

اندازه گیری میزان فرونشست با استفاده از GPS و تصاویر راداری (منطقه مورد مطالعه دشت همدان)

امیر محمد رفیعی^{۱*}، میثم داودآبادی فراهانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

چکیده

پیامدهای محیطی پدیده فرونشست، اساساً آسیب رساندن به سازه های دستساز بشر مانند ساختمانها، خیابانها، پلها و خطوط انتقال نیرو و سیل آب است. برای اندازه گیری فرونشست زمین روشهای مختلف ژئودتیک و غیر ژئودتیک مانند استفاده از GPS توتال استیشن، لیزر اسکنر و غیره وجود دارد. ایستگاه های GPS اندازه گیری های دقیق و پیوسته ای را در نقاط محدودی از نواحی فرونشست میدهند. بنابراین آنها توانایی تعیین وسعت و الگوی فرونشست را ندارند. یکی از روشهایی که در اندازه گیری فرونشست زمین به کار میرود، روش تداخل سنجی راداری است. در این روش تصاویر مختلط راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده ماهواره ای هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویری به نام تداخل نگاشت (Interferogram) تولید می شود. تداخل نگاشت تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر به دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده اند، حاصل میشود. در این تحقیق برای محاسبه ی میزان فرونشست از دو روش GPS و تداخل سنجی راداری استفاده شده است. منطقه ی مورد مطالعه نیز شهر همدان در سال ۲۰۲۱ در نظر گرفته شد. طبق نتایج حاصل از سری زمانی میانگین مقادیر فرو نشست زمین در ایستگاه GPS شهر همدان در طول یک سال حدود ۴ سانتی متر می باشد. زنگ خطر برای فروریزش، فروچاله و زمین لغزه توسط این ایجاد پدیده برای تصمیم گیری های کلان شهری و کشوری حایز اهمیت میباشد. **واژگان کلیدی:** فرونشست، سنجش از دور، تداخل سنجی راداری، GPS، مخاطرات طبیعی، تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP).

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور، موسسه آموزش عالی حکمت، قم، ایران.
^۲ استادیار و عضو هیئت علمی گروه سنجش از دور، موسسه آموزش عالی حکمت، قم، ایران.

مقدمه

استخراج بی رویه آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار سیال و در نتیجه افزایش فشار میان ذرات می‌شود که منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست زمین می‌شود. افت ناموزون سطح آب زیرزمینی و ناهمگنی بافت، ستبرای ویژگی آبرفت‌های منطقه نیز موجب فرونشست ناموزون سطح زمین می‌شود و شکاف‌هایی در پوسته زمین به وجود می‌آورد. چرخه فصلی تخلیه و تغذیه ناهمگن آبخوانها، موجب فشردگی و انبساط می‌شود. پیامدهای محیطی پدیده فرونشست، اساساً رساندن به سازه‌های دستساز بشر مانند ساختمانها، خیابانها، پلها و خطوط انتقال نیرو، ایجاد شکاف‌هایی بر روی سطح زمین و سیل آب است. دار جابه‌جایی ایجاد شده در سطح زمین است. برای اندازه‌گیری فرونشست زمین روشهای مختلف ژئودتیک و غیر ژئودتیک مانند استفاده از (GPS (System Positioning Global) توتال استیشن، لیزر اسکنر و غیره وجود دارد. ایستگاه‌های GPS اندازه‌گیریهای دقیق و پیوسته‌های را در نقاط محدودی از نواحی فرونشست می‌دهند. بنابراین آنها توانایی تعیین وسعت و الگوی فرونشست را ندارند. یکی از روش‌هایی که در اندازه‌گیری فرونشست زمین به کار می‌رود، روش تداخل سنجی راداری است. در این روش تصاویر مختلط راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویری به نام تداخل نگاشت (Interferogram) تولید می‌شود. تداخل نگاشت تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر به دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند، حاصل می‌شود. الزام به بیان آنست که ثبت هندسی دو تصویر طی دو مرحله به صورت تقریبی و دقیق انجام می‌شود. در یک تداخل نگاشت اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد. به کمک مقدار اختلاف فاز میتوان متغیرهای مختلف از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین تا کسری از سانتیمتر و اطلاعات توپوگرافی سطح زمین را با دقت ۱۰ متر استخراج کرد. روش تداخل سنجی راداری در سالهای اخیر به عنوان یکی از روشهای غیر ژئودتیک با توجه به مزایایی که نسبت به دیگر روشها دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش در میان روشهای زمینی و فضایی به عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک بسیار بالا به شمار می‌رود.

پیشینه تحقیق

در دنیا فرونشست زمین، پیشینه چند ساله دارد و اگر زمانی این پدیده تنها در برخی از کشورها رخ میداد، اینک کشورهای بیشتری متحمل فرونشست هستند و این مشکل به طور روز افزون در کشورها بیشتری خودنمایی می‌کند. در همه فرونشست‌هایی که در دنیا رخ میدهد، استخراج بی رویه آبهای زیرزمینی، تنها عامل یا مهمترین عامل ایجاد فرونشست است. در دنیای امروز با توجه به افزایش جمعیت و گسترش شهرها، هر روز بر نیاز به آب و تقاضای آن افزوده می‌شود. پدیده فرونشست زمین یکی از نتایج بهره برداری بی رویه آب از سفره آب‌های زیرزمینی است. در اثر برداشت بیش از حد آب از منابع زیرزمینی و خارج شدن آب از منافذ زیرزمین، امکان متراکم شدن مواد رسوبی و علی‌الخصوص آهکی فراهم می‌شود و باعث افت سطح زمین می‌شود. بنابراین این ضرورت احساس می‌شود که نرخ فرونشست با دقت بالایی اندازه‌گیری شود و با روش‌های مناسب از فرونشست زمین جلوگیری به عمل آید. از اوایل دهه ۱۹۹۰ تداخل سنجی رادار دریچه‌مصلوبی به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند مطرح شده و مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌هایی از این کاربری در مطالعه چندین زمین لرزه از ایران زمین قابل ذکر است. اساس کار این روش استفاده از اطلاعات فاز رادار بازتابی از زمین است به نحویکه تغییرات ایجاد شده در سطح زمین سبب اختلاف فاز در دو تصویر رادار از دو زمان مختلف از منطقه ای مشابه می‌شوند که با بررسی این اختلاف فاز و مدلسازی آن، تغییرات سطح زمین قابل کمی سازی می‌باشند. در این مقاله ضمن معرفی اصول اولیه رادار دهانه ترکیبی و تداخل سنجی آن، کاربردهای این فناوری در مباحث مختلف علوم زمین از جمله مطالعه زمینلرزه، آتشفشان، زمینلغزش، فرونشست، تغییرات یخچالها و کلاهیکی، جنگلداری، آب و هوا و غیره خاطر نشان شده است. ماهواره‌های موجود و در حال ساخت که اطلاعات لازم را عرضه می‌کنند

معرفی شده اند. با توجه به نقش این فناوری در مطالعه بلایای طبیعی و دیگر پدیده های سطح زمین؛ برنامه ریزی برای کسب دانش لازم و بررسی امکان ساخت ماهواره ای ملی با قابلیت های لازم پیشنهاد شده است.

