

**Research Paper**

**مقاله پژوهشی**

**Numerical Analysis of Land Subsidence  
due to Water Withdrawal from Pumping  
Well in Urban Areas**

**تحلیل عددی نشست زمین ناشی از برداشت آب  
از چاه پمپاژ در نواحی شهری**

Mojtaba Ansari Shad<sup>1</sup> and Majid Noorian-Bidgoli<sup>\*2</sup>

مجتبی انصاری شاد<sup>۱</sup> و مجید نوریان بیدگلی<sup>\*۲</sup>

1- M.Sc. in Mining Engineering, Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

2- Assistant Professor, Division of Mining Engineering, Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran.

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [noriyan@kashanu.ac.ir](mailto:noriyan@kashanu.ac.ir)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [noriyan@kashanu.ac.ir](mailto:noriyan@kashanu.ac.ir)

Received: 26/09/2021

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴

Revised: 19/12/2021

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸

Accepted: 05/01/2022

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

**Abstract**

**چکیده**

Land subsidence is defined as equal to the vertical displacement of the ground over a specified time. Declining water table elevation is one of the main causes of subsidence that can cause irreparable damage to surface and subsurface structures, especially in urban areas. In this research, the magnitude of subsidence due to water withdrawal from the pumping well has been estimated, and the factors affecting it have been determined. For this purpose, by collecting data from two water wells located in Kashan city, the subsidence analysis was performed based on the finite element numerical method using PLAXIS2D software. The results show that the water pumping during one year causes a decrease in the water table elevation and, as a result, the land subsidence by a few centimeters, but under a constant flow rate of water withdrawal from the well, the magnitude of subsidence in the studied wells is heterogeneous. Also, increasing the water withdrawal flow rate from wells up to 700 m<sup>3</sup>/day and the depth of wells up to 500 meters has increased subsidence, but after that, the amount of subsidence remains constant. Therefore, it can be concluded that the flow rate and depth of water withdrawal from the well are effective on the land subsidence and must be managed.

نشست زمین برابر با مقدار جابه‌جایی قائم زمین در یک بازه زمانی مشخص است. افت سطح ایستابی در چاه‌های برداشت آب، یکی از عوامل وقوع نشست است که می‌تواند باعث خسارات جبران ناپذیری به سازه‌های سطحی و زیرسطحی به‌ویژه در مناطق شهری شود. در این تحقیق میزان نشست ناشی از برداشت آب از چاه پمپاژ و تعیین عوامل موثر بر آن تخمین زده می‌شود. به این منظور با جمع‌آوری اطلاعات دو چاه برداشت آب واقع در محدوده شهر کاشان، تحلیل نشست براساس روش عددی المان محدود و به کمک نرم‌افزار PLAXIS2D انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پمپاژ آب طی یک سال باعث افت سطح ایستابی و در نتیجه نشست زمین در حد چند سانتی‌متر شده، ولی تحت شدت جریان ثابت برداشت آب از چاه، مقدار نشست در چاه‌های مورد مطالعه ناهمگن و متفاوت است. هم‌چنین افزایش شدت جریان برداشت آب از چاه تا ۷۰۰ مترمکعب در روز و افزایش عمق چاه برداشت تا ۵۰۰ متر باعث افزایش نشست شده، ولی بعد از آن مقدار نشست ثابت باقی می‌ماند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که شدت جریان و عمق برداشت آب از چاه، بر میزان نشست زمین موثر بوده و باید مدیریت شود.

**Keywords:** Finite element method (FEM), Ground water, Kashan city, Land subsidence, PLAXIS software.

**کلمات کلیدی:** نشست زمین، آب زیرزمینی، روش المان محدود، شهر کاشان، نرم‌افزار PLAXIS.

مناطق مختلف جهان نظیر ایالات متحده آمریکا (Galloway et al., 2004; Leake, 1999; al., 2003), سوژو چین (Chen et al., 2003), راونای ایتالیا (Teatini et al., 2005), بانکوک تایلند (Phien-Wej et al., 2006), تایپه تایوان (Chen et al., 2007), باندونگ اندونزی (Abidin et al., 2009), قاهره مصر (Aly et al., 2009), سمارانگ اندونزی (Pratikso et al., 2017) و کره (Lee et al., 2018) حاکی از رشد روز افزون این پدیده در سال‌های اخیر است. لذا پیش‌بینی و تخمین مقدار نشست زمین موضوعی با اهمیت و ضروری است. به‌منظور پیش‌بینی و تخمین نشست زمین، روش‌های متعددی مانند استفاده از تکنیک‌های سنجش از راه دور (Ili et al., 2018) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) وجود دارد که از برای تخمین نشست ناشی از برداشت آب در مناطقی از ایران نظیر دشت مشهد (اکبری و همکاران، ۱۳۸۸؛ Motagh et al., 2007) و دشت رفسنجان (Rahnama, 2001; Mousavi et al., 2009) and Moafi, 2009) و سایر نقاط جهان نظیر اوجیا ژاپن (Sato et al., 2003), پینگتانگ تایوان (Hu et al., 2005; Hou et al., 2006), کلکته هند (Chatterjee et al., 2006) و دشت پو ایتالیا (Baldi et al., 2009) استفاده شده است. در این خصوص، امروزه مدل‌سازی به‌کمک روش‌های عددی به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین و سریع‌ترین روش‌های ارزیابی نشست محسوب می‌شود که با توجه به نوع منطقه و اطلاعات موجود می‌توان از آن‌ها بهره برد (Gambolati, 1975). به‌عنوان مثال از این روش‌ها در پیش‌بینی نشست در شهر لوس بانوس کالیفرنیا (Larson et al., 2001) و مکزیکو سیتی (Ortega-Guerrero et al., 1999) استفاده شده است. مطالعات نشان داده است که از بین روش‌های عددی، روش المان محدود (FEM) در مسائلی که دارای فیزیک، هندسه و شرایط مرزی پیچیده‌تری هستند، کارا تر هستند (Pacheco et al., 2006). لذا نرم‌افزارهایی مبتنی بر این روش، نظیر PLAXIS که شامل معادلات تحکیم مواد تحت فشار آب منفذی است، می‌تواند به‌خوبی در مدل‌سازی نشست زمین استفاده شود. با توجه به این‌که برداشت آب از چاه‌های پمپاژ موجود در مناطق شهرها باعث کاهش سطح ایستابی می‌شود، معمولاً برآورد درستی از میزان برداشت مجاز آب از این چاه‌ها وجود ندارد. مسلماً با مدیریت میزان برداشت آب از این چاه‌ها می‌توان نشست زمین را بهتر کنترل نمود. بررسی‌های میدانی در سطح شهر کاشان نشان داده که نشست زمین در حوالی چاه‌های برداشت آب رخ داده است. به‌همین دلیل در این تحقیق سعی شده برای اولین بار به‌طور علمی میزان نشست زمین ناشی از برداشت آب از چاه‌های بهره‌بردار واقع در این منطقه، با هدف تعیین مقدار

