Original Article, Vol. 9, No. 4, Winter, 2022, pp 63-78

Desert Management
www.isadmc.ir

Iranian Scientific Association of Desert Management and Control

Evaluation of Land Subsidence in Abarkooh Plain Using Radar Differential Interferometry Technique And GIS

M. Fallahpoor Tezanji[1], F. Barzegari Banadkooki[2*]

1. Assistant Professor, Geology Department, Payame Noor University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Agricultural Department, Payame Noor University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author: barzegari@pnu.ac.ir

Received date: 10/01/2022 **Accepted date: 22/02/2022**

doi 10.22034/JDMAL.2022.546294.1364

Abstract

Land subsidence is a vertical movement downwards of the Earth's surface. It is difficult to identify or measure because of rapidly depleting ground water. This hazard, as a hydrogeomorphology phenomenon, is revealed in many areas of the country because of the uncontrolled depletion of the groundwater. There are a number of methods for identifying and determining the rate and range of subsidence. Radar interferometry (D-INSAR) technique is known as a robust technique for land subsidence measurement. This method has superior features in terms of cost, accuracy, scale of the study area and time, in comparison with other detection methods, and can provide a precise estimation of the phenomenon. In this study, the Abarkouh plain was studied from January 2016 until February 2018. Sentinel 1 sensor images using radar interferometry technique were used to estimate subsidence. To identify the impact of groundwater extraction in land subsidence, groundwater fluctuations data from 44 piezometric wells, and also land subsidence data were analyzed using regression models. Results showed that the highest rate of groundwater depletion occurred in the town of Mehrdasht and around the agricultural fields, which led to the maximum rate of subsidence up to 12 cm/year. Ccorrelations coefficient between aquifer fluctuations and land subsidence rate is 0.79 that indicated significant relation between these parameters.

Keywords: Land subsidence; Remote sensing; Satellite images; Ground water

مقاله پژوهشی، سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰، صفحات ۶۳ تا ۷۸

نشریه مدیریت بیابان
www.isadmc.ir

انجمن علمی مدیریت و کنترل مناطق بیابانی ایران

ارزیابی فرونشست زمین در دشت ابرکوه با استفاده از فنآوری تداخل‌سنجی تفاضلی و سامانه اطلاعات جغرافیایی

مرتضی فلاح‌پور طزنجی[1]، فاطمه برزگری بنادکوکی[2*]

۱. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران.
۲. استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران.
* نویسندهٔ مسئول: barzegari@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳**
doi 10.22034/JDMAL.2022.546294.1364

چکیده

پدیده فرونشست زمین، به حرکت در جهت پایین سطح زمین گفته می‌شود که به دلیل روند کند آن به آسانی قابل شناسایی و اندازه‌گیری نیست. این پدیده به عنوان مخاطرهٔ هیدروژئومورفولوژیک، در بخش‌های مختلفی از کشور تحت تأثیر استخراج بی‌رویه منابع آب به‌وقوع پیوسته است. روش‌های متعددی در زمینه شناسایی و تعیین میزان فرونشست استفاده می‌شود. از جمله مناسب‌ترین این روش‌ها استفاده از تداخل‌سنجی راداری (D-INSAR) می‌باشد. این روش مزیت‌هایی ازنظر هزینه، دقت، وسعت منطقه موردمطالعه و زمان انجام، نسبت به دیگر روش‌های آشکارسازی دارد. در پژوهش حاضر، مقدار فرونشست دشت ابرکوه در بازه‌ی زمانی دی ۱۳۹۴ تا بهمن ۱۳۹۶ مورد بررسی قرارگرفته است. تصاویر سنجنده Sentinel 1 در بازه زمانی مورد نظر تهیه و سپس به کمک تکنیک تداخل‌سنجی، نرخ فرونشست بررسی شد. نوسانات آب زیرزمینی نیز با استفاده از اطلاعات ۴۴ چاه پیزومتری بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار افت سطح آب زیرزمینی در محدودهٔ شهر مهردشت و اطراف زمین‌های کشاورزی می‌باشد که منجر به بیشترین نرخ فرونشست (۱۲ سانتیمتر در سال) شده است. ضریب همبستگی بین نوسان آب زیرزمینی و مقدار فرونشست ۰/۷۹ است که ارتباط مستقیم بین مقدار افت آب زیرزمینی و فرونشست سطح زمین در این دشت را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: نشست زمین؛ سنجش از دور؛ تصاویر ماهواره‌ای؛ آب‌های زیرزمینی

■ مقدمه

در پی توسعهٔ جمعیتی، فناوری و نیازهای انسانی در دهه‌های اخیر منابع آبی نیز به‌طور گسترده‌ای مورد بهره-برداری قرارگرفته‌اند، لذا پدیده‌های مرتبط با برداشت‌ها بیش‌از حد ظرفیت زیادتر از قبل رخ می‌دهند. از جمله مخاطرات مرتبط با برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی می‌توان به پدیدهٔ فرونشست زمین اشاره کرد. فرونشست به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با مولفهٔ افقی کمتر همراه باشد، گفته می‌شود و در مقیاس بزرگ به صورت تدریجی و یا آنی رخ می‌دهد (۲، ۲۸). نتایج حاصل از فرونشست زمین منجر به ضرر اقتصادی چشم‌گیر و خسارات گسترده‌ای در ساختمان‌ها، جاده‌ها و زیرساخت-ها شود (۵). این عوامل موجب‌شده است تا این پدیده به-عنوان یکی از مهمترین مخاطرات محیطی محسوب شود، ولی از آنجایی که این پدیده تلفات انسانی کمتری نسبت به دیگر پدیده‌های طبیعی دارد، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است (۳). بر اساس برآورد کارشناسان بیش از ۱۵۰شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده قرار دارند (۱۲).

اندازه‌گیری تأثیر برداشت آب‌های زیرزمینی و تغییرات سطح زمین موضوعی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان بوده است و با استفاده از ابزارهای مختلفی نظیر GPS، نقشه‌برداری و ابزارهای راداری مورد بررسی قرارگرفته است. استفاده از سنجش از دور نسبت به روش‌های سنتی اندازه‌گیری بررسی فرونشست دارای قابلیت‌هایی نظیر پوشش منطقه بزرگ‌تر و اندازه‌گیری تغییرات در مقیاس میلیمتری می‌باشد. به‌کارگیری روش تداخل سنجی با استفاده از تصاویر Sentinel 1 نسبت به سایر روش‌های موجود دارای مزایایی می‌باشد، نوارهایی با پهنای وسیع ۲۵۰km هر تصویر، دوره تصویربرداری مجدد شش روز و قدرت تفکیک مکانی ۲۰m روی زمین، موجب ایجاد بانک اطلاعاتی پویا و وسیع می‌شود که در مقایسه با اطلاعات جمع‌آوری شده از طریق GPS و نقشه‌برداری زمینی بسیار فشرده‌تر است. دقت این روش موجب شده تا در بررسی‌های مربوط به فرونشست زمین در اثر بهره‌برداری آب‌های زیرزمینی (۶، ۲۲، ۲۶) زمین لغزش (۸، ۲۷) فعالیت‌های آتش‌فشانی (۱۶، ۱۷) و فرونشست در مناطق شهری (۱۸) به وفور مورد استفاده قرار بگیرد.

در ایران پدیده فرونشست از سال‌های گذشته وجود داشته و در برخی از مناطق کارهای مطالعاتی انجام‌شده و گزارش‌هایی از وضعیت منطقه بیان‌شده است. در سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی وخشکسالی مربوط به آن شاهد افزایش استخراج آب به‌وسیله چاه‌های آب بوده‌ایم و این عامل باعث تشدید این پدیده شده است. مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای برداشت منابع آبی از این مناطق است (۷). در ایران نزدیک به شصت دشت وجود دارد که براثر اعلام نظر کارگروه فرونشست زمین و حفاظت از منابع آب زیرزمینی بیش از نیمی از آن دشت‌ها مستعد پدیده فرونشست می‌باشد. بخشی از بررسی‌های انجام شده در این زمینه عبارتند از:

دشت یزد - اردکان در استان یزد (۲)، قرچک ـ ورامین، اسلامشهر و هشتگرد در استان تهران (۲۴)، میدان نفتی مارون (۱۰) ، نجف آباد در استان اصفهان (۲۵)، نوق، بهرمان در استان کرمان (۲۳)، آبخوان قزوین در استان قزوین (۳)، دشت رفسنجان در استان کرمان (۲۱)، دشت اراک (۱).

