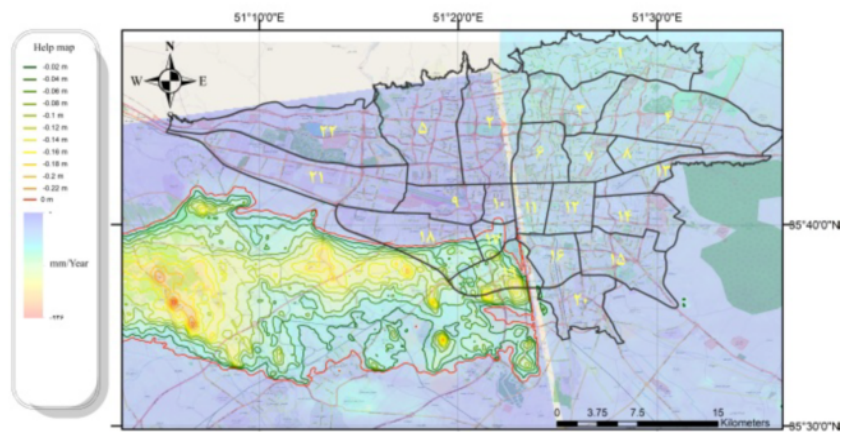


b)





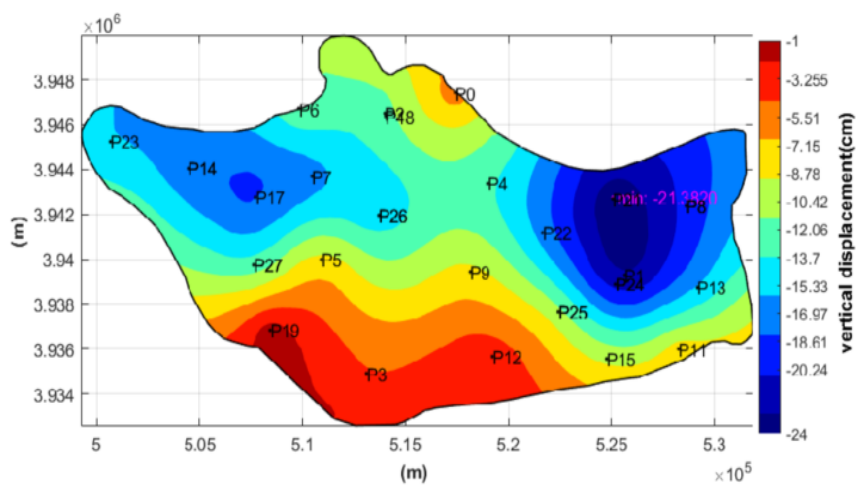
c)



d)

Fig. 8. Contour maps of land subsidence using Sentinel 1 radar interferometry images in study area, a) 2003, b) 2006, c) 2010 and d) 2016

شکل ۸- نقشه فرونشست محدوده با استفاده از تصاویر تداخل سنجی راداری Sentinel 1 در سال‌های (a) ۸۲، (b) ۸۵، (c) ۸۹ و (d) ۱۳۹۵



a)



