

پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل‌آباد)

حمیدرضا کوه‌بنانی^۱، محمدرضا یزدانی^{۲*}، سیدکیوان حسینی^۴

۱. دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲. دانشجوی دوره فرصت مطالعاتی مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳. دانشیار دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۴. استادیار مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

* نویسنده مسئول: m_yazdani@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱

چکیده

اندازه‌گیری رخداد فرونشست در مقیاس وسیع به دلیل نرخ کند و بطئی آن چالش‌برانگیز است و نیاز به فناوری‌های پیشرفته دارد. اولین پیامد جبران‌ناپذیر این پدیده مخرب، کاهش عمق مخزن آبخوان‌ها است. به دلیل استخراج بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی و افت سطح پی‌زومتری در بسیاری از آبخوان‌های کشور، فرونشست زمین با سرعت‌های مختلف در حال رخ دادن است. روش تداخل‌سنجی راداری با پنجره مصنوعی در مناطقی که اطلاعات ژئودزی زمینی کافی موجود نیست، جایجایی در راستای قائم را به‌خوبی و در گستره وسیع نمایش می‌دهد. در پژوهش حاضر از تصاویر جدید Sentinel-1A مربوط به سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ برای بررسی نرخ فرونشست استفاده شد. منطقه مورد مطالعه دشت کاشمر و خلیل‌آباد است. پس از اطمینان از همبستگی زیاد تصاویر، تداخل‌نگار اولیه تهیه شد. سپس با بهره‌گیری از روش کوتاه‌ترین خط مبنای مکانی و زمانی، فازهای غیرضروری حذف گردید. در پایان فاز جایجایی محاسبه و به مؤلفه قائم تبدیل گردید. نتایج نشان داد این منطقه در بیشترین حالت ۱۷ سانتیمتر در سال فرونشست دارد و بیشتر در حومه جنوب‌غرب شهر کاشمر و مناطق غربی دشت خلیل‌آباد متمرکز است. به دلیل ناهمگن بودن نرخ فرونشست، این منطقه مستعد شکل‌گیری شکاف‌های طولی و شق است. نقشه پایانی به‌دست‌آمده می‌تواند به مدیران سازمانی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک در زمینه حفاظت و مدیریت منابع آبی و مخاطرات طبیعی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک شایانی نماید.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی؛ سنتینل؛ پهنه‌بندی؛ نشست زمین؛ کوتاه‌ترین خط مبنا

■ مقدمه

کاهش بارندگی ناشی از خشکسالی موجب وابستگی بیشتر به منابع آب زیرزمینی در سطح جهانی به ویژه در بخش کشاورزی شده است. فرونشست زمین پدیده‌ای کند و نامحسوس و یا نشست ناگهانی سطح زمین بر اثر جابجایی ذرات خاک است. بردار حرکتی فرونشست بیشتر قائم است و بردار جابه‌جایی افقی قابل اغماض است. مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک، متراکم شدن و فشردگی رسوبات در اثر برداشت بی‌رویه از منابع سفره‌های آب زیرزمینی است (۳۸). چنانچه لایه‌های رسی آبدار بین لایه‌های ماسه‌ای قرار گرفته باشند، این پدیده به صورت گسترده‌تر و حادث‌تر مشاهده خواهد شد (۲۲). فرونشست زمین معمولاً با تأخیر زمانی پس از برداشت طولانی مدت منابع آب زیرزمینی رخ می‌دهد (۳۵). مقدار فرونشست به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع تنش وارده بستگی دارد (۶). با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد فرونشست می‌شود. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر زمان‌بر است؛ بنابراین به دنبال کاهش سطح پی‌زومتری، فرونشست با تأخیر زمانی رخ خواهد داد (۳۰). فرونشست ناشی از افت سطح سیال عمدتاً در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه‌های شن و ماسه قرار دارد صورت می‌گیرد (۳۴). در چنین شرایطی تراکم غیر الاستیک ناشی از افزایش تنش مؤثر در خاک رخ می‌دهد و چینش دانه‌های خاک به هم‌خورده و ضخامت لایه عمودی کم می‌شود (۸). در مناطقی که رسوبات ضخامت چندانی ندارد و برداشت آب زیرزمینی به صورت بی‌رویه ادامه دارد، خطواره‌ها و شکاف‌ها در سطح اراضی مخصوصاً اراضی کشاورزی مشاهده می‌شود (۳۷) و به نام پدیده شق شناخته شده است. از جمله کاربردهای تصاویر راداری می‌توان به پژوهش‌هایی همچون مدل‌سازی سیکل زلزله (۳۲)، پهنه‌بندی زمین‌لغزش (۳۶)، فعالیت‌های زمین‌گرایی (۲۲)، اندازه‌گیری فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه آب زیرزمینی (۱۹)، تغییر شکل و جابجایی سازه‌هایی از قبیل پل (۱۸) و سد (۲۵)، فرونشست و زمین‌لغزش ناشی از فعالیت‌های تونل‌سازی (۴) و

معدنکاری (۱۲) و همچنین مدل‌سازی حرکات تکتونیک گسل‌ها (۱۷) شناسایی گنبد‌های نمکی فعال (۱) و فعالیت آتشفشان‌ها (۹) اشاره کرد.

