

پایش فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری مبنی بر پراکنش گرهای پایا

۱- متین شرافت، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران.

۲- عبدالحمید انصاری، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران.

h.ansari@yazd.ac.ir

۳- سید حسین مجتهدزاده، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران.

۴- احمد قربانی، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

چکیده

فن تداخل سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات تغییرات سطحی پوسته زمین است که بر اساس اختلاف فاز دو زوج تصویر در بازه زمانی متفاوت به تعیین جابه‌جایی پوسته زمین می‌پردازد. از کاربردهای این فن می‌توان به بررسی فرونشست زمین اشاره نمود. فرونشست در واقع پایین رفتن سطح زمین به دلیل عوامل انسانی و طبیعی است. استخراج زیاد از منابع زیرزمینی به‌ویژه آب از علل فرونشست در بسیاری از دشت‌های ایران محسوب می‌شود. در تحقیق پیش رو به بررسی فرونشست دشت ابرکوه واقع در استان یزد پرداخته شده است. مطالعات آب‌شناسی در این منطقه نشان‌دهنده افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۰/۶ متر در سال است. با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی، وجود کارست‌ها و رس با واگرایی بالا در منطقه از دلایل فرونشست بیان شده‌اند. با استفاده از فن تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از ۱۲ تصاویر ماهواره‌ای Envisat، متوسط سرعت فرونشست در منطقه برآورد شد. در منطقه ابرکوه بیشینه میزان فرونشست ۲ تا ۳ سانتیمتر و در منطقه مهردشت ۵ سانتیمتر در سال مشخص شده است. برای اعتبارسنجی محاسبات از مطالعات ترازیابی دقیق در سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۰ استفاده شد که با نتایج حاصله از تداخل سنجی به‌صورت تقریبی تطابق دارد. دلایل این اختلاف نیز یکسان نبودن بازه زمانی دو داده موجود و خطای فن تداخل سنجی است.

واژگان کلیدی: فرونشست؛ تداخل سنجی راداری با دریچه مصنوعی؛ فروچاله؛ Envisat؛ یزد.

مقدمه

فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا نفت ایجاد شود. افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوزه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌عمق یا دریاچه‌ای تحکیم نیافته انباشته گشته‌اند، به نشست و یا فروریزش سطح زمین می‌تواند منجر شود. تشخیص و نمایان‌سازی نواحی که به دلیل خطرپذیری، مستعد فرونشست هستند ضروری به نظر می‌رسد. فرونشست زمین ممکن است به‌طور کلی ناشی از دلایل عمده‌ای همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات و انقباض خاک‌های رسی باشد. عمده رخداد‌های فرونشست زمین در ایران بیشتر در اثر عواملی همچون افت سطح سیالات زیرزمینی، انحلال تشکیلات زیرسطحی و ریزش کارست به وجود می‌آیند. از عوامل مهم دیگری که می‌توانند در ایجاد پدیده فرونشست مؤثر باشند، تغییر کاربری زمین،

پدیده فرونشست^۱ در اصل فرورفتگی در سطح زمین قلمداد می‌شود که ممکن است به‌صورت نشست تدریجی یا ناگهانی سطح زمین و به هر دو علت طبیعی یا اثر فعالیت بشر ایجاد شود. طبق تعریف مؤسسه زمین‌شناسی ایالات متحده^۲، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک باشد. حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر محدود نیست و فرونشست می‌تواند در اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا

1- Subsidence

2- United States Geological Survey (USGS)

خطوط راه آهن، سدهای خاکی، تصفیه خانه ها و کانال ها از آسیب پذیری زیادتری برخوردار هستند. به طور کلی هر سازه ای که در مسیر شکل گیری شکاف یا فروچاله واقع شده باشد، در معرض آسیب بیشتری قرار دارد. پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می تواند باعث بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود. به عنوان مثال، در این مناطق ممکن است سیلاب های سهمگین و مخربی به وقوع بپیوندد، در حالی که قبل از ایجاد فرونشست از هیچ سابقه ای برخوردار نبوده است. از سوی دیگر، این پدیده می تواند با ایجاد تغییر در وضعیت زمین آب شناختی منطقه از قبیل جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، بیلان آب زیرزمینی و غیره نتیجه های ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد [۶].

بر اساس اطلاعات کارگروه فرونشست در سازمان یونسکو^۳ قدیمی ترین فرونشست شناخته شده در ایالت آلابامای ایالات متحده در سال ۱۹۰۰ میلادی به وقوع پیوسته است. اساس مطالعات این کارگروه بررسی های تفصیلی بر روی ۴۲ فرونشست در ۱۵ کشور جهان بوده است. از سال ۱۹۶۵، یونسکو اولین برنامه جهانی خود را برای چرخه های آب شناختی تحت عنوان دهه جهانی آب شناسی آغاز نمود. در سال های بعد مطالعه فرونشست ها به یکی از موضوع های اصلی آن تبدیل گشت. در آوریل ۱۹۷۵ گروه کاری فرونشست در پاریس شکل گرفت که اساس کار آن بررسی ارتباط این پدیده با آب های زیرزمینی بود. از آن تاریخ تا به امروز بررسی های بیشتری در این زمینه در کشورهای پیشرفته به ویژه در ایالات متحده و ژاپن انجام شده است که نتیجه آن کنترل شدید مصرف آب و تغییر در الگوی مصرف و توقف فرونشست ها در بسیاری از موارد بوده است. در این بررسی ها از روش ها و فن های جدید مانند دستگاه های مکان یابی جغرافیایی پیشرفته، رادار برای مکان یابی فرونشست ها به صورت گسترده ای استفاده شده است [۶].

به منظور تشخیص و کنترل مناطق فرونشست از روش هایی همچون تداخل سنجی راداری با درجه

ساخت و یا بارگذاری سازه های مهندسی و زهکشی خاک های آلی است. شرایطی همچون فرآیندهای تکتونیکی اتفاق افتاده در منطقه، نفوذ ریزش ها و وجود لایه های غیر مقاوم در تشکیلات رسوبی زیرین، منجر به توسعه پدیده های فرونشستی در کشور شده است. برداشت بیش از اندازه آب زیرزمینی با ایجاد افت مداوم سطح آب غیر از آسیب رسانی و از دست دادن یک منبع مهم، ممکن است موجب نشست اراضی و در آخر باعث خسارت به ابنیه گردد. از میان عوامل تشکیل فرونشست زمین در ایران، کارستی شدن علاوه بر ایجاد خطرات طبیعی، مشکلات پیچیده ای در عملکرد مهندسی ایجاد می کند که در صورت ریزش کارست^۱، منجر به تشکیل فروچاله ها^۲ می شود [۶].

