



پردازش خودکار بر مبنای فن تداخل سنجی با پراکنشگرهای دائمی جهت پایش فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان هرات و مروست)

مقاله
پژوهشی

ابوالفضل محمدی فتح آباد، سیدعلی الحسینی المدرسی

دریافت: ۱۲ تیر ۱۴۰۰ / بازنگری: ۴ شهریور ۱۴۰۰ / پذیرش: ۹ شهریور ۱۴۰۰

دسترسی اینترنتی: ۹ شهریور ۱۴۰۰ / دسترسی چاپی: ۱ مهر ۱۴۰۱

چکیده

از سوی دیگر باید توجه داشته باشیم که تاثیرات فرونشست ممکن است به وسیله دیگر فعالیت‌های طبیعی در ناحیه همچون فعالیت‌های آتشفشانی، زمین لرزه‌ها و زمین لغزش‌ها تسریع شود و با توجه به لرزه‌خیزی بودن مناطق زیادی از کشور ما توجه به این پدیده اهمیت ویژه‌ای دارد. امروزه یکی از دقیق‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌ها برای شناسایی حرکات سطح زمین، فن تداخل سنجی راداری است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان متفاوت اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین با دقت و توان تفکیک مکانی در حد سانتی‌متر و حتی میلی‌متر در آن بازهی زمانی خواهد بود. در این مقاله ما برای نخستین بار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و نرم‌افزارهای منبع باز سعی در پایش وجود فرونشست زمین در آبخوان‌های هرات و مروست نمودیم. در این تحقیق، سعی داریم با به‌کارگیری داده‌های سری زمانی حسگر سنتینل-۱ که تاکنون در مطالعه فرونشست مناطق مورد مطالعه استفاده نشده است به اهداف زیر دست‌یابیم. هدف پژوهش حاضر، اجرا کردن فن تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی با استفاده از پکیج یکپارچه

پیشینه و هدف یکی از مسائلی که در اثر برداشت آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد نشست زمین (Land subsidence) است. این وضعیت اکنون در بسیاری از نقاط خشک و نیمه خشک ایران و بویژه استان یزد گزارش شده است. به علاوه، در دهه‌های اخیر توسعه ناهمگن اراضی کشاورزی و استخراج بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی مخازن آبخوان‌های هرات و مروست در استان یزد باعث بروز پدید فرونشست زمین در پیرامون اراضی کشاورزی شده است. بالا آمدن جداره فلزی میله چاه‌های عمیق، شکاف‌های افقی بر روی سطح زمین به‌طور مستقیم نشان‌دهنده میزان فرونشست سطح است. تشخیص و نمایان‌سازی نواحی که به دلیل خطرپذیری و به مخاطره انداختن زندگی، مستعد فرونشست هستند ضروری است.

ابوالفضل محمدی فتح آباد (✉)، سیدعلی الحسینی المدرسی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم‌اطلاعات جغرافیایی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی یزد، یزد، ایران
۲. استاد، گروه سنجش از دور، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی یزد، یزد، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات : almodaresi@iauyazd.ac.ir

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.684418>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.3.5.7>

قنات سفید و ۲) شمال چشمه علی و ۳) شهر هرات و نواحی ۴) قنات شوشوران ۵) چاه حاجی آباد ناصری و ۶) شهر مروست، مربوط به آبخوان مروست را می‌توان نام برد. در این مقاله با توجه عدم وجود ابزارهای تخصصی، جهت ارزیابی و صحت سنجی تنها راه بررسی نتایج، انطباق آن با شواهد زمینی فرونشست، نمودارهای سری زمانی و هیدرو گراف واحد آبخوان است. با توجه به نتایج هیدرو گراف واحد آبخوان‌های آبرفتی هرات و مروست، سطح آب زیرزمینی در آبخوان هرات در طول دوره ۸ ساله از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ بر اساس داده‌های ۲۸ چاه مشاهده‌ای در حدود ۵/۵ متر افت نموده است، برای آبخوان محدوده مطالعاتی مروست این هیدرو گراف نشان‌دهنده افت آب زیرزمینی در حدود ۷ متر در طی دوره هشت‌ساله است. نتایج سری زمانی حاصل از تداخل سنجی تصاویر مورد استفاده در این مقاله، نشان‌دهنده شیب‌خط برازشی که در واقع میزان جهت جابجایی (به سمت بالا یا پایین) را نشان می‌دهد، حاکی یک‌روند نزولی رو به پایین در ناحیه شماره دوم (قنات سفید از آبخوان هرات) و پنجم (قنات شو شوران از آبخوان مروست) به ترتیب میزان آن برابر با حدود ۵ و ۷ سانتی‌متر را نشان می‌دهند. که این نتایج ارتباط معنی‌داری با هیدرو گراف واحد هر دو آبخوان دارد.

نتیجه‌گیری در این تحقیق، برای برآورد نرخ پدیده فرونشست در آبخوان‌های هرات و مروست از استان یزد، از فن تداخل سنجی با پراکنش گره‌ای دائمی با استفاده از داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و پکیج منبع باز SNAP2StaMPS، استفاده شد. همچنین، پتانسیل نرم‌افزارهای استمپس و اسنپ جهت پردازش تداخل سنجی راداری بررسی شد، و همچنین جزئیات اجرای بسته نرم‌افزاری استپ به استمپس را نشان داده شد. به طور کلی، بر اساس خروجی‌های پردازش شده از این پکیج و نتایج حاصل از صحت سنجی می‌توان به توانایی روش خودکار ارائه شده در این پژوهش جهت پیش فرونشست پی برد و از این الگوریتم در مناطق مطالعاتی دیگر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ماهواره سنتینل-۱، فرونشست زمین، تداخل سنجی تفاضلی (DInSAR)، آبخوان هرات و مروست، تداخل سنجی با پراکنش گره‌ای دائمی (PSI)

هدف دیگر می‌توان به برآورد نرخ فرونشست با پردازش مجموعه‌ای از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۲/۲۰ تا ۲۰۱۹/۰۲/۱۰، تقریباً دوساله سری زمانی است. و هدف آخر بررسی پتانسیل داده این حس‌گر در تحلیل سری زمانی و پیش تغییرات حاصل از فرونشست زمین بود.

مواد و روش‌ها آبخوان هرات و مروست در واقع مناطق مورد مطالعه در این تحقیق شامل، آبخوان هرات و مروست واقع در استان یزد می‌باشند. آبخوان هرات و مروست از نظر زمین‌شناسی بخشی از زون‌های زاگرس (افیولیت، رادیولاریت) و سندج- سیرجان هستند. مناطق مورد مطالعه موجود در حوضه درجه ۲ ابریز کویر ابرقو و سیرجان با کد ۴۴ و مساحتی برابر با ۵۷۱۲۵/۳ کیلومتر مربع واقع شده است. در این پژوهش تعداد ۲۴ داده مربوط به سنجنده سنتینل-۱، در سطح تصویر مختلط تک منظر، گذر بالا، قطبش ۷۷ و شماره قطعه ۹۳ مربوط به بازه زمانی تقریباً دوساله را در هر دو منطقه مورد مطالعه مورد پردازش قرار گرفت. به‌طور کلی، قسمت اعظم پروسه پردازش و تحلیل سری زمانی تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی (PSI) در این مقاله توسط دو نرم‌افزار متن‌باز اسنپ و استمپس صورت گرفت. در نهایت، برای خودکار نمودن مراحل تداخل سنجی از نوع تک مرجع، از مجموعه‌ای کد نوشته به زبان برنامه‌نویسی پایتون به نام SNAP2StaMPS که به‌خوبی بر اساس گراف‌های نرم‌افزار اسنپ طراحی شده است، استفاده شد.

نتایج و بحث یکی از نتایج پردازش تداخل سنجی به اساس الگوریتم خودکار SNAP2StaMPS در این پژوهش، تولید تداخل‌نگاشت که فاز توپوگرافی از روی آن‌ها حذف شده است، بود. از دیگر نتایج شاخص پراکنندگی انحراف استاندارد برای نقشه متوسط جابجایی، هر دو آبخوان هرات و مروست به ترتیب برابر با ۴/۱۹ و ۳/۶۵ میلی‌متر در سال بود. همچنین از نتایج اصلی در این پژوهش برآورد نقشه متوسط جابجایی، آبخوان هرات بین ۴۰/۳۳- تا ۱۱/۴۶ میلی‌متر در سال و برای آبخوان مروست بین ۳۹/۷۹- تا ۱۰/۶۳ میلی‌متر در سال در راستای دید ماهواره در طول بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹) به دست آمد. بدین منظور ناحیه‌های به‌صورت تصادفی و ناحیه‌های نیز بر اساس شواهد میدانی فرونشست در هر دو محدوده مطالعاتی انتخاب شدند نواحی مربوط به آبخوان هرات شامل، ۱)

لطفاً به این مقاله استناد کنید: محمدی فتح‌آباد، ا.، الحسینی المدرسی، س. ع. ۱۴۰۱. پردازش خودکار بر مبنای فن تداخل سنجی با پراکنش گره‌ای دائمی جهت پیش فرونشست (مطالعه موردی):

آبخوان هرات و مروست، نشریه سنجنش‌آردور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۳(۱۳): ۹۳-۷۲. <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.684418>

مقدمه

فرونشست زمین (Land Subsidence) یک پدیده زیست‌محیطی است که بر اثر استخراج بیش از حد منابع زیرزمینی همانند آب زیرزمینی به وسیله عوامل انسانی که در صورت گسترش، عواقب شدید زیست‌محیطی و اقتصادی را در پی دارد ایجاد می‌شود (۱۴). در آبخوان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و شرقی کشور ایران همچون آبخوان هرات و مروست مهمترین علت فرونشست زمین، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه آب است. مخاطرات محیطی که خود شامل طیف وسیعی از مخاطرات کاملاً طبیعی تا مخاطرات حاصل از فعالیت‌های انسانی است. همچنین از جمله موانع توسعه در مناطق مختلف است عوامل بازدارنده که به محیط‌زیست وارد می‌شود. فرونشست زمین از جمله مخاطرات محیطی است که امروزه بسیاری از دشت‌های ایران را تهدید می‌کند (۱). امروزه یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها جهت شناسایی حرکات سطح زمین، فن تداخل سنجی راداری است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان متفاوت اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین با دقت و توان تفکیک مکانی در حد سانتی‌متر و حتی میلی‌متر در آن بازه زمانی خواهد بود (۶). اخیراً با راه‌اندازی ماهواره سنتینل-۱ نوع A و B که به ترتیب در ۳ آوریل ۲۰۱۴ و ۲۵ آوریل ۲۰۱۶ از شهر کورو در فرانسه با موشک سایوز عرصه و دریچه نوبنی از نظارت مستمر بر سطوح کره زمین، برای کاربران سامانه‌های رادار با دریچه مصنوعی گشوده گردید (۲). ماهواره سنتینل-۱ به دلایل؛ افزایش قدرت تفکیک زمانی و همچنین تفکیک مکانی، و عرض وسیع پوشش زمینی تا ۲۵۰ کیلومتر به‌نوبه خود قابل توجه است (۲۳). به‌علاوه داده‌های این ماهواره به‌عنوان ابزاری سودمند برای گسترش مطالعات علوم زمینی از جمله پایش فرونشست و همچنین جوامع علمی و متخصصان مشاهده زمین، محسوب می‌شود (۱۳). سازمان فضایی اروپا (ESA) اخیراً جهت همکاری با جوامع مشاهده زمین، به توسعه ابزارهایی مناسب در جهت پردازش تخصصی داده‌های