تداخل‌سنجی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای راداری با پنجره مصنوعی یا SAR^۱ روش دقیق مبتنی بر استفاده از حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه است و قادر است با دقت قابل توجهی در حد میلی‌متر تغییرات جابجایی ارتفاعی در سطوح وسیع و در طی بازه‌های زمانی مختلف را اندازه‌گیری نماید (۷، ۱۱، ۳۱). این روش برای برآورد جابه‌جایی‌های قائم در مقیاس وسیع امکان‌پذیر است. اساس این روش به این صورت است که اگر دو تصویر راداری از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شود، اینترفروگرام یا تداخل‌نگار مربوط به ترکیب این دو تصویر تغییرات اندک سطح زمین در مقیاس میلی‌متر را نشان خواهد داد. در خصوص منطقه‌ای از سطح زمین که دو بار و با یک هندسه مشابه تصویربرداری شده باشند، چنانچه مسافت رادار-زمین-رادار در هر دو تصویر یکسان باشد، فازهای برگشتی^۲ یکسان خواهد بود و این بدین معناست که اختلاف ارتفاعی صورت نگرفته است؛ اما چنانچه سطح موردنظر در پوسته زمین جابه‌جایی (افقی یا قائم) داشته باشد. مسافت رادار-زمین-رادار تغییر کرده و فاز تصویر دوم در اصطلاح شیفیت خواهد داشت. این شیفیت فاز دلالت بر جابه‌جایی سطح دارد.

به‌منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین، روش تداخل‌سنجی راداری با پنجره مصنوعی (InSAR^۳) در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودتیک موردتوجه بسیاری قرار گرفته است. به‌عنوان مثال در پژوهشی، فرونشست بخش‌هایی از کشور بلژیک را با بهره‌گیری از فناوری پراکنشگرهای دائمی از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ میلادی با بهره‌گیری از تصاویر ای-آر-اس و انویست و تراسار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد در برخی مناطق که از سال ۱۹۹۰ با تغذیه مناسب سفره‌های زیرزمینی روبرو بوده، نه‌تنها فرونشست متوقف شده بلکه ۳ میلی‌متر در سال بالا آمدگی مشاهده شده است؛ اما فرونشست در مناطقی که چاه‌های آب فعال

^۱ Synthetic Aperture Radar

^۲ Backscatter

^۳ Interferometric Synthetic Aperture Radar

تصویربرداری آن از ۱۴ فروردین ۱۳۹۳ شروع شده و مأموریت آن ۷ ساله در نظر گرفته شده است (۲۷). این ماهواره از نوع خورشید آهنگ با ارتفاع مداری ۶۹۳ کیلومتری بوده و در باند C با طول موج ۵/۵ میلی‌متر و با قدرت تفکیک زمانی ۱۲ روز تصویربرداری می‌کند (۵). مهم‌ترین محصول Sentinel_1A داده SLC با قدرت تفکیک مکانی ۵×۲۰ متر می‌باشد.

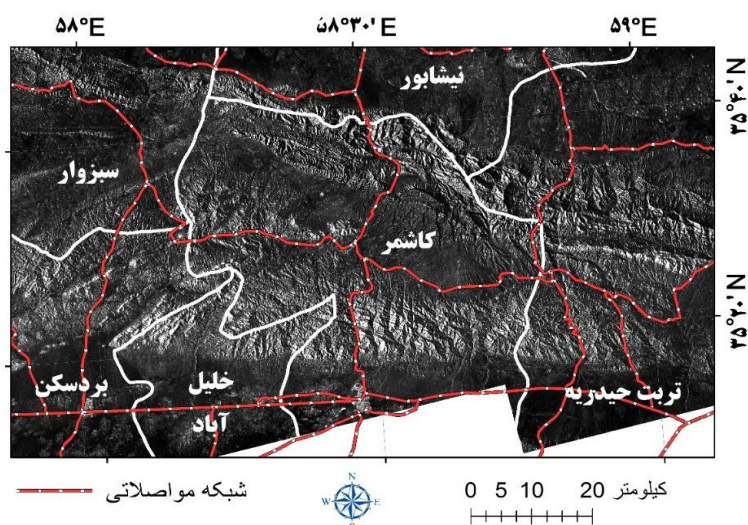
■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت‌های کاشمر و خلیل‌آباد می‌باشد که در بخش شمال شرقی حوضه آبخیز کویر مرکزی ایران واقع شده‌اند (شکل ۱). این دشت با طول ۱۰۰ کیلومتر و عرض ۲۵ کیلومتر و راستای شرقی غربی در جنوب شهرهای کاشمر و خلیل‌آباد در شرق ایران واقع است. این منطقه از دشت‌های حاصلخیز استان خراسان رضوی است. از نظر اقلیمی، منطقه در اقلیم نیمه‌خشک تا خشک طبقه‌بندی می‌گردد. در این منطقه هیچ رودخانه دائمی وجود ندارد لذا تأمین آب موردنیاز کشاورزان وابسته به منابع آب زیرزمینی است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی نبوی در بخشی از زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد (۲۷). دشت کاشمر به‌صورت یک ناودیس با محور شرقی غربی است و در چهار دهه اخیر از ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۸ افت آب زیرزمینی این دشت بیش از ۶۴ متر بوده است (۲۶).