بررسی‌های شناسایی پدیده فرونشست در ایران ابتدا به‌صورت میدانی و بر اساس پیمایش صورت گرفته است. البته در پاره‌ای از موارد از روش‌های مکانیک خاک نیز استفاده شده است، به‌عنوان‌مثال می‌توان به استفاده از دستگاه‌های کشش‌سنجی اشاره کرد که از آن‌ها برای بررسی خاک‌های سست استفاده شده و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیک و آشکارسازی تغییرات سطح زمین استفاده گردیده است (۱۲). با توجه به این مسئله که پدیده فرونشست دارای سرعت کندی است و در هنگام تأثیر منطقه وسیعی را تحت پوشش قرار می‌دهد، استفاده از این روش‌های قدیمی علاوه بر هزینه‌بر بودن و صرف زمان بسیار زیاد نتایج آن‌ها از صحت بالایی برخوردار نبودند (۹). لذا در بررسی‌های اخیر از روش‌های راداری برای پایش این پدیده استفاده شده است. از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

بررسی پدیده فرونشست زمین و شکستگی‌های موجود در منطقه رستاق جنوب میبد، پس از جمع‌آوری اطلاعات طی بازدیدهای صحرایی و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محدوده گسترش نشست زمین و جنس آبرفت‌ها در منطقه، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که برداشت از سفره عمیق رستاق و اردکان موجب کاهش فشار پیزومتریک در حدود ۳ m/year شده است که این کاهش فشار موجب برهم خوردن تعادل و افزایش فشار حاصل از بار رسوبات بالای سطح ایستابی شده و با کاهش تخلخل رسوبات در اثر افزایش تراکم، فرونشست حاصل‌شده است (۲۹) .

مطالعه مقدار و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری در دشت نوق-بهرمان با استفاده از داده‌های راداری در دو باند C و L در بازه‌های زمانی ۱۳۸۴تا ۱۳۸۹ نشان داد، مقدار فرونشست با میانگین سالیانه حدود ۳۰cm در پهنه‌ای به گستره ۲۸۱ km^2 در بخش میانی دشت می‌باشد و همچنین به سبب ثابت بودن مقدار تأثیرگذاری عوامل ایجابی مانند فعالیت کشاورزی پسته‌کاری، در رویداد این پدیده، تغییرات فصلی و سالیانهٔ مقدار فرونشست بسیار اندک است. اما دامنه برخوردار از بیشترین مقدار نشست، از نواحی میانی و شرقی در فصل‌های بهار و تابستان به نواحی جنوبی و غربی در فصل‌های زمستان و پاییز تغییریافته است. همچنین مقایسه مقدار فرونشست با ارقام تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیزومتریک نشان می‌دهد در این دشت هر ۳/۲m افت تراز آبی قادر است فرونشستی به ۱cm ایجاد کند (۲۳).

با کمک فنآوری تداخل‌سنجی راداری و تحلیل سری زمانی، SBAS نرخ فرونشست سالانه دشت استان قم در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۹ با استفاده از داده‌های ماهواره Envisat ASAR مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از داده‌های تغییرات تراز سطح ایستابی، ضخامت لایه‌های آبدار و ضخامت لایه‌های ریزدانه، دلایل فرونشست تحلیل شد. نتایج بیانگر تاثیر معنی‌دار برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی بر فرونشست زمین می‌باشد (۱۱).

فرونشست دشت قزوین در سال‌های۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ و ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ با استفاده از داده‌های ماهواره Envisat و روش سری زمانی و PS مورد ارزیابی قرار گرفت و میانگین فرونشست در دشت قزوین ۴۰ mm/year گزارش شد (۴).

در پژوهشی، نرخ فرونشست سطح زمین در آبخوان نجف آباد اصفهان با استفاده از پردازش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (D-InSAR) و داده‌های سنجنده‌های ASAR و PALSAR تعیین و با داده‌های افت سطح آب زیرزمینـی مقایسه شد. پردازش داده‌های رقومی ماهواره‌ای راداری سنجنده ASAR میزان فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد را با نرخ متوسط ۶/۷ cm در سال و در مجموع ۴۱cm در مدت ۶ سال برآورد نمود و پردازش داده‌های سنجنده PALSAR نرخ سالیانه ۷/۷ cm و در مجموع ۳۰cm فرونشست در مدت ۴ سال را نشان داد (۲۵).

بررسی پژوهش‌های که درزمینهٔ فرونشست زمین در سال‌های اخیر انجام‌شده بیانگر این مطلب است که بیشتر محققان، روش پژوهشی خود را تداخل‌سنجی تفاضلی راداری انتخاب کرده‌اند (۱۱-۹، ۱۶-۱۴، ۲۳-۲۱). این موضوع مؤید این است که روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری یکی از کارآمدترین و دقیق‌ترین روش‌ها در این زمینه می‌باشد و نتایج قابل‌اعتمادی می‌دهد. در اکثر پژوهش‌ها مهم‌ترین یا درواقع تنها دلیل فرونشست زمین برداشت از منابع آب زیرزمینی بیش‌ازحد مجاز بیان‌شده که این امر با توجه به‌قرار گرفتن کشور ایران در ناحیه بیابانی و نیمه بیابانی جهان و مقدار بارش سالیانه که زیر مقدار میانگین جهانی در دو دهه اخیر می‌باشد، رو به افزایش است.

با توجه به فقدان بررسی تغییرات فرونشست در دشت ابرکوه به‌عنوان یک دشت ممنوعه که سالانه افت تراز سطح ایستابی بیش از ۱/۵ m دارد (۱۹)، هدف از انجام پژوهش حاضر، محاسبه فرونشست دشت ابرکوه و ارتباط بین فرونشست با تغییرات تراز سطح ایستابی آبخوان بود.

پرسش‌های اصلی پژوهش به‌صورت زیر بود:

۱) آیا تصاویر ماهواره Sentinel-1 در باند C توانایی محاسبه میزان جابجایی عمودی سطح را در منطقه مطالعاتی دارا هستند؟

۲) آیا جابجایی حاصل از این داده‌های راداری رابطه‌ای با میزان کاهش سطح آب زیر زمینی دارند؟