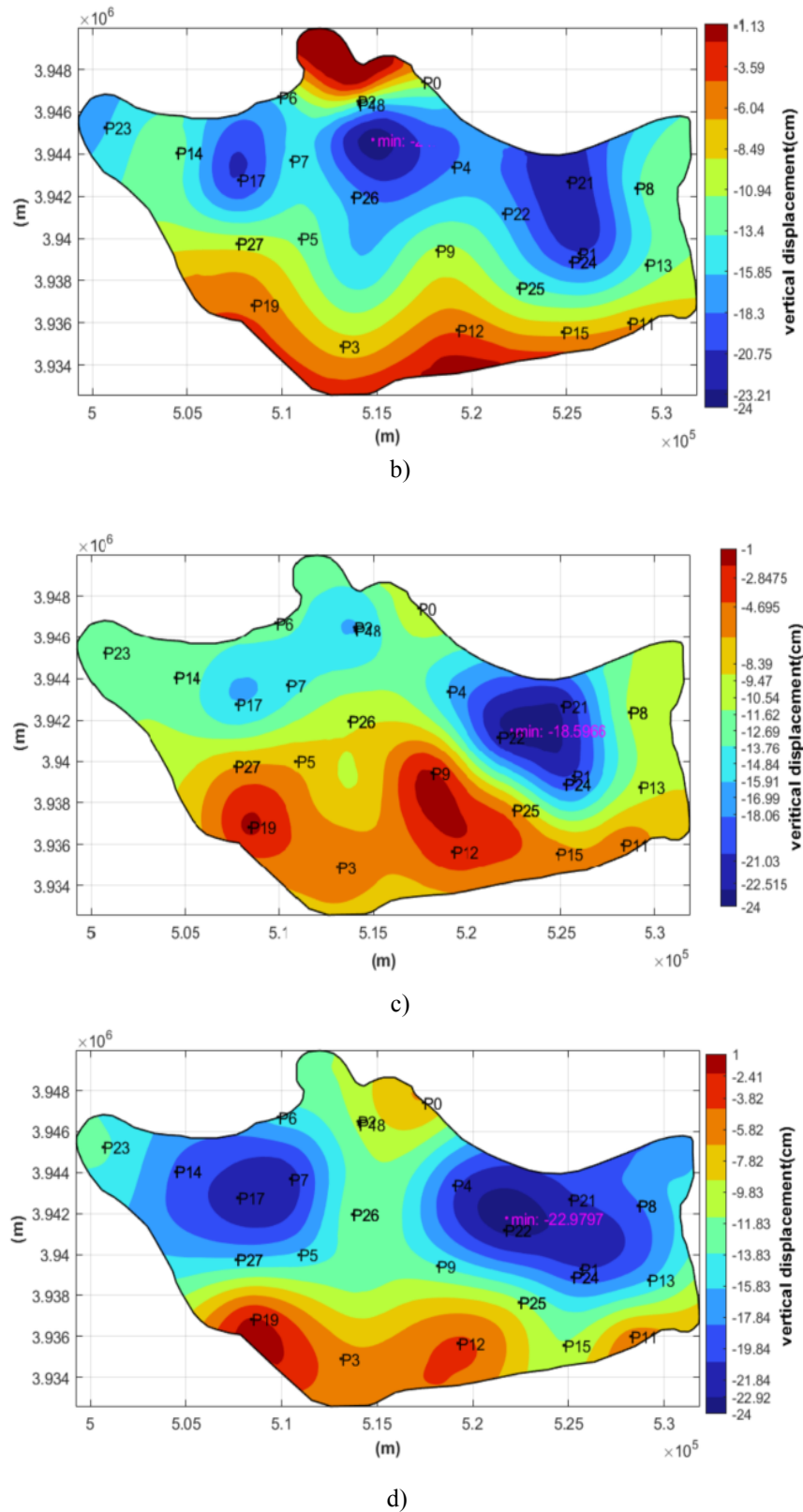


Fig. 9. Contour maps of land subsidence in study area, a) 2003, b) 2006, c) 2010 and d) 2016

شکل ۹- نقشه‌های هم‌نشست در محدوده مدل سال‌های (a) ۱۳۸۲، (b) ۱۳۸۵، (c) ۱۳۸۹ و (d) ۱۳۹۵



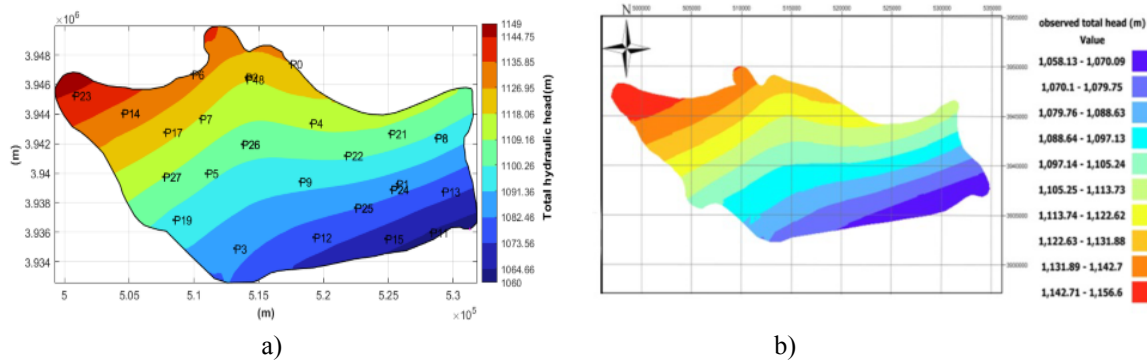


Fig. 10. Maps total hydraulic head, a) observation and b) calculated in 2015-2016

شکل ۱۰- هد هیدرولیکی کل (a) مشاهداتی و (b) محاسباتی توسط نرم‌افزار در سال آبی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵

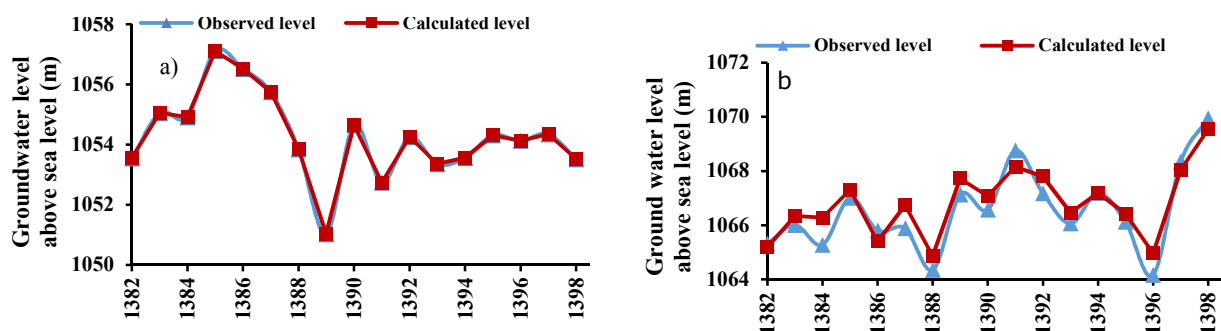


Fig. 11. Observatory and computational groundwater unit hydrograph, a) Ahmadabad Mostofi and b) Eskman

شکل ۱۱- هیدروگراف واحد آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی (a) احمدآبادمستوفی و (b) اسکمان

۴-۲- تحلیل فرونشست بر اساس پارامترهای مؤثر

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در فرونشست زمین پارامترهایی مانند تغییرات سطح آبخوان، تعداد واحدهای زمین‌شناسی و جنس زمین بیشترین تأثیر را دارند. در ادامه به تحلیل رابطه فرونشست با هریک از این پارامترها پرداخته شده است.