داشتند کماکان ادامه دارد (۱۰). در پژوهش دیگری با بهره‌گیری از سری داده‌های ای-آر-اس و آلوس اقدام به بررسی جابجایی سطح زمین ناشی از فرونشست در ایالت تگزاس گردید. این پژوهشگران مقدار فرونشست بین ۵ تا ۴۰ میلی‌متر در سال ارزیابی نموده و بین فرونشست و برداشت منابع آب زیرزمینی ارتباط معنی‌داری یافتند. همچنین آنها گسل‌های منطقه را در تقویت این پدیده را مؤثر دانسته‌اند (۳۴). در مطالعه دیگری با بهره‌گیری از سری تصاویر ایسار و انویست بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ اقدام به بررسی فرونشست حوضه آبخیز باندانگ واقع در کشور اندونزی گردید. نرخ جابجایی سالانه محاسبه شده بین ۲۴۰- میلی‌متر تا ۴۰ میلی‌متر متغیر بود. نتایج آن مطالعه نشان داد در صورت افت یک متر در سفره‌های آب زیرزمینی، ۲۰ تا ۲۳ میلی‌متر فرونشست مشاهده خواهد شد (۱۵). پژوهش دیگری بر روی فرونشست شهر تهران با بهره‌گیری از تکنیک پراکنشگرهای دائمی و سری زمانی تصاویر انویست و سنتینل بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ نشان داد نرخ سالانه فرونشست بین ۱۳ تا ۱۴ سانتی‌متر در سال می‌باشد (۲۴).

هدف پژوهش جاری بهره‌گیری از قابلیت جدیدترین تصاویر راداری Sentinel_1A برای اندازه‌گیری و پهنه‌بندی فرونشست دشت کاشمر و خلیل‌آباد است. تصاویر Sentinel_1A به‌وسیله آژانس فضایی اروپا توسعه‌یافته و



شکل ۱. تصویر راداری منطقه مورد مطالعه (۵ شهریور ۱۳۹۷)

است. به طوری که جنس طبقات آبرفتی که بر روی سنگ کف قرار گرفته‌اند، از شمال به سمت جنوب دشت تغییر رخساره می‌دهد و به تدریج درصد کانی‌های رسی افزایش می‌یابد (۲۰).

روش پژوهش

در مطالعه حاضر از بایگانی تصاویر سنتینل استفاده شده است (جدول ۱). تصاویر مورد استفاده در این پژوهش از نوع پایین‌گذر با قطبش VV و از نوع SLC می‌باشند.

برای انجام تحلیل سری زمانی داده‌های راداری از روش SBAS یا کوتاه‌ترین خط مبنای مکانی استفاده شد. با بهره‌گیری از این روش از بین تصاویر موجود، تنها ۱۵ تصویر که دارای کوتاه‌ترین خط مبنای زمانی و مکانی بودند، انتخاب شدند (جدول ۱).

ارتفاعات بخش شمالی دشت بیشتر شامل شیستهای دگرگونی است. در نواحی جنوبی رسوبات رسی، مارنی و گچی با سن میوسن وجود دارد. گسل درونه به طول تقریبی ۷۰۰ کیلومتر در حدفاصل سازندهای سنگی نواحی شمالی و دشت واقع شده است.

این گسل نقش مهمی در تغذیه و تشکیل سفره آب زیرزمینی با افق‌های آبرفتی ضخیم فراهم کرده است. رسوبات این دشت از لایه‌هایی با دانه‌بندی متفاوت تشکیل شده‌اند. لایه سطحی متشکل از قلوه‌سنگ، سنگ، شن و رس می‌باشد. با افزایش عمق تناوب افق‌های آبرفتی با دانه‌بندی ریزودرشت مشاهده می‌گردد. در عمق، رس میوپلیوسن به‌عنوان سنگ‌بستر سفره آب زیرزمینی محسوب می‌شود.

در توزیع دانه‌بندی آبرفت‌های دشت، سنگ شناسی سازندها، رژیم بارندگی و جریان‌های سیلابی، مورفولوژی و توپوگرافی ارتفاعات و تکتونیک منطقه نقش داشته

جدول ۱: ویژگی‌های تصاویر مورد استفاده در پژوهش

ردیف	تاریخ تصویربرداری	شماره مدار
۱	۲۹-۱۰-۲۰۱۴	۳۰۳۸
۲	۱۶-۱۲-۲۰۱۴	۳۷۳۸
۳	۰۹-۰۱-۲۰۱۵	۴۰۸۸
۴	۲۰-۰۷-۲۰۱۵	۶۸۸۸
۵	۱۳-۰۸-۲۰۱۵	۷۲۳۸
۶	۲۴-۱۰-۲۰۱۵	۱۱۴۳۸
۷	۲۷-۰۵-۲۰۱۶	۸۲۸۸
۸	۲۹-۱۲-۲۰۱۶	۱۴۵۸۸
۹	۲۳-۰۳-۲۰۱۷	۱۵۸۱۳
۱۰	۱۶-۰۴-۲۰۱۷	۱۶۱۶۳
۱۱	۲۱-۰۷-۲۰۱۷	۱۷۵۶۳
۱۲	۱۴-۰۸-۲۰۱۷	۱۷۹۱۳
۱۳	۱۲-۱۲-۲۰۱۷	۱۹۶۶۳
۱۴	۲۳-۰۴-۲۰۱۸	۲۱۵۸۸
۱۵	۲۸-۰۷-۲۰۱۸	۲۲۹۸۸