۳) بیشترین مقدار فرونشست در کدام قسمت‌های دشت وجود دارد؟

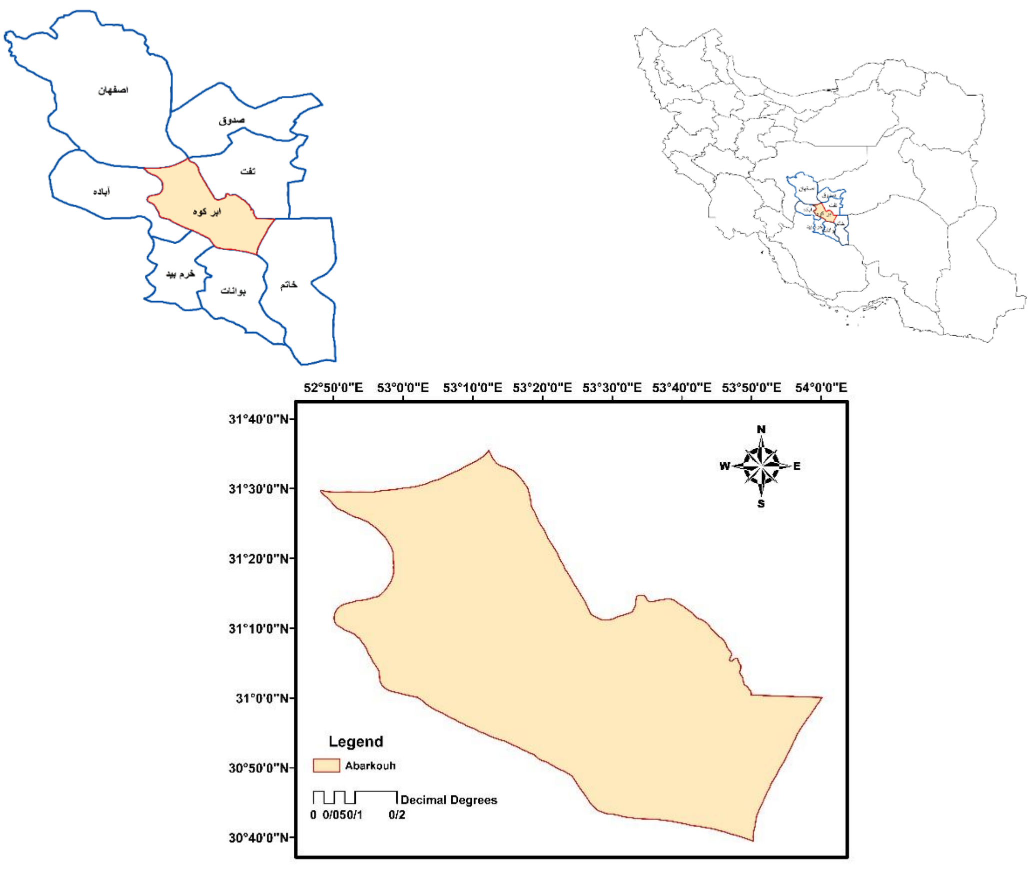
■ مواد و روش

منطقهٔ مورد بررسی

شهرستان ابرکوه در محدوده جغرافیایی ′۵۰ °۵۲ تا ′۰۱ °۵۴ طول شرقی و ′۳۰ °۳۰ تا ′۳۵ °۳۱ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این شهرستان از شمال به شهرستان صدوق، از شمال غرب به استان اصفهان، از غرب به شهرستان آباده استان فارس، از جنوب و جنوب غرب به شهرستان‌های خرم بید و بوانات استان فارس، از شرق و شمال شرق به شهرستان‌های خاتم و تفت در استان یزد، محدود می‌گردد. ارتفاعات کوه سفید و قنبره در جنوب شرق و کوه اعلاء در شمال غرب شهر ابرکوه واقع شده است. واقع شدن در مسیر مواصلاتی استان‌های فارس، اصفهان، کهگیلویه و بویر احمد، خراسان و استان‌های جنوب شرق به‌عنوان یک مرکزیت نسبی ارزشمند می‌تواند توجیه‌گر توسعه امکانات باراندازی و انبارداری در ابرکوه باشد (۳۰).

وسعت منطقه در حدود $۵۳۸۱km^2$ می‌باشد. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۵۰۶m است. حداقل ارتفاع شهرستان ابرکوه در حاشیه کفه نمک ۱۴۵۰m و حداکثر آن ۴۰۴۰m در ارتفاعات جنوبی این شهرستان می‌باشد. حدود ۷۹/۷٪ از مساحت منطقه ابرکوه کمتر از ۲۰۰۰ m و فقط ۲٪ آن بیش از ۲۵۰۰m ارتفاع دارد (۳۰).

میانگین سالانه درجه حرارت ۱۸/۹°C است. به‌طورکلی موقعیت طبیعی شهرستان ابرکوه دارای ویژگی‌هایی است که بر پدیده‌های هواشناسی منطقه تأثیر چشم‌گیر دارد. از دیدگاه تأثیرات اقلیمی مسأله توپوگرافی شامل سه منطقه مرتفع اصلی و چهار منطقه پست است و این وضعیت باعث صعود و نزول مکرر جریان و پدیده‌های رطوبتی و حرارتی متنوعی گردیده و موجب پیدایش شرایط اقلیمی خاص منطقه می‌گردد. لازم به ذکر است که نزولات اندک جوی همراه با تبخیر شدید رطوبت نسبی ناچیز توأم با گرمای زیاد و نوسانات شدید درجه حرارت این شهرستان را به یکی از مناطق خشک و کویری ایران تبدیل گردانده است.



شکل ۱. موقعیت نسبی شهرستان ابرکوه

میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی توسط چاه، قنات و چشمه جمعاً معادل ۱۵۸Mm^3/year معادل ۹۵٪ کل تخلیه محدوده می‌باشد. مقدار تبخیر از آب زیرزمینی معادل ۷Mm^3/year محاسبه شده است و با احتساب جریان خروجی معادل ۱Mm^3/year، مجموع عوامل تخلیه، جمعا معادل ۱۶۶Mm^3/year می‌باشد. تفاضل دو مقدار تغذیه و تخلیه سفره بیانگر بیلان منفی ۲۰Mm^3/year این سفره می‌باشد (۱۹).

داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر به دو دسته کلی داده‌های زمینی و ماهواره‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. داده‌های ماهواره‌ای از سازمان فضایی اروپا و داده‌های زمینی از دفتر مطالعات آب منطقه‌ای استان یزد و سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد که در ادامه به پردازش و آماده‌سازی آن‌ها اشاره خواهد شد.

داده‌های سنجنده‌های راداری

در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره سنتینل-۱ با نام مخفف SA-1[1] با مد IW در دو بازه زمانی مجزا از دی‌ماه ۱۳۹۴ تا بهمن ۱۳۹۶ استفاده گردید.

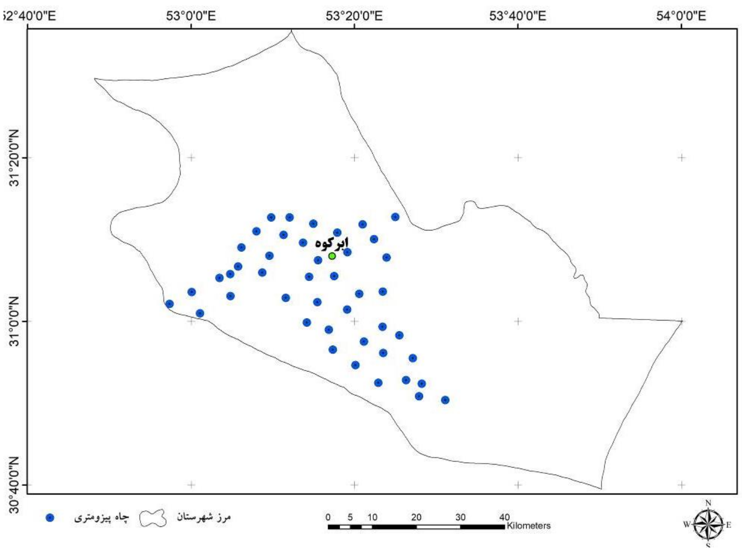
SA-1 سنجنده مایکرویوی است که در طول‌موج C با محدوده فرکانس اسمی از ۴-۸ GHz در بخش مایکروویو طیف الکترومغناطیس فعالیت دارد و در حالات مختلفی تصویربرداری می‌کند. این سنجنده می‌تواند با درون‌یابی، دقت کمتر از میلی‌متر جابجایی‌های سطح زمین را نشان می‌دهد. تصاویر مورداستفاده در پژوهش حاضر در جدول ۱ آمده است.

داده‌های سطح چاه‌های پیزومتری منطقه

بر اساس آمار مربوط به سال ۱۳۹۶ در دشت ابرکوه تعداد ۴۴ چاه پیزومتری موجود بود که تمامی این چاه‌ها در داخل محدوده مطالعاتی قرار داشتند و مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۲).

