

برآورد میزان سالیانه فرونشست در دشت مهیار با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تحلیل پارامترهای موثر بر آن

علیرضا عرب‌عامری^{۱*}، مجتبی رفیعی^۲، خلیل رضایی^۲، کورش شیرانی^۴ و نسرین محمدی ثابت^۵

^۱ دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲ کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۳ استادیار رسوب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی و ^۴ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۶

چکیده

شناسایی مناطق در معرض فرونشست و برآورد نرخ آن نقش مهمی در مدیریت کنترل این پدیده دارد. تکنیک تداخل-سنجی تفاضلی راداری با دقت بالا از مناسب‌ترین روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری میزان فرونشست می‌باشد. در این پژوهش، به منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست در دشت مهیار از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است. بدین منظور تعداد هشت زوج تصویر سری زمانی از سنجنده ASAR در نوار C راداری، در عبور صعودی به کار گرفته شد. روش مورد استفاده در این پژوهش مبتنی بر روش آزمایشگاهی-پیمایشی است. به منظور صحت‌سنجی روش از داده‌های پیمایشی، نقشه‌های کاربری اراضی، زمین‌شناسی و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه استفاده شد. طبق نتایج بیشینه نرخ متوسط فرونشست سالانه در منطقه حدود ۶/۴ سانتی‌متر در سال برآورد شده است. نتایج نشان داد که بیشترین میزان فرونشست در مناطق تحت کشت و در نتیجه استحصال بیش از حد آب و فرونشست سطح سفره آب‌های زیرزمینی رخ داده است. رابطه بین فرونشست و مقدار تغییرات سطح چاه پیژومتری نشان داد که به ازای هر دو سانتی‌متر افت سطح چاه پیژومتری، دشت دچار ۰/۳۸۴ سانتی‌متر فرونشست خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: استان اصفهان، چاه پیژومتری، روش آزمایشگاهی-پیمایشی، سنجنده ASAR، صحت‌سنجی

مقدمه

پوسته زمین به‌عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پیوسته این تغییرات از حیث هزینه، مقیاس و سرعت مطرح می‌باشد (Davoudijam, ۲۰۱۰؛ Raucoules و همکاران، ۲۰۰۷). اصول این تکنیک برای اولین بار به‌وسیله گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد (Lashkari و همکاران، ۲۰۰۸). بدین صورت که تداخل‌سنجی تفاضلی راداری تغییرات فاز را از دو زوج تصویر راداری

از اوایل دهه ۱۹۹۰، با عملیاتی شدن ماهواره‌های راداری، تداخل‌سنجی راداری نیز به‌صورت گسترده مورد استفاده متخصصان علوم زمین قرار گرفت (Shirani و همکاران، ۲۰۱۳؛ Motaghi, ۲۰۰۶، ۲۰۰۸). تداخل‌سنجی داده‌های راداری (InSAR) در بین روش‌های متنوع و گوناگون آشکارسازی تغییرات