سری ماهواره‌ای سنتینل گام برداشته است. بر همین اساس ابتدا نرم‌افزار NEST و پس‌از آن نرم‌افزاری قوی و چندکاره به نام SNAP که همزمان قابلیت پردازش داده‌های راداری و اپتیکی سری سنتینل و ماهواره‌های دیگر را داشت، شد. توسعه نرم افزار اسنپ بر اساس مجوز GPL، رایگان و منبع باز بوده است (۲۳). به‌تازگی، نوعی فناوری پیشرفته در حالت اخذ داده بر روی ماهواره سنتینل-۱ پیاده‌سازی شده به نام اسکن تصاعدی (TOPSAR) (۲۸). این قابلیت برای کاربران در مراحل اولیه، درست قبل از شروع انتشار داده‌های سنتینل-۱ و نتایج آن برای اولین بار در کارگاه آموزشی فرینچ توسط سازمان فضایی اروپا ابلاغ شد و دسترس قرار گرفت (۱۳). در حال حاضر، فن تداخل سنجی راداری، توانایی خود را در زمینه اندازه‌گیری دقیق از تغییر شکل سطح زمین، در سطح گسترده و با دقت بالا به اثبات رسانده و همچنان به‌عنوان ابزاری با توانایی پردازش صرفاً تصاویر سری سنتینل-۱ محسوب می‌شود (۸ و ۱۷). یکی از موارد ترقی در راستای فن تداخل سنجی پیشرفته در بستر نرم‌افزار اسنپ، ایجاد خروجی‌های متناسب با بسته نرم‌افزاری استمپس (StaMPS)، با استفاده از پکیجی در قالب زبان برنامه‌نویسی پایتون بود (۱۵). روش‌های تداخل سنجی سنتی در مواردی از تغییر شکل غیرخطی و مشاهدات در فواصل زمانی طولانی‌تر (مانند رشد سریع پوشش گیاهی) که باعث ناهمبستگی و ایجاد خطا در فاز تداخل سنجی می‌شود، دارای محدودیت هستند (۱۹). بنابراین روش تداخل سنجی پراکنده پایدار (PSI) به‌منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، برای نظارت بر تغییر شکل با دقت میلی‌متر معرفی شدند (۹ و ۱۰). پس از آن، بسیاری مطالعات در مورد انتخاب و پردازش نقاط پراکنش‌کننده‌های پایدار (PS) و بهبود دقت انجام گرفت (۳). پردازش در این روش بر اساس تحلیل فاز و دامنه انجام می‌گیرد (۱۱ و ۱۳). این تکنیک توسط جلنک و همکاران (۱۸) ارائه شد که با در نظر گرفتن یک مدل تغییر شکل، نقاط پراکنش‌کننده را بر اساس تغییر فاز آن‌ها انتخاب می‌کند. در حالی که روش StaMPS بدون پیش‌فرض قبلی در مورد ماهیت زمانی آن، از همبستگی مکانی مرحله آن‌ها بهره برداری می‌کند

بررسی شده، محققان مختلف برای پایش فرونشست حاصل از برداشت آب زیرزمینی کارکرده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استخراج آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی تاثیر زیادی در وقوع پدیده فرونشست و شکاف‌ها بر سطح زمین دارد و این سناریو در آبخوان هرات و مروست در این مطالعه نیز صادق بوده است. در تحقیقات مشابه برای استخراج نقشه جابجایی فرونشست بیشتر از روش‌های تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های با طول خط مبنایی کوتاه استفاده شده درحالی‌که در این تحقیق برای استخراج نقشه جابجایی تداخل سنجی راداری از روش SNAP2StaMPS-PSI و پکیج SNAP2StaMPS استفاده می‌گردد. از اهداف این تحقیق؛ اجرا کردن فن تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی با استفاده از پکیج یکپارچه SNAP2StaMPS است. برآورد نرخ فرونشست با پردازش مجموعه‌ای از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۲/۲۰ تا ۲۰۱۹/۰۲/۱۰، تقریباً دوساله سری زمانی است. بررسی پتانسیل داده‌ای این حس‌گر در تحلیل سری زمانی و پایش تغییرات حاصل از فرونشست زمین بود. اگرچه فعالیت‌های اعتبار سنجی در مورد فن‌های تداخل سنجی با درجه مصنوعی پیش‌تر در مورد اندازه‌گیری‌های سطح زمین در مجامع علمی اثبات و تأیید شده است (۵). ولی به‌منظور ارزیابی نقشه فرونشست خروجی و مقدار سازگاری آن با داده‌های واقعی لازم است تا نواحی بارز شده با مشاهدات میدانی و واقعی تطبیق داده شود. به لحاظ علمی، مرسوم‌ترین روش‌ها جهت ارزیابی نتایج فن تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی، بر اساس مقایسه سرعت تغییر شکل و سری زمانی، با فن‌های مشابه ولی با دقت و کیفیت بهتر، به‌عنوان مثال داده‌های ایستگاه‌هایی سیستم موقعیت‌یاب جهانی، روش ترازیبی دقیق است (۵) و روش‌های کالیبراسیون بر اساس بازتابنده‌های گوشه‌ای (۲۰). در پژوهش حاضر با توجه عدم وجود ابزارهای ذکرشده، عملاً استفاده از این ابزارها در منطقه، جهت ارزیابی و صحت سنجی نتایج حاصل از فناوری تداخل سنجی راداری وجود نداشت؛ بنابراین تنها راه بررسی

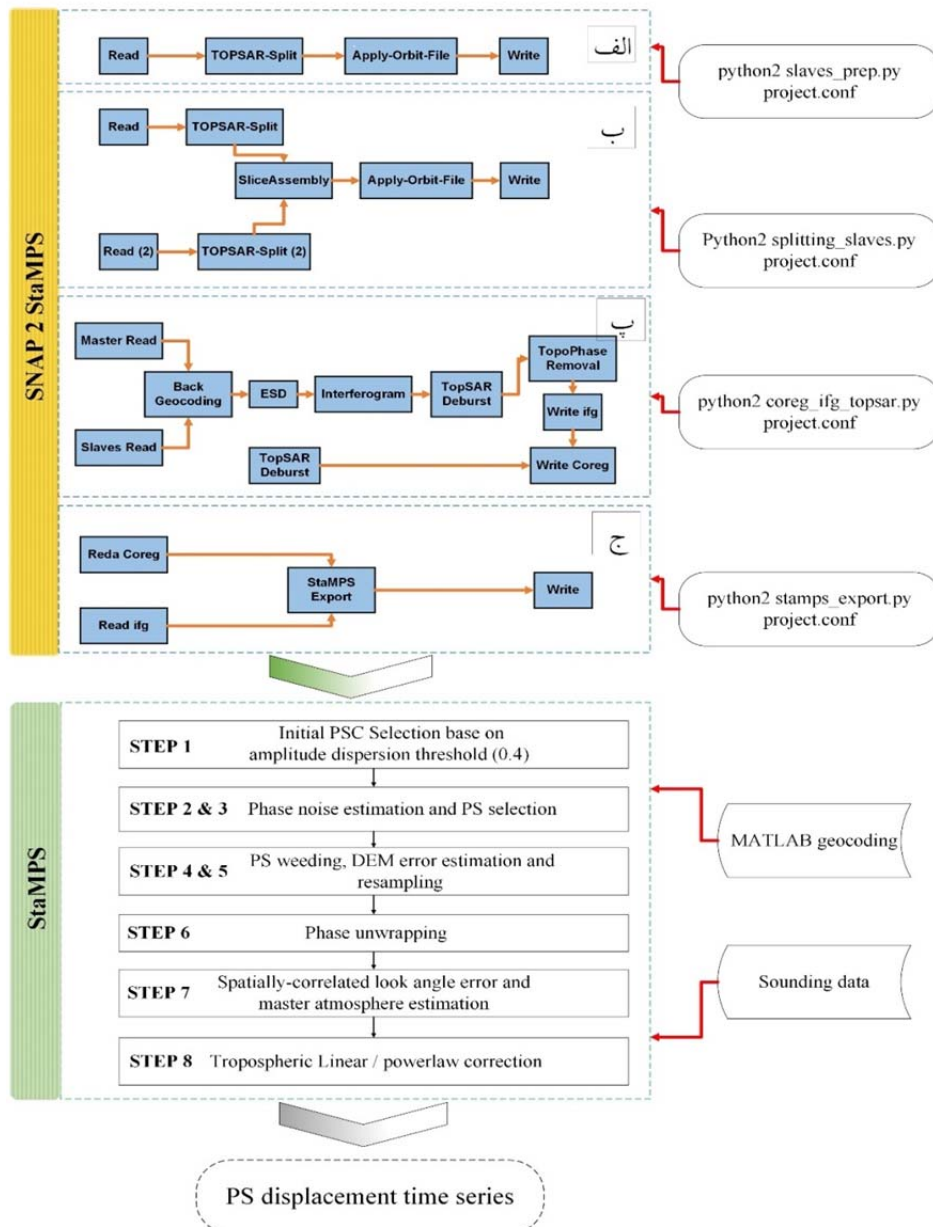
(۱۶). سیان و همکاران (۵) که به بررسی پدیده فرونشست در شهرهای ساحلی بانجول (گامبیا) و لاگوس (نیجریه) در کشور آفریقا پرداخته‌اند اشاره نمود. در این تحقیق با استفاده مجموعه داده‌های سنتینل-۱ و پردازش با پکیج یکپارچه SNAP2StaMPS، به روش تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های پایدار، با هدف برآورد فرونشست انجام و همچنین آن‌ها در پایان نتایج را با تداخل سنجی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای دیگر مقایسه کردند. مانچینی و همکاران (۲۰) در پژوهشی مشابه با استفاده از این پکیج و همچنین ترکیب نتایج پردازش فن تداخل سنجی با پراکنش گرهای دائمی در هر دو مدار صعودی و نزولی سنتینل-۱ به پایش فرونشست در بخش جنوب غربی دشت پو (ایتالیا) پرداختند. اورلانا و همکاران (۲۱) در تحقیقی به بررسی پدیده فرونشست بر روی مسیرها و جاده‌های شهری در شهر رم (ایتالیا) پرداختند. آن‌ها برای رسیدن به این هدف با استفاده از این پکیج خودکار و بر اساس پردازش دو مجموعه داده از ماهواره سنتینل-۱ و کاسمو اسکای مد توانستند به خروجی‌های متناسب با فن تداخل سنجی پراکنش کننده‌ها با طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی و همچنین ترکیب هر دو فن در جهت کارایی بیشتر دست یابند. زارع کمالی و همکاران (۲۶) در پژوهشی با هدف تحلیل و مقایسه جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم طول خط مبنای کوتاه در باندهای X و C بر روی منطقه موردی اراضی شهر تهران صورت گرفت. برای این منظور از ۱۹ تصویر باند C سنجنده ASAR و ۱۱ تصویر باند X از سنجنده TerraSAR-X استفاده شد، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که باوجود یکسان نبودن طول‌موج و زمان اخذ تصاویر مورد استفاده، نتایج به‌دست‌آمده برای مناطق نشست و بالآمدگی برای هر سنجنده نزدیک به هم است. فروغ‌نیا و همکاران (۱۳) به برآورد میانگین نرخ تغییرات سالیانه فرونشست در منطقه شهری تهران با استفاده از مجموعه داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و انویست، پرداختند. نتایج بیانگر فرونشست چشم‌گیری، در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه و حومه اطراف شهر تهران را نشان می‌داد. با توجه به منابع

قسمت اصلی پردازش سری زمانی تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های پایدار (PSI) در بسته نرم افزاری استمپس به روی مناطق مورد مطالعه انجام شد (شکل ۱).

نتایج، انطباق آن با شواهد زمینی فرونشست، نمودار سری زمانی و هیدرو گراف واحد آبخوان است.

روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا یک پیش پردازش تداخل سنجی تفاضلی (DInSAR) توسط نرم افزار متن باز اسنپ و سپس



شکل ۱. دیاگرام از مراحل پردازش تحقیق. قسمت بالا مربوط به فن تداخل سنجی تفاضلی در نرم افزار SNAP، قسمت پایین مربوط به پردازش پراکنش کننده‌های دائمی در نرم افزار StaMPS

Fig. 1. Diagram of research processing steps. The upper part is related to the differential interferometry technique in SNAP software, the lower part is related to the processing of permanent distributors in StaMPS software

روش تداخل سنجی مورد استفاده در این تحقیق از روش ابدأ شده از پژوهش فرتی و همکاران (۱۰ و ۱۱) برگرفته شده است. به طور کلی فاز تداخل نما (Φ)، از سیگنال‌های مزاحمی تشکیل شده است (رابطه ۱) از جمله این عوامل مزاحم می‌توان به Φ_{topo} یعنی فاز ناشی از توپوگرافی، Φ_{flat} فاز ناشی از زمین مسطح، Φ_{lae} فاز ناشی از تغییر زاویه دید سنجنده، Φ_{disp} فاز ناشی از جابجایی ایجاد شده در فاصله زمانی بین دو تصویر، Φ_{aps} اختلاف فاز ناشی از اتمسفر، و همچنین Φ_{noise} که نشانگر سایر عوامل نویز می‌باشد (۲۷).

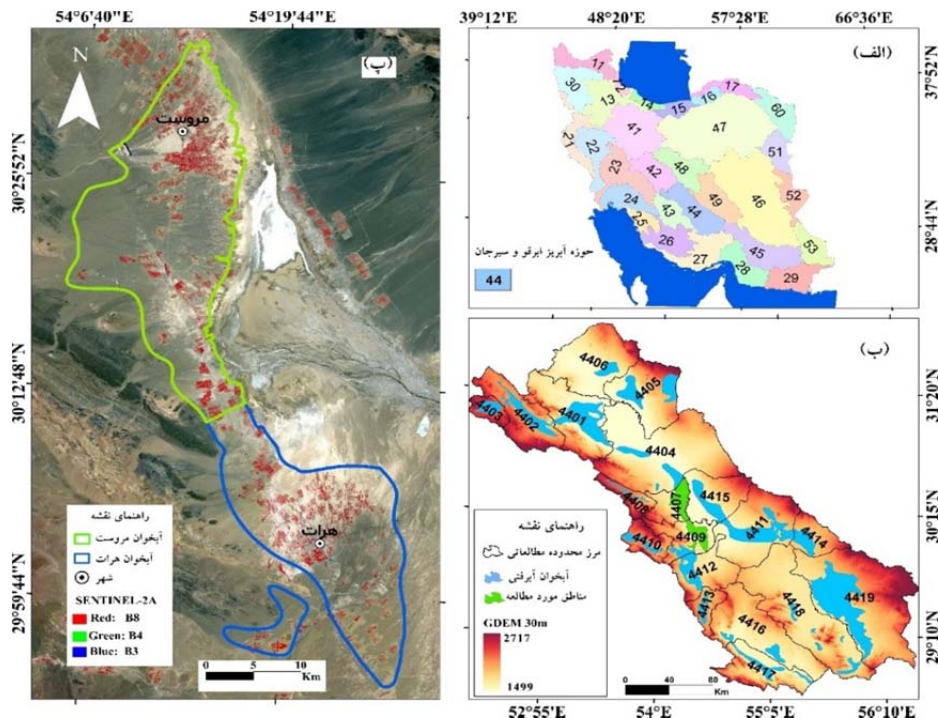
[۱]

$$\Phi = \Phi_{topo} + \Phi_{flat} + \Phi_{lae} + \Phi_{disp} + \Phi_{aps} + \Phi_{noise}$$

بر این اساس، Φ_{disp} را می‌توان با مدل‌سازی یا برآورد سایر ترم‌های مزاحم فاز و در نتیجه کسر آن‌ها از فاز تداخل سنجی بازیابی کرد (۴ و ۱۲). جهت خودکار نمودن مراحل پردازش تداخل سنجی نوع تک مرجع (Single master)، از مجموعه‌ای کد نوشته به زبان برنامه‌نویسی پایتون به نام

منطقه مورد مطالعه

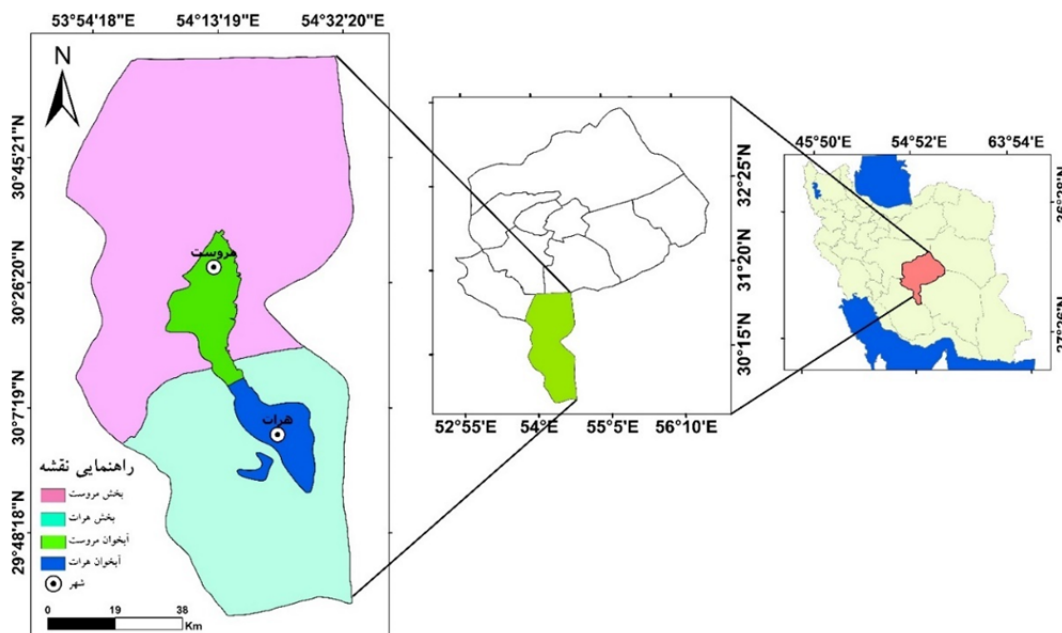
آبخوان هرات و مروست واقع در استان یزد می‌باشند. آبخوان هرات و مروست از نظر زمین‌شناسی بخشی از زون‌های زاگرس (افیولیت، رادیولاریت) و سنندج- سیرجان هستند (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲. نمایش موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه بر اساس حوزه آبریز
Fig. 2. Shows the geographical location of the study area based on the catchment area

از ماهواره سنتینل-۲ را نمایش داده شده است (شکل ۲ قسمت ج). آبخوان‌های هرات و مروست به توجه به گزارش‌های بیلان آب از سوی دفتر مطالعات کشور از نوع آزاد بوده است. از نظر جغرافیایی، محدوده مطالعاتی آبخوان مروست بین طول‌های جغرافیایی "۵۱° ۵۳' تا "۱۹° ۵۴' شرقی و عرض‌های "۸° ۳۰' تا "۳۵° ۳۰' شمالی و محدوده مطالعاتی آبخوان هرات در محدوده جغرافیایی "۳۹° ۵۳' تا "۳۵° ۵۴' شرقی و عرض‌های "۴۶° ۲۹' تا "۱۵° ۳۰' شمالی در منتهی علیه جنوب استان یزد واقع شده‌اند (شکل ۳).

در این شکل‌ها قسمت‌های ب و ج، به ترتیب نشان‌دهنده تقسیم‌بندی محدوده‌های مطالعاتی موجود در حوضه درجه ۲ آبریز کویر ابرقو و سیرجان با کد ۴۴ و مساحتی برابر با ۵۷۱۲۵/۳ کیلومترمربع است. محدوده مطالعاتی هرات از بین ۱۹ محدوده مطالعاتی موجود حوزه ابرقو سیرجان، دارای کد ۴۴۰۹ و مروست با کد ۴۴۰۷ با مساحتی به ترتیب ۱۶۲۵/۶ و ۱۱۵۱/۲ کیلومترمربع هستند. همچنین موقعیت هر ۲ آبخوان آبرفتی هرات (آبی‌رنگ) و مروست (سبزرنگ) بر روی تصویر دارای ترکیب رنگی کاذب



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه به ترتیب کشور ایران و استان یزد و شهرستان خاتم.

Fig. 3. Geographical location of the study area, Iran, Yazd province and Khatam city, respectively

سنتینل-۱، در سطح تصویر مختلط تک منظر، گذر بالا، قطبش ۷۷ و شماره قطعه ۹۳ مربوط به بازه زمانی تقریباً دوساله را در هر دو منطقه مورد مطالعه مورد پردازش قرار گرفت. برخی از جزئیات داده‌های سنتینل-۱ که در پردازش مورد استفاده قرار گرفته در ادامه نشان داده شده است (جدول ۱).

در این پژوهش تحلیل و آنالیز فن تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی تنها محدود به استفاده از داده‌های راداری سنتینل و بر اساس دوره بازدید مجدد ۱۲ روز شد که با توجه به میزان جابجایی‌ها و شناخت منطقه مورد مطالعه و تعداد نسبتاً بالای تصاویر راداری این انتخاب مناسب بود (جدول ۱). بر همین اساس تعداد ۲۴ داده مربوط به سنجنده

جدول ۱. لیست کامل داده‌های مورداستفاده از سنجنده سنتینل-۱

Table 1. Complete list of data used by Sentinel-1 sensor

تاریخ جمع‌آوری	داده‌ها	نام	ردیف
2017/03/20	S1A_IW_SLC_ISDV_20170320T142545_20170320T142612_015777_019FAE_6870		1
2017/04/25	S1A_IW_SLC_ISDV_20170425T142547_20170425T142614_016302_01AF8C_08BB		2
2017/06/12	S1A_IW_SLC_ISDV_20170612T142550_20170612T142617_017002_01C507_8337		3
2017/07/18	S1A_IW_SLC_ISDV_20170718T142552_20170718T142618_017527_01D4FB_58EC		4
2017/05/19	S1A_IW_SLC_ISDV_20170519T142548_20170519T142615_016652_01BA33_AE1A		5
2017/08/23	S1A_IW_SLC_ISDV_20170823T142554_20170823T142621_018052_01E4F8_5A7A		6
2018/01/14	S1A_IW_SLC_ISDV_20180114T142553_20180114T142620_020152_0225F7_7510		7
2017/10/22	S1A_IW_SLC_ISDV_20171022T142555_20171022T142622_018927_01FFC4_566A		8
2018/01/26	S1A_IW_SLC_ISDV_20180126T142552_20180126T142619_020327_022B81_44F1		9
2018/02/07	S1A_IW_SLC_ISDV_20180207T142552_20180207T142619_020502_02311A_6EFC		10
2018/02/19	S1A_IW_SLC_ISDV_20180219T142552_20180219T142619_020677_0236AE_B2BC		11
2018/03/03	S1A_IW_SLC_ISDV_20180303T142552_20180303T142619_020852_023C3A_3EE9		12
2018/09/23	S1A_IW_SLC_ISDV_20180923T142601_20180923T142628_023827_02999B_1AB6		13
2018/10/29	S1A_IW_SLC_ISDV_20181029T142602_20181029T142629_024352_02AAAA_7EAB		14
2018/04/08	S1A_IW_SLC_ISDV_20180408T142552_20180408T142619_021377_024CCF_2176		15
2018/06/19	S1A_IW_SLC_ISDV_20180619T142556_20180619T142623_022427_026DCC_82EF		16
2018/11/22	S1A_IW_SLC_ISDV_20181122T142601_20181122T142628_024702_02B767_391E		17
2018/12/04	S1A_IW_SLC_ISDV_20181204T142601_20181204T142628_024877_02BD5B_298F		18
2018/12/16	S1A_IW_SLC_ISDV_20181216T142600_20181216T142627_025052_02C3A2_FE21		19
2019/01/09	S1A_IW_SLC_ISDV_20190109T142558_20190109T142626_025402_02D047_EEB9		20
2019/02/02	S1A_IW_SLC_ISDV_20190202T142559_20190202T142626_025752_02DD07_F3BA		21
2019/02/14	S1A_IW_SLC_ISDV_20190214T142558_20190214T142625_025927_02E337_451B		22
2019/02/26	S1A_IW_SLC_ISDV_20190226T142558_20190226T142625_026102_02E97E_2AB3		23
2019/03/10	S1A_IW_SLC_ISDV_20190310T142558_20190310T142625_026277_02EFCA_AB07		24

تداخل سنجی به روش تفاضلی

در این رابطه؛ γ^m هم‌دوسی تجمعی برای تصویر پایه M و K تعداد تصاویر فرعی است. مقادیر بیشینه برای خط مبنایی قائم B_{\perp} ، خط مبنایی زمانی T و فرکانس مرکزی دوپلر f_{dc} هست. در ضمن اعداد ۱۲۰۰ و ۵ و ۱۳۸۰ به ترتیب به‌عنوان مقادیر بیشینه برای خط مبنایی قائم $(B_{\perp, \max})$ ، خط مبنایی زمانی (T_{\max}) و $f_{dc, \max}$ فرکانس مرکزی دوپلر، در خصوص تصاویر سنجنده ERS در نظر گرفته شده است. جزئیات پارامترهای مربوط به این مرحله را نشان می‌دهد (جدول ۲).