ارتفاع منطقه و استفاده از نقاط پراکنش گر دائم استفاده گردید. سپس با توجه به نقاط نمونه‌برداری تصویر تابع نسبت به تصویر مرجع نمونه‌برداری مجدد صورت گرفت. پس از تناظریابی و هم مرجع کردن دو تصویر، فاز دو تصویر باهم ترکیب شدند. فاز ترکیب‌شده همبستگی زیادی با توپوگرافی منطقه و جابه‌جایی سطحی زمین دارد. بعد از تشکیل اینترفروگرام اولیه با بهره‌گیری از DEM^۳ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر فاز مربوط به توپوگرافی حذف شد. با بهره‌گیری از فیلتر گلدشتین^۴ سطح نویز اینترفروگرام کاهش یافته و دقت افزایش می‌یابد (۱۶). پس از اعمال فیلتر اقدام به تحلیل سری زمانی تصاویر به روش کوتاه‌ترین خط مبنایی مکانی-زمانی گردید. در این روش فاز نهایی فرونشست زمین با بهره‌گیری از روش شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات، مقدار فرونشست به صورت میانگین محاسبه شده و نرخ سالانه فرونشست در بازه زمانی مورد مطالعه استخراج شد.

تبدیل فاز به جابه‌جایی

برای تبدیل فاز تداخل‌سنجی ناشی از جابه‌جایی به فاصله به واحد متر از رابطه (۳) استفاده شد:

$$d = \frac{-\lambda \times \Delta\phi}{4\pi \times \cos(\text{inc_angle})} \quad (3)$$

در این رابطه d مقدار جابه‌جایی به متر، λ طول موج سیگنال راداری، $\Delta\phi$ فاز باقیمانده ناشی از جابه‌جایی در راستای دید ماهواره و inc_angle هم زاویه فرودی موج است. در پایان اعوجاجات موجود در هندسه تصویربرداری راداری با بهره‌گیری از روش Range-doppler تصحیح و به مختصات جغرافیایی تبدیل شد (شکل ۲).

منابع آب زیر زمینی

در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط فرونشست منطقه مورد مطالعه و وضعیت منابع آب زیرزمینی اقدام

قبل از تشکیل تداخل‌نگار یا اینترفروگرام باید از همدوسی^۱ تصاویر اطمینان حاصل شد. با بهره‌گیری از رابطه ۱ همدوسی محاسبه شد (۲۹).

$$\gamma = \frac{|\sum s_1 \cdot s_2|}{\sqrt{|\sum s_1|^2 \cdot |\sum s_2|^2}} \quad (1)$$

در این رابطه S_1 و S_2 دامنه^۲ زوج تصاویر مورد استفاده در تداخل‌نگار و γ مقدار همدوسی است. برای اطمینان بیشتر از نتایج حاصله مناطقی با نرخ همدوسی پایین از اینترفروگرام نهایی حذف شدند. این مناطق فاقد همبستگی کافی برای تشکیل تداخل‌نگار محسوب می‌شوند و بیشتر تغییرات زیادی از خود نشان می‌دهند. با بهره‌گیری از رابطه ۲ اختلاف فاز زوج تصاویر محاسبه شد (۵).

$$\Delta\phi = 2\pi\alpha + \Delta\phi_{\text{flat}} + \Delta\phi_{\text{elevation}} \quad (2)$$

$$+ \Delta\phi_{\text{displacement}} + \Delta\phi_{\text{atm}} + \Delta\phi_{\text{orb}} + \Delta\phi_{\text{noise}}$$

در این رابطه $\Delta\phi$ مقدار کل اختلاف فاز بین جفت تصویر، $2\pi\alpha$ مقدار باقیمانده معادله، $\Delta\phi_{\text{flat}}$ اختلاف فاز ناشی از کروی بودن زمین و $\Delta\phi_{\text{elevation}}$ اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی منطقه است. $\Delta\phi_{\text{displacement}}$ اختلاف فاز ناشی از جابه‌جایی و تغییر شکل زمین است و مجهول این معادله است. $\Delta\phi_{\text{atm}}$ اثر مؤلفه جو ناشی از رطوبت، دما و تغییرات فشار هوا در دو زمان تصویربرداری است. $\Delta\phi_{\text{orb}}$ اثر مؤلفه مداری و $\Delta\phi_{\text{noise}}$ اختلاف فاز ناشی از حرارت آنتن‌های سنجنده ماهواره‌ای، پراکنش حجمی اشیاء و در کل اثر مؤلفه نوفه است. اختلاف فاز ناشی از شرایط اتمسفری و حرارت آنتن‌ها توسط شرکت‌های ارائه دهنده تصاویر محاسبه می‌شوند. در واقع هدف اصلی تداخل‌سنجی، استخراج مقدار فاز جابه‌جایی با حذف یا کمینه کردن اثر دیگر مؤلفه‌هاست. در نخستین گام دو تصویر هم مرجع شدند. برای انجام این مرحله بسیار مهم از پارامترهای مداری هر دو تصویر به همراه مدل رقومی