* مسئول مکاتبات: alireza.ameri91@yahoo.com

(ایتالیا)، مکزیکوسیتی (مکزیک)، لاس وگاس، آنتلپ و سانتاکلارا (ایالات متحده)، بانکوک (تایلند) و شانگهای (چین) نام برد. از لحاظ هزینه‌های اقتصادی وارده نیز به‌عنوان مثال می‌توان به خسارت ۵۰ میلیون یورویی وارد به مادر شهر ماریسا در اسپانیا اشاره کرد که به تبع آن، هزینه‌های سنگین اجتماعی را در دوره خشکسالی ۱۹۹۵-۱۹۹۲ بر جامعه تحمیل کرده است (Thomas و همکاران، ۲۰۰۹). شناسایی فرونشست در ابتدا متکی بر بررسی‌های پیمایشی و عملیات مکانیک خاک و ژئوتکتونیک بود که این روش‌ها علاوه بر دقت اندک، زمان‌بر و پرهزینه بودند. در دهه گذشته با فراگیر شدن ابزار GPS امکان پایش نواحی در معرض فرونشست با هدف تعیین نرخ فرونشست مورد توجه قرار گرفت. این تکنیک هر چند از لحاظ دقت مورد قبول بود، لیکن از لحاظ مسائلی چند مانند هزینه بالای اجرا در نصب و پایش ایستگاه‌های دائم، عدم سهولت در تعیین دامنه و گستره فرونشست و در نهایت نابسامانی در دوره زمانی پایش به واسطه تغییر در بودجه و اعتبارات سالانه، موفقیت‌آمیز نبوده است (Dehghani، ۲۰۱۱). اندازه نرخ و دامنه فضایی پدیده فرونشست از طریق اطلاعات ماهواره‌ای، روشی نوین و کارآمد به‌شمار می‌رود که در طی دهه پیشین مطرح شد و باعث شد که نقاط ضعف روش‌های پیشین مرتفع شود. تا کنون در زمینه فرونشست با استفاده از تکنیک D-InSAR مطالعات محدودی صورت گرفته است. به‌طوری که در خارج از کشور می‌توان به Golpper (۱۹۸۹)، Fruneau و Sarti (۲۰۰۰)، Kampes (۲۰۰۶)، Liu و همکاران (۲۰۰۶)، Chatterjeel و همکاران (۲۰۰۶)، Ketelaar (۲۰۰۸)، Herrera و همکاران (۲۰۱۳)، García-Davalillo و همکاران (۲۰۱۴)، Neamah Jebur و همکاران (۲۰۱۴)، Terranova و همکاران (۲۰۱۵) و Amato و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. در ایران نیز می‌توان به مطالعات Komakpanah (۲۰۰۷)، Sharifikia (۲۰۱۱)، Sharifikia و همکاران (۲۰۱۳)، Roustaei و همکاران (۲۰۱۳)، Shirani و همکاران (۲۰۱۳) و Shirani و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. هدف از این پژوهش، محاسبه نرخ و دامنه فرونشست در دشت مهبیار با استفاده از پردازش تصاویر سنجنده ASAR

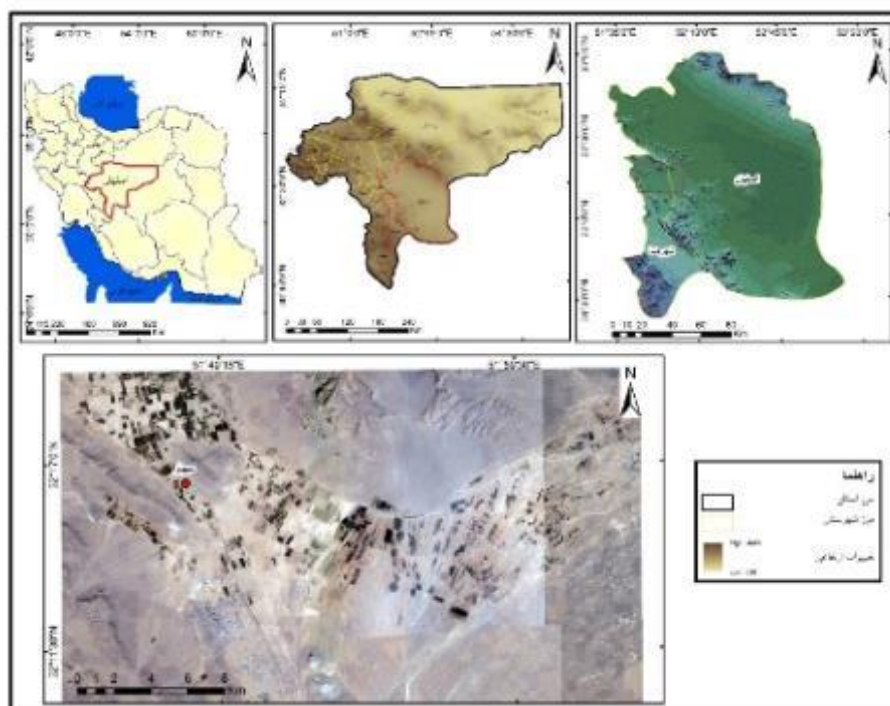
که در زمان‌های مختلف اخذ شده‌اند محاسبه کرده، مبتنی بر آن؛ تغییرات به‌وجود آمده در پوسته زمین را به‌صورت کمی و کیفی آشکار می‌کند (Salehi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Stephan و همکاران، ۲۰۱۱؛ Pacheco و همکاران، ۲۰۰۶)، این فن برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های حاصل شده از زمین‌لرزه، جابه‌جایی یخچال‌ها و پدیده فرونشست و روراندگی با موفقیت به‌کار گرفته شده است. فرونشست زمین به‌عنوان پدیده مورفولوژیکی، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین (Sharifikia، ۲۰۱۱) و همچنین، نشست تدریجی و یا ناگهانی مواد سطحی همراه است (Avalone و همکاران، ۱۹۹۹؛ Sharifikia، ۲۰۰۹). رخداد این پدیده از هر نوع (تدریجی یا ناگهانی) می‌تواند با دخالت عوامل طبیعی و یا انسانی همچون تغییرات نوع کاربری زمین همراه باشد (Sharifikia و همکاران، ۲۰۱۳؛ Zebker، ۱۹۹۴). مهمترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر پمپاژ بی‌رویه از این منابع است (Dehghani، ۲۰۱۱؛ Chung و همکاران، ۲۰۱۵)، این وضعیت به‌ویژه در جایی که پمپاژ بی‌رویه از سفره‌های آبدار ماسه‌ای متخلخل که به‌صورت بین لایه‌ای با لایه‌های آبدار رسی نفوذناپذیر قرار دارد، بسیار حاد بوده، موجب فرونشست گسترده می‌شود (Alemi، ۲۰۰۲). تغییر در روند و میزان فرونشست، می‌تواند موجبات وارد آوردن خسارات جدی به تأسیسات و همچنین، ساختمان‌های مستقر بر روی آن‌ها شود که از این‌رو به‌عنوان یک مخاطره طبیعی تهدید کننده مناطق مسکونی و کشاورزی به‌شمار آید (Davoudijam، ۲۰۱۰). امروزه نشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی به‌عنوان یک مخاطره، جوامع ساکن بر آن را در سطوح بین‌المللی تهدید می‌کند. این پدیده در سطح زمین به‌صورت جابه‌جایی‌های عمودی نمود دارد که از مقیاس میلی‌متر تا متر و در محدوده‌ای وسیع حادث می‌شود. بر طبق گزارش کارشناسان، نزدیک به ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا در معرض این مخاطره قرار دارند. از جمله این مناطق می‌توان به دره پو