تداخل سنجی رادار دریچه مصنوعی یا InSAR یک فناوری دورسنجی است که به منظور مطالعه حرکات سطح زمین در زمینلرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا ابداع شد. در این فناوری، با استفاده از تلفیق داده های بدست آمده از سیستم های تصویربرداری رادار، نصب شده بر سکوهای ماهواره ای یا هواپیمایی، حرکت، ارتفاع و تغییرات سطح زمین نقشه برداری می شوند. اساس کار در اندازه گیری حرکات سطح زمین استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می شود (زمان مرجع) با تصویر که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می شود، تلفیق می شود. با این فناوری می توان حرکات و تغییرات ناشی از پدیده هایی مانند زمینلرزه، آتشفشان، یخچالها، زمینلغزش و دیابیرهای نمکی و یا پدیده های نامنظم مانند خروج آبهای زیرزمینی و نفت، آبیگری مزارع و انفجارات زیرزمینی را مطالعه نمود. علاوه بر این پدیده های سطحی مانند آتش سوزی، سیلاب، تغییرات رطوبت و رشد گیاهان نیز قابل تشخیص اند. بنابراین کاربردهای آن شامل بررسی و شناسایی خطرات طبیعی و بشری و کمی سازی رابطه بشر با منابع طبیعی است. اولین کاربری InSAR برای مطالعه حرکات سطح زمین توسط (al et Gabriel ۱۹۸۹) انجام شد. آنها با استفاده از تصاویر ماهواره SEASAT برپایی زمین را در اثر آبدهی انتخابی زمینهای ایمپریال ولی کالیفرنیا مطالعه کردند. با اینحال تا زمان انتشار نقشه دقیق جابجایی زمین در اثر زمین لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا و حرکات یخی داخل رودخانه یخی روتفرد، سودمندی این روش به عنوان یک ابزار ژئودزی برای جامعه علوم زمین شناخته نشده بود. سرعت جریان رودخانه های یخی قطب جنوب را با استفاده از تصاویر ERS-۱، که با فاصله شش روز برداشت شده بود، مطالعه کرد. این اولین باری بود که سرعت جریانهای یخی بطور مستقیم از فضا و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی اندازه گیری می شد. جابجایی همزمان با زمینلرزه لندرز را با استفاده از تصاویر ERS-۱، که با چند ماه اختلاف تهیه شده بودند محاسبه کردند. این اولین تصویر کاملی بود که از تغییر شکل حین زمینلرزه بدست آمده بود. تغییر شکل سطحی کوه آتشفشانی اتنا را با InSAR محاسبه کردند. از آنجا که تغییرات سطحی می تواند از فوران های آینده یک آتشفشان فعال خبر دهد، توانایی اندازه گیری این تغییرات از فضا بدون کنترل زمینی، پیشرفتی اساسی در قابلیت های فرانگری محسوب می شود. این مطالعات اولیه، انگیزه فراوانی را در بین جامعه علوم زمین برای بررسی و تکمیل جنبه های مختلف این فناوری ایجاد کرد. از آن زمان تا بحال کارهای متعددی با استفاده از تصاویر ماهواره، یخچالها، آتشفشان، زمینلرزه مطالعه برای RADARSAT و X-SAR، SIR-C، Space Shuttle، ERS، JERS، های زمینلغزش و فرونشینی زمین و تغییر شکل مرز ورقه ها صورت گرفته است. با توجه به کاربردهای این فناوری و با توجه به اینکه هیچ یک از ماهواره های قبلی به این روش اختصاص نداشتند، ماهواره هایی جدیدتر و اختصاصی طراحی و به فضا فرستاده شده و خواهند شد. جدول ۱ فهرست ماهواره های موجود و طراحی شده که از داده های آنها در این فناوری استفاده می شود را نشان می کند.

از تداخل سنجی SAR، می توان برای تولید نقشه های توپوگرافی با تفکیک بالا استفاده کرد. براین اساس، ناسا با پرتاب ماهواره TOPOSAR به فضا، از این روش برای تهیه نقشه توپوگرافی رقومی جهان با تفکیک افقی ۳۰ متر و دقت ارتفاعی در حد چندین متر استفاده نموده که تهیه این نقشه چندی پیش پایان یافته است. امروزه تعیین تغییرات بسیار کوچک در سطح زمین و یخچالها طی دوره های روزانه تا سالیانه در مقیاس جهانی و با دقت در حد میلی متر بدون تاثیرپذیری از شرایط آب و هوایی و یا شب و روز امکان پذیر است. البته هنوز تحقیقات برای بهبود بخشیدن این فناوری ادامه دارد. با این مقدمه چگونگی عملکرد و تشکیل تصاویر SAR را مورد بررسی قرار می دهیم. پیری و همکاران نرخ فرونشست زمین در طول خطوط ریلی در شاخه های خروجی خط آهن تهران با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و با استفاده از تصاویر ماهواره ی سنتینل - ۱ در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۷ مورد بررسی قراردادند برای آنالیز سری زمانی جابجایی سطح زمین از روش خط مبنای کوتاه (SBAS) برای پردازش ۴۶ تصویر ۱۵۸ تداخل نگار ایجاد شده استفاده کردند. نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی، نشان از وقوع فرونشست قابل ملاحظه ای در مناطقی از محدوده مورد مطالعه داشت که بیشینه آن مربوط به مسیر های کرج-کردان و ملکی-آپرین با نرخ جابجایی ۱۴ سانتیمتر در سال می باشد. [1] تورانی و همکاران پدیده فرونشست زمین