³ Digital Elevation Model

⁴ Goldstein

¹ Coherence

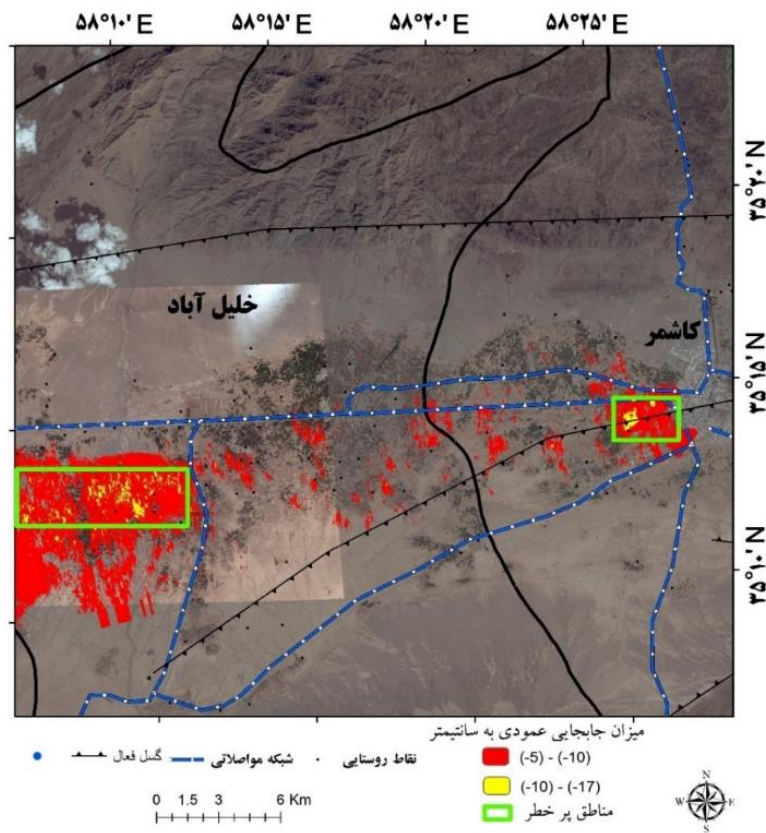
² Amplitude

است و بیشتر راستای شرقی-غربی دارد. این روند منطبق با گسل‌های قدیمی دوران کرتاسه دارد. اگرچه این ساختارهای زمین‌شناسی اولیه در حال حاضر از لحاظ تکتونیک غیر فعال هستند، اما الگوی فرورانشستی مشاهده شده نشان از کنترل ساختاری قابل توجه در هندسه حوضه آبخیز و تغییر شکل آن در هنگام تخلیه مخزن دارد. همچنین مطالعه بر روی چاه‌های پیژومتری دشت کاشمر نشان می‌دهد، افت سالانه در بیشترین حالت ۱۸۸ سانتی‌متر است و عمدتاً مناطق غربی شهر کاشمر و مناطق شرقی شهر خلیل‌آباد را درگیر کرده است. با تلفیق اطلاعات شکل ۲ و شکل ۳ به نظر می‌رسد بین افت تراز پیژومتری و نرخ فرورانشست ارتباط مکانی وجود دارد. این مساله نشان می‌دهد یکی از نیروهای محرک فرورانشست در دشت کاشمر و خلیل‌آباد برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی است.

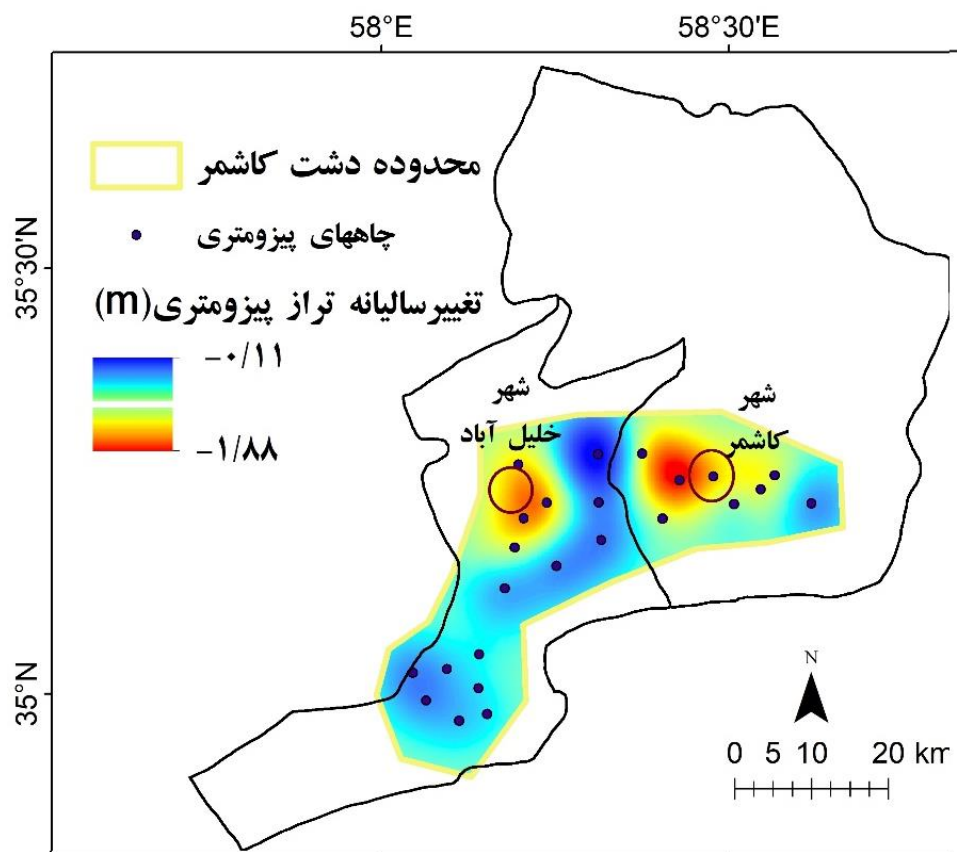
به بررسی افت آب زیرزمینی گردید. بدین منظور اطلاعات مربوط به ۱۹ چاه از چاه‌های مشاهده‌ای سطح تراز پیژومتری آبخوان کاشمر از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی تهیه شد. پس از بررسی نوسان تراز سفره آبخوان در ده سال اخیر، مقدار افت سالانه آب زیرزمینی محاسبه و سپس نقشه پهنه‌بندی نوسانات تراز پیژومتری با بهره‌گیری از روش کریجینگ تهیه شد.