فرونشست و شکاف های زمین که به آهستگی و به تدریج گسترش می یابند شاید همان تأثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه بار مانند سیل و زلزله را نداشته باشد. در منطقه در حال فرونشست شاید خرابی به میزان گسترده مشاهده نشده، حتی آثار سطحی حاصل از آن نیز به راحتی قابل تشخیص نباشد. با این وجود به طور معمول خسارت های ناشی از فرونشست ها و شکاف های زمین ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند. به عنوان نمونه، فرونشست ها می توانند به تخریب سامانه آبیاری و خاک های حاصلخیز کشاورزی (با پایین آوردن تخلخل آن ها) منجر شوند. خسارت به چاه ها در منطقه های فرونشست روستایی و شهری به طور کامل متداول بوده، موجب خرابی چاه ها و ایجاد پدیده های می شود که در اصطلاح به آن رشد چاه ها یا لوله زائی می گویند. مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمان ها و شریان های حیاتی به طور ویژه آسیب پذیرتر هستند. این پدیده می تواند به خیابان ها، پل ها و بزرگراه ها آسیب زده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان ها آسیب رسانده، موجب ترک در آن ها گردد. در این حالت سازه هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب پذیرتر هستند. به عنوان نمونه،

1- Karst

2- Sinkhole

3- International Hydrological Programme (IHP)

از تحلیل سری زمانی داده‌های راداری ماهواره‌های ALOS, ENVISAT و SENTINEL-1 در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ استفاده شد. نتایج حاصل از این پردازش در محدوده‌ای به وسعت ۱۰۰۰ کیلومترمربع در منطقه‌ی مورد مطالعه، فرونشستی بیش از ۵ سانتیمتر در سال را نشان می‌دهد که به صورت محلی نرخ فرونشست به ۳۰ سانتیمتر در سال هم می‌رسد. بررسی رابطه مکانی و زمانی بین فرونشست و سطح آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که بخش زیادی از فرونشست مشاهده شده در منطقه رفسنجان ناشی از استخراج بیش از اندازه‌ی آب از منابع آب‌های زیرزمینی است [۱۴].

باتارای و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی و شناسایی پدیده‌ی فرونشست در روستای کاسماندو در نیپال پرداختند. در این منطقه از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی برای شناسایی دگرشکلی و میزان نشست استفاده شد. در این پژوهش، تصاویر راداری ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ برای پردازش اخذ شد. نتایج پردازش این تصاویر نشان داد که منطقه‌ی مورد نظر با سرعت متوسط ۸/۴ سانتیمتر در سال در حال نشست است [۸].

کالو و همکاران (۲۰۱۷)، روی منطقه‌ی کنیا یکی از مراکز اقتصادی پیشرو در بخش کشاورزی و صنعت در ترکیه، در رابطه با استخراج بیش از اندازه‌ی آب تمرکز کرده‌اند. در این منطقه با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، فشرده‌سازی سفره آب‌های زیرزمینی و در نتیجه‌ی آن فرونشست اتفاق افتاده است که منجر به خسارت‌های اقتصادی فراوانی شده است. به منظور تحلیل الگوی مکانی و زمانی فرونشست از روش طول مبنای کوتاه استفاده شده است. بدین منظور داده‌های ماهواره‌ی ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ مورد پردازش قرار گرفت. در این بازه زمانی از مشاهده‌ها و در محدوده‌ای به مساحت ۱۲۰۰ کیلومترمربع در منطقه‌ی مورد مطالعه، نقشه‌ی جابجایی زمین و سری زمانی مربوط به آن تهیه شد که جابجایی عمودی حدود ۱۰ سانتیمتر را در این بازه‌ی زمانی نشان می‌دهد. نتایج پردازش تداخل سنجی تفاضلی در کنار داده‌های هواشناسی، چینه‌شناسی و داده‌های پیزومتریک و همچنین اطلاعات مربوط به تغییرات پوشش زمین امکان دستیابی به

مصنوعی^۱، تراز یابی دقیق و سامانه تعیین موقعیت جهانی^۲ استفاده می‌شود. تراز یابی دقیق در کنار برتری دقت بالا با محدودیت‌های اندازه‌گیری فرونشست به صورت نقطه‌ای و هزینه بالا مواجه است. از طرفی امروزه، فن تداخل سنجی راداری به عنوان یک روش رایج برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین شده است. پوشش سرا سری، قدرت تفکیک مکانی و دقت قابل قبول، این روش را به عنوان ابزاری برای مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین مطرح کرده است [۷].

علی بخشی (۱۳۹۵)، میدان جابجایی دشت ورامین را برای حدود سه سال (۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های تداخل سنجی راداری ماهواره ENVISAT به دست آورد. سری زمانی تغییر شکل زمین با استفاده از روش پراکنش کننده‌های دائمی تداخل سنجی استخراج شده است. در این تحقیق ۱۲ تصویر ماهواره ENVISAT در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ از منطقه‌ی مورد مطالعه دریافت شد و با استفاده از روش تداخل سنجی داده‌های راداری تعداد ۲۳ زوج تصویر استخراج گردید. نتایج حاصل پردازش داده‌های راداری نشان می‌دهد که بیشترین مقدار جابجایی در سال در این منطقه ۱۹ سانتیمتر است [۵].

تانگ و همکاران (۲۰۱۶)، از داده‌های ماهواره ALOS-1 برای بررسی حرکات فعال زمین لغزش‌ها در طول رودخانه‌ی کلمبیا از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ استفاده کردند. آن‌ها از روش خط مبنای کوتاه استفاده کرده و سری زمانی حرکات زمین لغزش‌ها را از طریق آن به دست آوردند. برای انجام این تحقیق، ۲۴ تصویر ALOS از منطقه اخذ شده که با استفاده از این تصاویر ۱۳۳ تداخل نگار با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR به دست آمده است. با پردازش این دسته از داده‌ها به طور حدودی ۲۵ سانتیمتر جابجایی در راستای خط دید ماهواره در طول بازه زمانی چهار سال مشاهده به دست آمده است [۱۶].

معتق و همکاران (۲۰۱۶)، به مطالعه‌ی میزان فرونشست در دشت رفسنجان پرداخته‌اند. در این مطالعه

1- Interferometric Synthetic Aperture Radar (INSAR)

2- Global Positioning System (GPS)

حاشیه چاله رسی و دشت سرها و کوهستان تشکیل شده است و اقلیم آن تابعی از آب و هوای گرم و خشک فلات مرکزی ایران است. مطابق با آمار آب منطقه‌ای یزد، از ویژگی‌های اقلیمی این ناحیه، ناچیز بودن میزان بارش با میانگین سالانه در حدود ۷۵ میلی‌متر و میانگین سالانه تبخیر و تعرق بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر، است. دامنه تغییرات درجه حرارت مطلق سالانه در این ناحیه از 10°C تا بالای 43°C است. از آنجا که ریزش‌های جوی این ناحیه ناچیز و از رودخانه دائمی نیز برخوردار نیست، از این رو آب مورد نیاز به‌ویژه در زمینه کشاورزی در گذشته از قنات و امروز به‌طور عمده از چاه‌های نیمه عمیق و عمیق تأمین می‌شود. بهره‌برداری از آب چاه را برخلاف آب قنات به‌سختی می‌توان با شرایط اقلیمی موجود تطبیق داد، به‌خصوص در مناطقی که کشاورزی به‌صورت باغ (مانند باغ پسته و زردآلو) توسعه یافته است، در سال‌های خشک نیز همانند ایام ترسالی از آب چاه‌ها و حتی با میزان بیشتر استحصال می‌گردد. این امر باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در این دشت شده است [۴]. در شکل ۲ با استفاده از تصویر Sentinel 2، نقشه شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده^۱ برآورد گردیده و مقادیر سفیدرنگ مبین پوشش گیاهی است.

اطلاعات بیشتری را در رابطه با تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در کاهش منابع آب‌های زیرزمینی و فروریزش زمین می‌دهد [۱۰].