جدول ۱. تصاویر مورداستفاده

فاصله زمانی (روز)	تاریخ	مد تصویر	تفکیک مکانی (m)	قطبش	گذر تصویربرداری
۲۴۷	۱۳۹۴/۱۰/۲۸	IW	۵*۲۰	VV	پائین گذر
	۱۳۹۵/۱۲/۰۲	IW	۵*۲۰	VV	پائین گذر
۳۷۲	۱۳۹۶/۱۲/۰۸	IW	۵*۲۰	VV	پائین گذر



شکل ۲. نقشه پراکندگی چاه‌های پیزومتری منطقه

1 Sentinel-1 A

بررسی مقدار تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه

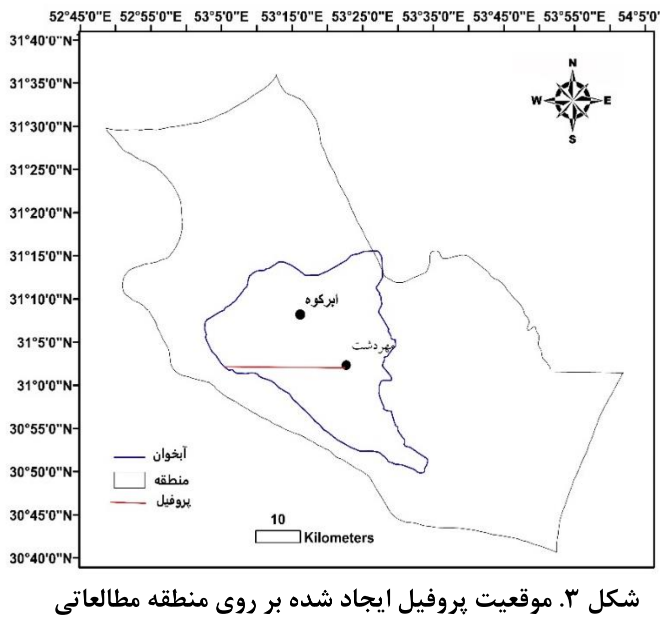
برای بررسی نوسان آب‌های زیرزمینی در طول دوره آماری از اطلاعات ۴۴ چاه پیزومتری استفاده شد. اطلاعات مربوط به افت سطح این پیزومترها وارد نرم افزار ArcGIS10.2 گردید و سپس از طریق روش میان‌یابی IDW [1] نقشه هم افت آب زیرزمینی حاصل گردید.

به‌منظور نمایش بهتر میزان تغییرات جابه‌جایی و مقایسه آن با تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده دشت ابرکوه پروفیلی از ابتدای دشت تا ابتدای کویر ترسیم شد شکل (۳). این پروفیل بر منطقه مهردشت که بیشترین میزان فرونشست را دارا بود منطبق است. سپس در محیط نرم افزار ArcGIS 10.2 اطلاعات مقدار جابه‌جایی سطح زمین و اطلاعات تغییر سطح آب برای این پروفیل استخراج شد.

فنآوری تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR)

مراحل مختلف پردازش اینترفرومتری راداری تفاضلی به منظور آشکارسازی پدیده فرونشست و محاسبه مقدار آن با استفاده از نرم افزار SARScape 4.4 مطابق روند موجود در شکل ۴ انجام شد. برای انجام این بخش، ابتدا تصاویر راداری برای پردازش اینترفرومتری به فرمت SLC[2] تبدیل شدند. سپس به‌منظور ثبت هندسی تصاویر، یکی از آن‌ها به‌عنوان تصویر مرجع و دیگری به‌عنوان تصویر تابع در نظر گرفته شد. با ترکیب دو تصویری که نسبت به هم به‌طور دقیق ثبت هندسی شده‌اند، یک اینترفروگرام تهیه گردید. در اصل، یک اینترفروگرام تهیه شده از حاصل ضرب هر پیکسل تصویر اول در مزدوج مختلط تصویر دوم ساخته شد. سپس اینترفروگرام تفاضلی از طریق حذف فاز رفرنس بر اساس مدل رقومی ارتفاعی منطقه تهیه شد. به منظور بهبود اینترفروگرام تهیه شده، از فیلتر تطبیقی گلدشتاین استفاده شد. نقشه همدوستی نیز که شاخص کیفیت اینترفروگرام است، از خروجی‌های حاصل از این مرحله به‌دست آمد. سپس مرحله اصلاح فاز انجام شد. به‌منظور تبدیل تصحیح فاز اصلاح شده به مقادیر ارتفاعی و محاسبه جابجایی سطح زمین، مرحله پایش یا تصحیح مجدد فاز، اجرا شد.

اجرای این مرحله موجب می‌شود خطاهای احتمالی مداری تصحیح شده و مقدار انحراف فاز محاسبه شود تا از این طریق مقادیر فاز مطلق به‌دست‌آید. همچنین این کار موجب حذف حالت پله‌ای فاز می‌شود و این فرایند از طریق نقاط کنترل زمینی به تعداد ۴۴ مورد و مدل رقومی ارتفاعی انجام شد. آخرین مرحله از فرایند پردازش اینترفرومتری تفاضلی، تبدیل فاز مطلق نقشه جابجایی و ژئوکد کردن آن است که بر اساس سطح بیضوی WGS84 سامانهٔ تصویر متریک انجام شد.



شکل ۳. موقعیت پروفیل ایجاد شده بر روی منطقه مطالعاتی

1 Inverse Distance Weighting

2 Single Look Complex

در نقشه‌های پایانی مربوط به جابجایی حاصل از پردازش اینترفرومتری تفاضل همیشه مقادیر مثبت و منفی به ترتی به‌معنی کاهش فاصله سنجنده تا سطح زمین یا بالا آمدگی سطح زمین و فروافتادگی سطح زمین در جهت دید ماهواره تفسیر می‌شوند. شاخص اصلی تفسیر این قبیل نقشه‌ها تغییرات فاز است که به‌صورت تغییر ناگهانی در تن رنگی مشخص می‌شود. بدین‌صورت که مقدارهای مثبت تغییر فاز سیگنال راداری با تن رنگی قرمز و کاهش ارتفاع با تغییر تدریجی تن رنگی آبی بیان می‌شود.

بررسی ارتباط فرونشست با تغییرات سطح آب

در پژوهش حاضر برای بررسی ارتباط مقدار فرونشست با نوسان چاه های آب منطقه از روش رگرسیون خطی و در محیط نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

اعتبار سنجی

در پایان برای یافتن جواب‌های واقعی و انجام ارزیابی از معادلهٔ خطی درجه اول و رگرسیون خطی استفاده شد. از ضریب همبستگی برای بیان شدت وجود رابطه رابطه مستقیم یا معکوس استفاده شد.

همچنین از ضریب میانگین ریشه خطای (RMSE[1] نیز برای ارزیابی نتایج استفاده‌شد (رابطه ۱).

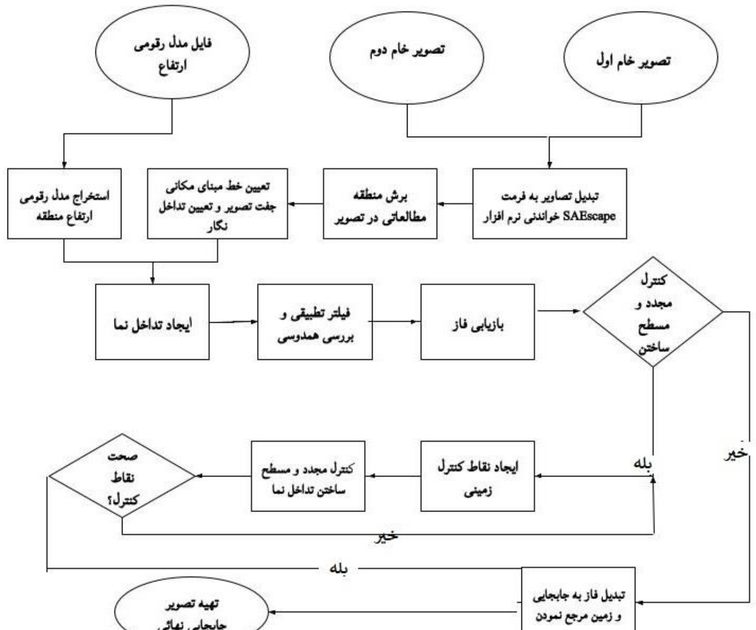
$$RMSE = \sqrt{\frac{i^n = 1^{(oi-pi)^2}}{n}} \qquad (۱)$$

که در آن، n : تعداد داده‌ها، oi :مقادیر مشاهداتی و pi: مقادیر برآوردی است (۲۰).

