

Technical Paper

Investigation of the Effective Factors on the Subsidence in Tehran South-East Plain Due to Excessive Groundwater Exploitation

Omid Tavasoli^{1*}, Hasan Karbin², Mina Torabi³ and Adel Asakereh⁴

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran

3- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

* Corresponding author, Email: o.tavasoli@iauet.ac.ir

Received: 19/01/2019

Revised: 05/05/2019

Accepted: 05/05/2019

Abstract

Land subsidence is amongst the issues that occur due to excessive groundwater exploitation, causing deep gaps in the ground, tilting of wells and collapse of buildings. In most areas of the country, the main reason for this phenomenon is water table draw-down, which is caused by the lack of rainfall due to climate change and excessive exploitation of groundwater. In this paper, in order to investigate the effective factors on the subsidence in the South-East plain of Tehran, various stations in this area have been studied and numerically modeled using the finite element method. GEOSTUDIO software has been used to analyze the geotechnical and hydraulic data in the region in comparison to the results of previous studies. The results indicated that the level of water changes and depth of drilled boreholes had an effect on the amount of land subsidence, and with decreasing water recharge to groundwater table, the subsidence rate increased by up to 55%. Also by increasing the percentage of changes in water exploitation, the subsidence rate was increased by about 40%.

Keywords: Finite Element method, Ground subsidence, South-East Tehran plain, Groundwater exploitation, Water return.

مقاله کاربردی

بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست دشت جنوب شرقی تهران بر اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی

امید توسلی^{۱*}، حسن کاربین^۲، مینا ترابی^۳ و عادل عساکره^۴

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: o.tavasoli@iauet.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

چکیده

یکی از مسائلی که در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد فرونشست زمین است، که باعث ایجاد شکاف‌های عمیق در سطح زمین، کج شدن لوله‌های چاه، خرابی ساختمان‌ها و لوله‌زائی چاه‌ها می‌شود. دلیل اساسی این پدیده در اغلب پهنه‌های کشور، افت سطح ایستابی بوده، که ناشی از کمبود بارندگی‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی است. در این مقاله، برای بررسی عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست دشت جنوب شرقی تهران، ایستگاه‌های برداشت مختلف این محدوده با مدل‌سازی عددی به کمک روش اجزای محدود مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی ساختگاه منطقه و تحلیل آن، از نرم‌افزار GEOSTUDIO استفاده شده و با به کارگیری داده‌های ژئوتکنیکی و هیدرولیکی منطقه و همچنین نتایج تحقیقات گذشته، نسبت به صحت‌سنجی اقدام شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که میزان تغییرات سطح آب و عمق حفاری گمانه‌ها بر میزان فرونشست زمین مؤثر بوده و با کاهش میزان برگشت آب به سفره آب زیرزمینی، میزان فرونشست تا ۵۵٪ افزایش یافته و همچنین با افزایش درصد تغییرات برداشت آب، میزان فرونشست نیز در حدود ۴۰٪ بیشتر شده است.

کلمات کلیدی: فرونشست زمین، دشت جنوب شرقی تهران، برداشت آب‌های زیرزمینی، برگشت آب، روش اجزای محدود.

بررسی‌های سازمان نقشه‌برداری کشور نشان می‌دهد که حفر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق به علت خشک‌سالی‌های چندسال اخیر و تأسیس چاه‌های جدید، موجب کاهش تدریجی منابع آب افت سطح آب، شور و لم‌یزرع شدن مزارع، خشک شدن بسیاری از چاه‌ها و در نتیجه باعث فرونشست سطح زمین شده است (Panda et al., 2015).

در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان، برداشت آب از منابع زیرزمینی از میزان تغذیه سالانه آن‌ها بیشتر است. این امر به معنای استخراج و استفاده از آبی است که در طول هزاران سال در لایه‌های آبدار زمین ذخیره شده و با انجام این کار، سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه روز به روز افت کرده و سرانجام به جایی خواهد رسید که آبی برای استخراج وجود نخواهد داشت. پایین افتادن سطح آب‌های زیرزمینی به معنای خشک شدن مناطق پایین دست (مناطق با ارتفاع کمتر که آب جاری در لایه‌های آبدار تحت اثر جاذبه به سمت آن‌ها جریان می‌یابند) و از بین رفتن چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌های آن است (de Graaf et al., 2017). در سال ۲۰۰۵ میلادی چین، هند و ایران رتبه‌های اول تا سوم برداشت بیش از حد از منابع زیرزمینی آب را داشته‌اند. ایران به‌طور متوسط سالانه ۵ میلیارد مترمکعب آب بیش از ظرفیت لایه‌های آبدار زمین از آن‌ها بهره‌برداری می‌کند، به‌طوری که این میزان آب معادل آب مورد نیاز برای تولید یک سوم کل غله تولیدی این کشور است. براساس گزارش ارائه شده، حدود یک سوم جمعیت جهان وابسته به آب زیرزمینی بوده و بیش از ۷۰٪ منابع آب زیرزمینی به‌مصرف کشاورزی می‌رسد. بنابراین توسعه کشاورزی و صنعت باعث افزایش برداشت از منابع مذکور شده و برداشت بی‌رویه از مخازن آب زیرزمینی موجب شده که میزان تغذیه آبخوان جواب‌گویی برداشت نبوده و سطح آب زیرزمینی افت نماید (Agormoorthy and Hsu, 2015).

افت سطح آب زیرزمینی مشکلاتی هم‌چون خشک شدن چاه‌های آب، کاهش دبی رودخانه و آب دریاچه‌ها، تنزل کیفیت آب، افزایش هزینه پمپاژ و استحصال آب و همچنین فرونشست زمین را به دنبال دارد. اما برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، خسارات جبران‌ناپذیری به ذخیره آب‌های زیرزمینی و همچنین خاک وارد کرده است، به‌طوری که حفر چاه‌های عمیق در بسیاری از مناطق، موجب پایین رفتن شدید آب شیرین و بالا آمدن آب شور شده است (Wang et al., 2014; Hashemi, 2013). به‌علاوه، پیشگیری از پمپاژ بی‌رویه آب و در صورت امکان استفاده از آب‌های سطحی به جای آب زیرزمینی، تغذیه سفره‌های زیرزمینی توسط آب‌های سطحی و در صورت امکان، انتقال آب از حوضه‌های مجاور و یا تغذیه توسط فاضلاب شهری، از جمله راه‌کارهای مقابله با فرونشست زمین است (Alen, 1998). این پیامد، مشکلاتی شامل از بین رفتن بخشی از اراضی کشاورزی، هدررفت مقدار

نشست یکی از پدیده‌های مخاطره‌آمیز زمین‌شناسی است، که در اثر فعالیت بشری هم‌چون استخراج طولانی آب، نفت و گاز از مخازن و معادن زیرزمینی می‌تواند تشدید شود. هنگامی که سفره آبدار تحت بهره‌برداری قرار می‌گیرد، نیروهای متعادل‌کننده سفره آبدار در اثر پمپاژ آب زیرزمینی دچار تغییر شده و سرانجام فرونشست رخ می‌دهد. میزان نرخ بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر با رشد چشمگیری همراه بوده و همین موضوع باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی شده است. یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در حوزه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی وجود دارد، پدیده نشست بوده، که تاکنون باعث تحمیل خسارات و بروز مشکلات عدیده‌ای برای بهره‌برداران از این حوزه‌ها شده است. فرونشست زمین در اثر بهره‌برداری آب زیرزمینی موجب تغییرات ریخت‌شناسی در سطح زمین شده، به‌طوری که با توجه به کاربری اراضی در منطقه‌ای که تحت تأثیر فرونشست قرار گرفته است، پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مختلفی را دربردارد. از مهم‌ترین عوارض فرونشست می‌توان به گود افتادگی‌های ناحیه‌ای، تخریب و خسارت به راه‌های ارتباطی، ترک خوردگی زمین، فروریزش ناگهانی سطح زمین، سیل‌گیر شدن زمین، آسیب دیدن و در معرض خطر قرار گرفتن شریان‌های حیاتی و وارد شدن خسارت به ساختمان‌ها اشاره کرد. نحوه ترک خوردن ساختمان‌ها در اثر فرونشست با ترک خوردن و خسارت دیدن آن‌ها در اثر نیروهای برشی کاملاً متفاوت است. متراکم شدن بافت خاک باعث کاهش نفوذپذیری در هنگام وقوع بارندگی می‌شود، که این پدیده علاوه بر پایداری زمین و ساختمان‌های موجود، موجب غیرقابل استفاده شدن آبخوان در بارندگی‌های بعدی شده و برای همیشه منطقه را از بهره‌برداری آب‌های زیرزمینی بی‌نصیب می‌سازد (Tisell, 2013).

در ایجاد پدیده فرونشست در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی، عوامل زمین‌شناسی و آب‌شناسی بسیاری مانند تخلخل مصالح تشکیل دهنده لایه‌های خاک، تراکم، جنس و ترکیب لایه‌ها، نحوه پمپاژ، ساختار زمین‌شناسی منطقه، هدایت هیدرولیکی لایه‌های آبدار، بارندگی و دما همگی از عوامل تاثیرگذار هستند. بررسی فرونشست زمین در ایران سابقه ۳۵ ساله داشته و این مشکل به‌طور روزافزون در بسیاری از مناطق کشور به دلیل استخراج بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی خودنمایی می‌کند (Amigh Pay et al., 2010). این پدیده در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را برای مناطق مختلف ایجاد کرده و شناسایی میزان فرونشست و برآورد نرخ آن، نقش به‌سزایی در مدیریت و کنترل این پدیده خواهد داشت.

زیادی از آب کشاورزی، تحمیل هزینه‌های اضافی به کشاورزان و از دست رفتن دائمی بخشی از گنجایش آبخوان در واقع کاهش سطح آب‌های می‌شود، به همراه دارد. زیرا با از دست رفتن خلل و فرج و توان ذخیره‌سازی آب سفره قابلیت باروری و تغذیه طبیعی را از دست خواهد داد و حتی با انجام طرح‌های تغذیه مصنوعی نیز امکان بازگرداندن ظرفیت ذخیره از سفره آب زیرزمینی سلب خواهد شد (Hung et al., 2010; Carnivati and Martinelli, 2002).

