

مطالعه فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری با دریچه مصنوعی

متین شرافت؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

عبدالحمید انصاری*؛ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

سید حسین مجتهدزاده؛ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

احمد قربانی؛ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

چکیده

تداخل سنجی راداری ابزاری کارآمد در بررسی تغییرات سطح زمین، به ویژه در محاسبه میزان فرونشست، معرفی شده است. در این روش، با استفاده از اختلاف فاز دو تصویر راداری، سعی در برآورد میزان تغییر شکل و جابه جایی سطح زمین است. فرونشست جابه جایی رو به پایین سطح زمین است. در تحقیق پیش رو به بررسی فرونشست دشت ابرکوه یزد پرداخته شد. بهره برداری بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی یکی از علل ایجاد فرونشست در این منطقه شناخته شده است. مطالعات آب شناسی در این منطقه نشان دهنده افت سطح آب زیرزمینی، به میزان ۰/۶ متر در سال، است. نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر لندست ۷ بیانگر این موضوع است که میزان شوری خاک در حال افزایش است و یکی از مخاطرات ناشی از فرونشست گزارش شده است. با استفاده از ۵۵ تصویر در گذر پایین سنجنده SENTINEL-1A، در سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹، ۵۴ تداخل نگاشت محاسبه و سری زمانی تداخل نگاشت ها با بهره بردن از فن پراکنشگرهای پایا مطالعه و در نهایت نقشه سرعت متوسط فرونشست در دشت ابرکوه بررسی شد. در دو بخش شهر ابرکوه و مهردشت، بیشینه میزان فرونشست به ترتیب ۳ تا ۴ سانتی متر در سال و ۶ تا ۷ سانتی متر در سال اعلام شده است. کلیدواژگان: ابرکوه، تداخل سنجی راداری، فرونشست، مخاطرات زیست محیطی.

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و گسترش شهرها و توسعه صنعت و کشاورزی موجب استفاده بی رویه از منابع، به خصوص منابع تجدیدناپذیر، شده و بشر را به سوی خطر پایان یافتن منابع سوق داده است. در برخی مناطق، علاوه بر مشکلات یادشده، مخاطرات زیست محیطی و زمین شناسی جبران ناپذیری، به دلیل استفاده بیش از حد از منابع، پیش آمده است. ازدیاد برداشت از منابع آب زیرزمینی از مسائلی است که علاوه بر مواجه ساختن بشر با خطر کمبود منابع آبی مخاطراتی نیز در پی دارد. پدیده فروریزش سطح زمین، به دلایل طبیعی و انسانی، فرونشست^۱ نامیده شده است. یکی از دلایل این پدیده فعالیت های انسانی است که از جمله آن ها می توان برداشت از منابع آب زیرزمینی و به تبع آن افت سطح ایستابی را نام برد. فرونشست خود باعث رخدادهای زیان باری شده است؛ همانند ایجاد شکاف های عمیق در سطح زمین، کج شدن لوله های چاه، خرابی ساختمان ها، و لوله زایی چاه ها. یکی از خسارات فرونشست، که بسیاری از دشت های ایران را شامل شده است، ایجاد فروچاله^۲ است. گودال های عمیقی که عمدتاً در ارتباط با فرایند کارستی شدن هستند خطرات بسیاری را متوجه

قسمت‌های شهری و محیط زیست کرده‌اند. با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری با درجهٔ مصنوعی^۱ به شناسایی مناطق تحت تأثیر پدیدهٔ فرونشست پرداخته شده است. تداخل‌سنجی فن استفاده از تداخل امواج الکترومغناطیس به منظور استخراج اطلاعات است. تداخل‌سنجی راداری با استفاده از اختلاف فاز زوج تصویر راداری با حد تفکیک مکانی بالا به دنبال تولید مدل رقومی ارتفاعی^۲ منطقه و برآورد میزان تغییر شکل^۳ و جابه‌جایی پوستهٔ زمین است. در فن تداخل‌سنجی راداری تصاویر مختلط راداری، که حاوی مقادیر فاز و دامنهٔ موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند، با یک‌دیگر تلفیق می‌شوند و تصویری با نام «تداخل‌نما»^۴ تولید می‌کنند. تداخل‌نما تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر اخذشده در دو زمان مختلف، که از نظر هندسی به‌طور دقیق روی هم منطبق^۵ شده‌اند، حاصل شده است. در یک تداخل‌نگاشت اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر، که مبین اختلاف فاصلهٔ عارضه تا سنجنده در دو زمان اخذ تصویر است، وجود دارد. به کمک مقدار اختلاف فاز، پارامترهای مختلف، از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین، استخراج شده است.

ایجاد و گسترش مناطق تحت فرونشست و فروچاله در شهرستان ابرکوه به دلیل استخراج بیش از اندازه از منابع آبی صورت گرفته است. از آنجا که فن تداخل‌سنجی راداری در سال‌های اخیر در بررسی پدیدهٔ فرونشست استفاده شده است، در این تحقیق نیز محققان به کمک این روش به پایش فرونشست پرداختند. استفاده از تصاویر راداری به دلیل رایگان بودن، وسعت بالای منطقهٔ مورد مطالعه، و عدم نیاز به فعالیت‌های میدانی نسبت به سایر روش‌های بررسی فرونشست‌ها ارجحیت دارد. انگیزهٔ اولیهٔ این پژوهش پایش فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری تصاویر ماهوارهٔ SENTINEL-1A در بازهٔ زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ مبنی بر پراکنشگرهای پایا بود. به منظور ارزیابی یافته‌ها از اطلاعات ترازبایی دقیق موجود در منطقه استفاده شد. بررسی‌های زمین‌شناسی مبین تسریع رخداد پدیدهٔ فروچاله در این منطقه به دلیل واگرایی بالای رس‌ها در منطقه است. از این جهت شناسایی مناطق فرونشست و اتخاذ تصمیمات مناسب به کنترل گسترش فروچاله‌ها می‌انجامد. شکاف‌های طولی ایجادشده در اثر رخداد پدیدهٔ فرونشست در منطقهٔ مورد مطالعه از عوامل تهدیدکنندهٔ سازه‌های شهری و ابنیه و همچنین خطوط انتقال انرژی و جاده‌هاست. همچنین بررسی عوامل مخرب ایجادشده در اثر فرونشست، همانند شوری خاک، که در نهایت به بیابان‌زایی و تسریع این رخداد منجر می‌شود، نیز از اهداف این پژوهش بود.

مطالعه و شناسایی پدیدهٔ فرونشست زمین، با توجه به خطرات و آسیب‌هایی که ایجاد می‌کند، ضروری است. به همین دلیل این پدیده همواره مورد توجه محققان بوده است تا بتوانند میزان نشست زمین، علت نشست، محدوده نشست، و ... را شناسایی کنند و روش‌هایی را جهت جلوگیری از وقوع این پدیده ارائه دهند. روش‌های مختلفی برای شناسایی این پدیده تاکنون ارائه شده و به کار رفته است. از این روش‌ها می‌توان به روش ترازبایی دقیق زمینی، روش سامانهٔ موقعیت‌یاب جهانی، و روش تداخل‌سنجی راداری اشاره کرد (شیخ‌احمدی ۱۳۹۶: ۱۸).

1. synthetic aperture radar interferometry (InSAR)
2. digital elevation model
3. deformation
4. interferogram
5. aligned or co-registered

دانگ^۱ و همکارانش (۲۰۱۴) فرونشست زمین را در شهر شانگهای، واقع در شرق دلتای یانگ‌تسه در چین، بررسی کردند. استخراج بیش از اندازهٔ آب از منابع زیرزمینی دلیل اصلی نشست در این منطقه است؛ هرچند توسعهٔ شهری و جمعیت هم بی‌تأثیر نیست. این محققان در مطالعهٔ خود، با آنالیز مکانی و زمانی فرونشست به کمک روش تداخل‌سنجی راداری، به شناسایی این پدیده پرداختند و در این زمینه از بیست تصویر راداری در باند L سنجندهٔ ALOS در بازهٔ زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ جهت تهیهٔ نقشهٔ دگرشکلی منطقه استفاده کردند. نتایج حاصل از پردازش نشست زمین در منطقهٔ مورد مطالعه را به‌وضوح نشان داد.

بابایی و همکارانش (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی میزان فرونشست ناشی از تخلیهٔ آب‌های زیرزمینی در دشت قزوین پرداختند. آن‌ها از روش تداخل‌سنجی راداری برای مدل کردن الگوی نشست در بازهٔ سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استفاده کردند و به منظور آنالیز سری زمانی فرونشست در این دشت از آنالیز سری زمانی خط مبنای کوتاه^۲ و پراکنش‌گر پایا^۳ استفاده کردند. نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی فرونشست فراوانی را در این منطقه نشان داد. هر دو روش سری زمانی تداخل‌سنجی بیشینهٔ دامنهٔ فرونشست را حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال مشخص کرد.