۴-۲-۱- تحلیل رابطه فرونشست با تغییرات سطح آبخوان

یکی از اصلی‌ترین عوامل فرونشست زمین، تغییرات میزان آبهای زیرزمینی است که با تغییرات سطح آبخوان نشان داده می‌شود. به منظور تحلیل رابطه فرونشست با این پارامتر چند نقطه بحرانی و غیربحرانی از نظر میزان فرونشست، در نظر گرفته شد. احمدآباد مستوفی (P3) و بالابان (P7) به عنوان نقاط بحرانی و جعفرآباد جنگل (P11) و اسکمان (P5) به عنوان نقاط غیربحرانی انتخاب شدند. رابطه میزان فرونشست جمعیتی با تغییرات سطح آبخوان

۴- نتایج و بحث

بعد از وارد کردن اطلاعات زمین‌شناسی لایه‌ها، آب‌شناسی و همچنین نرخ پمپاژ سالیانه، انتخاب شرایط هیدرولیکی مدل و اعمال شرایط مرزی مدل اجرا شد. در ادامه با انتخاب سال شروع مدل‌سازی و گام زمانی و سال پایانی یافته‌های زیر ارائه شده است.

۴-۱- تخمین فرونشست در سال ۱۴۱۰

همان‌طور که در نتایج صحت‌سنجی ملاحظه شد تطابق بالا و خوبی بین داده‌های واقعی و محاسباتی وجود دارد، بنابراین با اطمینان می‌توان فرونشست در سال‌های آینده را توسط نرم‌افزار تخمین زد. در شکل ۱۲ با فرض ادامه شرایط کنونی تغییرات آبخوان، فرونشست تا سال ۱۴۱۰ توسط نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. نتایج نشان داد فرونشست مدل در طول سال ۱۴۱۰، ۱۳/۱۹ سانتی‌متر و در نقاط بحرانی دشت مثل گلدسته (P24) و بالابان (P7) به ترتیب ۱۷/۱۵ و ۱۸/۳۸ سانتی‌متر خواهد بود.