پیش از پردازش داده‌ها در این پژوهش، از قابلیت اپراتور ایجاد گراف (GPT) در نرم افزار اسنپ برای انتخاب تصویر اصلی (Master) از مجموعه داده‌های راداری سنتینل-۱ به کمک (رابطه‌های ۲ و ۳) استفاده شد.

[۲]

$$\gamma^m = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^K g(B_{\perp}^{k,m}, 1200) \times g(T^{k,m}, 5) \times g(f_{dc}^{k,m}, 1380)$$

که در آن تابع g به‌صورت زیر تعریف می‌شود؛

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & \text{if } |x| < c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad [۳]$$

در این رابطه؛ γ^m همدوسی تجمعی برای تصویر پایه M جدول ۲. برخی پارامترهای مربوط به تصویر اصلی

Table 2. Some parameters related to the master image

نام منطقه مورد مطالعه	شماره قطعه	تاریخ تصویر	قطبش	نخستین قطعه	آخرین قطعه	زیرپوشش (Sub-Swath)
آبخوان هرات	۹۳	۲۰۱۸/۰۴/۰۸	۷۷	۴	۶	IW-2
آبخوان مروست	۹۳	۲۰۱۸/۰۴/۰۸	۷۷	۶	۸	IW-2

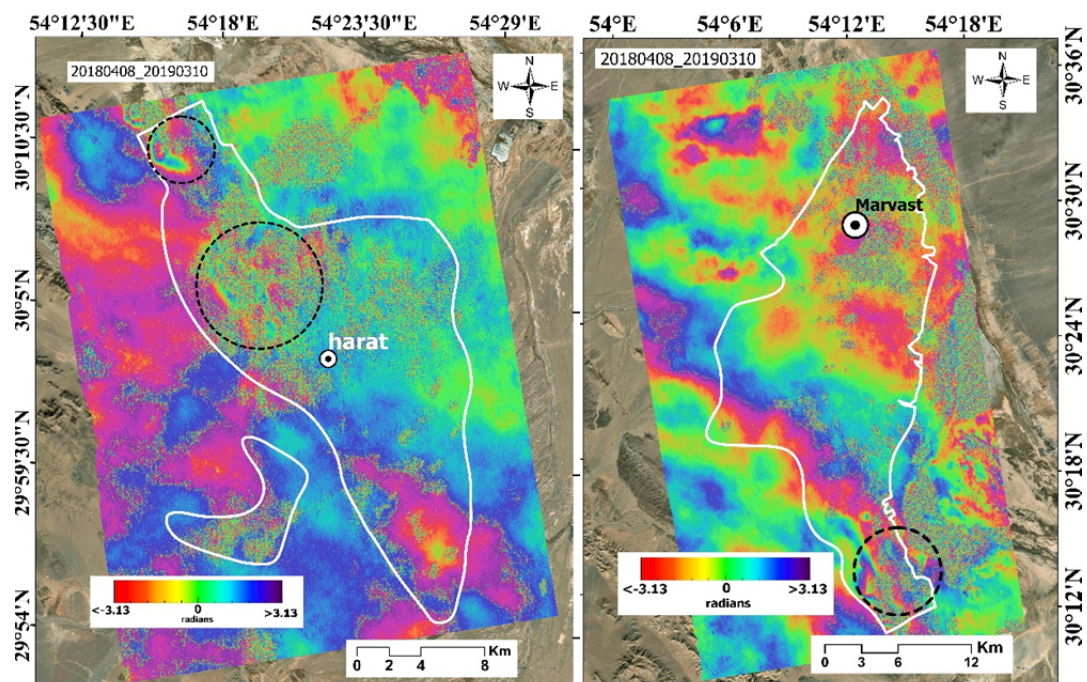
نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از فن تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های پایدار در پژوهش حاضر با استفاده از پکیج SNAP2StaMPS به شرح ذیل بود. از جمله تداخل نما تفاضلی حاصل از الگوریتم پردازش خودکار بر مبنای فن تداخل سنجی با پراکنشگرهای دائمی که به کمک پکیج SNAP2StaMPS در شکل ۴ ملاحظه می‌شود. قابل ذکر است که در این پژوهش جهت دستیابی به دقت بهتر در حذف اثر توپوگرافی از مدل ارتفاعی سنجنده SRTM با دقت ۳۰ متر در تمام مراحل پردازشی استفاده شد. بر همین اساس، تعداد ۲۳ تداخل نما با پردازش روش تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی با استفاده از ۲۴ تصویر راداری سنجنده سنتینل-۱ ایجاد شد. (شکل ۴)، دو نمونه از تداخل نگاشت منتخب آورده شده است. در این شکل سیکل تغییرات رنگی که با نقطه چین مشخص شده‌اند، ناشی از جابجایی زمین در راستای دید سنجنده هست. همچنین عواملی مانند نویز موجود، نرخ بالایی حرکت سطحی و پوشش گیاهی ناشی از ارضی کشاورزی در این ناحیه‌ها موجب از دست رفتن همدوسی و در نتیجه عدم شکل‌گیری فرینج به صورت کامل شده است. اعداد ذکر شده در مورد طول خط مبنایی زمانی و مکانی در این شکل بر اساس اطلاعات (جدول ۴) که در بخش بعدی است، هست.

تولید و پردازش فن تداخل سنجی تفاضلی راداری در این مطالعه، در چهار گام پیوسته و خودکار (مورد ملاحظه دز شکل ۱ الف تا ج) به کمک اسکریپت‌های پایتون اجرا شد. گام اول، آماده‌سازی تصاویر فرعی جهت مرتب سازی تصاویر انجام می‌شود. گام دوم جهت تقسیم و به‌روزرسانی پروتجهای مداری تصاویر فرعی، گام سوم جهت ثبت هندسی مشترک و ایجاد تداخل سنجی، و در نهایت گام چهارم خروجی از نرم‌افزار استمپس انجام می‌گردد. در گام دوم، به‌طور معمول پروتجهای مداری دقیق با دقت ۵ سانتی‌متر خودکار توسط نرم‌افزار اسنپ دانلود و اعمال می‌شوند (۲۲). گام سوم به‌عنوان محاسباتی‌ترین بخش پردازش محسوب می‌شود؛ زیرا این گام محاسبات ثبت هندسی مشترک و ایجاد تداخل نماها را برای داده‌های TOPSAR را انجام می‌دهد، عملیاتی مانند استک کردن (Back-geocoding) و تنوع طیفی پیشرفته (۲۴)، ایجاد تداخل نماها، حذف فاز ناشی از اثر زمین مسطح و در پایان حذف فاز ناشی از توپوگرافی با توجه به نوع مدل رقومی ارتفاعی انجام می‌گیرد پس از اتمام هر چهار مرحله خروجی با چهار فولدر (rslc,diff0,geo,dem) به دست آمد.

تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های پایدار

در این تحقیق مرحله پردازش در نرم‌افزار استمپس، تمام گام‌های هشت‌گانه پردازش مطابق کتابچه راهنمای استمپس راهنمایی کتابچه (۱۷) صورت گرفت.



شکل ۴. دو نمونه از تداخل نماهای منتخب در پردازش نهایی روش تداخل سنجی (PSI)، با طول باز زمانی و مکانی ۳۳۶ روز و ۶۰/۷۷ متر.

(الف) تداخل نمای سمت راست مربوط به آبخوان مروست، (ب) تداخل نمای سمت چپ مربوط به آبخوان هرات

Fig. 4. Two examples of selected interference views in the final processing of the interferometric measurement (PSI) method, with a length of 336 days and 60.77 meters: a) Interferogram of the facade related to Marvast aquifer b); Interferogram of the facade related to Herat aquifer

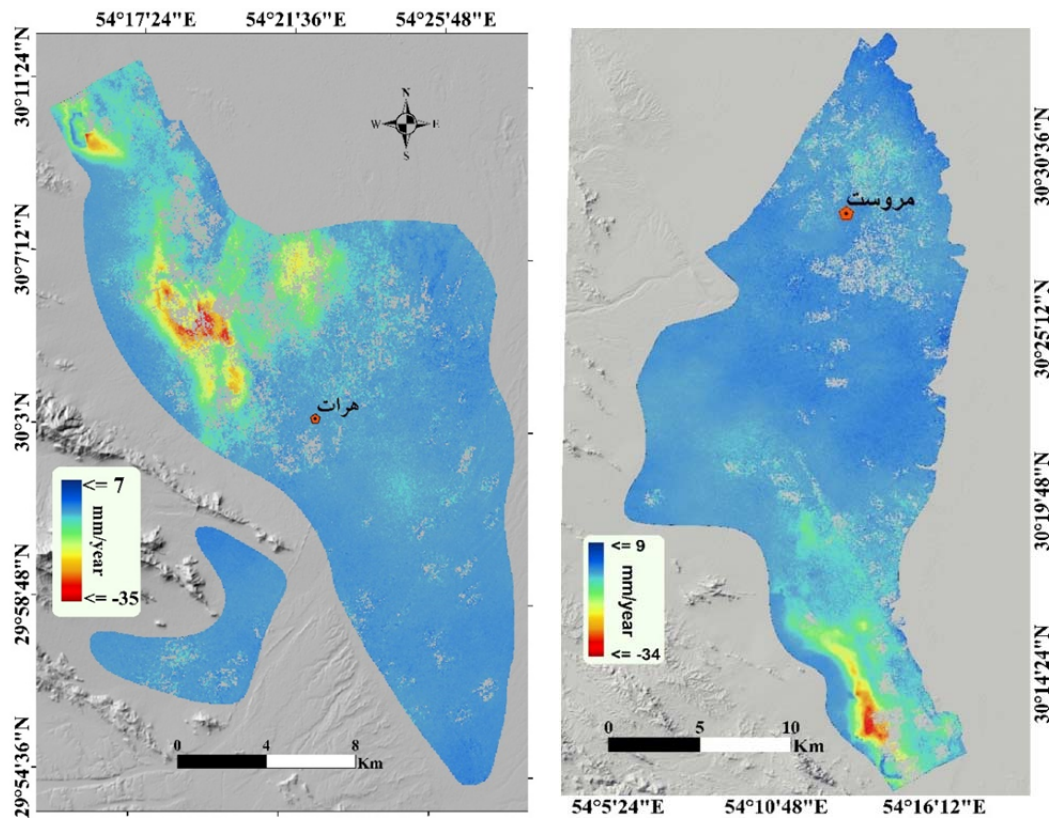
استاندارد برای نقشه متوسط جابجایی، هر دو آبخوان هرات و مروست به ترتیب برابر با ۴/۱۹ و ۳/۶۵ میلی متر در سال به دست آمد. علاوه بر این شاخص‌های آماری دیگری در مورد نحوه توزیع مشاهدات عنوان شدند (جدول ۳).