احمدی و همکارانش (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی رخداد پدیدهٔ فرونشست در دشت خرم‌دره با استفاده از فن تداخل‌سنجی راداری پرداختند. با استفاده از داده‌های راداری ماهوارهٔ ENVISAT در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و با بهره‌گیری از آنالیز سری زمانی مبنی بر پراکنشگرهای پایا، میزان فرونشست برابر با ۳۵ میلی‌متر در سال در جهت دید سنجنده برآورد شد. همچنین به منظور بررسی پدیدهٔ فرونشست در منطقه در سال‌های اخیر، با استفاده از آنالیز سری زمانی مبنی بر فن خط مبنای کوتاه، تصاویر سنجندهٔ SENTINEL-1 در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ بررسی شد. نتایج مبین بیشینهٔ میزان سرعت ۴۹ میلی‌متر در سال در جهت خط دید سنجنده بود. نتایج حاصل از داده‌های ژئودتیک بیانگر افزایش میزان فرونشست در آن دشت است. همچنین، تأثیرپذیری خطوط راه‌آهن، جاده‌ها، بناهای شهری و تاریخی از فرونشست در این منطقه از مخاطرات این پدیده یاد شده است.

راسیتو^۴ و همکارانش (۲۰۱۹) در منطقهٔ سمرقند به بررسی پدیدهٔ فرونشست پرداختند. آن‌ها از تصاویر ماهوارهٔ SENTINEL-1A در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ استفاده کردند. با استفاده از آنالیز سری زمانی مبنی بر پراکنشگرهای پایا، هفت تداخل‌نما مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بیانگر بیشینهٔ سرعت فرونشست در مناطق اوتارا و بارات به میزان ۴/۴ سانتی‌متر در سال بود. به منظور ارزیابی نتایج نیز از داده‌های ایستگاه دائم موقعیت‌یاب جهانی استفاده شد.

شفیعی و همکارانش (۱۳۹۹) در مطالعاتی به بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SENTINEL-1A در بازهٔ زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ بیشینهٔ میزان فرونشست در منطقه ۴ سانتی‌متر در سال گزارش شد. با استفاده از محاسبهٔ همبستگی بین افت آب زیرزمینی و لایهٔ فرونشست در منطقه، نتایج مبین ارتباط مستقیم این دو مؤلفه بود.

1. Dong
2. small baseline subsets (SBAS)
3. persistent scatterer interferometry (PSI)
4. Prasetyo

چن^۱ و همکارانش (۲۰۲۰) در پژوهشی به بررسی رخداد پدیده فرونشست ایجادشده در اثر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه بچینگ، واقع در کشور چین، پرداختند. در این پژوهش با استفاده از فن تداخل‌سنجی راداری نقشه متوسط سرعت فرونشست برآورد شد. منطقه مورد مطالعه، به دلیل ازدیاد برداشت از منابع آب زیرزمینی، از سال ۱۹۳۵ با پدیده فرونشست مواجه شده است. با استفاده از تصاویر ماهواره ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و همچنین تصاویر ماهواره TerraSAR-X در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱، بیشینه میزان سرعت فرونشست در منطقه مورد مطالعه بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در سال گزارش شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

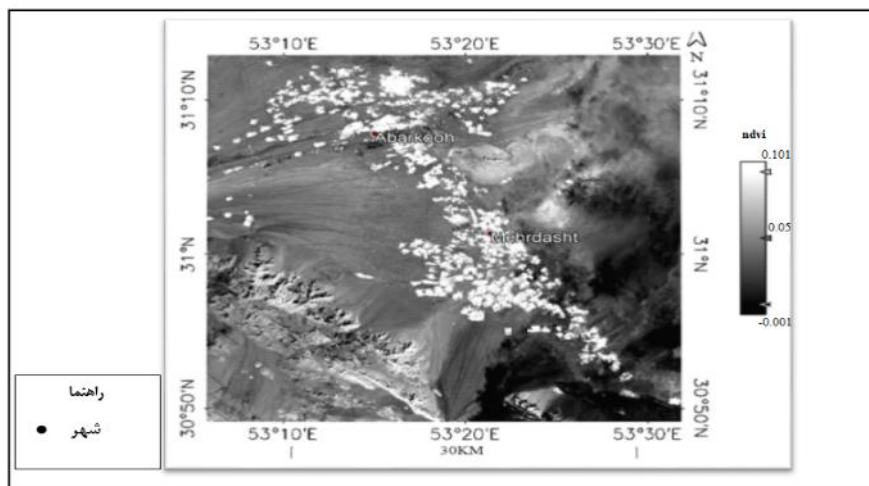
ابركوه در جنوب غربی شهرستان تفت و استان یزد واقع شده است. این شهرستان از شمال به شهرستان صدوق استان یزد و شهرستان شهرضا استان اصفهان، از شرق به شهرستان خاتم یزد، و از غرب و جنوب به شهرستان آباد استان فارس محدود است (شرافت و همکاران ۱۳۹۸: ۱۲۴). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

شهرستان ابرکوه دارای دو نقطه شهری ابرکوه و مهردشت است. وسعت ابرکوه ۵۶۴۱ کیلومتر مربع است و در مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و ۳۱ درجه و ۰۷ دقیقه شمالی با ۱۵۵۰ متر ارتفاع از سطح دریای آزاد واقع شده است (اخوان قالیباف و همکاران ۱۳۹۴: ۲۱۴). ابرکوه دارای اقلیم گرم و خشک بیابانی است. آب‌وهوای شهر در مقیاس عمومی ویژگی‌های اقلیمی مناطق کویری درون‌فلاتی ایران را داراست و از مشخصات آن کمی بارندگی، دامنه نوسان حرارتی کم‌وبیش زیاد، و خشکی است (شمس اسفندآبادی ۱۳۸۰: ۲۰).



شکل ۱. نقشه موقعیت شهرستان ابرکوه (شرافت و همکاران ۱۳۹۸: ۱۲۴)

مطابق با آمار آب منطقه‌ای یزد، از ویژگی‌های اقلیمی این ناحیه ناچیز بودن میزان بارش با میانگین سالیانه در حدود ۷۵ میلی‌متر و تبخیر و تعرق با میانگین سالیانه در حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر است. دامنهٔ تغییرات درجهٔ حرارت میانگین مطلق سالیانه در این ناحیه بین حداقل زیر ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد تا حداکثر بالای ۴۳ درجهٔ سانتی‌گراد است. از آنجا که نزولات جوئی این ناحیه ناچیز است و رودخانهٔ دائمی نیز ندارد، آب مورد نیاز، به‌ویژه در زمینهٔ کشاورزی، در گذشته از قنات و امروزه عمدتاً از چاه‌های نیمه‌عمیق و عمیق تأمین می‌شود. از آنجا که بهره‌برداری از آب چاه را برخلاف آب قنات به‌سختی می‌توان با شرایط اقلیمی موجود تطبیق داد، به‌خصوص در مناطقی که به صورت باغ (مانند باغ پسته و زردآلو) توسعه یافته‌اند، در سال‌های خشک نیز همانند ایام ترسالی از آب چاه‌ها، حتی با میزان بیشتر، بهره‌برداری می‌شود. این وضعیت باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در این دشت شده است (اخوان قالیباف و همکاران ۱۳۹۴: ۲۱۴). در شکل ۲ با استفاده از تصویر Landsat-8 نقشهٔ شاخص پوشش گیاهی^۱ برآورد شده است. مقادیر سفیدرنگ مبین پوشش گیاهی است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، بخش کشاورزی و نیاز به آب در این منطقه گسترش یافته است و همین دلیل باعث افت سطح ایستابی در منطقه شده است. در نتیجه، فضاهای خالی که قبلاً از آب پر بودند با تراکم لایه‌های بالایی به تدریج یا ناگهانی فروریخته‌اند که باعث رخداد پدیده‌های فرونشست و فروچاله شده است. با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته، نوسانات سطح آب زیرزمینی عامل مهمی در تورم و انقباض‌های پیاپی رس‌خاک اعلام شده است که از دلایل تشدید پدیدهٔ فرونشست و تشکیل فروچاله‌هاست (بیدکی ۱۳۹۴: ۱۲).



شکل ۲. نقشهٔ شاخص پوشش گیاهی. مناطق سفیدرنگ مبین پوشش گیاهی در منطقه است.

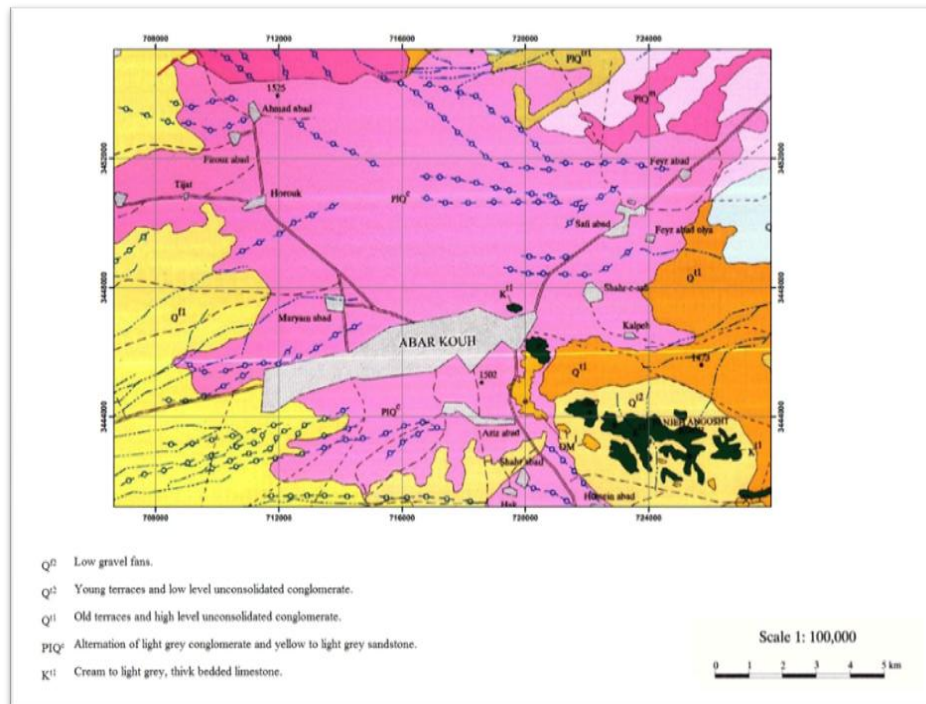
نقشهٔ زمین‌شناسی منطقهٔ ابرکوه در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۳، شهرستان ابرکوه از نظر مطالعات زمین‌شناسی جزء مجموعهٔ ایران مرکزی بررسی می‌شود. در حاشیهٔ جنوبی دشت ابرکوه یک سلسله ارتفاعات با امتداد شمالی غربی- جنوب شرقی گسترش یافته که دارای رسوبات پرمین و تریاس است. در ارتفاعات کولی‌کش و جنوب هنشک، رخنه‌ی