نتایج

مناطق بحرانی نشست زمین از غرب شهر کاشمر شروع و تا خلیل‌آباد ادامه دارد (شکل ۲). نرخ سالانه فرورانشست در بیشترین حالت ۱۷ سانتی‌متر است و شکاف‌های کششی طولی در غرب دشت کاشمر در رابطه با نشست‌های ناهمگن سطح زمین در این منطقه مشهود است. الگوی فرورانشست دشت کاشمر و خلیل‌آباد ناهمگون



شکل ۲. نقشه نهایی نرخ فرورانشست سطح زمین محدوده مورد مطالعه



شکل ۳. پهنه‌بندی مکانی میانگین سالانه افت تراز پیزومتریک بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ (توضیح شکل: دوایر توخالی موقعیت تقریبی شهرهای کاشمر و خلیل‌آباد را نشان می‌دهد)

■ بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش جاری تمام فرآیندهای پردازشی از قبیل انتخاب زوج تصاویر تا بازیابی فاز جابه‌جایی عمودی سطح دشت‌های کاشمر، خلیل‌آباد صورت گرفت و قابلیت‌های تصاویر جدید و به‌روز Sentinel_1A آژانس فضایی اتحادیه اروپا در تهیه پهنه و گستره مناطق تحت تأثیر فرونشست به تصویر کشیده شد. پیش‌ازاین برخی پژوهشگران وقوع فرونشست و تشکیل شکاف‌های طولی در غرب دشت کاشمر را به وجود خاک‌های ریزدانه در رسوبات آبرفتی منطقه مرتبط دانسته‌اند (۲۰).

در پژوهش صورت گرفته طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ در دشت کاشمر با بهره‌گیری از تصاویر انویست، مقدار فرونشست سالانه این دشت ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر در سال برآورد شد و الگوی فرونشست منطبق با ساختار گسل‌های منطقه اعلام گردید (۳). نتایج این محققان با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر مشابهت بسیاری دارد. تلفیق اطلاعات حاصله از پردازش InSAR و داده-

های پیزومتری دشت کاشمر و خلیل‌آباد نشان می‌دهد به طور تقریبی هر ۱ متر افت آب زیرزمینی منجر به فرونشست حداکثر ۱۰ سانتی‌متر زمین می‌گردد. پیش از این، محققان دیگری نیز به نتایج مشابهی دست یافتند (۲). افت سالانه ۱۱ تا ۱۸۸ سانتی‌متر آب زیرزمینی به همراه کسری مخزن دشت به مقدار ۱۲۱/۴ میلیون مترمکعب موجب بروز پدیده فرونشست شده است. از سوی دیگر نبود رودخانه دائمی در این منطقه موجب تشدید وابستگی کشاورزان به منابع آب‌های زیرزمینی شده است. نکته حائز اهمیت تأثیر حرکات تکتونیک بر فرونشست می‌باشد. نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه حاکی از حضور گسل روانده فعالی به نام گسل تربت جام در منطقه دارد که بین کانون‌های خطر فرونشست در منطقه و این گسل انطباق مکانی مشاهده شد (شکل ۲). پیش از این نیز در پژوهش دیگری به تأثیر حرکات تکتونیک و گسل‌های فعال بر روی پدیده فرونشست اشاره شده است (۳۳). با توجه به احتمال تأثیر هم‌زمان حرکات تکتونیک

فن برای تعیین رفتار دشت‌ها در قبال طرح‌های مدیریتی و منابع آب و عکس‌العمل آن‌ها استفاده گردد. استفاده از این تصاویر به همراه اطلاعات ایستگاه‌های GPS می‌توانند بهترین و دقیق‌ترین اطلاعات پایش از پدیده فرونشست در دشت‌های بحرانی محسوب شوند. مدیریت منابع آبی به‌منظور جبران کسری مخزن آب زیرزمینی، جلوگیری از اضافه برداشت، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اعمال سیاست‌های حمایتی و تشویقی، حمایت از روش‌های نوین آبیاری بر اساس الگوی کشت و نصب کنتورهای هوشمند برخی از راهکارهایی است تا از فرونشست بیشتر این منطقه جلوگیری کنیم.