در تحقیق حاضر، ما برای هر دو محدوده (آبخوان هرات و مروست)، میانگین نرخ تغییر شکل در جهت خط دید ماهواره را با فن تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی حاصل از پردازش داده‌های راداری با گذر صعودی سنتینل-۱ را به دست آوردیم (شکل ۵). شاخص پراکنندگی انحراف

جدول ۳. پارامترهای آماری برآورد شده از نقشه متوسط سرعت جابجایی در راستای خط دید ماهواره (LOS)

Table 3. Statistical parameters estimated from the average displacement velocity map along the satellite line of sight (LOS)

چولگی	کشیدگی	ماکزیمم	مینیمم	تعداد نقاط پراکنش گر	انحراف استاندارد	میانگین	میانگین	نام محدوده
-۲/۲۷	۱۵/۶۰	۱۰/۶۳	-۳۹/۷۹	۲۶۳۵۶۶۹	۳/۶۵	-۱/۸۴	-۲/۳۴	آبخوان مروست
-۲/۱۸	۱۱/۹۰	۱۱/۴۶	-۴۰/۳۳	۱۶۲۹۳۳۳	۴/۱۹	-۰/۶۵	-۱/۲۹	آبخوان هرات

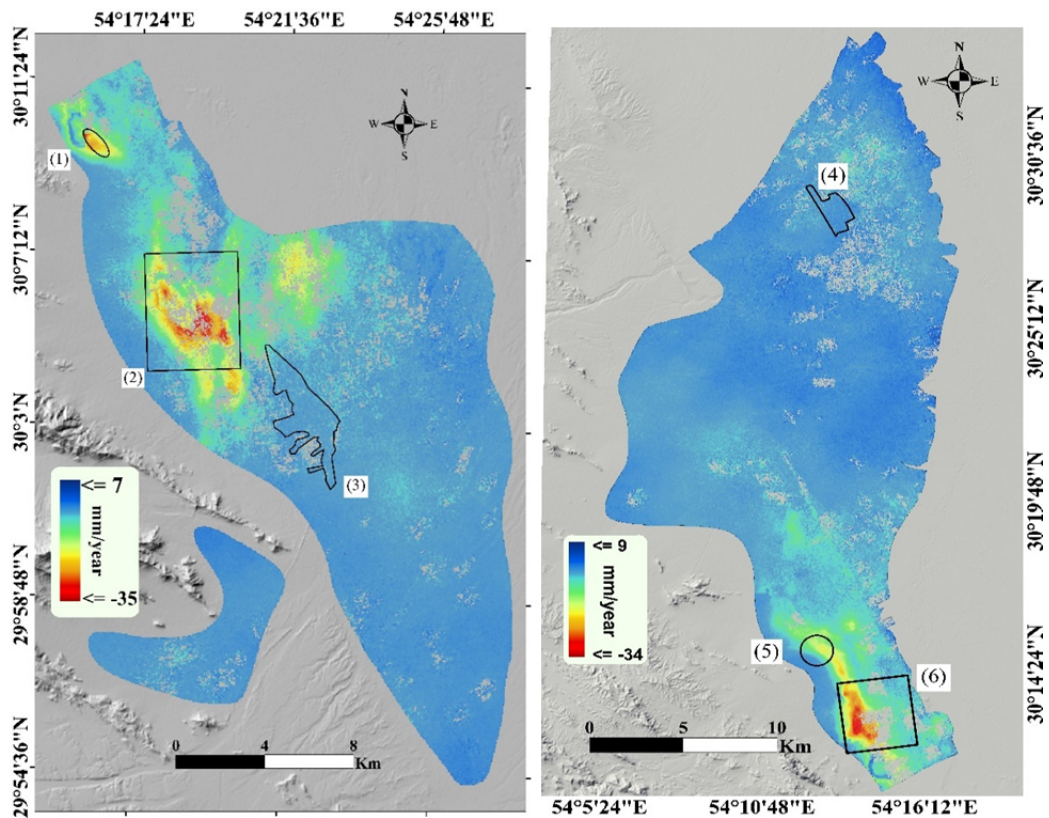


شکل ۵. نقشه‌های نرخ متوسط جابجایی در جهت خط دید ماهواره (LOS)، حاصل از فن پراکش گرهای دائمی (PSI) و پردازش داده‌های سنتینل-۱ طی بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۲/۲۰ تا ۲۰۱۹/۰۲/۱۰ از آبخوان هرات (الف) و آبخوان مروست. مقادیر مثبت، حاکی از حرکت به سمت بالا در راستای دید ماهواره و مقادیر منفی نشانگر یک حرکت به سمت پایین در راستای خط دید سنجنده است. پس‌زمینه بر اساس مدل سطح زمین (DSM) با رزولوشن ۳۰ متری، اتخاذشده از ماهواره آلوس (ALOS)

Fig. 5. Medium rate satellite landscape displacement (LOS) maps obtained from permanent Interferometry measurement (PSI) and Sentinel-1 data processing during the period 20/02/2017 to 10/02/2019 from the Herat groundwater aquifer Has come (a) and the aquifer is Marvast. Positive values indicate upward movement in the direction of the satellite view and negative values indicate downward movement in the direction of the sensor's line of sight. The background is taken from the Alos satellite (ALOS) based on the 30 m high surface level model (DSM)

ناحیه‌های نیز بر اساس شواهد میدانی فرونشست در هر دو محدوده مطالعاتی انتخاب شدند. این ناحیه‌ها بر اساس شماره بر روش نقشه متوسط جابجایی برچسب‌گذاری شدند.

بر اساس شکل ۶، می‌توان به راحتی الگوهای تغییر شکل که اکثراً بر اثر استخراج آب زیرزمینی در اراضی کشاورزی مشاهده کرد. همچنین در ادامه ناحیه‌های به صورت تصادفی و

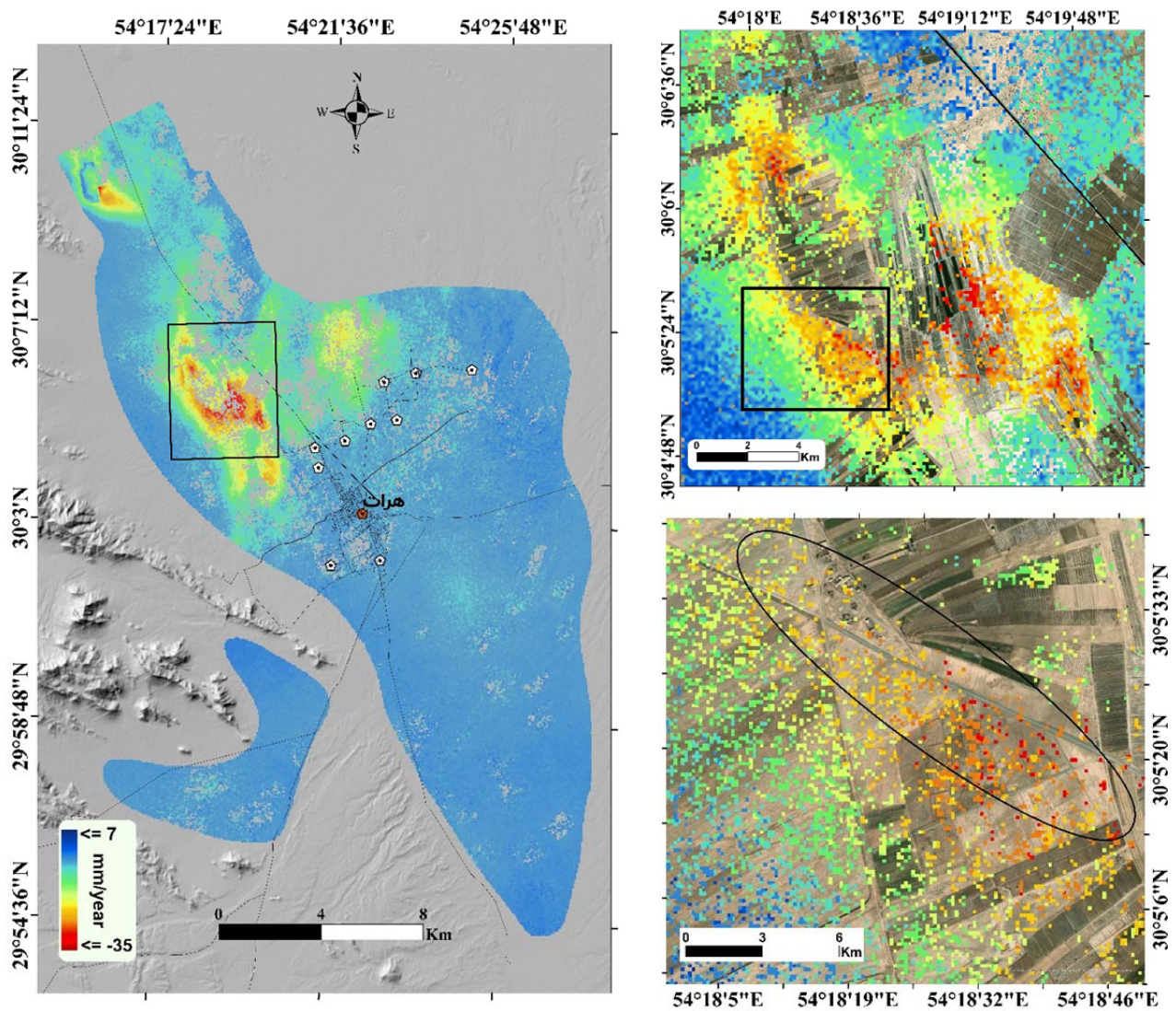


شکل ۶. نواحی انتخاب شده برای ارزیابی نتایج دقیق نرخ متوسط فرونشست در راستایی خط دید ماهواره. جهت نمایش بهتر، از نقشه فرونشست از پس زمینه نقشه ارتفاعی سطح ماهواره الوس ۳۰ متری (ALOS-DSM30m) استفاده شده است.

Fig. 6. Areas selected to evaluate the exact results of the average subsidence rate in line with the satellite line of sight. For better display, the subsidence map is used from the background of the altitude map of ALOS satellite 30 meters (ALOS-DSM 30m).