1. normalized difference vegetation index (NDVI)

از تشکیلات متامریک دیده می‌شود که سن آن نامشخص و احتمالاً پی‌سنگ قدیمی پرکامبرین است. این سری دگرگونی‌ها شامل شیست، فلدسپات لایه‌های نازک دولومیتی، و آهک‌های مرمریزه است. در اطراف هنشک آهک‌های تریاس بالایی تحت تأثیر این دگرگونی به شدت مرمریزه شده و دارای کنتاکت تکتونیکی با سری فوق است. این سنگ‌های دگرگون در اینفرا کامبرین بالا آمده و تا اواخر تریاس خارج از آب بوده است و همین دلیل رسوب‌گذاری دوران اول و تریاس روی آن‌هاست. اما در ژوراسیک به زیر آب رفته و ماسه‌سنگ و شیل در قسمت‌های زیرین، سپس آهک و ماسه و سنگ‌های آهکی، و بالاخره مارن در قسمت‌های فوقانی روی آن‌ها نهشته شده است. سنگ‌های آتشفشانی، شامل آندزیت و ریولیت و توف، درون تشکیلات تریاس بالایی جای گرفته است. از سنگ‌های آذرین درونی تعدادی رگه‌های دیاباز به صورت دایک و شیل در امتداد گسل‌های عمیق ایجاد شده است. از مواد معدنی مقدار کمی باریت از معدن کوچکی در نزدیکی خانه‌خوره استخراج می‌شود و نیز سنگ مرمریت جهت مصارف ساختمانی در حوالی کوه اعلا قابل استخراج است. قدیمی‌ترین سنگ‌های رسوبی منطقه آهک‌های پرمین و فسیل نوزولینا است که در سطح تجزیه‌شده با چرت‌های سیاه‌رنگ همراه است. روی این فسیل‌های آهکی سری‌های آهک و مارن و شیل، که تشکیلات آباده نام‌گذاری شده، قرار دارد. از دوره تریاس سنگ‌های آهک و مارن و دولومیت و ماسه‌سنگ را باید نام برد. قسمت اعظم رسوبات تریاس را لایه‌های آهکی تشکیل می‌دهد که در قسمت فوقانی ماسیو و در بخش‌های تحتانی لایه است. سنگ‌های کرتاسه زیرین با فسیل آهکی در جنوب شرقی دشت و در مجاورت شهر ابرکوه بیرون‌زدگی دارد. آهک‌های الیگوسن نیز در مجاورت شهر به چشم می‌خورد. این سری رسوبی در شمال غربی دشت با فسیل آهک و مارن‌های کمی دگرگون‌شده مشخص است. آخرین پدیده رسوب‌گذاری دریایی، تحت عنوان کنگلومرای بختیاری، اطراف شهر ابرکوه به صورت لایه‌های تقریباً افقی تظاهر می‌کند. اولین حرکات کوه‌زایی منطقه مربوط به اواخر تریاس است که احتمالاً از مراحل اولیه کوه‌زایی است. اما، فرم تکتونیکی موجود منطقه را حرکات بعد از پلیوسن ایجاد کرده است. کویر نمک، که حوضه تبخیری را ایجاد کرده، به صورت یک پایین‌افتادگی گرابن در امتداد کویر هرات و مروست از یک سمت و کفه طاقستان اسفنداران و باتلاق گاوخونی از سمت دیگر امتداد یافته است (شمس اسفندآبادی ۱۳۸۰: ۲۶).

واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه عبارت است از:

۱. محدوده دهستان فراغه و گاشار- ده عرب (Q^1): مخروط‌افکنه‌های کهن و جوان که شامل رسوبات سیلتی و ماسه‌ای و قلوله‌سنگی است.
۲. محدوده جنوب و جنوب شرقی ده عرب و شرق- شمال شرقی روستای فراغه (TR_{sh}^d): سنگ‌های دولومیتی خاکستری با رگچه‌های کلسیتی فراوان است.
۳. مرکز دشت ابرکوه و شمال شرقی دشت (PIQ^c): تناوبی از لایه‌های نیمه‌سخت کنگلومرای و ماسه‌های خاکستری روشن است.
۴. جنوب شهر ابرکوه و بخش مرکزی آبخوان دشت در محدوده دهستان مهرآباد و شهر مهردشت (Q^{12}): انباشت‌هایی از کنگلومرای سخت‌نشده به شکل مخروط‌افکنه و دشت‌های آبرفتی کم‌ارتفاع است.
۵. جنوب و جنوب شرقی آبخوان آبرفتی دشت، حد فاصل مهردشت و اسفندآباد (Q^{12}, Q^M): این بخش، که به کفه ابرکوه نیز معروف است، دارای دو واحد به ترتیب کفه گلی با نهشته‌های ریزدانه و کفه نمکی است (مرآت و همکاران ۱۳۹۵: ۲).



شکل ۳. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (شرافت و همکاران ۱۳۹۸: ۱۲۶)

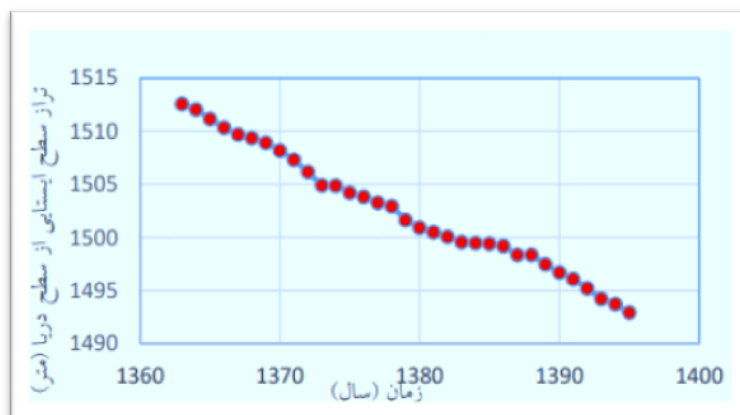
طبق مطالعات انجام گرفته دلایل زمین شناختی رخداد پدیده فرورانشست در این منطقه هنوز مشخص نشده است. اما وجود کارست و همچنین وجود رس با میان لایه کانی های ایلات و اسمکتایت از دلایل تشدید فرورانشست و فروچاله ها معرفی شده است (بیدکی ۱۳۹۴: ۴). بر اساس گفته افراد محلی در دو روستای شهرستان ابرکوه (فیض آباد و هروک)، فروچاله ها قبل از حفر چاه های کشاورزی نیز در منطقه وجود داشته اند و با حفر آن ها گسترش یافته اند. در این دو منطقه تعداد ۳۱ فروچاله پوششی و فرورانشستی به وقوع پیوسته است. با توجه به برداشت و بازدیدهای صحرائی صورت گرفته، همه فروچاله های ابرکوه در پوشش آبرفتی رخ داده اند و از نوع فروچاله های کارستی فرورانشستی و ریزشی پوششی هستند. وجود خاک های چسبنده و مجاری در اعماق باعث افزایش سرعت حرکت آب در جهت افقی و عمودی می شود و در نتیجه رسوبات انتقال می یابد و حفره هایی در مرز بین سنگ کف و پوشش رویین به وجود می آید. با بزرگ تر شدن حفره ها، مقاومت سقف حفره کاهش می یابد و به طور ناگهانی ریزش می کند. پایین افتادن سطح آب زیرزمینی با متمرکز کردن رواناب می تواند باعث افزایش سرعت تشکیل فروچاله ها شود (بیدکی ۱۳۹۴: ۴). در شکل ۴ نمایی از فروچاله ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه دیده می شود.