در سال‌های اخیر با توجه به کاهش نزولات جوی، افزایش درجه حرارت و در نتیجه کاهش جریان آب‌های سطحی، سفره‌های آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب برای مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی و خانگی محسوب می‌شود، لذا حفظ و صیانت از این منابع بسیار مهم و ضروری است. از طرفی گسترش شهرنشینی، رشد سریع جمعیت، صنعتی شدن جامعه و عدم مدیریت صحیح در بخش مصرف موجب شده در بسیاری از مناطق کشور به‌ویژه در مناطق خشک و بیابانی، منابع آب زیرزمینی با بحران و تهدید جدی مواجه شود. در این خصوص افزایش بهره‌برداری به‌دلیل برداشت بیش از حد آب از چاه‌های آب‌کشی (پمپاژ) بدون در نظر گرفتن توان آبی هر منطقه، باعث تهی شدن هرچه بیشتر سفره‌های آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح تراز آب در منطقه می‌شود. از جمله پیامدهای افت سطح آب زیرزمینی، پدیده نشست زمین است که وقوع آن می‌تواند باعث خسارات زیادی به تأسیسات سطحی و زیرسطحی موجود در منطقه، از جمله تخریب لوله جدار چاه‌های برداشت آب شود (آل خمیس و همکاران، ۱۳۸۵).

نشست به‌عنوان یک پدیده مخرب زمین‌شناسی به‌فرورفتگی و تغییر شکل سطح زمین اطلاق می‌شود. راستای نشست در زمین قائم و به سمت پایین است که معمولاً بدون محدودیت در سرعت و بزرگی ایجاد می‌شود. در اکثر موارد وقوع نشست باعث فروریزش سطح زمین در مقیاس بزرگ می‌شود که عامل به‌وجود آمدن آن می‌تواند متفاوت باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در بین عوامل مؤثر در ایجاد نشست، برداشت منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح ایستابی علاوه بر کاهش کمیت و کیفیت آب منطقه، باعث نشست زمین می‌شود (Barends et al., 1995).

گزارش‌های منتشر شده از مناطق مختلف ایران نظیر کرمان (رحمانیان، ۱۳۶۵)، دشت رفسنجان (عباس‌نژاد، ۱۳۷۷؛ Solaimani and Mortazavi, 2008)، دشت تهران (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴؛ توسلی و همکاران، ۱۳۹۸)، دشت مشهد (لشکری پور، ۱۳۸۴؛ انوری و نورالهی، ۱۳۸۶)، دشت نیشابور (لشکری پور، ۱۳۸۶)، دشت کاشمر (لشکری پور، ۱۳۸۷)، استان اصفهان (قیومی و همکاران، ۱۳۸۸؛ جاودانیان و احمدی دارانی، ۱۳۹۵)، دشت کاشان (مصلحی و قاضی فرد، ۱۳۸۹)، رستاق میبد (زارع مهرجردی، ۱۳۹۰)، دشت درمیان (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰)، دشت علی آباد قم (مقدم فردویی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Rajabi, 2018)، دشت سیرجان (عباس‌نژاد و شاهی، ۱۳۹۲) و

جمعیت و صنعتی شدن باعث افزایش استفاده از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت زیاد و سریع سطح تراز آب منطقه شده است. لذا بررسی نشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی از طریق پمپاژ آب چاه‌ها به ویژه در نواحی شهری از موضوعات مهم و راهبردی در مبحث برنامه‌ریزی شهری، مدیریت بحران و توسعه پایدار این منطقه است. بررسی‌های میدانی در منطقه نشان داده که در محدوده چاه‌های پمپاژ آب در نواحی شهری (شکل ۱-الف) و خارج شهری (شکل ۱-ب) نشست سطح زمین به اندازه چند سانتی‌متر رخ داده است. با این وجود متأسفانه توجه زیادی به این مسأله مهم نشده و اقدامی نیز به‌منظور تعیین، جلوگیری و یا کند کردن سرعت این پدیده صورت نگرفته است. موضوعی که انگیزه و هدف اصلی انجام این تحقیق بوده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱- وضعیت نشست زمین در محدوده چاه‌های پمپاژ آب واقع در کاشان

دانشگاه آزاد و اداره راه و شهرسازی شهرستان کاشان جمع‌آوری شده است. به‌طور کلی از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه رسوبی است. البته رسوبات تشکیل‌دهنده به‌دلیل وضعیت پالئوژئوگرافی منطقه یکنواخت نبوده و به‌صورت تناوبی از رسوبات عدسی شکل ریزدانه بین رسوبات درشت‌دانه یا مخلوط رسوبات شن و ماسه به‌همراه مقادیر متفاوتی از رس ریزدانه هستند. در عمق زمین نیز رسوبات آبرفتی غالباً رسوبات مارنی-رسی و تبخیری دوره میوسن و گاهی کنگلومرای پلیوسن است.

### ۳- مدل‌سازی عددی نشست زمین

معمولاً تخلیه هر نوع سیال (آب، نفت، گاز) از عمق زمین، به‌ویژه در مناطق سست، باعث ایجاد جابجایی لایه‌های زمین شده و می‌تواند به‌صورت نشست در زمین ظاهر شود. در برداشت آب به‌کمک چاه، مقدار و سطح تأثیر نشست به‌میزان دبی برداشت،

حداکثر نشست زمین و بررسی تأثیر شدت جریان (دبی) برداشت آب بر روی نشست، بررسی شود. به این منظور، پس از جمع‌آوری اطلاعات میدانی و داده‌های ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی عددی نشست ناشی از برداشت آب از دو چاه بهره‌بردای موجود در منطقه به‌کمک نرم‌افزار المان محدود PLAXIS2D انجام شده است.

### ۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان کاشان واقع در شمال استان اصفهان، یکی از مناطق کویری و خشک در مرکز ایران است که طی سال‌های گذشته به‌دلیل خشکسالی و کاهش میزان بارندگی و از طرفی رشد

لازم به ذکر است با توجه به بافت قدیمی و تاریخی شهر کاشان تحلیل نشست اهمیت بسیار زیادی دارد چون می‌تواند باعث خسارات جبران ناپذیری مانند تخریب خانه‌های قدیمی و تاریخی، تخریب تأسیسات زیرزمینی شهری، از بین رفتن کیفیت آب زیرزمینی و راه‌های ارتباط شهری و ... شود. به این منظور برای تخمین نشست زمین، دو چاه پمپاژ آب واقع در محدوده شهری کاشان انتخاب شده است. مطابق شکل ۲، این دو چاه در فاصله حدوداً دو کیلومتری از همدیگر، یکی در میدان پلیس (چاه شماره یک) و دیگری در میدان آب (چاه شماره دو) شهر کاشان واقع شده است. قطر دهانه هر دو چاه ۲۴ اینچ و عمق آن در چاه شماره یک و دو به‌ترتیب برابر با ۱۸۰ و ۱۵۰ متر است. هم‌چنین تراز سطح ایستابی در زمان انجام این مطالعه (سال ۱۳۹۸) در این دو چاه به‌ترتیب ۹۶ و ۹۰ متر پایین‌تر از سطح زمین بوده است. مشخصات این دو چاه و اطلاعات ژئوتکنیکی دو چاه مذکور از گزارش‌های موجود در مدیریت منابع آب و آزمایشگاه‌های خاک