در غرب استان گلستان با بکارگیری روش تداخل سنجی راداری و استفاده از تصاویر راداری انویست بررسی کردند. برای دو مجموعه تصاویر راداری تداخل نگاشت ایجاد شد. در تداخل نگاشت مجموعه اول، تغییرات خاصی مشاهده نشد که احتمالاً به دلیل کوتاه بودن فاصله زمانی دو تصویر میباشد. برای مجموعه دوم که فاصله زمانی دو تصویر ۳۴ ماه و ۱۵ روز است، یک منطقه فرونشست در محدوده شمال شهر گرگان مشاهده شد. محدوده فرونشست تقریباً روند شرقی- غربی دارد که با روند ساختارهایی نظیر گسل خزر همخوانی دارد و میزان فرونشست در آن چیزی حدود ۴/۸ سانتیمتر محاسبه شد. نمودارهای تراز سطح آب و میزان بارندگی این محدوده در سالهای ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ علیرغم نوسانات فصلی روند نزولی نشان میدهند. پیامد این افت سطح آب زیرزمینی میتواند منجر به فرونشست زمین در منطقه شده باشد. [2] عبدالخالق و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره‌های راداری Sentinel-1 سالهای ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ و روش تداخلسنجی تفاضلی راداری در بررسی میزان و گسترش فرونشست زمین را بررسی کردند. نتایج پردازشهای انجام شده بر روی این تصاویر نشان داد که در دوره مطالعاتی، حدود ۱۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. بعد از صحت سنجی پهنه بندی انجام شده با واقعیت‌های زمینی (شهریور، ۱۳۹۷) به منظور تشخیص رابطه فرونشست با میزان تغییرات و افت سطح آب زیرزمینی، ارتفاع سطح زمین و شیب، تحلیل‌های فضایی انجام و میزان همبستگی هر یک از فاکتورهای مذکور با تراکم رخداد فرونشست محاسبه گردید. تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران خوشه ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را به میزان ۰.۹۲۵ نشان داد. همچنین بالا بودن امتیاز توزیع نرمال استاندارد (Z) و پایین بودن مقدار سطح معنی داری (p_value) نشاندهنده رابطه خودهمبستگی قوی ۰.۸۹ بین عناصر مورد مطالعه است. [3] خرمی و همکاران نرخ فرونشست در شهر مشهد با روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی، در فاصله زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ترکیب ۶۹ تصویر راداری مدارهای بالاگذر و پایین گذر ماهواره ی Sentinel-1A، مطالعه و تعیین کردند. نتایج تحلیل صورت گرفته در این پژوهش، نرخ فرونشست بسیار بالا در نواحی شمال غرب و شمال شهر مشهد با بیشینه ای در حدود ۱۴ سانتیمتر در سال را نشان میدهد. همچنین به منظور تفسیر نتایج فرونشست از داده های پیرومتری و اطلاعات ژئوتکنیکی استفاده شده است. [4]

مواد و روش ها

روش های مطالعه ی فرونشست

روشهای مختلفی برای مطالعه پدیده فرونشست زمین وجود دارد. از جمله این روشها میتوان به روش تداخل سنجی راداری روش استفاده از ایستگاه دائمی GPS و چاه های پیرومتری اشاره کرد.

روش تداخل سنجی راداری

در روش تداخل سنجی راداری تغییرات هندسی سطح زمین (ارتفاع و مسطحات) اندازه گیری میشود. در این فناوری با کمک داده هایی که از سیستم تصویربرداری رادار به دست میآید مقدار حرکت در راستای دید ماهواره، تغییر ارتفاع و تغییرات سطح زمین اندازه گیری میشود. بنابراین این روش برای تعیین مقادیر فرونشست زمین، تغییرات آن در هنگام زلزله، زمینلغزش، آتشفشان و مشابه آن بسیار کاربرد دارد. همچنین از مهمترین مزیت‌های این ماهواره این است که به خاطر طول امواج بلندش قادر به عبور از پوشش گیاهی می باشد. روش تداخل سنجی راداری، با کمک تصاویر تکراری رادار، حرکات سطح زمین اندازه گیری شده و تصاویر برداشتی در دو زمان مختلف توسط سنجنده رادار برداشت و با هم ترکیب میشود و نهایتاً تغییرات ارتفاع زمین اندازه گیری میشود. تصاویر به دست آمده از این روش، اینترفروگرام (Interferogram) نام دارد که حاوی تفاوت فازی بین دو تصویر راداری است که با دقت نسبت به هم هندسی شده اند. فاز اندازه گیری شده توسط InSAR، تحت تأثیر عوامل مختلفی اعم از توپوگرافی، انحنای زمین، جابجایی سطح، اتمسفر و نویز است و آن را میتوان به صورت ترکیب خطی عوامل ذکر شده نوشت:

$$\phi_{InSAR} = \phi_{topo} + \phi_{orb} + \phi_{defo} + \phi_{atm} + \phi_{noise}$$

که در آن، ϕ InSAR اختلاف فاز تداخل سنجی بین دو تصویر راداری است. همچنین ϕ_{topo} فاز ناشی از توپوگرافی منطقه بوده که با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی میتوان اثر آن را حذف نمود.

ϕ_{orb} فاز ایجاد شده به دلیل انحنای زمین است و با استفاده از اطلاعات مداری دقیق گردد. ϕ_{noise} فاز نویز است که عمدتاً ناشی از ناهمبستگی سیگنال InSAR، ایجاد شده توسط پوشش گیاهی و یا تغییرات محیطی سطح زمین میباشد. [44]

تداخل نگار

تولید تداخل نگار حاصل نمایش اختلاف فازی ناشی از تغییر فاصله بین پدیده زمینی و سنجنده در دو عبور متوالی است. فاصله یک نقطه در روی زمین از سنجنده در دو عبور متفاوت می تواند با محاسبه اختلافات فازی حاصل از دو تصویر در فرم مختلط، محاسبه گردد. در نتیجه تداخل نگار (interferogram) با ضرب پیکسل به پیکسل یک تصویر SAR در مزدوج مختلط تصویر دوم که نسبت به تصویر اول تثبیت هندسی (Coregister) و هم اندازه (Resample) شده است، حاصل می شود. این مراحل در معادلات زیر خلاصه می شود:

$$y_1 = |y_1|e^{j(\varphi_1)}$$

$$y_2 = |y_2|e^{j(\varphi_2)}$$

$$\text{Complex Interferogram} = y_1 * y_2 = |y_1||y_2|e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

فاز حاصل از این ضرب مختلط یک فاز تفاضلی است و حامل فازهای مربوط به توپوگرافی، فاز اضافه شده در نتیجه تغییرات مداری، فاز مربوط به اختلال اتمسفر و در نهایت فاز حاصل از جابجایی احتمالی پوسته سطحی زمین است. [36]

تعدیل اثرات توپوگرافی از روی تداخل نگار

فرایند تعدیل اثر توپوگرافی از روی تداخل نگار حاصل میتواند به روشهای مختلفی صورت گیرد. ولی در حالت کلی فاز ثابت القا شده ناشی از هندسه راداری و شرایط مداری سنجنده و همچنین فاز موجود از تاثیر توپوگرافی بایستی از فاز مربوط به جابجایی زمین جدا گردد. در این باره یکی از راه حل های ممکن می تواند از تقسیم فاز تفاضلی حاصل در تداخل نگار به دو مولفه فازهایی با تواتر بالا و فازهایی با تواتر پایین انجام گردد. [41], [42]

فیلتر گذاری

شایان ذکر است که تصاویر SAR دارای فاز مطلق و پیوسته نبوده و فقط مقدار اصلی فاز در بازه $[-\pi, \pi]$ را بطور گسسته داراست. بنابراین یکی از مراحل پردازش تداخل سنجی راداری، عملیات بازیابی فاز است. یکی از مشکلات بازیابی فاز در اینترفروگرام، وجود نقاطی است که عملیات بازیابی فاز در آنها ممکن نیست. این نقاط را اصطلاحاً باقی مانده گویند. وجود نوفه در اینترفروگرام باعث افزایش تعداد باقی مانده ها شده و عملیات بازیابی فاز را دچار مشکل و یا حتی ناممکن می سازد. از این رو به منظور کاهش نوفه، فیلتر کردن اینترفروگرام پیش از عملیات بازیابی فاز، امری ضروری است. جهت فیلتر نمودن تداخل نگارهای تفاضلی و بهبود کیفیت آنها از فیلتر گلداشتاین استفاده شده است. در فیلترهای تطبیقی وزن های فیلتر برای هر مکان جدید پنجره محاسبه می شود، این محاسبات براساس میانگین و واریانس سطوح خاکستری ناحیه تصویری که زیر پنجره است انجام می گیرد. این فیلترها به ویژه در تضعیف اثر نویز لکه ای مهم است، این نویز در تصاویر SAR متداول است. [39].