(Rajabi and Ghorbani (2016) اقدام به بررسی پدیده فرونشست زمین در اثر خروج بی‌رویه آب در شهر اراک نموده‌اند. آن‌ها در این پژوهش به دنبال یافتن رابطه‌ای بین سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست در شهر اراک بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ بوده و نشان دادند که در این ۶ سال حدود ۳۶ متر کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه میغان اراک به وجود آمده است. (Wang et al. (2015) اقدام به بررسی تکنیکی برای برآورد دبی آب خروجی و فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های غیرخطی نموده و بعد از مدل‌سازی یک وضعیت طبیعی در نرم‌افزار، نتیجه گرفتند که نتایج حاصل از تحلیل عددی از نتایج میدانی بیشتر است. (Notti et al. (2016) فرونشست زمین در شهر گرانا اسپانیا طی یک دهه تا سال ۲۰۱۴ را بررسی و با نصب پیژومترهایی در محل پمپ‌های خروجی آب منطقه، تغییرات سطح آب زیرزمینی را اندازه‌گیری نموده و رابطه‌ای میان فرونشست زمین و سطح تراز آب زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد دادند.

(Mahmoudpour et al. (2016) به مدل‌سازی عددی و تخمین فرونشست زمین در اثر استخراج آب‌های زیرزمینی در دشت‌های جنوب غربی تهران با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PMWIN پرداخته و با کاربرد مدل پیشنهادی خود، میزان فرونشست نهایی در سال ۲۰۱۸ و نرخ فرونشست را برای منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی کرده‌اند. لشکری پور و بارانی (۱۳۸۵) افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت کاشمر را در اثر توسعه سریع کشاورزی همراه با رشد سریع جمعیت و افزایش نیاز آبی در دهه‌های اخیر بررسی کرده و نشان دادند که افت ممتد سطح آب زیرزمینی با ایجاد پدیده فرونشست و شکاف و ترک‌های طولی در سطح زمین، سبب شده تا این دشت در زمره دشت‌های بحرانی کشور قرار گیرد. باقری و کاظمی (۱۳۸۵) با شبیه‌سازی هیدرولیک جریان آب زیرزمینی، به بررسی نوسانات سطح آب و فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی در دشت رفسنجان پرداخته و اشاره کردند که این مسئله باعث افت سطح آب به اندازه ۱۷ متر شده و ایجاد ترک در ساختمان‌ها، شکاف در زمین‌های کشاورزی و شکسته شدن لوله جدار چاه‌ها شده است. رنجبر و جعفری (۱۳۸۸) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای آمار

میزان سطح آب زیرزمینی چاه‌ها شهر اشتهارد در دوره زمانی ۱۳۷۹ الی ۱۳۸۳ را مطالعه کرده و اقدام به بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین در دشت اشتهارد نمودند. مرندی و واعظی (۱۳۸۸) در مطالعه موردی شهر کرمان، اثرات مخرب برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرسطحی و فرونشست‌های پدید آمده را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر سطح آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف شهر کرمان دچار نوسان شده و این تغییرات ناشی از پدیده خشکسالی، افزایش تعداد چاه‌های عمیق، رشد جمعیت، افزایش تعداد کارخانه‌های صنعتی، توسعه کشاورزی در منطقه است. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که در قسمت‌هایی که برداشت آب‌های زیرزمینی شدت بیشتری داشته، میزان فرونشست بیشتر بوده و به بیش از ۱۰ سانتیمتر در سال می‌رسد.

جاودانیان و احمدی دارانی (۱۳۹۵) با بررسی میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی و وضعیت فرونشست شهر دامنه اصفهان، نشان دادند که افت سطح آب زیرزمینی، اثری مستقیم بر ایجاد و گسترش فرونشست در محدوده این شهر داشته و بیشترین میزان بهره‌برداری از آبخوان‌های منطقه به مصارف کشاورزی اختصاص دارد. همچنین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در بازه سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳ به طور متوسط به میزان ۲۰ متر افت داشته است. میراحمدی و طالب بیدختی (۱۳۹۵) طرح تغذیه مصنوعی منابع آب‌های زیرزمینی دشت شهریار واقع در جنوب غرب تهران را به عنوان راه‌کاری برای جلوگیری از فرونشست زمین بررسی و مطالعه نموده و نشان دادند که با توجه به برداشت بیش از حد مجاز منابع آب‌های زیرزمینی در این دشت که باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین شده، می‌تواند به عنوان راه‌حل موثری کاربرد داشته باشد.

بهرامی و بذرافشان (۱۳۹۶) به بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در دشت میناب پرداختند، که از جمله مناطق دارای فرونشست بالا در استان هرمزگان است. برای مطالعه فرونشست در این دشت از آمار میزان و عمق سطح تراز آب زیرزمینی و آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک استفاده شده و هیدروگراف واحد آبخوان دشت میناب نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۹۰ حالت نزولی داشته است و در این دوره زمانی سطح آب زیرزمینی در حدود ۹۳٪ کاهش یافته است. مطابق آمار ارائه شده توسط ایشان، میزان تخلیه کل آب در حدود ۱۷۸۰ میلیون مترمکعب بوده و ۹۷٪ آب تخلیه شده دارای مصارف آب شرب شهری و روستایی و کشاورزی است. کیانی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی پتانسیل فرونشست شهر کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS پرداخته و نشان دادند که وضعیت افت آب‌های زیرزمینی در طی دوره آماری ۱۵ ساله به میزان حدود ۱۴ متر بوده و می‌تواند در

فرونشست کلی منطقه تاثیر به‌سزایی داشته باشد.

متغیرهای میزان برداشت، میزان برگشت آب و شیب منطقه، براساس بررسی‌های میدانی و گزارش‌های آبی و هیدروژئولوژیکی از دشت مورد بررسی در نظر گرفته شده، که به‌منظور انجام این پژوهش، آمار ۱۸ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت و همچنین مقادیر بارش این دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. درصد تغییرات هریک از متغیرهای میزان برداشت و برگشت آب براساس بازه زمانی مدل‌سازی، در نهایت به‌صورت میزان افت سطح آب زیرزمینی محاسبه و به‌صورت شرایط مرزی متناسب لحاظ شده است.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر تهران در دامنه جنوبی رشته کوه البرز و حاشیه شمالی‌ترین فرونشست ایران مرکزی استقرار یافته است. تهران بر روی نهشته‌های آبرفتی کوارتزی واقع شده و این حوضه رسوبی، گستره وسیعی از اراضی کوهپایه‌های بخش جنوبی البرز مرکزی حفاصل رودخانه‌های جاجرود در شرق و کن در غرب را شامل می‌شود. گستره تهران از شمال به دامنه‌های جنوبی البرز، از شرق به ارتفاعات قوچک، سه پایه و بی‌بی‌شهربانو، از غرب به گستره کرج و از جنوب به دشت هموار تهران محدود شده، که ارتفاع بیشینه و کمینه آن از سطح دریا به ترتیب در حدود ۱۴۰۰ و ۹۵۰ متر است. دشت‌های استان تهران با شیب ملایم از شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده و این دشت‌ها به‌دلیل هموار بودن و وجود خاک‌های آبرفتی، شرایط خوبی را برای فعالیت‌های اقتصادی، صنعتی و کشاورزی فراهم آورده است. واحدهای زمین‌شناسی مختلف در محدوده جنوب تهران دارای سازند D به‌عنوان خاک ریزدانه غالب هستند و از نظر توپوگرافی اصلی منطقه، جنوب تهران را بیشتر دشت‌های آبرفتی تشکیل می‌دهند (TRWC, 2012).

از دیدگاه کلی آب و هوایی، گستره تهران از شمال به جنوب و با تأثیرپذیری از توپوگرافی، تحت تأثیر آب و هوای معتدل تا سرد کوهستانی در منطقه مرتفع شمالی، آب و هوای گرم و نیمه خشک در منطقه کوهپایه‌ای و آب و هوای خشک و نیمه بیابانی در اراضی مرکزی و جنوبی قرار دارد، به‌طوری‌که با داشتن میانگین درجه حرارت سالانه حدود ۲۷ درجه سانتی‌گراد و متوسط رطوبت نسبی معادل ۵۰ درصد، در تابستان‌ها گرم و در زمستان سرد و معتدل بوده و احتمال یخبندان در ۵ ماه انتهایی سال در مناطق شمالی وجود دارد. الگوی تغییر دمای تهران بدین صورت است که از شمال به جنوب به تدریج افزایش یافته، ولی از غرب به شرق چندان تفاوتی نمی‌کند. متوسط میزان بارش سالانه نیز از ۲۵۰ میلی‌متر در مناطق شمالی تا ۱۰۰ میلی‌متر در جنوب دشت تهران متغیر بوده و بیشترین بارندگی در فصول سرد و اوایل

