



The Study of Land Subsidence due to Aquifer Water Level Decline (Case Study: Karaj and Hashtgerd Plains)

Firouz Ghasemzadeh¹, Ali Sadrzadeh^{2*}, Saeed Naghdi³, Mojtaba Noury⁴

Abstract

The land subsidence is an important environmental issue that sometimes causes irreversible damages to the environment. Understanding the necessity of this issue and observing the field evidences of subsidence in the plains of Alborz province, current study was carried out in plains located west of the Alborz province. The methods used in this research are based on the permanent GPS data of NajmAbad station, radar data analysis and leveling of groundwater piezometric network. After extracting subsidence values and generating its raster map in the study area, the resulted map was overlaid by map of annual volume of water obtained from wells and also the map of head reduction of the aquifer. The results indicated that subsidence is strongly influenced by these parameters and even according to data of geodynamic network, seasonal fluctuations of aquifer table cause to fluctuation of the earth's surface. Based on the time series of the elevation of earth's surface, recorded on Najmabad's permanent GPS, the magnitude of seasonal fluctuations in the earth's surface has decreased during time. It was inferred that the reduction in fluctuations is related to the reduction of elasticity of earth layers, due to experiencing of higher pre-consolidation pressures. The results of radar data analysis and leveling of piezometers indicated, respectively, subsidence values up to 15 and 20 centimeters per year. The resulted values are very significant and in order to deal with potential risks, the preventive actions especially in the area of water resources management must be done.

Keywords: *Land Subsidence, Hashtgerd Plain, Karaj Plain, Radar Interferometry, Leveling of Piezometers.*

¹ Ph.D. Graduate of Hydraulic Structures & Head of Water Resources Balance & Combination Group, Alborz Regional Water Authority, Karaj, Iran. Email: F.GH.WATER@GMAIL.COM.(Alborz Regional Water Authority, Karaj, Iran; 026-33342300(132)-09197011391)

² M.Sc. Student of Water Resources Engineering, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: A.SADRZADEH@UT.AC.IR

³ Director of Water Resources Studies, Alborz Regional Water Authority, Karaj, Iran. Email: SAEEDNAGHDI175@GMAIL.COM

⁴ Head of Applied Research Group, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran. Email: MOJTABANOURY@GMAIL.COM



مطالعه فرونشست زمین در اثر افت تراز آبخوان (مطالعه موردی: دشت‌های کرج و هشتگرد)

فیروز قاسم‌زاده^۱، علی صدرزاده^{۲*}، سعید نقدی^۳، مجتبی نوری^۴

چکیده

فرونشست زمین یکی از مسائل دامن‌گیر طبیعت بوده‌است و باعث خسارت‌های بعضاً جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست می‌شود. تحقیق حاضر با درک ضرورت این موضوع و براساس شواهد عینی فرونشست در دشت‌های استان البرز، این پدیده را در دشت‌های واقع در غرب استان البرز مورد مطالعه قرار داد. روشهای مورد استفاده در این پژوهش بر پایه آمار و اطلاعات GPS دائمی ایستگاه نجم‌آباد، آنالیز اطلاعات راداری و همچنین ترازبایی نقطه‌نشان‌های شبکه پیزومتری است. بعد از استخراج میزان فرونشست و تهیه نقشه رستری آن در سطح کل منطقه مورد مطالعه، نتایج با مقادیر برداشت چاه‌های بهره‌برداری و همچنین افت تراز آبخوان، تطبیق داده شد و مشخص شد که میزان فرونشست از این پارامترها بشدت تأثیر می‌پذیرد و حتی طبق اطلاعات شبکه ژئودینامیک کشور، نوسانات فصلی تراز آبخوان منجر به تغییرات نوسانی در تراز زمین نیز می‌گردد و براساس سری زمانی تراز سطح زمین ثبت شده در GPS دائمی نجم‌آباد، دامنه نوسانات فصلی تراز زمین در طول زمان کاهش یافته است که محققین این امر را به کاهش خاصیت الاستیک لایه‌های آبخوان در اثر تجربه تنش‌های پیش‌تحکیمی بالاتر نسبت دادند. نتایج آنالیز راداری و ترازبایی نقطه‌نشان‌های پیزومتری نشانگر نرخ بیشینه فرونشست سالانه بترتیب تا حدود ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در سال بودند که این میزان فرونشست بسیار بالاست و برای مقابله با خسارات احتمالی، باید نسبت به اقدامات پیشگیرانه بویژه در حوزه مدیریت منابع آب اقدام شود.

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، دشت هشتگرد، دشت کرج، تداخل سنجی راداری، ترازبایی پیزومتر.

^۱ دانش‌آموخته دکترای مهندسی آب و رئیس گروه تلفیق و بیلان شرکت آب منطقه‌ای البرز. ایمیل: F.GH.WATER@GMAIL.COM

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران. ایمیل: A.SADRZADEH@UT.AC.IR

^۳ مدیر دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای البرز. ایمیل: SAEEDNAGHDI175@GMAIL.COM

^۴ رئیس گروه تحقیقات کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران. ایمیل: MOJTABANOURY@GMAIL.COM

مقدمه

لایه‌های خاک می‌گردد که می‌تواند منجر به کاهش فشار آب منفذی و در نتیجه تراکم لایه‌های خاک و فرونشست زمین شود (Sneed and Brandt, 2007). خروج آب از لایه‌های خاک همچنین باعث افزایش مکش در خاک و افزایش تنش مؤثر شده و باعث تجربه تنش‌های پیش‌تحکیمی بالا در خاک و از بین رفتن حالت الاستیک می‌شود. تحت این شرایط حتی بعد از برگشت مجدد آب به لایه‌ها، وضعیت خاک دیگر نمی‌تواند احیا شود. چرا که طبق پژوهش‌های Estabragh et al., 2017 بر روی تحکیم خاک در شرایط تر و خشک شدن متوالی، مشخص شد که خاک در حالت تر شدن نسبت به حالت خشک شدن در محدوده بیشتری حالت الاستیک خود را حفظ میکند ولی پس از چند چرخه متوالی خشک شدن و تر شدن حالت هیسترسیس (Hysteresis) در منحنی تحکیم مستهلک شده و منحنی تر و خشک بر هم منطبق می‌شوند (Estabragh et al., 2013; Estabragh et al., 2014; Estabragh et al., 2016). بنابراین فرونشست علاوه بر فروریزش‌های موضعی یا نشست عمومی سطح زمین، باعث خساراتی مانند کاهش ظرفیت ذخیره خاک از طریق سازوکار فوق‌الذکر نیز می‌گردد. این اتفاق باعث تغییر در بیلان آب زیرزمینی شده و ظرفیت سفره آب زیرزمینی به عنوان تنها منبع تامین آب بسیاری از مناطق را کاهش می‌دهد (Engineering Geology Group of GSI, 2004). از دیگر خسارات ناشی از فرونشست می‌توان به نابودی زمین‌های کشاورزی، تخریب سیستم‌های آبیاری، افزایش سیل‌خیزی مناطق، کج شدن و بیرون‌زدگی لوله‌های چاه، خرابی ساختمان‌ها، خیابان‌ها و شریان‌های حیاتی، پل‌ها، بزرگراه‌ها، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب اشاره نمود (Lashkaripour et al., 2008; Amighpey et al., 2010). از آنجایی که فرونشست اساساً پدیده‌ای

توسعه جوامع بشری و افزایش جمعیت موجب کاهش سرانه آب تجدیدپذیر شده است به طوریکه در برخی نقاط سرانه آب حتی به کمتر از ۱۰ مترمکعب بر سال نیز می‌رسد (Alizadeh, 2008). بروز این مسئله درکنار توزیع ناهمگون منابع آب، باعث وقوع تنش در وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی شده و مشکلات زیست‌محیطی را به همراه داشته است که یکی از موارد بسیار مهم، وقوع پدیده فرونشست (Land Subsidence) در اثر برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و افت تراز ایستابی است.