اصلاح و بازیابی فاز

مرحله بسیار مهم و پیچیده در فرایند تهیه نقشه فرونشست از تکنیک تداخل سنجی راداری، مرحله تصحیح فاز است. بطور کلی فاز تداخل نگار تنها می تواند پیمانه ای از $\pi/2$ بیان گردد. ولی در طی فرایند ممکن است تغییر فاز بیشتر از $\pi/2$ گردد، که در این صورت در تداخل نگار حاصل مقادیر بیشتر از $\pi/2$ دوباره از نو آغاز شده و بصورت یک چرخه خواهد در آمد. در حقیقت الگوریتم های اصلاح فاز تداخل نگار تلاش در جهت حل این ابهام دارند. عمومی ترین الگوریتم های موجود شامل الگوریتم موسوم به رشد ناحیه ای (Growing Region) و جریان با کمترین هزینه (cost Minimum flow) می باشند. حاصل این عملیات در شکل زیر آمده است. [31]

پالایش و تصحیح

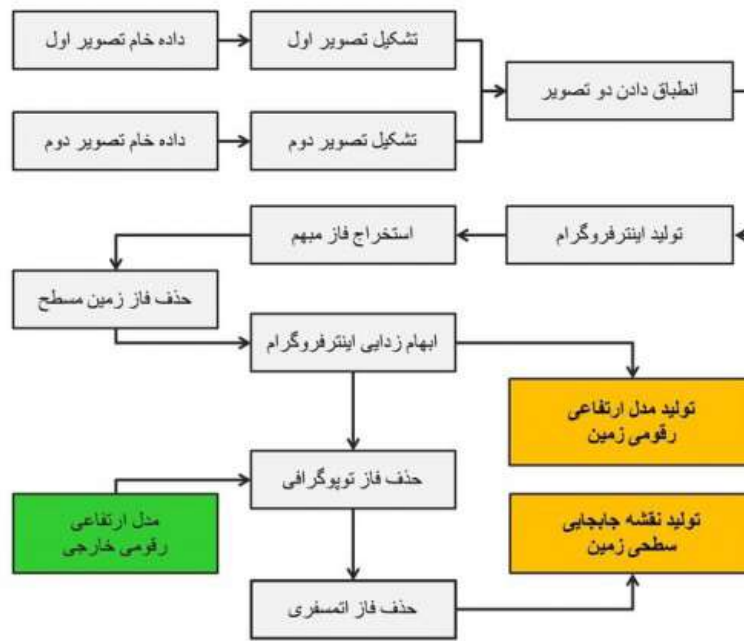
قبل از انجام تبدیل فاز به ارتفاع بایستی فازهای احتمالی مزاحم دیگر از قبیل فازهای باقی مانده از اثرات توپوگرافی و همچنین فاز باقی مانده از جابجایی های مداری از فاز موجود حذف گردد. انجام این عمل برای تداخل نگارها که نشان هایی از لرزش سکو در فرم پلکان دارند، ضروری بوده و حتما می بایست انجام پذیرد. این عمل بر روی فاز تصحیح شده در مرحله قبل انجام می شود. از اختلاف فاز حاصل در مرحله اصلاح فاز تداخل نگار ناشی از توپوگرافی و خطاهای مداری، فاز مطلق بدست می آید که مربوط به جابجایی های رخ داده در زمین در بازه زمانی برداشت دو تصویر است. در نتیجه تغییرات ناگهانی یا پرش های فاز موجود در تصویر تصحیح شده فاز تداخل نگار، زوده شده و مقادیر فاز، تغییرات نرم و تدریجی را نشان می دهد. آنچه مسلم است، تغییر ناگهانی و نسبتا شدید سطوح زمین به جز موارد گسلش تا حدود زیادی غیر ممکن می نماید. لذا هر گونه جابجایی ناگهانی مقادیر فاز پس از کنترل و بررسی ساختارهای زمین شناسی و مرفولوژیکی، و بخصوص موضوع تغییرات سطحی پوسته زمین، می بایست به پرش فاز نسبت داده شده و اصلاح میگردد. [32]

تبدیل فاز به نقشه جابجایی

هر چرخه ای از مقدار فاز $\pi/2$ در تداخل نگار تفاضلی برابر است نصف طول موج مورد استفاده در سیستم راداری و بیانگر میزان جابجایی در راستای خط دید آنتن می باشد. بعد از پالایش و تصحیح مضاعف فاز، اینک می توان فاز مطلق حاصل را به مقادیر جابجایی یا نقشه جابجایی تبدیل و زمین مرجع نمود. در نقشه های حاصل مقادیر مثبت جابجایی مربوط به حرکت سطح زمین به سمت دید راداری (بالا آمدگی) و مقادیر منفی بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری است که در شکل زیر بصورت نقشه نهایی نمایش داده شده است. [33]

پردازش تصاویر راداری با نرم افزار SNAP

از سال ۲۰۱۴ میلادی با آغاز پروژه سنتینل توسط سازمان فضایی اتحادیه اروپا، فصل جدیدی در علم سنجش از دور آغاز شد. برای اولین بار در این سال دو ماهواره سنتینل ۱ و ۲ ماموریت خود را آغاز کردند که در مقایسه با ماهواره های پیشین از ویژگی های منحصر به فردی برخوردار بودند. ماهواره سنتینل ۱ نخستین ماهواره راداری سنجش از دور بود که با توان تفکیک مکانی بالا (۱۰ متر) و پوشش سراسری جهانی و با تناوب زمانی ۶ روز یک بار داده تولید می کرد در صورتی که تا پیش از این در زمینه سنجش از دور راداری هیچ ماهواره ای با این قابلیت های طیفی و مکانی بصورت رایگان عرضه نشده بود. اسنپ (SNAP) نرم افزار تخصصی پردازش تصاویر ماهواره ای سری سنتینل است که از سال ۲۰۱۴ میلادی هم زمان با آغاز ماموریت ماهواره های سری سنتینل بصورت رسمی عرضه شد. در سال های اخیر روز به روز این نرم افزار توسعه پیدا کرده و امکانات با ارزش و منحصر به فردی را برای پردازش تصاویر ماهواره ای اپتیکی و راداری فراهم آورده است.