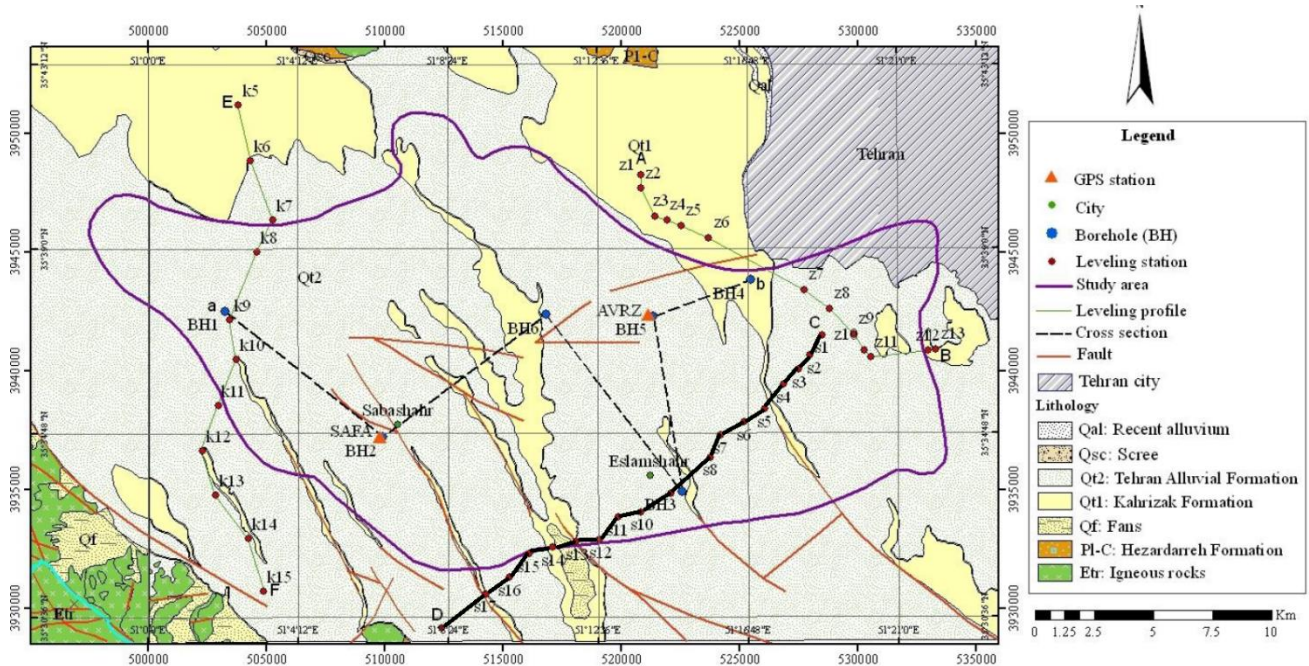
از جمله موقعیت‌هایی که به‌طور جدی با مخاطرات نشست زمین مواجه است، دشت محدوده جنوب استان تهران بوده و بررسی‌ها و گزارش‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که در میان مناطق ۲۲ گانه تهران، در مناطق شمالی و به‌طور کلی در شهر تهران، فرسودگی تأسیسات شهری از جمله فرسودگی لوله‌های آب و نشست آن و همچنین حفاری‌های صورت گرفته از جمله شبکه مترو، دو عامل مهم برای فرونشست هستند. اما در سایر مناطق که عمدتاً در جنوب تهران واقع هستند، به‌دلیل افت آب‌های زیرزمینی و آثار تکتونیکی آن، نشست زمین خطری جدی محسوب می‌شود و باید به‌دقت بررسی و مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، به تحلیل فرونشست زمین در دشت جنوب شرقی استان تهران در اثر برداشت آب و تغییرات تراز آب زیرزمینی پرداخته شده و سپس با استفاده از نتایج مقالات معتبر، اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود GEOSTUDIO انجام و ارزیابی شده است. اطلاعات و داده‌های اولیه شامل مشخصات ژئوتکنیکی و هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه هستند، که با استفاده از بانک داده‌های موجود در شرکت آب و فاضلاب استان تهران، مشاهدات عینی و صحرایی و پژوهش‌های گذشته جمع‌آوری شده و به‌عنوان داده‌های ورودی برای ساختگاه منطقه مورد مطالعه، در مدل‌سازی اعمال می‌شوند. از جمله نکات با اهمیت و اطلاعات اساسی در شروع این تحلیل‌ها، مقادیر حجم آب ورودی و خروجی در دوره‌های زمانی مختلف از بستر خاک و محل مصرف آن‌ها در این مناطق بوده، که باید به‌درستی به‌صورت شرایط مرزی و اولیه به نرم‌افزار تخصیص داده شده و پس از تحلیل عددی مسئله، میزان نشست سطح زمین و ضریب اطمینان منطقه محاسبه شود. برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب‌های زیرزمینی به‌دلیل کمبود منابع آب شیرین در مصارف کشاورزی و خانگی، موجب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و تغییر در وضعیت تنش‌های وارده بر خاک شده و پدیده فرونشست را به‌همراه دارد. با توجه به این‌که اطلاعات آماری به‌روز شده و دقیقی از میزان چاه‌های درحال بهره‌برداری و خشک شده در این منطقه وجود ندارد، لذا بررسی تأثیر میزان برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی و برگشت آن به‌صورت درصدی از برداشت متوسط سالانه، دارای اهمیت زیادی در فرونشست خاک بوده و برای جلوگیری از مخاطرات مترتب، باید به‌دقت مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد.

در این تحقیق با بررسی سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده برای متغیرهایی همچون میزان برداشت آب از سفره زیرزمینی و میزان برگشت آب به سفره، میزان اثر هر یک از این متغیرها بر پی‌آمدهای ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. محدوده تغییرات هریک از

بهار گزارش شده است.

با توجه به این که منطقه مورد مطالعه در دشتهای جنوبی تهران در نظر گرفته شده، لذا این نواحی در مدتی از سال دارای بارندگی می باشند و میزان برگشت آب به سفره های آب زیرزمینی

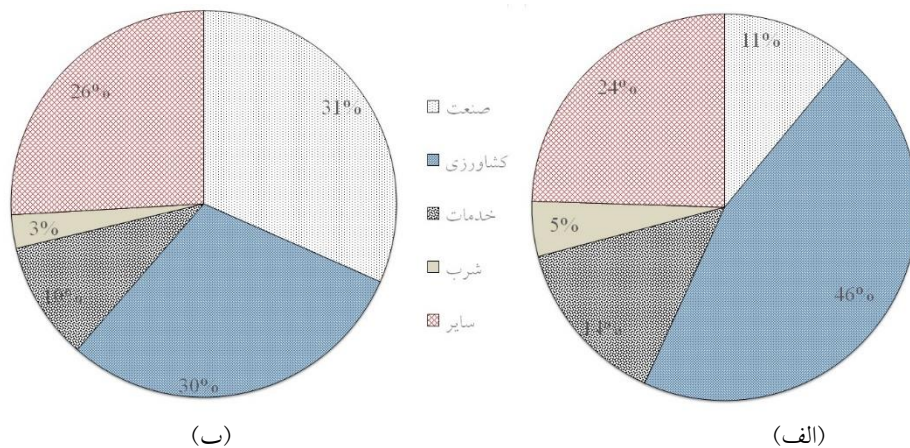
باید در تحلیل ها در نظر گرفته شود. وجود آب برگشتی و آب های زیرزمینی گسترده در این منطقه و ازدیاد برداشت آب از این سفره ها، از دلایل انتخاب این محدوده برای مطالعه در تحقیق حاضر است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در جنوب تهران (Mahmoudpour et al., 2016)

در دشت تهران هیچ رودخانه دائمی وجود ندارد، لذا تأمین آب مورد نیاز کشاورزان وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی داشته و تخلیه اصلی سفره این دشت توسط چاه ها، قنات ها و چشمه ها صورت می گیرد. براساس مدارک اطلاعات پایه منابع آب استان، تعداد کل چاه های رسمی موجود در دشت برابر ۳۳۹۵۷ حلقه، قنات ها معادل ۸۷ رشته و چشمه ها نیز ۶۹ دهنه هستند. طبق محاسبات بیان آب زیرزمینی آبخوان، کل برداشت از منابع آب زیرزمینی، سالانه در حدود ۹۰۳ میلیون مترمکعب بوده، که ۸۵٪ این مقدار توسط چاه های عمیق و نیمه عمیق برداشت شده و الباقی از طریق چشمه ها و قنات ها تخلیه می شود. در مجموع، عوامل تغذیه کننده آبخوان ۸۰۰ مترمکعب محاسبه شده، که

در نتیجه رقمی معادل ۱۱۰ میلیون مترمکعب در سال از حجم آب زیرزمینی کاسته می شود. با توجه به اطلاعات جمع آوری شده در خصوص تعداد چاه های موجود در پهنه جنوبی تهران و همچنین داده های ثبت شده در تحقیقات گذشته، عمده مصرف برداشت آب های زیرزمینی در این مناطق در زمینه های کشاورزی، صنعت، شرب، خدمات و سایر مصارف هستند. با توجه به تحلیل داده های موجود مطابق شکل ۲، مشاهده می شود که عمده چاه های موجود در منطقه به منظور مصارف کشاورزی و صنعتی حفاری شده و بیشترین سهم از برداشت های سالیانه آب برای مصرف در این دو حوزه کاربرد دارند (TRWC, 2012).

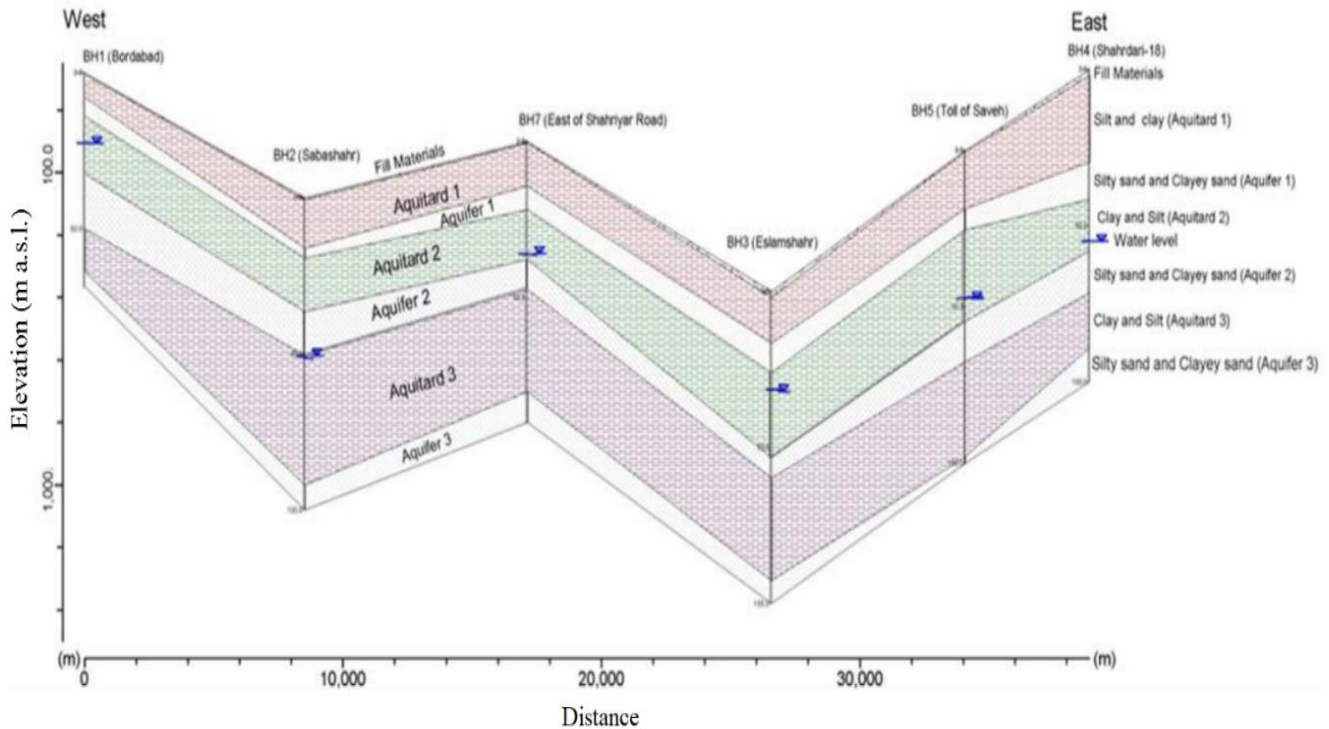


شکل ۲- درصد توزیع و کاربری (الف) تعداد چاه ها و (ب) حجم برداشت سالانه در منطقه مورد مطالعه (TRWC, 2012)

۳- مدل سازی فرونشست زمین در دشت های جنوب تهران و صحت سنجی آن

نرم افزار الهان محدود MODFLOW پرداختند. در شکل ۳ مقطع عرضی هیدروژئولوژی مربوط به سیستم سفره های آب زیرزمینی دشت های جنوب غربی تهران نمایش داده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به تعداد چاه ها و گالری های برداشت آب زیرزمینی به همراه میزان برداشت از آن ها برای بازه زمانی بین ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۲ به تفکیک برای سفره های مختلف در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