آبخوان ابرکوه در بخشی از گستره دشت واقع شده و از نوع آبخوان آزاد است. در مطالعات ژئوالکتریک، نقشه عمق و جنس سنگ کف ارائه نشده است. اما در بخش شمالی دشت (هروک تا شرق فیض آباد) سازندهای الیگومیوسن و سنگ آهک مرجانی و در جنوب شرق ابرکوه سنگ آهک کرتاسه گزارش شده است (بیدکی ۱۳۹۴: ۱۲). منابع آب زیرزمینی موجود در محدوده مطالعاتی ابرکوه شامل ۷۳۱ حلقه چاه، ۵۱ رشته قنات، و ۲۰ دهنه چشمه و همچنین در محدوده آبخوان آبرفتی ۷۰۸

حلقه چاه است (مرتضوی زاده و همکاران ۱۳۹۲: ۶). آب نمود آبخوان آبرفتی دشت ابرکوه به شرح شکل ۵ است که با توجه به گزارش‌ها سطح آب زیرزمینی در این دشت سالیانه ۰/۶ متر افت می‌کند. بر اساس آنچه آمد، نقش نوسانات سطح آب زیرزمینی در تشدید و تشکیل پدیده‌های فرونشست و فروچاله نسبت به نقش افت سطح آب زیرزمینی اهمیت بسزایی دارد.



شکل ۴. نمایی از فروچاله و ترک ایجادشده در منطقه ابرکوه



شکل ۵. آب نمود واحد دشت ابرکوه (پورفلاح ۱۳۹۷: ۹۹)

داده‌های مورد استفاده

ویژگی تصاویر مورد استفاده در این پژوهش به شرح جدول ۱ است که از ماهواره SENTINEL-1A مد تصویری IW سطح ۱ با دوره ۱۲ روزه استفاده شد. ماهواره SENTINEL-1A در سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شده است و به صورت راداری تصویربرداری از عوارض را در شب و روز و بدون در نظر داشتن شرایط آب‌وهوایی جمع‌آوری می‌کند. این ماهواره در محدوده طول موج ماکروویو و باند C راداری به تصویربرداری از زمین می‌پردازد.

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده در پژوهش

شماره تصویر	گذر	فریم	ترک	تاریخ تصاویر	بیس لاین زمانی (روز)	بیس لاین مکانی (متر)	شماره تصویر	گذر	فریم	ترک	تاریخ تصاویر	بیس لاین زمانی (روز)	بیس لاین مکانی (متر)
۱	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۲۰۸	-۱۲	-۲	۲۹	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۲۰۸	-۱۲	-۲
۲	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۲۲۰	۰	۰	۳۰	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۲۲۰	۰	۰
۳	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۳۰۴	۱۲	۱۹	۳۱	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۳۰۴	۱۲	۱۹
۴	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۳۲۸	۳۶	-۳۲	۳۲	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۳۲۸	۳۶	-۳۲
۵	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۴۰۹	۴۸	-۷۳	۳۳	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۴۰۹	۴۸	-۷۳
۶	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۴۲۱	۶۰	-۱۱۳	۳۴	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۴۲۱	۶۰	-۱۱۳
۷	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۵۰۳	۷۲	-۳۴	۳۵	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۵۰۳	۷۲	-۳۴
۸	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۵۱۵	۸۴	۶۱	۳۶	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۵۱۵	۸۴	۶۱
۹	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۵۲۷	۹۶	۶	۳۷	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۵۲۷	۹۶	۶
۱۰	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۶۰۸	۱۰۸	-۶۴	۳۸	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۶۰۸	۱۰۸	-۶۴
۱۱	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۶۲۰	۱۲۰	-۸۸	۳۹	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۶۲۰	۱۲۰	-۸۸
۱۲	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۷۰۲	۱۳۲	-۵۷	۴۰	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۷۰۲	۱۳۲	-۵۷
۱۳	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۷۱۴	۱۴۴	۱	۴۱	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۷۱۴	۱۴۴	۱
۱۴	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۷۲۶	۱۵۶	-۲۵	۴۲	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۷۲۶	۱۵۶	-۲۵
۱۵	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۸۰۷	۱۶۸	-۳۳	۴۳	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۸۰۷	۱۶۸	-۳۳
۱۶	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۸۱۹	۱۸۰	-۵۷	۴۴	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۸۱۹	۱۸۰	-۵۷
۱۷	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۸۳۱	۱۹۲	۱۹	۴۵	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۸۳۱	۱۹۲	۱۹
۱۸	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۹۱۲	۲۰۴	-۳۶	۴۶	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۹۱۲	۲۰۴	-۳۶
۱۹	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۹۲۴	۲۱۶	۲	۴۷	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۹۲۴	۲۱۶	۲
۲۰	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۰۱۸	۲۴۰	۱۷	۴۸	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۰۱۸	۲۴۰	۱۷
۲۱	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۰۳۰	۲۵۲	۳۶	۴۹	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۰۳۰	۲۵۲	۳۶
۲۲	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۱۱۱	۲۶۴	۶۲	۵۰	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۱۱۱	۲۶۴	۶۲
۲۳	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۱۲۳	۲۷۶	۳۶	۵۱	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۱۲۳	۲۷۶	۳۶
۲۴	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۲۰۵	۲۸۸	۸۰	۵۲	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۲۰۵	۲۸۸	۸۰
۲۵	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۲۱۷	۳۰۰	-۷۴	۵۳	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۲۱۷	۳۰۰	-۷۴
۲۶	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۲۲۹	۳۱۲	۱۶	۵۴	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۱۲۲۹	۳۱۲	۱۶
۲۷	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۹۰۱۱۰	۳۳۴	۴	۵۵	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۹۰۱۱۰	۳۳۴	۴
۲۸	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۱۲۷	-۲۴	-۴۰	۵۶	یابین گذر	۴۸۹	۱۳۷	۲۰۱۸۰۱۲۷	-۲۴	-۴۰

تداخل سنجی راداری

تداخل نما از حاصل ضرب سیگنال یک تصویر راداری در مختلط مزدوج سیگنال تصویر دوم به دست می‌آید. بنابراین فاز تداخل نما، اختلاف فاز زوج تصویر، و دامنه آن حاصل ضرب دامنه‌های زوج تصویر است (مقصودی و مهدوی ۱۳۹۴: ۱۸۱).

رابطه ۱

$$s_1 = A_1 e^{i\phi_1} \quad s_2 = A_2 e^{i\phi_2}$$

$$s_1 \cdot s_2^* = A_1 A_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} = e^{\phi}$$

در رابطه ۱ s_1 و s_2 سیگنال‌های ثبت شده در A تصاویر اول و دوم برای یک پیکسل متناظر، A_1 و A_2 دامنه سیگنال‌های ثبت شده، ϕ_1 و ϕ_2 فاز آن‌ها، A حاصل ضرب دامنه سیگنال‌های یادشده، و بالاخره ϕ فاز تداخل نما است. تداخل نما شامل سیکل‌های^۱ رنگی مجزایی است که هر یک معرف تغییرات فاز از ۰ تا π هستند. اختلاف فاز زوج

1. fringe

تصویر متأثر از عوامل مختلفی است. بنابراین برای استفاده از آن لازم است اثر عوامل مزاحم حذف شود. رابطه ۲ عوامل مؤثر در فاز تداخل نما را نشان می دهد (پرنگ ۱۳۹۶: ۵۰).

$$\Phi_{\text{interferogram}} = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{defo}} + \Phi_{\text{flat}} + \Phi_{\text{noise}} + \Phi_{\text{atmo}} + \Phi_{\text{orb}} + \Phi_{\text{scatt}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن $\Phi_{\text{interferogram}}$ فاز تداخل نما، $\Phi_{\text{topography}}$ فاز توپوگرافی، $\Phi_{\text{deformation}}$ فاز ناشی از تغییرات ارتفاع، $\Phi_{\text{flat earth}}$ فاز ناشی از تغییر زاویه دید سنجنده در امتداد آزمون یا زمین مسطح، Φ_{noise} فاز ایجاد شده در اثر نویز، $\Phi_{\text{atmosphere}}$ فاز مربوط به سهم اتمسفر، Φ_{orbital} فاز به وجود آمده در اثر خطای مداری سنجنده، و Φ_{scatter} فاز پراکنشی است. فازهای توپوگرافی، تغییرات ارتفاعی، و زمین مسطح را فاز وابسته به فاصله می گویند. در بین موارد یاد شده فقط فاز وابسته به فاصله نسبت به مرکز مؤثر پراکنشی پیکسل تعریف می شود. در واقع، این محل یک موقعیت مجازی است که به سبب پراکنش یک پراکنشگر هم دوس در سلول رزولوشن ایجاد می شود. فاز پراکنشی به دلیل تصادفی بودن سیگنال بازگشتی در هر پیکسل ایجاد می شود. فاز نویز مربوط به نویز مشاهده شده به دلایلی چون نویز حرارتی^۱ یا نویز دستگاهی است که به خصوصیات سنجنده مورد استفاده و خصوصیات پراکنشگر وابسته است. فاز وابسته به فاصله نیز مربوط به فاصله هندسی دوطرفه بین آنتن رادار و مرکز پراکنشی است. و فاز اتمسفر تأخیری مربوط به تأخیر فاز به دلیل حرکت در یونوسفر و تروپوسفر است.

در ساخت تصاویر تداخل سنجی راداری از دو تصویر راداری با دریچه مصنوعی روش های بسیاری وجود دارد. با توجه به اینکه توضیح دقیق این مراحل از اهداف این تحقیق نیست، از آن صرف نظر شد. با اینکه روش های متنوعی برای این موضوع مطرح شده است، همه این روش ها چند اصل یکسان دارند که در اینجا به برخی از آن ها اشاره می شود (آجرلو ۱۳۹۸: ۴۸).