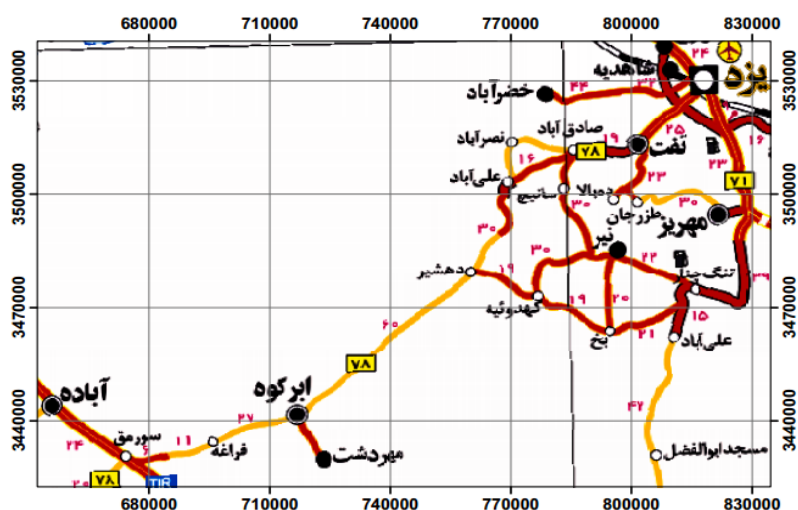
هدف اصلی تحقیق حاضر، پایش فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از فن تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ است که به بررسی زمین‌شناسی منطقه و هیدروژئولوژی و همچنین مطالعات ترازیبی دقیق برای ارزیابی و صحت نتایج تداخل سنجی پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ابرکوه 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 آباده استان فارس محدود است (شکل ۱). وسعت ابرکوه ۵۶۴۱ کیلومترمربع هست و در مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و ۳۰ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی و با ۱۵۵۰ متر ارتفاع از سطح دریای آزاد واقع شده است.

شهرستان ابرکوه با دو بخش مهرآباد و بهمن، از یک زمین‌ریخت‌شناسی بیابانی شامل چاله نمکی، بخش‌های



شکل ۱- نقشه موقعیت شهرستان ابرکوه در استان یزد

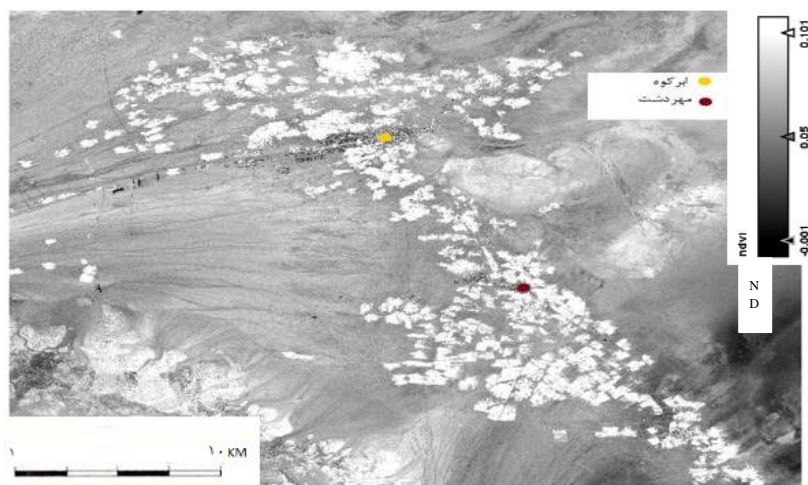
1- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

به حفره‌ها و مجاری سنگ‌بستر آهکی برسند، از آب‌دهی خوبی برخوردار می‌شوند و در اثر پمپاژ، آب با سرعت زیاد از حفره‌ها تخلیه می‌گردد. اگر لایه پوشش فوقانی سفره آب زیرزمینی دارای آب باشد، تحت فشار هیدروستاتیکی آب موجود در آن به سرعت از طریق حفره‌های موجود در سطح سنگ کف و مجاری متصل به آن به سوی چاه در حال بهره‌برداری رانده می‌شود. در اثر حرکت سریع و رو به پایین، رسوبات موجود در حفره سطحی به سوی غارهای زیرزمینی و چاه پمپاژ رانده شده و یک وضعیت خالی‌شدگی ایجاد می‌گردد. از آن جا که به‌طور مدام رسوبات شسته و حفره وسیع‌تر می‌شود، به‌طور مرتب این ریزش‌ها ادامه دارد. هرچه ناپایداری لایه‌های رسوبی فوقانی بیشتر باشد عمل فروریزش با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد.

بررسی نتایج نشان‌واره‌های حفاری دشت ابرکوه نشان می‌دهد که جنس ستون‌های چاه‌ها از رس، سیلت، شن و لایه‌های جوش سنگ به همراه گچ بوده و میزان درصد رس از بقیه بیشتر است. عوامل دیگری که به ناپایداری در نتیجه به فروریزش رسوبات کمک می‌کند، عمل شستشو در لایه‌های رسوبی است که به علت عدم وجود گراول پک مناسب در جداره چاه‌ها اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد در دشت ابرکوه با توجه به یکنواختی پوشش سطحی و وجود چاه‌های آب فراوان در آن و پایین بودن سطح آب، نمی‌توان چاه‌های حفرشده در دشت را عامل اصلی ایجاد فروچاله‌ها دانست [۱].

افزایش زمین‌های کشاورزی و نیاز به آب در این منطقه گسترش یافته و باعث افت سطح ایستایی در منطقه شده است. در نتیجه آن فضاها خالی که پیش‌تر از آب پر بودند، با تراکم لایه‌های بالایی به صورت تدریجی یا ناگهانی فروریخته که باعث رخداد پدیده‌های فرونشست و فروچاله شده است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، نوسانات سطح آب زیرزمینی به‌عنوان عامل مهمی در تورم و انقباض‌های پیایی رس خاک بیان شده است که از دلایل تشدید پدیده فرونشست و تشکیل فروچاله‌ها است [۹].

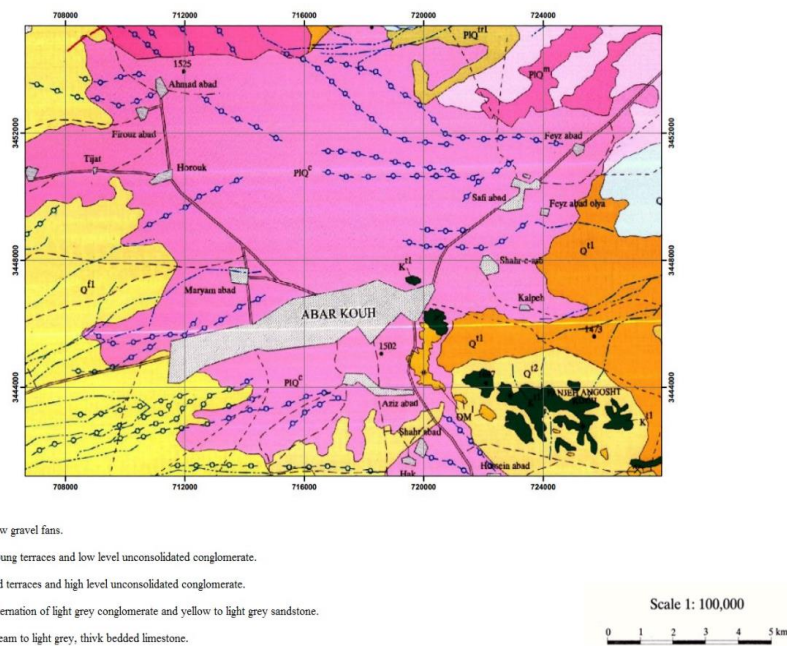
بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه ابرکوه (شکل ۳) این شهرستان در محدوده ایران مرکزی و بخشی از پهنه سنندج - سیرجان است. این منطقه دارای کهن‌ترین سنگ‌های منطقه دولومیت و سنگ‌های بیومیکرواسپاریت وابسته به پرمین پایانی است [۹]. طبق مطالعات انجام گرفته دلایل زمین‌شناختی رخداد پدیده فرونشست در این منطقه هنوز مشخص نشده است. هرچند وجود کارست و همچنین رس با میان لایه‌های کانی‌های ایلیت و اسمکتایت، از دلایل فرونشست معرفی شده است. با توجه به نیمرخ‌های تهیه شده مناطقی که در سنگ کف آن‌ها شکستگی ثبت شده، ضخامت پوشش رسوبی به علت عملکرد غسل‌های سنگ کف بالا آمدگی کم گردیده است. بی‌شک این مناطق در صورتی که سایر عوامل مؤثر در رخداد فروچاله‌ها مهیا باشد، برای وقوع پدیده فروچاله در دشت ابرکوه مستعدتر است [۱]. با وجود چاه‌های آب در دشت ابرکوه به‌ویژه در نزدیکی فروچاله‌ها، وقتی این چاه‌ها