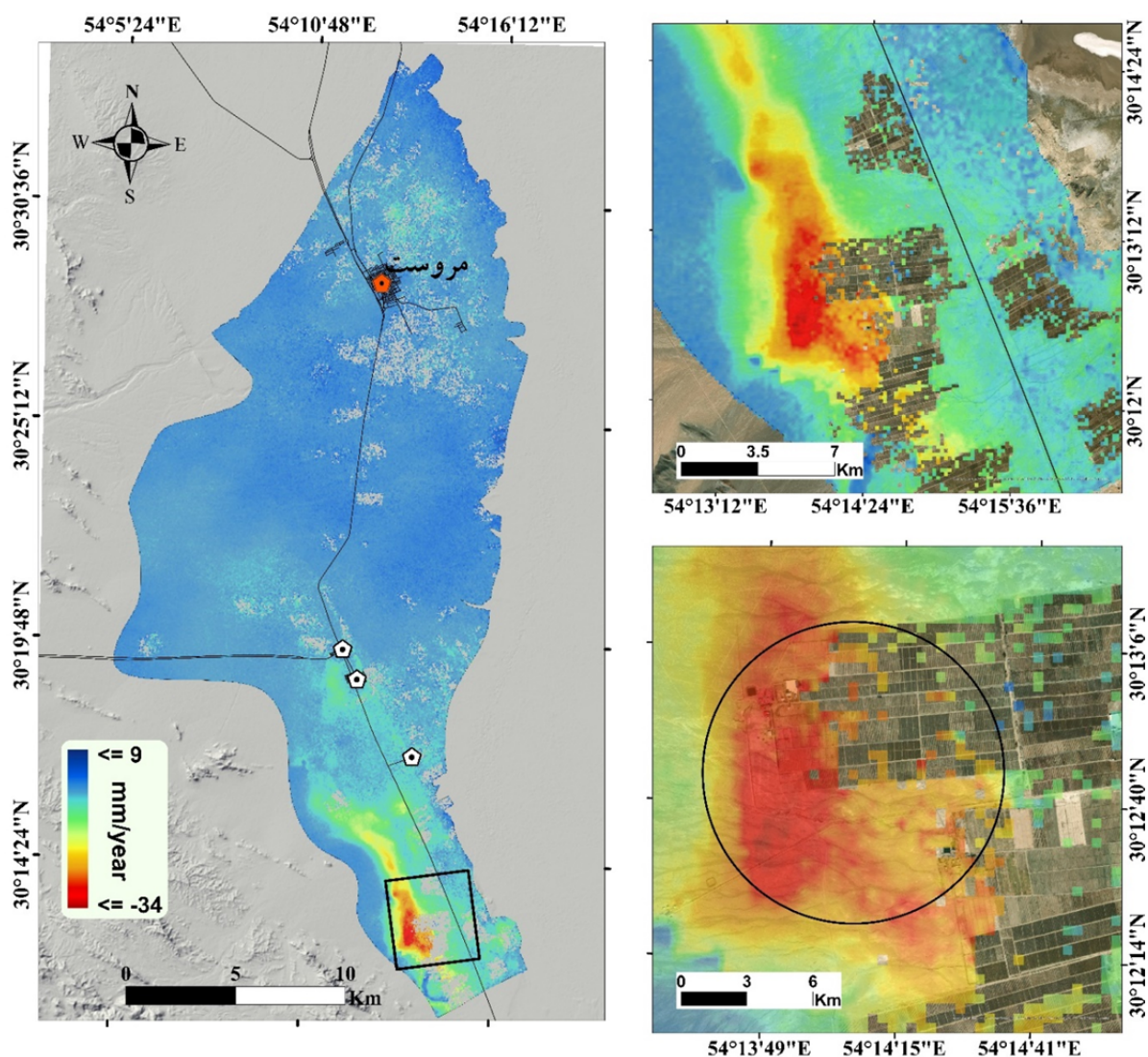
دادند. در این تحقیق بر اساس نقشه متوسط سرعت جابجایی در جهت خط دید ماهواره محدوده قنات سفید از آبخوان هرات و منطقه قنات شو شوران از آبخوان مروست نشان داده شدند (شکل های ۷ و ۸).

نواحی مربوط به آبخوان هرات شامل، (۱) قنات سفید و (۲) شمال چشمه علی و (۳) شهر هرات و نواحی (۴) قنات شو شوران (۵) چاه حاجی آباد ناصری و (۶) شهر مروست، مربوط به آبخوان مروست را می توان نام برد. این در حالی است که بقیه مناطق نرخ تغییر شکل بسیار ناچیز را در خود جای



شکل ۷. نقشه متوسط جابجایی در جهت خط دید ماهواره از ناحیه دوم در منطقه مورد مطالعه آبخوان هرات. جهت نمایش بهتر نتایج پس‌زمینه از مدل سه‌بعدی سطح رقومی ماهواره الوس (ALOS 3D)، و پس‌زمینه مپ سرویس نرم‌افزار ArcGIS-Pro از شرکت ESRI استفاده شده است.

Fig. 7. Medium displacement map in the direction of the satellite line of sight from the second area in the study area of Herat Aquifer. To better display the results, the background of the 3D digital surface model of Alos satellite (ALOS 3D), and the background of the ARCGIS-Pro software mapping service from Esri company have been used.



شکل ۸. نقشه متوسط جابجایی در جهت خط دید ماهواره از ناحیه دوم واقع در آبخوان مروست. جهت نمایش بهتر، از پس‌زمینه مدل سه‌بعدی سطحی رقومی ماهواره الوس (ALOS 3D)، و پس‌زمینه مپ سرویس نرم‌افزار ARCGIS-Pro از شرکت ESRI استفاده شده است.

Fig. 8. The average displacement map in the direction of the satellite line of sight from the second area located in Marvas aquifer. For a better view, the background of the digital 3D surface model of the Alos satellite (ALOS 3D), and the background of the ARCGIS-Pro software mapping service from Esri company have been used.

تهیه تصاویر ابتدا وضعیت بیس لاین (Baseline)، زمانی و مکانی تصاویر بررسی شد (۱۹)، و بر اساس آن زوج تصاویر برای ایجاد تداخل‌نگاشت انتخاب شده‌اند (جدول ۴).

در تحقیق حاضر میزان نرخ متوسط فرونشست از تاریخ ۲۰۱۷/۰۲/۲۰ تا ۲۰۱۹/۰۲/۱۰ با استفاده از ۲۴ تصویر راداری سنتینل-۱ و روش سری زمانی تداخلسنجی با پراکنش‌کننده‌های دائمی برآورد شده است؛ که برای این منظور، پس از

جدول ۴. برآورد خط مبنا جهت انتخاب زوج تصاویر تداخل سنجی حاصل از تصاویر سنجنده سنتینل-۱

Table 4. Estimation of baseline for selecting pairs of interferometry images obtained from Sentinel-1 sensor images.

تاریخ تصاویر	خط مبنا عمودی (متر)	خط مبنا زمانی (روز)	مقادیر متوسط هموسی	مقدار ارتفاعی (متر)	دوپلر ابهام ارتفاعی (متر)	خط مبنا
۲۰۱۸/۰۴/۰۸	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۲۰۱۷/۰۳/۲۰	-۱۷/۴۴	۳۸۴	۰/۶۴	۹۰۲/۶۴	۱/۲۸	
۲۰۱۷/۰۴/۲۵	۳۰/۳۵	۳۴۸	۰/۶۶	-۵۱۸/۸۸	۳/۹۶	
۲۰۱۷/۰۵/۱۹	-۸۰/۱۲	۳۲۴	۰/۶۶	۱۹۶/۵۲	۲/۷۳	
۲۰۱۷/۰۶/۱۲	-۱۱/۵۸	۳۰۰	۰/۷۲	۲۰/۱۳۵۹	۴/۷۰	
۲۰۱۷/۰۷/۱۸	-۲۰/۳۳	۲۶۴	۰/۷۴	۴۹/۷۷۴	۲/۹۱	
۲۰۱۷/۰۸/۲۳	۱۵/۳۵	۲۲۸	۰/۷۸	-۱۰۲۵/۸۷	-۳/۰۲	
۲۰۱۷/۱۰/۲۲	-۲۳/۳۳	۱۶۸	۰/۸۴	۲۷۵۴/۶۵	۰/۱۱	
۲۰۱۷/۰۱/۱۴	۳/۲۵	۸۴	۰/۸۸	-۲۹۷/۴۸	-۰/۳۳	
۲۰۱۸/۰۱/۲۶	۱۴/۹۵	۷۲	۰/۹۲	-۱۰۵۳/۱۱	-۱/۲۰	
۲۰۱۸/۰۲/۰۷	-۴۰/۰۹	۶۰	۰/۹۱	۳۹۲/۷۹	-۱/۵۱	
۲۰۱۸/۰۲/۱۹	-۲۳/۴۴	۴۸	۰/۹۴	۶۷۱/۸۸	۰/۸۷	
۲۰۱۸/۰۹/۲۳	۳۱/۸۵	-۱۹۸	۰/۸۲	-۴۹۴/۴۳	۰/۶۱	
۲۰۱۸/۰۳/۰۳	-۸/۵۴	۳۶	۰/۹۶	۱۸۴۳/۲۷	-۱/۷۷	
۲۰۱۸/۰۶/۱۹	-۱/۰۶	-۷۲	۰/۹۳	۱۴۸۷۲/۹۶	-۱/۰۵	
۲۰۱۸/۱۰/۲۹	-۴۶/۹۶	-۲۰۴	۰/۷۸	۳۳۵/۳۱	۲/۰۷	
۲۰۱۸/۱۱/۲۲	۷۸/۸۵	-۲۲۸	۰/۷۴	-۱۹۹/۶۸	-۰/۳۶	
۲۰۱۸/۱۲/۰۴	۳۷/۲۵	-۲۴۰	۰/۷۶	-۴۲۲/۷۵	۱/۶۳	
۲۰۱۸/۱۲/۱۶	۴۷/۸۳	-۲۵۲	۰/۷۴	-۳۲۹/۱۷	-۰/۷۱	
۲۰۱۹/۰۱/۰۹	۳۴/۷۲	-۲۷۶	۰/۷۳	-۴۵۳/۴۶	۱/۶۷	
۲۰۱۹/۰۲/۰۲	۲۸/۷۲	-۳۰۰	۰/۷۱	-۵۴۸/۲۶	۳/۹۴	
۲۰۱۹/۰۲/۱۴	۱۴/۱۴	-۳۱۲	۰/۷۱	۱۱۱۳/۹۵	۱/۰۵	
۲۰۱۹/۰۲/۲۶	-۶۲/۰۷	-۳۲۴	۰/۶۷	۲۵۳/۶۸	-۳/۵۳	
۲۰۱۹/۰۳/۱۰	۶۰/۷۷	۳۳۶	۰/۶۶	۲۵۹/۱۲	-۲/۰۵	

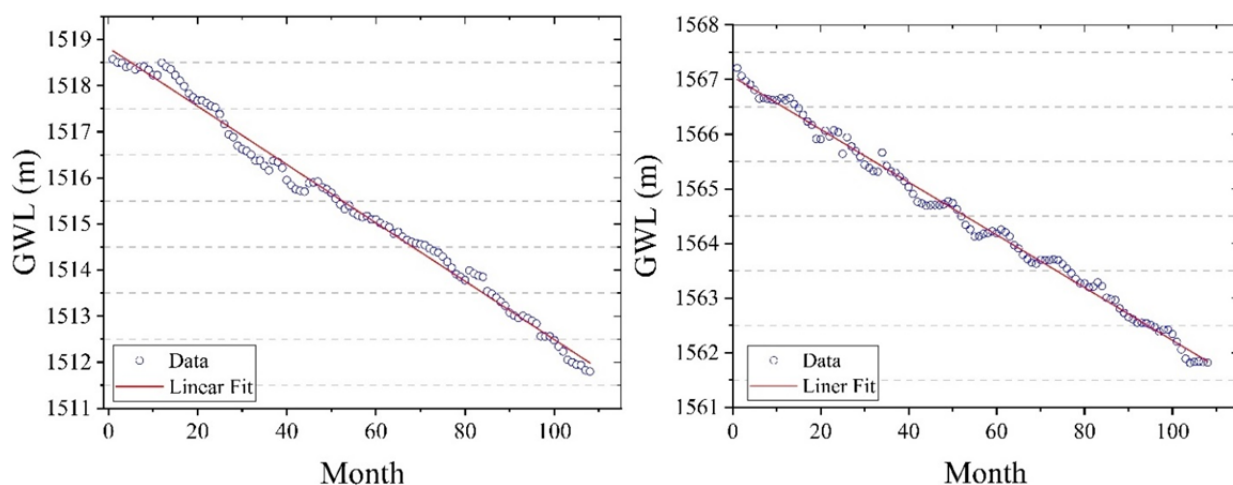
مطالعاتی مروست شامل ۲۰۲ حلقه چاه، ۴ رشته قنات و دودهنه چشمه هست که تخلیه سالیانه آن‌ها به ترتیب ۷۴/۲۵، ۳/۰۹ و ۰/۰۳۵ میلیون مترمکعب است. در مطالعات هیدرو ژئولوژی برحسب نیاز هیدرو گراف معرف آبخوان یا دشت به کمک هیدرو گراف چاه‌های مشاهده‌ای واقع در آن دشت بر اساس رابطه زیر ترسیم می‌شود.

