

Determining the Amount of Land Subsidence in Jajrood Alluvial Fan Using Differential Radar Interferometry Technique

Somayeh Emadodin ^{a*}, Vida Shahi ^b, Saleh Arekhi^c, Maryam Agatabai^d.

^a. Assistant Professor of Geomorphology, Geography Department, Golestan University, Gorgan, Iran

^b. M.A. in Environmental Hazards, Department of Geography, Golestan University, Gorgan, Iran

^c. Assistant Professor of Geography Department, Golestan University, Gorgan, Iran

^d. Associate Professor of Geology Department, Golestan University, Gorgan, Iran

Extended Abstract

Introduction

The phenomenon of land subsidence involves the collapse or sinking of the earth's surface, which can also have a slight horizontal displacement vector. This movement is not limited in terms of intensity, extent, and measure of the involved areas. Subsidence in cities leads to costly and serious damage to urban infrastructures such as buildings, roads, and railway tracks. Land subsidence can occur for various reasons: groundwater abstraction, subsidence due to oil extraction in oil fields, displacement due to landslides, and collapse of internal walls of mines. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a powerful technique for measuring the topography of a surface and its changes over time. Varamin plain is one of the areas affected by subsidence in Iran, which is located in the alluvial fan of Jajrood river, and its development and prosperity is due to the quality and fertility of the soil in this region. Irregular and over pumping groundwater has caused many subsidence cases in the study area. This study investigates the subsidence of Jajrood alluvial fans with emphasis on Javadabad Varamin from 2016 to 2019, using the permanent scatter radar interferometry method.

Materials and Methods

In this study, 41 images of Sentinel (2016-2019) were used to determine the rate and amplitude of land subsidence using the method of permanent dispersants. Permanent scattering points (PS) were selected based on the domain scattering index.

According to the threshold limit, the amplitude scattering index is usually considered to be 0.4 or 0.42 in various studies, which means that all selected points are not located in the set of PS points, and only those points to be selected that the amplitude scattering index value is exceeding the threshold. Then, a points network (PS) was prepared at this stage to evaluate the processing performed. The prepared spatial network in this section is derived from the Delaunay model. Since the amount of displacement is relative in this method, one of the points in the area is selected where the amount of displacement is relatively zero compared to other points, and other PS points are applied to it. Because of seasonal temperature changes and their effect on

*. Corresponding author (s.emadodin@gu.ac.ir)

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.319591.1007596>

Received: 25 March 2022; Received in revised form: 24 May 2022; Accepted: 27 July 2022

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

buildings that cause elevation changes (the effect of temperature on the structure of buildings), the selected point must be located on the ground. SNAP software was selected for radar interferometry processing. In order to find the cause of subsidence, the information of piezo metric wells (1996-2016) in the study area and their temporal changes were investigated.

Results and discussion

In general, land subsidence has occurred in two significant areas. The northern region is located in the Jajrood alluvial fan. The length of this zone is 44 km, and its width is 7 km, which covers an area of more than 300 square kilometers.

The highest subsidence in this area is related to the Golabbas area, which is about 120 mm per year. The presence of Jajrood alluvial fan and agricultural lands in this area is considerable.

The second region is related to the southern zone. The northern part of this zone is bounded by the city of Pishva, Qala-e-Sin, and the east of Varamin city. In these areas, the annual subsidence rate reaches to maximum six cm. The southern part of this zone is surrounded by Hesargol and Jahanabad areas.

In these areas, the land subsidence rate is lower compared to the central areas and is about 20 to 40 millimeters per year. In the northern part of the Jahanabad region, the maximum land subsidence is 60 mm per year. The southern zone in which the study area is located has a circular shape, and the amount of land subsidence increases from the periphery to the center of the region. The highest rate of land subsidence in the study area occurred in Salman-Abad, Khaveh, Javadabad, Hesar-e-Sorkh, and Zavarehvar areas, with the amount of between 160 to 200 mm per year. Areas such as Tajreh, Rostamabad, and Hesar Kouchak also show significant land subsidence, about 120 to 160 mm per year.

Conclusion

The result of radar interferometry studies has demonstrated that subsidence has occurred in the main parts of the Jajrood alluvial fan's surface. Javadabad region, which is located in Varamin is one of the areas with significant subsidence that subsidence occurs at rate of 20 cm per year. Studies conducted in the study area depicted that the decreases in groundwater level in the study area is linear and this is acceptable in justifying land subsidence. So that the patterns obtained using the radar interferometry method in order to find the pattern of land subsidence and groundwater were consistent and somewhat uniform. In this regard, one of the main causes of land subsidence in the region in Javadabad due to the increasing depth of piezo metric wells in the study period can be attributed to the high pumping of groundwater resources.

According to the physiographic shape of the region and the pattern of land subsidence, the highest rate of land subsidence was observed in areas consisting of low slopes, including Javadabad and Varamin. In terms of risk, population, roads and buildings, railroads are involved in the phenomenon of land subsidence in this region. The railroads of Tehran, Mashhad, Garmsar and Qom are the connecting roads in this region.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar, Subsidence, Varamin, Jajrood Alluvial Fan.



تعیین میزان فرونشست زمین در محدوده مخروط افکنه جاجرود با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری

سمیه عمادالدین - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

ویدا شاهی - کارشناس ارشد مخاطرات محیطی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

صالح آرخی - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

مریم آق آتابای - دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

چکیده

دشت ورامین یکی از مناطق متأثر از فرونشست در ایران است که در مخروط افکنه رودخانه جاجرود قرار دارد. این پژوهش به بررسی فرونشست مخروط افکنه جاجرود با تأکید بر جوادآباد ورامین از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری می‌پردازد. این مطالعه، ۴۱ تصویر از سنتینل (۲۰۱۶-۲۰۱۹) برای تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین با استفاده از روش پراکنده‌کننده‌های دائمی استفاده شد. نرم‌افزار SNAP برای پردازش تداخل سنجی راداری انتخاب شد. ه‌منظور یافتن علت فرونشست، اطلاعات چاه‌های پیزومتریک (۱۳۷۵-۱۳۹۵) منطقه مورد مطالعه و تغییرات زمانی آن بررسی شد. منطقه جوادآباد واقع در ورامین یکی از مناطق دارای فرونشست قابل توجه که فرونشست به میزان ۲۰ سانتی‌متر در سال رخ می‌دهد. یکی از عوامل اصلی فرونشست زمین در منطقه جوادآباد به دلیل افزایش عمق چاه‌های پیزومتریک در دوره مورد مطالعه را می‌توان به پمپاژ بالای منابع آب زیرزمینی نسبت داد. وو وقوع فرونشست زمین باعث تغییر در شیب سطح محلی شده و این امر باعث اختلال در شبکه زهکشی و مسیر جریان آب‌های سطحی شده است که در نهایت منجر به بروز انواع فرسایش شده است.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی تفاضلی راداری، فرونشست، ورامین، مخروط افکنه جاجرود.

مقدمه

پدیده فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه آن آسیب برساند (Yastika et al., 2019:3). فرونشست زمین به دلایل متفاوتی از قبیل برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی از قبیل آب‌های زیرزمینی، فرونشست ناشی از استخراج نفت در میدان‌های نفتی، جابجایی‌های ناشی از زمین‌لغزش و ریزش دیواره‌های داخلی معادن صورت می‌پذیرد (احمدی و سودمند افشار، ۱۳۹۹:۲۲۰). مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین، در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک، تراکم آب سفره‌های زیرزمینی و بهره‌برداری بیش‌ازحد آن‌ها است (عقیفی، ۱۳۹۵: ۱۲۲).