فرونشست زمین عبارت است از فروریزش یا نشست تدریجی سطح زمین که به دلیل جابجایی و تغییر شکل (تراکم) مواد زیرسطحی رخ می‌دهد (Galloway et al., 1999) و این پدیده علاوه بر جابجایی عمودی می‌تواند اندک جابجایی افق نیز داشته باشد (Hsu et al., 2015). فرونشست می‌تواند در اثر پدیده‌های مختلفی از قبیل، انحلال در سازندها، جنس سازند، زمین‌لرزه، گسل، بارندگی و دما، زهکشی لایه‌های آبدار، نشست لوله‌های فاضلاب یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدنکاری، استخراج نفت و گاز، تخلیه آب از لایه‌های زیرزمینی و ساخت و ساز ایجاد شود (Sharifikia, 2012; Rezaie and Dadsetan, 2012; Haghghatmehr et al., 2012). ولی سوابق موجود در زمینه بررسی پدیده فرونشست در ایران نشانگر این است که مهمترین علت فرونشست‌ها، عوامل انسانی در اثر برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها است (Haghghatmehr et al., 2012; Amighpey et al., 2007; Amighpey et al., 2009).

برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باعث افت تراز سطح ایستابی و خروج آب از منافذ

(Dadsetan et al., 2002)، بررسی علل وقوع فرونشست در جنوب غرب تهران (Shemshaki and Entezam, 2004)، شکاف‌های ایجاد شده در دشت معین‌آباد- ورامین (Shemshaki and Entezam, 2006)، بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار (Shemshaki et al., 2005) و بررسی فروچاله و شکاف زمین دشت ایچ استان فارس (Entezam et al., 2015) است که پیامدهای پدیده را نیز مورد بررسی قرار داده‌است.

از روش‌های مطرح در مطالعات پدیده فرونشست، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی مانند عملیات ترازیابی، سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و رادار (InSAR, SAR) بوده که در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌است. روش تداخل‌سنجی راداری با ویژگی پوشش وسیع و توان تفکیک مکانی بالا در کنار سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) با توان تفکیک زمانی بالا و عملیات ترازیابی دقیق جهت صحت‌سنجی و کنترل نتایج حاصل از آن می‌تواند منبع مناسبی برای مطالعه و بررسی فرونشست زمین باشد (Abidin et al., 2015b; Amighpey et al, 2007; Amighpey et al, 2010; Amighpey et al, 2009). در ایران (Haghighatmehr et al (2012) به ارزیابی قابلیت روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در تعیین فرونشست دشت هشتگرد پرداختند و در تأیید قابلیت این روش از مشاهدات سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) بهره گرفتند.

(Amighpey et al (2010) از طریق مطالعات میدانی در دشت یزد- اردکان (حد فاصل شمسی و حجت‌آباد) به روش ترازیابی دقیق به این نتیجه رسید که نرخ فرونشست در منطقه حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال طی سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۰ بوده که بدلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی حادث

غیر قابل حذف و در بیشتر مواقع برگشت‌ناپذیر است بنابراین باید ذات این پدیده و عوامل موثر در ایجاد آنرا شناخت و به دنبال اقدامات پیشگیرانه بود و بواسطه این اقدامات، نرخ رشد فرونشست را کاهش و مخاطرات ناشی از آن را به حداقل رساند (Lee and Able, 1983; Angorani et al., 2015;) (Amighpey, 2010).

فرونشست زمین برای نخستین بار در برنامه‌های دهه جهانی آبشناسی یونسکو ۱۹۷۴-۱۹۶۵، گنجانده شد. در آوریل ۱۹۷۵، کارگروه فرونشست زمین (WGLS) با محوریت موضوع ارتباط میان این پدیده با آب‌های زیرزمینی شکل گرفت. اساس مطالعات این کارگروه بررسی ۴۲ مورد فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در ۱۱ کشور جهان بود. که در این میان کشورهای ایالات متحده و ژاپن به ترتیب با ۱۸ و ۱۰ مورد مطالعاتی بیشترین سهم بررسی و مطالعه این پدیده را به خود اختصاص داده بودند (Poland, 1984). در سطح جهانی، خطر فرونشست زمین ناشی از تخلیه بی‌رویه آبخوان‌ها و افت تراز ایستابی در طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ همزمان با افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و صنعتی‌شدن کشورها به اوج خود رسید (Waltham, 1989).

بروز پدیده فرونشست بر اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در سطح کشورمان نیز سابقه نسبتاً طولانی دارد. به طوریکه اولین بار فرونشست زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ گزارش شده است (Mahmoudpour and Shemshaki, 2016). بررسی‌های موردی در سازمان زمین‌شناسی به عنوان متولی بررسی مخاطرات زمین‌شناختی کشور شامل بررسی فروچاله‌های (Sinkhole) متعدد دشت‌های کبودآهنگ، فامنین و همه‌کسی استان همدان

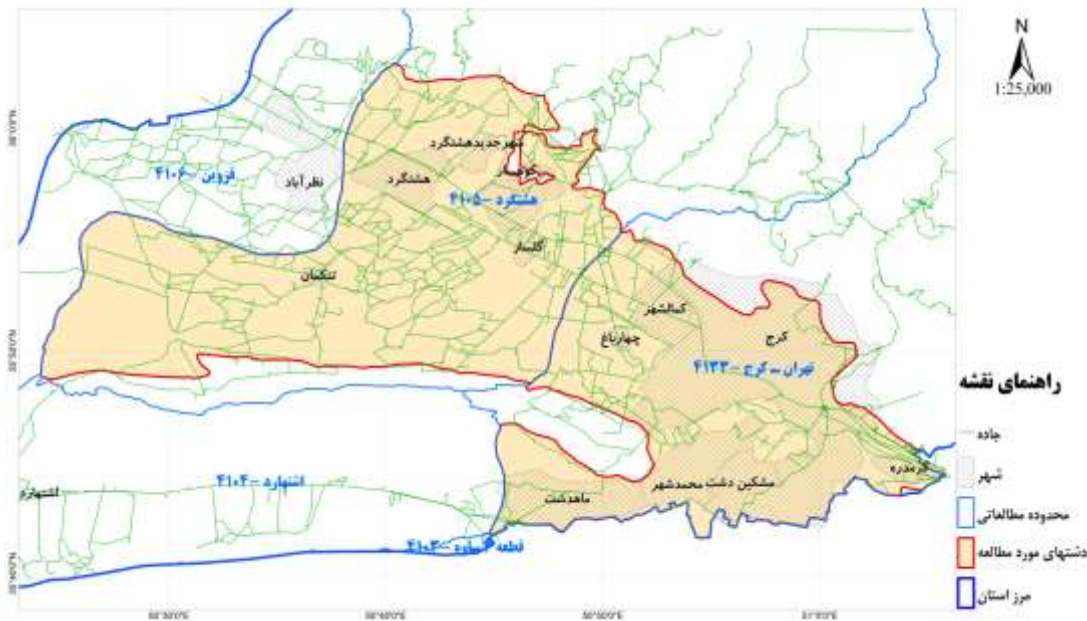
پدیده فرونشست و (ب) پهنه‌بندی میزان فرونشست در دشت‌های کرج به منظور تطبیق آن با وضعیت منابع آب، انجام شد.

روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر شامل دشت‌های کرج و هشتگرد واقع در استان البرز است (شکل) که مرز آن در بخش‌های شمال و جنوب منطبق بر مرز ارتفاع و دشت مصوب وزارت نیرو، بخش شرقی منطبق بر مرز سیاسی استان البرز که تقریباً با مرز دشت کرج نیز انطباق دارد و در بخش غربی محدود به مرز محدوده مطالعاتی هشتگرد، مصوب وزارت نیرو با کد ۴۱۰۵، است. بدلیل استقرار بیش از ده شهر در منطقه مورد مطالعه که کرج و هشتگرد از مهمترین آنها هستند، همچنین وجود تعداد زیادی شهرک صنعتی، واحدهای صنعتی و تجاری و راه‌های ارتباطی، منطقه از جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی دارای حساسیت بالا تشخیص داده‌شد و پدیده فرونشست با تاکید بر تغییرات ناشی از افت تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت.