■ نتایج و بحث

بررسی نوسان سطح آب زیرزمینی منطقه

نقشه تراز آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعاتی مربوط به سال ۱۳۹۶ در شکل ۵ آمده است. شکل مذکور از طریق روش میان‌یابی IDW حاصل شده است. براساس این شکل، بیشترین و کمترین مقدار تراز آبی ثبت شده، به ترتیب در سمت غربی دشت (۱۶۳۰m) و مرکز دشت و قسمت شرقی (۱۴۰۳m) می‌باشد. میانگین سالانهٔ نوسان سطح آب زیرزمینی در دشت ابرکوه در شکل ۶ آمده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت، در بیشتر نقاط دشت، افت سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. در محدوده مهردشت بیشترین افت سطح آب زیرزمینی رخ داده است. به‌طوری که مقدار افت تا ۳/۵ m در سال قسمت‌های جنوبی مهردشت مشاهده می‌شود. در قسمت غربی دشت نیز مقدار افت سطح آب زیرزمینی به ۵/۵ m در سال می‌رسد.



شکل ۴. مراحل تهیه نقشه جابجایی زمین توسط تصاویر راداری

1 Root Mean Square Error

تداخل‌نگار (اینترفروگرام) های استخراجی از D-InSAR

برای ترسیم تداخل‌نگار از تصاویر سنتینل با قطبش VV استفاده شد. زیرا در قطبش‌های همسان مانند VV، به دلیل منطبق بودن تصاویر بر روی هم، بازگشت قوی‌تری ایجاد می‌شود (۱۵). تداخل‌نگار به‌دست آمده مربوط به دو تصویر با پولاریزاسیون VV (شکل ۷) برای ماه‌های دی‌ماه ۱۳۹۴ تا بهمن‌ماه ۱۳۹۵ می‌باشد. یک چرخه کامل رنگ از آبی تا قرمز، یک فرینچ نامیده می‌شود. مشاهدهٔ فرینچ در تصویر تداخل‌نگار به‌معنای فرونشست می‌باشد. استخراج تداخل‌نگار منطقه مطالعاتی برای اولین بازه مطالعاتی نشان داد که ترکیب این رنگ‌ها در کنار هم یا به عبارتی شکل‌گیری فرینچ در اطراف ابرکوه بود که مهمترین آن در جنوب ابرکوه و بر روی مهردشت واقع شد. علاوه بر این در شمال شهر ابرکوه و غرب آن نیز فرینچ های جداگانه‌ای در این بازه زمانی ایجاد شد که بیانگر تغییرات ارتفاعی سطح زمین در این نقاط می‌باشد.

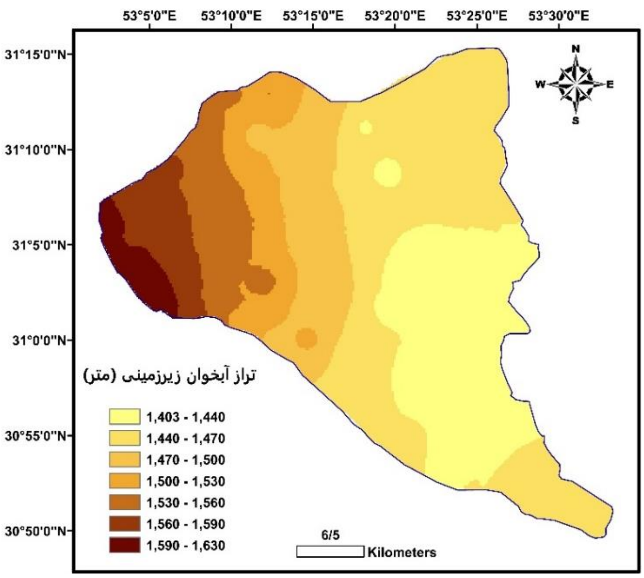
تصویر تداخل‌نگار بازه زمانی دوم یعنی بین دی‌ماه ۱۳۹۵ تا بهمن‌ماه ۱۳۹۶ در شکل ۸ آمده است.

در این دوره زمانی همانند دورهٔ گذشته فرینچ‌هایی در محل‌های قبلی شکل گرفته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها بر روی مهردشت واقع شده است. در دیگر مناطق جابه‌جایی مشخصی صورت نگرفته است.

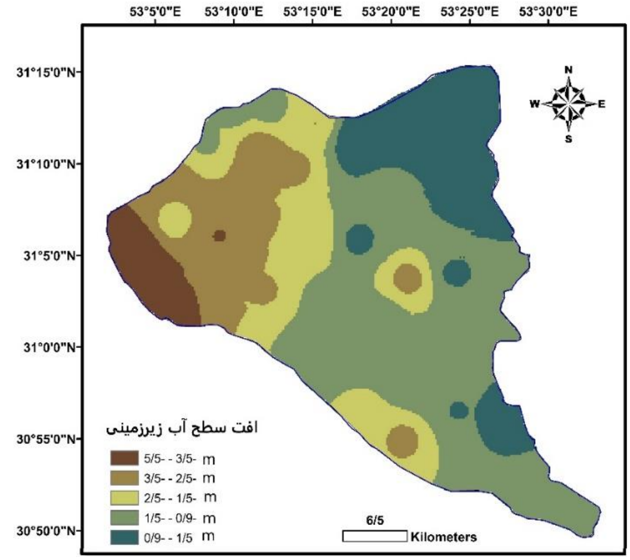
همدوسی استخراجی از تکنیک D-InSAR

یکی از خروجی‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری همدوسی تصاویر استفاده شده در تداخل‌سنجی است. تصویر همدوس تصویری است که از همبستگی توانی دو تصویر هم مختصات شده به‌دست می‌آید. به‌طورکلی اگر مقدار این شاخص برای یک زوج تصویر مورد استفاده در تداخل‌سنجی کم باشد، بدان معنا است که آن زوج برای تداخل‌سنجی چندان مناسب نمی‌باشد. به منظور ایجاد تداخل‌نگار از تصاویر با همدوسی بیشتراز ۰/۵ استفاده می‌شود. همدوسی زوج تصویرهای مورد استفاده در پژوهش حاضر در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است.

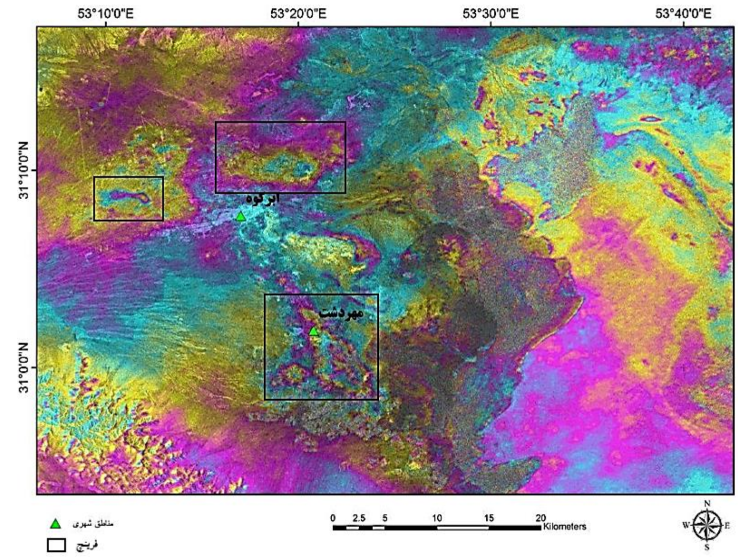
این شکل‌ها، بیانگر شاخص همبستگی مقادیر توان سیگنالی در دو تصویر اخذ شده در دو نمای متفاوت است. مقدار همدوسی از ۰ به‌معنای غیر همدوس تا ۱ برای همدوسی کامل متغیر می‌باشد. مقدار همدوسی دو دوره در شکل‌های ارائه شده، از نزدیک صفر با رنگ قهوه‌ای تا یک با رنگ زرد مشخص شده است. از آنجا که در محدودهٔ مناطق مورد مطالعه، شامل مهردشت و ابرکوه رنگ زرد مشاهده می‌شود، لذا مقدار همدوسی در منطقه مطالعاتی درحد قابل قبولی می‌باشد. با توجه به شکل کمترین مقدار همدوسی به‌عبارتی همان نقاط قهوه‌ای رنگ مربوط به مراکز کشاورزی و حواشی کویر می‌باشد.