فشار آب حفره‌ای ایجاد شده، تغییر شکل‌های را در نقاط مختلف محاسبه نماید. لذا برای افزایش دقت در محاسبات، در ساخت مدل از المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای استفاده شده است. همچنین به منظور مدل‌سازی چاه آب‌کشی از مقطع دو بعدی و حالت کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. در این حالت محدوده اطراف چاه، یک محیط پیوسته، همگن و همسان فرض شده است.

عمق چاه و جنس مواد بستگی دارد. لذا باید قبل از استخراج سیال، تأثیر برداشت سیال از چاه پیش‌بینی شود. در این تحقیق با مدل‌سازی نحوه برداشت آب از چاه در مقیاس محلی، مقدار نشست زمین تعیین می‌شود. بدین منظور از نرم‌افزار PLAXIS برای تحلیل تنش-جابجایی زمین استفاده شده است. نرم‌افزار مذکور قادر است برای هر المان مدل، با توجه به نیروهای وارده و



شکل ۲- موقعیت مکانی دو چاه بهره‌بردار آب در شهر کاشان

همچنین مرز بالایی مدل به‌عنوان سطح زمین، کاملاً آزاد در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری چاه‌های مذکور در منطقه، به دلیل این که توپوگرافی سطح زمین در دهانه هر دو چاه مسطح بوده، لذا تنش‌های برجای افقی موجود در منطقه نسبت به تنش‌های قائم ناچیز است. بنابراین برای تعیین شرایط اولیه مدل، تنش‌های اولیه اعمال شده به مدل، معادل با نیروی ثقل ناشی از وزن طبقات در نظر گرفته شده است.

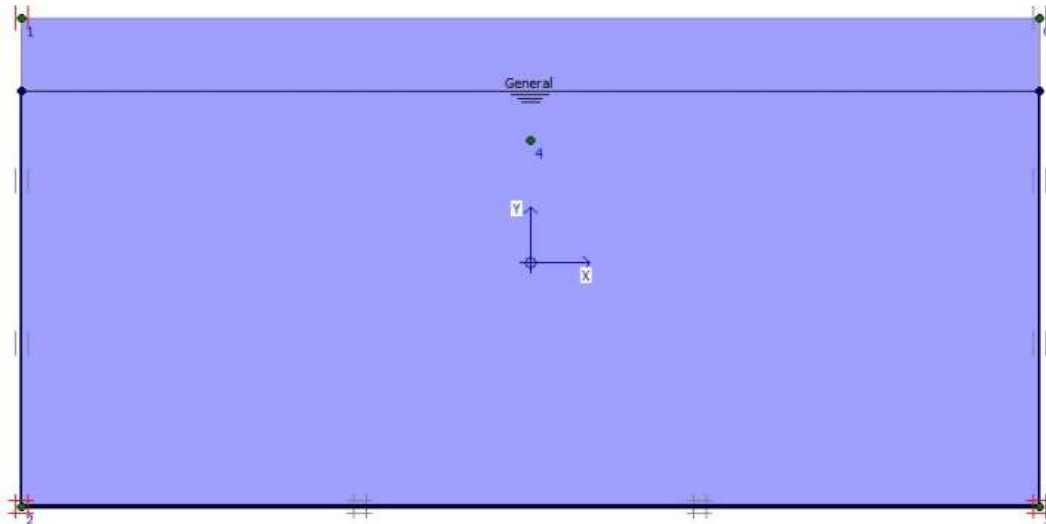
در جدول ۱ مقادیر پارامترهای مکانیکی خاک در برگیرنده دو چاه که در مدل‌سازی استفاده شده، مشخص شده است. با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و اطلاعات موجود از لایه‌های زمین در منطقه مورد مطالعه، معیار شکست موه‌ر-کلمب برای مدل رفتاری خاک در مدل‌سازی انتخاب شده است. بر این اساس، پارامترهای مورد نیاز در مدل شامل پارامترهای اصلی مقاومتی و

برای انتخاب بهترین ابعاد محدوده مدل، از تحلیل حساسیت استفاده شده است. بدین منظور در ابتدا پنج محدوده با طول‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ متر برای ابعاد مدل انتخاب شده و محاسبات نشست در آن‌ها انجام شده است. نتایج تحلیل نشان داد که تقریباً در هر دو چاه افزایش طول مدل از ۵۰۰ متر به بالا، تأثیری در میزان نشست ندارد، لذا در کلیه مدل‌های ساخته شده، طول محدوده مدل برابر با ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۳، هندسه مدل ساخته شده نشان داده شده است. مطابق این شکل، به منظور اعمال شرایط مرزی به مدل، مرزهای قائم مدل (دو دیواره سمت راست و چپ) دارای محدودیت تغییر مکان در راستای افق (درجه آزادی فقط در جهت قائم) و مرز پایینی ثابت و با تکیه‌گاه‌هایی بدون درجه آزادی در نظر گرفته شده است تا از تغییر مکان‌های غیرواقعی جلوگیری شود.

همچنین به منظور بررسی حالت بحرانی نشست زمین، خاک به صورت اشباع در نظر گرفته شده است.

تغییر شکل پذیری خاک یعنی؛ متوسط وزن مخصوص در حالت خشک ( $\gamma_{dry}$ ) و اشباع ( $\gamma_{sat}$ )، مدول الاستیسیته ( $E$ )، چسبندگی ( $C$ )، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و نسبت پواسون ( $\nu$ ) است.