۰۹' ۴۳° تا ۳۰' ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲° دقیقه تا ۱۹' ۳۲° شمالی قرار گرفته است. این دشت در ۳۰ کیلومتری شمال شهرضا در استان اصفهان واقع شده است. کمینه ارتفاع منطقه ۱۵۰۱ و بیشینه آن ۲۳۴۳ متر است. این دشت از شمال و شرق به شهرستان اصفهان، از جنوب به شهرستان شهرضا و از غرب به شهرستان مبارکه منتهی می‌شود (شکل ۱).

است. به منظور صحت‌سنجی روش نیز از پیمایش میدانی و هم‌نهادسازی با نقشه کاربری اراضی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مطالعاتی: دشت مهباز با وسعت تقریبی ۵۵۸/۲ کیلومتر مربع و منطقه مورد بررسی مساحت ۹۷/۸۲ کیلومتر مربع، در طول جغرافیایی



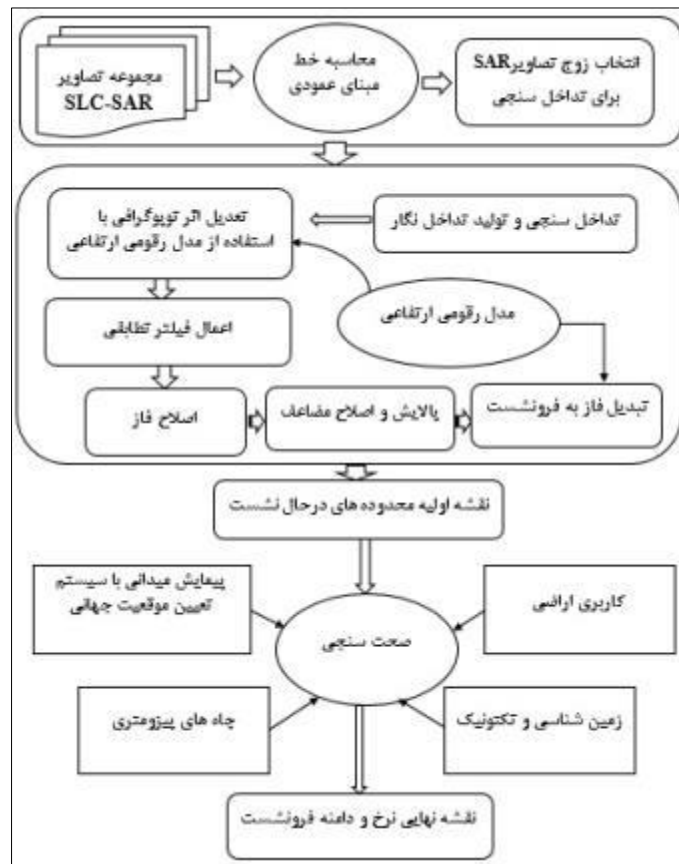
شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