- انطباق تصاویر: همان طور که پیش تر اشاره شد، تصاویر تداخل سنجی راداری حاصل تفاضل فاز دو تصویر راداری رابطه ۱ است. اما برای اینکه بتوان مقدار فاز تفاضلی را برای یک منطقه مشخص روی زمین به دست آورد باید پیکسل مربوط به ناحیه روی زمین در هر دو تصویر یکسان باشد. به عبارتی، فاز پیکسل های کسر شده هر دو مربوط به یک ناحیه روی زمین باشد. در واقع، به دلایلی چون موقعیت، سرعت، زاویه برخورد، و ارتفاع مختلف ماهواره در زمان عکس برداری تصاویر دقیقاً منطبق نیستند. در نتیجه برای ساخت تصاویر تداخل سنجی باید شبکه نمونه برداری هر دو تصویر یکسان باشد که در مرحله انطباق مقدار جابه جایی پیکسل ها محاسبه می شود. انطباق تصاویر عمدتاً در چهار مرحله انجام می شود (آجرلو ۱۳۹۸: ۴۹):
منطبق سازی مداری^۲، منطبق سازی غیر دقیق^۳، منطبق سازی دقیق^۴، منطبق سازی بر مبنای مدل رقومی ارتفاعی^۵.

- بازسازی تصویر:^۶ در این مرحله مقادیر مختلط در تصویر پیرو روی موقعیت پیکسل های تصویر مبنای بر اساس میزان آفست های به دست آمده در مرحله انطباق تصاویر بازسازی می شوند (آجرلو ۱۳۹۸: ۴۹).

1. thermal
2. orbit coregistration
3. coarse coregistration
4. fine coregistration
5. dem-based coregistration
6. resampling

- کسر فاز توپوگرافی و زمین مسطح: تصاویر تداخل سنجی ساخته شده از تصاویر راداری طبق رابطه ۲ دارای فازهای مشارکتی متعددی هستند. با توجه به اهداف تحقیق، فازهای مشارکتی اضافه باید به حداقل برسند. برخی از این فازها حالت قطعی و برخی غیرقطعی دارند. مثلاً فاز حاصل از زمین مسطح، که مربوط به استفاده از مرجع بیضوی است، را می توان به صورت قطعی برآورد کرد. این فاز مشارکتی را می توان برای همه پیکسل ها به دست آورد و اثر آن را از فاز تداخل سنجی کسر کرد (باید توجه داشت که به دلیل تغییر موقعیت ماهواره و زوایا اثر این فاز روی دو تصویر مبنا و پیرو متفاوت است). اگر هدف تحقیق برآورد میزان جابه جایی باشد، اثر توپوگرافی نیز باید تا حد ممکن کاهش یابد. بدین منظور، از داده های ارتفاعی چون DEM-SRTM یا خروجی روش 3-pass استفاده می شود. داده های ارتفاعی طی مراحل به سیستم مختصات راداری انتقال می یابد و اثر توپوگرافی برای هر پیکسل محاسبه و مقدار آن از همه پیکسل ها کسر می شود (آجرلو ۱۳۹۸: ۴۹).

- بازیابی فاز: به دلیل عدم ثبت مقادیر سیکل صحیح فاز برای پیکسل مورد نظر در هر یک از تصاویر راداری و در نتیجه عدم امکان محاسبه تعداد سیکل صحیح فاز تداخل نما، فاز تداخل نما قابلیت نمایش اختلاف فاز تا حداکثر 2π را دارد و هر سیکل نیز معرف تغییرات فاز از 0 تا 2π است. بنابراین برای به دست آوردن اختلاف فاز (و در نهایت اختلاف ارتفاع) بین دو پیکسل غیر مجاور باید تعداد سیکل های بین این دو نقطه شمارش شود (مقصودی ۱۳۹۴: ۱۹۴). به دلیل محدودیت های استفاده از تداخل سنج ها، به جای استفاده از یک تصویر از یک دسته تصویر استفاده می شود که به این روش سری های زمانی می گویند. ناهمبستگی هندسی و زمانی فاز پراکنشی و خطای اتمسفری از محدودیت های مهم استفاده از تداخل سنجی هستند. ناهمبستگی زمانی زیاد مانند مناطق کشاورزی و استفاده از تصاویر با طول مبنای بلند جزء ناهمبستگی هندسی و زمانی اند. هدف از سری های زمانی غلبه بر محدودیت های بیان شده است. بر همین اساس از روش های سری های زمانی جهت پایش فرونشست در بازه زمانی خاص استفاده شد.

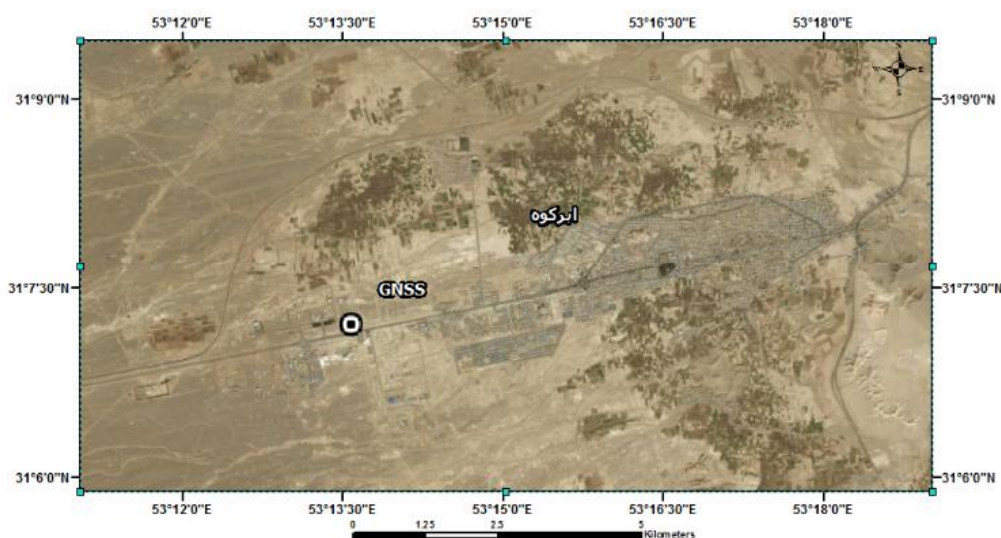
تداخل سنجی پراکنشگرهای پایا

تحقیقات نشان داده است برخی پراکنشگرها و عوارض در طول زمان های طولانی دارای الگو و رفتار پراکنشی ثابت اند. این عوارض عمدتاً سازه های انسانی یا عوارض طبیعی، چون کوهستان ها و بیابان ها، هستند. این دستاورد باعث توسعه الگویی جدید به نام تداخل سنجی پراکنشگرهای پایا شد. در این روش از پیکسل های پراکنشگرهای پایدار، یعنی پیکسل هایی که دارای پراکنشگرهایی با الگوی پراکنشی ثابت در طول زمان اند، برای استخراج اطلاعات و غلبه بر محدودیت های تداخل سنجی راداری استفاده می شود (فرتی^۱ و همکاران ۲۰۰۱: ۱۵). همه روش های ارائه شده (بعد از استخراج اطلاعات از نقاط پراکنشگرهای پایدار) دارای مفهوم یکسان اند و همه آن ها در دسته تداخل سنجی پراکنشگرهای پایا قرار می گیرند. روش های متنوع ارائه شده برای روش پراکنشگرهای پایا، اگرچه دارای تفاوت هایی در اهداف به دلیل استفاده در مناطق مختلف اند، همگی چند مرحله یکسان دارند (آجرلو ۱۳۹۸: ۵۷): انتخاب نقاط پایدار، بازیابی فاز سه بعدی، کاهش اثر اتمسفری.