در ایران آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از مناطق است، به‌علاوه روش‌های قدیمی و نادرست کشاورزی نیاز به منابع آب را بیش‌تر کرده است که این موضوع منجر به بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه نشست سطح آب می‌شود. افزایش تنش و فشار منجر به فشردگی و در نتیجه فرونشست زمین می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰:۷۶). در گذشته تنها برخی از استان‌ها از جمله کرمان و یزد با مسئله فرونشست مواجه بودند ولی هم‌اکنون بسیاری از دشت‌های ایران با این مسئله مواجه هستند (محمدخان و گنجائیان، ۱۳۹۸: ۲۲۰). از جمله مناطق متأثر از پدیده فرونشست در ایران، دشت ورامین است که از دیرباز به‌عنوان یک قطب بزرگ کشاورزی در سطح استان تهران مطرح بوده است. دشت ورامین در مخروط‌افکنه رودخانه جاجرود استقرار یافته است و رونق و آبادانی آن مدیون مرغوبیت و حاصلخیزی خاک این منطقه است. مساحت دشت ورامین بیش از ۱۳۰,۰۰۰ هکتار است که حدود ۶۰,۰۰۰ هکتار آن جز اراضی کشاورزی است (زهتاییان و همکاران، ۱۳۸۳: ۹۱). برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی و افزایش ۳,۶۶ برابری تخلیه چاه‌های بهره‌برداری محصوره در سطح دشت از سال ۱۳۴۱ تا ۱۳۹۰، باعث افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۳۴,۰۴ متر در این دشت شده است. خشک شدن ۲۶۰ رشته قنات، کاهش آبدی چاه‌ها علی‌رغم افزایش تعداد آن‌ها، افزایش میزان شوری آب زیرزمینی، ایجاد شکاف در زمین‌های کشاورزی، وقوع پدیده نشست سطح زمین و... از جمله اثرات نامطلوب افت سطح آب زیرزمینی در دشت ورامین است (حیدریان و همکاران، ۱۳۹۱: ۱). با توجه به اهمیت موضوع مورد مطالعه، در طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در سطح جهان و ایران صورت گرفته است. از جمله تحقیقات خارجی می‌توان به لینلین جی^۱ و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد که با استفاده از تصاویر راداری Envisat و ALOS PALSAR به تعیین نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۲ در شهر باندونگ اندونزی پرداخته‌اند. فرونشست زمین با استفاده از باند C، Envisat و باند L، ALOS PALSAR تجزیه و تحلیل شده است. نرخ فرونشست در محدوده مورد مطالعه در نتیجه صنعتی شدن و استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی رخ داده است. طوری که برای هر یک متر کاهش سطح آب زیرزمینی در سال، فرونشست زمین از ۲۰ تا ۲۳ میلی‌متر در سال مشاهده شده است. جین^۲ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی نقش فعالیت‌های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان خواکین در کالیفرنیا پرداخته‌اند. خشک‌سالی‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ موجب افزایش شدید استفاده از آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه باعث فرونشست گردیده است. یافته‌های اصلی آن‌ها نشان داد در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیشتر باشد فرونشست زمین هم در منطقه زیاد می‌باشد. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی مکان‌هایی که در آینده بیشتر در معرض تخریب قرار دارند را شناسایی و مدیریت منابع آب زیرزمینی را پیشنهاد داده‌اند. چین^۳ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی فرونشست زمین در پکن و ارتباط آن با گسل‌های زمین‌شناسی توسط مشاهدات Sentinel_ Insar پرداخته‌اند. پکن پایتخت چین از سال ۱۹۳۵ به علت استخراج زیاد آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر فرونشست زمین

1 Linlinge

2 Jeanne

3 Heyinhu

قرار گرفته است. مطالعات اخیر نشان داده است که حداکثر فرونشست زمین در شرق پکن رخ داده است و تا سال ۲۰۱۷ به بیش از ۱۱ سانتی متر رسیده است. نشست زمین در پکن به طور عمده ناشی از استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است و از بین رفتن سفره‌های آب زیرزمینی موجب تحریک گسل‌های فعال خواهد شد. گورابی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی فرونشست زمین در کلان‌شهر اصفهان با تصاویر Sentinel-1 میزان فرونشست زمین را به میزان ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند که از جنوب به بخش‌های شمالی، شمال شرقی و شرقی کلان‌شهر اصفهان افزایش یافته است، در حالی که بخش‌های جنوبی شهر تقریباً یک منطقه پایدار هستند و میزان فرونشست قابل توجه در آن مشاهده نشده است. مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران پرداخته‌اند. در این پژوهش یک سری زمانی دو ساله شامل ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل-۱، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی در دو ناحیه مطالعاتی مورد پردازش قرار گرفته است. جابه‌جایی سالانه ۱۵ سانتی‌متری در جنوب منطقه مورد مطالعه، جایی که به دشت‌های شهریار و تهران منتهی می‌شود را نشان داده است. مناطق دارای واحدهای صنعتی و مسکونی، طی دو سال شاهد جابه‌جایی تجمعی ۹ تا ۱۳ سانتی‌متری بوده‌اند. مرادی و همکاران (۱۳۹۹) در تحلیل فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری در منطقه ۱۸ شهر تهران به این نتیجه رسیده‌اند منطقه ۱۸ شهری بر روی مخروط افکنه جوان کن که توزیع بالای گراول و متخلخل را در عمق‌های تحتانی دارا هستند قرار گرفته است. با توجه به عمق چاه‌های موجود در منطقه که ضخامت بالای آبرفت را نشان می‌دهد، به همراه افت سطح ایستابی و خالی شدن خلل و فرج بین دانه‌بندی‌ها که منجر به افزایش وزن آبرفت در جهت نیروی گرانشی می‌شود وجود پدیده فرونشست را موجه نشان داده است. حداکثر میزان فرونشست به دست آمده از مطالعه تداخل‌سنجی راداری در حدود ۴۳۰ میلی‌متر و در محدوده محله یافت‌آباد به دست آمده است. اما مطالعاتی که در منطقه مورد مطالعه انجام شده است می‌توان به مطالعات حق‌شناس حقیقی و معنق (۲۰۱۹) اشاره کرد که در بررسی فرونشست شهرستان ورامین با استفاده از تصاویر Sentinel-1 از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷، عامل اصلی فرونشست را برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. محبی تفرشی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی فرونشست زمین در آبخوان ورامین با استفاده از روش منطبق فازی پرداخته‌اند و نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که قسمت‌های جنوب و مرکزی دشت بیشترین میزان فرونشست را دارند. روحی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی محاسبه فرونشست زمین و تغییرات رطوبت و شوری خاک با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور در دشت ورامین پرداخته‌اند. در این مطالعه، تغییرات فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴، توسط تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و نرم‌افزار SNAP ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که افزایش فرونشست زمین باعث افزایش سطح شوری خاک و شدت آن شده است. در نتیجه، کاهش رطوبت در اعماق مختلف در سال‌های اخیر مشاهده شده است.

بررسی پیشینه تحقیق نشان داد، با توجه به اینکه اکثر دشت‌های کشور با پدیده فرونشست مواجه هستند. اما مطالعات منسجمی در این زمینه انجام نشده است. تنها دشت‌هایی که شرایط حاد و بحرانی داشته‌اند، مطالعاتی انجام شده است. بیشتر تحقیقات انجام شده به علل فرونشست و پیامدهای بعد از وقوع پرداخته‌اند. با توجه به مطالب ذکر شده، وجود مناطق متعدد فرونشست در ایران، لزوم شناسایی و تعیین نقاط محتمل فرونشست، کنترل و مدیریت این مناطق را ضروری می‌کند. از سویی دیگر با توجه به اینکه یکی از جدیدترین و مؤثرترین روش‌ها در مطالعه فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی تصاویر راداری است. یک ابزار قوی برای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح و تغییرات آن در طول زمان است (Burgmann et al., 2000: 170) و توانایی برآورد فرونشست را با دقتی در محدوده میلی‌متر با استفاده از مشاهدات فزاینده دارا هستند (Crosetto et al., 2013: 923) و می‌تواند در تعیین نرخ فرونشست در بازه زمانی مشخص مورد استفاده قرار گیرد. هدف از پژوهش حاضر محاسبه نرخ و دامنه فرونشست مخروط افکنه جاجرد در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۱۶ میلادی است و به منظور صحت‌سنجی روش نیز از پیمایش میدانی و مطالعه آب‌های زیرزمینی با استفاده از ۱۱۷ حلقه

چاه پیژومتری استفاده شده است.