شده‌است. همچنین بررسی‌های Saffari et al (2016) در دشت کرج- شهریار به روش تداخل‌سنجی راداری نشان داد که فرونشستی به میزان ۱۳/۶ سانتی‌متر در سال طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است که محققین دلیل این فرونشست را به افت تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه نسبت دادند. مطالعه نرخ فرونشست سالیانه در شهر جاکارتا اندونزی براساس سه روش ترازیابی دقیق، تصاویر راداری InSAR و روش موقعیت‌یابی جهانی (GPS) نشان داد که میزان فرونشست برای این شهر ۳ الی ۱۰ سانتی‌متر در طی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۰ بدلیل تخلیه بی‌رویه سفره‌های آب زیرزمینی و بار حاصل از ساختمان‌ها است (Abidin et al., 2015a). با توجه به سوابق مطالعاتی در خصوص ارتباط فرونشست زمین با وضعیت منابع آب و همچنین آمار دو دهه اخیر تراز آب زیرزمینی در هیدروگراف دشت‌های کرج و هشتگرد که نشانگر روند منفی آنهاست (براساس آمار دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای البرز)، مطالعه وقوع پدیده فرونشست در این دشت‌ها مهم تشخیص داده‌شد. بنابراین تحقیق حاضر با دو هدف (الف) سنجش رفتار تراز زمین در گذر زمان در اثر وقوع

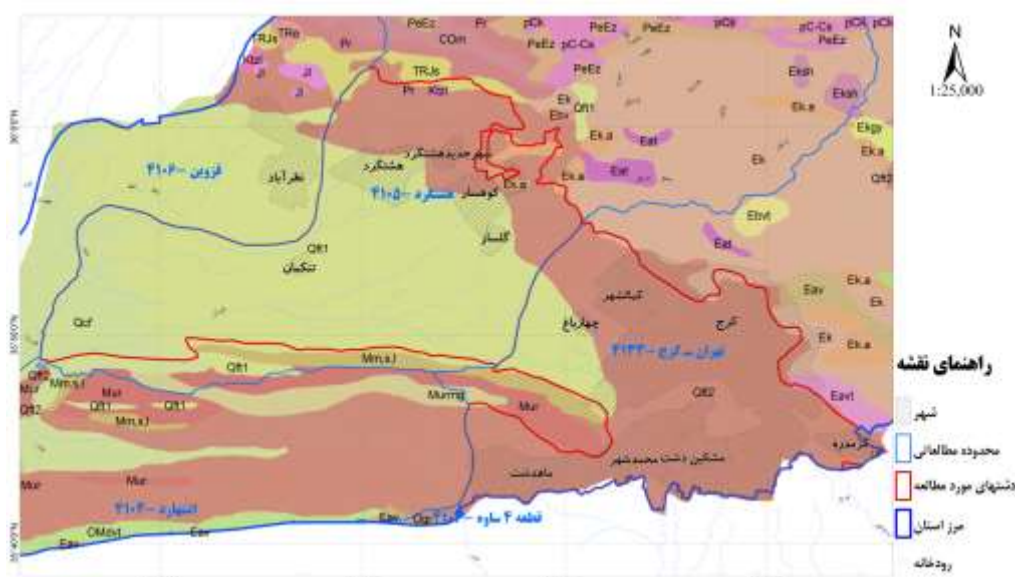


شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در تحقیق

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر ساختار زمین‌شناختی دارای وضعیتی مشابه شکل است که در ادامه به تشریح وضعیت آن پرداخته می‌شود. مرز "دشتهای مورد مطالعه" موجود در شکل بر اساس تقسیم‌بندی ارتفاع و دشت صورت گرفته توسط وزارت نیرو است و محدوده داخل این مرز اغلب متشکل از سازند آبرفتی تهران است که بافت آن شامل ماسه، شن، قلوه‌سنگ و رس می‌باشد. بدلیل

عمق بالای رسوبات کواترنری در این محدوده (حدود ۳۰۰ متر در برخی نقاط)، محدوده مورد مطالعه مستعد ذخیره منابع آب زیرزمینی است و توانسته آب با کیفیت مناسب را در خود جای دهد. وجود پتانسیل مناسب آب زیرزمینی در منطقه باعث رشد سریع تعداد چاه‌های بهره‌برداری در منطقه شده‌است که بعنوان یکی از عوامل تشدید کننده پدیده فرونشست در منطقه، در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته‌است.



شکل ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در تحقیق

زمین‌شناسی دشت هشتگرد

می‌دهد. آبرفت تهران بیشتر از قلوه‌سنگ، شن، ماسه و رس تشکیل یافته و به سمت مرکز و جنوب دشت بر مقدار مواد ریزدانه آن افزوده می‌شود و لایه ای از لیمون ظاهر می‌گردد. بنابراین تغییرات دانه‌بندی واریزه و آبرفت جوان هشتگرد به صورت شرقی- غربی و شمالی- جنوبی است. تمرکز نهشته‌های کواترنری ریزدانه با بیشترین ضخامت در مناطق میانی دشت، این مناطق را مستعد وقوع فرونشست با نرخ نسبتاً بالا خواهد نمود.

زمین‌شناسی دشت کرج

دشت کرج مابین دوسری از ارتفاعات در شمال و جنوب تشکیل یافته و شیب کلی دشت به سمت جنوب و جنوب‌شرق است. ارتفاعات شمالی دشت از توده‌های توف سبزرنگ متعلق به دوران سوم و چهارم و ارتفاعات جنوبی از آندزیت‌ها و تشکیلات میوسن ساخته شده است. دشت کرج محل اجتماع آبرفت‌های ناشی از فرسایش ارتفاعات شمالی بوده که بوسیله رودخانه کرج حمل و در دشت رسوب شده است. این رسوبات مربوط به

ساختمان دشت هشتگرد شامل ناودیس عظیمی مابین ارتفاعات حلقه‌در در جنوب و رشته‌کوه البرز در شمال است که عمیق‌ترین نواحی ناودیس مذکور در مخروط‌افکنه رودخانه کردان واقع شده که بواسطه عملکرد گسل رورانده حصارک- هشتگرد، دارای فرونشینی مداوم بوده و به‌ازای آن رسوبات آبرفتی رودخانه کردان را دریافت نموده است. همچنین عملیات فرسایشی رودخانه کردان باعث حذف کنگلومرای پلیوسن و جایگزینی آن توسط آبرفت‌ها شده است. آبرفت تهران که از دیدگاه زمین‌شناسی جزء رسوبات پلیو- کواترنر محسوب می‌شود، در بخش میانی دشت هشتگرد و از واریزه و آبرفت جوان تشکیل شده است که دارای رنگ روشن و اندازه ذرات در حد قلوه‌سنگ تا ذرات ماسه است و قطعات سنگی بیشتر از نوع سازند کرج (پالئوژن) است. این رسوبات به علت گسترش و ضخامت قابل‌توجه و همچنین نفوذپذیری زیاد آبخوان اصلی دشت را تشکیل

سازند آبرفتی تهران بوده که بافت آن شامل ماسه، شن، قلوه سنگ و رس است. این رسوبات در بیشتر قسمت‌های دشت کرج وجود دارد. رسوبات این دشت در قالب چند مخروط افکنه که بزرگترین آنها در مسیر رودخانه کرج ایجاد شده، ساختارهای بادبزی بزرگ و کوچکی را تشکیل داده‌اند. بدین معنی که در نواحی بالادست، آبرفت از نوع کم ضخامت ولی درشت دانه (قلوه سنگ و شن) و در مرکز دشت ضخیم و ریزدانه (رس و ماسه ریز) است لذا مرکز دشت از نظر پدیده فرونشست در درجه بالای حساسیت ارزیابی گردید. با احتساب افزایش ضخامت آبرفت در مرکز دشت نسبت به ارتفاعات مشاهده می‌شود که در نواحی شمالی دشت، آبرفت از نوع رودخانه‌ای و درشت دانه است که آبدهی خوبی را نشان می‌دهند. در مرکز دشت و مسیل رودخانه اصلی، رسوبات درشت دانه رودخانه‌ای که مقاومت بالایی دارند موجب تشکیل آبخوان آزادی با ضخامت و آبدهی بالا شده‌اند. به‌طور کلی اندازه این رسوبات از شمال به جنوب کمتر و به همین نسبت با ریزتر شدن دانه‌بندی، قابلیت نفوذشان نیز تقلیل می‌یابد.