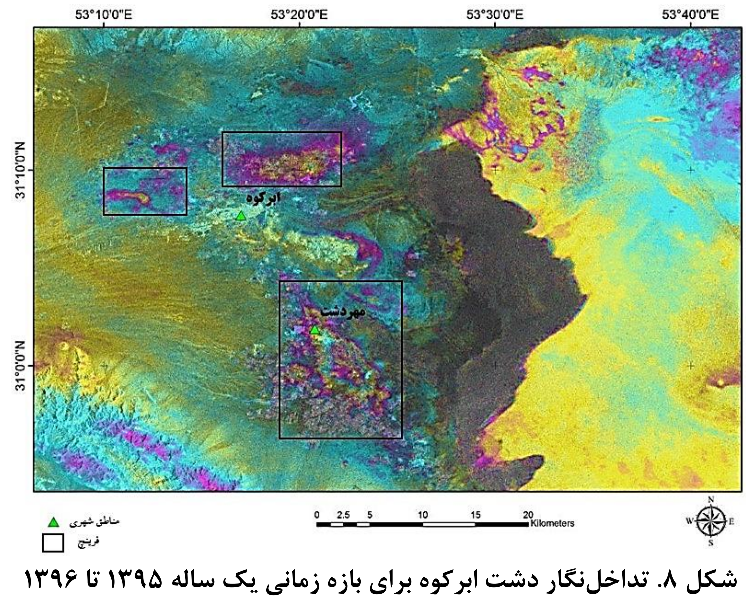
شکل ۵. تراز آب‌های زیرزمینی در دشت ابرکوه



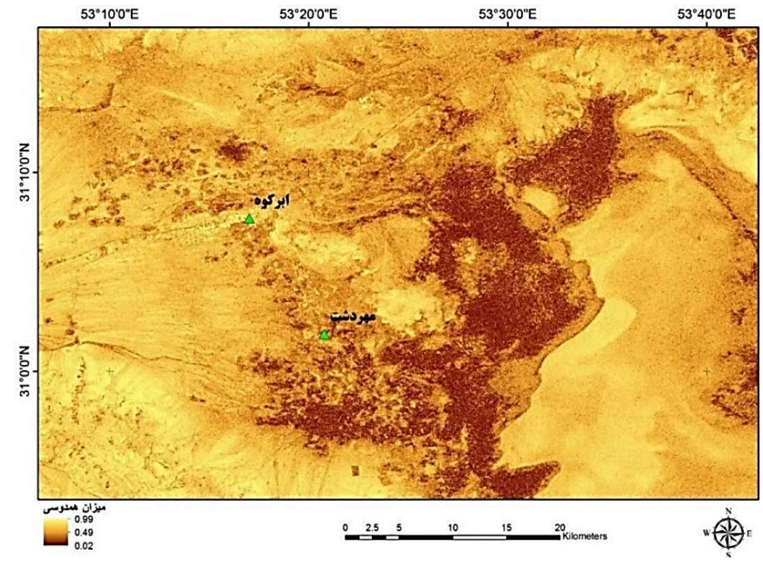
شکل ۶. نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی در دشت ابرکوه



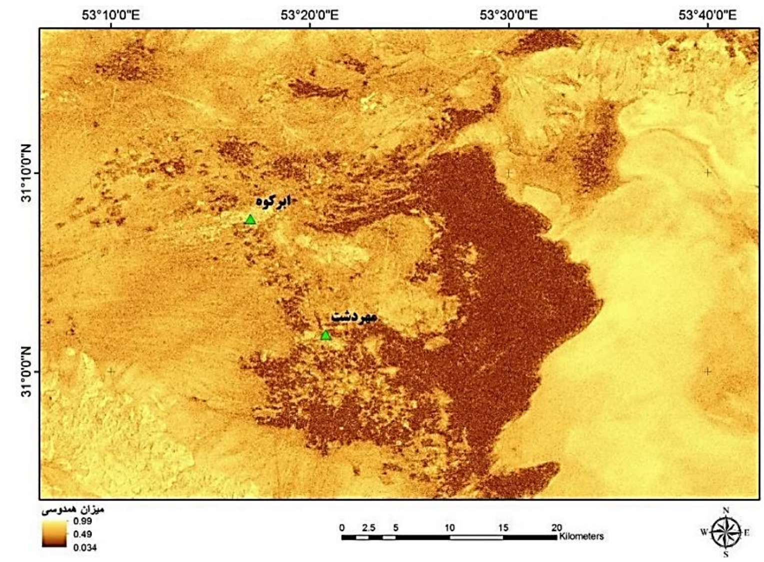
شکل ۷. تداخل‌نگار دشت ابرکوه برای بازه زمانی یک ساله ۱۳۹۴-۱۳۹۵



شکل ۸. تداخل‌نگار دشت ابرکوه برای بازه زمانی یک ساله ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶



شکل ۹. مقدار همدوسی تصاویر سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵



شکل ۱۰. مقدار همدوسی تصاویر سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶

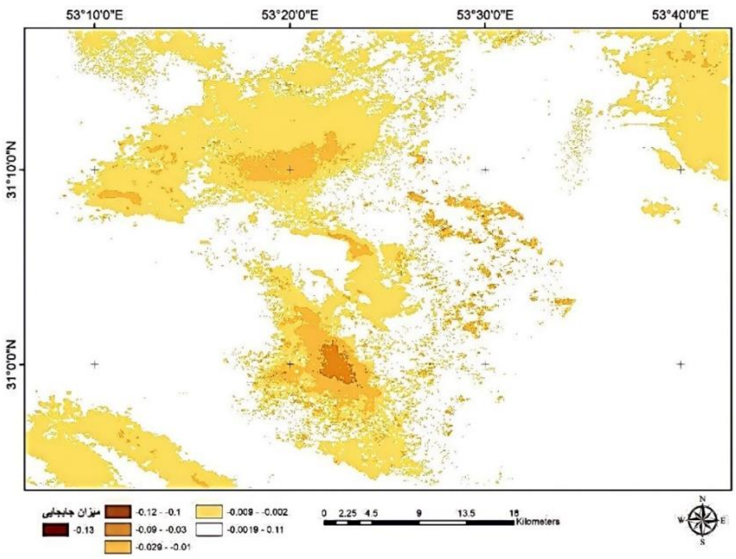
مقادیر جابه‌جایی استخراجی از سنجنده Sentinel 1

پس از انجام روش تداخل‌سنجی بر روی تصاویر Sentinel 1و ایجاد تداخل‌نگار و پردازش نهایی در نرم‌افزار SARScape 4.4 تصاویر تبدیل به مقادیر جابه‌جایی در راستای قائم برحسب میلیمتر شدند. شکل ۱۱ نقشه‌های جابه‌جایی به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنده Sentinel 1 در باند C برای دوره ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد.