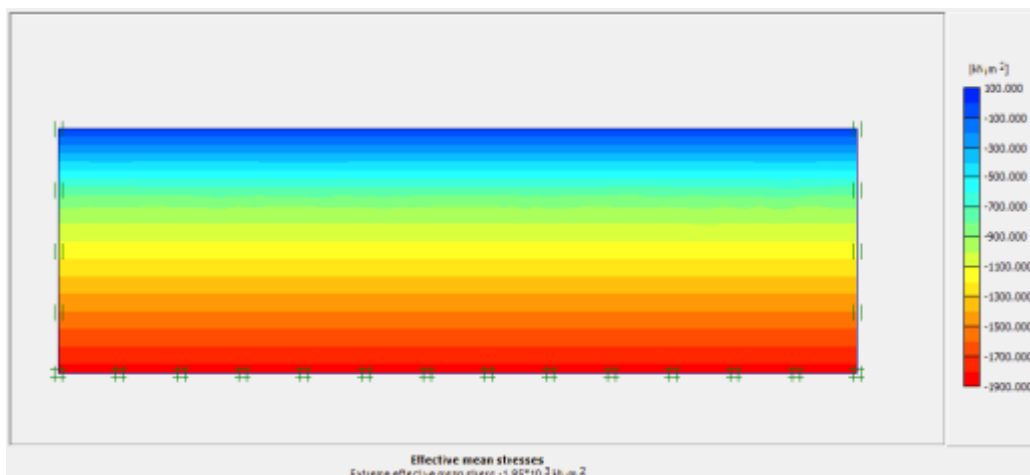
شکل ۳- هندسه و شرایط مرزی مدل عددی ساخته شده

جدول ۱- پارامترهای مکانیکی خاک مورد استفاده در مدل سازی (انصاری شاد، ۱۳۹۵)

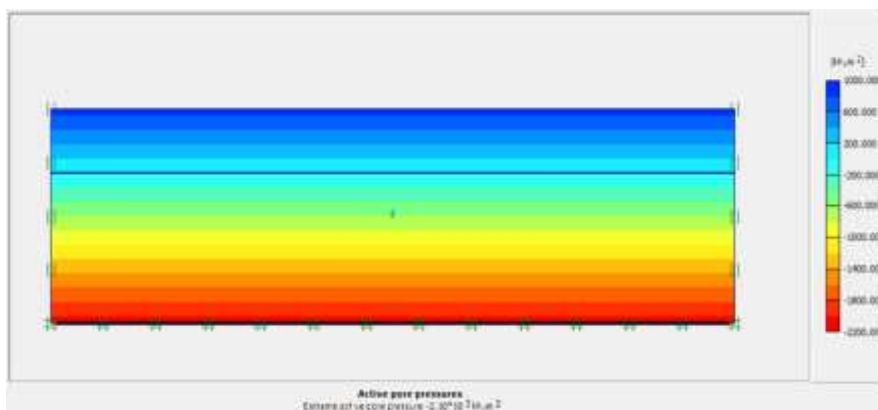
پارامتر	$\gamma_{dry}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$E$ (KN/m <sup>2</sup> )	$C$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\nu$
چاه شماره ۱	16.5	18.8	$5.25 \times 10^4$	12.1	31.2	0.375
چاه شماره ۲	15.2	17.3	$1.93 \times 10^4$	32.7	32.9	0.375

به دلیل عدم فعال بودن چاه، ثابت و یکنواخت باقی مانده و تقریباً جریانی به وجود نمی آید. به عنوان مثال، شکل های ۴ و ۵ به ترتیب وضعیت توزیع تنش مؤثر استاتیکی و فشار آب حفره ای طی تحلیل تنش-جابجایی چاه شماره یک را در این مرحله، که در واقع حالت به تعادل رسیدن مدل است را نشان می دهد.

با ساخت هندسه مدل، اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل و تعیین پارامترهای مکانیکی مواد تشکیل دهنده مدل، تحلیل نشست در دو مرحله انجام شده است. به این منظور در مرحله اول، چاه پمپاژ در مدل غیرفعال شده تا به مدل اجازه تغییر شکل تحت تنش استاتیکی ناشی از وزن روباره داده شود و همچنین فشار آب حفره ای اولیه ایجاد شود. در این حالت سطح آزاد آب (ایستایی)،



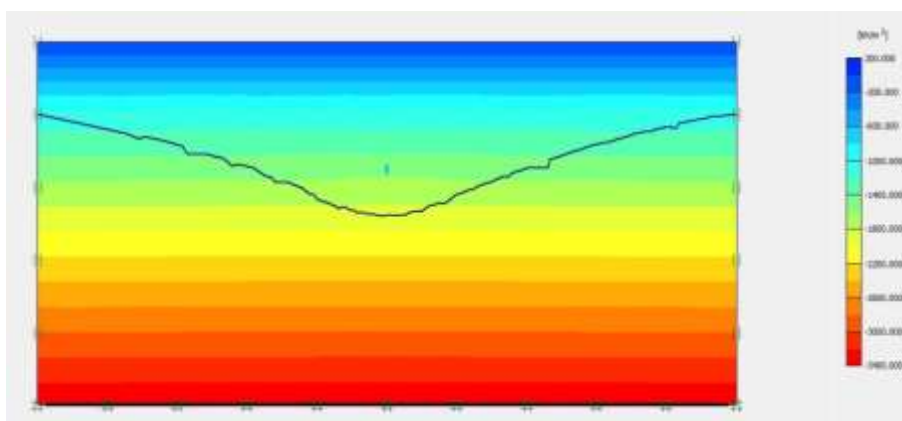
شکل ۴- توزیع تنش مؤثر استاتیکی اولیه مدل در چاه شماره یک



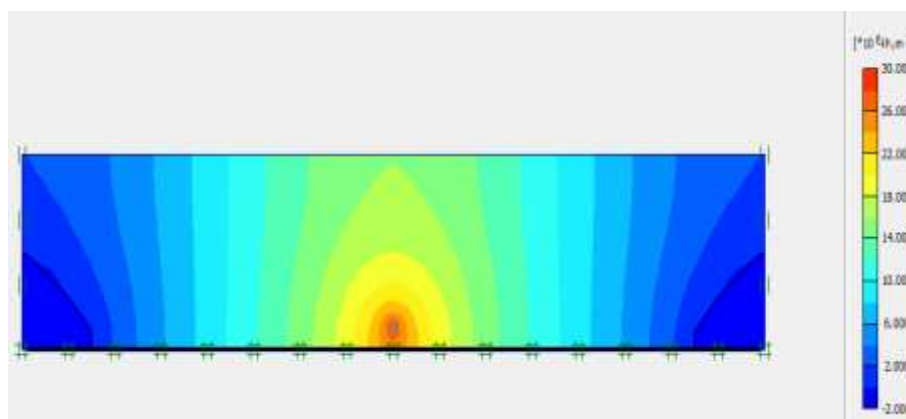
شکل ۵- توزیع فشار آب حفره‌ای اولیه مدل در چاه شماره یک

تحقیق کلیه تحلیل‌های نشست برای یک سال (سال ۱۳۹۸) طی ۳۶۵ روز انجام شده است. بنابراین بعد از اتمام این مدت نشست ناشی از پمپاژ آب در هر مدل به دست آمده است. لازم به ذکر است که به منظور مدل‌سازی چاه پمپاژ در نرم‌افزار می‌توان از دو نوع چاه در حالت تخلیه و تغذیه استفاده نمود. در این تحقیق از حالت تخلیه آب از محیط برای تعریف چاه در مدل استفاده شده است. در این حالت می‌توان میزان شدت جریان آب پمپاژ شده از چاه را در هر مرحله تعیین و تحلیل نشست را انجام داد.