روشهای تحلیل اطلاعات

با توجه به اهداف تحقیق که عبارتست از پهنه‌بندی فرونشست به منظور تطبیق آن با وضعیت منابع آب و همچنین رفتارسنجی تراز سطح زمین در گذر زمان در منطقه مورد مطالعه، از روش‌های آنالیز زیر به منظور پوشش جنبه‌های فوق‌الذکر بهره گرفته شد:

- آنالیز داده‌های راداری: پهنه‌بندی فرونشست در منطقه مورد مطالعه در یک بازه زمانی مشخص و تطبیق آن با تغییرات وضعیت منابع آب.

- آنالیز اطلاعات شبکه ژئودینامیک کشور (نقاط GPS دائمی): رفتارسنجی تراز سطح زمین در گذر زمان.
- بعد از انجام تحلیل‌های مربوط به آنالیز داده‌های راداری، عملیات تراز یابی نقطه‌نشان چاه‌های پیرومتری منطقه به منظور صحت‌سنجی نتایج صورت گرفت.

آنالیز داده‌های راداری

آنالیز داده‌های راداری بعنوان یک ابزار قوی در تحلیل پدیده‌های مختلف آب و هوا و زمین‌شناسی شناخته شده‌است. محاسبات مربوط به پدیده‌های مختلف هوا و اقلیم‌شناسی، سیلاب، تعیین نوسانات سطح آب دریا، موج سونامی، تهیه مدل رقومی ارتفاع، تغییرات ارتفاعی و غیره امروز توسط داده‌های رادار صورت می‌گیرد. اخیراً این تکنولوژی امکان خوبی را برای بررسی تغییرات موضعی و ناحیه‌ای سطح زمین (Deformation) نیز در حد سانتی‌متر و میلی‌متر فراهم کرده است و سنجنده‌هایی برای تولید اطلاعات با هدف بررسی تراز ارتفاعی زمین از چندین سال پیش فعالیت دارند. از این نوع سنجنده‌ها می‌توان به سنجنده‌های نصب شده بر روی ماهواره‌های راداری ENVISAT, ALOS-1, Sentinel-1 To 3, Cosmo Sky اشاره نمود. بنابراین اطلاعات این سنجنده‌ها در تحقیق حاضر مورد توجه واقع شد و ابتدا از نظر سازگاری با اهداف تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی‌ها نشان داد از بین ماهواره‌های فوق‌الذکر، ماهواره Cosmo Sky بدلیل مدار عبور با فاصله زیاد از منطقه طرح و ماهواره ALOS-1 بدلیل طول موج بسیار بلند (۲۳-۱۵ cm) برای اهداف تحقیق حاضر مناسب نیستند. اما دو ماهواره اروپایی ENVISAT و Sentinel هر دو دارای سنجنده‌های

اصلی (MASTER) و در تاریخ 2016.29.07 (۸) مرداد ۹۵) به عنوان تصویر پیرو (SLAVE) انتخاب شد. اما بررسی انطباق تصاویر اصلی و پیرو نشانگر عدم انطباق کامل آنها بود و باعث وقوع خطا در پردازش می‌شد. بنابراین، میزان خطاهای راداری و اتمسفری برای بازه‌های زمانی مختلف تصاویر آرشیو مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت تصاویر مربوط به تاریخ 2015.02.12 و 2016.29.07 مورد انتخاب واقع شد و آنالیز آنها به روش InSAR آغاز شد.

از میان روش‌های آنالیز InSAR، روش تداخل سنجی تفاضلی (DInSAR) جهت آنالیز فاز تصاویر مورد بررسی در تحقیق، انتخاب شد. در این گام براساس الگوریتم تفاضلی تداخل سنجی، نقشه‌های رستری شامل اختلاف فاز کل، فاز توپوگرافی و فاز باقی‌مانده به صورت رستری تولید شد. بعد از حذف خطاهای مربوط به فاز ناشی از مواردی چون اتمسفر، نویز و جابجایی در جهت دید سنجنده (LOS) ۲ و و انجام عملیات فیلترگذاری و اجرای الگوریتم‌های همبستگی، فایل‌های همدوسی و فیلترشده تولید شد و به نقشه‌ای که دارای تغییرات رنگی مشخص‌تری بنام فرینچ است تبدیل شد. در سنجنده Sentinel-1 هر فرینچ معادل ۲/۸ سانتی‌متر جابجایی افقی است اما از آنجا که برای محاسبه فرونشست، مؤلفه عمودی مورد نیاز بود لذا برای استخراج مقادیر جابجایی عمودی، ابتدا به کمک نقشه رستری فرینچ، نقشه مدل ارتفاعی دامنه اریبی (Slant Range)، تصاویر راداری بازتابش (Power) و نقاط کنترل زمینی (حداقل ۱۰ نقطه)، اثر کرویت زمین تصحیح و سایر خطاهای مربوط به خطای سایه، کوتاه‌شدگی و روی هم افتادگی عوارض حذف و پالایش شد و نهایتاً نقشه‌های رستری جابجایی در افق دید سنجنده به نقشه‌های تغییر

باند C (طول موج ۵/۵ سانتی‌متر) با پایه زمانی تا ۳ سال به ترتیب با سنجنده ASAR و Sentinel-1 هستند و سازگاری خوبی با اهداف تحقیق دارند. ۱ بررسی‌ها نشان داد که اطلاعات سنجنده ASAR برای منطقه مورد مطالعه مربوط به دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ است و اطلاعات سنجنده Sentinel-1 از سال ۲۰۱۵ تا حال می‌باشد. بنابراین با توجه به هدف محققین برای پهنه‌بندی فرونشست برای شرایط حال حاضر، داده‌های سنجنده Sentinel-1 مورد توجه قرار گرفت.

از طرفی با توجه به تنوع بالای کاربری اراضی منطقه (شهری، پوشش درختی تا مرتع، زراعی، باغی) و اینکه کاهش طول موج تحت این شرایط ممکن است بدلیل حساسیت کاربری، عملیات تفسیر اطلاعات را با مشکل مواجه نماید و همچنین با در نظر گرفتن این موضوع که طول موج C از جنبه توان تفکیک مکانی، دقت لازم و همچنین قدرت نفوذ (Penetration)، در سطح قابل قبولی است و سازگار با تحلیل‌های تحقیق می‌باشد لذا انتخاب سنجنده Sentinel-1 برای آنالیزهای تحقیق مورد پذیرش واقع شد و اطلاعات این سنجنده بروش تداخل سنجی InSAR مورد تحلیل واقع شد. برای آنالیز تصاویر راداری و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی، مدل‌های SNAP (آنالیز داده‌های رادار نسل جدید) و SARSCAPE (خاص آنالیز تداخل سنجی) در کنار سایر ابزار GIS و RS انتخاب گردید و ابزار Erdas و Envi نیز برای انجام محاسبات و تصحیح خطاها تعیین شد.

بعد از گام‌های فوق، انتخاب بازه زمانی داده‌های قابل تحلیل مهمترین گام از تحقیق بود. بنابراین بعد از بررسی تاریخ‌های ثبت تصاویر منطقه توسط سنجنده Sentinel-1، تصویر منطقه در تاریخ عبور 2015.13.03 (۲۳ اسفند ۹۳) به عنوان تصویر

(علمی-ترویجی)

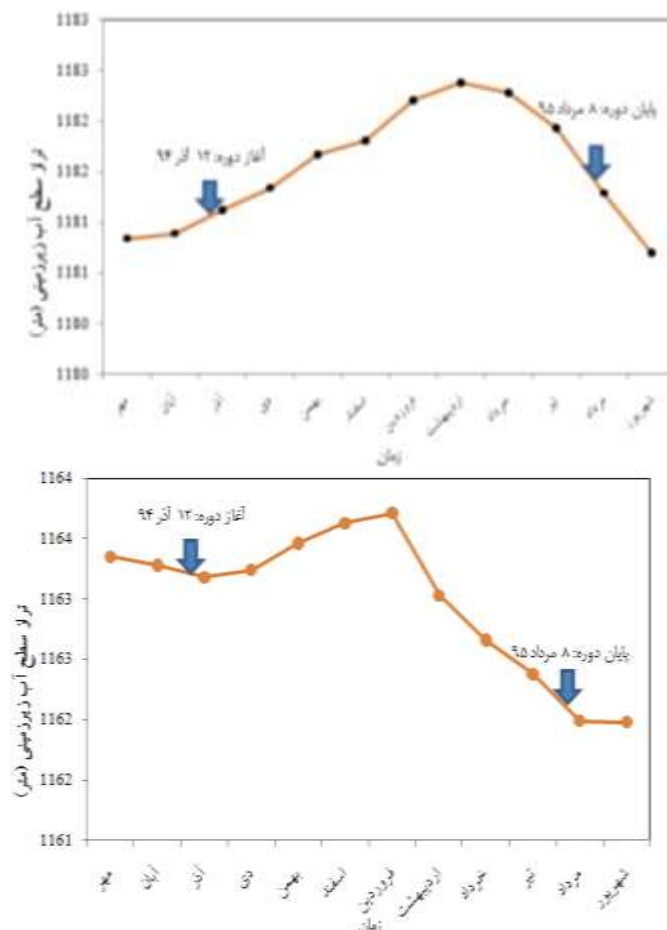
قاسم زاده و همکاران: مطالعه فرونشست زمین ...