یافته‌های پژوهش

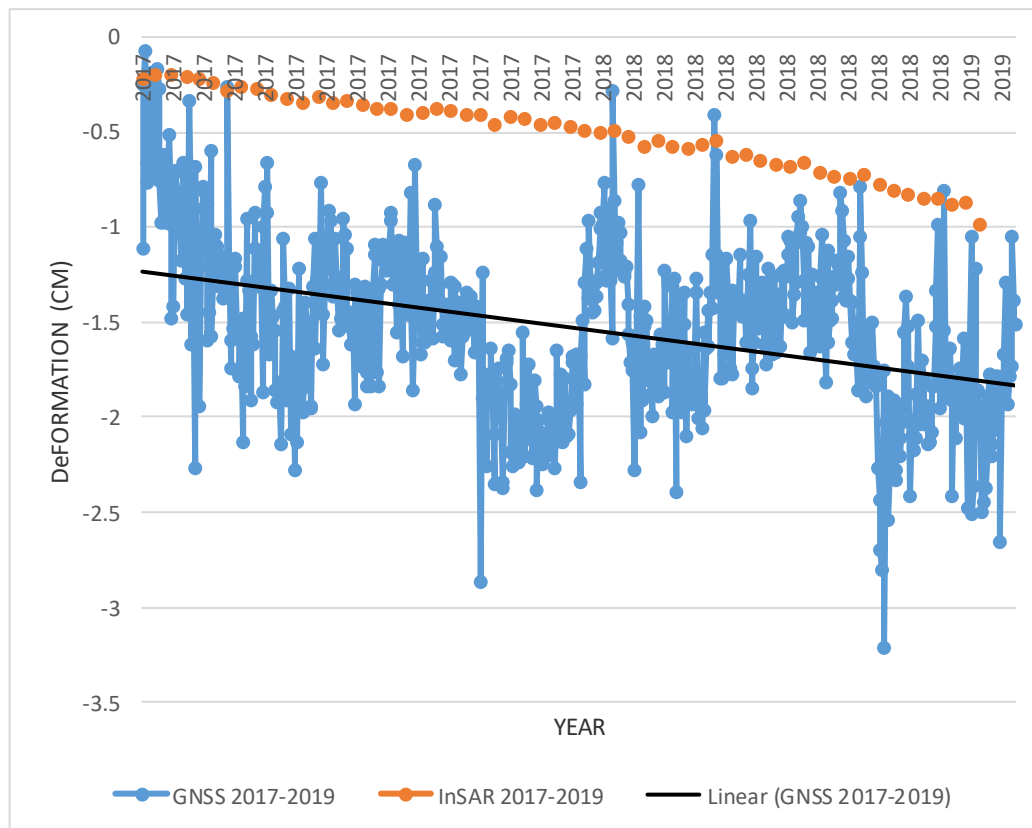
پایش فرونشست دشت ابرکوه

سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ موجود در منطقه ابرکوه از سال ۱۳۸۹ به صورت روزانه و با استفاده از سامانه‌های ماهواره‌ای موقعیت نقاط را ثبت کرده است. بر این اساس، جهت ارزیابی یافته‌های روش تداخل‌سنجی، از داده‌های سامانه ناوبری جهانی استفاده شده است. در شکل ۶ موقعیت قرارگیری ایستگاه دائم نشان مشاهده می‌شود. بر اساس شکل ۷ میزان جابه‌جایی ثبت‌شده در سامانه ناوبری جهانی در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ برابر با ۱ سانتی‌متر است. جابه‌جایی برآوردشده از روش تداخل‌سنجی راداری در این بازه زمانی برابر با ۰/۷ سانتی‌متر است. این نتایج مبین صحت و دقت روش تداخل‌سنجی راداری در پایش جابه‌جایی سطح زمین است. اختلاف بین دو سری داده می‌تواند به دلیل خطاهای موجود در روش تداخل‌سنجی باشد؛ از جمله خطای مدل رقومی ارتفاعی، خطای بازیابی فاز، اثر اتمسفر، و ...



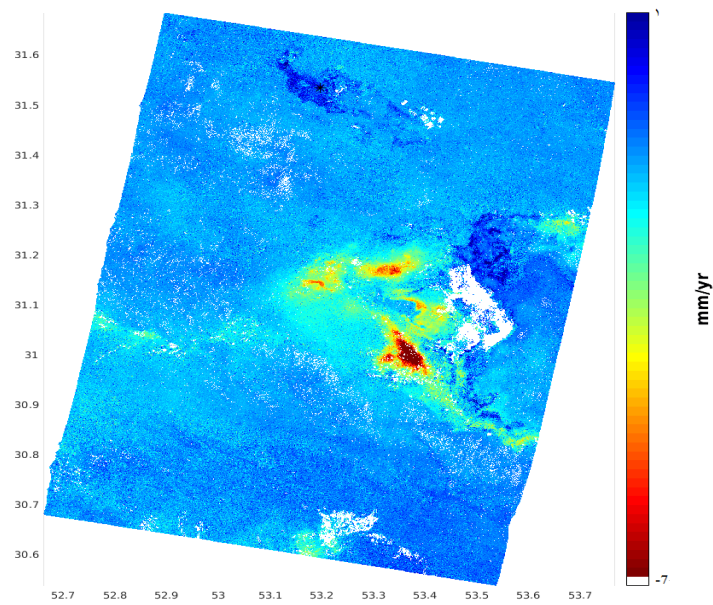
شکل ۶. موقعیت ایستگاه سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی روی تصویر گوگل ارث

1. global navigation satellite system (GNSS)

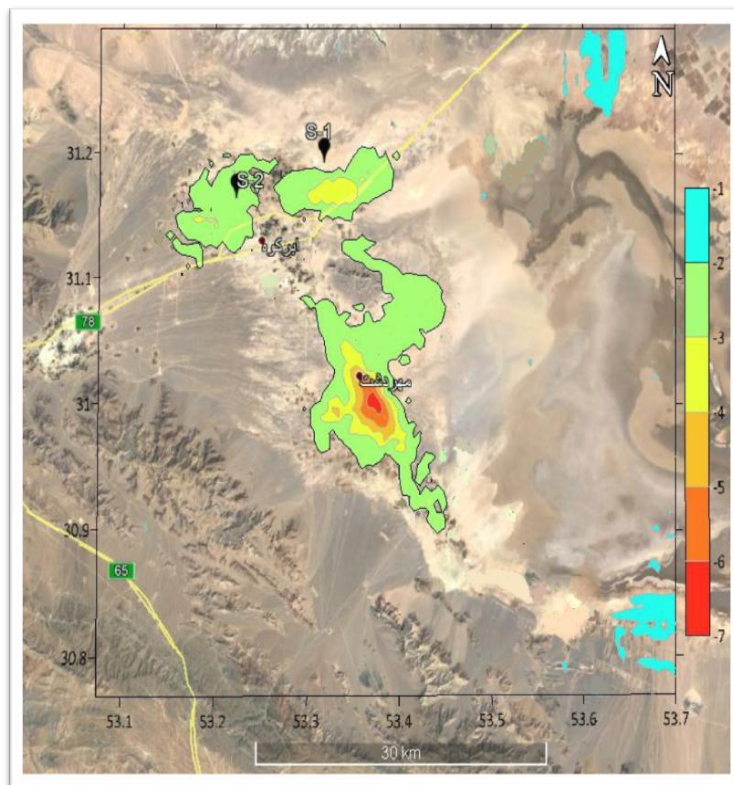


شکل ۷. ارزیابی مقادیر فرونشست محاسبه شده با مقادیر GNSS. نمودار قرمز رنگ مبین میزان جابه جایی کل زمین در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ در روش تداخل سنجی راداری است. نمودار آبی رنگ نشان دهنده جابه جایی کل زمین بر اساس داده های ایستگاه دائم موجود در منطقه است.

در این پژوهش ۵۴ تداخل نگاشت نسبت به تصویر مینا، با استفاده از نرم افزار DORIS، محاسبه شد و فاز مشارکتی مربوط به توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر ماهواره SRTM از فاز تداخل نگاشت ها کسر شد و نتایج جهت بررسی سری های زمانی مبنی بر پراکنشگرهای پایا در نرم افزار STAMPS در متلب مورد پردازش قرار گرفت. پس از تبدیل بردار فرونشست به جهت قائم، شکل ۸ مبین متوسط میزان فرونشست در منطقه ابرکوه است. در نهایت، پس از جداسازی سیگنال های حاوی فرونشست از سایر سیگنال ها در شکل ۹ میزان فرونشست طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ نشان داده شد. بر اساس شکل ۹ بیشینه میزان فرونشست در منطقه ابرکوه ۳ تا ۴ سانتی متر در سال و بیشینه میزان فرونشست در منطقه مهردشت ۶ تا ۷ سانتی متر در سال است. در شکل ۹ موقعیت قرارگیری شهرستان های ابرکوه و مهردشت و همچنین مسیر جاده های ابرکوه- یزد در محدوده فرونشست مشخص شده است. همان گونه که تصویر نشان می دهد، گسترش فرونشست باعث بروز خسارات در مناطق شهری و جاده های خواهد شد.



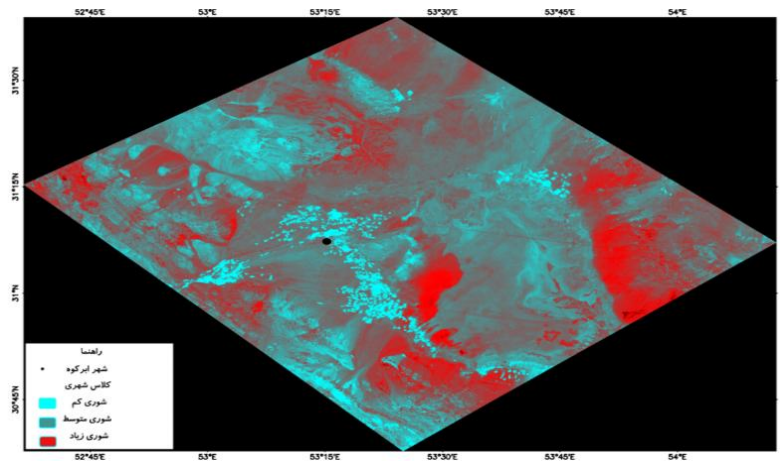
شکل ۸. نقشه میزان فرورنشست در منطقه ابرکوه



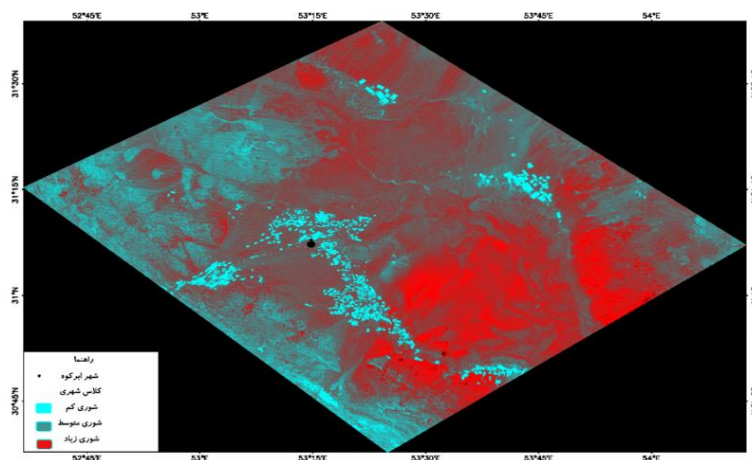
شکل ۹. نقشه گسترش محدوده فرورنشست در منطقه مورد مطالعه روی تصویر گوگل ارث. نمادهای S1 و S2 محل قرارگیری فروچاله‌های ایجادشده در محدوده مورد مطالعه است.