شکل ۲- نقشه شاخص پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنتینل ۲. نقاط سفیدرنگ، مناطق کشاورزی را بیان می‌کند

باعث افزایش سرعت حرکت آب در جهت افقی و عمودی شده است. در نتیجه رسوبات انتقال یافته، حفره‌های در مرز بین سنگ کف و پوشش روئین به وجود می‌آید. با بزرگ‌تر شدن حفره‌ها، مقاومت سقف حفره کاهش یافته و به‌طور ناگهانی ریزش می‌کند. پایین افتادن سطح آب زیرزمینی با متمرکز نمودن رواناب می‌تواند باعث افزایش سرعت تشکیل فروچاله‌ها شود [۱]. در شکل ۴ نمایی از فروچاله ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

بر اساس گفته افراد محلی در دو روستای شهرستان ابرکوه (فیض‌آباد و هروک) فروچاله‌ها قبل از حفر چاه‌های کشاورزی نیز در منطقه وجود داشته است و با حفر آن‌ها، این پدیده گسترش یافته است. در این دو منطقه تعداد ۳۱ فروچاله پوششی و فرونشستی به وقوع پیوسته است. با توجه به برداشت و بازدیدهای صحرایی صورت گرفته تمامی فروچاله‌های ابرکوه در پوشش آبرفتی رخ داده و از نوع فروچاله‌های کارستی فرونشستی و ریزشی پوششی هستند. وجود خاک‌های چسبنده و مجاری در اعماق،



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی منطقه ابرکوه



شکل ۴- تصویری از فروچاله ایجاد شده در منطقه ابرکوه

$$s_1 = A_1 e^{i\varphi_1} \quad s_2 = A_2 e^{i\varphi_2} \quad (1)$$

$$s_1 \cdot s_2^* = A_1 A_2 e^{(\varphi_1 - \varphi_2)} = e^\Phi \quad (2)$$

که در آن:

s_1 و s_2 سیگنال‌های ثبت‌شده در A تصاویر اول و دوم برای یک پیکسل متناظر، A_1 و A_2 دامنه سیگنال‌های ثبت‌شده، φ_1 ، φ_2 فاز آن‌ها، A حاصل ضرب دامنه سیگنال‌های ذکرشده و در آخر Φ فاز تداخل نما است [۱۳].

$$\Phi_{int} = W(\Phi_{topo} + \Phi_{def} + \Phi_{FE} + \Phi_{noise} + \Phi_{atm} + \Phi_{orb}) \quad (3)$$

که در آن:

Φ_{int} فاز تداخل نما، Φ_{topo} فاز توپوگرافی، Φ_{def} فاز ناشی از تغییرات ارتفاع، Φ_{FE} فاز ناشی از تغییر زاویه دید سنجنده در امتداد آزمون یا زمین مسطح، Φ_{noise} فاز ایجادشده در اثر نویز، Φ_{atm} فاز مربوط به سهم اتمسفر و Φ_{orb} فاز به وجود آمده در اثر خطای مداری سنجنده است [۱۳].

داده‌های مورد استفاده

تصاویر استفاده‌شده در این تحقیق (جدول ۱) از سنجنده ASAR ماهواره Envisat است. ماهواره Envisat در سال ۲۰۰۲ توسط سازمان فضایی اروپا به منظور پایش تغییرات زمین، اتمسفر و غیره به فضا پرتاب شد. این ماهواره در ارتفاع ۸۰۰ کیلومتری و در یک مدار خورشید آهنگ قطبی به دور زمین می‌چرخد. ماهواره در باند C از محدوده امواج الکترومغناطیسی با طول موج ۵/۶ سانتیمتر و فرکانس ۳۱ مگاهرتز و دوره تکرار ۳۵ روزه تصویربرداری می‌کند. تصویر مبنا در پردازش‌ها با علامت ستاره مشخص شده است و دیگر داده‌ها، تصویر پیرو است.

تداخل سنجی راداری

در طول سه دهه گذشته، تداخل سنجی راداری با دریچه مصنوعی به فناوری و روشی مؤثر برای اندازه‌گیری پدیده‌های مختلف جابه‌جایی و تغییر شکل سطح زمین تبدیل شده است [۲]. 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 [۱۳].

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره مورد استفاده در پژوهش

نوع ماهواره	گذر سنجنده	ترک	فریم	تاریخ
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۳/۱۰/۰۶
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۳/۱۱/۱۰
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۳/۱۲/۱۵
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۴/۰۱/۱۹
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۴/۰۲/۲۳
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۴/۰۷/۱۲
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۴/۰۹/۲۰
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۴/۱۱/۲۹
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۵/۰۲/۰۷
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۵/۰۴/۱۸
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۵/۰۶/۲۷
انویست	پایین گذر	۲۹۲	۲۹۷۹	۲۰۰۵/۰۹/۰۵

از سری‌های زمانی تداخل سنجی راداری^۶، به شرح زیر استفاده می‌شود:

الف) تداخل سنجی پراکنش گرهای پایا^۷

استفاده از عوارض و پراکنش گرهای پایا که در طول زمان‌های طولانی دارای الگو و رفتار پراکنشی ثابتی هستند را تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی گویند. در واقع این عوارض به‌طور عمده سازه‌های انسانی و یا عوارض طبیعی چون کوه‌ها و بیابان‌ها هستند [۳].

ب) فن دسته‌های طول مبنا کوتاه^۸

پراکنش گرهای روی زمین به دودسته نقطه‌ای و توزیعی تقسیم می‌شوند. پراکنش گرهای نقطه‌ای آن دسته از عوارضی هستند که سیگنال ارسالی از سمت سنجنده را با قدرت زیادی به سمت آن باز می‌گردانند. در مقابل پراکنش گرهای توزیعی، سیگنال ارسالی را با قدرت کمتری به سمت آن باز می‌گردانند. با توجه به مطالب نقاط پایا از دسته پراکنش گرهای نقطه‌ای هستند. در بررسی پراکنش گرهای توزیعی از تداخل سنج‌هایی با طول مبنا مکانی و زمانی کوتاه جهت تعیین جابه‌جایی پوسته زمین استفاده می‌شود [۳].