روش پژوهش

در پژوهش حاضر از روش پراکنش‌گرهای دائمی به منظور بررسی فرونشست دشت ورامین استفاده شده است. در واقع ایده اصلی تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی شناسایی نقاط همبسته با رفتاری ثابت و پایدار در طول زمان با استفاده از داده‌های راداری است. بر روی هر پراکنش‌گر دائمی اطلاعاتی از قبیل نرخ سرعت جابجایی و خطای باقیمانده مدل ارتفاعی رقومی زمین در یک بازه زمانی مشخص برآورد می‌شود (احمدی و سودمند افشار، ۱۳۹۹).

در روش پراکنش‌گرهای دائمی هدف شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که در بازه زمانی تصاویر مورد استفاده همدوس باقی می‌مانند که به اختصار PS نامیده می‌شوند. اگر ابعاد PS کوچک‌تر از ابعاد سلول تفکیک باشد، که معمولاً نیز این چنین است، میزان همدوسی حتی برای تداخل‌نگارهای با طول مبنای بزرگ‌تر از مقدار بحرانی مناسب است. بدین ترتیب از مجموعه داده‌های بیشتری می‌توان جهت تداخل سنجی راداری استفاده کرد (بابائی و همکاران، ۱۳۹۵). در واقع میزان همبستگی راداری وابسته به توزیع پراکنده‌سازی است که داخل یک پیکسل قرار گرفته‌اند. اگر فاز یک پیکسل فقط توسط یک پراکنده ساز نقطه‌ای تعیین شود، مقدار نا همبستگی صفر خواهد شد. اگرچه در سطوح واقعی چنین حالتی هرگز رخ نمی‌دهد، با این حال پیکسل‌هایی وجود دارند که شبیه پراکنده ساز نقطه‌ای عمل می‌کنند و نا همبستگی را کاهش می‌دهند (Hooper, 2006).

در روش مذکور ابتدا کاندیدای پراکنش‌کننده دائمی بر پایه مقدار شاخص پراکنندگی دامنه DA اولین بار توسط فریتی در سال ۲۰۰۰ طبق رابطه ۱ ارائه شد:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \leq 0.4 \text{ or } 0.42 \quad \text{رابطه ۱:}$$

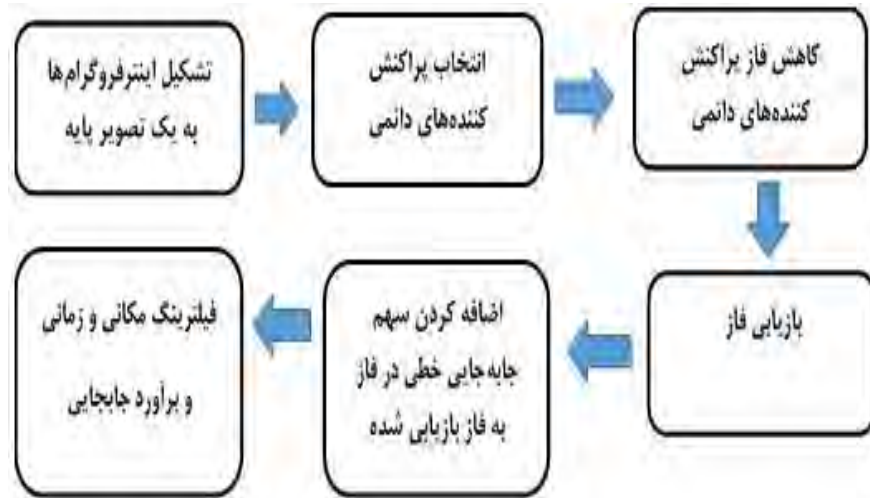
در این رابطه σ_A انحراف معیار استاندارد و μ_A میانگین مقادیر دامنه در یک پنجره هستند (lu, 2007). پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی بر اساس میزان استحکام فاز حاصل از آنالیز فاز انتخاب می‌شوند. در واقع پراکنش‌کننده‌های دائمی پیکسل‌هایی هستند که سهم نویز آن‌ها به قدری کوچک است که سیگنال به‌طور کامل از بین نرود. برای این منظور یک کمیت کوهرنس زمانی (γ_x) از تغییرات فاز باقی‌مانده که معیاری از PS بودن است، طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Ferretti et al, 2000).

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp\{j(\phi_{int,x,i} - \bar{\phi}_{int,x,i} - \bar{\phi}_{\varepsilon,x,i})\} \right| \quad \text{رابطه ۲:}$$

که در آن $\phi_{int,x,i}$ فاز بازیابی نشده پیکسل x ام در تداخل‌نگاشت i ام و $\bar{\phi}_{int,x,i}$ برآوردی از فاز بازیابی نشده پیکسل x ام که در یک شعاع معین از پیکسل‌های مجاور تعیین شده و $\bar{\phi}_{\varepsilon,x,i}$ برآوردی از مؤلفه نا همبسته در مکان (فاز باقی‌مانده از اثر توپوگرافی) و N تعداد کل تداخل‌نگاشت‌ها می‌باشد که پس از هر تکرار، تغییرات RMS در تعیین شده و زمانی که این مقدار از حد آستانه انتخاب شده کمتر باشد همگرا شده و الگوریتم تکرار خاتمه می‌یابد.

برای انجام فرایند تداخل سنجی از تصاویر راداری سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ با ترکیب ۴۱ تصویر راداری مدارهای پایین گذر ماهواره Sentinel 1A استفاده شده است. به منظور پیش‌پردازش داده‌های راداری، نرم‌افزار SNAP انتخاب گردید و برای برآورد جابجایی به صورت سری زمانی از StaMPS استفاده شد. شکل ۱ مراحل انجام کار را نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه آخرین وضعیت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، اطلاعات آماری ۲۲ ساله، ۱۱۷ چاه پیژومتری از آب منطقه‌ای تهران اخذ گردید، که در ادامه در نرم‌افزار GIS نقشه سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید و میزان تغییرات سطح ایستابی هر یک از چاه‌ها بررسی شده است.



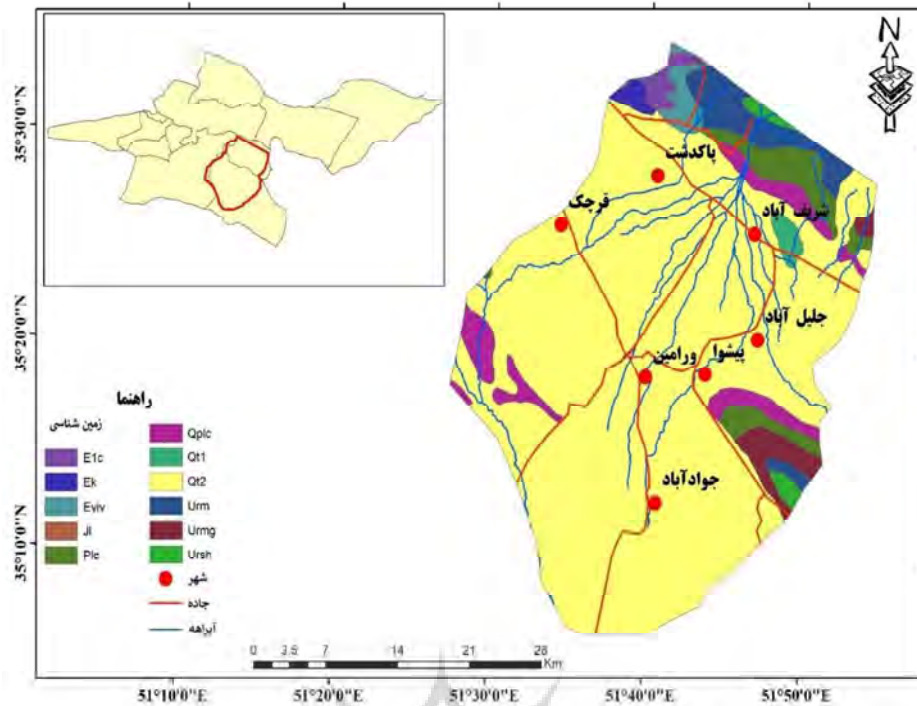
شکل شماره ۱. نمودار مراحل مختلف روش کار در StaMPS