شد. همانطور که در این شکل مشاهده میشود، بازه زمانی منتخب تقریباً منطبق بر سیکل تغییرات تراز فصلی بوده و یک دوره پراپی و سپس کم آبی را تجربه کرده است و از این حیث یک تغییرات یکسویه را شامل نمی گردد. بنابراین محدودیت زمانی حاصل از تصاویر ماهواره ای فقط اندک تغییرات تراز در ابتدا و انتهای سال آبی را پوشش نداده است و می توان با اندک تقریبی، نتایج را به کل سال تعمیم داد:

ناشی از فرونشست تبدیل شد. روش شناسی فوق الذکر برای تمام سری های اطلاعات منطبق تکرار شد و نتایج مربوط به فرونشست استخراج شد.

نتایج و بحث

با توجه به اهداف تحقیق، در این بخش ابتدا به منظور بررسی وضعیت تغییرات تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی منتخب، که شامل یک بازه ۲۴۰ روزه از مورخ 2015.02.12 (۱۲ آذر ۹۴) تا 2016.07.29 (۸ مرداد ۹۵) بود، ترسیم



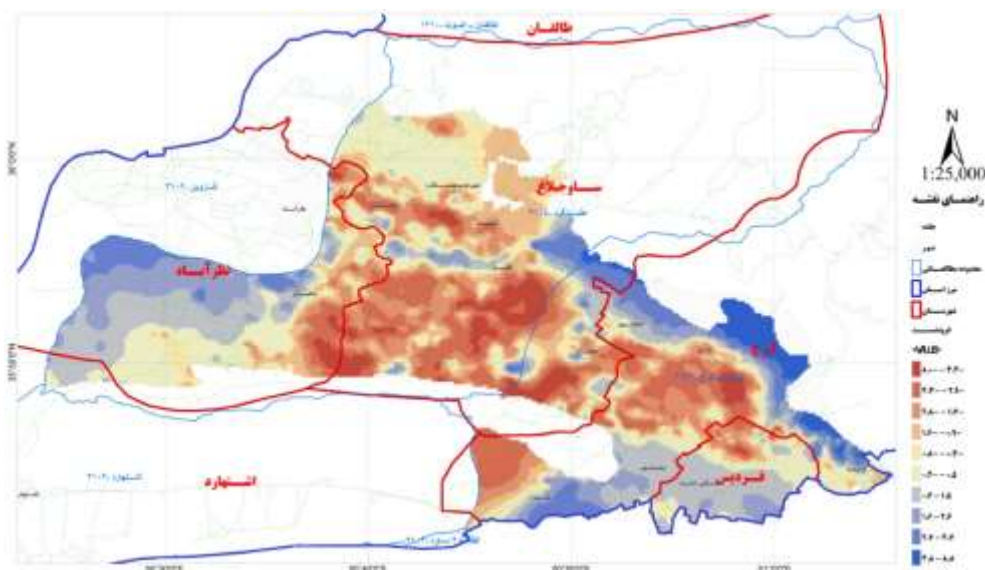
شکل ۳- وضعیت انطباق بازه زمانی تصاویر ماهواره ای با تغییرات فصلی تراز آب زیرزمینی - (الف) هیدروگراف دشت هشتگرد در سال آبی ۹۴-۹۵ (ب) هیدروگراف دشت کرج در سال آبی ۹۴-۹۵

پهنه بندی فرونشست در بازه زمانی نزدیک به حال حاضر باشد و قابل تعمیم به یکسال است، با

بعد از تشخیص اینکه بازه اطلاعات ماهواره ای موجود می تواند معیار مناسبی برای

حدود ۱۲ سانتیمتر در نوار میانی محدوده مورد مطالعه نیز بود که در فرآیند محاسبات مربوط به تولید نقشه رستری شکل در اثر مقادیر همسایگی تعدیل شده‌اند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نوارمیانی دشت‌ها دارای مقادیر بالای فرونشست بوده‌است که این روند با استنباط صورت گرفته از داده‌های زمین‌شناسی همخوانی دارد:

متدولوژی تشریح شده در بخش قبلی، نقشه رستری پهنه‌بندی پدیده فرونشست در شکل ترسیم شد. بر اساس پهنه‌بندی ارائه شده در شکل، مقادیر فرونشست در بخش‌های مختلف دشت متفاوت است و بیشینه فرونشست در بازه هشت ماهه مورد مطالعه حدود ۸ سانتیمتر است. البته نتایج خام حاصل از آنالیز تصاویر راداری در مرحله قبل از تولید نقشه رستری، دارای مقادیر فرونشست نقطه‌ای



شکل ۴- میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه در بازه ۸ ماهه انتخاب شده

واقع در محدوده و تغییرات تراز آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفت. بنابراین ابتدا در شکل نقشه میزان تخلیه سالانه از چاه‌های آب واقع در محدوده در کنار نقشه پهنه‌بندی فرونشست ترسیم شد. در شکل اندازه نمادهای استفاده شده برای نمایش موقعیت چاه‌های بهره‌برداری با استفاده از میزان تخلیه سالانه چاه مقیاس داده شده‌است تا علاوه بر نمایش تمرکز چاه‌ها، نشانگر شدت تخلیه آبخوان نیز باشد. همانطور که از شکل استنباط می‌شود شدت فرونشست از شدت تخلیه سالانه چاه‌ها متأثر است و

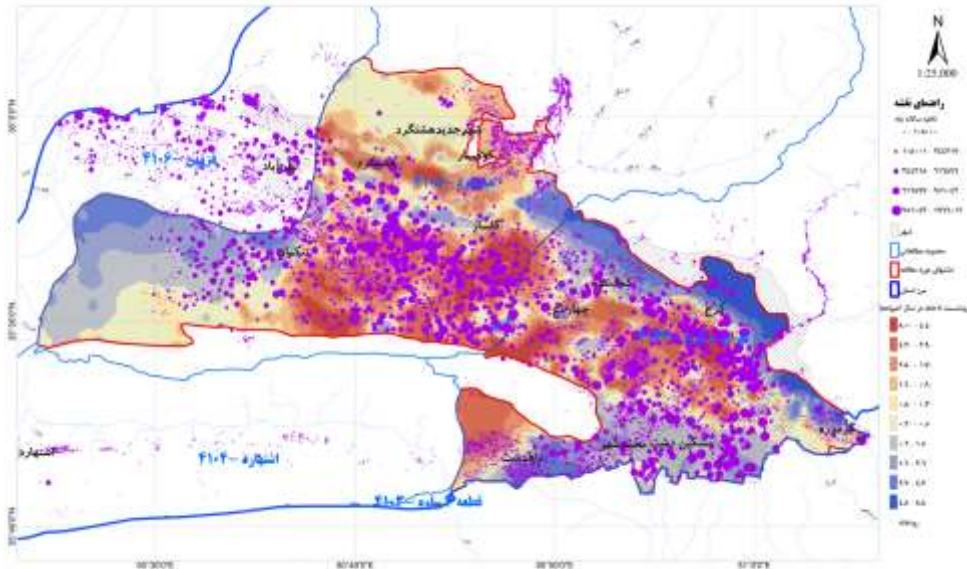
از طرفی همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرات تراز زمین در بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه مثبت نیز بوده‌است. تطبیق این نواحی با عوارض زمینی مشخص نمود که تغییرات تراز مثبت اغلب در مناطق کوهپایه‌ای اتفاق افتاده‌است لذا این تغییرات به رسوبگذاری مصالح فرسایشی نسبت داده شد که در اثر رواناب‌های سطحی یا باد منتقل شده و در این مناطق رسوبگذاری نموده‌اند.