مراحل تحلیل سری‌های زمانی فن تداخل سنجی راداری در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از بارز سازی^۹ تصاویر خام، داده‌های مختلط تک منظر^{۱۰} برای پردازش‌های تداخل نگار، وارد مرحله بعد می‌شوند. در ابتدا تصویری که مجموع عدم همبستگی تمام تداخل نگارهای تولید شده با آن تصویر کمینه شود، تصویر مبنا^{۱۱} و تصاویر باقیمانده به‌عنوان پیرو^{۱۲} انتخاب می‌شوند. سپس بر اساس داده‌های مداری سنجنده، همه تصاویر در یک سامانه مختصات واحد به‌نحوی که برای هر پیکسل تصویر مبنا یک پیکسل متناظر با آن در تمامی تصاویر پیرو برای

به‌منظور محاسبه فاز ناشی از تغییرات ارتفاعی، فازهای بیان شده از مقدار کل فاز حذف گردیده است. فاز باقی مانده دارای ابهام^۱ است که این بدین معنی است که تداخل نگار نهایی دارای اطلاعات راجع به مقدار مطلق فاز نیست و فاز آن به‌صورت نسبی است. این تداخل نگارها به‌صورت منحنی‌های بسته رنگی^۲ هستند که هر منحنی بسته مبین تغییرات فاز 2π است. پردازش بازیابی فاز^۳ به‌منظور محاسبه فاز کامل از مقادیر جزئی فاز تداخل نگارها صورت می‌گیرد [۱۱]. به دلیل محدودیت‌های استفاده از تداخل سنج‌ها، به‌جای استفاده از یک تصویر، از یک دسته تصویر استفاده می‌شود که به این روش، سری‌های زمانی گویند. نا همبستگی هندسی و زمانی فاز پراکنشی و خطای اتمسفری از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های استفاده از تداخل سنجی است. نا همبستگی زمانی زیاد مانند مناطق کشاورزی و استفاده از تصاویر با طول مبنای بلند جزو نا همبستگی هندسی و زمانی هستند. هدف از سری‌های زمانی غلبه بر محدودیت‌های بیان شده است. بدین منظور برای کاهش اثر فاز پراکنشی، از پیکسل‌هایی با همدوسی بالا (پراکنشی کمتر) و کاهش نویز با بهره‌گیری از روش‌هایی خاص استفاده می‌شود. روش‌های بیان شده باعث معرفی دو فن مجزا بر اساس پراکنش گرهای روی زمین شده است که به پراکنش گرهای پایا^۴ و پراکنش گرهای توزیعی^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند. روش اول به بررسی نقاطی که فاز پراکنشی کمی دارند و در طول زمان دارای الگوی پراکنشی ثابتی هستند پرداخته و در روش دوم از پراکنش گرهای بر روی زمین که تحت تأثیر نا همبستگی قرار دارند و در طول زمان دچار تغییر می‌شوند استفاده می‌شود. به‌منظور کاهش اثر اتمسفری به دلیل نا همبستگی زمانی و همبستگی مکانی اتمسفر، میانگین‌گیری از دسته تصاویر تداخل سنجی انجام می‌گیرد. به‌منظور پایش فرونشست در بازه زمانی خاص،

6- Time-series Interferometric Synthetic Aperture Radar (T-INSAR)

7- Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

8- Small Baseline Subsets (SBAS)

9- Focusing

10- Single Look Complex (SLC)

11- Master

12- Slave

1- Wrapped

2- Fringe

3- Unwrapping

4- Persistent Scatterers

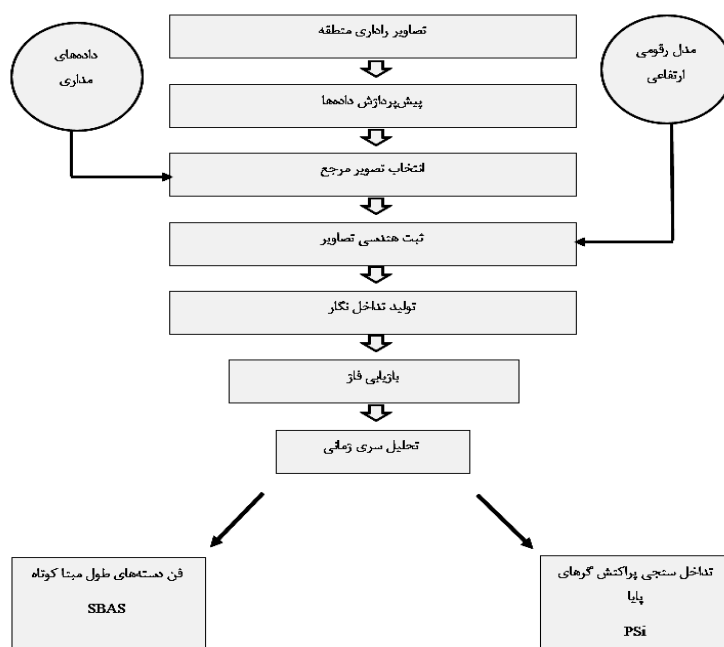
5- Distributed Scatterers

دشت (هروک تا شرق فیض آباد) سازندهای الیگومیوسن و سنگ آهک مرجانی و در جنوب شرق ابرکوه، سنگ آهک کرتاسه گزارش شده است [۹]. 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 بیان شده است. بر اساس آب نمود آبخوان آبرفتی دشت ابرکوه (شکل ۶) سالانه ۰/۶ متر افت سفره برآورد گردیده است. نقش نوسانهای سطح آب زیرزمینی در تشدید و تشکیل پدیدههای فرونشست و فروچاله نسبت به نقش افت سطح آب زیرزمینی اهمیت بسزایی دارد.

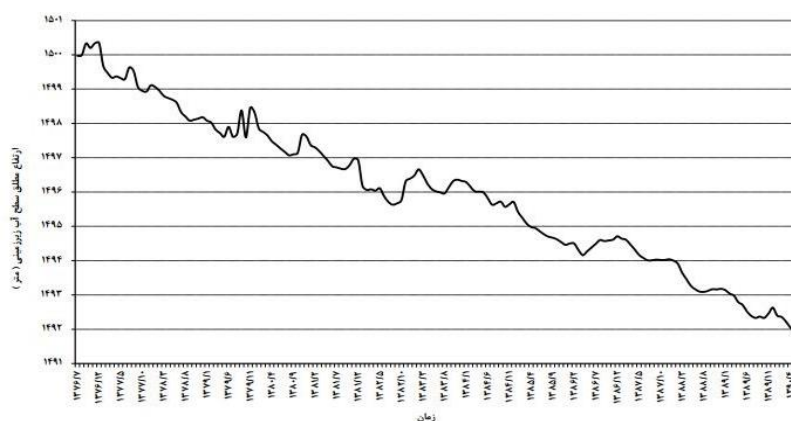
نگاشت پیکسل به پیکسل وجود داشته باشد، قرار می گیرند. سپس پیکسل های متناظر در هم ضرب مختلط شده و تداخل نگار حاصل می شود. اگر منظور بررسی تداخل نگارها باشد پس از این مرحله بازیابی فاز صورت گرفته در غیر این صورت پس از بررسی های سری زمانی بازیابی فاز برآورد می گردد.

نتایج

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 اما در بخش شمالی



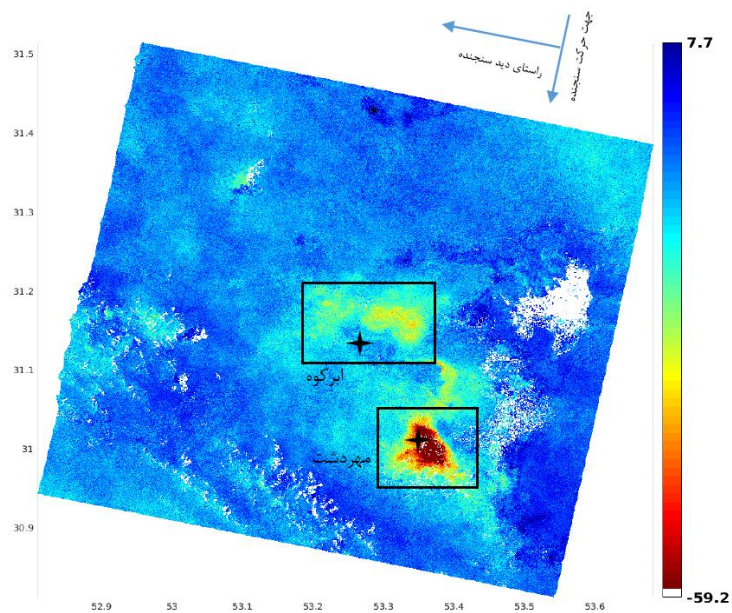
شکل ۵- نمودار مراحل پردازش سری های زمانی [۱۵]