پس از به تعادل رسیدن مدل، در مرحله دوم، چاه در مدل فعال شده تا تأثیر تخلیه آب از محیط بر روی رفتار خاک اعمال شود. در این مرحله که چاه فعال می‌شود و در واقع پمپاژ آب از چاه صورت می‌گیرد، لذا سطح آزاد آب اولیه دچار افت می‌شود. به عنوان مثال شکل‌های ۶ و ۷ نیز به ترتیب نشان‌دهنده نحوه توزیع تنش مؤثر استاتیکی و فشار آب حفره‌ای مدل بعد از فعال شدن چاه و پمپاژ آب چاه از شماره یک است. همان‌طور که در شکل مشخص است در این حالت سطح ایستابی طی اجرای مدل تغییر می‌کند. از آن‌جا که نشست زمین تابع زمان است، در این



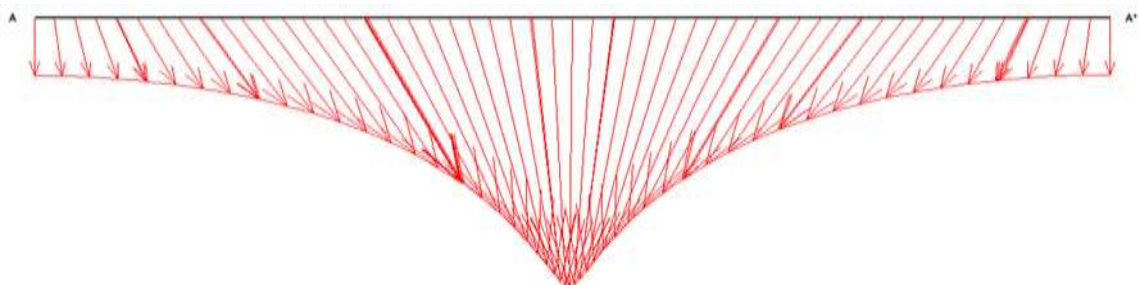
شکل ۶- توزیع تنش مؤثر استاتیکی مدل بعد از پمپاژ چاه شماره یک



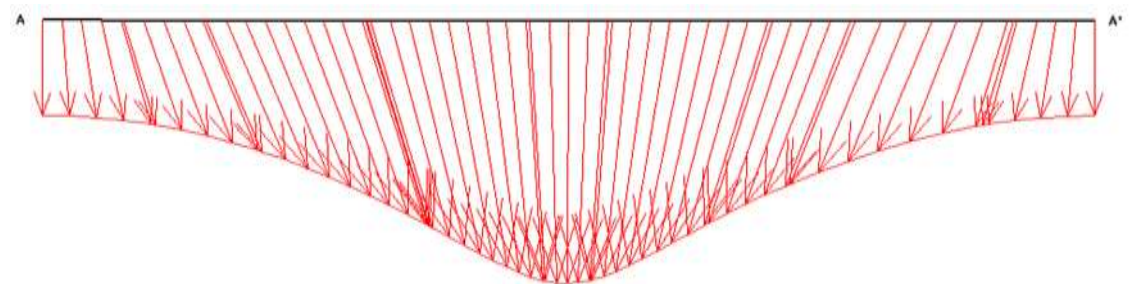
شکل ۷- توزیع فشار آب حفره‌ای مدل بعد از پمپاژ چاه شماره یک

نقطه متمرکز نمی‌شود، لذا در این حالت مقدار متوسط نشست در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با افزایش شدت جریان برداشت آب از چاه، نوع نشست از حالت بحرانی (حداکثر نشست در یک نقطه) به حالت فوق بحرانی (حداکثر نشست در یک سطح) تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است در واقعیت دبی برداشت آب از چاه‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۵۶۰ و ۴۷۵ مترمکعب در روز است. لذا به منظور تحلیل حساسیت نشست نسبت به شدت جریان برداشت آب از چاه پمپاژ، تحلیل نشست با مقادیر شدت جریان کمتر و بیشتر از مقادیر مذکور انجام شده است.

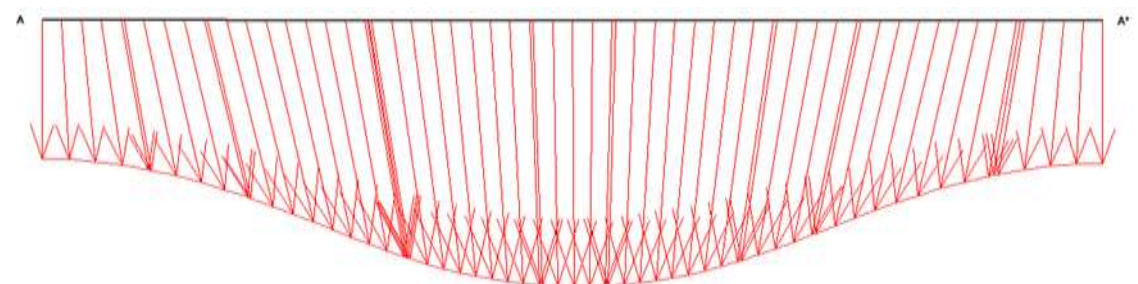
در پایان اجرای مدل، میزان نشست را می‌توان معادل با مقدار جابه‌جایی‌ها در راستای قائم تعیین نمود. بدین منظور مقدار تغییرشکل‌های مذکور که معادل نشست زمین است را می‌توان به صورت بردارهای جابجایی (شکل ۸) یا به صورت مقادیر عددی به دست آورد. در شکل‌های ۸ بردارهای جابه‌جایی قائم یا پروفیل نشست ایجاد شده در چاه شماره یک با دبی‌های برداشت ۱۰۰ (شکل ۷-الف)، ۴۰۰ (شکل ۷-ب) و ۷۰۰ (شکل ۷-ج) مترمکعب در روز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش دبی برداشت، در هر دو چاه نقاط بیشتری به حداکثر نشست می‌رسند و حداکثر نشست موجود تنها در یک



(الف)



(ب)



(ج)