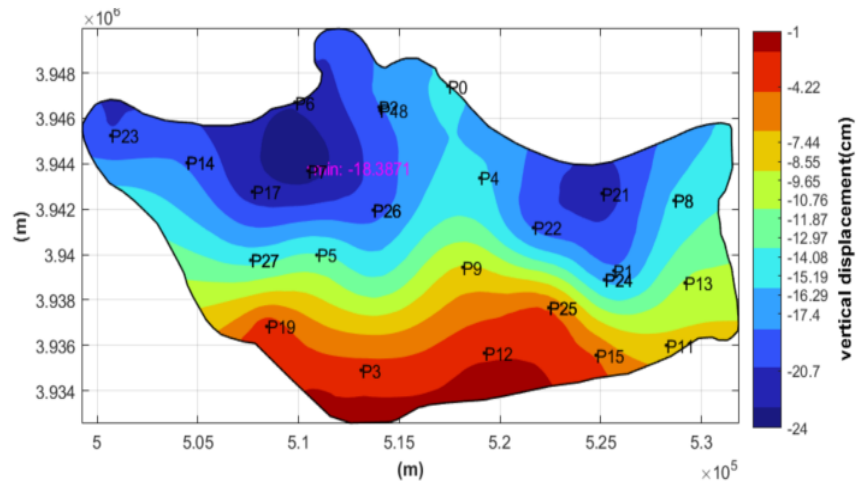


Fig. 12. Contour map of land subsidence in study area at 2031

شکل ۱۲- نقشه فرونشست در محدوده مدل در سال ۱۴۱۰

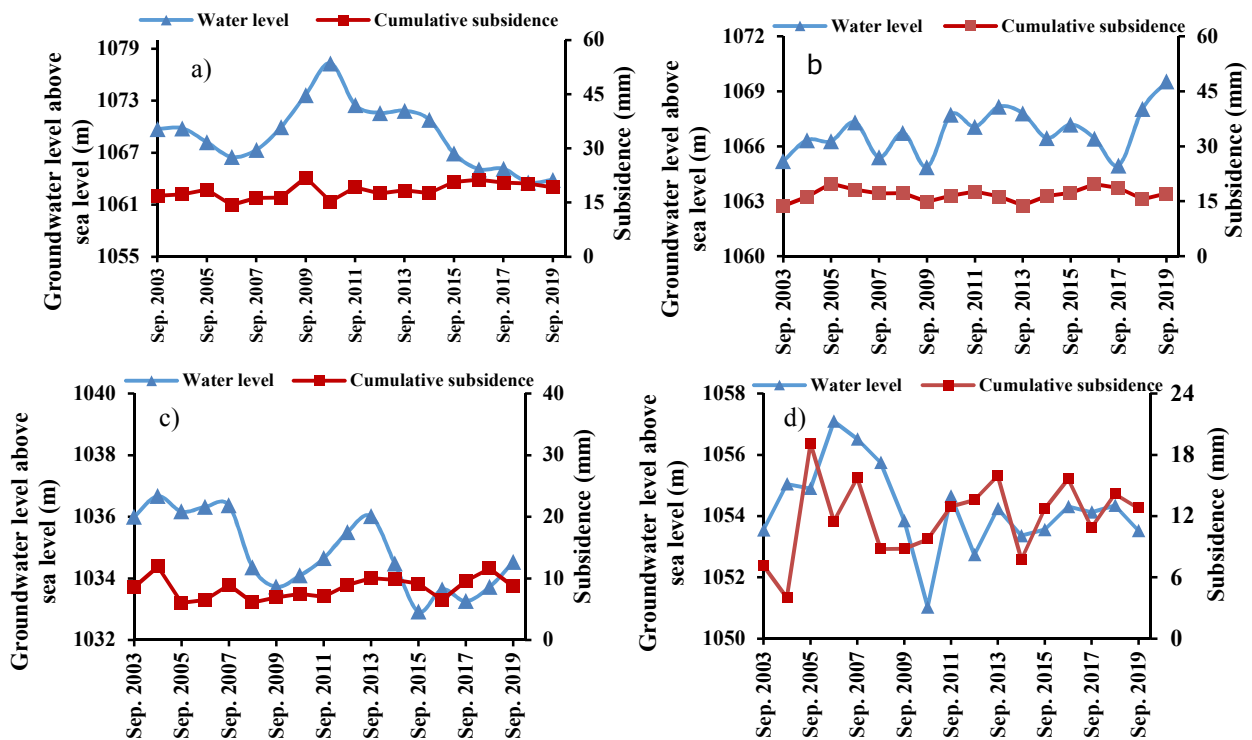


Fig. 13. Diagrams of the relationship subsidence with changes in aquifer levels in points a) Balaban,

b) Ahmadabad Mostofi, c) Jafarabad Jangal and d) Eskman

شکل ۱۳- نمودارهای فرونشست و تغییرات آبخوان (a) بالابان، (b) احمدآباد مستوفی، (c) جعفرآباد جنگل و (d) اسکمان

داشته است، اما در سطح آبخوان کل دشت همان طور که در هیدروگراف شکل ۳ نشان داده شده، روند کاهشی به وضوح مشاهده می‌شود. به منظور تحلیل جزئی‌تر و دقیق‌تر رابطه فرونشست با تغییرات

به طور سالانه در نقاط موردنظر در نمودارهای شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان طور که در نمودارها مشاهده می‌شود میزان فرونشست همواره وجود دارد. این در حالی است که در برخی نقاط سطح آبخوان روند کلی کاهشی و در برخی دیگر روند کلی افزایشی



فرونشست از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ با شیب تغییرات زیاد شده، به طوری که در این مدت میزان فرونشست سالانه از حدود ۱۰ سانتی متر به ۱۶ سانتی متر در سال رسیده است. در حالی که دامنه کم تغییرات سطح آبخوان در جعفرآباد جنگل (P11) (به میزان ۱ متر) باعث تغییرات فرونشستی با دامنه در نهایت ۱/۵ سانتی متر شده که از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ خود را نشان داده است.

ج) هرچه بسامد تغییرات سفره آبخوان کمتر باشد یعنی تغییرات سطح آب در بازه زمانی طولانی تری اتفاق بیفتد، میزان فرونشست زمین کمتر خواهد بود و برعکس هرچه تغییرات در بازه زمانی کوتاه تری رخ دهد، فرونشست حاصل که با تأخیر زمانی مشاهده می شود، مقدار بیشتری خواهد داشت. این امر در مقایسه با نمودارهای بالابان (P7) که تغییرات سطح آبخوان در بازه زمانی طولانی تری اتفاق می افتد و احمدآباد مستوفی (P4) که این تغییرات در زمان های کوتاه تری رخ می دهد، بهتر خود را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در بالابان (P7) از

سطح آبخوان، نمودارهای شکل ۱۴ ترسیم شده است. نتایج حاصل از تحلیل این نمودارها موارد زیر را نشان می دهد:

الف) تأثیر تغییرات سطح آبخوان در فرونشست با تأخیر زمانی ۱ تا ۳ سال خود را نشان می دهد که میانگین تأخیر ۲ ساله فراوانی بیشتری دارد. به عنوان مثال در احمدآباد مستوفی (P4) افزایش سطح آب در سال ۱۳۸۸ باعث کاهش نرخ فرونشست در سال ۱۳۹۰ شده است. یا در بالابان (P7) افزایش نرخ فرونشست ناشی از کاهش سطح آب در سال ۱۳۸۹، سه سال بعد یعنی در سال ۱۳۹۲ خود را نشان داده است. همچنین افزایش نرخ فرونشست سال ۱۳۹۵ در جعفرآباد جنگل (P11) ناشی از کاهش سطح آب دو سال قبل یعنی از سال ۱۳۹۳ بوده است.