بر اساس شکل ۹ گسترش مناطق تحت فرونشست مشخص شده است. با توجه به نقشهٔ شاخص پوشش گیاهی منطقه، مناطق تحت فرونشست در گسترهٔ محدودهٔ پوشش گیاهی قرار گرفته‌اند. با توجه به افت سطح ایستابی در منطقه می‌توان علت اصلی فرونشست را بهره‌برداری نامناسب از منابع آب زیرزمینی دانست. گسترهٔ محدودهٔ فرونشست در شکل ۸ مبین مخاطرات ناشی از این پدیده نیز هست. منطبق شدن فروچاله‌های منطقه با محدودهٔ فرونشست و همچنین میل روند محدودهٔ فرونشست به مناطق شهری و جاده‌ها از مخاطرات مشخص شده در تصویرند.

جهت بررسی تخریب زیست‌محیطی فرونشست در منطقه با استفاده از تصاویر ماهوارهٔ LANDSAT-7 در سامانهٔ گوگل ارث انجین^۱ نقشهٔ شوری خاک در خلال سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ رسم شده است. شکل ۱۰ بیانگر میزان شوری خاک در منطقهٔ ابرکوه در سال ۲۰۰۰ است. به منظور بررسی تخریب خاک‌های منطقه در اثر فرونشست و رشد آن در سال‌های اخیر نقشهٔ شوری خاک در شکل ۱۱ در سال ۲۰۲۰ محاسبه شد.



شکل ۱۰. نقشهٔ شوری خاک در سال ۲۰۰۰



شکل ۱۱. نقشهٔ شوری خاک در سال ۲۰۲۰

1. <https://earthengine.google.com>

بحث و نتیجه

کارستی شدن و واگرایی بالای خاک‌های حاوی کانی‌های رسی در منطقه از عوامل تشدید فرونشست و فروچاله در منطقه گزارش شده است. در مطالعات صورت گرفته، با توجه به دولومیتی بودن رسوبات، افزوده شدن یون منیزیم به سیستم آب و خاک در منطقه مورد مطالعه باعث ناپایداری رس‌ها شده است (اخوان قالیباف ۱۳۹۴: ۲۰۹؛ بیدکی ۱۳۹۴: ۱۲). افت سطح آب زیرزمینی در ابرکوه به رخداد پدیده فرونشست انجامیده و با تورم و انقباض‌های پیاپی در اثر نوسانات سطح ایستایی باعث تشدید پدیده فرونشست و فروچاله شده است. ایجاد فروچاله‌های متعدد با عمق زیاد در منطقه از پیامدهای مخرب فرونشست است. با توجه به خسارات ناشی از فرونشست، در این پژوهش به پایش فرونشست منطقه ابرکوه پرداخته شد. مطالعات متعدد به منظور بررسی فرونشست با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی صورت گرفته است (اسنید^۱ و همکاران ۲۰۰۱: ۱؛ عامریان و وثوقی ۱۳۹۰: ۱۳۳؛ موسوی^۲ و همکاران ۲۰۰۱: ۴۵۲). بسیاری از پژوهشگران از فن تداخل‌سنجی راداری به منظور پایش فرونشست استفاده کرده‌اند (آمیغی و همکاران ۱۳۸۹: ۱۵۷؛ صادقی و همکاران ۱۳۹۲: ۴۵؛ باتارای^۳ و همکاران ۲۰۱۷: ۳۹؛ معتق^۴ و همکاران ۲۰۱۶: ۱۳۴؛ وانگ^۵ و همکاران ۲۰۱۷: ۱). دقت روش تداخل‌سنجی در بررسی فرونشست در بعضی مطالعات (معتق و همکاران ۲۰۱۶: ۱۳۴) در حد میلی‌متر نشان داده شده است. همچنین ارزیابی یافته‌های این روش با داده‌های سری زمانی ایستگاه‌های ترازیبی دقیق در برخی بررسی‌ها (آمیغی ۱۳۸۹: ۱۵۷؛ اکبری ۱۳۸۷: ۹۷) گزارش شده است. در مطالعاتی نقش ویژگی کانی‌شناسی رس در تشدید فرونشست دشت ابرکوه به دلیل ناپایداری و واگرایی خاک‌های منطقه گزارش شده است (اخوان قالیباف ۱۳۹۴: ۲۰۷؛ بیدکی ۱۳۹۴: ۵). ایجاد فروچاله‌ها و شکاف‌های عمیق طولی متأثر از فرونشست در منطقه مورد مطالعه از عوامل تهدیدکننده اراضی کشاورزی، محدوده شهر و ابنیه و خطوط انتقال انرژی، جاده‌ها، و خط راه‌آهن است که می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به بار آورد. به همین منظور جهت بررسی فرونشست در منطقه از آنالیز سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری مبنی بر پراکنشگرهای پایا استفاده شد.

با استفاده از ۵۵ تصویر ماهواره SENTINEL-1A، نقشه میانگین سرعت فرونشست در منطقه ابرکوه محاسبه شد. بر این اساس بیشینه میزان فرونشست منطقه ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ بین ۳ تا ۴ سانتی‌متر در سال گزارش شده است. همچنین بیشینه سرعت فرونشست منطقه مهردشت ۶ تا ۷ سانتی‌متر در سال به دست آمده است. بر اساس مطالب یادشده، یعنی قرار گرفتن محدوده فرونشست در محدوده اراضی کشاورزی منطقه و افت سطح ایستایی، می‌توان عامل فرونشست را ازدیاد برداشت از منابع آب زیرزمینی دانست. به منظور بررسی تخریب‌های زیست‌محیطی ناشی از فرونشست نقشه شوری خاک محاسبه شد. به طور کلی، شوری منطقه، به مثابه عاملی در تخریب خاک‌های سطحی و بیابان‌زایی، در حال افزایش است. از جمله پیامدهای فرونشست در تخریب چاه‌ها می‌توان به رخداد پدیده‌های لوله‌زایی، ماسه‌دهی چاه‌ها، کاهش آب‌دهی، و رشد چاه‌ها اشاره کرد. همچنین از دیگر پیامدهای فرونشست در این منطقه تبدیل

1. Sneed
2. Mousavi
3. Bhattarai
4. Motagh
5. Wang

چهرهٔ دشت به بیابان، آسیب دیدن آبخوان‌ها، تغییر توپوگرافی زمین، و آلودگی‌های زیست‌محیطی است. با توجه به روند پراکندگی محدودهٔ فروروشست منطقه، تخریب جاده‌ها و خط راه‌آهن و بناهای شهری و صنعتی و خطوط انتقال انرژی پیش‌بینی می‌شود. از خسارات مهم ناشی از فروروشست در این منطقه ایجاد فروچاله‌ها و شکاف‌های عمیق طولی در حاشیهٔ محدودهٔ فروروشست است. ارزیابی یافته‌های تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ایستگاه دائم به دست آمد. این نتایج مبین دقت و صحت یافته‌های روش تداخل‌سنجی راداری است.

پیشنهاد می‌شود جهت بررسی دقیق‌تر پدیدهٔ فروروشست در منطقه نقش عواملی همچون گسل‌های فعال در ایجاد و گسترش این پدیده بررسی شود. همچنین با بهبود در عملکرد فرایندهای سری زمانی، همانند بازیابی فاز، نتایج با دقت بالاتری برآورد شود. علاوه بر این، با توجه به فروروشست مداوم در منطقه، جهت جلوگیری از خسارات بیشتر پیشنهاد می‌شود بررسی دقیق‌تر به صورت طرح‌های جداگانه با هدف یافتن راهکارهای مناسب برای مقابله با این پدیده‌ها صورت گیرد.