محدوده مورد مطالعه

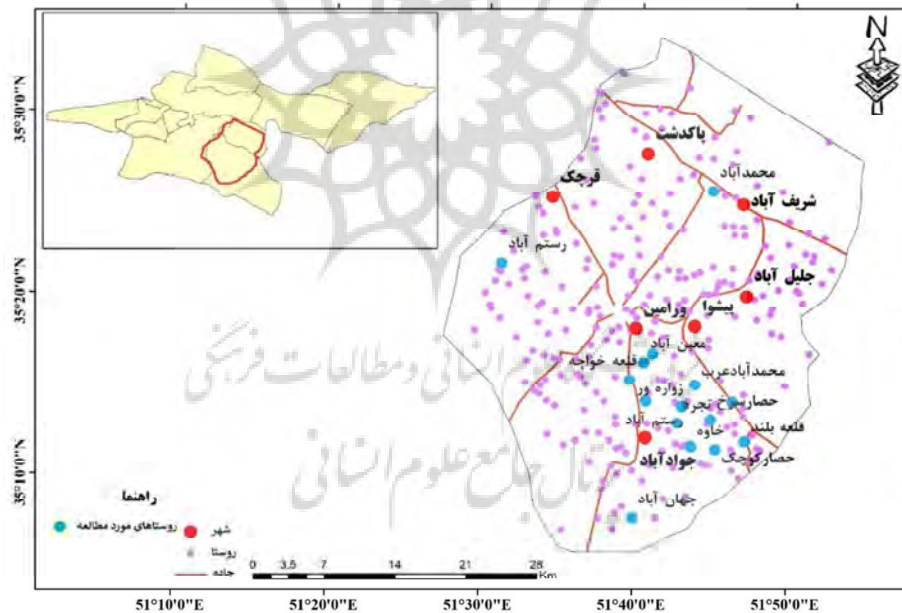
منطقه مورد مطالعه در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز و در ۴۰ کیلومتری جنوب شرق تهران واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه آن ۱۸۷/۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد است (Nejatijahromi et al., 2019:398).

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی منطقه ورامین را دو ناودیس شمالی و جنوبی با امتداد محوری شمال غرب- جنوب شرق تشکیل داده است که رسوبات آبرفتی نهشته شده در ناودیس شمالی، دانه درشت‌تر از ناودیس جنوبی است و از لحاظ ویژگی‌های هیدرولوژیکی دارای اهمیت بیشتری است. در بررسی‌های اکتشافی، بخش شمالی دشت و مخروط افکنه آبرفتی رودخانه جاجرود، رسوبات ضخیم و دانه‌ریزتر و همراه با آب زیرزمینی است. در بین گسل‌های موجود در منطقه، گسل‌های پیشوا، دره جاجرود و غرب ورامین از لحاظ تأثیر بر وضعیت آبخوان دارای اهمیت بیشتری هستند (شکل ۱). گسل‌های دره جاجرود و غرب ورامین گسل‌هایی عادی، قدیمی و پرشیب می‌باشند. عملکرد هم‌زمان آن‌ها در سنگ کف آبخوان سبب ایجاد فرونشست در حدفاصل شهرستان پیشوا تا غرب ورامین شده است و معبری زیرزمینی بین بخش شمالی و جنوبی به پهنای حدود ۹ کیلومتر ایجاد کرده است. خطوط جریان آب زیرزمینی در پهنای این معبر همگرا شده است. طوری که قسمت بیشتر آب زیرزمینی حوضه شمالی از طریق معبر ذکر شده به قسمت‌های جنوبی هدایت می‌شود. گسل پیشوا از نوع معکوس و جوان است که در حدفاصل بین دو بخش شمالی و جنوبی به مثابه یک زهکش عمل می‌کند و آب‌های زیرزمینی اطراف خود را به سمت شوره‌زار موجود در جنوب شرقی حوضه هدایت می‌کند (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۴).

شهرها و روستاهای زیادی در منطقه مورد مطالعه قرار دارد (شکل ۲). این منطقه در مسیرهای ارتباطی قابل توجهی قرار دارد، به طوری که خط ریلی تهران مشهد، گرمسار و قم راه‌های اتصالی این منطقه است. بنابراین می‌توان گفت از نظر خطرپذیری جمعیت، مسکن، راه و ابنیه، راه شریان‌های ریلی و جاده‌ای مهمی درگیر پدیده فرونشست زمین در این منطقه است.



شکل شماره ۲. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

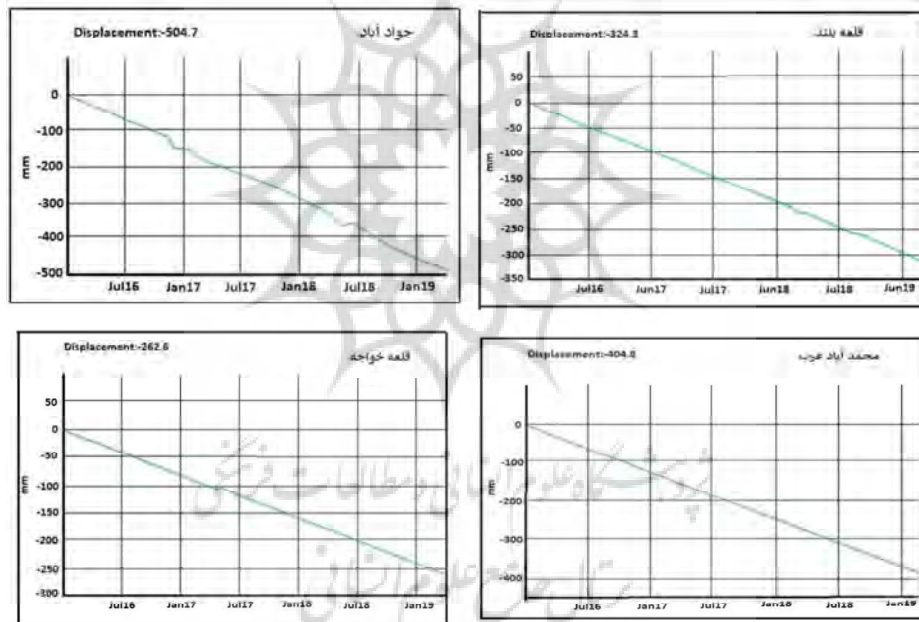


شکل شماره ۳. نقشه مناطق شهری و روستایی محدوده مورد مطالعه

بحث و یافته‌ها

پس از اعمال پردازش‌های اولیه، میزان فرونشست زمین برای محدوده مورد نظر، حداکثر میزان فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی منطقه ورامین حدوداً ۲۰ سانتی‌متر در سال می‌باشد. میزان فرونشست به‌دست‌آمده از نتایج تکنیک سری زمانی متکی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی در جوادآباد سالانه ۱۵۳٫۶ میلی‌متر بوده است. در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ در حدود ۵۰۴٫۷ میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است. نرخ ماهانه فرونشست در محدوده جوادآباد ورامین که در ارتفاع ۸۸۵ متری واقع شده است حدوداً ۶ میلی‌متر می‌باشد. محدوده جوادآباد ورامین با