ب) با افزایش دامنه تغییرات سطح آبخوان، نرخ فرونشست نیز با مقدار بیشتر و با تأخیر زمانی کمتری خود را نشان می دهد. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود مثلاً کاهش ۴ متری سطح آبخوان از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۹ در اسکمان (P5)، باعث

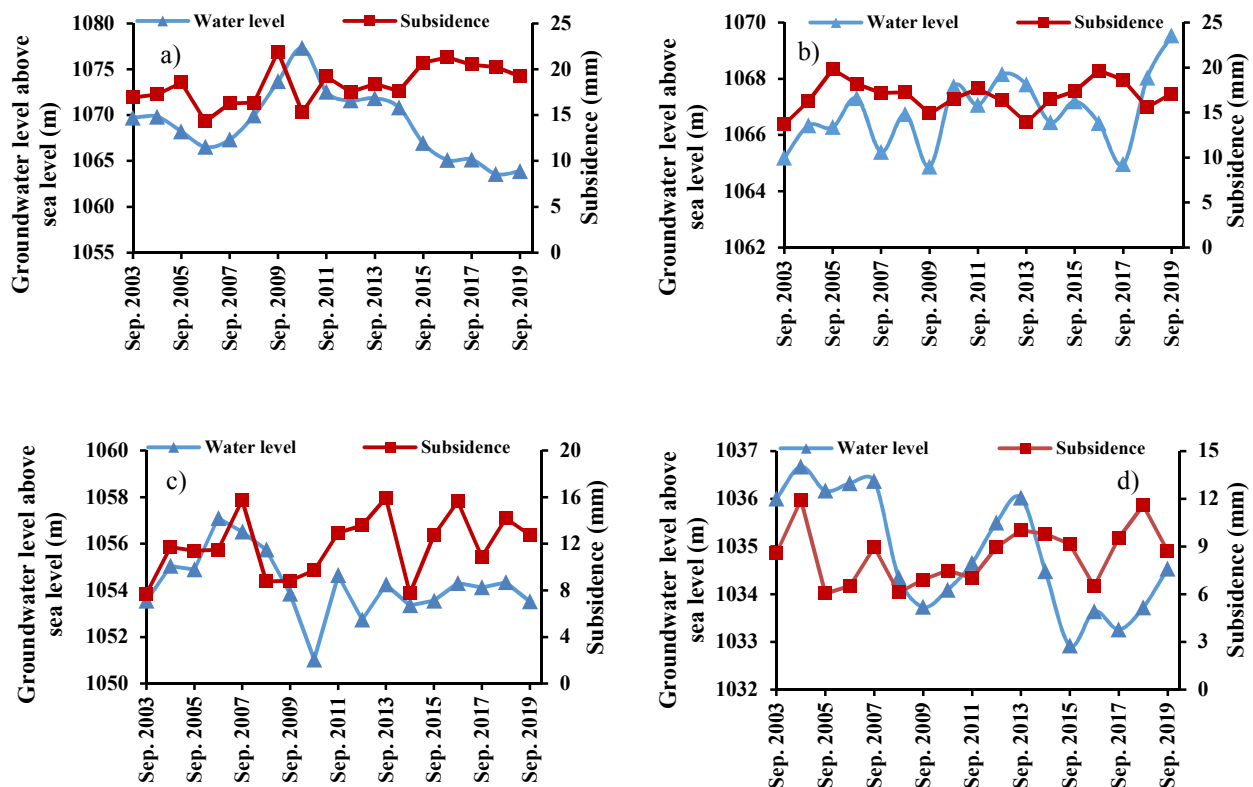


Fig. 14. Combined subsidence and hydrograph diagrams, a) Balaban, b) Ahmadabad Mostofi, c) Eskaman and d) Jafarabad Jangal

شکل ۱۴- نمودارهای ترکیبی فرونشست و هیدروگراف (a) بالابان، (b) احمدآباد مستوفی، (c) اسکمان و (d) جعفرآباد جنگل



مقایسه با رسوبات ریزدانه در وقوع پدیده فرونشست دارند. ضخامت لایه خاک نیز پارامتر تأثیرگذار دیگری است که ارتباط مستقیمی با میزان فرونشست در هر منطقه دارد، به طوری که هر چه ضخامت لایه ریزدانه بیشتر باشد احتمال فرونشست بیشتر است. بنابراین تفاوت میزان فرونشست یا تأخیر زمانی آن در برخی از نقاط نسبت به نقاط دیگر با تغییرات سطح آبخوان تقریباً مشابه یا مختلف با فرونشست مشابه، ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه شامل جنس و ضخامت خاک است.