(Mahmoudpour et al., 2016) با مدل سازی عددی سه سفره آب زیرزمینی، به مطالعه و تخمین نشست زمین در اثر استخراج آب های زیرزمینی در دشت های جنوب غربی تهران با استفاده از



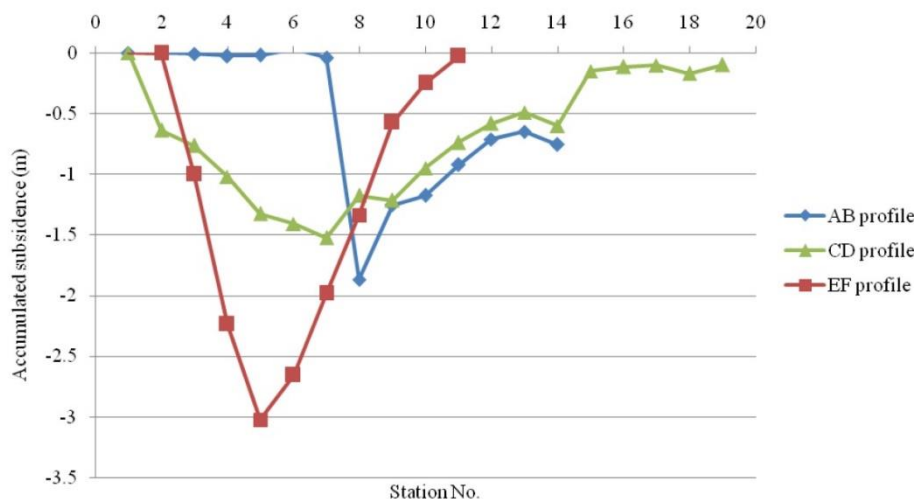
شکل ۳- مقطع عرضی هیدروژئولوژی (Mahmoudpour et al., 2016)

جدول ۱- اطلاعات مربوط به تعداد چاه ها و گالری های برداشت آب زیرزمینی (Mahmoudpour et al., 2016)

سال	تعداد چاه ها	برداشت از چاه ها (میلیون مترمکعب)	تعداد گالری های نفوذ	برداشت از گالری های نفوذ (میلیون مترمکعب)	جمع برداشت (میلیون مترمکعب)
۱۹۶۸	۳۹۰۶	۶۳۸/۸	۵۲۲	۳۹۳	۱۰۳۱/۸
۱۹۸۳	۷۳۰۴	۹۸۵/۷	-	-	-
۱۹۹۴	۸۹۵۰	۹۶۱/۹	۲۸۶	۲۷۲	۱۲۳۳/۹
۲۰۰۳	۲۶۰۷۶	۹۰۱/۴	۷۶	۷۱	۹۷۲/۴
۲۰۱۲	۳۲۵۱۸	۱۸۸۱/۸	۱۶۷	۲۶	۱۹۰۷/۸

شده، که این خط از ایستگاه K5 شروع شده و در ایستگاه K15 به پایان می رسد. پس از تحلیل های انجام شده، نشان دادند که میزان فرونشست ایستگاه های مختلف مفروض در پروفیل های زمین در دشت جنوبی تهران مطابق نمودارهای شکل ۴ بوده و پیش بینی نمودند که با فرض پمپاژ ثابت در برداشت آب زیرزمینی، میزان فرونشست زمین در این محدوده از سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۱۸ به میزان ۳۳ سانتیمتر افزایش می یابد (Mahmoudpour et al., 2016).

مطابق شکل ۱، پهنه جنوبی تهران به سه پروفیل تقسیم شده است. اولین پروفیل در امتداد خط AB واقع در شمال شرق و شامل ۱۳ ایستگاه بوده است. این خط از ایستگاه Z1 آغاز شده و در ایستگاه Z13 به پایان می رسد و دارای طول تقریبی ۱۶/۳۶ کیلومتر است. پروفیل دوم در طول خط CD به طول تقریبی ۳۸ کیلومتر، در جنوب شرقی منطقه در جهت NE-SW قرار داشته و شامل ۱۸ ایستگاه پایه است. این خط از ایستگاه S1 شروع شده و در ایستگاه S18 به پایان می رسد. همچنین پروفیل شمال-جنوب غربی منطقه با ۱۱ ایستگاه با خط EF نشان داده

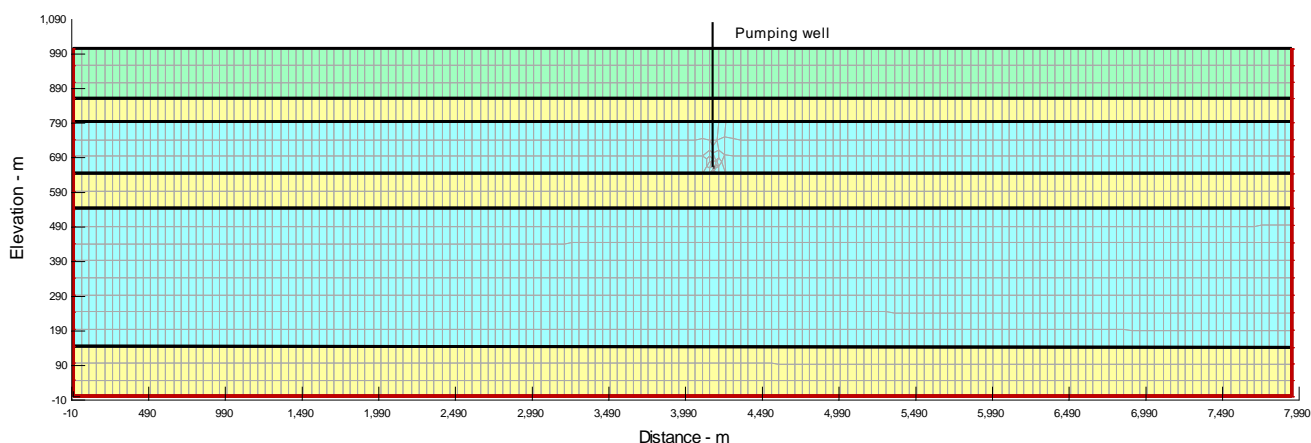


شکل ۴- میزان فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران (Mahmoudpour et al., 2016)

به واسطه پمپاژ آب در چاه‌های برداشت مختلف در مقطع CD (دارای ۱۸ ایستگاه برداشت)، به صورت پروفیل نشست از اتصال میزان حداکثر نشست ایجاد شده در هر ایستگاه محاسبه شده است. صحت‌سنجی مدل برای کلیه ایستگاه‌های موجود در پروفیل CD انجام و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده، که نتایج فقط برای ایستگاه Stat.7 به‌عنوان نمونه آورده شده است.

شکل ۵، هندسه و پروفیل خاک مورد بررسی برای گمانه ایستگاه Stat.7 را نشان می‌دهد. کلیه مشخصات مکانیکی و مقاومتی خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۲ آورده شده، که براساس اطلاعات گمانه‌ها و چاه‌های برداشت آب زیرزمینی مطابق مقاله Mahmoudpour et al. (2016) انتخاب شده است. مدل رفتاری استفاده شده برای پروفیل خاک در تحقیق حاضر، مدل رفتاری موهر-کولمب بوده، که در آن تنش مؤثر خاک بر اساس تغییرات سطح آب زیرزمینی، تغییر می‌کند و در نهایت تغییرات تنش مؤثر خاک باعث ایجاد کرنش و تغییر حجم در المان‌های خاک و فرونشست در مدل می‌شود.

با توجه به تراکم سکونت شهری و روستایی و وسعت فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در جنوب شرق استان تهران و همچنین وجود مسیرهای اصلی ارتباطی و حمل و نقل ریلی و جاده‌ای با شرق کشور، این منطقه دارای اهمیت ویژه‌ای بوده و باید عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست، به‌دقت مورد ارزیابی قرار گیرند. بنابراین، مطالعه این محدوده با انتخاب پروفیل CD در اولویت این تحقیق قرار گرفته و بررسی شده است. در این پژوهش، برای بررسی فرونشست پهنه جنوب شرقی تهران از نرم‌افزار GEOSTUDIO استفاده شده و مدل سازی به صورت ترکیب ماژول‌های SEEP/W و SIGMA/W آن انجام گرفته است. به طوری که در ابتدا، شرایط اولیه شامل وضعیت تنش‌های برجا و سطح و فشار آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و سپس برای مدل‌سازی برداشت آب و پایین رفتن سطح ایستایی، تحلیل تراوش پایدار انجام شده است. در نهایت، بررسی و ارزیابی نشست زمین با تحلیل تغییر حجم در المان‌ها، به‌واسطه تغییرات تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار منفذی و نشست صورت پذیرفته است. برای اعتبارسنجی، از تحقیق Mahmoudpour et al. (2016) استفاده شده و فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی



شکل ۵- مدل سازی پروفیل خاک برای ایستگاه Stat.7

جدول ۲- مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک استفاده شده در تحقیق حاضر

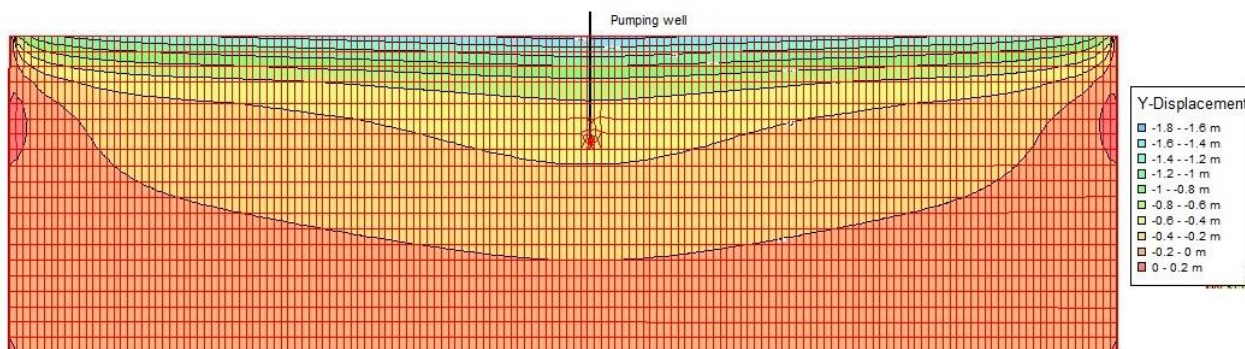
ضریب نفوذپذیری قائم (m/s)	ضریب نفوذپذیری افقی (m/s)	شاخص تورم (C_r)	شاخص فشردگی (C_c)	تخلخل (e)	وزن مخصوص (kN/m^3)	ضخامت متوسط (m)	نام خاک	لایه
$3/4 \times 10^{-10}$	$5/1 \times 10^{-10}$	0/19	0/31	0/67	16/55	17/21	CL-ML	I
$2/2 \times 10^{-10}$	$3/3 \times 10^{-10}$	0/18	0/25	0/64	16/88	22/10	CL	II
$1/4 \times 10^{-10}$	$2/1 \times 10^{-10}$	0/28	0/33	0/73	20/52	29/39	CL-ML	III