■ سپاسگزاری

پژوهش حاضر مورد حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) وابسته به معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری به شماره ۹۶۰۱۶۴۷۱ می‌باشد. بدین‌وسیله از حمایت‌های این صندوق در انجام این پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

و افت آب زیرزمینی بر روی رخداد فرونشست زمین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌هایی برای تفکیک تأثیرات هرکدام بر این پدیده انجام شود. مزیت روش‌های مبتنی بر تصاویر راداری با پنجره مصنوعی نسبت به دیگر روش‌ها از قبیل سامانه‌های GPS و یا ترازایی دقیق، سرعت بالای پردازش، پوشش مکانی وسیع و شناسایی کانون‌ها و نقاط بحرانی با دقت بالاتر در دشت‌ها است. دگرشکلی مستخرج از تصاویر راداری به دلیل قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب، روش مناسبی برای پایش پیوسته در طول زمان است. هزینه پایین این روش نسبت به سایر روش‌ها و عدم نیاز به عملیات زمینی موجب می‌شود این فن در این زمینه بی‌رقیب محسوب شود.

یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از تصاویر راداری برای انجام پردازش‌های تداخل‌سنجی، کمبود داده مناسب با بالاترین درجه همدوسی و دسترسی ناکافی به این‌گونه تصاویر است. البته با توجه به توسعه روزافزون این‌گونه ماهواره‌ها و سرمایه‌گذاری وسیع اتحادیه اروپا در این زمینه و اهمیت زیاد تصاویر SAR، بیش از گذشته شاهد سهولت در دسترسی به این‌گونه داده‌ها و توسعه کاربردهای آن خواهیم بود. پیشنهاد می‌گردد در دشت‌های بحرانی کشورمان در فواصل کوتاه زمانی از این

■ References

1. Abdolmaleki, N., Motagh, M., Bahroudi, A., Sharifi, M.A., & Haghshenas Haghghi, M. (2014). Using Envisat InSAR time-series to investigate the surface kinematics of an active salt extrusion near Qum, Iran. *Geodynamics*, 81, 56-66.
2. Almodaresi, S.A., & Heshmati, Sh. (2015). Modeling the subsidence of the Neyshabour plain by using time series and DINSAR. *Geography and environmental planning*, 26(1), 67-84 (in Farsi).
3. Anderssohn, J., Wetzel, H.-U., Walter, T. R., Motagh, M., Djamour, Y., & Kaufmann, H. (2008). Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International*, 174(1), 287-294.
4. Bayer, B., Simon, A., Schmidt., & Bertello, L. (2017). Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. *Engineering Geology*, 226, 20-32.
5. Chen, Q., Cheng, H., Yang, Y., Liu, G., Liu, L. (2014). Quantification of mass wasting volume associated with the giant landside Daguangbao induced by the 2008Wenchuan earthquake from persistent scatterer InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 152, 125-135.

6. Cigna, F., Bateson, L.B., Jordan, C.J., & Dashwood, C. (2014). Simulating SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: Nationwide feasibility assessment to monitor the landmass of Great Britain with SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 152, 441–466.
7. Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68(1-2), 3–14.
8. Davoodijam, M., Motagh, M., & Momeni, M. (2015). Land subsidence in Mahyar Plain, Central Iran, investigated using Envisat SAR Data. Proceedings the 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). Springer.
9. De Novellis, V., Castaldo, R., De Luca, C., Pepe, S., Zinno, I., Casu, F., Lanari, R., & Solaro, G. (2017). Source modelling of the 2015 Wolf volcano (Galápagos) eruption inferred from Sentinel 1-A DInSAR deformation maps and pre-eruptive ENVISAT time series. *Volcanology and Geothermal Research*, 344, 246-256.
10. Declercq, P., Gerard, P., Pirard, E., Perissin, D., Walstra, J., & Devleeschouwer, X. (2017). Subsidence related to groundwater pumping for breweries in Merchtem area (Belgium), highlighted by Persistent Scatterer Interferometry, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, 178–185.
11. Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M. (2018). Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205, 180–198.
12. Fan, H., Gu, W., Qin, Yong., Xue, J., & Chen, B. (2014). A model for extracting large deformation mining subsidence using D-InSAR technique and probability integral method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(4), 1242– 1247.
13. Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P., & Bau, D. (2006). Stochastic poromechanical modeling of anthropogenic land subsidence. *Solids and Structures*, 43(11-12), 3324–3336.
14. Foroughinia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., Perissin, D., 2019. An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 248-258.
15. Ge, L., Ng, A., Li, X., Abidin, H., & Gumilar, I. (2014). Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 154, 46–60.
16. Goldstein, R.M., & Werner, C.L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysic Research Letter*, 25(21), 4035–4038.
17. Hu, J., Ding, X.L., Li, Z.W., Zhang, L., Zhu, J.J., Sun, Q., & Gao, G.J. (2016). Vertical and horizontal displacements of Los Angeles from InSAR and GPS time series analysis: Resolving tectonic and anthropogenic motions, *Geodynamics*, 99, 27-38.
18. Huang, Q., Crosetto, M., Monserrat, O., & Crippa, B. (2017). Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 204–211.
19. Huang, Y., Yang, Y., & Li, J. (2015). Numerical Simulation of Artificial Groundwater Recharge for Controlling Land Subsidence. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(2), 418-426.

20. Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M., & Rostami Barani, H.R. (2009). An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar Plain, *Geological Studies*, 1(1), 95-111 (in Farsi).
21. Li, J. (2003). A nonlinear elastic solution for 1-D subsidence due to aquifer storage and recovery applications. *Hydrogeology*, 11(6), 646-658.
22. Liu, C.W., Lin, W.S., & Cheng, L.H. (2006). Estimation of land subsidence caused by loss of smectiteinterlayer water in shallow aquifer systems. *Hydrogeology*, 14(4), 508-525.
23. Lofgern, B.E. (1969). Field measurement of aquifer system compaction, Sanjoaquin Balley, California, U.S.A. Process, Tokyo Symposium on Land Subsidence, 272-284.
24. Maghsoudi, Y., Van der meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A. (2017). Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 386-396.
25. Milillo, P., Perissin, D., Salzer, J., Lundgren, Lacava, G., Milillo, G., & Serio, C. (2016). Monitoring dam structural health from space: Insights from novelInSAR techniques and multi-parametric modeling applied to thePertusillo dam Basilicata, Italy. *International Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 221-229.
26. Motagh, M., Walter, T.R., Sharifi, M., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16), 1-5.
27. Nabavi, M.H. (1977). Introduction to Geology of Iran, Iranian Geology organization Press (in Farsi).
28. Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence usind gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84(3-4), 143-160.
29. Pepe, A., Calo, F. (2017). A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied sciences*, 7(12), 1-39.
30. Peter, H., Jaggi, A., Fernandez, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., & Femenias, P. (2017). Sentinel-1A – First precise orbit determination results. *Advances in Space Research*, 60(5), 879-892.
31. Prati, C., Ferretti, A., & Perissin, D. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Geodynamics*, 49 (3-4), 161-170.
32. Qiu, J., & Qiao, X. (2017). A study on the seismogenic structure of the 2016 Zado, Qinghai Ms6.2 earthquake using InSAR technology. *Geodesy and Geodynamics*, 8(5), 342-346.
33. Qu, F., Lu, Z., Zhang, Q., Bawden, G., Kim, J.W., Zhao, C., & Qu, W. (2015). Mapping ground deformation over Houston-Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 169, 290-306.
34. Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., & Dehghani, M. (2013). Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry. *Irrigation and Water Engineering*, 3(11), 47-57 (In Farsi).

35. Scott, R.F. (1979). Subsidence-revaluation and prediction of subsidence. Saxema, S.K., *Process Conference*, ASCE, Gainsville, USA.
36. 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.
37. Zhang, Y., Wang, Z., Xue, Y., Wu, J., & Yu, J. (2016). Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 745-760.
38. Zhu, L., Gong, H., LI, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243–255.

Mapping Land Subsidence Hazard through InSAR (Case study: Kashmar and Khalil Abad plain)

H. R. Koozbanani^{1&2}, M. R. Yazdani^{3*}, S. K. Hosseini⁴

1. Ph.D. Candidate, Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran.
2. Visiting scholar, Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran.
4. Assistant Professor, Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* Corresponding Author: m_yazdani@semnan.ac.ir

Received date: 29/09/2018

Accepted date: 02/03/2019

Abstract

Measuring of subsidence is often challenging due to the gradual occurrence in large-scale, and advanced measuring techniques are required. The first foresighted consequence of this catastrophic phenomenon is irreversible loss of aquifer reservoir. Subsidence is downward motion of the earth's surface with negligible horizontal vector component. Subsidence is occurring with different rates in many aquifers of the country constantly, because of excessive extraction of groundwater for years which causes lowering of the water table. Increasing the intensity of this phenomenon in recent years requires modern methods of measuring subsidence. InSAR technique can be strongly powerful that can extract vertical component in large extent, especially in areas with insufficient geodetic data. In this study, new Sentinel-1A imagery from 2014 to 2018 were used to examine the subsidence rate in the Kashmar and Khalil Abad plain. According to the high correlation between pair images, basic interferograms was calculated. Then, using SBAS method unnecessary phases were removed. Thereafter, the displacement phase was calculated and converted to the vertical component. Maximum subsidence rate is observed near the southwest suburb of Kashmar city and western part of Khalilabad plain. Results indicate that the Kashmar and Khalilabad plain was encountered maximum of 17 cm downward movement annually. Due to uneven and heterogeneous subsidence, the area has susceptibility for formation of longitudinal cracks. Final map can be used to control and manage water resources and prevent natural hazards and desertification

Keywords: Interferometry; Sentinel-1A; Zoning; Subsidence; SBAS method