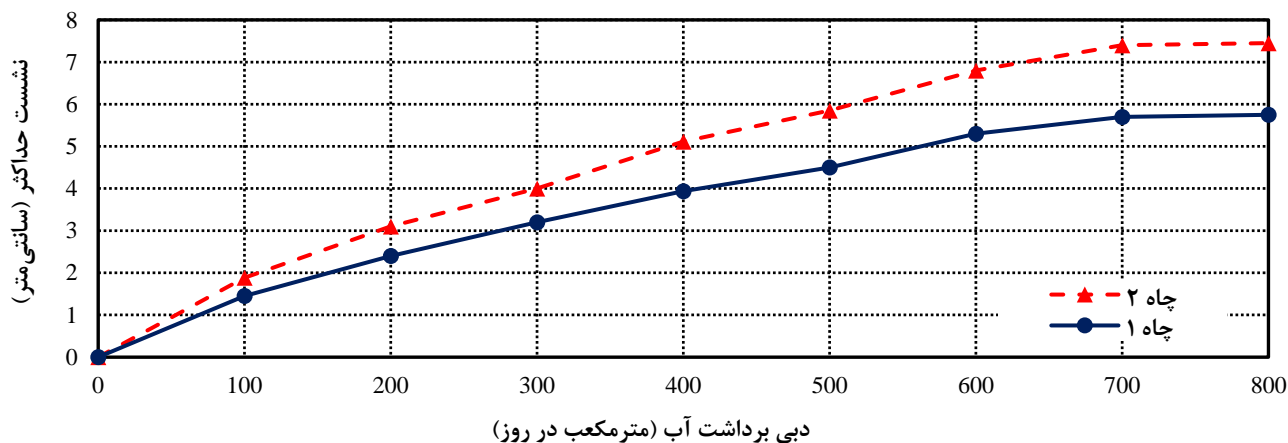
شکل ۸- بردارهای جابه‌جایی و منحنی نشست زمین ناشی از برداشت آب از چاه شماره ۱ تحت شدت جریان: (الف) ۱۰۰؛ (ب) ۴۰۰؛ (ج) ۷۰۰ مترمکعب در روز

حداکثر مقدار نشست چند سانتی‌متر است. هم‌چنین مقدار نشست در چاه شماره ۲ کمی بیشتر از چاه شماره ۱ است. نمودار نشان می‌دهد که افزایش شدت جریان تا تقریباً ۷۰۰ مترمکعب

شکل ۹ نمودار تغییرات حداکثر نشست زمین به دست آمده در شدت جریان‌های مختلف برداشت را در هر دو چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این حالت بسته به میزان شدت جریان برداشت،

بیشتر از مقدار ثابت (۷۰۰ مترمکعب در روز)، تنها منجر به افزایش تنش بین دانه‌ها شده و با توجه به سرعت بالای آب در شدت جریان‌های بالاتر، افزایش دبی برداشت از ۷۰۰ مترمکعب به بالا تأثیری بر نشست نخواهد داشت.

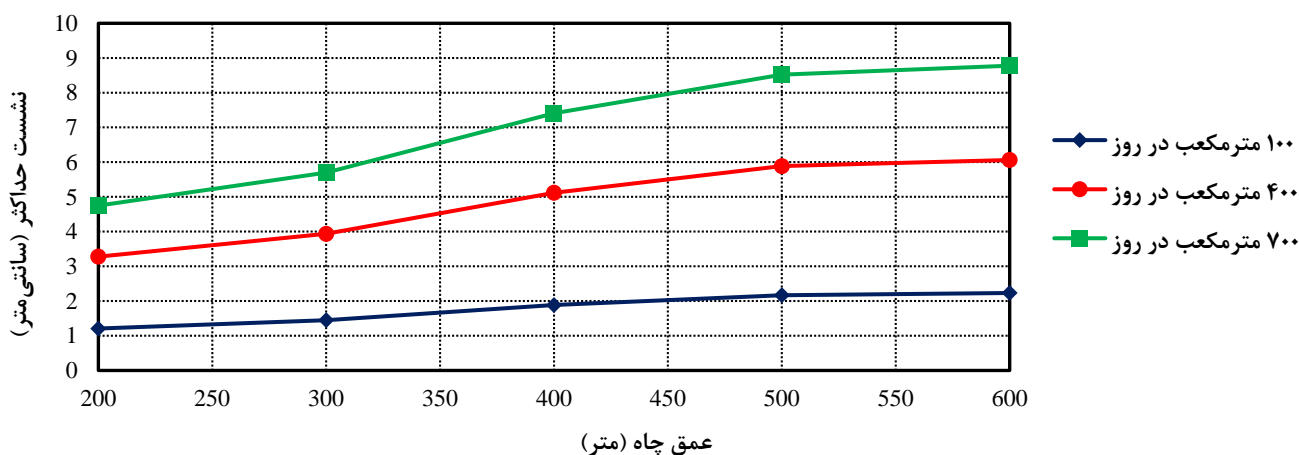
در روز باعث افزایش نشست شده و بعد از آن تقریباً مقدار نشست ثابت می‌شود. در این حالت افزایش شدت جریان برداشت از چاه، منجر به تخلیه بیشتر آب در مدت زمان برابر شده و در نتیجه باعث افزایش نشست سطح زمین می‌شود. ولی به دلیل ثابت بودن اندازه و تعداد حفره‌های موجود در خاک، با افزایش شدت جریان



شکل ۹- تغییرات حداکثر نشست زمین نسبت به شدت جریان برداشت آب از چاه‌های برداشت

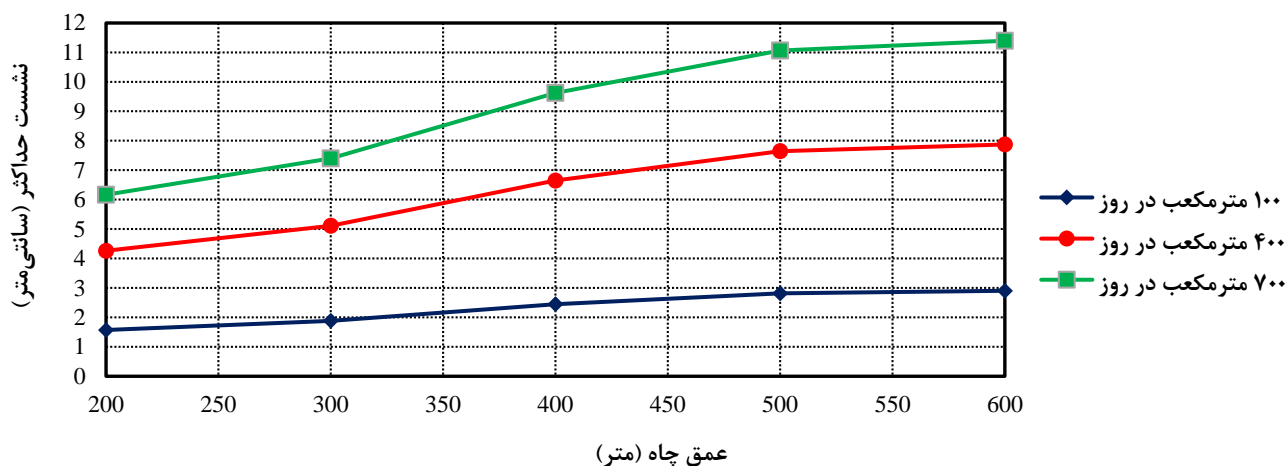
این است که با افزایش عمق، حجم توده خاک و به طبع آن حجم آب موجود در این توده نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این که چاه از این حجم آب برای تخلیه استفاده می‌کند، در صورت بالا بودن مقدار آب در خاک، قابلیت برداشت بیشتر وجود داشته و منجر به نشست بیشتر سطح زمین می‌شود. ولی با افزایش عمق و در نتیجه میزان بار سنگ میزان جابجایی‌ها به حدی است که دیگر نشست بیشتر از یک حد مشخصی افزایش نمی‌یابد و ثابت می‌ماند. در واقع با افزایش عمق چاه، فشار آب حفره‌ای مثبت (مکشی) بیشتر شده و تأثیر عمق چاه بهتر و کامل‌تر در مدل مشخص می‌شود. افزایش فشار آب حفره‌ای مثبت باعث ایجاد نیروی کششی بیشتر و به طبع آن نشست بیشتر زمین در مدل می‌شود.