شکل ۱-فلوچارت پردازش تصاویر راداری در نرم افزار SNAP

روش GPS

در این روش معمولاً از ایستگاه های GPS که به طور ثابت و دائمی در یک نقطه با مختصات جغرافیایی مشخص مستقر شده اند استفاده میشود. در این ایستگاه ها تغییرات ارتفاع به طور منظم و دقیق ثبت شده و در نهایت با کمک مقادیر به دست آمده میزان فرونشست زمین محاسبه میگردد. برای محاسبه ی میزان فرونشست با استفاده از GPS از تکنیک تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) استفاده می شود. تعیین موقعیت مطلق دقیق یک شیوه ی تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات غیرتفاضلی و دو فرکانسه (کد وفاز) یک گیرنده تنهاست که اساس آن به کارگرفتن نمونه اطلاعات دقیق مداری وساعت ماهواره ها (به عنوان نمونه محصولات IGS است. سه فاکتور کلیدی مطرح در مورد PPP عبارتنداز:

- داشتن اطلاعات دقیق مداری وساعت ماهواره ها
- مدلسازی دقیق منابع خطای دیگر
- استفاده از مشاهدات فاز موج حامل

در تکنیک PPP جای استفاده از مشاهدات خام، مشاهدات عاری از اثر یونسفر شبه فاصله وفاز موج حامل به همراه اطلاعات معلوم و دقیق مداری وساعت ماهواره ها استفاده می شود.

معادلات مشاهدات تعیین موقعیت مطلق دقیق:

معادلات مشاهدات شبه فاصله (کد) وفاز موج حامل GPS شرح داده می شوند

$$P_i = \rho + c (dt^r - dt^s) + T + \frac{f_1^2}{f^2} I_1 + b_{L_1}^r - b_{L_1}^s + \epsilon_{P_i}$$

$$L_i = \rho + c (dt^r - dt^s) + T - \frac{1}{2} I_1 - \lambda_1 N_1 + b_{L_1}^r - b_{L_1}^s + \epsilon_{L_i}$$

اندکس فرکانس i برابر با 1 و 2 بوده وفرکانس های موج حامل $1L = 154f_0$, $2L = 120f_0$ هستند به طوری که f_0 برابر 10.23 مگاهرتز می باشد. نماد P_i و L_i به ترتیب معرف مشاهده ی فاز و کد می باشد و p فاصله هندسی بین گیرنده و ماهواره، c سرعت نور در خلا، dt^r خطای ساعت گیرنده، dt^s خطای ساعت ماهواره، T تاخیر تروپوسفری، I_1 تاخیر یونسفری مرتبه اول برای فرکانس اول، λ_1 طول موج مربوط به فرکانس N_1 ، i ابهام فاز صحیح، $b_{L_1}^r$ بایاس سخت افزاری کد گیرنده، $b_{L_1}^s$ بایاس

سخت افزاری فاز گیرنده، pisb، بایاس سخت افزاری کد ماهواره و bli s بایاس سخت افزاری فاز ماهواره، epi شامل چند مسیری و نویز کد و eli شامل چند مسیری و نویز فاز مربوط به فرکانس i هستند. دستگاه معادلات روش PPP به صورت زیر تشکیل می شود:

$$\underline{l} = Ax$$

$$\underline{l} = \begin{bmatrix} P_3^1 - \rho_0^1 + cdt^{s_1} - T_0^1 \\ L_3^1 - \rho_0^1 + cdt^{s_1} - T_0^1 \\ \vdots \\ P_3^n - \rho_0^n + cdt^{s_n} - T_0^n \\ L_3^n - \rho_0^n + cdt^{s_n} - T_0^n \end{bmatrix}$$

$$T(E) = T_0(E) + M_{wet}(E)\Delta T_{wet}$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0 - y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0 - z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0 - y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0 - z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \dots & \frac{1}{k} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

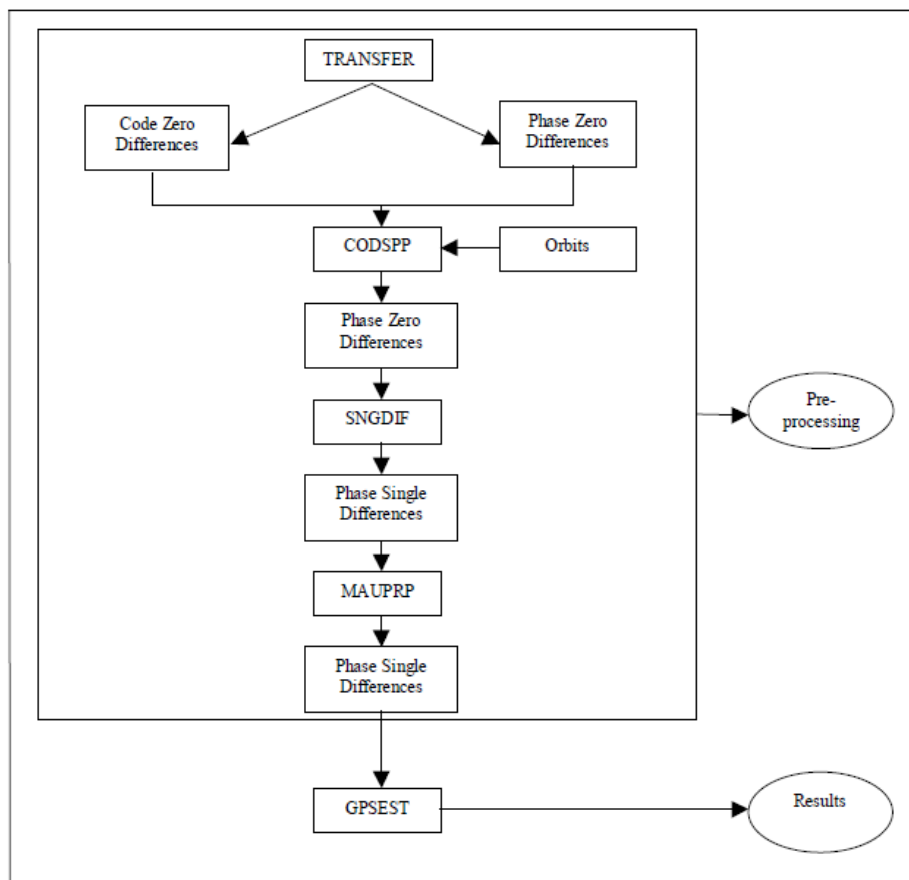
$$\underline{x} = [dx \quad dy \quad dz \quad cdt^r \quad \Delta T_{wet} \quad B_3^1 \quad \dots \quad B_3^k \quad \dots \quad B_3^n]$$