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times T_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad [4]$$

محدوده مطالعاتی هرات با کد ۴۴۰۹ و مروست با کد ۴۴۰۷ (شکل ۱)، به ترتیب با وسعتی حدود ۱۶۲۵/۶ و ۱۱۵۱/۲ کیلومترمربع هست. آبخوان‌ها موجود در هر دو محدوده مطالعاتی از نوع آزاد بوده است. بر اساس اطلاعات آخرین دوره آماربرداری مربوط به سال ۱۳۸۸، منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی هرات شامل ۱۹۱ حلقه چاه، ۶۰ رشته قنات و ۱۰۶ دهنه چشمه هست که تخلیه سالیانه آن‌ها به ترتیب ۶۳/۳۴، ۱۵/۳۳ و ۲۵/۰۶ میلیون مترمکعب است. همچنین در مورد منابع آب زیرزمینی در محدوده

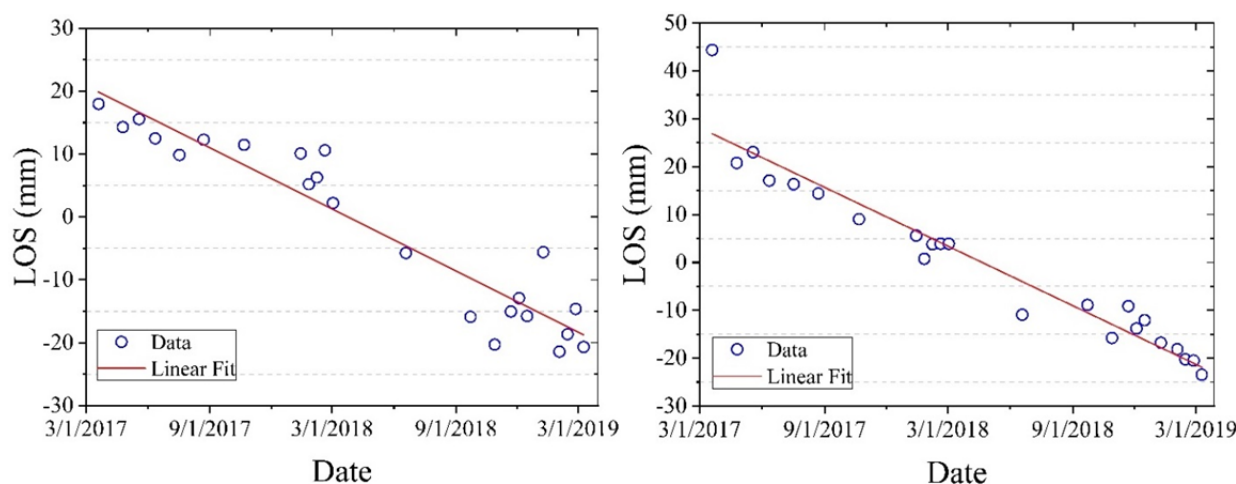
مروست این هیدرو گراف افت آب زیرزمینی در حدود ۷ متر در طی دوره هشت ساله محاسبه شد. بر اساس گراف سری زمانی حاصل از تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی ارزیابی نرخ فرونشست صورت گرفت (شکل ۹). بر این اساس، بخش‌های از هر دو محدوده آبخوان هرات و مروست بر اساس (شکل‌های ۷ و ۸) انتخاب شدند.

در این رابطه؛ \bar{T} تراز متوسط آب زیرزمینی و A_i سطح تأثیر برای هر چاه مشاهده‌ای و T_i نمایش دهنده تراز آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای است. در این تحقیق با استفاده از نتایج اندازه‌گیری طولانی‌مدت سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای هیدرو گراف واحد آبخوان مناطق مورد مطالعه استخراج شد. مطابق هیدرو گراف واحد (شکل ۹)، سطح آب زیرزمینی در آبخوان هرات در طول دوره ۸ ساله (۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸) در حدود ۵/۵ متر افت، برای آبخوان محدوده مطالعاتی



شکل ۹. سمت راست هیدرو گراف واحد آبخوان آبرفتی دشت هرات، سمت چپ هیدرو گراف واحد آبخوان آبرفتی دشت مروست

Fig. 9. To the right of the hydrograph of the alluvial aquifer of Herat plain, to the left of the hydrograph of the alluvial aquifer of Marvashst plain



شکل ۱۰. نمایش سری زمانی جابجایی در راستایی (LOS) گراف سمت راست مربوط به قنات شوشوران آبخوان مروست و سمت چپ مربوط به قنات سفید از آبخوان هرات (همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است)

Fig. 10. Display the time series of displacement in direction (LOS) The graph on the right is related to the Shoshuran aqueduct of Marvast aquifer and the left is related to the white aqueduct of Herat aquifer (as shown in Figure 8).

علاوه بر این، نتایج سری زمانی ناحیه‌های دیگر مطابق با (شکل ۱۰ و جدول ۵)، نمایش و لیست شده‌اند، این ارزیابی‌ها حاکی از یک‌روند نزولی نسبتاً شدید بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ بوده است.

جدول ۵. مقایسه نرخ تغییرات برآورد شده بین ناحیه‌های انتخاب شده

Table 4. Compare the estimated change rates between the selected areas

نام ناحیه	تعداد نقاط	میانگین	مینیمم	ماکزیمم	ضریب همبستگی
(۱)	۵۷۰۲	-۰/۵۱	-۱۹/۴۸	۱۲/۸۴	-۰/۲۸
(۲)	۷۱۵	-۰/۵۵	-۱۸/۷۷	۱۹/۸۶	-۰/۹۵
(۳)	۲۷۶۹۵	-۰/۵۰	-۱۷/۶۷	۱۵/۸۰	-۰/۳۲
(۴)	۱۲۰۲۱	-۰/۲۴	-۱۵/۹۹	۰/۱۷	۰/۳۶
(۵)	۲۷۰۸۷	-۰/۹۷	-۱۴/۴۱	۱۲/۲۵	-۰/۹۳
(۶)	۵۰۹۴	-۰/۲۸	-۲۳/۴۴	۴۴/۳۶	-۰/۹۶

بخش غربی کلانشهر بولونیا که در آن سرعت عمودی حداکثر ۲۰ میلی متر در سال در گستره ۲۰۰ کیلومتر مربع بود.

نتیجه‌گیری

روش‌های سری‌زمانی تداخل‌سنجی با پراکنش‌کننده‌های دائمی (PSI) کمک شایانی در جهت پایش فرونشست و حرکات زمین می‌نمایند. از جمله محدودیت‌های این پژوهش جود پیکسل‌های خاکستری‌رنگ در سطح نقشه جابجایی بود، این موضوع به دلیل ناهمبستگی زمانی که بر اثر تغییرات سریع پوشش منطقه و در نتیجه پایین بودن میزان هم‌دوسی ایجاد می‌شود. و همچنین اختلاف فاز ناشی از بازکردن فاز (Phase unwrapping) که این با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه بسیار ناچیز بود.

در پژوهش حاضر، به برآورد نرخ پدیده فرونشست در آبخوان‌های هرات و مروست از استان یزد، از فن تداخل‌سنجی با پراکنش‌گرهای دائمی با استفاده از داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و پکیج خودکار (SNAP2StaMPS) استفاده نمودیم. همچنین، در این تحقیق، پتانسیل بسته متن‌باز استمپس و نرم‌افزار اسنپ جهت پردازش تداخل‌سنجی راداری را نشان دادیم. از نتایج مهم استخراج‌شده از این الگوریتم پردازش تداخل‌سنجی با پراکنش‌کننده‌های دائمی، ایجاد نقشه متوسط جابجایی برای آبخوان هرات بین ۴۰/۳۳- تا ۱۱/۴۶ میلی‌متر در

در تحقیق حاضر، برای هر دو محدوده (آبخوان هرات و مروست)، میانگین نرخ تغییر شکل در جهت خط دید ماهواره با فن تداخل‌سنجی با پراکنش‌کننده‌های دائمی حاصل از پردازش داده‌های راداری با گذر صعودی سنتینل-۱ با استفاده از پکیج SNAP2StaMPS به دست آمد. میان و همکاران (۵) در پژوهشی مشابه برای بررسی پدیده فرونشست در شهرهای ساحلی بانجول (گامبیا) و لاگوس (نیجریه) در کشور آفریقا پرداخته‌اند. در این تحقیق با استفاده مجموعه داده‌های سنتینل-۱ و پردازش با پکیج یکپارچه SNAP2StaMPS، به روش تداخل‌سنجی با پراکنش‌کننده‌های پایدار، با هدف برآورد فرونشست انجام گرفت. با این تفاوت که در پژوهش یاد شده آن‌ها در پایان نتایج را با تداخل‌سنجی حاصل از دیگر داده‌های ماهواره‌ای مقایسه کردند. مانجینی و همکاران (۲۰)، در پژوهشی مشابه با استفاده از این پکیج و همچنین ترکیب نتایج پردازش فن تداخل‌سنجی با پراکنش‌گرهای دائمی در هر دو مدار صعودی و نزولی سنتینل-۱ به تعداد ۱۷۱ تصویر در جهت بالاگذر ۱۳۲ تصویر در جهت پایین‌گذر در فاصله زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ به پایش فرونشست در بخش جنوب غربی دشت پو (ایتالیا) پرداختند. از نتایج این پژوهش استخراج نقشه سرعت جابجایی و دستیابی به الگوی فرونشست در

انتخاب و میانگین نرخ فرونشست مقایسه شد. علاوه بر این پارامترهای آماری مانند؛ مینیمم، ماکسیمم نرخ جابجایی، به همراه برآورد ضریب همبستگی پیرسون نیز استخراج و مقایسه شدند (جدول ۴). نتایج سری زمانی حاصل از تداخل سنجی تصاویر مورد استفاده در این تحقیق، نشان‌دهنده شیب‌خط برآزشی که در واقع میزان و جهت جابجایی (به سمت بالا یا پایین) را نشان می‌دهد، حاکی یک‌روند نزولی رو به پایین در ناحیه شماره دوم (قنات سفید از آبخوان هرات) و پنجم (قنات شو شوران از آبخوان مروست) به ترتیب میزان آن برابر با حدود ۵ و ۷ سانتی‌متر را نشان می‌دهند. که این نتایج ارتباط معنی‌داری با هیدرو گراف واحد هر دو آبخوان در دارد.

پیشنهاد می‌شود که از ترکیب هندسه صعودی و نزولی تصاویر ماهواره سنتینل، تصاویر با قدرت تفکیک بالاتری مانند TerraSAR-X، ترکیب فن پراکنش کننده‌های پایدار (PSI) با خط مبنای کوتاه (SBAS) و استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند Sarproz جهت پایش فرونشست زمین استفاده گردد.

سال و برای آبخوان مروست بین ۳۹/۷۹- تا ۱۰/۶۳ میلی‌متر در سال در راستای دید ماهواره در طول بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹) بود. بالا آمدن جداره فلزی میله چاه‌های عمیق، شکاف‌های افقی عمیق و نیمه‌عمیق بر روی سطح زمین به‌طور مستقیم نشان‌دهنده میزان فرونشینی سطح در هر دو آبخوان مورد مطالعه است (شکل ۱۱). اگرچه داده‌های ماهواره‌ای دیگری برای آنالیز تداخل سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی وجود دارد، اما با توجه به میزان تغییر شکل نسبتاً کم منطقه، رفتار حرکت خطی در زمان مورد انتظار، قدرت تفکیک زمانی مناسب، تجزیه و تحلیل به زمان اخذ داده‌های سنتینل-۱ (تکرار به مدت ۱۲ روز) و دلایل دیگر که در این تحقیق به آن‌ها اشاره شد، برای این انتخاب کافی است. باهدف ارزیابی کار پردازش شده، نرخ تغییرات مورد برآورد با نتایج حاصل از تحلیل مجموعه مشاهدات میدانی، تحلیل هیدرو گراف واحد و آنالیز سری زمانی حاصل از تداخل سنجی مقایسه شد. بدین منظور، در مناطق مطالعاتی، چندین ناحیه به‌صورت تصادفی و برخی بر اساس شواهد میدانی



شکل ۱۱. پیامدهای فرونشست در مناطق مورد مطالعه در بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰/۰۳/۲۰۱۷ تا ۱۰/۰۳/۲۰۱۹) (الف)؛ (ب) ناحیه قنات سفید در آبخوان هرات، (ج) ناحیه قنات شو شوران از آبخوان مروست.