آب از تراز بالاتر به تراز پایین‌تر ایجاد شده است. در ادامه پنج ایستگاه Stat.5، Stat.7، Stat.9، Stat.13 و Stat.15 از کل ۱۸ ایستگاه مختلف برداشت آب زیرزمینی بر روی سی شده موجود در جنوب غرب تهران به صورت نمونه طی مدت ۴۴ سال از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۲، مورد ارزیابی و تشریح قرار گرفته و نتایج مدل سازی برای آن‌ها ارائه شده است. ایستگاه Stat.5 در مختصات حدودی (۳۹۳۸۵۱۶ و ۵۲۵۹۲۳) قرار داشته و عمق اولیه آب زیرزمینی در آن ۱۲ متر پایین‌تر از سطح زمین است و با در نظر گرفتن میزان برداشت میانگین ۸۴ میلیون مترمکعب در سال، عمق آب زیرزمینی به عمق ۳۳ متری می‌رسد. همچنین مختصات تقریبی ایستگاه برداشت Stat.7 برابر (۳۹۳۷۴۱۷ و ۵۲۴۰۲۱) بوده و در اثر برداشت میانگین ۸۹ میلیون مترمکعب سالانه از این ایستگاه، تراز اولیه آب زیرزمینی در حدود ۲۲ متر پایین‌تر رفته است.

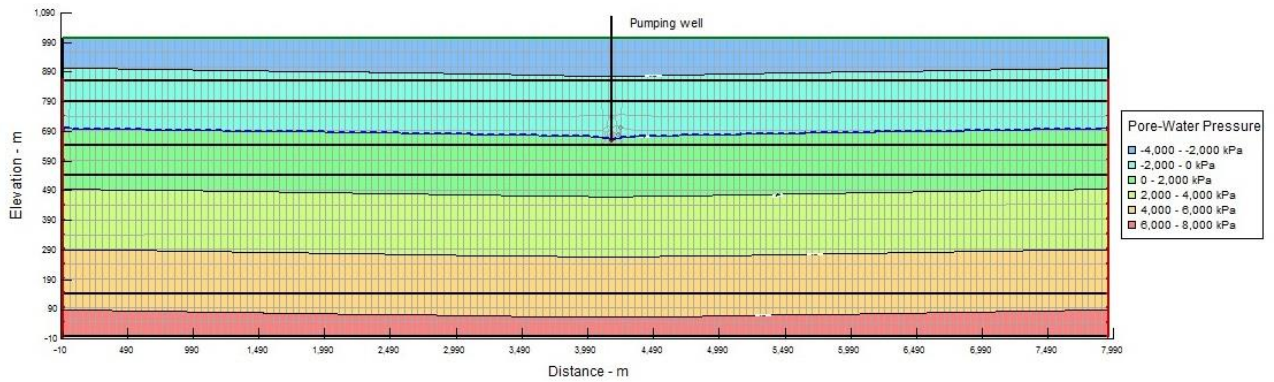
گمانه Stat.9 نیز در مختصات جغرافیایی (۳۹۳۴۸۹۰ و ۵۲۱۹۵۶) واقع شده و عمق آب زیرزمینی در این ایستگاه به دلیل استخراج ۸۸ میلیون مترمکعب در سال، از عمق ۹ متر به عمق ۳۱ متری رسیده است. گمانه مستقر در مختصات (۳۹۳۲۹۱۲ و ۵۱۷۹۸۹) نیز با نام Stat.13 معرفی شده، سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت میانگین سالانه ۵۷ میلیون مترمکعب، از تراز ۸ متری سطح زمین به عمق ۱۹ متری کاهش یافته است. پس از انجام تحلیل‌ها، نتایج محاسبه شده برای فرونشست زمین، تغییرات فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر قائم در اثر تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی در گمانه Stat.7 به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

لازم به توضیح است که پس از تکمیل ساخت هندسه مدل، مطابق شکل ۵، محیط مدل با استفاده از المان‌های چهار ضلعی چهار گرهی و با در نظر گرفتن اندازه المان‌ها به صورت ریز، مش بندی شده است. تحلیل حساسیت بر روی عوامل مؤثر از جمله اندازه المان‌ها و مش بندی مجاور گمانه برداشت و محیط اطراف آن، پس از طی فرآیند تکرار و کنترل، صورت پذیرفته و در نهایت بهترین اندازه مش بندی که منجر به استخراج پاسخ‌های دقیق شده، برای انجام تحلیل‌ها انتخاب شده است. بنابراین، با توجه به این که محدوده اطراف چاه‌های برداشت مورد بررسی قرار گرفته، لذا اندازه المان‌ها در نواحی نزدیک به آن‌ها، به صورت مش بندی ریزتر اعمال شده، به طوری که تعداد کل المان‌های مورد استفاده برای مش بندی مدل، ۸۶۲۴ المان بوده است.

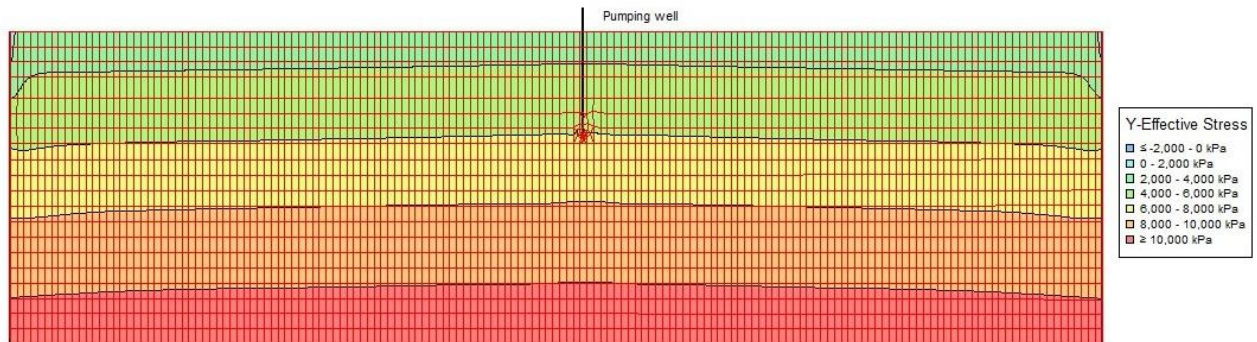
تعریف شرایط مرزی برای مرزهای هیدرولیکی و مرزهای مکانیکی با یکدیگر متفاوت است. برای اعمال شرایط مرزی مکانیکی در مدل سازی عددی حاضر، کف مدل در هر دو جهت افقی و قائم گیردار لحاظ شده است، ولی مرزهای کناری فقط در جهت محور افقی ثابت شده و به منظور تغییر مکان و جابجایی آزادانه، در جهت قائم آزاد هستند. برای اعمال شرایط مرزی هیدرولیکی برای تعریف تغییر تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از طریق گمانه نیز از شرایط مرزی Head (فشار متناظر با ارتفاع آب) برای مرزهای کناری و برای تعریف فشار صفر در سطح مدل از Pressure Head استفاده شده است. شرایط مرزی Head برای حالت وجود یک سطح بار آبی ثابت برای تمام نقاط این سطح به کار می‌رود و برای مدل سازی برداشت آب از طریق چاه بر روی دو مرز کناری، با توجه به ارتفاع آب در هر گمانه، تغییرات سطح



شکل ۶- فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی در ایستگاه Stat.7



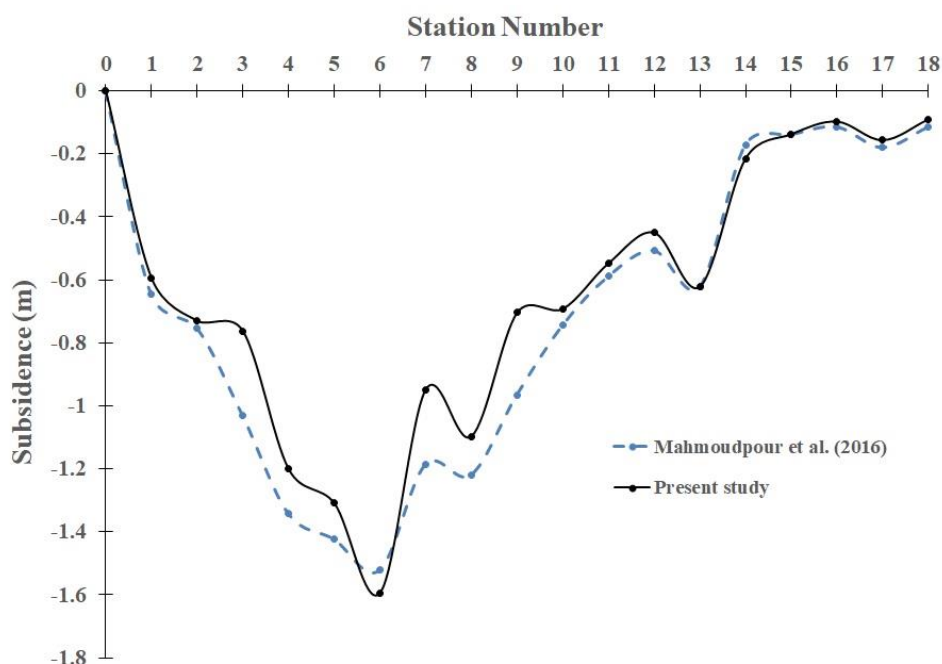
شکل ۷- فشار آب حفره‌ای پس از برداشت آب زیرزمینی در ایستگاه Stat.7



شکل ۸- تنش مؤثر قائم پس از برداشت آب زیرزمینی در ایستگاه Stat.7

از نرم‌افزار GEOSTUDIO در مقایسه با پژوهش Mahmoudpour et al. (2016) وجود داشته و می‌توان بیان کرد که استفاده از این نرم‌افزار برای تحلیل و بررسی مسئله فروزش زمین با در نظر گرفتن تغییرات سطح تراز آب در اثر برداشت و استخراج آب، منجر به پاسخ‌های مناسب و دقیق می‌شود.