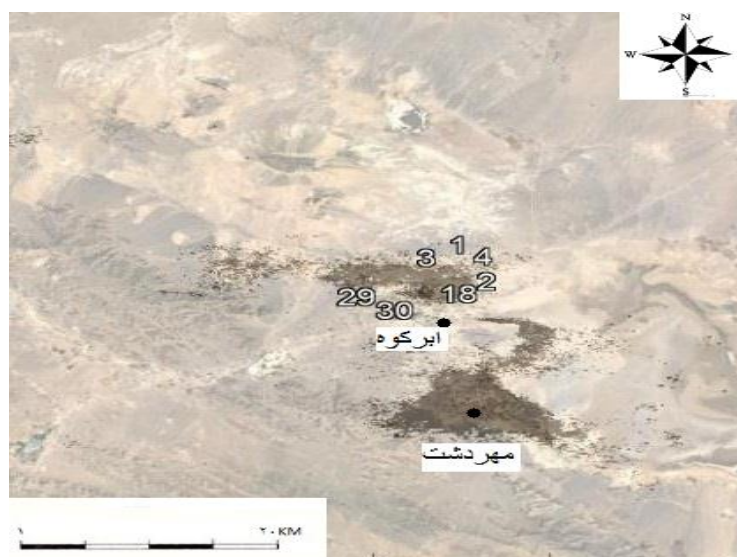
شکل ۶- آب نمود واحد دشت ابرکوه [۹]

محدوده‌های فروچاله‌ها است که با اعداد ۱ تا ۳۰ مشخص شده‌اند. در ادامه مقادیر فرونشست در جهت قائم با جای‌گذاری زاویه فرود معین برحسب میلی‌متر محاسبه گردیده‌اند. بنا بر شکل ۹، بیشترین مقدار فرونشست در بالای محدوده شهری ابرکوه ۲ تا ۳ سانتیمتر در سال و کمترین میزان فرونشست ۱ تا ۲ سانتیمتر در سال برآورد گردیده است. در محدوده شهر ماهدشت بیشترین میزان مقادیر فرونشست ۵ سانتیمتر در سال و کمترین مقدار آن ۱ تا ۲ سانتیمتر در سال معین شده است.

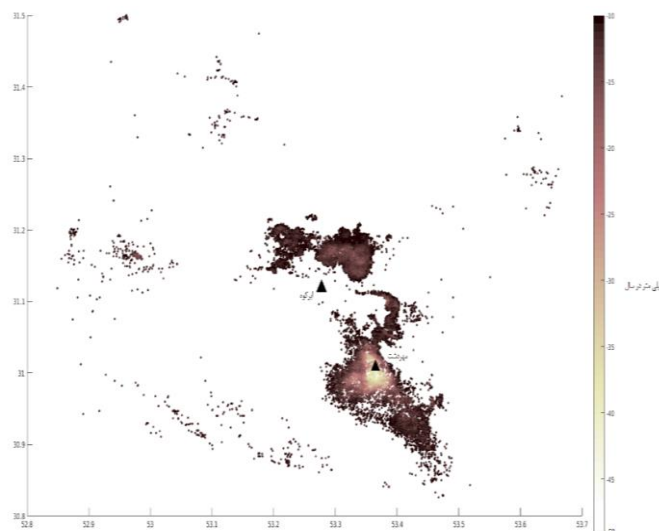
تمامی تداخل‌سنج‌ها نسبت به تصویر مینا و با استفاده از نرم‌افزار Doris محاسبه شده‌اند. فاز مشارکتی مربوط به توپوگرافی به وسیله مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر ماهواره SRTM^۱ از فاز تصاویر کسر و نتایج برای بررسی سری‌های زمانی از نرم‌افزار Stamps استفاده شده است. در شکل ۷ میانگین سرعت فرونشست منطقه در جهت زاویه دید سنجنده برآورد گردیده است. در شکل ۸، مناطق حاوی سیگنال‌های فرونشست مشخص شده است. نکته حائز اهمیت در این تصویر تطبیق مناطق تحت فرونشست با



شکل ۷- نقشه متوسط نرخ فرونشست در راستای دید سنجنده. نقاط سفیدرنگ، مناطق تحت پدیده فرونشست را نشان می‌دهد.



شکل ۸- موقعیت فروچاله‌های اتفاق افتاده در منطقه و گسترش محدوده‌های در حال فرونشست بر روی تصویر گوگل ارث. شماره‌های مشخص شده بر روی تصویر مبین فروچاله‌های ایجاد شده است

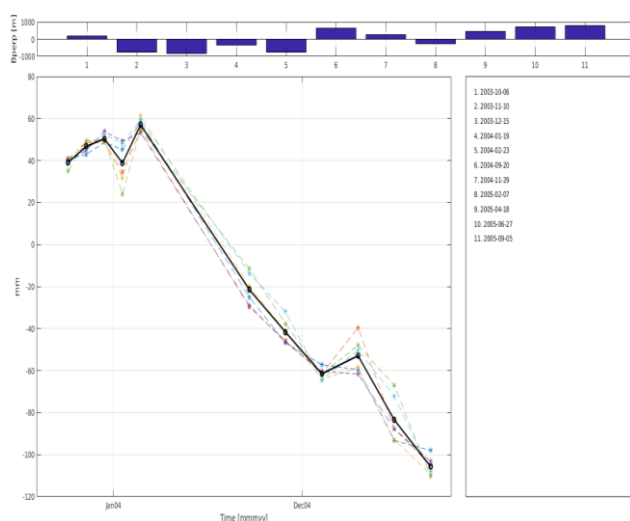


شکل ۹- نقشه میانگین سرعت فرونشست در بخش ابرکوه و مهردشت

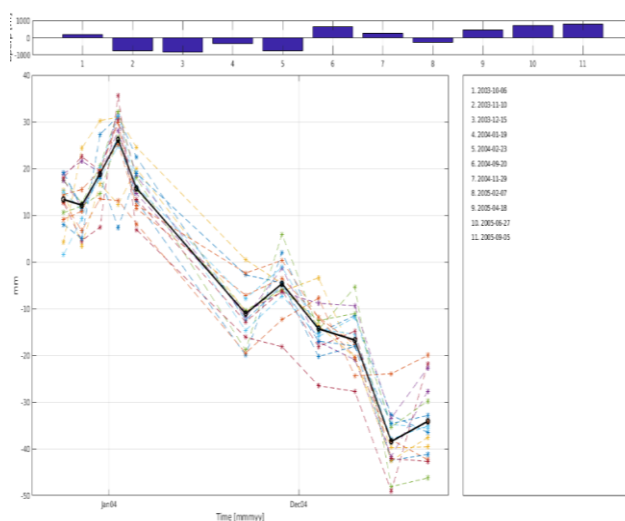
به دقت $0/2$ میلی‌متر در یک کیلومتر اخذ شده است. سری دوم مشاهده‌ها (تا سال ۱۳۸۰) به کمک تجهیزات رقومی و با استفاده از دستگاه DINI12 ZEISS به دقت $0/3$ میلی‌متر در یک کیلومتر به صورت رفت و برگشت انجام شده است. موقعیت ایستگاه‌های ترازبایی دقیق منطقه ابرکوه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس مشاهده‌های حاصل از آن به ارزیابی محاسبات فرونشست با استفاده از فن تداخل سنجی راداری پرداخته شده است. مقادیر ترازبایی دقیق موجود در سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۰، بیشینه نرخ فرونشست را 8 میلی‌متر مشخص کرده است (شکل ۱۳).