استفاده از داده‌های پیمایشی پرداخته شد. در مرحله پردازش تصاویر از سری زمانی داده‌های راداری ماهواره Envisat سنجنده ASAR در نوار C استفاده شد. با استفاده از پردازش تصاویر با نرم‌افزار SARscape در پلت‌فرم ENVI و به‌کارگیری روش‌سنجی، مناطق در معرض فرونشست و میزان فرونشست در هر یک از مناطق تعیین شد. در مرحله بعد، با استفاده از عملیات پیمایشی عوارض حاصل از فرونشست در منطقه شناسایی و برداشت میدانی شد. به‌منظور تبیین علل فرونشست در منطقه مطالعاتی، داده‌های مربوط به کاربری اراضی و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین، اطلاعات مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای با نتایج حاصل از میزان

روش پژوهش: داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های راداری و همچنین، داده‌های جانبی مانند تصاویر سنجنش از دور اپتیکی به‌منظور استخراج کاربری اراضی، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، داده‌های مربوط به چاه‌های پیژومتری و داده‌های مربوط به پیمایش میدانی با GPS می‌شود. پژوهش پیش رو از نوع آزمایشگاهی- پیمایشی می‌باشد. بدین صورت که در ابتدا، روش آزمایشگاهی به‌منظور پردازش تصاویر انجام پذیرفت و سپس بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصاویر، به گردآوری داده‌های پیمایشی پرداخته شد و در آخرین مرحله نیز به صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی با

داده شده است.

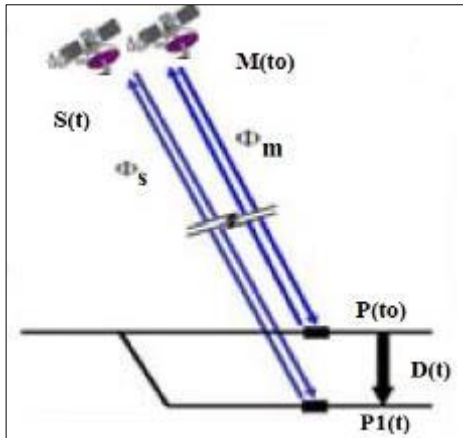
فرونشست در منطقه، مقایسه و مورد تحلیل آماری قرار گرفت. مدل مفهومی تحقیق در شکل ۲ نشان



شکل ۲- نمودار مفهومی مراحل پژوهش

موج داده‌های مورد استفاده و معادل نصف آن خواهد بود. اصول بنیادین نحوه اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوسته زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست (Master) این فضا را در زمان T_0 ثبت و مقدار فاز (Φ_m) آن را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار نشست عبارت است از فاصله P تا PI که طی زمان مشخصی صورت گرفته است (Dt) . برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویر دومی (Slave) در زمان t و با هندسه-ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز (Φ_s) را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل-سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φ_m و Φ_s را در فرم تداخل‌نگار فازی نمایش می‌دهد $(\Delta\Phi_{int})$. در صورت

تداخل‌سنجی راداری: روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل‌های رقومی ناهمواری‌های زمین را فراهم می‌آورد که دقت ارتفاع بهینه آن برای داده‌های نوار C با طول موج $5/6$ سانتی‌متر حدود پنج متر است (Chatterjeel و همکاران، ۲۰۰۶). این روش را برای اولین بار Goldstone و Zebeker در سال ۱۹۸۹ ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری پاره‌ای پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابه‌جایی سطح زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزه مجازی (SAR) اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. این روش قادر است با استفاده از دست‌کم سه (دو تصویر DEM^+ یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت‌های میلی‌متری آشکارسازی کند. در عین حال، این دقت تابع طول



شکل ۳- روش تداخلسنجی تفاضلی برای محاسبه فرونشست (Sharifikia, ۲۰۱۱)

نتایج و بحث

تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخلسنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر یا غیر مکرر (Two Pass D-In SAR) می‌باشد. از اساسی‌ترین مراحل در پردازش تداخلسنجی راداری انتخاب مناسب زوج تصاویر راداری است که یکسری عوامل همچون فرکانس سنجنده، خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و همچنین، هم‌پوشانی فضایی در راستای حرکت سنجنده، در انتخاب زوج تصاویر موثر می‌باشند. در این پژوهش، از هشت زوج تصویر ASAR استفاده شده است. زوج تصاویر انتخاب شده در محیط SARscape به فرمت SLC تبدیل و بر مبنای آن محاسبات مربوط به خط مبنای عمودی و دیگر عوامل ذکر شده در انتخاب زوج تصاویر انجام شد (جدول ۱).

ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر (SP-MP) ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده است و مقدار آن به کمک رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\Delta \Phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن، SP فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت ۳/۱۴، λ طول موج می‌باشد. در اندازه‌گیری مقدار فرونشست در این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به طوری که سطح از P به PI تنزل یافته است. تعیین مقدار نشست در فاصله زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر $\Delta \Phi_{int}$ به همراه فاز ناشی از توپوگرافی (Φ_{Top}) و فاز ناشی از جابه‌جایی سطح (Φ_{Mov}) و همچنین، فاز ناشی از اثر اتمسفر (Φ_{Atm}) خواهد بود (Ding و همکاران، ۲۰۰۴).

$$\Delta \Phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} = \Phi_{Top} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} \quad (2)$$

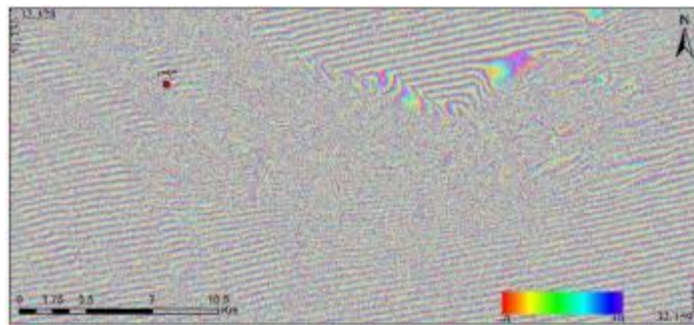
در این روش، در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم، به کمک مدل رقومی زمین و تبدیل ارتفاع به فاز، یک تداخل‌نگار مصنوعی (syntactic interferogram) تولید می‌شود و از این طریق به کمک معکوس اطلاعات DEM، اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می‌شود. اختلاف فاز باقی‌مانده به اثر جابه‌جایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. در نهایت، با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابه‌جایی‌های به میزان بالا (چند سانتی‌متر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل‌نگار، فقط بیان‌کننده مقادیر جابه‌جایی سطح (فرونشست) خواهد بود.

جدول ۱- زوج تصاویر انتخابی تصاویر ASAR

نام اختصاری انتخابی	تاریخ (روز-ماه-سال میلادی)	خط مبنای زمانی (روز)	خط مبنای مکانی (متر)	خط مبنای بحرانی (متر)
A ₁	۲۰۰۴/۰۸/۲۴-۲۰۰۶/۱۱/۰۷	۸۰۳	۷۹/۵	۲۱۶۰/۲
A ₂	۲۰۰۶/۰۶/۲۰-۲۰۰۹/۰۶/۰۹	۱۰۷۱	۱۴۸/۶	۲۱۵۵/۸
A ₃	۲۰۰۷/۰۲/۲۰-۲۰۰۹/۰۶/۰۹	۸۳۹	۱۲۴/۶	۲۱۵۹/۸
A ₄	۲۰۰۷/۰۳/۲۷-۲۰۱۰/۰۴/۲۰	۱۱۱۸	۵۴/۰۵	۲۱۵۸/۳
A ₅	۲۰۰۷/۰۸/۱۴-۲۰۱۰/۰۶/۲۹	۱۰۴۵	۴۱/۲	۲۱۶۱/۷
A ₆	۲۰۰۹/۰۳/۳۱-۲۰۱۰/۰۶/۲۹	۴۵۴	۱۱۷/۵	۲۱۵۷/۹
A ₇	۲۰۱۰/۰۴/۲۰-۲۰۱۰/۰۶/۲۹	۶۹	۲۲۱/۰۳	۲۱۵۸/۸
A ₈	۲۰۱۰/۰۴/۲۰-۲۰۱۰/۰۹/۰۷	۱۳۷	۳۰۹/۱۳	۲۱۵۸/۸

شده) به منظور اصلاح جابه‌جایی طیفی و اثر داپلر منظور شد. به دلیل اثرات تجمعی نویزهای مؤثر که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، تداخل‌نگارهای حاصل، فاقد هر گونه تعبیر و تفسیر از لحاظ بصری بوده، تشخیص فاز حاصل از جابه‌جایی نیز مشکل و حتی در مواردی غیر ممکن می‌نماید.