در این روابط x_0, y_0, z_0 مقادیر مختصات گیرنده در لحظه ی دریافت سیگنال x_i, y_i, z_i مقادیر مختصات ماهواره در لحظه ی ارسال و فاصله ی هندسی بین مرکز فاز آنتن گیرنده و مرکز فاز آنتن ماهواره هستند. $Cdts$ خطای ساعت ماهواره به همراه اثر نسبیت استکه این اثر به دلیل یکسان نبودن نرخ پیشروی ساعت های گیرنده و ماهواره ناشی از سرعت نسبی بین آنها، باید در نظر گرفته شود. $Cdtr$ خطای ساعت گیرنده و مقادیر B ابهام فاز مربوط به مشاهده فاز موج حامل عاری از اثر یونسفر هستند که در فرآیند کمترین مربعات برآورد می شوند. لازم به ذکر است تا زمانی که جهش فاز رخ نداده باشد مقادیر ابهام فاز ثابت بوده و تغییر نخواهند داشت T مقدار اولیه برای تأخیر تروپوسفر است که با استفاده از مدل ها و توابع تصویر موجود مانند ساستاموینن، هاپفیلد، نیل و غیره برای هر دو مولفه ی خشک و تر و با استفاده از مدل های استاندارد برای دما، فشار و رطوبت و با توجه به مختصات گیرنده محاسبه می شود. از آنجا که مدل های موجود در برآورد مولفه ی تر تأخیر تروپوسفر ضعیف دارند، لذا باقیمانده ی این اثر (T_{wet}) به عنوان یک مجهول در کنار باقی مجهولات در دستگاه معادلات برآورد شده و در نتیجه از تابع تصویر مربوط به مولفه ی تر در دستگاه معادلات استفاده میشود. دستگاه معادلات فوق به روش تکرار حل شده و در هر مرحله با استفاده از موقعیت جدیدی که برای گیرنده به دست می آید تمامی مقادیر وابسته به موقعیت گیرنده به هنگام شده و سرشکنی کمترین مربعات دوباره تکرار میگردد. این روش تا رسیدن به جواب بهینه تکرار میگردد. برای رسیدن به یک مدل مشاهده ی کامل PPP باید چند تصحیح را به مشاهدات فاز موج حامل و شبه فاصله اعمال نمود. این تصحیحات سبب رسیدن به دقت در حد سانتیمتر میشوند و عبارتند از: جدایی و تغییرات مرکز فاز آنتن ماهواره-

جدایی و تغییرات مرکز فاز آنتن گیرنده - جزر و مد زمین جامد - بارگذاری ناشی از جزر و مد اقیانوسی - اثر حرکات صفحات تکتونیک - بایاسهای تفاضلی کد - اثر خمیدگی فاز - اثر نسبیت.

پردازش مشاهدات GPS با استفاده از نرم افزار برنیز

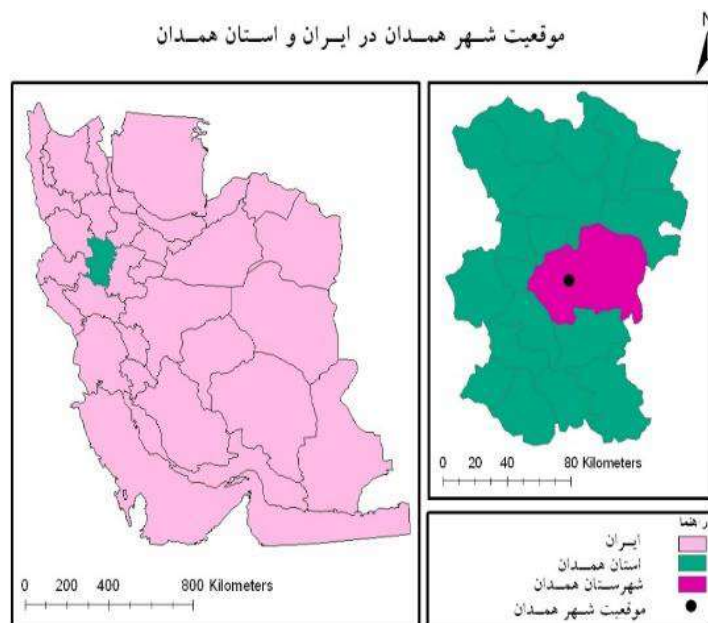
نرم افزار برنیز یک نرم افزار علمی و دقیق با قابلیت پردازش داده های متنوع سیستم GNSS می باشد که در موسسه علمی مطالعات نجومی در دانشگاه برن سوییس (AIUB) توسعه داده شده است. نسخه ی ۵.۲ این نرم افزار برای پردازش داده های GPS در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل شماره ی (۲-۳) فلوچارت مراحل پردازش داده ها آورده شده است.



شکل ۲-۳- فلوچارت پردازش داده های GPS در نرم افزار برنیز

داده ها و منطقه ی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه:



همدان یکی از قدیمی ترین شهر های ایران از پیدایش حکمرانی مادها تا به اکنون بوده که امروزه از لحاظ جمعیت چهاردهمین شهر پرجمعیت ایران به شمار می آید و در مرداد سال ۱۳۸۸ به عنوان یکی از کلانشهرهای ایران معرفی شد. امروزه به دلیل تراکم جمعیت و بحران فرونشست در دشت های اطراف خود دچار تهدید جدی زمین شناسی میباشد.

داده های مورد استفاده:

به منظور تعیین فرونشست با استفاده از تداخل سنجی راداری و سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) منطقه ی مورد مطالعه شهر همدان انتخاب شد. این شهر مجهز به یک ایستگاه دائمی بین المللی (IGS) می باشد و مشاهدات مربوط به این گیرنده در وب سایت IGS موجود می باشد. این ایستگاه در نقطه ای به مختصات عرض جغرافیایی ۳۴.۸۶۹۰۷۶۳۸ و طول جغرافیایی ۴۸.۵۳۴۲۹۹۸۹ احداث شده است. برای محاسبه ی فرونشست با استفاده از GPS مشاهدات سال ۲۰۲۱ از سایت <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/001> دانلود شد. همزمان با مشاهدات GPS تصاویر راداری ماهواره ی سنتینل ۱ برای سال ۲۰۲۱ از وبسایت <https://scihub.copernicus.eu> دانلود شد.