منابع

- احمدی، نعیمه؛ زهرا موسوی؛ زهره معصومی (۱۳۹۷). «مطالعهٔ فروروشست دشت خرم‌دره با استفاده از فن تداخل‌سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن»، *سنجش از دور و GIS/یران*، س ۱۰، ش ۳، صص ۲۳ - ۵۲.
- اخوان‌قالیباف، محمد؛ هستی بیدکی؛ حمید مهرنهاد (۱۳۹۴). «نقش ویژگی‌های کانی‌شناسی رس در شدت فروروشست زمین‌های دشت ابرکوه یزد»، *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، س ۳، ش ۱، صص ۲۰۷ - ۲۲۸.
- اکبری، وحید (۱۳۸۷). «نظارت بر فروروشست زمین ناشی از استخراج بی‌رویهٔ آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد با استفاده از سری زمانی فن تداخل‌سنجی راداری و مقایسه با مشاهدات ژئودتیک»، *پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه تهران*.
- آجرلو، پرویز (۱۳۹۸). «امکان‌سنجی استفاده از سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری برای پایش فروروشست ناشی از ساخت مترو و زیرساخت‌های عمرانی در تهران»، *پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران*.
- آمیغ‌بی، معصومه؛ سیاوش عربی؛ علی طالبی (۱۳۸۹). «بررسی فروروشست یزد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و ترازبازی دقیق»، *علوم زمین*، س ۲۰، ش ۷۷، صص ۱۵۷ - ۱۶۴.
- بابایی، سید ساسان؛ زهرا موسوی؛ مه‌آسا روستایی (۱۳۹۵). «آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فروروشست دشت قزوین»، *علوم و فنون نقشه‌برداری*، د ۵، ش ۲، صص ۹۵ - ۱۱۱.
- بیدکی، هستی (۱۳۹۴). «بررسی تأثیر عوامل خاک‌سازی و تحولات کانی‌شناسی رس در ایجاد شق و نشست زمین در دشت آبرفتی ابرکوه»، *پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد*.
- پرنگ، سوران (۱۳۹۶). *InSAR در تحقیقات علوم زمین*، تهران، انتشارات ماهواره.
- پورفلاح، ساناز؛ محمدرضا اختصاصی؛ محسن صادقیان (۱۳۹۷). «بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژی و علل شکل‌گیری فروچاله‌های دشت ابرکوه»، *مهندسی اکوسیستم بیابان*، س ۷، ش ۲۱، صص ۹۱ - ۱۰۵.

- شرافت، متین؛ عبدالحمید انصاری؛ حسین مجتهدزاده؛ احمد قربانی (۱۳۹۸). «پایش فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری مبنی بر پراکنشگرهای پایا»، خشک بوم، د ۹، ش ۲، صص ۱۲۱ - ۱۳۶.
- شفیعی، نجمه؛ لیلا گلی مختاری؛ ابوالقاسم امیراحمدی؛ رحمان زندی (۱۳۹۹). «بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری»، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، س ۸، ش ۴، صص ۹۳ - ۱۱۱.
- شمس اسفندآبادی، حمیدرضا (۱۳۸۰). با من به ابرکوه بیایید، تهران، پاسارگاد.
- شیخ احمدی، سیده پریسا (۱۳۹۶). «بررسی پدیده فروچاله‌ها به کمک تصاویر هوایی و ماهواره‌ای راداری»، پایان‌نامه کارشناسی/ارشد، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران.
- صادقی، زهرا؛ محمدجواد ولدان زوج؛ مریم دهقانی (۱۳۹۲). «تلفیق دو روش متفاوت تداخل سنجی راداری بر پایه پراکنش کننده‌های دائمی به منظور پایش فرونشست»، علوم زمین، س ۲۳، ش ۹۰، صص ۴۵ - ۵۴.
- عامریان، یزدان؛ بهزاد وثوقی (۱۳۹۰). «کنترل فرونشست دشت مشهد و نیشابور بر مبنای روش تجزیه و تحلیل تغییر انحنای استفاده از میدان جابه‌جایی حاصل از مشاهدات GPS»، علوم زمین، س ۲۱، ش ۸۲، صص ۱۳۳ - ۱۳۸.
- مرآت، مجتبی؛ هادی جعفری؛ افشین قشلاقی؛ محمدعلی امیریکی (۱۳۹۵). «ارزیابی هیدروژئوشیمی کیفیت آب زیرزمینی دشت ابرکوه، استان یزد»، اولین کنفرانس بین‌المللی آب محیط زیست و توسعه پایدار، دانشگاه محقق اردبیلی.
- مرتضوی‌زاده، فاطمه‌سادات؛ امیرعلی فتاحی؛ سید امیر شمس‌نیا (۱۳۹۲). «افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست در دشت ابرکوه»، دومین همایش ملی توسعه پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ابرکوه.
- مقصودی، یاسر؛ ساحل مهدوی (۱۳۹۴). «مبانی سنجش از دور راداری، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی».
- Ahmadi, N., Mousavi, Z., & Masoumi, Z. (2018). "Study of subsidence of Khorramdareh plain using radar interferometry technique and investigation of its hazards", *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(3), pp. 23-52 (in Persian).
- Ajourlo, P. (2019). "Feasibility of using radar interferometry time series to monitor subsidence caused by subway construction and civil infrastructure in Tehran", *Master's degree*, Faculty of Surveying Engineering, University of Tehran (in Persian).
- Akbari, V. (2008). "Monitoring of land subsidence due to Improper extraction of groundwater in Mashhad plain using time series of radar interferometry technique and comparison with geodetic observations", *Master's degree*, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran (in Persian).
- AkhavanGhalibaf, M., Bidoki, H., & Mehrnahad, H. (2014). "The Role of Clay Mineralogical Features in the Intensity of Subsidence of Yazd Abarkouh Plain", *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 3(1), pp. 207-228 (in Persian).
- Amerian, Y. & Vosoghi, B. (2011). "Subsidence control of Mashhad and Neishabour plains based on the method of analysis of curvature change using the displacement field obtained from GPS observations", *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 21(82), pp. 133-138 (in Persian).
- Amighpey, M., Arabi, S., & Talebi, A. (2009). "Investigation of Yazd Subsidence by Radar Interferometry and precise levelling", *Geoscience journal*, 20(77), pp. 157-164 (in Persian).
- Babae, S., Mousavi, Z., & Roostaei, M. (2016). "Time series analysis of radar images using small baseline subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) methods in determining the subsidence rate of Qazvin plain", *Journal of Geomatics Science And Technology*, 5(2), pp.

- 95-111 (in Persian).
- Bhattacharai, R., Alifu, H., Maitiniyazi, A., & Kondoh, A. (2017). "Detection of land subsidence in Kathmandu valley, Nepal", *using DInSAR technique*, 6(2), pp. 39-54.
- Bidoki, H. (2015). "Investigation of the Effect of Soil Factors and Clay Mineralogy Developments on Earth Fissures and Subsidence in the Abarkuh Plain", *Master's degree*, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University (in Persian).
- 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*, 735(140), 139111.
- Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S., & Cao, Y. (2014). "Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method", *Environmental Earth Sciences*, 72(3), pp. 677-691.
- Esfandabadi, H. (2001). *Come to Abarkooh with me*, Tehran, Pasargad Publications. (in Persian)
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), pp. 8-20.
- Maghsoudi, Y. & Mahdavi, S. (2015). *Basics of Radar Remote Sensing*, Tehran, Khaje Nasiruddin Toosi University Press (in Persian).
- Meraat, M., Jafari, H., Gheshlaghi, A., & Amirbeiki, M.A. (2016). "Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in Abarkooh plain, Yazd province", *Water Environment Sustainable Development*, University of Mohaghegh Ardabili (in Persian).
- Mortazavizadeh, F.S., Fatahi, A.A., & Shamsnia, A. (2013). "Groundwater level decline and subsidence in Abarkooh plain", *The Second national conference on sustainable development in arid and semiarid regions*, Abarkooh (in Persian).
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M.H., Wetzell, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., & Arabi, S. (2016). "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time series and situ measurements", *Engineering Geology*, 218, pp. 134-151.
- Mousavi, M., Shamsai, A., ElNaggar, M.H., & Khomehchian, M. (2001). "A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28, pp. 452-464.
- Parang, S. (2017). *InSAR in Earth Science Research*, Tehran, Satellite (in Persian).
- Pourfallah, S., Ekhtesasi, M.R., & Sadeghian, M. (2018). "Investigation of geomorphological features and causes of sinkholes in Abarkooh plain", *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(3), pp. 91-105 (in Persian).
- Prasetyo, Y., Sugiastu Firdaus, H., & Diyanah (2019). "Land Subsidence Of Semarang City Using Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (Ps-Insar) Method In Sentinel 1a Between 2014-2017", *The 3rd Geoplanning-International Conference on Geomatics and Planning*.
- Sadeghi, Z., Valadanzoej, M.J., & Dehghani, M. (2013). "Combining two different radar interferometry methods based on Persistent Scatterer to monitor subsidence", *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 23(90), pp. 45-54 (in Persian).
- Shafie, N., Gholimokhtari, L., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2020). "Investigation of aquifer subsidence in Nurabad plain using radar interferometry method", *Journal of Quantitative*

- Geomorphological Research*, 8(4), pp. 93-111 (in Persian).
- Sharafat, M., Abdolhamid, A., Mojtahedzadeh, S.H., & Ghorbani, A. (2019). "subsidence Monitoring of Yazd Abarkuh plain using radar interferometry technique Based on Persistent Scatterers", *Journal of Aridbiom*, 9(2), pp. 121-136 (in Persian).
- Sheikhahmadi, S. P. (2017). "Assessment of sinkholes using aerial and radar satellite imagery", *Master's degree*, Faculty of Surveying Engineering, University of Tehran (in Persian).
- Sneed, M., E.Ikehara, M., Galloway, D.L., & Amelung, F. (2001). "Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996-98", *Hydrological Sciences Journal*, 39(5), pp. 417-429.
- Wang, H., Feng, G., Xu, B., Yu, Y., Li, Z., Du, Y., & Zhu, J. (2017). "Deriving Spatio-Temporal Development of Ground Subsidence Due to Subway Construction and Operation in Delta Regions with PS-InSAR Data: A Case Study in Guangzhou", *The China*, 9(10), pp. 1-19.