به منظور بررسی اثر تغییرات وضعیت منابع آب در محدوده مورد مطالعه بر روی میزان فرونشست، دو فاکتور میزان تخلیه سالانه چاه‌های

(علمی-ترویجی)

قاسم زاده و همکاران: مطالعه فرونشست زمین ...

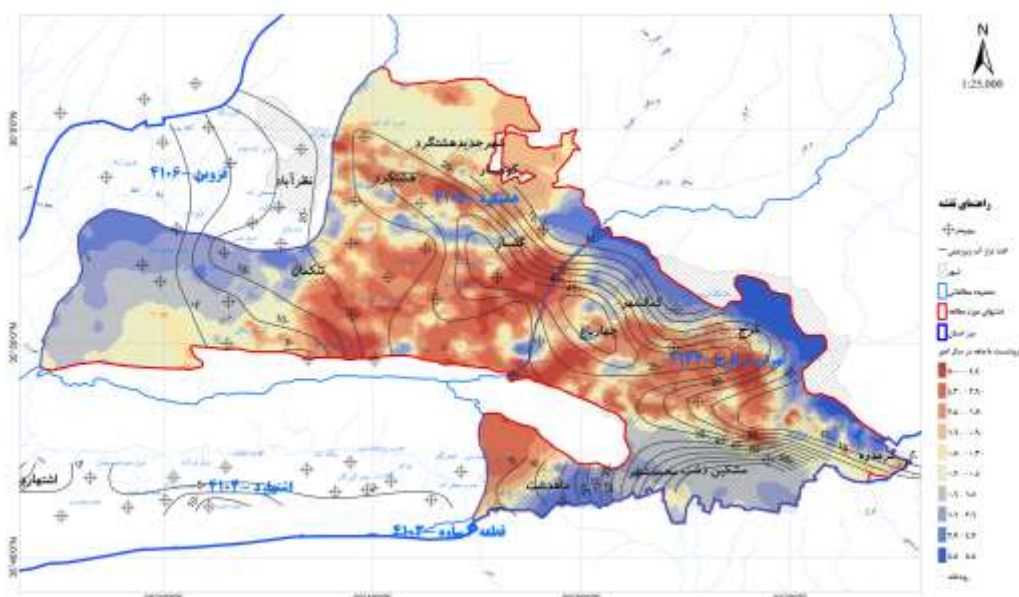
هر چه میزان تخلیه یا تمرکز چاه‌ها در منطقه‌ای بیشتر باشد، میزان فرونشست نیز در آنجا بالاست:



شکل ۵- نمایش ارتباط بین میزان فرونشست با تخلیه سالانه از آبخوان

تمرکز اصلی فرونشست است، خطوط هم‌افت نشانگر بیشترین میزان افت تراز آب زیرزمینی نیز هستند و از بررسی تطبیقی آنها چنین بر می‌آید که بجز در ناحیه کوچکی در محل شهرستان فردیس واقع در بخش شرقی محدوده مورد مطالعه، در سایر نواحی شدت فرونشست با شدت افت تراز آب زیرزمینی همخوانی دارد:

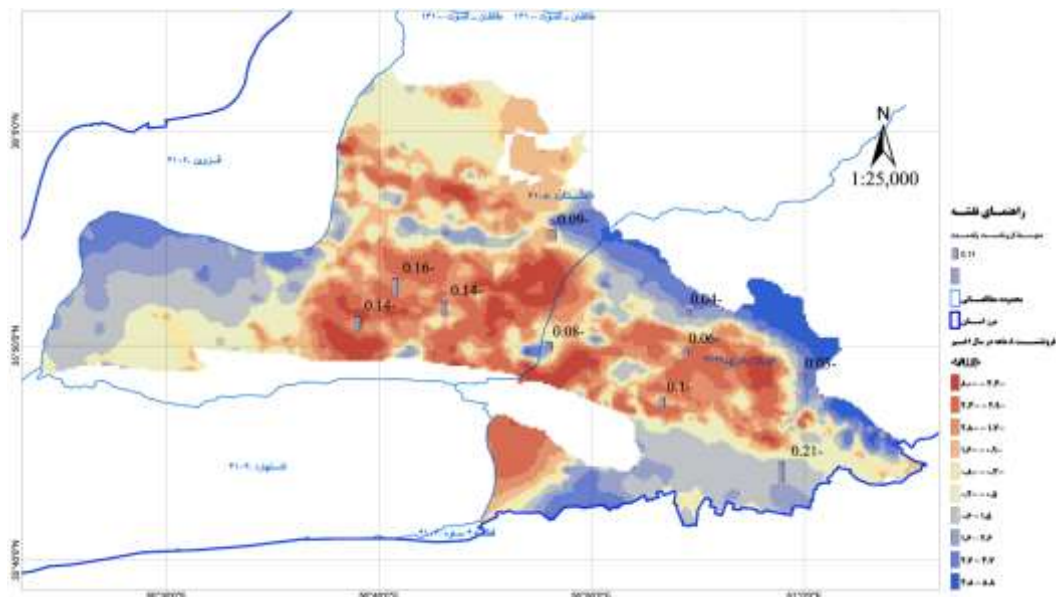
در گام بعدی به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری فرونشست زمین از تغییرات تراز آب زیرزمینی، لایه‌های مربوط به آنها در شکل ترسیم شد. در این شکل شبکه چاه‌های پی‌زومتری، که نقشه خطوط هم‌افت آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات ۲۰ ساله تراز آب ثبت شده در آنها استخراج شده است، نیز وجود دارد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد در نوار میانی منطقه مورد مطالعه که محل



شکل ۶- نقشه افت تراز آب زیرزمینی و ارتباط آن با فرونشست

نشان پیزومتری موجود در منطقه که در معرض فرونشست قرار داشتند برای عملیات ترازابی و انجام تحلیل‌های تحقیق انتخاب شد. در عملیات ترازابی، تراز نقطه‌نشان پیزومترها در شرایط حاضر (سال ۱۳۹۵) تعیین شد و با مقایسه آنها با تراز نقطه‌نشان در سال تأسیس پیزومترها، مقادیر متوسط فرونشست در طی سال‌های گذشته استخراج گردید. شکل در بردارنده نتایج حاصل از تحلیل‌های فوق‌الذکر می‌باشد:

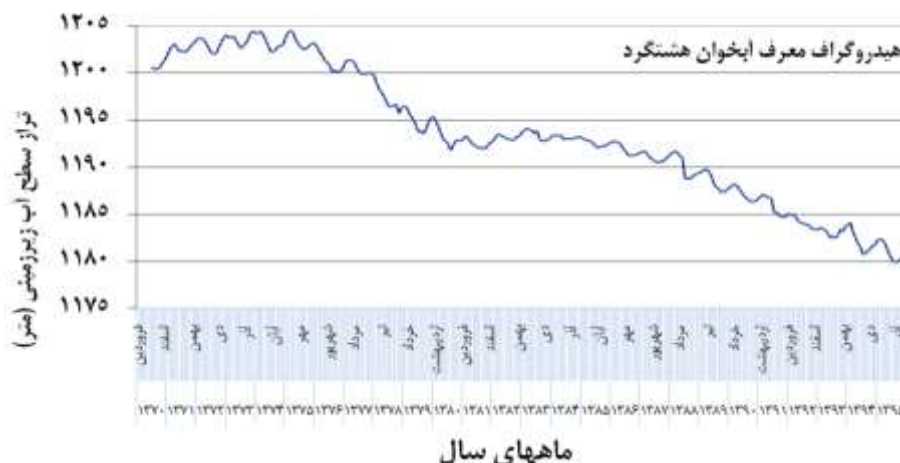
بعد از بررسی‌های فوق، به منظور بررسی تغییرات بلندمدت تراز زمین در اثر وقوع فرونشست و تطبیق آن با نتایج کوتاه‌مدت قبلی، عملیات ترازابی زمینی نقطه‌نشان چاه‌های پیزومتری انجام شد. در این مرحله، بدلیل محدودیت تعداد نقاط مبنای نقشه‌برداری در منطقه مورد مطالعه که تراز آن به روز باشد و برای تشکیل حلقه‌های مسیر ترازابی مورد استفاده قرار گیرد، امکان ترازابی تمام چاه‌های پیزومتری وجود نداشت لذا در مجموع ده نقطه