در ادامه نیز به منظور تأثیر عمق چاه پمپاژ در میزان نشست، تحلیل حساسیت نشست انجام شده است. بدین منظور با ساخت مدل‌های متعدد، میزان نشست در عمق‌های مختلف چاه (از عمق ۲۰۰ متر تا ۶۰۰ متر، به فواصل ۱۰۰ متری) و تحت دبی‌های پمپاژ آب مختلف (۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ مترمکعب در روز) در دو چاه مورد مطالعه تعیین شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات نشست حداکثر نسبت به عمق چاه در چاه‌های شماره ۱ و ۲ است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، ضمن این که با افزایش دبی پمپاژ میزان نشست زمین بیشتر می‌شود، در هر دو چاه، افزایش عمق چاه تا ۵۰۰ متر باعث افزایش مقدار نشست و بعد از آن تقریباً ثابت می‌شود. علت آن



شکل ۱۰- تغییرات حداکثر نشست زمین نسبت به عمق چاه تحت دبی‌های مختلف برداشت آب در چاه شماره ۱





شکل ۱۱- تغییرات حداکثر نشست زمین نسبت به عمق چاه تحت دبی‌های مختلف برداشت آب در چاه شماره ۲

#### ۴- نتیجه‌گیری

می‌شود مکش ایجاد شده ضمن پمپاژ آب بیشتر شده و در نتیجه نشست بیشتری رخ دهد. لذا به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که نشست زمین به دلیل افت سطح ایستایی کمیته ناهمگن است که مقدار آن به میزان دبی یا شدت جریان برداشت آب، عمق چاه برداشت آب و جنس مواد دربرگیرنده چاه بستگی دارد. در این تحقیق به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات ژئوتکنیکی کامل منطقه، جنس مواد دربرگیرنده در طول چاه یکسان فرض شده است، لذا انجام آزمایش‌های برجا و نمونه‌گیری در عمق‌های مختلف زمین به منظور تعیین دقیق‌تر پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های زمین و میزان نشست زمین پیشنهاد می‌شود.

#### ۵- مراجع

- اکبری، م.، جرگه، م.ر.، و مدنی سادات، ح.، (۱۳۸۸)، "بررسی افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۴)۱۶، ۶۳-۷۸.
- آل خمیس، ر.، کریمی نسب، س.، و آریانا، ف.، (۱۳۸۵)، "بررسی تأثیر نشست حاصل از تخلیه آب زیرزمینی بر تخریب لوله جدار"، نشریه آب و فاضلاب، (۴)۱۷، ۷۷-۸۸.
- انصاری شاد، م.، (۱۳۹۵)، "گزارش آزمایشگاه مکانیک خاک کاشان"، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان.
- انواری، م.ع.، و نوراللهیان، ح.، (۱۳۸۶)، "نگرشی نو به فرونشست دشت مشهد"، همایش ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.
- رحمانیان، د.، (۱۳۶۵)، "نشست زمین و ایجاد شکاف بر اثر تخلیه آب‌های زیرزمینی در کرمان"، نشریه آب، (۶)، ۲۸-۳۵.

تحلیل نشست زمین ناشی از برداشت آب از چاه‌های پمپاژ و تعیین عوامل موثر بر آن هدف اصلی انجام این تحقیق بود. به این منظور از اطلاعات دو چاه پمپاژ آب واقع در شهر کاشان استفاده شد و با مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار PLAXIS2D، میزان نشست زمین ناشی از برداشت آب از چاه‌های مذکور طی مدت زمان یک‌سال به دست آمده است. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش شدت جریان برداشت آب از چاه، با افت سطح ایستایی میزان نشست زمین بیشتر می‌شود. لذا به منظور کنترل و کاهش نشست زمین باید میزان برداشت آب از چاه‌های بهره‌بردار در حد مجاز انجام گیرد. در این حالت نشست به صورت جابجایی قائم گودی شکل در مرکز چاه حداکثر بوده و به سمت بیرون گسترش می‌یابد. از آن‌جا که حداکثر میزان نشست زمین که در حد چند سانتی‌متر بوده در مرکز چاه اتفاق افتاده، لذا پایدارسازی و نگهداری دهانه و دیواره چاه برداشت پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که از شدت جریان برداشت ۷۰۰ مترمکعب در روز به بعد مقدار نشست افزایش نیافته و ثابت باقی می‌ماند که نشان از حداکثر میزان جابه‌جایی زمین است. تحلیل حساسیت نیز نشان داده با افزایش عمق چاه، میزان نشست سطح زمین بیشتر می‌شود. در این حالت از یک عمق مشخصی (عمق ۵۰۰ متر در این تحقیق)، افزایش عمق چاه تأثیری بر مقدار نشست سطح زمین نداشته و مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در تمام موارد، تحت دبی ثابت برداشت آب از چاه‌های پمپاژ، مقدار نشست چاه شماره ۲ از چاه شماره ۱ بیشتر است. دلیل این موضوع می‌تواند بیشتر بودن مقدار چسبندگی خاک اطراف چاه شماره ۲ نسبت به چاه شماره ۱ باشد که باعث

مهندسی عمران و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

مقدم فردویی، ر.، محمد احمدآبادی، ر.، و علی مددی، م.، (۱۳۹۰)، "بررسی فرونشست در دشت علی آباد قم"، *سی‌امین گردهمایی علوم زمین*، تهران.

نوروزی، غ.ر.، احمدی دستگرد، ع.، رهنما راد، ج.، و درمیانی، ع.، (۱۳۹۰)، "افت سطح آب زیرزمینی و بررسی نشست زمین در دشت درمیان"، *سی‌امین گردهمایی علوم زمین*، تهران.

Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Wangsaatmaja, S., Fukuda, Y., and Deguchi, T., (2009), "Land subsidence and groundwater extraction in Bandung Basin, Indonesia", *IAHS Publication*, 20, 145.

Aly, M.H., Zebker, H.A., Giardino, J.R., and Klein, A.G., (2009), "Permanent scatterer investigation of land subsidence in Greater Cairo, Egypt", *Geophysical Journal International*, 178(3), 1238-1245.