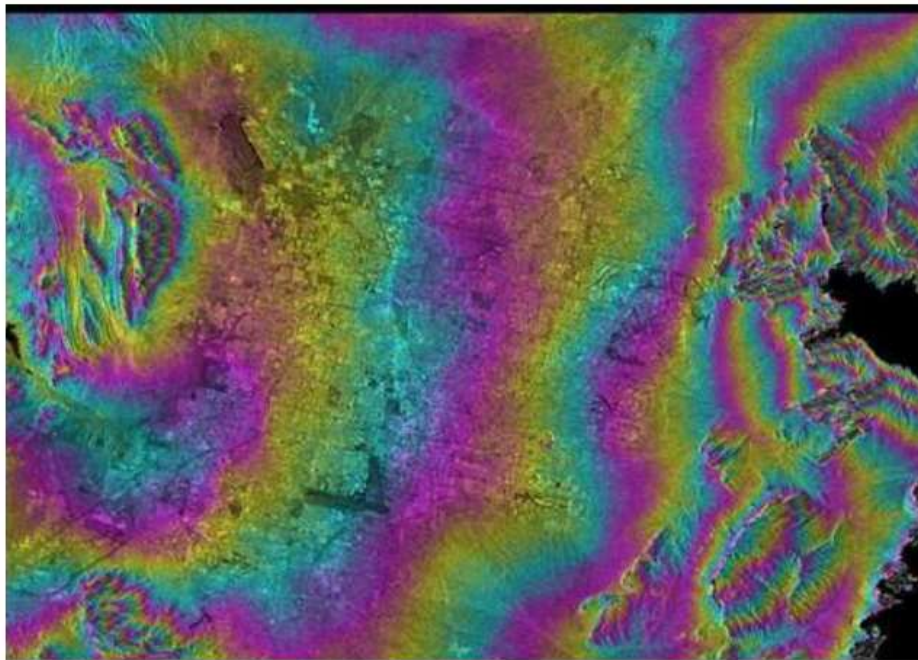


شکل ۳- موقعیت ایستگاه دائمی شهر همدان



شکل ۴- پوشش تصویر ماهواره ای از منطقه ی مورد نظر

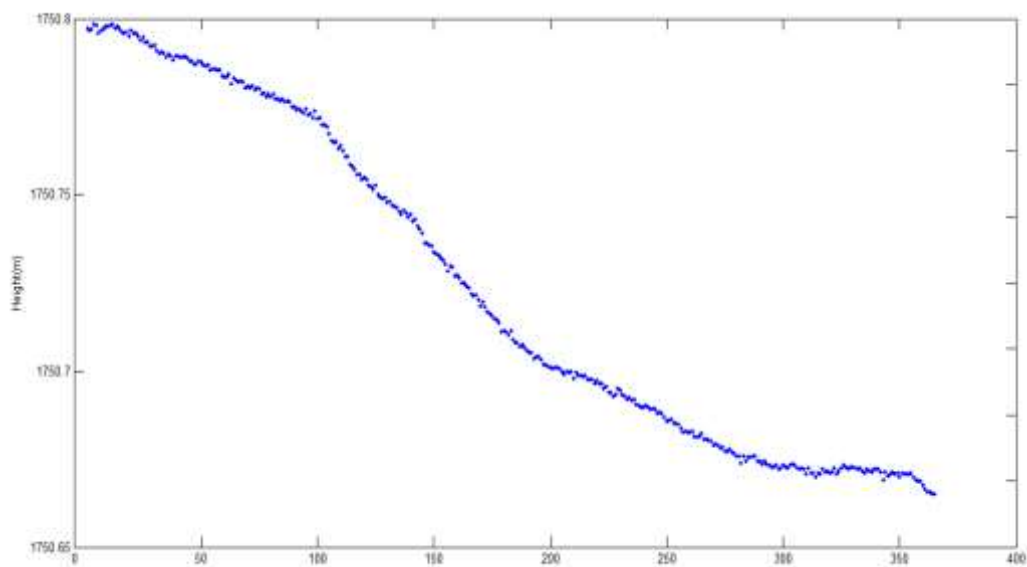
بحث و بررسی



0 mm  160 mm

شکل ۵- نقشه ی فرو نشست حاصل از پردازش تصاویر ماهواره ی سنتینل ۱

با توجه به شکل فوق میزان فرو نشست در این ناحیه از ۱ تا ۱۶ سانتی متر تعیین شده است. طبق نقشه ی فوق در بیشتر نقاط این ناحیه میزان فرو نشست ۱۲ سانتی متر (رنگ زرد) تعیین شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می گردد توزیع فرونشست در این منطقه یکنواخت نیست.



شکل ۶- ارتفاع سطح زمین (متر)

در این تحقیق جهت بررسی فرو نشست زمین از داده های ایستگاه دائمی GPS شهر همدان در سال ۲۰۲۱ استفاده شد. سری زمانی تغییرات ارتفاعی سطح زمین در شکل فوق نمایش داده شده است. طبق نتایج حاصل از سری زمانی فوق میانگین مقادیر فرو نشست زمین در ایستگاه GPS شهر همدان در طول یک سال حدود ۴ سانتی متر می باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق میزان فرونشست زمین در منطقه ای در شهر همدان با استفاده از دو روش تداخل سنجی راداری و GPS در سال ۲۰۲۱ اندازه گیری شد. (شکل ۵و۶). بر اساس نتایج این تحقیق میزان فرو نشست زمین در این منطقه به بیش از ۱۰ سانتی متر نیز رسیده است. نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری (شکل ۵) نشان داد که میزان فرو نشست بین مقادیر ۱ تا ۱۶ سانتی متر متغیر است. از طرفی طبق نتایج بدست آمده از روش GPS (شکل ۶) میانگین میزان فرو نشست طی یکسال ۴ سانتی متر گزارش شده است. این میزان فرونشست در طی یک سال بیانگر وضعیت بحرانی کاهش رقوم ارتفاعی زمین در این ناحیه بوده است که می تواند مشکلات فراوانی در آینده ی نزدیک ایجاد کند. عوامل مختلفی در پدیده ی فرونشست سهم دارند که مهم ترین آنها برداشت بی رویه از منابع آب زیر زمینی می باشد. برای جلوگیری از بروز مشکلات احتمالی باید از حفر چاه های غیر مجاز تا حد امکان جلوگیری به عمل آورد.

منابع و مراجع

- [۱] جلیل پیری. اسلام جوادنیا. غلامرضا جودکی. " بررسی فرونشست زمین در طول خطوط ریلی با استفاده از تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۰". اولین کنفرانس ملی داده‌کاوی در علوم زمین. ۹ آبان ۱۳۹۹ - دانشکده مهندسی علوم زمین.
- [۲] مرجان تورانی. مریم آقاتابای. مه‌آسا روستایی. " مطالعه فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخلسنجی راداری". مجله آمایش جغرافیایی فضا، فصلنامه علمی- پژوهشی دانشگاه گلستان. سال هشتم/ شماره مسلسل بیست و هفتم/ بهار ۱۳۹۷
- [۳] عبدالخالق آروین. قربان وهابزاده کبریا. سیدرمضان موسوی. مسعود بختیاری کیا. " مدلسازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش‌از‌دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی". سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. سال دهم/ شماره سوم) پاییز ۱۳۹۸
- [۴] محمد خرمی. سعید ابریشمی. یاسر مقصودی " تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. دوره ۵۱ شماره ۶. سال ۱۳۹۸
- [5] References Alley, R.B., and Whillans, J.M., (1991) Changes in the west Antarctic ice sheet, *Science*, 254, 959-963.
- [6] Barr, T.D., and Dahlen, F.A., (1989) Brittle frictional mountain building 2. Thermal structure and heat budget, *Journal of Geophysical Research*, 94, 3923-3947.
- [7] Bénédicte, F., Christophe, D., and Jose' A., (1996) Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, at http://earth.esa.int/workshops/fringe_1996/
- [8] Bilham, R., (1991) Earthquakes and sea level: space and terrestrial geodesy on a changing planet, *Reviews of Geophysics*, 29, 1-29.
- [9] Blom, R., Crippen, R.E., and Elachi, C., (1984) Detection of subsurface features in Seasat radar images of Means Valley, Mojave Desert, California, *Geology*, 12, 346-349.
- [10] Bull, W.B., (1991) *Geomorphic response to climatic change*, Oxford University Press, 326p. Carnec, C., Massonnet, D., and King, C., (1996) Two examples of the application of SAR interferometry to sites of small extent, *Geophysical Research Letters*, 23, 3579-3582.
- [11] Chapman, B., (1995) SAR Interferometry and Surface Change Detection, at <http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/dixon/report1.html>. Dahlen, F.A., and Barr, T.D., (1989)
- [12] Brittle frictional mountain building 1. Deformation and mechanical energy budget, *Journal of Geophysical Research*, 94, 3906-3922. Dvorak, J.A., (1993) complete earthquake cycle along the south flank of Kilauea volcano, Hawaii, *Journal of Geophysical Research*, 98, 4993-5001.
- [13] Dzurisin, D., Savage, J., and Fournier, R., (1990) Recent crustal subsidence at Yellowstone caldera, *Bulletin of Volcanology*, 52, 247-270.
- [14] Feigl, K.L., Sergent, A., and Jacq, D., (1995) Estimation of an earthquake focal mechanism from a satellite radar interferogram: Application to the December 4, 1992, Landers aftershock, *Geophysical Research Letters*, 22, 1037-1048.
- [15] Feigl, K.L., and Massonnet, D., (1995) Seismology from space: Estimation of fault parameters by inversion of radar interferograms (abstract), *Eos Trans. AGU*, 76(17), Spring Meet. Suppl., S196.
- [16] Goldstein, R.M., Engelhardt, H., Kamb, B., and Frolich, R.M., (1993) Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream, *Science*, 262, 1525-1530.
- [17] Hoen, W., (2001) A correlation-based approach to modelling interferometric radar observations of the Greenland ice sheet, PhD thesis, Stanford University. Isacks, B.L., (1989) Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline, *Journal of Geophysical Research*, 93, 3211-3236.