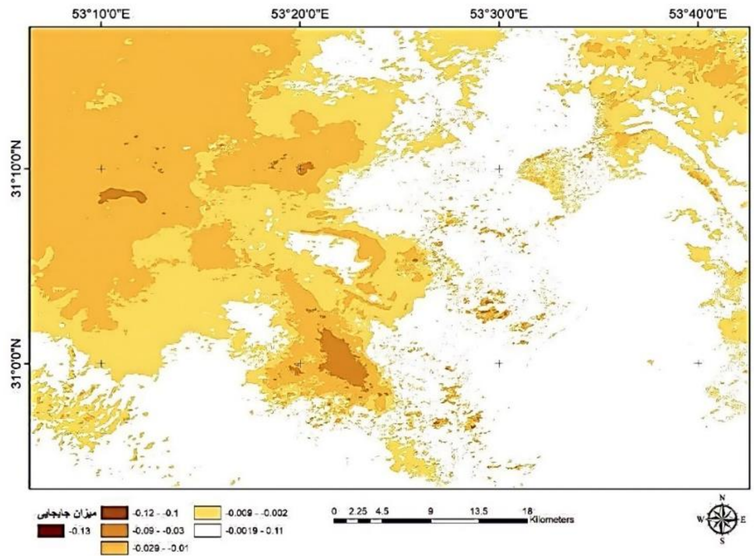
با توجه به شکل (۱۱)، بیشترین مقدار فرونشست با بیش از ۱۰cm در اطراف محدوده مهردشت واقع شده بود. در شمال شهر ابرکوه نیز مقدار فرونشست بین ۳ cm تا ۱۰cm بود که این مقدار در سمت غربی شهر نیز مشاهده شد. نقشهٔ جابه‌جایی دورهٔ ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶ در شکل ۱۲ آمده‌است.

براساس شکل (۱۲)، اطراف مهردشت، شمال و غرب ابرکوه، در این دوره نیز دارای فرونشست ملموسی بودند. در اطراف مهردشت مقدار فرونشست نسبت به دورهٔ قبل افزایش یافت و به بیش از ۱۲ cm رسیده بود.

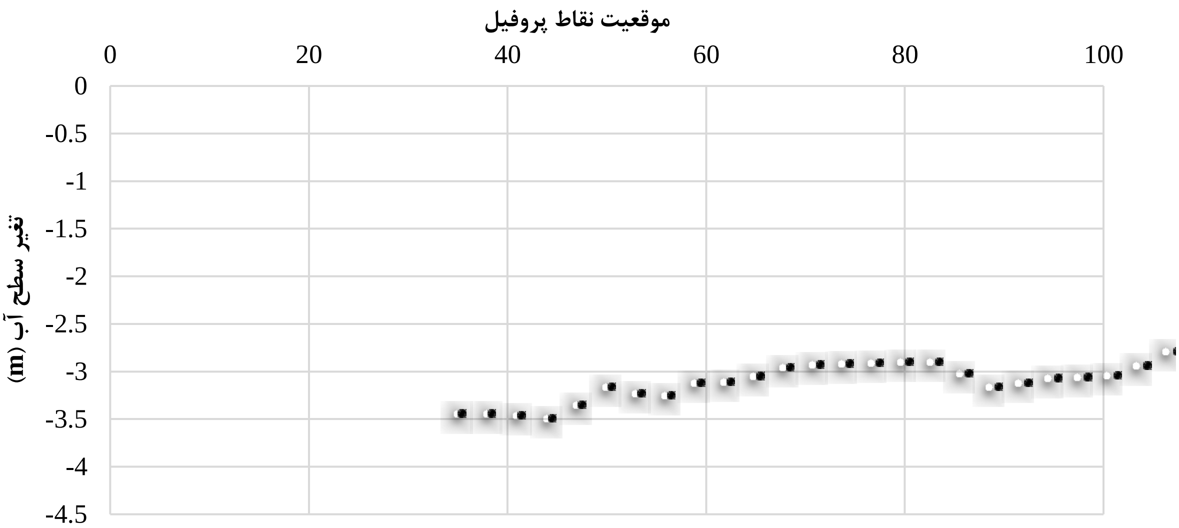
تغییر سطح آب زیرزمینی در طول پروفیل غربی-شرقی مشخص شده در شکل (۳) در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۳)، بیشترین میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی بر روی محدوده مهردشت رخ داده است که این امر منطبق بر بیشترین افت سطح زمین می‌باشد.



شکل ۱۱. میزان جابجایی(m) سطح زمین بین سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵



شکل۱۲. میزان جابجایی(m) سطح زمین بین سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶



شکل ۱۳. تغییر سطح ایستابی آب در طول پروفیل منطقه

مدل‌سازی آماری

ابتدا با استفاده از داده‌های چاه‌های آب، نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش میان‌یابی ترسیم و سپس با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، مدل رگرسیون خطی بین متغیرهای مقدار فرونشست زمین (به‌عنوان متغیر وابسته) و افت سطح آب زیرزمینی (متغیر مستقل) تعریف شد. نتایج همبستگی در جداول (۳و۲) آمده است.

ضریب همبستگی دو متغییر نوسان سطح آب زیرزمینی در منطقه و جابه‌جایی سطح زمین با توجه به جدول (۲) معادل ۷۹/۱٪ به‌دست آمد. ضریب R^2 نیز بیش از ۶۶٪ گزارش شد. همچنین با توجه به ضریب معناداری رابطه خطی از شرایط مطلوبی برخوردار بوده و مطابق اطلاعات مندرج در جدول (۳)، مانند رابطه (۲) تعریف گردید:

$$LS = 0.008 + (-0.0002 \times \Delta D) \qquad (۲)$$

که در آن:

LS: مقدار فرونشست زمین

ΔD: میزان افت سطح آب زیرزمینی

■ نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی نرخ فرونشست و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی در منطقه ابرکوه استان یزد، انجام شد. با توجه به پتانسیل مناسب تصاویر سنجنده Sentinel 1 از این داده‌ها برایبررسی فرونشست استفاده شد. یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش نشان‌داد که تغییر سطح چاه‌های پیزومتری یا درواقع برداشت آب زیرزمینی ارتباط تنگاتنگی با فرونشست زمین دارد. با مقایسهٔ مقدار فرونشست با ارقام تغییر تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیزومتریک مشخص‌شد، در قسمت‌های بحرانی این دشت هر 1m افت تراز آبی قادر است فرونشستی به مقدار 2cm ایجاد کند. براساس معادله رگرسیونی مستخرج از این تحقیق، فرونشست یک رابطه مستقیم و خطی با مقدار برداشت آب زیرزمینی توسط عوامل انسانی مانند عامل کشاورزی و غیره دارد. مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در این منطقه، استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی است. به دلیل قرارگرفتن منطقه در اقلیم خشک، اتکا بر آبخوان‌های زیرزمینی، توسعه بی‌رویه فعالیت‌های کشاورزی، سیستم نامناسب آبیاری غرقابی و تشکیلات رسوبی آبخوان، استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و به‌تبع آن فرونشست زمین رخ داده است. با کاهش سطح ایستابی آب و به‌تبع آن، کاهش مقدار فشار منفذی در اثر نیروی وزن لایه‌های بالایی، کاهش ضخامت در لایه‌های آبدار اتفاق افتاده و خلل و فرج موجود در آن‌ها، آرایش و چیدمان جدیدی یافته و نتیجه آن، فرونشست در منطقه بوده است.

جدول ۲. خلاصه آماری مدل رگرسیونی نوسانات سطح آب زیرزمینی و جابجایی سطح زمین

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل‌شده	خطای برآورد
۱	۰/۷۹۱	۰/۶۲۵	۰/۶۲۱	۰/۰۰۱

جدول ۳. جدول ضرایب مدل رگرسیونی نوسانات سطح آب زیرزمینی و جابجایی سطح زمین

مدل	ضرایب غیراستاندارد		ضرایب استاندارد شده	t	سطح معنی‌داری
	ضریب Beta	خطا	Beta		
۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰		۵۴/۲۲۴	۰/۰۰
	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰	-۰/۷۹۱	-۱۲/۰۳۹	۰/۰۰

براساس نتایج حاصل از این پژوهش و با توجه به توسعه منطقه و افزایش روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، می‌توان پیش‌بینی کرد که نشست زمین نیز متناسب با بهره‌برداری از منابع آبی، به صورت تصاعدی در حال افزایش است که این بزرگترین خطر برای زیر ساخت‌های انسانی و طبیعی منطقه می‌باشد. ارتباط مستقیم بین برداشت منابع آب زیرزمینی و فرونشست زمین در پژوهش‌های انجام شده در برخی دشت‌های ممنوعه کشور نیز گزارش شده است که با نتایج تحقیق حاضر همراستاست (۱، ۳، ۴، ۷، ۱۴، ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۹).