Figure 11. Consequences of subsidence in the studied areas in the studied period (20/03/2017 to 10/03/2019). a) and b) white aqueduct area in Herat aquifer, b) Shuran aqueduct area of Marvast aquifer.

اسلامی واحد یزد اجرا شده است. در پایان نویسندگان از خدمات تحقیقاتی و پشتیبانی ESA برای تأمین منابع رایانه‌ای مورد استفاده با داده‌های Copernicus Sentinel-1 قدردانی می‌نمایند. همچنین از اداره آب و منطقه‌ای استان یزد جهت قرار دادن اطلاعات چاه‌های پیژومتری کمال تشکر را داریم.

تقدیر و تشکر

این مطالعه حاصل پایان‌نامه با عنوان ارزیابی داده‌های راداری سنتینل-۱ در برآورد نرخ فرونشست زمین مبتنی بر فن پراکنش کننده‌های دائمی بر اساس الگوریتم SNAP2StaMPS (مطالعه موردی آبخوان هرات) در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۴۰۰ و کد ۱۶۷۳۵۲ است که با حمایت دانشگاه آزاد

References

1. Arvin A, Vahabzadeh G, Mousavi SR, Bakhtyari Kia M. 2019. Geospatial modeling of land subsidence in the south of the Minab watershed using remote sensing and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3): 19-34. (In Persian).
2. Bamler R, Hartl P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 14(4): R1-R54. doi:http://dx.doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001.
3. Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11): 2375-2383. doi:http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792.
4. Bozzano F, Esposito C, Franchi S, Mazzanti P, Perissin D, Rocca A, Romano E. 2015// 2015. Analysis of a Subsidence Process by Integrating Geological and Hydrogeological Modelling with Satellite InSAR Data. In: Lollino G, Manconi A, Guzzetti F, Culshaw M, Bobrowsky P, Luino F (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*, Cham. Springer International Publishing, pp 155-159. https://doi.org/110.1007/1978-1003-1319-09048-09041_09031.
5. Cian F, Blasco JMD, Carrera L. 2019. Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: a methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. *Geosciences*, 9(3): 124. doi:https://doi.org/10.3390/geosciences9030124.
6. Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N, Crippa B. 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 78-89. doi:https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
7. Dehghani M. 2016. Landslide Monitoring Using Hybrid Conventional and Persistent Scatterer Interferometry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(4): 505-513. doi:https://doi.org/10.1007/s12524-015-0536-3.
8. Delgado Blasco J, Foumelis M. 2019. Automated SNAP Sentinel-1 DInSAR processing for StaMPS PSI with open source tools (version 1.0. 1). Zenodo Available online: doi:http://doiorg/105281/zenodo1322353.
9. Delgado Blasco JM, Foumelis M, Stewart C, Hooper A. 2019. Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, 11(2): 129. doi:https://doi.org/10.3390/rs11020129.
10. Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38(5): 2202-2212. doi:http://dx.doi.org/10.1109/36.868878.
11. Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 39(1): 8-20. doi:http://dx.doi.org/10.1109/36.898661
12. Ferretti A M, Guarnieri A P. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications.
13. Foroughnia F, Nemati S, Maghsoudi Y. 2018. PS-InSAR Time Series Analysis Using Sentinel-1A and ENVISAT-ASAR Data Stacks for Subsidence Estimation in Tehran. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(1): 57-72. (In Persian).
14. Foumelis M, Blasco JMD, Desnos Y-L, Engdahl M, Fernández D, Veci L, Lu J, Wong C. 2018. ESA SNAP-StaMPS integrated processing for sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In: *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, pp 1364-1367.
15. Galloway D, Burbey T. 2011. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology* 19: 1459-1486. doi:https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5
16. Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arikan M. 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517: 1-13. doi:https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013.
17. Hooper A, Spaans K, Bekaert D, Cuenca MC, Arikan M, Oyen A. 2010. *StaMPS/MTI manual*. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluuyverweg, 1: 2629.
18. Jelének J, Kopačková V, Fárová K. 2018. Post-earthquake landslide distribution assessment using sentinel-1 and-2 data: The example of the 2016 mw 7.8 earthquake in New Zealand. In: *Proceedings*, vol 7. MDPI AG, pp 361. doi:https://doi.org/310.3390/ecrs-3392-05174.
19. Mahapatra P, der Marel Hv, van Leijen F, Samiei-Esfahany S, Klees R, Hanssen R. 2018. InSAR datum connection using GNSS-augmented radar transponders. *Journal of Geodesy*, 92(1): 21-32. doi:https://doi.org/10.1007/s00190-017-1041-y.
20. Mancini F, Grassi F, Cenni N. 2021. A workflow based on SNAP-StaMPS open-source tools and GNSS data for PSI-Based ground deformation using dual-orbit sentinel-1 data: Accuracy assessment with error propagation analysis. *Remote Sensing*, 13(4): 753.

21. Orellana F, Delgado Blasco JM, Foumelis M, D'Aranno PJ, Marsella MA, Di Mascio P. 2020. Dinsar for road infrastructure monitoring: Case study highway network of Rome metropolitan (Italy). *Remote Sensing*, 12(22): 3697. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12223697>.
22. Scheiber R, Moreira A. 2000. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2179-2191. doi:<https://doi.org/10.1109/36.868876>.
23. Takaku J, Tadono T, Tsutsui K, Ichikawa M. 2016. Validation of "AW3D" global DSM generated from Alos Prism. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3: 25. doi:<http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-4-25-2016>.
24. Villasenor J, Zebker H. 1992. Temporal decorrelation in repeat pass-radar interferometry. In: *In: IGARSS'92; Proceedings of the 12th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, TX, May 26-29, 1992. Vol. 2 (A93-47551 20-43)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
25. Zan De F, Guarnieri AM. 2006. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9): 2352-2360. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>.
26. Zarekamali M, Alhoseini Almodaresi SA, Naghdi K. 2017. Comparing the magnitude of the earth's vertical relocation using the SBAS algorithm in X and C radar bands (Case study: Tehran lands). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(3): 104-120. (In Persian).
27. Zhou X, Chang N-B, Li S. 2009. Applications of SAR interferometry in earth and environmental science research. *Sensors*, 9(3): 1876-1912. doi:<https://doi.org/10.3390/s90301876>.
28. Zhu XX, Wang Y, Montazeri S, Ge N. 2018. A review of ten-year advances of multi-baseline SAR interferometry using TerraSAR-X data. *Remote Sensing*, 10(9): 1374. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10091374>.



Automated processing based on interferometer technique with permanent dispersers for subsidence monitoring (Case study of Herat and Marvast aquifers)

Abolfazl Mohammadi Fatehabad, Seyed Ali Alhousseini Almodaresi

Received: 3 July 2021 / Received in revised form 26 August 2021 / Accepted: 31 August 2021
Available online 31 August 2021 / Available print 23 September 2022

Abstract

Background and Objective One of the issues that occur due to groundwater abstraction is land subsidence. This situation is now reported in many arid and semi-arid regions of Iran, especially in Yazd province. In addition, in recent decades, heterogeneous development of agricultural lands and uncontrolled extraction of groundwater from the reservoirs of Herat and Marvast aquifers in Yazd province have caused the occurrence of land subsidence around agricultural lands. The rising metal wall of deep wells and the horizontal cracks on the ground directly indicate the degree of subsidence. It is necessary to identify and identify areas that are prone to subsidence due to the risk and danger to life.

A. Mohammadi Fatehabad¹, S. A. A. Almodaresi²

1. MSc. Student of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Yazd, Yazd, Iran
2. Professor, Department of Remote Sensing, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Yazd, Yazd, Iran

e-mail: almodaresi@iauyazd.ac.ir

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.684418>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.3.5.7>

On the other hand, we must note that The effects of subsidence may be accelerated by other natural activities in the area such as volcanic activity, earthquakes and landslides, and due to the seismicity of many areas of our country, attention to this phenomenon is of particular importance. Today, one of the most accurate and cost-effective methods for detecting ground surface movements is the radar interference technique. By comparing the phases of two radar images taken from the same area at two different times, this method will be able to determine changes in the earth's surface with accuracy and spatial resolution in centimetres and even millimetres in that time interval. In this article, for the first time, we tried to monitor the subsidence of land subsidence in Herat and Marva's aquifers by using Sentinel-1 satellite images and open source software. In this research, we try to achieve the following goals by using the time series data of the Sentinel-1 sensor, which has not been used in the study of subsidence of the studied areas. The aim of this study is to implement the technique of interferometry with permanent distributors using the integrated SNAP2StaMPS package.

Another goal can be to estimate the subsidence rate by processing a set of Sentinel-1 sensor images in the period 20/02/2017 to 10/02/2019, approximately two years of time series. The ultimate goal was to investigate the data potential of this sensor in time series analysis and monitoring of changes due to land subsidence.

Materials and Methods Herat and Marvast aquifers, in fact, the study areas in this study include Herat and Marvast aquifers located in Yazd province. Herat and Marvast aquifers are geologically part of the Zagros (ophiolite, radiolarite) and Sanandaj-Sirjan zones. The study areas are located in the 2nd-degree catchment area of Abargoo and Sirjan deserts with code 44 and an area equal to 57125 square kilometres. In this study, 24 data related to Sentinel-1 sensor were processed in one-dimensional mixed image level, high pass, VV polarization and segment number 93 related over a period of approximately two years in both study areas. In general, most of the process of processing and analyzing the time series of interferometers with permanent distributors (PSI) in this paper was done by two open source software, Snap and Stamps. Finally, to automate the single-reference interferometry steps, a set of code written in the Python programming language called SNAP2StaMPS was used, which is well designed based on the graphs of the Snap software.

Results and Discussion One of the results of interferometric processing based on the innovative SNAP2StaMPS algorithm in this research was the production of interference maps from which the topographic phase has been omitted. Other results of the standard deviation scatter index for the average displacement map of both Herat and Marva's aquifers were 4.19 and 3.65 mm per year, respectively. Also, the main results of this study are the estimation of the average displacement map of the Herat aquifer between -40.33 to 11.46 mm per year and for Marva's aquifer between -39.79 to 10.63 mm per year in terms of satellite visibility during the study period (2017 to 2019). For this purpose, areas were randomly selected

and areas based on subsidence field evidence in both study areas were selected. Hajiabad Naseri and, 6) Marvast city, related to the Marvast aquifer can be named. In this paper, due to the lack of specialized tools to evaluate and validate the only way to review the results, its compliance with ground subsidence evidence, time series diagrams and hydrograph of the aquifer unit. According to the hydrograph results of Herat and Marvast alluvial aquifers, the groundwater level in the Herat aquifer has decreased by about 5.5 meters during the 8-year period from 2011 to 2019, based on data from 28 observation wells. This hydrograph shows a drop of groundwater of about 7 meters over an eight-year period. The time series results obtained from the interferometry of the images used in this paper show the slope of the fitting line, which actually shows the amount of displacement (up or down), indicating a downward trend in the second area (white aqueduct of Herat aquifer) and Fifth (Shuran aqueduct from Marvast aquifer) shows its amount equal to about 5 and 7 cm, respectively. These results have a significant relationship with the hydrograph of the unit of both aquifers.

Conclusion In this study, for the first time, to estimate the rate of subsidence in Herat and Marvast aquifers in Yazd province, the technique of interferometry with permanent dispersants was used using Sentinel-1 sensor data and SNAP2StaMPS open source package. Also, the potential of Stamps and SNAP software for radar interferometry processing was investigated, and also the details of the implementation of the Step to Stamps software package were shown. In general, based on the processed outputs of this package and the results of validation, it is possible to understand the ability of the automated method presented in this study to monitor subsidence and use this algorithm in other study areas.

Keywords: Sentinel-1 satellite, Land subsidence, Differential interferometry (DInSAR), Herat and Marvast aquifers, Permanent scatterers interferometry (PSI)