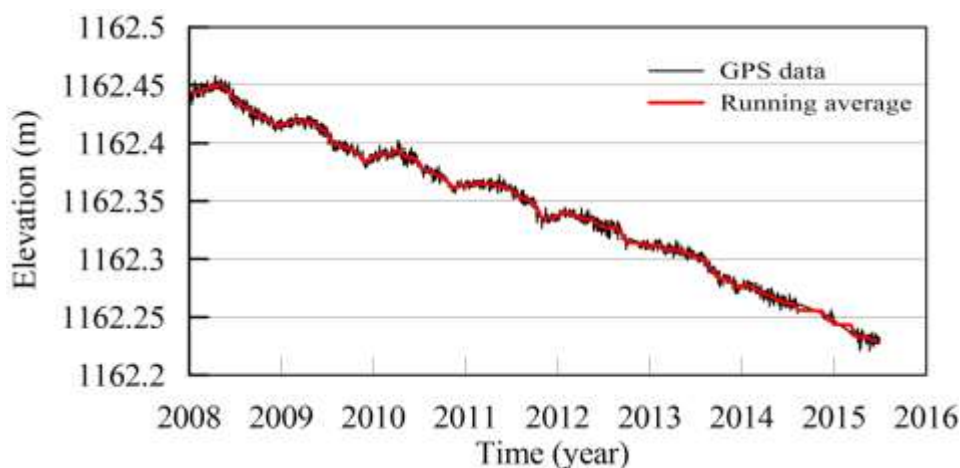
شکل ۷- مقادیر متوسط بلندمدت فرونشست در محل چاه‌های پیژومتری (مستخرج از عملیات ترازیابی)

پوکی لایه‌ها کاهش یافته و امکان وقوع تراکم بیشتر در لایه‌ها از بین رفته‌است. برای بررسی بیشتر این موضوع، اطلاعات شبکه ژئودینامیک کشور در قالب داده‌های شبکه GPS دائمی واقع در منطقه مورد مطالعه از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد. بررسی موقعیت نقاط IPGN نشان داد که از نقاط IPGN موجود در شبکه، ایستگاه NAJM (واقع در نجم‌آباد در غرب منطقه مورد مطالعه)، ایستگاه HSGD (واقع در هشتگرد در شمال منطقه) و ایستگاه FOPM (واقع در فرودگاه پیام در میانه منطقه) در منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند که از بین این ایستگاه‌ها، فقط ایستگاه نجم‌آباد بدلیل دارا بودن اطلاعات مداوم و به‌روز برای استفاده در تحقیق مناسب تشخیص داده شد. با استفاده از اطلاعات ایستگاه NAJM، نمودار تغییرات تراز زمین در شکل ترسیم شد.

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود رفتار متوسط فرونشست بلندمدت از نظر پراکنش بزرگی با رفتار فرونشست در بازه زمانی ۸ ماهه مورد مطالعه انطباق خوبی دارد اما مقادیر متوسط فرونشست بلندمدت حاصل از عملیات ترازیابی در مقایسه با مقادیر متناظر استخراجی از پهنه‌بندی صورت گرفته برای سال اخیر بزرگتر است. این بدان معناست که نرخ فرونشست در سال‌های گذشته بیشتر بوده‌است و در چند سال اخیر از میزان آن کاسته شده‌است. اما از آنجا که افت تراز آب زیرزمینی در دشتهای منطقه مورد مطالعه همچنان ادامه دارد (برای نمونه هیدروگراف آبخوان هشتگرد در شکل ارائه گردید) لذا بر اساس اصول مکانیک خاک، چنین استنباط می‌گردد که کاهش میزان فرونشست در سال‌های اخیر نشانگر تراکم لایه‌های زمین در طول سالیان متمادی است بطوریکه نسبت



شکل ۸- هیدروگراف واحد آبخوان آبرفتی هشگرد



شکل ۹- نمودار روند تغییرات تراز زمین و وقوع فرونشست در ایستگاه GPS دائمی نجم‌آباد (NAJM)

زمین دوباره بر روی منحنی تحکیم حرکت کرده و با وقوع تراکم خاک، تراز زمین هماهنگ با تراز آبخوان کاهش می‌یابد.

از دیدگاه ژئوتکنیکی، خروج آب از لایه‌های اشباع با افزایش تنش موثر در آنها همراه است لذا روند دائمی کاهش تراز آبخوان در منطقه مورد مطالعه باعث افزایش تنش‌های مؤثر لایه‌ها در هر سال نسبت به سال قبل می‌شود. بنابراین لایه‌های زمین در منطقه مورد مطالعه در هر سال نسبت به سال قبل تنش‌های پیش‌تحکیم بالاتری را تجربه می‌کنند و به همین دلیل از میزان الاستیسیته آنها بتدریج کاسته می‌شود و وارد ناحیه پلاستیک

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، تراز زمین بطور تناوبی در هر سال با یک افزایش و سپس کاهش مواجه است. وقوع چنین روندی می‌تواند ناشی از تغییرات تراز سطح ایستابی آبخوان منطقه که در شکل ارائه شد، باشد. بنابراین می‌توان چنین تفسیر نمود که با افزایش تراز آب در فصل پرآبی (ترشدن خاک) و افزایش فشار منفذی، بخشی از تراکم صورت گرفته در خاک در اثر تنش‌های پیش‌تحکیمی که در محدوده الاستیک قرار دارد احیا می‌گردد سپس در فصل کم‌آبی (خشک شدن خاک)، که بدلیل اقلیم مدیرانه‌ای منطقه با فصل برداشت آب برای مصارف کشاورزی همزمان است، لایه‌های

می‌گردند. همین امر باعث شده‌است که در شکل بتدریج از ارتفاع قله‌های تشکیل شده کاسته شود و چون این اتفاق در ناحیه پلاستیک افتاده‌است لذا تراکم صورت گرفته غیر قابل برگشت است.

وقوع تراکم غیر قابل برگشت در آبخوان باعث از بین رفتن ظرفیت ذخیره لایه‌ها و همچنین کاهش هدایت هیدرولیکی آنها می‌شود و تحت این شرایط لایه‌های آبدار در معرض آسیب بسیار جدی قرار دارند. چرا که حتی در صورت مدیریت برداشت و احیای آبخوان، بدلیل کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان، آب بسرعت می‌تواند در لایه‌ها بالا بیاید و در مناطق با تراز آب بالا، حتی به لایه‌های سطح زمین نیز برسد و موجب وقوع حالت ماندابی یا توسعه شوره‌زارها گردد. بنابراین با توجه به اینکه ادامه یافتن روند افت تراز آب زیرزمینی موجود در شکل در آینده همچنان باعث وقوع پدیده فرونشست خواهد شد لذا برای جبران خسارات ناشی از آن، باید برنامه‌های مدیریت منابع آب با جدیت بیشتر دنبال شود و از طریق مقابله با برداشت‌های غیرمجاز، از ادامه چنین روندی جلوگیری شود.

خلاصه و جمع‌بندی

فرونشست زمین یک مسئله جهانی است که باعث خسارت بر سازه‌های دست ساز بشر، تغییر وضعیت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و حتی تاثیرگذاری بر حیات گیاهان و جانوران نیز می‌شود. تحقیق حاضر با درک ضرورت پرداختن به این موضوع، دشت‌های کرج و هشتگرد واقع در استان البرز را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. در این پژوهش براساس آمار و اطلاعات GPS دائمی ایستگاه نجم‌آباد و آنالیز اطلاعات راداری و همچنین ترازبایی نقطه‌نشان‌های شبکه پیزومتری اقدام به

پایش و تشخیص وقوع پدیده فرونشست در دو بازه کوتاه مدت و بلندمدت شد.