در سری زمانی تصاویر ابرکوه و مهردشت (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) میزان جابه‌جایی قائم ناشی از فرونشست در بین سال‌های مورد پردازش، نسبت به نقاط شهری ابرکوه و مهردشت محاسبه گردیده است. بیشینه تغییرات ارتفاعی در جهت قائم در ابرکوه 6 سانتیمتر و در محدوده مهردشت 15 سانتیمتر مشخص شده است. میزان جابه‌جایی قائم در بازه‌های زمانی 2003 تا 2005 در زیر نشان داده شده است.

داده‌های ترازبایی دقیق منطقه از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۰ موجود است. سری اول مشاهده‌ها تا سال ۱۳۷۲، با تجهیزات اپتیکی و با استفاده از دستگاه N3 WILD



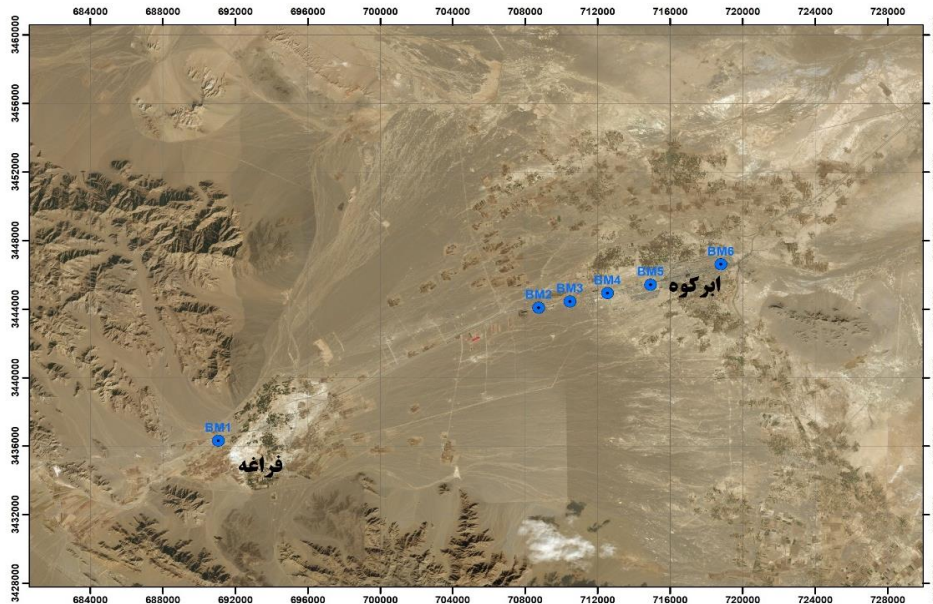
شکل ۱۱- سری زمانی تصاویر منطقه مهردشت



شکل ۱۰- سری زمانی تصاویر منطقه ابرکوه

سنجی ۱۲ میلی‌متر است. به دلیل عدم هم‌زمانی دو داده موجود، همچنین ثابت نبودن نرخ فرونشست در سال‌های متفاوت و خطای پردازش‌های تداخل سنجی، نمودار حاصله دارای مقادیر یکسانی نبوده است. روند کلی دو نمودار به تقریب از هم پیروی می‌کنند.

به دلیل یکسان نبودن زمان‌های دو داده موجود امکان ارزیابی دقیق محاسبات وجود ندارد، ولی مناطق فرونشست به صورت کلی در هر دو داده ترازیبی و تداخل سنجی به خوبی نشان داده شده است. بنا بر شکل ۱۳، بیشترین میزان فرونشست محاسبه شده از طریق تداخل



شکل ۱۲- موقعیت ایستگاه‌های مبنای ترازیبی دقیق بر روی تصویر گوگل ارث



شکل ۱۳- ارزیابی مقادیر فرونشست محاسبه شده به کمک مقادیر ترازیبی

بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعات صورت گرفته برای بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی درشفت فرونشست زمین در ابرکوه یزد کارستی شدن و واگرایی بالای کانی‌های رسی موجود در منطقه از عوامل تشدید فرونشست و فروچاله در این منطقه بیان شده‌اند. بر طبق این مطالعات دلایل زمین‌شناختی رخداد پدیده فرونشست در این منطقه هنوز مشخص نشده است. هرچند وجود کارست و همچنین وجود رس با میان لایه‌ای کانی‌های ایلیت و اسمکتیت، از دلایل فرونشست معرفی شده‌اند. با توجه به آزمایش‌های شیمیایی، ژئوشیمی و کانی‌شناسی صورت گرفته در منطقه، فراوانی میزان منیزیم در بخش آهک خاک‌ها و رسوبات گزارش شده است. از این رو دولومیتی بودن رسوبات تأیید و باوجود حلالیت کمتر دولومیت نسبت به کلسیت، افزوده شدن یون منیزیم به سیستم آب‌و خاک باعث ناپایداری رس‌های موجود در خاک شده است [۴]. میزان افت سطح ایستابی به صورت متوسط در هر سال برابر ۰/۶ متر برآورد گردیده است. بر طبق مطالعات به منظور بررسی عوامل مؤثر در وقوع فروچاله‌های دشت ابرکوه علاوه بر میزان افت سطح ایستابی، نوسان‌های زیاد سطح آب زیرزمینی از علل رخداد و تشدید پدیده‌های گفته شده است. نوسان‌های سطح آب زیرزمینی به دلیل افت سطح آب توانسته است تأثیر رس موجود در خاک‌ها را در نشست زمین با تورم و انقباض‌های پیاپی تشدید نماید [۱۲]. با توجه به مطالب بالا و به دلیل اهمیت موضوع فرونشست و فروچاله در منطقه ابرکوه، به منظور بررسی مناطق تحت پدیده فرونشست و محاسبه میزان جابه‌جایی ناشی از آن، در این پژوهش سعی در محاسبه سرعت فرونشست در دو محدوده ابرکوه و مهردشت شده است. محققین مختلفی از روش تداخل سنج راداری برای محاسبه مقدار فرونشست زمین در محدوده‌های شهری، راه‌آهن، خطوط انتقال نیرو و تأثیر محیط زیستی و کشاورزی استفاده کرده‌اند [۲،۳،۵،۶،۷،۸،۹،۱۴،۱۵،۱۶]. در بسیاری از این مطالعات [۱۵] این روش در تشخیص علت به وجود آمدن فروچاله‌ها کمک نموده است. در مطالعاتی دیگر دقت قابل قبول روش در حد میلی‌متر تأکید گردیده است

[۲،۱۱،۱۴]. در این مطالعات صحت سنجی نتایج روش تداخل سنجی راداری با اندازه‌گیری‌های مستقیم مانند ترازیبی دقیق و سامانه موقعیت‌یاب جهانی بررسی و نقد شده است. در مطالعات صورت گرفته برای بررسی سرعت فرونشست در اردکان یزد [۶ و ۷] انطباق خوبی بین مقدار فرونشست حاصل از روش تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های سری زمانی نقاط ترازیبی دقیق گزارش شده است. در پژوهش حاضر به دلیل پوشش سراسری محدوده توسط تصاویر راداری از این روش استفاده گردیده است. رخداد فرونشست در محدوده مخروط افکنه‌های موجود در منطقه و احداث خط راه‌آهن در نزدیکی این مناطق، گسترش شکاف‌های حاصل از فرونشست به سمت جاده و مناطق شهری، ایجاد فروچاله‌های متعدد در منطقه و خسارت‌های محیط زیستی و شهری در این منطقه، به منظور بررسی پدیده فرونشست و تعیین نواحی پرخطر برای تصمیم‌سازی مناسب برای کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده در منطقه، از سری زمانی تداخل نگارها استفاده شده است.