در هر صورت دشت ابرکوه به علت برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی و نیز فرونشست آن نیازمند مدیریت قوی و برنامه‌ریزی جامع منابع آب می‌باشد و این امر به‌خصوص برای ارگان‌ها و سازمان‌هایی که به طور مستقیم در تخصیص منابع آبی تاثیر گذارند، قابل بهره‌برداری است.

برای جلوگیری از توسعه فرونشست موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

- حفاظت از سفره آب زیرزمینی منطقه و کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی به ویژه برای مناطق حساس.
- از آنجایی‌که بیشترین فرونشست مربوط به مناطق کشاورزی متمرکز در مهردشت و ابرکوه می‌باشد و با توجه به کشت محصولات پرآبخواه در منطقه، تهیه الگوی کشت بهینه و مناسب با اقلیم خشک و به کارگیری روش‌های نوین آبیاری توصیه می‌شود.
- آموزش به کشاورزان منطقه و بهبود راندمان آبیاری و اصلاح مسیرهای انتقال آب.
- مدیریت مناسب و کنترل برداشت از آبخوان با نصب کنتورهای هوشمند و تخصیص سهمیه به بهره‌برداران.
- تقویت آبخوان از طریق تغذیه مصنوعی به ویژه در حاشیه کویر.

■ References

1. Akbari, M. (2021). Monitoring land subsidence due to geological and water resources factors using Differential Radar Interferometry method (Case Study: Arak city). *Soil and Water Resources Protection*, *10*(3), 115-131. (in Farsi)

2. Amighpey, M., Arabi, S. & Talebi, A. (2010) Studying Yazd subsidence using InSAR and precise leveling. *Geosciences 20*(77), 157-164. (in Farsi)

3. Angorani, S., Memarian, H., Shariat Panahi, M. & Bolourchi, M.J. (2015). Dynamic modelling of land subsidence in Tehran plain. *Geosciences*, *25*(97), 211-220. (in Farsi)

4. Babaee, S., Mousavi, Z., Mousavi Z., Hojati Malekshah, A., Roostaei, M. & Aflaki, M. (2020) Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *Remote Sensing*, *41*(12), 4780-4798.

5. Chatterjee, R.S., Shailaja Thapa, K.B., Singh, G., Varunakumar, E. & Raju, V.R. (2015). Detecting, mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques. *Earth System Science*, *124*(6), 1359-1376.

6. Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Li, X., Zhou, C., Lei, K., Zhu, L., Duan, L. & Zhao, X. (2020). Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. *Science of the Total Environment*, 139111.

7. Dehghan-Soraki, Y., Saha, S. K. & Kumari, M. (2013). A modified polarimetric decomposition for applicability in complex agricultural environment, I*nternational Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-1/W3*, 133-137.

8. Dong, J., Zhang, L., Liao, M. & Gong, J. (2019). Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring. *Remote Sensing of Environment*, *233*, 111370.

9. El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K. & Kontoes, C. (2021). Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. *Science of the Total Environment*, *776*, 145946.

10. Fatholahi, N., Akhoonzadeh Henzayea, M. & Bahroudi, A. (2017). Investigation of land subsidence due to oil extraction Using radar interferometry method. *Geographical Data (SEPEHR).27*(105), 23-34. (in Farsi)

11. Hajeb, Z., Mousavi, Z., Masoumi, Z. & Rezaei, A. (2020). Investigation of Qom plain ssubsidence using synthetic aperture radar interferometry and aquifer hydrogeological characterization. *Geosciences, 29*(114), 251-258. (in Farsi)

12. Holdahl, S. R., Zilkoski, D. B., & Holzschuh, J. C. (1991). *Subsidence at Houston, Texas*, 1973-1987. In The 4th International Symposium on Land Subsidence, Houston, TX, USA, 05/12-17/91, pp. 3-14.

13. Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. C. & Wang, S. J. (2004). Review on current status and challenging issues of subsidence in China. *Engineering Geology*, *76*(1), 65-77.

14. Janbaz Fotamy, M., Kholgi, M., Abdeh Kolahchi, A.& Roostaei M. (2020). Assessment of land subsidence due to groundwater exploitation by using differential radar interferometry technique, case study: Qazvin province. *Iran-Water Resources Research*, *16*(3), 133-147. (in Farsi)

15. Negahban, S., Ganjaeian, H., Saeedi, Sh. & Ghasemi, A. (2020). Study of vertical displacement caused by 2019 Turkmanchay earthquake based on InSAR method. *Earth and Space Physics*, *46*(3), 445-456. (in Farsi)

16. Papoutsis, I., Kontoes, C., Paradissis, D. (2017). Multi-stack persistent Scatterer interferometry analysis in wider Athens, Greece. *Remote Sensing, 9*(3), 276.

17. Papoutsis, I., Papanikolaou, X., Floyd, M., Ji, K.H., Kontoes, C., Paradissis, D. & Zacharis, V. (2013). Mapping inflation at Santorini volcano, Greece, using GPS and InSAR. *Geophysical Research Letters, 40*(2), 267–272.

18. Pepe, S., De Siena, L., Barone, A., Castaldo, R., D'Auria, L., Manzo, M., Casu, F., Fedi, M., Lanari, R., Bianco, F. & Tizzani, P. (2019). Volcanic structures investigation through SAR and seismic interferometric methods: the 2011–2013 Campi Flegrei unrest episode. *Remote Sensing of the Environ*ment, *234*, 111440.

19. Pourfallah, S., (2017). *An investigation on the best management approaches in order to groundwater balancing in Abarkooh plain using SWOT and MODFLOW models*. M.Sc. Thesis. Yazd University. (in Farsi)

20. Rezai, A. (2005). Concepts of probability and statistics. Mashhad Publishing Co. ISBN: 964-6157-12-2. (in Farsi)

21. Roozaban, A., Smaeeli, A. & Moatagh, M. (2017). *Investigation of ground subsidence using DInSAR radar differential interferometry method with Using SENTINEL images*. The 2nd National Conference on Geospatial Information Technology (NCGIT), Tehran, Iran. (in Farsi)

22. Ruiz-Constán, A., Ruiz-Armenteros, A.M., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Lazecky, M., García, M., Sousa, J.J., de Galdeano, C.S., Delgado-Blasco, J.M., Jiménez-Gavilán, P. & Caro-Cuenca, M. (2018). SAR interferometry monitoring of subsidence in a detritic basin related to water depletion in the underlying confined carbonate aquifer (Torremolinos, southern Spain). *Science of the Total Environment*, *636*, 670–687.

23. Sharifikia, M. (2012). Land subsidence rate and area assessment in Nogh-Bahraman plain based on D-Insar technique. *Spatial Planning (Modares Human Sciences)*, *16*(3), 55-77. (in Farsi)

24. Shemshaki, A., Mohammadi, Y. & Bolorchi M.J. (2008) Identification of confined aquifer zone and its role on land subsidence formation in Hashtgerd plain. *Geoscience, 20*(79), 137-142 (in Fersi).

25. Shirani, K., Pasandi, M. & Ebrahimi, B. (2021). Assessment of land subsidence in the Najafabad plain using the differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) technique. *Water and Soil Science*, *25*(1), 105-127. (in Farsi)

26. Svigkas, N., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Tsangaratos, P., Kiratzi, A. & Kontoes, C. (2016). Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece. *Engineering geology*, *209*, 175–186.

27. Tong, X. & Schmidt, D. (2016). Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing of the Environment*, *186*, 405–415.

28. USGS (United States Geological Survey). (2011). *Research and review information located*, Assess on September: water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165.

29. Zare Mehrjerdi, A.A. (2011). Investigation of ground subsidence reasons and fractures in rostagh area, south of Meybod. *Geography and Environmental Planning*, *22*(3), 155-166. (in Farsi)

30. Zare Shahabadi, A.R., Zare Shahabadi, A., Samimi, S. & Khorasani, M.A. (2010). Strategic planning for the development of the agricultural sector in Abarkooh city. *Applied Researches in Geographical Sciences*, *18*, 29-49. (in Farsi)