- [18] Jonsson, S., (2002) Modeling volcano and earthquake deformation from satellite radar interferometric observations, PhD thesis, Stanford University. Joughin, I., (1995) Estimation of ice-sheet topography and motion using interferometric synthetic aperture radar. PhD thesis, University of Washington. Kakkuri J., (ed.), (1991) Proceedings of the 11th International Symposium on Earth Tides, Schweizerbart'sche Verlag., Stuttgart, 662 p. Linde, A., Agustsson, K., Sacks, I.S., and Stefansson, R., (1993) Mechanism of the 1991 eruption of Hekla from continuous borehole strain monitoring, *Nature*, 365, 737- 740.
- [19] Marks, D., Dozier, J., and Frew, J., (1984) Automated basin delineation from digital elevation data, *Geo-Processing*, 2, 299-311.
- [20] Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., and Adragna, F., (1994) Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake, *Nature*, 369, 227- 230.
- [21] Massonnet, D., Briole, P., and Arnaud, A., (1995) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375, 567-570.
- [22] Massonnet, D., and Feigl, K.L., (1995) Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M 5 6.1 Eureka Valley, California, earthquake of May 17, 1993, *Geophysical Research Letters*, 22, 1541-1544.
- [23] Massonnet, D., and Feigl, K.L., (1998) Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36, 4, 441-500.
- [24] Milliman, J.D., and Meade, R.H., (1983) World-wide delivery of river sediment to the oceans, *Geology*, 11, 1-21. Mogi, K., (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surface around them. *Bull. Earth Res. Inst. Univ. Tokyo*, 36, 99-134.
- [25] Newhall, C.G., and Dzurisin, D., (1988) Historical unrest at large calderas of the world, U.S. Geological Survey Bulletin, 1855. Okada, Y., (1985) Surface deformation to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- [26] O'Loughlin, E.M., (1986) Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, *Water Resources Res.* 22, 794-804. Oerlemans, J., (1989) A projection of future sea level, *Climate Change*, 15, 151-174.
- [27] Parker, B.B., ed., (1991) *Tidal Hydrodynamics*, Wiley and Sons, New York, 883 pp. Peltzer, G., and Rosen, P., (1995) Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry, *Science*, 268, 1333- 1336.
- [28] Shimada, M., Nakai, M., and Moriyama, T., (1992) Derivation of topography from OPS stereoscopic data, Proc. CEOS Working Group on Calibration/Validation, Pasadena, CA. Shoberg, T., and Stein, S., (1994) Investigation of spreading center evolution by joint inversion of seafloor lineation and magnetic data, *Earth Planet Science Letters*, 199, 1- 2, 195-206.
- [29] Shoberg, T., Stein, S., and Karsten, J., (1991) Constraints on rift propagation history at the Cobb Offset, Juan de Fuca ridge, from numerical modelling of tectonic fabric, *Tectonophysics*, 197, 295-308.
- [30] Thatcher, W., (1990) Precursors to eruption, *Nature*, 343, 590-591. Talebian, M., Fielding, E.J., Funning, G.J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, P., Priestley, K., Rosen P.A., Walker, R., and Wright, T.J., (2004) The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault, *Geophysical Research Letters*, 31, L11611.
- [31] VanDam, T.M., Blewitt, G., and Heflin, M., (1994) Atmospheric pressure-loading effects on Global Positioning System coordinate determinations, *Journal of Geophysical Research*, 99, B12, 23939-23950. Van Der Veen, (1991) State of balance of the cryosphere, *Review of Geophysics*, 29, 433-455.
- [32] Yang, X., Davis, P., Delaney, P., and Okamura, A., (1992) Geodetic analysis of dike intrusion and motion of the magma reservoir beneath the summit of Kilauea volcano, Hawaii: 1970-1985, *Journal of Geophysical Research*, 97, 3305-3324, 1992.

- [33] Wise, D.U., (1974) Continental margins, freeboard, and the volume of continents and oceans through time, *The Geology of Continental Margins*, C. A. Burk and C. L. Drake, eds., Springer-Verlag, 45-58.
- [34] Chatterjee, R., Fruneau, B., Rudan, J., Roy, P., Frison, P& ,Lakhera, R .(2006) .Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique .*India: Remote Sensing of Environment* 102 , 176_185 6.
- [35] Ferretti, A. C& .Prati, R. F .(2000) .Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry .*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, 2202-2212. 7.
- [36] Hanssen, R. ,2001- *Radar Interferometry: Data interpretation and error analysis*. Kluwer Acad, Netherlands 8.
- [37] Ketelaar, V .(2008) *Satellite Radar Interferometry Subsidence Monitoring Techniques* .Vol, 14. Netherlands. Springer Science . 9.
- [38] Klar, A& ,Linker, R .(2009) .Feasibility study of the auto mated detection and localization of underground tunnel excavation using Brillouin optical time domain reflectometer .Haifa, Israel. 10.
- [39] Kampes, B .(2006) .*RADAR INTERFEROMETRY Persistent Scatterer Technique* .Germany: German Aerospace Center (DLR) 11.
- [40] <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/asar> 12.
- [41] Raucoules, D., Colesanti, C& ,Carnec, C .(2007) .Use of SARinterferometry for detecting and assessing ground subsidence .*C. R. Geoscience* 339 , 289_302. 13.
- [42] Samuel, W. M& ,Christopher, R. J .principles of synthetiv Aperture Radar .USA: SAR Marine Users manual. 14.
- [43] W, H.April (1999).characterization of underground facilities .virginia
- [44] Kampes, B.M., Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry. 2005, TU Delft, Delft University of Technology.