با توجه با توضیحات ارائه شده و پس از انجام تحلیل‌های لازم، نشست زمین در محدوده جنوب شرقی تهران در اثر برداشت آب زیرزمینی برای تمامی ایستگاه‌های مستقر در مقطع CD محاسبه و نمودار پروفیل نشست در این منطقه مطابق شکل ۹ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تطابق مناسب و قابل قبولی بین نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر با استفاده

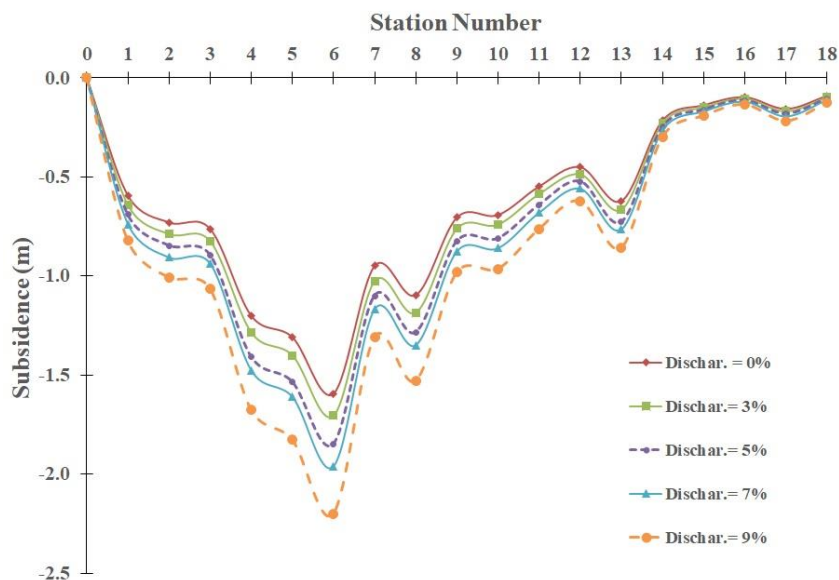


شکل ۹- پروفیل نشست محاسبه شده برای مقطع CD در مطالعه حاضر و پژوهش Mahmoudpour et al. (2016)

۴-۱- بررسی تغییرات فرونشست زمین

با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۱، میزان برداشت متوسط سالانه برای چاه‌های برداشت مختلف معادل ۱۰۰ میلیون متر مکعب در سال در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر

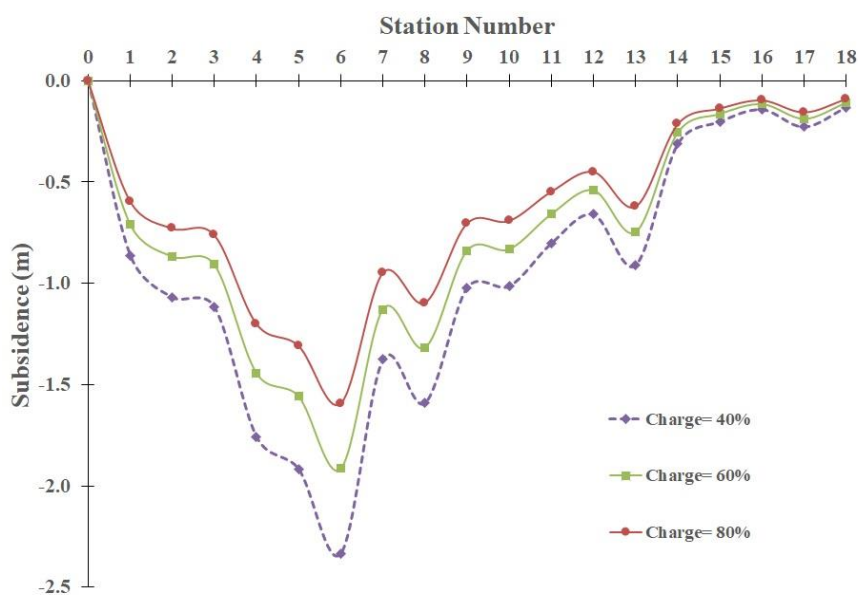
برداشت آب زیرزمینی، درصد برداشت‌های مختلف شامل ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد برداشت متوسط سالانه در نظر گرفته شده و تغییرات برگشت آب به سفره‌های زیرزمینی نیز معادل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد برداشت متوسط سالانه لحاظ شده است. در شکل ۱۰ برای ایستگاه‌های برداشت مختلف نتایج پروفیل فرونشست برای تغییرات برداشت سالانه آورده شده است.



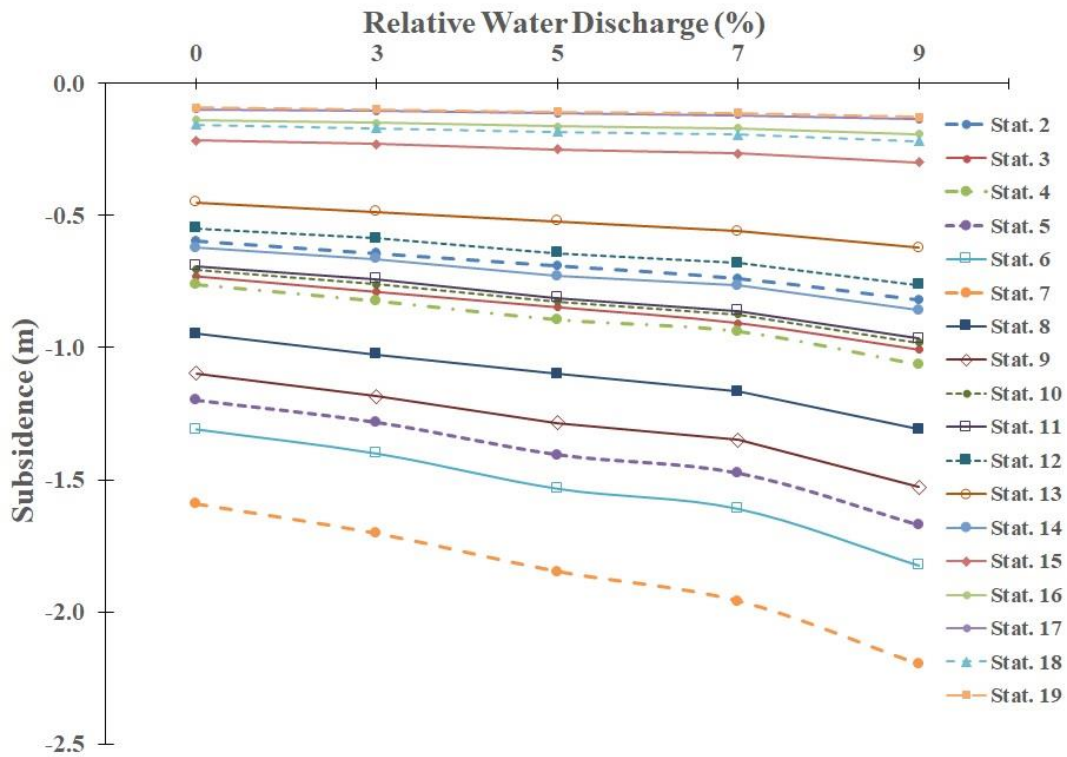
شکل ۱۰- پروفیل فرونشست برای تغییرات برداشت سالانه و برگشت ۸۰٪ آب

برداشت آب نیز در شکل ۱۲ برای ایستگاه‌های برداشت مختلف آورده شده، که مطابق آن، با افزایش درصد برداشت آب زیرزمینی، مقادیر فرونشست افزایش می‌یابد. این تغییرات به دلیل تغییر در شرایط ژئوتکنیکی زمین نظیر جنس لایه‌های خاک و ضخامت مختلف آن‌ها، عمق چاه‌های پمپاژ و تغییر میزان دبی برداشتی در چاه‌های مختلف ایجاد می‌شود.

در بررسی‌های قبل، میزان برگشت آب معادل ۸۰٪ میزان برداشت در نظر گرفته شده بود. مقادیر مختلف برگشت آب مورد بررسی شامل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد است و میزان برداشت آب زیرزمینی نیز معادل میانگین سالانه برداشت در هر ایستگاه در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۱ برای ایستگاه‌های برداشت مختلف نتایج پروفیل فرونشست برای تغییرات درصد برگشت آب آورده شده است. مقادیر فرونشست در برابر تغییرات درصد



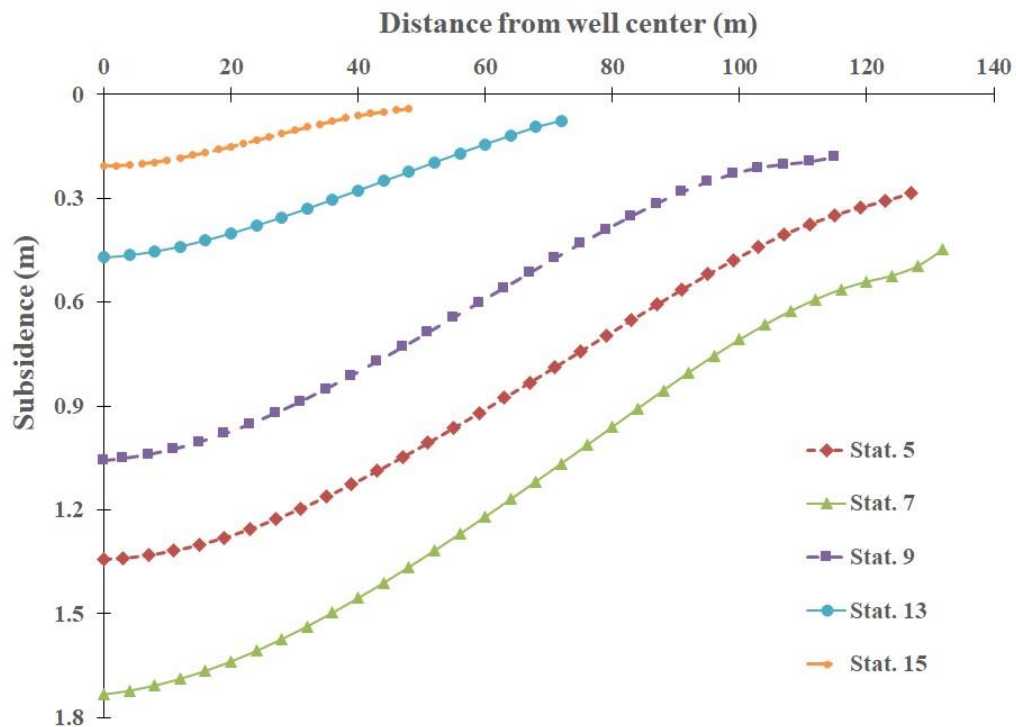
شکل ۱۱- پروفیل فرونشست برای تغییرات درصد برگشت آب و برداشت ۵٪