توجه به تصاویر هوایی اغلب در اختیار بخش کشاورزی قرار دارد. حداکثر میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ در محدوده روستای قلعه بلند ۳۲۴٫۳ میلی‌متر به‌دست‌آمده است که متوسط سالانه این میزان در حدود ۹۸٫۷ میلی‌متر و متوسط نرخ ماهانه آن ۴ میلی‌متر است. ارتفاع از سطح دریا در منطقه قلعه بلند حدوداً ۸۳۰ متر می‌باشد. این ناحیه از منطقه دارای فرونشست در حاشیه دشت و در فاصله حدوداً ۲ کیلومتری ارتفاعات پیشوا که گسلی به همین نام نیز وجود دارد قرار گرفته است. منحنی زمانی فرونشست زمین در محدوده روستای قلعه بلند در شکل ۴ آورده شده است. در محدوده روستای محمدآباد عرب که در ارتفاع ۸۷۵ متری قرار گرفته است. میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ در حدود ۴۰۴٫۸ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود که نرخ ماهانه فرونشست در این محدوده در حدود ۵ میلی‌متر و نرخ سالانه آن ۱۲۳٫۲ میلی‌متر می‌باشد. در بررسی عکس‌های هوایی ملاحظه گردید بیشتر کاربری اراضی این منطقه نیز در اختیار بخش کشاورزی بوده است و مهم‌ترین عارضه انسانی در این محدوده خط ریلی تهران - مشهد می‌باشد. در روستای قلعه خواجه میزان فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹، ۲۶۲٫۶ میلی‌متر به‌دست‌آمده است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. نرخ ماهانه فرونشست زمین در این محدوده ۳٫۵ میلی‌متر و نرخ سالانه ۷۹٫۹ میلی‌متر می‌باشد. که مهم‌ترین عوارض موجود در این منطقه خطوط انتقال برق فشارقوی می‌باشد. با بررسی تصاویر هوایی این ناحیه ملاحظه گردیده است کاربری اراضی این محدوده نیز در اختیار بخش کشاورزی قرار دارد.



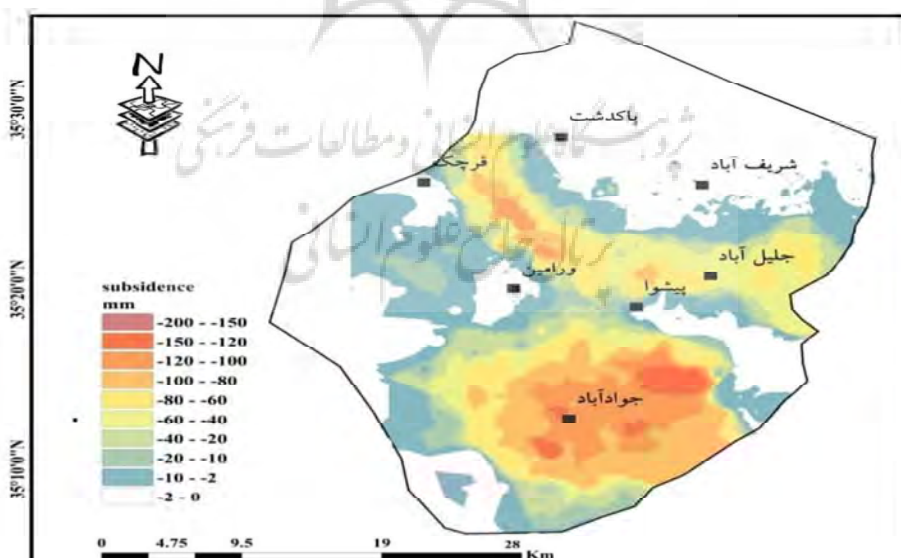
شکل شماره ۴. نرخ ماهانه، سالانه و کلی فرونشست زمین در چند نقطه از محدوده مورد مطالعه

نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. به‌طور کلی در دو پهنه وسیع رخداد فرونشست زمین به دست آمد. منطقه شمالی آن در بادبزن مخروط‌افکنه جاجرد قرار گرفته است. طول این پهنه ۴۴ کیلومتر و عرض آن ۷ کیلومتر می‌باشد که مساحتی بالغ بر ۳۰۰ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد. بیشترین میزان فرونشست در این پهنه مربوط به منطقه گلعباس می‌باشد که سالانه در حدود ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. وجود مخروط‌افکنه جاجرد و زمین‌های کشاورزی با کشت آبی در این گستره قابل ملاحظه می‌باشد. قسمت جنوبی پهنه شمالی با ارتفاعات پیشوا که گسلی نیز به همین نام وجود دارد محدود می‌شود. نکته مهم دیگر در این محدوده وجود خطوط انتقال نیروی فشارقوی می‌باشد که با طول ۲۰ کیلومتر در ۲ خط موازی امتداد یافته است. این خطوط در مناطقی امتداد یافته است که سالانه در حدود بین ۴ الی ۱۰ سانتی‌متر فرونشست زمین رخ می‌دهد. از این رو بررسی و پایش این خطوط ضروری به نظر

می‌رسد.

گستره دوم مربوط به پهنه جنوبی می‌شود قسمت شمالی این پهنه در محدوده شهر پیشوا، قلعه سین و شرق شهر ورامین محدود می‌شود. در این نواحی میزان فرونشست سالانه حداکثر تا ۶ سانتی‌متر می‌رسد. قسمت جنوبی این پهنه در منطقه‌های حصار گل و جهان‌آباد محدود می‌شود. در این مناطق میزان فرونشست زمین نسبت به مناطق مرکزی کمتر و در حدود بین ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر در سال است. در شمال منطقه جهان‌آباد میزان فرونشست زمین حداکثر ۶۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. پهنه جنوبی که منطقه مورد مطالعه نیز در آن واقع شده است به شکل دایره بوده و از پیرامون به سمت مرکز آن بر میزان فرونشست زمین افزوده می‌شود. بیشترین میزان فرونشست زمین در این پهنه مربوط به محدوده‌های سلمان‌آباد، خاوه، جوادآباد، حصار سرخ و زواره‌ور می‌باشد که مقدار آن بین ۱۶۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر در سال است. مناطقی مانند تجره، رستم‌آباد و حصار کوچک نیز از فرونشست زمین با میزان قابل توجه و در حدود بین ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر در سال برخوردار می‌باشند. موقعیت نقاط ذکر شده در شکل ۲ مشخص است.

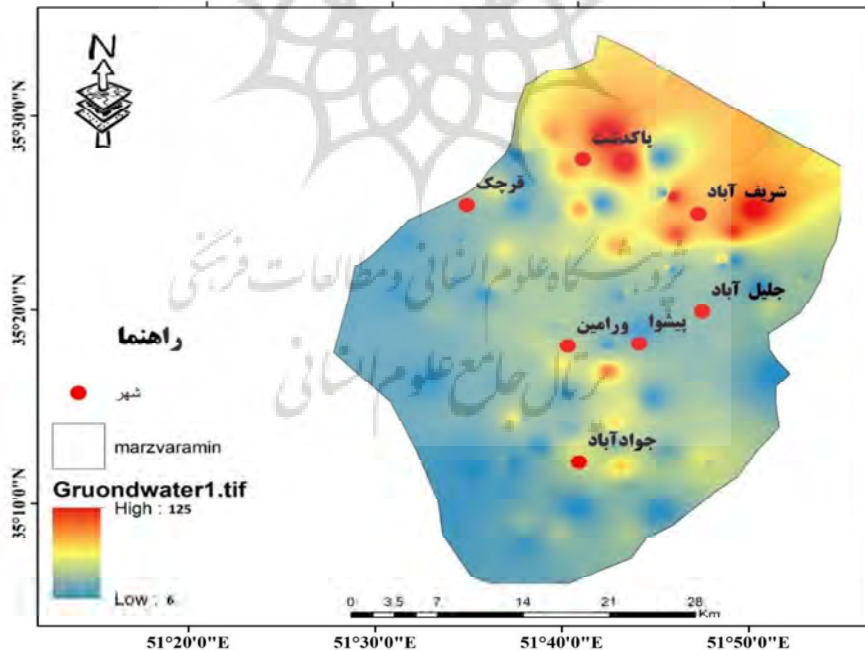
با توجه به نتایج به دست آمده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری که در شکل ۵ نشان داده شده است، در پهنه جنوبی منطقه مورد مطالعه، بخش شرقی آن بیشتر از بخش غربی دارای میزان فرونشست می‌باشد. همچنین در قسمت شمالی محدوده مورد مطالعه میزان فرونشست زمین نسبت به قسمت‌های جنوبی کمتر می‌باشد. به عبارتی دیگر با حرکت از سمت شمال به سمت جنوب در محدوده مورد مطالعه میزان فرونشست افزایش یافته است. علاوه بر منطقه مورد مطالعه ملاحظه می‌شود که خطوط انتقال نیرو در دو لاین و به صورت موازی با طول هر کدام حدوداً ۱۶ کیلومتر و در مجموع بیش از ۳۰ کیلومتر در قسمت شمالی پهنه فرونشستی قرار دارد که نیاز به پایش و بررسی زمینی را می‌طلبد. مهم‌ترین عارضه در منطقه مورد مطالعه مخروط‌افکنه جاجرود می‌باشد که از دامنه جنوبی البرز و از منطقه پارچین به عنوان رأس مخروط‌افکنه به صورت پهنه وسیعی تا عرض‌های جنوبی در منطقه جهان‌آباد گسترش یافته است. با توجه به اینکه ساختار مخروط‌افکنه از بافت آبرفت تحکیم نیافته است و نیز این عارضه از نظر آب زیرزمینی بسیار غنی می‌باشد و همچنین بخش کشاورزی در منطقه فعال می‌باشد که نشان‌دهنده استفاده زیاد آب‌های زیرزمینی می‌باشد،