در محدوده مورد مطالعه این نکات خود را در مقایسه نقاط پلانین (P10)، احمدآباد جان‌سپار (P3)، شمس‌آباد (P19) و شاهدشهر (P18) خود را بهتر نشان می‌دهد. در همه این نقاط فرونشست تقریباً روند کلی ثابتی دارد اما هیدروگراف‌های متفاوتی داشته که در پلانین (P10) سطح آب رو به کاهش و در احمدآباد جان‌سپار (P3) و شمس‌آباد (P19) و شاهدشهر (P18) رو به افزایش است. طبق شکل ۱۵ همچنین میزان فرونشست در شمس‌آباد (P19) بسیار زیاد است و در شاهدشهر (P18) کمترین میزان است. دلیل این پدیده (یکسان بودن روند فرونشست در نقاطی با هیدروگراف‌های متفاوت) متفاوت بودن جنس زمین در این نقاط است. طبق بررسی نقشه زمین شکل ۴ در منطقه پلانین (P10) لایه شنی و رسی با ضخامت زیاد و درصد بالای شن وجود دارد که باعث می‌شود علی‌رغم کاهش سطح آب، افزایش محسوسی در فرونشست نداشته باشد. در شمس‌آباد (P19) لایه رسی و شنی با ضخامت زیاد و درصد زیادی رس وجود دارد که برعکس پلانین (P10)، با افزایش سطح آب روند فرونشست کاهش نمی‌یابد. در شاهدشهر (P18) و احمدآباد جان‌سپار (P3) نیز وجود لایه شنی و درشت دانه با ضخامت زیاد باعث عدم کاهش فرونشست با افزایش میزان سطح آبخوان شده و هم‌زمان دلیل میزان کم فرونشست است.

۵- نتایج

در این پژوهش، به کمک نرم‌افزار COMSOL، فرونشست در محدوده مدل محاسبه و داده‌های مدل عددی در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در ۲۴ نقطه منتخب با برداشت‌های تراز یابی، تصاویر تداخل‌سنجی راداری Sentinel 1، هد هیدرولیکی برداشتی و محاسباتی صحت‌سنجی، مقایسه و بررسی شد. ضریب تعیین برابر ۰/۹۷ نشان‌دهنده هم‌بستگی قابل قبول بین مقدار داده‌ها، تطابق

سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۵ کاهش سطح آب به میزان ۱۲ متر وجود داشته، اما نمودار فرونشست که از سال ۱۳۹۲ شروع می‌شود با شیبی ملایم و دامنه تغییرات کمتر از ۵ سانتی‌متر است. یعنی به ازای هر ۱ متر کاهش سطح آب، ۰/۴ سانتی‌متر افزایش فرونشست اتفاق افتاده است. در احمدآباد مستوفی (P4) اما وضعیت برعکس است، یعنی از سال ۸۵ به بعد که هر ساله کاهش و افزایش متناوب تراز سطح آب به میزان کم در نهایت تا ۳ متر وجود داشته، اما تغییرات نرخ فرونشست متناظر آن از سال ۱۳۸۸ به بعد با شیب بیشتر و دامنه تغییرات بیش از ۶ سانتی‌متر رخ داده است. یعنی به ازای هر ۱ متر کاهش تراز سطح آب ۲ سانتی‌متر فرونشست رخ داده است. همان طور که مشاهده می‌شود این مقدار فرونشست ۴ برابر بالاتر (P7) است.

د) شیب تند فرونشست در سنوات اولیه به علت خالی شدن حجم زیادی از آب داخل خلل و فرج بین دانه و فشرده شدن سریع لایه‌های بالایی سفره آبخوان است. با ادامه کاهش سطح و عمق آبخوان و شرایط اتصال هیدرولیکی بین لایه‌های با حجم خلل و فرج نسبتاً کمتری نسبت به سنوات اولیه مواجه شده است. بنابراین فرونشست با آهنگ کمتری نسبت به سنوات اولیه رخ می‌دهد.

۴-۲-۲- تحلیل رابطه فرونشست با تعداد واحدهای زمین‌شناسی و جنس زمین

منطقه مورد مطالعه در دشت تهران- شهریار در برگرفته شش واحد زیر سطحی از هم تفکیک شده است که سه واحد آن را آبخوان و سه واحد دیگر آن را لایه‌های تراکم‌پذیر رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم تشکیل می‌دهند. بنابراین طبق شکل ۶-a منطقه دارای یک سیستم آبخوان چند لایه‌ای است.

جنس لایه‌های مختلف خاک نقش مهمی در تغییر شکل لایه‌های خاک بعد از برداشت آب و فرونشست ناشی از آن دارد. وجود رسوبات دانه ریز مانند سیلت و رس، به دلیل تراوایی بسیار کم اجازه تغذیه و نفوذ آب سریع به آبخوان را نمی‌دهند. ریزدانه‌ها به دلیل عدم حالت الاستیسته و ضریب تحکیم بالایی که دارند، بعد از برداشت بی‌رویه آب دچار تحکیم برگشت‌ناپذیر شده و باعث فرونشست می‌شوند.

از سوی دیگر، رسوبات درشت دانه مانند ماسه و گراول به دلیل نفوذپذیری زیاد و وجود حالت الاستیسته، تأثیر بسیار کمتری در