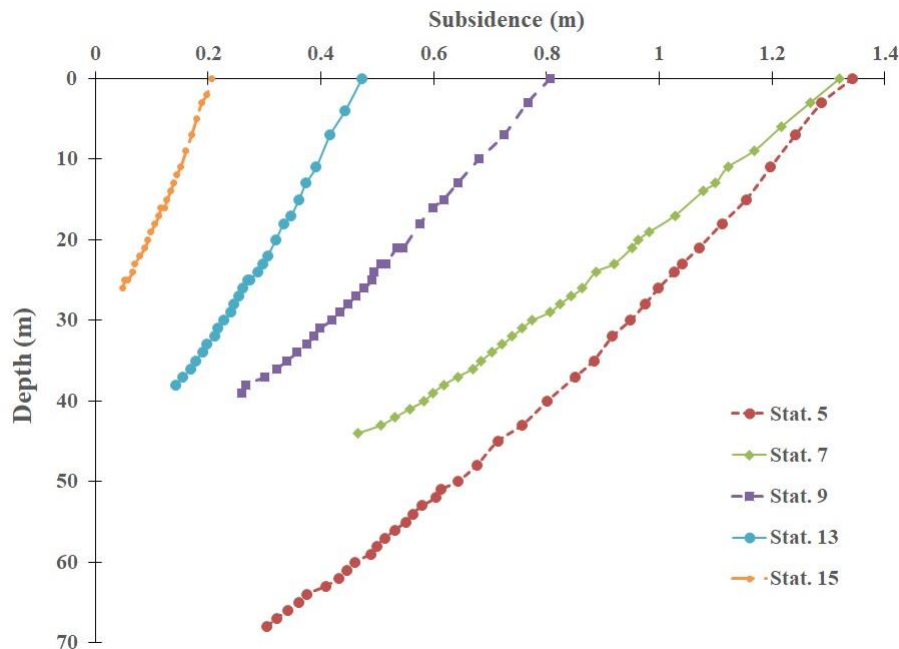
شکل ۱۲- فرونشست به دست آمده در برابر تغییرات درصد برداشت آب برای ایستگاه‌های برداشت مختلف

برداشت Stat. 5, Stat. 7, Stat. 9, Stat. 13, Stat. 15 و Stat. 19، پروفیل فرونشست نسبت به عمق چاه‌های برداشت ترسیم شده، مطابق نتایج به دست آمده می‌توان بیان نمود که با افزایش عمق چاه‌ها، میزان فرونشست کاهش یافته است. علت این پدیده، دور شدن عمق برداشت آب نسبت به سطح زمین بوده، به طوری که فاصله تاثیر بین محل فرونشست و محل تغییرات تنش مؤثر، افزایش یافته و در نتیجه میزان فرونشست در سطح زمین کاهش می‌یابد.

پروفیل فرونشست زمین نسبت به فاصله شعاعی از محور چاه‌های برداشت برای پنج ایستگاه برداشت Stat. 7, Stat. 5, Stat. 9, Stat. 13, Stat. 15 و Stat. 19، در شکل ۱۳ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله شعاعی از محور چاه‌ها میزان فرونشست کاهش یافته، به طوری که در فاصله‌ی محوری معادل دو برابر عمق چاه، مقادیر فرونشست‌ها تقریباً به صفر متمایل می‌شود. همچنین در شکل ۱۴ برای پنج ایستگاه



شکل ۱۳- پروفیل فرونشست زمین نسبت به فاصله شعاعی از محور چاه‌های برداشت



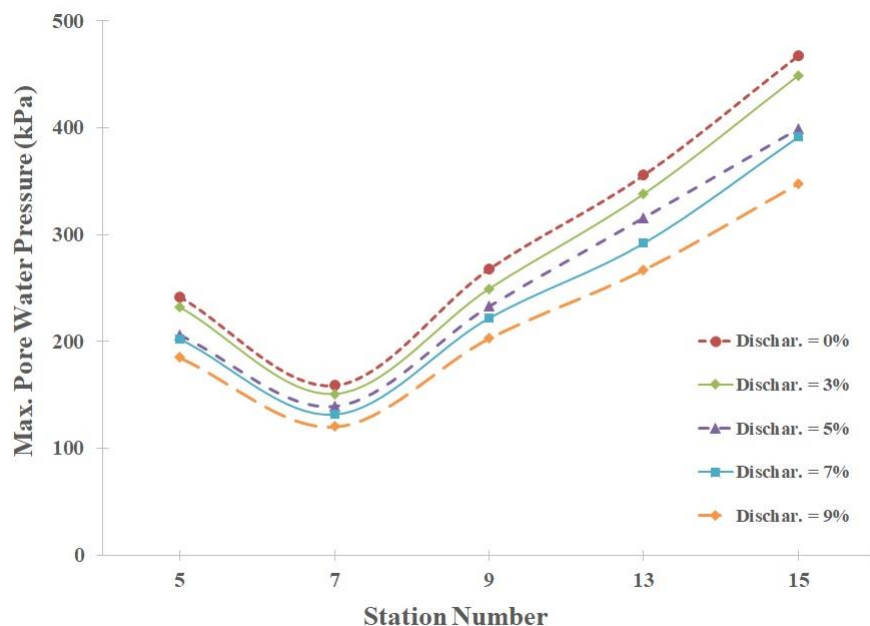
شکل ۱۴- پروفیل فرونشست نسبت به عمق چاه‌های برداشت

آب‌های سطحی به‌همراه استفاده از انواع روش‌های حفاظت از آبخوان‌ها و کاهش و بهینه‌سازی مصرف است.

۲-۴- بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای

پروفیل فشار آب حفره‌ای برای درصد‌های مختلف تغییرات برداشت سالانه برای پنج ایستگاه برداشت Stat.5, Stat.7, Stat.9, Stat.13 و Stat.15 در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل حداکثر فشار آب حفره‌ای در بین ایستگاه‌ها از ۴۷۵ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.15 تا ۱۲۵ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.5 متغیر بوده و هم‌چنین با افزایش درصد تغییرات برداشت سالانه، میزان فشار آب حفره‌ای کاهش یافته است.

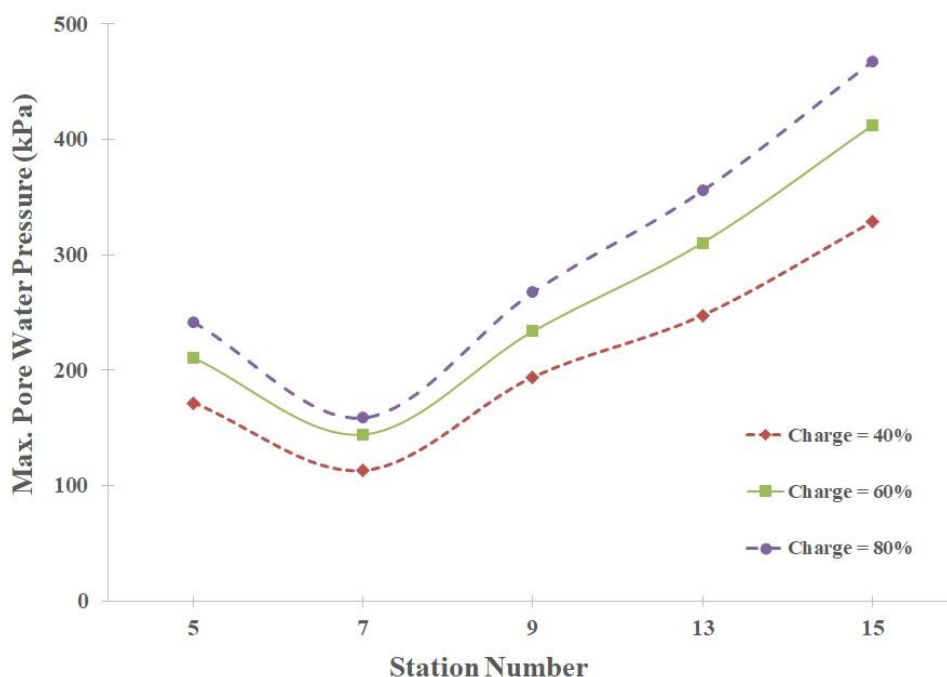
با توجه به این‌که بیش‌ترین میزان آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی صرف آبیاری زمین‌های کشاورزی می‌شود، با حفاظت آب در مصارف کشاورزی و استفاده از روش‌های آبیاری نوین مانند آبیاری قطره‌ای به‌همراه انجام اقداماتی هم‌چون بیان مشکلات و افزایش سطح دانش بهره‌برداران، عدم صدور مجوزهای جدید حفاری، طولانی نمودن دوره آبیاری، تغییر الگوی کشت و کنترل دقیق برداشت از منابع آب زیرزمینی با نصب کنترلهای حجمی و تعیین قیمت مناسبی به‌عنوان آب‌بهای کشاورزی، امکان کاهش میزان افت سطح آب زیرزمینی و پیامدهای ناشی از آن وجود دارد. لازم‌به‌ذکر است که الزاماً به‌کارگیری یک راه‌کار به‌تنهایی نمی‌تواند مثمرتر واقع شود. بنابراین راه‌حل مشکلات، اجرای تلفیقی از راه‌کارهای قابل‌اجرا برای بهره‌برداری حداکثری از



شکل ۱۵- پروفیل فشار آب حفره‌ای برای درصد‌های مختلف تغییرات برداشت سالانه

کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.15 تا ۱۱۰ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.5 برای برگشت آب ۴۰٪ متغیر بوده و همچنین با افزایش درصد برگشت آب، میزان فشار آب حفره‌ای نیز افزایش یافته است.

در شکل ۱۶ برای پنج ایستگاه برداشت Stat.5، Stat.7، Stat.9، Stat.13 و Stat.15 پروفیل فشار آب حفره‌ای برای درصد‌های مختلف برگشت آب ترسیم شده است. مطابق این شکل حداکثر فشار آب حفره‌ای در بین ایستگاه‌ها حدوداً از ۴۷۰

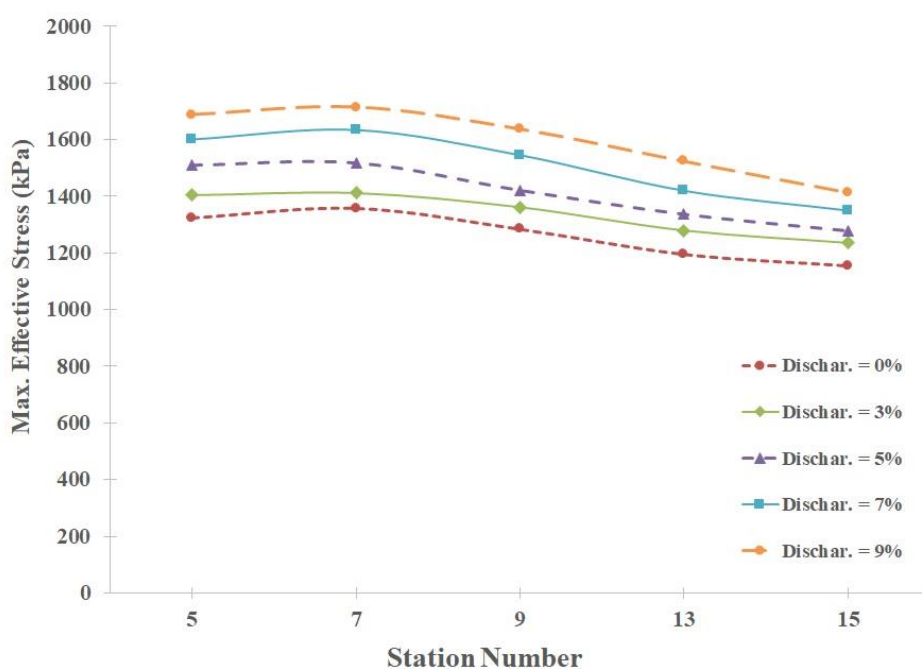


شکل ۱۶- پروفیل فشار آب حفره‌ای برای درصد‌های مختلف برگشت آب

شکل، تغییرات حداکثر تنش مؤثر در بین ایستگاه‌ها از ۱۶۹۰ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.5 تا ۱۴۹۰ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.15 محاسبه شده و همچنین با افزایش درصد تغییرات برداشت سالانه، میزان تنش مؤثر نیز افزایش یافته است.