شکل شماره ۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه

پس از تهیه نقشه میزان فرونشست، به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از اطلاعات ۱۱۷ حلقه چاه‌های پیژومتری منطقه استفاده شده است و ارتباط بین میزان افت آب‌های زیرزمینی با فرونشست منطقه تحلیل شده است. در شکل ۶

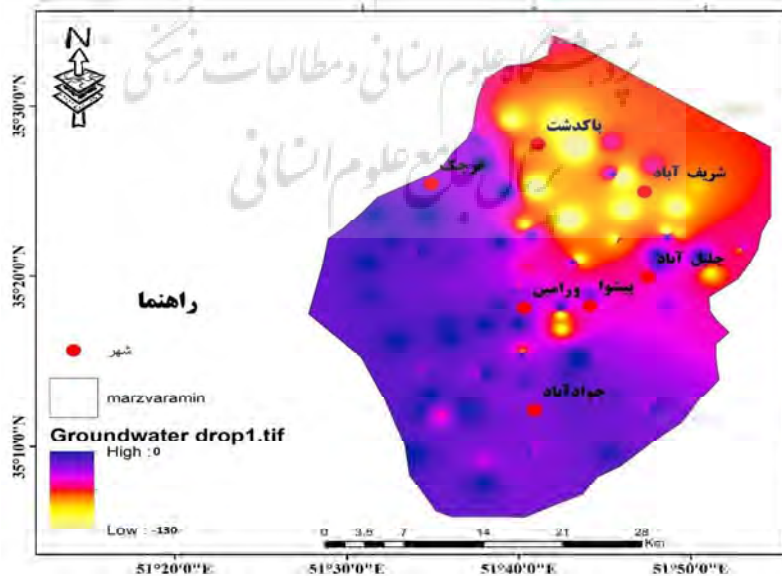
نقشه توزیع آب زیرزمینی برای کل پهنه مخروط افکنه و دشت وسیع عرض‌های جنوبی نشان داده شده است. الگوی سطح آب زیرزمینی از شمال به جنوب با کاهش مواجه است، دو پهنه با میزان بالا برای سطح آب زیرزمینی وجود دارد. پهنه اول در قسمت شمالی و در رأس مخروط افکنه و پهنه دوم در محدوده عرض‌های جنوبی به مرکزیت جوادآباد ورامین است. در قسمت میانی، سطح آب زیرزمینی از عمق کمتری برخوردار است. میانگین سطح آب زیرزمینی در مناطق شمالی و در محدوده‌های شریف‌آباد و پاکدشت حدوداً ۱۲۵ متر به دست آمده است. در منطقه جوادآباد ورامین نیز میزان سطح ایستابی در بیشترین مقدار به طور میانگین حدوداً ۷۰ متر است. کمترین عمق سطح آب زیرزمینی نیز در منطقه پیشوا (امتداد ارتفاعات) و نیز در قسمت‌های شرقی با میزان کمتر از ۱۵ متر به دست آمده است. در محدوده جوادآباد و با مرکزیت شهر میزان سطح ایستابی آب زیرزمینی نسبت به پیرامون بیشتر است. در واقع سطح آب زیرزمینی از شرق به غرب و نیز از جنوب به شمال به صورت محلی افزایش می‌یابد. نکته دیگر سطح آب زیرزمینی با عمق زیاد با مرکزیت جوادآباد نسبت به سایر مناطق است که بیانگر ضخامت بالای آبرفت خشک و شدت نیروی وارده در جهت نیروی ثقل زمین است. موارد ذکر شده هم‌جهت با توجیه‌پذیری وجود فرونشست زمین با افزایش افت سطح آب زیرزمینی است. نکته قابل توجه در توزیع سطح آب زیرزمینی منطقه، انطباق الگوی فرونشست زمین با الگوی توزیع سطح ایستابی آب زیرزمینی است. به عبارتی دیگر هر محدوده‌ای که سطح آب زیرزمینی پائین است میزان فرونشست زمین نیز بیشتر می‌باشد. موضوع مهم دیگر در رابطه با آب‌های زیرزمینی میزان افت سطح آب زیرزمینی در گذر زمان می‌باشد. این قسمت با توجه به بازدیدهای به عمل آمده بیشترین فعالیت کشاورزی را نیز به خود اختصاص داده است. می‌توان دریافت گرادیان آب‌های زیرزمینی به سمت محل‌های با مصرف بالا در همین محدوده بود که بیشترین افت سطح آب را نیز دارا است.



شکل شماره ۶. میانگین سطح آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات چاه‌های منطقه

با مقایسه نقشه افت سطح آب زیرزمینی (شکل ۷) و نقشه فرونشست زمین، به نکات مهمی می‌توان اشاره کرد. از سویی سطح آب زیرزمینی در بخش شمالی بیشتر از سایر بخش‌ها بوده و از سویی دیگر میزان افت سطح آب زیرزمینی نیز در این بخش‌ها بیشتر می‌باشد. در قسمت‌های جنوبی نیز که الگوی فرونشست زمین به صورت دایره متحدالمرکز با مرکزیت