براساس نتایج پهنه‌بندی فرونشست در یک دوره کوتاه‌مدت هشت ماهه مربوط به ۱۲ آذر ۱۳۹۴ تا ۸ مرداد ۱۳۹۵ و تطبیق آن با مقادیر برداشت چاه‌های بهره‌برداری و همچنین افت تراز آبخوان، مشخص شد که میزان فرونشست از این پارامترها بشدت تأثیر می‌پذیرد و حتی اطلاعات شبکه ژئودینامیک کشور نشان داد که تغییرات فصلی تراز آبخوان منجر به وقوع تغییرات سینوسی در تراز زمین می‌گردد. بررسی این تغییرات در قالب سری زمانی تراز سطح زمین، ثبت شده در GPS دائمی نجم‌آباد، نشان داد که دامنه تغییرات فصلی تراز زمین در گذر زمان و از سالی به سال دیگر کاهش یافته‌است. محققین این امر را به کاهش خاصیت الاستیک لایه‌های آبخوان در اثر تجربه تنش‌های پیش‌تحکیمی بالاتر نسبت دادند.

نتایج آنالیز راداری و ترازبایی نقطه‌نشان‌های پیزومتری نشانگر نرخ بیشینه فرونشست سالانه بترتیب تا حدود ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در سال بودند که این میزان فرونشست بسیار بالاست و می‌تواند منجر به بروز خسارات موضعی گردد بنابراین برای مقابله با خسارات ناشی از فرونشست باید نسبت به اقدامات پیشگیرانه مبادرت ورزیده شود که مهمترین این اقدامات می‌تواند مربوط به حوزه مدیریت منابع آب و بویژه مقابله با اضافه برداشت از آبخوان باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود وظیفه می‌دانند از شرکت آب منطقه‌ای البرز بدلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات پایه منابع آب و همچنین عوامل پروژه "مطالعه پهنه‌بندی و بررسی مخاطرات ناشی از

پی‌نوشت‌ها

- 1- Working Group on Land Subsidence
- 2- Line of Sight
- 3- Iranian Permanent GPS Network for Geodynamics

فرونشست زمین در استان البرز "نهایت قدردانی را داشته باشند چرا که نتایج تحقیق، حاصل تلفیق اطلاعات دریافتی از دو منبع مذکور است.

منابع

- Tehran plain. Journal of Geosciences 25 (97):211-220 (In Persian)
- Dadsetan A, Entezam I, Bolourchi MJ (2002) Studying subsidence mechanism and its impacts in Kabutar-Ahang, Famenin and Hamekasi, Hamedan Province. Group of Geological Survey of Iran, 16p (In Persian)
- Engineering Geology Group of Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (2004) Land subsidence and its undesirable impacts in the world and Iran. 10p (In Persian)
- Entezam I, Ghasemi A, Yousefi T, Shafiei M (2015) The Investigation of earth fissures and sinkhole of Eaj plain, Fars Province. Geohazards, Environmental and Engineering Geology Affair Hydrogeology Group of Geological Survey of Iran, 16p (In Persian)
- Estabragh AR, Moghadas M, Javadi AA (2013) Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying. Journal of Soils and Foundations 53(5):617-627
- Estabragh AR, Moghadas M, Javadi AA (2015) Mechanical behaviour of an expansive clay mixture during cycles of wetting and drying inundated with different quality of water. European Journal of Environmental and Civil Engineering 19(3):278-289
- Estabragh AR, Moghadas M, Javadi AA (2016) Hydrochemical Effect of Different Quality of Water on the Behaviour of an Expansive Soil During Wetting and Drying Cycles. Journal of Irrigation and Drainage 65(3):371-381
- Abidin HZ, Andreas H, Gumilar I, Brinkman JJ 2015(a) Study on the risk and impacts of land subsidence in Jakarta. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 372:115-120
- Abidin HZ, Andreas H, Gumilar I, Sidiq TP, Gamal M 2015(b) Environmental Impacts of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia. In: Proc of the FIG Working Week 2015, TS 3- Positioning and Measurement, Sofia, Bulgaria, Paper no. 7568, 1-12
- Alizadeh A (2008) The Principle of applied hydrology. Imam Reza University press, 811p (In Persian)
- Amighpey M, Arabi S, Talebi A (2010) Studying Yazd subsidence by radar interferometry and precise leveling Journal of Geosciences 20 (77):157-164 (In Persian)
- Amighpey M, Arabi S, Talebi A, Jamoor Y (2007) Studying subsidence in Iran by leveling data. In: Proc. of National Conference on Geomatics, 21- 22 April, Iran National Cartographic Center, Tehran, 21p (In Persian)
- Amighpey M, Arabi S, Talebi A, Jamoor Y (2009) Application of radar interferometry in land subsidence studying. In: Proc. of National Conference on Geomatics, 10- 11 May, Iran National Cartographic Center & University of Tehran, Tehran, 10p (In Persian)
- Angorani S, Memarian H, Shariat panahi M, Bolourchi MJ (2015) Dynamic modeling of land subsidence in

- Rezaie F, Dadsetan A (2012) Evaluation of gradual ground linear subsidence and geotechnical parameters assessment in the Taleghan site of Eshtehard. *Geoscinces Journal* 21(83):3-12 (In Persian)
- Saffari A, Jafari F, Tavakoli sabour M (2016) Monitoring its land subsidence and its relation to groundwater harvesting (case study: Karaj plain- Shahriar). *Journal of Quantitative geomorphological researches* 5(2):93-82 (In Persian)
- Sharifikia M (2012) Land subsidence rate and area assessment in Noghbahraman plain based on D-InSAR technique. *Modares Journal of Spatial Planning* 16(3):55-77 (In Persian)
- Shemshaki A, Bolourchi MJ, Ansari F (2005) Studying land subsidence in Tehran- Shahriar plain. *Geohazards, Environmental and Engineering Geology Group of Geological Survey of Iran*, 84p (In Persian)
- Shemshaki A, Entezam I (2004) Investigating causes of subsidence in southwestern of Tehran. *Engineering Geology Group of Geological Survey of Iran*, 5p (In Persian)
- Shemshaki A, Entezam I (2006) Mechanism and causes of earth-fissures in Moein abad- Varamin plain. In: *Proc. of National Conference on Engineering Geology and the Environment*, 23-25 February, University of Tarbiat Modares, Tehran, 178- 191 (In Persian)
- Sneed M, Brandt J (2007) Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System Surveying and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996-2005. *US.Geological Survey Scientific Investigations Report* 2007-5251, 30p.
- Estabragh AR, Moghadas M, Moradi M, Javadi AA (2017) Consolidation behavior of an unsaturated silty soil during drying and wetting. *Journal of Soils and Foundations* 57(2):277-287
- Galloway D, Jones DR, Ingebritsen SE (1999) Land Subsidence in the United States. *US. Geological Survey Circular* 1182, Reston, Virginia, 177p
- Haghighatmehr P, Valadanouzj MJ, Tajik R, Jabari S, Sahebi, MR, Eslami R, Ganjiyan M, Dehghani, M (2012) Time series analysis of Hashtgerd subsidence using radar interferometry and global positioning system. *Geoscinces Journal* 22 (85):105-114 (In Persian)
- Hsu WC, Chang HC, Chang KT, Lin EK, Liu JK, Liou YA (2015) Observing Land Subsidence and Revealing the Factors That Influence It Using a Multi-Sensor Approach in Yunlin County, Taiwan. *Journal of Remote Sensing* 7(6):8202-8223
- Lashkaripour GR, Ghafoori M, Rostami barani HR (2008) An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar plain. *Journal of Sedimentary Facies* 1(1):95-111 (In Persian)
- Lee FT, Abel JF (1983) Subsidence from Underground Mining:Environmental Analysis and Planning Considerations. *Geological Survey Circular* 876, 28p
- Mahmoudpour M, Shemshaki, A (2016) Land subsidence in Iran. In: *Proc. of National Conference on Environment*, 20 April, University of Shahid Beheshti, Tehran, 284-292 (In Persian)
- Poland JF (1984) Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*, 305p

202p.

Waltham AC (1989) Ground Subsidence,
Blakie and Son Limited, Glasgow,