۳-۴- بررسی تنش مؤثر

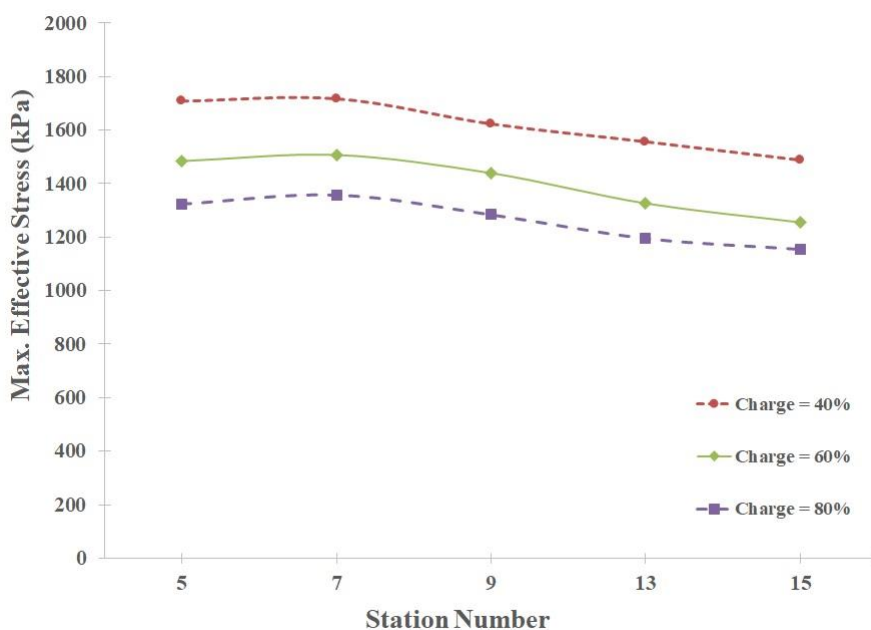
در شکل ۱۷ برای پنج ایستگاه برداشت Stat.5، Stat.7، Stat.9، Stat.13 و Stat.15 پروفیل تنش مؤثر برای درصد‌های مختلف تغییرات برداشت سالانه ترسیم شده است. مطابق این



شکل ۱۷- پروفیل تنش مؤثر برای درصد‌های مختلف تغییرات برداشت سالانه

۱۸۰۰ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.5 تا ۱۴۸۰ کیلوپاسکال در ایستگاه Stat.15 متغیر بوده و با افزایش درصد تغییرات برداشت سالانه، از میزان تنش مؤثر کاسته شده است.

در شکل ۱۸ برای پنج ایستگاه برداشت Stat.5، Stat.7، Stat.9، Stat.13 و Stat.15 پروفیل تنش مؤثر برای درصدهای مختلف برگشت آب ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر تنش مؤثر در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه از



شکل ۱۸- پروفیل تنش مؤثر برای درصدهای مختلف برگشت آب

- با کاهش میزان درصد برگشت آب به سفره آب زیرزمینی، مقادیر فرونشست در ایستگاه‌های برداشت افزایش می‌یابد. به طوری که با کاهش درصد تغییرات برگشت از ۸۰ تا ۴۰ درصد و نصف شدن میزان برگشت آب، میزان فرونشست حداکثر در ۲۱ ایستگاه برداشت، از ۱۱۲ سانتیمتر به ۱۵۷ سانتیمتر افزایش یافته و در حدود ۳۹ درصد تغییرات داشته است؛
- با توجه به این‌که بیش‌ترین میزان آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی صرف آبیاری زمین‌های کشاورزی می‌شود، با حفاظت آب در کشاورزی و بهبود روش‌های آبیاری به‌علاوه انجام اقداماتی همچون بیان مشکلات و افزایش سطح دانش بهره‌برداران و کنترل دقیق در برداشت از منابع آب زیرزمینی با نصب کنتورهای حجمی می‌توان میزان افت سطح آب زیرزمینی و پیامدهای ناشی از آن بخصوص نشست سطح زمین را به‌حداقل رساند.

۶- مراجع

باقری، م.، و کاظمی آذر، ف.، (۱۳۸۵)، "فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی در دشت رفسنجان"، اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی.
 بهرامی، س.، و بذرافشان، ا.، (۱۳۹۶)، "عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در دشت میناب"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی فرونشست ایجاد شده در دشت‌های جنوب شرقی تهران در اثر برداشت آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود GEOSTUDIO پرداخته شد. ابتدا مدل‌سازی براساس برداشت میانگین سالانه انجام و سپس برای بررسی دقیق‌تر درصد تغییرات سالانه ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر برداشت، میزان برگشت آب به سفره آب زیرزمینی نیز در مدل‌سازی‌ها لحاظ شده، که برای درصدهای معادل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد برداشت متوسط سالانه مطالعه شده است. نتایج بررسی شده شامل پروفیل فرونشست، تنش کلی و تنش مؤثر است. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر به شرح ذیل است:

- میزان تغییرات سطح آب و عمق حفاری گمانه‌ها بر میزان فرونشست زمین مؤثر است به طوری که با افزایش عمق حفاری گمانه‌ها و افزایش تغییرات سطح آب (افزایش میزان برداشت آب) مقادیر فرونشست افزایش خواهد یافت؛
- با بررسی درصد تغییرات برداشت آب زیرزمینی از ایستگاه‌های برداشت موردنظر، ملاحظه می‌شود که میزان فرونشست حداکثر در ۲۱ ایستگاه برداشت، از ۱۱۲ سانتیمتر به ۱۳۶ سانتیمتر افزایش یافته و در حدود ۲۱ درصد افزایش داشته است؛

- aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan", *Environmental Earth Sciences*, 59(7), 1535-1548.
- Mahmoudpour, M., Khamehchiyan, M., Nikudel, M.R., and Ghassemi, M.R., (2016), "Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran", *Engineering Geology*, 201, 6-28.
- Notti, D., Mateos, R.M., Monserrat, O., Devanthery, N., Peinado, T., Roldán, F.J., Fernández-Chacón, F., Galve, J.P., Lamas, F., and Azañón, J.M., (2016), "Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban areas (Granada Basin, SE Spain), Multiband DInSAR monitoring", *Hydrological Processes*, 30(13), 2317-2331.
- Panda, B.B., Rucker, M.L., and Ferguson, K.C., (2015), "Modeling of earth fissures caused by land subsidence due to groundwater withdrawal", *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 69-72.
- Rajabi, A.M., and Ghorbani, E., (2016), "Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, 9(20), 738.
- Tisell, V., (2013), "Risk management of groundwater drawdown in settlement sensitive areas", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Tehran Regional Water Company (TRWC), (2012), *Detailed data collection from piezometric wells, wells, springs, Tehran Province*.
- Wang, H., Gao, J., Li, X., Wang, H., and Zhang, Y., (2014), "Effects of soil and water conservation measures on groundwater levels and recharge", *Water*, 6(12), 3783-3806.
- Wang, S.J., Lee, C.H., and Hsu, K.C., (2015), "A technique for quantifying groundwater pumping and land subsidence using a nonlinear stochastic poroelastic model", *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8111-8124.
- برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران.
- جاودانیان، ح. و احمدی دارانی، م.، (۱۳۹۵)، "برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و نشست منطقه‌ای: مطالعه موردی شهر دامنه اصفهان"، *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۱(۱)، ۴۹-۶۰.
- رنجبر، م. و جعفری، ن.، (۱۳۸۸)، "بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین در دشت اشتهارد"، *مجله جغرافیا*، ۶(۱۸-۱۹)، ۱۵۵-۱۶۶.
- کیانی، ف.، عابدینی، م. و احمدزاده، غ.، (۱۳۹۶)، "بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS"، *سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر، معماری و مدیریت شهری*، تهران، ایران.
- لشکری پور، غ.، رستمی بارانی، ح.، کهندل، ا.، و ترشیزی، ح.، (۱۳۸۵)، "افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت کاشمر"، *دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*، تهران، ایران.
- مردی، م. و واعظی نژاد، م.، (۱۳۸۸)، "برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و تاثیر آن بر نشست زمین (مطالعه موردی شهر کرمان)"، *هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*.
- میراحمدی پور، ص. و طالب بیدختی، ن.، (۱۳۹۵)، "بررسی طرح تغذیه مصنوعی منابع آب‌های زیرزمینی دشت تهران - شهریار به‌عنوان راه‌کاری جهت جلوگیری از فرونشست زمین"، *پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران*، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین.
- Agoramoorthy, G., and Hsu, M.J., (2015), "Irrigation-based social work relieves poverty in India's drylands", *International Social Work*, 58(1), 23-31.
- Alén, C., (1998), *On probability in geotechnics, Random calculation models exemplified on slope stability analysis and ground-superstructure interaction*. Chalmers University of Technology.
- Amigh Pay, M., Arabi, S., and Talebi, A., (2010), "Study on Yazd plain subsidence using InSAR and its precise leveling", *Geosciences*, 20(77), 157-164.
- Carminati, E., and Martinelli, G., (2002), "Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation", *Engineering Geology*, 66(3-4), 241-255.
- de Graaf, I.E., van Beek, R.L., Gleeson, T., Moosdorf, N., Schmitz, O., Sutanudjaja, E.H., and Bierkens, M.F., (2017), "A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion", *Advances in Water Resources*, 102, 53-67.
- Hashemi, E., (2013), "Ground settling due to groundwater drawdown", M.Sc. Thesis, Chalmers University of Technology, Stockholm, Sweden.
- Hung, W.C., Hwang, C., Chang, C.P., Yen, J.Y., Liu, C.H., and Yang, W.H., (2010), "Monitoring severe