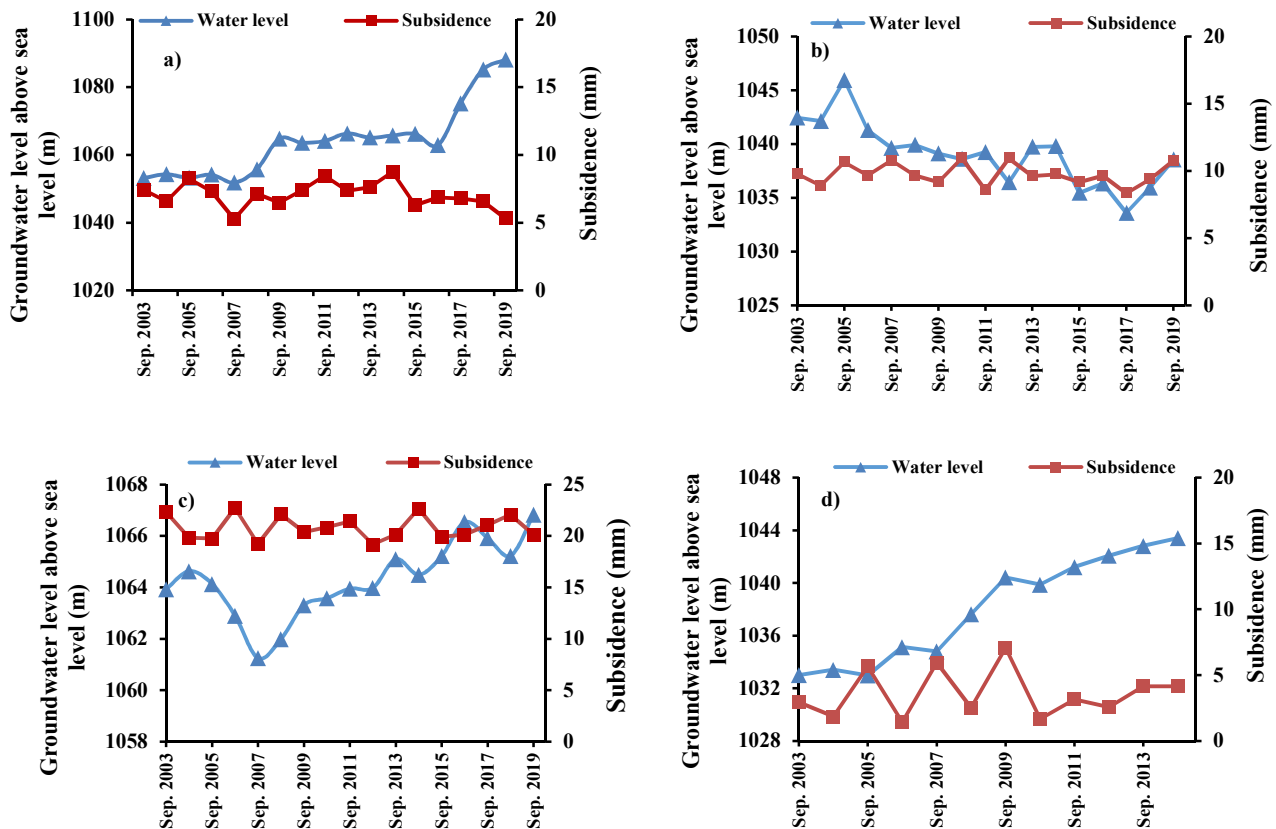


Fig. 15. Combined subsidence diagram and hydrograph of points, a) Ahmadabad Janspar, b) Plaeine, c) Shamsabad and d) Shahedshahr

شکل ۱۵- نمودار ترکیبی فرونشست و هیدروگراف نقاط (a) احمدآباد جانسپار، (b) پلائین، (c) شمس آباد و (d) شاهدشهر

زمین مشاهده می‌شود. همچنین پارامترهای مؤثر بر فرونشست و میزان تغییرات آن نیز بررسی و تحلیل شد. بر اساس نتایج حاصل، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر فرونشست این منطقه، تغییرات سطح تراز آبخوان به علت افزایش زمین‌های اراضی نوآباد کشاورزی، تراکم چاه‌های کشاورزی مجاز و غیرمجاز با دبی تخلیه بالا، ساختارهای زمین‌شناسی از پیش موجود در منطقه و تغییرات شدید تراز ارتفاعی سنگ کف بود.

همچنین دامنه تغییرات تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی نیز از جمله عوامل مؤثر بر الگو و نرخ فرونشست بوده‌اند. به نحوی که تأثیر تغییرات سطح آبخوان در فرونشست با تأخیر زمانی ۱ تا ۳ سال خود را نشان می‌دهد که میانگین تأخیر ۲ ساله فراوانی بیشتری دارد. همچنین با افزایش دامنه تغییرات سطح آبخوان، نرخ فرونشست نیز با مقدار بیشتر و با تأخیر زمانی کمتری خود را نشان می‌دهد و هرچه بسامد تغییرات سفره آبخوان کمتر باشد یعنی

بالا و خوب تصاویر تداخل‌سنجی راداری با نقشه پهنه‌های فرونشست حاصل از داده‌های نرم‌افزار، شباهت کامل منحنی تراز آب زیرزمینی در دو حالت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده پیرومترها در سال آبی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵ و نزدیک شدن مقدار مجذور میانگین مربعات خطا به سمت صفر و مقدار ضریب کارایی بیش از ۰/۵ و نزدیک شدن آن به سمت ۱ حاصل شد. سپس متوسط نرخ فرونشست محدوده در طول سال ۱۴۱۰ به میزان ۱۳/۱۹ سانتی‌متر و در نقاط بحرانی ۱۸/۳۸ سانتی‌متر تخمین زده شد.