تحقیق پیش رو در منطقه ابرکوه یزد، با توجه به رخداد پدیده فروچاله و مخاطره‌های ناشی از آن به کمک فن تداخل سنجی راداری به شناسایی مناطق تحت فرونشست پرداخته شده است. به دلیل همدوسی بالای دشت مورد نظر، از فن پراکنش گرهای پایا استفاده شده است. تطابق مکانی فرونشست محاسبه شده و فروچاله‌های بیان شده در مطالعات [۱۲] نشان می‌دهد که در منطقه شهرستان ابرکوه در اطراف فروچاله‌های تشکیل شده میزان فرونشست به بیشترین مقدار خود رسیده است. بیشینه و کمینه مقادیر فرونشست در این منطقه به ترتیب ۲ تا ۳ و ۱ تا ۲ سانتیمتر در سال معین شده است. در محدوده مهردشت بیشترین مقدار فرونشست ۵ سانتیمتر در سال و کمترین مقدار آن ۱ تا ۲ سانتیمتر در سال برآورد گردیده است. به منظور ارزیابی و صحت نتایج در این تحقیق از مطالعات آب‌شناسی و همچنین بررسی سری زمانی نقاط ترازیبی دقیق موجود در منطقه استفاده شده است. بررسی‌های نقاط ترازیبی دقیق موجود در منطقه در سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۰ نشانگر رخداد فرونشست در منطقه با بیشینه سرعت متوسط ۸

(تعداد تداخل‌نگار بیشتر)، خطاهای پردازش تقلیل یافته و نتایج حاصله از آن با یافته‌های پژوهش پیش رو مقایسه شوند تا به درک درستی از فرونشست منطقه برای تصمیم‌گیری مناسب برای کنترل پدیده‌های فرونشست و فروچاله رسید. پیشنهاد می‌گردد برای ارزیابی دقیق‌تر یافته‌ها تا حد امکان بازه زمانی بین دو داده ترازیبی یا جی‌پی‌اس و تداخل سنجی، کم باشد.

میلی‌متر در سال است. تطابق تقریبی بین یافته‌های تحقیق و نتایج ترازیبی دقیق وجود دارد. بر اساس یافته‌های تحقیق منطقه ابرکوه از سال ۱۳۶۴ فرونشست داشته است که نرخ فرونشست آن تا سال ۱۳۸۴ در حال افزایش بوده است.

پیشنهاد می‌شود به‌منظور بررسی دقیق فرونشست و تأثیر ناشی از آن، با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ به دلیل بازه زمانی ۲۰۱۴ تاکنون و تعداد تصاویر بیشتر

References

- [1]. Abarghoui, S. (2014). Studies of the Karst and its Effect on Structures, Bachelor's Thesis, Faculty of Civil Engineering, Yazd University. (in Farsi)
- [2]. Ajourlo, P. & Samiei, S. (2018). The Result of the Subsidence of the Local Mechanisms in Tehran City in 2014-2018 By Sentinel-1A Radar interferometry, Geospatial Information Technology. (in Farsi)
- [3]. Ajourlo, P. (2019). Feasibility of using radar interferometry time series to monitor subsidence caused by subway construction and civil infrastructure in Tehran, Master's Thesis, Faculty of Surveying Engineering, University of Tehran. (in Farsi)
- [4]. AkhavanGhalibaf, M., Bidoki, H. & Mehrnahad, H. (2014). The Role of Clay Mineralogical Features in the Intensity of Subsidence of Yazd Abarkouh Plain, *Geographical Research on Desert Areas*, 3(1), 207-228. (in Farsi)
- [5]. Alibakhshi, H. R. (2016). Investigating the subsidence rate of Varamin plain using geodetic tools of *Precision Levelling* data, GPS and InSAR radar images, Master's degree, Faculty of Surveying Engineering, Shahrood University of Technology. (in Farsi)
- [6]. Amighpey, M. & Arabi, S. (2009). Yazd Subsidence Research Project Report Using Radar Interferometry and Precision Alignment, National Survey Organization. (in Farsi)
- [7]. Amighpey, M., Arabi, S. & Talebi, A. (2009). Investigation of Yazd Subsidence by Radar Interferometry and precise levelling, *Geoscience*, 20(77), 157-164. (in Farsi)
- [8]. Bhattarai, R., Alifu, H., Maitiniyazi, A. & Kondoh, A. (2017). Detection of land subsidence in Kathmandu valley, Nepal, using DInSAR technique, *Land*, 6(2), 39-54.
- [9]. 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 Thesis, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University. (in Farsi)
- [10]. Calo, F., Notti, D., Galve, J.P., Abdikan, S., Gorum, T., Pepe, A. & Balik, F. (2017). DInSAR based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya plain, Turkey, *Remote sensing*, 9(1), 83-98.
- [11]. Hanssen, R. F. (2001). Radar Interferometry; Data Interpretation and Analysis, Ph.D. Thesis, Faculty of Civil

Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

- [12]. Karam, A., Ziaeiian, P. & Mohasel, N. A. (2012). Investigating the Factors Affecting the Occurrence of Sinkholes in Abarkuh Plain and Mapping Hazardous Areas, *Geographical Research on Desert Areas*, 1(1), 17-34. (in Farsi)
- [13]. Maghsoudi, Y. & Mahdavi, S. (2015). Basics of Radar Remote Sensing, Tehran, Khaje Nasiruddin Toosi University Press. (in Farsi)
- [14]. Motagh, M., Shamschiri, R., Haghghi, M.H., Wetzel, 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, 134-151.
- [15]. Sheikahmadi, S. P. (2017). Assessment of sinkholes using aerial and radar satellite imagery, Master's Thesis, Faculty of Surveying Engineering, University of Tehran. (in Farsi)
- [16]. 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 Environment*, 186, 405-415.

Subsidence monitoring of Yazd Abarkuh plain using radar interferometry technique based on persistent scatterers

- 1- M. Sharafat, MSc Student in Mining Engineering, Faculty of Mining and Metallurgy, Yazd University, Iran.
- 2- A.H. Ansari, Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran.
h.ansari@yazd.ac.ir
- 3- S. H. Mojtahedzadeh, Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran.
- 4- A. Ghorbani, Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran.

Received: 13 Apr 2019

Accepted: 11 Jan 2020

Abstract

Radar interferometry technique is an efficient tool to study changes in the Earth's crust. The method is based on the phase difference between two image pairs at different time intervals. In this research, subsidence of Abarkuh plain, Yazd province investigated. The subsidence is actually the lowering of the Earth's surface due to the natural and human activities. Excessive extraction of underground resources, especially water, is a main cause of subsidence in many plains in Iran. Hydrological studies in this area show a groundwater level drop of 0.6 meters per year. According to the geological studies, karst developments and dispersive clay soils are two causes of subsidence. By the radar interferometry technique over a period of 2003 to 2005 using 12 Envisat satellite images, the average subsidence rate in the region was estimated. In Abarkouh, maximum subsidence rate is 2 to 3 cm/year and in Mehrdasht area 5 cm/year. Accurate alignment studies have been used for the accuracy of the calculations between 1985 and 2001, which are in agreement with the results obtained by radar interferometry. The reasons for this discrepancy are the inconsistency between two available data and the radar interferometry error.

Keyword: Subsidence; Synthetic Aperture Radar Interferometry; Sinkhole; Envisat; Yazd.