تقریبی جوادآباد ورامین است نیز سطح آب زیرزمینی از افت بیشتری نسبت به پیرامون برخوردار است. نکته دیگر با توجه به عمق و افت سطح آب زیرزمینی چنین تصور می‌شود که نرخ فرونشست زمین بایستی در پهنه شمالی بیشتر از پهنه جنوبی باشد. اما طبق نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات تداخل‌سنجی راداری نرخ فرونشست زمین در پهنه جنوبی و به مرکزیت جوادآباد ورامین از نرخ بیشتری برخوردار است و این موضوع نیاز کنکاش عوامل دیگر را نشان می‌دهد. به‌احتمال زیاد جنس و اندازه دانه‌بندی زمین‌شناسی منطقه می‌تواند پاسخگو باشد. افت سطح آب زیرزمینی به‌صورت خطی بوده و در تمامی ادوار با یک شیب ملایم بیشتر شده است. در شمال منطقه و در منطقه کریم‌آباد از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۷ افت سطح آب زیرزمینی در حدود ۷۰ تا ۷۵ متر بوده است. با توجه به اینکه روند افت سطح آب زیرزمینی به‌صورت خطی می‌باشد، سالانه در حدود ۳٫۴ متر افت سطح آب را می‌توان متصور شد. در بخش میانی و مربوط به روستای قلعه‌سین افت سطح ایستابی حدوداً ۶۰ تا ۶۵ متر است. شیب افزایش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در بخش میانی نیز به‌صورت خطی بوده و به‌طور میانگین سالانه حدوداً ۲٫۸ متر است. افت سطح ایستابی در بخش میانی نسبت به بخش شمالی با نرخ کمتری رخ داده است. در پهنه جنوبی منطقه با مرکزیت جوادآباد ورامین سطح ایستابی آب زیرزمینی چاه‌ها نسبت به عرض‌های شمالی از نرخ کمتری برخوردار است. نکته مهم در این بخش شیب تغییرات افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۱ می‌باشد که شدت بیشتری نسبت به سال‌های قبلی به خود گرفته است. این در حالی است که تا سال ۱۳۹۰ شیب کاهش سطح ایستابی ملایم بوده است. اما پس از سال‌های ذکر شده شدت بیشتری به خود گرفته است. این امر احتمالاً بیانگر کاهش سطح ایستابی سفره آب زیرزمینی می‌باشد. این منطقه جزء پهنه جنوبی فرونشست زمین بوده که توجه‌پذیری این رخداد را نشان می‌دهد. میانگین افت سطح ایستابی در این زون تا سال ۱۳۹۰ حدوداً نیم متر بوده که با افزایش شدت افت سطح ایستابی بر آن افزوده شده است. به‌طوری‌که در طول کل بازه زمانی ۲۲ ساله به ۱٫۵ متر در سال رسیده است. در محدوده‌هایی که افت سطح آب زیرزمینی زیاد است و نیز در عمق بیشتری قرار دارد با توجه به این موضوع که ضخامت آبرفت زیاد است و با افزایش عمق سطح آب زیرزمینی بر ضخامت آن افزوده می‌شود لذا نیروی فشارشی در جهت ثقل زمین افزایش یافته و منجر به رخداد فرونشست زمین می‌گردد. البته در مناطق شمالی که دانه‌بندی سطوح زیرین بزرگ‌تر و درشت‌تر از قسمت‌های جنوبی است با توجه به استحکام آن‌ها از نظر مهندسی زمین‌شناسی در برابر نیروی وارده، مقاومت نشان داده و این موضوع سبب می‌شود رخداد فرونشست زمین با حداکثر شدت صورت نپذیرد.



شکل شماره ۷. افت سطح آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات چاه‌های منطقه



شکل شماره ۸. تصاویری از اثرات فرورانشست زمین در محدوده مورد مطالعه

به منظور بررسی نتایج به دست آمده از منطقه مورد مطالعه بازدید میدانی به عمل آمد. در بررسی‌های میدانی ملاحظه گردید ۳ زون در پهنه جنوبی متأثر از پدیده فرورانشست زمین به مرکزیت جوادآباد ورامین وجود دارد. محدوده اول مربوط به قسمت شمال شرقی و در حوالی ایستگاه ابردژ می‌باشد. شمال این منطقه محدود به ارتفاعات و گسل پیشوا می‌باشد که مشرف بر دشت می‌باشد. در بخش تالاقی ارتفاعات و دشت و در آن قسمت که مرز بین مناطق دارای فرورانشست می‌باشد با مناطق بدون فرورانشست شکاف‌هایی بر سطح زمین ایجاد شده است. به نظر می‌رسد این شکاف‌ها در اثر افت سطح آب زیرزمینی و رخداد فرورانشست که منجر به تغییر شیب‌ها و اعوجاجات سطح زمین می‌شود پدید می‌آید. در این منطقه انواع

فرسایش‌های شیاری و تونلی به‌وفور قابل‌رؤیت می‌باشد. از المان‌های مهم موجود در این بخش خط ریل تهران به مشهد می‌باشد که در صورت عدم توجه می‌تواند آسیب‌های جدی وارد نماید. لازم است در این منطقه مطالعات تخصصی زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی به‌منظور شناخت رفتار این پدیده در سطوح زیرین به عمل آید. در شکل ۸ (الف و ب) نمونه‌هایی از این شکاف‌ها آورده شده است.

منطقه دوم مربوط به محدوده روستای معین‌آباد و قلعه سین می‌باشد. رخداد فرونشست زمین در این زون از محدوده مورد مطالعه، بیشتر اراضی کشاورزی را در برمی‌گیرد. یکی از المان‌های مهم این بخش خطوط انتقال نیرو و راه مواصلاتی ورامین و جوادآباد می‌باشد. شکاف‌های ایجادشده در این زون با توجه به این‌که نزدیک به سکونتگاه‌ها و زمین‌های کشاورزی می‌باشد می‌تواند خطرآفرین باشد. در شکل ۸ (پ و ت) نمونه‌هایی از تصاویر شکاف‌های این منطقه آورده شده است.

منطقه سوم مربوط به اراضی روستای قلعه خواجو می‌باشد در این ناحیه رخداد فرونشست و رخنمون‌های مرفولوژیکی پس‌از آن، با توجه به مصاحبه‌های محلی از دو زون ذکرشده دیرتر رخ داده است. زمین‌های کشاورزی و خط انتقال نیرو تحت تأثیر این پدیده خطوط مواصلاتی نیز به همراه سکونت‌گاه‌ها متأثر خواهند گردید. در شکل ۸ (ث و ج) اثرات فرونشست و آسیب‌های آن در منطقه قلعه خواجو نشان داده شده است. نکته قابل‌تأمل در این رابطه رخداد عوارض مرفولوژیکی به وجود آمده از فرونشست زمین در مناطقی می‌باشد که در مرز پهنه‌های فرونشست زمین و بدون فرونشست زمین و یا در بین مناطق دارای فرونشست زمین با نرخ بالا و نرخ پائین واقع شده‌اند. لذا با تدقیق در نتایج مراحل قبلی و بازدیدهای میدانی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که رخداد فرونشست در قسمت لبه‌های پهنه بیشترین اثرات را می‌گذارد که نتیجه آن علاوه بر نشست زمین سبب ایجاد انواع شکاف‌ها شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرونشست زمین در مخروط افکنه جاجرود مورد بررسی قرار گرفت و نرخ فرونشست منطقه تعیین گردید. در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ میلادی با ترکیب ۴۱ تصویر راداری پایین گذر ماهواره‌ای Sentinel-1A و با استفاده از نرم‌افزار SNAP تعیین شد و از داده‌های چاه‌های پیژومتری و بازدید میدانی به‌منظور صحت‌سنجی و تفسیر نتایج استفاده گردید. نتیجه مطالعات حاصل از تداخل‌سنجی راداری نشان داد در بیشتر سطح مخروط‌افکنه جاجرود فرونشست زمین رخ داده است. منطقه جوادآباد ورامین از محدوده‌های با فرونشست قابل‌ملاحظه است که سالانه ۲۰ سانتی‌متر رخداد فرونشست زمین در آن وجود دارد. افت سطح آب زیرزمینی منطقه به‌صورت خطی بوده و این مورد در توجیه فرونشست زمین قابل‌قبول می‌باشد. به‌طوری‌که الگوهای به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی راداری برای آشکارسازی الگوی فرونشست زمین و آب‌های زیرزمینی منطبق بر هم و تا حدودی هم‌شکل به دست آمد که با نتایج حق‌شناس حقیقی و معتق (۲۰۱۹) که عامل اصلی فرونشست منطقه را برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی عنوان کردند، همخوانی دارد.