نتایج نشان داد حداکثر نشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های ابتدایی با نرخ بیشتر در لایه بالایی سفره آبخوان ظاهر شده که به مرور زمان پس از پر شدن خلل و فرج بین ذرات خاک با توجه به ارتباط هیدرولیکی بین لایه‌ها با سرعت کمتری نسبت به گذشته در لایه‌های فوقانی سطح آبخوان و سطح



آبخوان ارتباط مستقیم‌تر و واضح‌تری با تغییرات فرونشست این منطقه دارد.

۶- قدردانی

نویسندگان، از همکاری مدیران و کارشناسان آب منطقه‌ای تهران و آقای مهندس سجاد نجفی قدردانی می‌کنند.

تغییرات سطح آب در بازه زمانی طولانی‌تری اتفاق بیفتد، میزان فرونشست زمین کمتر خواهد بود. سایر پارامترهای مؤثر بر فرونشست این منطقه، جنس زمین و تعداد واحدهای زمین‌شناسی بوده است. وجود لایه‌های ریزدانه و رسی به‌خصوص زمانی که ضخامت زیادی هم داشته باشند نیز عاملی مؤثر و مربوط به پارامتر جنس زمین است. البته نتیجه کلی حاکی از آن بود که تغییرات سطح

References

- Biot, M. A. 1955. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, 26, 182-185.
- Biot, M. A. 1956. General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. *Journal of Applied Mechanics*, 23(1), 91-96.
- Biot, M. A. 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, 33, 1482-1498.
- Guo, H., Wang, L., Cheng, G. & Zhang, Z. 2015. Groundwater-abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 17-21.
- Hsieh, P. A. 1996. Deformation-induced changes in hydraulic head during ground-water withdrawal. *Groundwater*, 34, 1082-1089.
- Hu, R., Yue, Z., Wang, L. U. & Wang, S. 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76, 65-77.
- Janbaz Fotmi, M., Kholghi, M., Abdeh Kolahchi, A. & Roostaei, M. 2020. Investigation of land subsidence due to changes in groundwater water level using radar differential interferometry method- a case study of Qazvin province. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 133-147. (In Persian)
- 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), 95-111. (In Persian)
- 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. *Engineering Geology, Tarbiat Modares University*. Tehran, Iran. (In Persian)
- Mahmoudpour, M., Khamehchian, M., Nikoudeh, M. R. & Ghassemi, M. R. 2013. Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. *JGeope*, 3(2), 49-62.
- 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*, 28(112), 219-229. (In Persian)
- Multiphysics, C. 2015. Comsol Multiphysics, Software Guide Version 5.1.
- Nadiri, A., Monafi Azar, A. & Khamehchian, M. 2018a. Comparison of aquifer subsidence vulnerability in southwestern Tehran plain with simple weighting model and genetic algorithm. *Journal of Kharazmi Earth Sciences*, 4(2), 199-212. (In Persian)
- Nadiri, A., Taheri, Z., Barzegari, G. & Dedeban, K. 2018b. Providing a framework for estimating aquifer subsidence potential using genetic algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 182-194. (In Persian)



- Papi, R., Attarchi, S. & Soleimani, M. 2020. Analysing time series of land subsidence in the west of Tehran Province (Shahriar Plain) and its relation to groundwater discharge by InSAR technique. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(1), 109-128. (In Persian)
- Sharifi Kia, M. 2010. Investigation of the consequences of subsidence phenomenon in residential lands and plains of Iran. *Journal of the Iranian Geological Engineering Association*, 3(3-4), 43-58. (In Persian)
- 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*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Shemshaki, A., Bolourchi, M. J. & Entezam Soltani, I. 2005. Study of land subsidence in Tehran-Shahriar plain. *9th Soil Science Congress of Iran*. Tehran, Iran. (In Persian)
- Taheri Tizro, A. 2008. *Groundwater*. Razi University Press, second edition. Kermanshah, Iran. (In Persian)
- Tehran Regional Water Company, 2020. *Inventory of the third Period of Piezometers and Wells in Operation of Tehran-Shahriar Aquifer*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Tehran Regional Water Company, 2016. Artificial recharge studies through wide open wells in Tehran-Shahriar plain, *The 15th Iranian National Hydraulic Conference*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Terzaghi, K. 1925. Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay. *Engineering News-Record*, 95, 874-878.
- Tran, D. H., Wang, S. J. & Nguyen, Q. C. 2022. Uncertainty of heterogeneous hydrogeological models in groundwater flow and land subsidence simulations—a case study in Huwei Town, Taiwan. *Engineering Geology*, 298, 106543.
- Verruijt, A. 2018. Numerical and analytical solutions of poroelastic problems. *Geotechnical Research*, 5, 39-50.
- Xiong, W. 2010. Applications of Comsol multiphysics software to heat transfer processes. PhD. Thesis, Arcada University of Applied Sciences, Helsinki, Finland.
- Zeng, C. F., Wang, S., Xue, X. L., Zheng, G. & Mei, G. X. 2021. Evolution of deep ground settlement subject to groundwater drawdown during dewatering in a multi-layered aquifer-aquitard system: insights from numerical modelling. *Journal of Hydrology*, 603, 127078.
- Zhang, Q. L., Chen, Y. X., Jilani, G., Shamsi, I. H. & Yu, Q. G. 2010. Model Avswat apropos of simulating non-point source pollution in Taihu lake basin. *Journal of Hazardous Materials*, 174, 824-830.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