Baldi, P., Casula, G., Cenni, N., Loddo, F., and Pesci, A., (2009), "GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy)", *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2), 204-212.

Barends, F.B., Brouwer, F.J., and Schroeder, F.H., (1995), "Land subsidence-by fluid withdrawal, by solid extraction, theory and modelling, environmental effects and remedial measures", *In proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence*, 16-20, Hague.

Chatterjee, R.S., Fruneau, B., Rudant, J.P., Roy, P.S., Frison, P.L., Lakhera, R.C., Dadhwal, V.K., and Saha, R., (2006), "Subsidence of Kolkata (Calcutta) city, India during the 1990s as observed from space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique", *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 176-185.

Chen, C., Pei, S., and Jiao, J., (2003), "Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou city, China", *Hydrogeology Journal*, 11(2), 275-287.

Chen, C.T., Hu, J.C., Lu, C.Y., Lee, J.C., and Chan, Y.C., (2007), "Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan", *Engineering Geology*, 95(1-2), 30-47.

Ilija, I., Loupasakis, C., and Tsangaratos, P., (2018), "Land subsidence phenomena investigated by spatiotemporal analysis of groundwater resources, remote sensing techniques, and random forest method: The case of Western Thessaly, Greece", *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11), 1-19.

Galloway, D.L., Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E., (1999), "Land subsidence in the United States", Vol. 1182, US Geological Survey, United States.

Gambolati, G., (1975), "Numerical models in land subsidence control", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 5(2), 227-237.

Hou, C.S., Hu, J.C., Shen, L.C., Wang, J.S., Chen, C.L., Lai, T.C., Huang, C., Yang, Y.R., Chen, R.F., Chen,

توسلی، ا.، کاربین، ح.، ترابی، م.، و عساکره، ع.، (۱۳۹۸)، "بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست دشت جنوب شرقی تهران بر اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی"، *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۲)، ۵۸-۷۲.

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.

زارع مهرجردی، ا.ع.، (۱۳۹۰)، "بررسی پدیده نشست زمین و شکستگی‌های موجود در منطقه رستاق جنوب میبد"، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۲(۳)، ۱۵۵-۱۶۶.

شمشکی، ا.، بلورچی، م.ج.، و انتظام سلطانی، ا.، (۱۳۸۴)، "فرونشست زمین در دشت تهران و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن"، *بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین*، تهران.

عباس‌نژاد، ا.، (۱۳۷۷)، "بررسی شرایط و مسائل زمین‌شناسی محیط‌زیست دشت رفسنجان"، *دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*، مشهد، ۳۰۳-۳۱۰.

عباس‌نژاد، ا.، و شاهی دشت، ع.، (۱۳۹۲)، "بررسی آسیب‌پذیری دشت سیرجان با توجه به برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی منطقه"، *نشریه جغرافیا و آمایش شهری-منطقه‌ای*، ۳(۷)، ۸۵-۹۶.

قیومی محمدی، ح.، رامشت، م.ح.، و مرادی، ی.، (۱۳۸۸)، "بررسی فرآیندهای مورفوتیک تأثیرگذار بر نشست زمین در استان اصفهان"، *دومین همایش اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن*، اصفهان.

لشگری پور، غ.ر.، غفوری، م.، سویزی، ز.، و پیوندی، ز.، (۱۳۸۴)، "افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت مشهد"، *نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*، تهران.

لشگری پور، غ.ر.، غفوری، م.، کاظمی گلپان، ر.، و دم شناس، م.، (۱۳۸۶)، "نشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور"، *پنجمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران*، تهران.

لشگری پور، غ.ر.، غفوری، م.، و رستمی بارانی، ح.ر.، (۱۳۸۷)، "بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر"، *نشریه مطالعات زمین‌شناسی*، ۱(۱)، ۹۵-۱۱۱.

مصلحی، ع.، و قاضی فرد، ا.، (۱۳۸۹)، "بررسی فرونشست زمین و پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت کاشان"، *همایش ملی*

measured land subsidence in Ojiya city, Niigata prefecture, Japan”, *Engineering Geology*, 67(3-4), 379-390.

Solaimani, K., and Mortazavi, S.M., (2008), “Investigation of land subsidence and its consequences of large groundwater withdrawal in Rafsanjan, Iran”, *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11, 265-269.

Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni, W., and Gonella, M., (2005), “A century of land subsidence in Ravenna, Italy”, *Environmental Geology*, 47(6), 831-846.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

Y.G., and Angelier, J., (2005), “Estimation of subsidence using GPS measurements, and related hazard: The Pingtung Plain, Southwestern Taiwan”, *Comptes Rendus Geoscience*, 337(13), 1184-1193.

Hu, J.C., Chu, H.T., Hou, C.S., Lai, T.H., Chen, R.F., and Nien, P.F., (2006), “The contribution to tectonic subsidence by groundwater abstraction in the Pingtung area, southwestern Taiwan as determined by GPS measurements”, *Quaternary International*, 147(1), 62-69.

Larson, K.J., Başağaoğlu, H., and Marino, M.A., (2001), “Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman city area, California, using a calibrated numerical simulation model”, *Journal of Hydrology*, 242(1-2), 79-102.

Leake, S.A., (2004), “Land Subsidence from Ground-Water Pumping”, United States Geological Survey, Available On: <https://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside>.

Lee, I., Choi, Y.T., Lee, M., and Yune, C.Y., (2018), “Effect of groundwater level variation on residual settlement of Korean high-speed railway on soft ground”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(9), 3312-3320.

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.U., Zschau, J., and Arabi, S., (2007), “Land subsidence in Mashhad Valley, Northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS”, *Geophysical Journal International*, 168(2), 518-526.

Mousavi, S.M., Shamsai, A., Naggar, M.H.E., and Khamsehchian, M., (2001), “A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 452-464.

Ortega Guerrero, A., Rudolph, D.L., and Cherry, J.A., (1999), “Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling”, *Water Resources Research*, 35(11), 3327-3341.

Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., and Ochoa, G., (2006), “Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México”, *Engineering Geology*, 84(3-4), 143-160.

Phien-Wej, N., Giao, P.H., and Nutalaya, P., (2006), “Land subsidence in bangkok, Thailand”, *Engineering Geology*, 82(4), 187-201.

Pratikso, P., Soedarsono, S., and Kurniawan, A., (2017), “Analysis of land subsidence (land subsidence) affects against water puddle in Semarang city”, *International Conference on Coastal and Delta Areas*, Vol. 3, 313-321.

Rahnama, M.B., and Moafi, H., (2009), “Investigation of land subsidence due to groundwater withdraws in Rafsanjan plain using GIS software”, *Arabian Journal of Geosciences*, 2(3), 241-246.

Rajabi, A.M., (2018), “A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom-Iran”, *Natural Hazards*, 93(2), 1085-1103.

Sato, H.P., Abe, K., and Ootaki, O., (2003), “GPS-