بررسی‌های اطلاعات آب‌های زیرزمینی نشان داد، سطح آب زیرزمینی در عرض‌های شمالی مخروط‌افکنه نسبت به عرض‌های جنوبی از عمق بالایی برخوردار بوده اما بیشترین میزان فرونشست در قسمت‌های جنوبی و در منطقه جوادآباد ورامین می‌باشد. با توجه به بررسی‌های مرفولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه به‌احتمال زیاد دانه‌بندی خاک و بحث زمین‌شناسی در این مورد دخیل بوده که نیازمند مطالعات تخصصی این بخش است. موضوع دیگر عمق بالای آب زیرزمینی در شمال منطقه است که نسبت به عرض‌های جنوبی از فرونشست کمتری برخوردار می‌باشد. با توجه به ماهیت مخروط‌افکنه در قسمت‌های شمالی دانه‌بندی درشت‌تر بوده و از نظر استحکام در برابر نیروی ثقلی بیشتر می‌باشد که مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در راستای چه باید کردها می‌تواند راهگشا باشد.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) احمدی، س. و سودمند افشار، ر. (۱۳۹۹). پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهاردولی استان‌های همدان و کردستان با استفاده از فن پراکنش گرهای دائمی. مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۶ (۳)، ۲۱۹-۲۳۳.
- ۲) بابایی، س.؛ موسوی، ز. و روستایی، م. (۱۳۹۵). آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین. نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، ۵ (۴)، ۹۵-۱۱۱.
- ۳) حیدریان، م.ح.؛ کابلی، ع. ر. و فاتح دیزجی، ع. (۱۳۹۱). اثرات محیطی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دشت ورامین، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- ۴) زهتابیان، غ.ر.؛ رفیعی امام، ع.، علوی پناه، س.ک. و جعفری، م. (۱۳۸۳). بررسی آب زیرزمینی دشت ورامین جهت استفاده از آبیاری اراضی کشاورزی، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۶ (۴۸)، ۹۱-۱۰۲.
- ۵) سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح. (۱۳۷۰). فرهنگ جغرافیایی آبادی‌های کشور.
- ۶) شریفی‌کیا، م. (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق بهرمان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی) ۱۶ (۳)، ۷۷-۵۵.
- ۷) شمشکی، ا. و انتظام سلطانی، ا. (۱۳۸۴). سازوکار و علل تشکیل شکاف‌های زمین در منطقه معین‌آباد - ورامین، چهارمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، تهران.
- ۸) عقیقی، م.ا. (۱۳۹۵). ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل موثر بر آن (مطالعه موردی: دشت سیدان فاروق مرودشت) مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۹ (۳)، ۱۳۲-۱۲۱.
- ۹) مرادی، آ.؛ عمادالدین، س.؛ آرخی، ص. و رضائی، خ. (۱۳۹۹). تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیرومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری ۱۸ تهران). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷ (۱)، ۱۷۶-۱۵۳.
- ۱۰) محمدخان، ش.، گنجائیان، ح.، گروسی، ل. و زنگنه تبار، ز. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. نشریه اطلاعات جغرافیایی، ۲۸ (۱۱۲)، ۲۲۹-۲۱۹.
- ۱۱) محمدی، م.؛ پورقاسمی، ح.ر. و امیری، م. (۱۴۰۰). ارزیابی حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان با استفاده از مدل آنتروپی، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۲ (۲۳)، ۸۵-۷۵.
- ۱۲) معتق، م.؛ داودی جم، م.؛ مؤمنی، م. و هاشمی، م. (۱۳۹۱). کشف و نمایش فرونشست دشت مهیار اصفهان به کمک تداخل‌سنجی راداری. نشریه مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۳ (۲)، ۵۷-۴۷.
- ۱۳) مقصودی، ی.؛ امانی، ر. و احمدی، ح. (۱۳۹۸). بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵ (۱)، ۳۱۳-۲۹۹.

References

- 1) Ahmadi, S., & Soudmand Afshar, R. (2020). Monitoring of Land Subsidence in Qorveh and Chahardoli Plains of Hamadan and Kurdistan Provinces using PS-InSAR Technique. Journal of Environment and Water Engineering, 6(3), 219-233. [In Persian].
- 2) Afifi, M.A., (2016). Assess the potential of land subsidence and its related factors (Case study: Plain Saidan Farouk Marvdasht. Quantitative Geomorphological Research, 19(3), 121-132. [In Persian].
- 3) Babae, S.S., Mouavi, Z., & Roostaei, M., (2016). Time Series Analysis of SAR I mages Using Small Baseline Subset(SBAS) and Persistent Scatterer(PS) Approaches to Determining Subsidence Rate of Qazvin Plain. Journal of Geomatics Science and Technology, 5(4), 113-125. [In Persian].
- 4) Burgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J., 2000. Synthetic aperture radar interferometry to measure earths surface topography and its deformation. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28, 169-209.
- 5) Crosetto, M., Gili, J.A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., & Serral, D., (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors. Natural

- Hazards and Earth System Sciences, 13(4), 923-933.
- 6) Ferretti, C., Prati, C., & Rocca, F., (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38, 2202-2212.
 - 7) Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D., (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, 181, 1-17. [In Persian].
 - 8) Haghshenas Haghghi, M., & Motagh, M., (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550. [In Persian].
 - 9) Heydarian, M.H., Kabuli, A.R., & Fateh-Dizaji, A., (2012). Environmental effects of extraction from groundwater resources in Varamin plain, 16th Conference of Iranian Geological Society. [In Persian].
 - 10) Hooper, A.J., (2006). Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, PhD Thesis, 144p. [In Persian].
 - 11) hooper, A., Segall, P., & Zebker, H., (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-21.
 - 12) Jeanne, P., Faar, T. G., Rutqvist, J., & Vasco, D. W., (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the Jouquin Valley, California. *Journal of Hydrology*, 569, 462 -469.
 - 13) Linlin G., Alex Hay-Man, Ng., Xiaojing, L., Hasanuddin, Z.A., & Irwan, G., (2014). Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry *Remote Sensing of Environment*, 154, 46-60.
 - 14) Leyin, H., Keren, D., Chengqi, X., Zhenhong, L., Roberto, T., Beth, C., Xianlin, SH., Mi, CH., Rui, Z., Qiang, Q., & Yajun, L., (2019). Land subsidence in beijing and its relationship with geological faults revealed by sentinel - 1 InSAR observation, *Internation Journal of Applied Earth observation and Geoinformation*, 82, 1-10.
 - 15) Maghsoudi, Y., Amani, R., & Ahmadi, H., (2019). A Study of land Subsidence in West of Tehran Using Sentinel-1 Images and Permanent Scatterers Interferometry. *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 299-313. [In Persian].
 - 16) Mohammakhhan, Sh., Ganjaeian, H., Garosi, L., & Zanganetabar, Z., (2020). Assessing the impact of groundwater drop on the subsidence rate using the Sentinel-1 Radar images - Case study: Qorveh Plain. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data(SEPEHR)*, 28(112), 219-229. [In Persian].
 - 17) Mohebbi Tafreshi, Gh., Nakhaei, M., & Lak, R., (2019). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *GeoJournal*, 8, 1203-1223. [In Persian].
 - 18) Moradi, A., emadodin, S., Arekhi, S., rezaei, K., (2020). Earth subsidence analysis using radar interferometry technique, geotechnical and piezometric wells (case study: Urban region 18 Tehran). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, Vol.7, No.1, pp.153-176. [In Persian].
 - 19) National Geography Organization of Iran, 1991, Geographical culture of the country's villages.
 - 20) Nejatijahromi, Z., Nassery, H. R., Hosono, T., Nakhaei, M., Alijani, F., & Okumura, A., (2019). Groundwater nitrate contamination in an area using urban wastewaters for agricultural irrigation under arid climate condition, southeast of Tehran, Iran. *Agricultural Water Management*, 221, 397-414. [In Persian].
 - 21) Roohi, M., Faeli, M., Irani, M., & Shamsaei, E., (2021). Calculation of land subsidence and changes in soil moisture and salinity using remote sensing techniques. *Environmental Earth Sciences*, 80, 4-23.
 - 22) Shafiei, N., Golimokhtari, L., Amir Ahmadi, A., Zandi, R., (2020). Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(4), 93-111. [In Persian].
 - 23) Sharifikia, M., (2012). Determining the extent and amplitude of land subsidence using radar interferometry (D-InSAR) method in Nogh Bahrman plain. *Journal of Spatial Planning*, 16(3), 55-77. [In Persian].
 - 24) Yastika P. E., Shimizu N. & Abidin H. Z., (2019). Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data. *Advances in Space Research*, 63(5), 1719-

- 1736.
- 25) Zehtabian, GH., Rafii, I.A., Alavi Panah, S.K., & Jafari, M., (2004). Investigation of groundwater in Varamin plain for irrigation of agricultural lands. Geographical research, 36(48), 91-102. [In Persian].