پس از هم‌خوانی دو تصویر، فاز حاصل از دو تصویر SLC نسبت به هم تفاضل یافته، در نتیجه تداخل‌نگار تولید می‌شود (شکل ۴). با توجه به قدرت تفکیک متفاوت این سنجنده در امتداد برد و آزیموت راداری، اندازه پنجره فیلتر به مقدار پنج نگاه در امتداد آزیموت و یک نگاه در جهت برد (بر پایه رابطه ریاضی تعریف



شکل ۴- تداخل‌نگار حاصل از زوج تصاویر ۲۰۰۶/۱۱/۰۷-۲۰۰۴/۰۸/۲۴

ارتفاعی به مختصات هندسی تصویر پایه در زمان اخذ تصویر می‌باشد. در حین تبدیل مختصات، اطلاعات مربوط به پارامترهای مداری نیز مورد نیاز است که به وسیله مرجع عرضه کننده تصاویر راداری ارائه می‌شود (مانند فایل‌های DORIS برای سنجنده ASAR). در این مورد، هر چه دقت مدل ارتفاعی مورد استفاده (به نسبت مقدار ابهام توپوگرافی) بهتر و همچنین، پارامترهای مداری از دقت بالاتر برخوردار باشد، به همان میزان دقت و صحت عملیات حذف اثرات توپوگرافی بیشتر خواهد بود. به منظور تعدیل بیشتر اثرات توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی زمین، کسب شده از شاتل فضایی SRTM و همچنین فایل‌های DORIS که مربوط به پارامترهای مداری سنجنده در زمان نزدیک به اخذ تصاویر است، استفاده شده است (شکل ۵).

تداخل‌نگار تفاضلی حاصل از حذف اثرات توپوگرافی در مرحله پیشین، حاوی نویزهایی است که در نتیجه اختلاف زمانی یا بازه زمانی دریافت دو تصویر راداری و یا در اثر تفاوت خط مبنای مکانی و همچنین، ناشی از لکه‌های فاقد سیگنال پدید آمده، ممکن است باعث پایین آمدن کیفیت تداخل‌نگار شده باشند. لذا لازم است تا با اجرای فیلترهای تطبیقی اثر

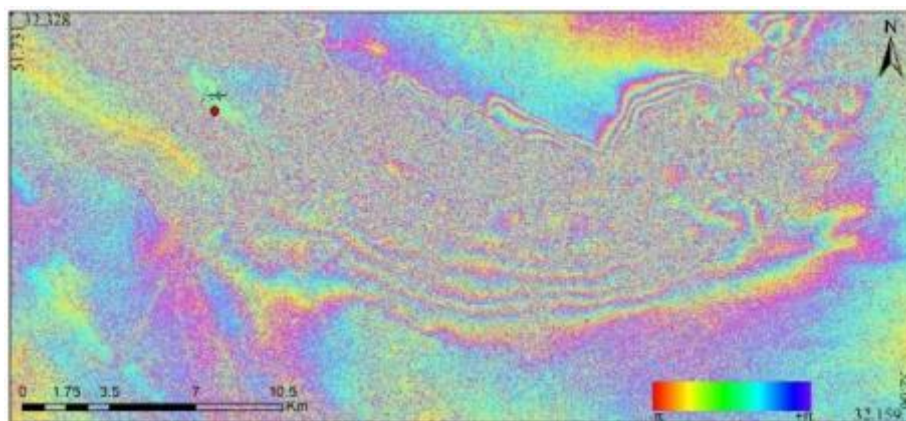
یک تداخل‌نگار، حاصل نمایش اختلاف فازی ناشی از تغییر فاصله بین پدیده زمینی و سنجنده در دو عبور متوالی می‌باشد. فاصله یک نقطه بر روی زمین از سنجنده در دو عبور متفاوت می‌تواند با اختلافات فازی حاصل از دو تصویر در فرم ضرب مختلط دو تصویر اول در مزدوج^۱ تصویر دوم، محاسبه شود. تصویر حاصله، اختلافات فاز موجود در هر پیکسل را نشان می‌دهد. فاز حاصل از این ضرب مختلط، یک فاز تفاضلی است که حامل فازهای مربوط به توپوگرافی، فاز مداری، فاز اتمسفری و فاز ناشی از جابه‌جایی‌های سطح زمین است. به همین منظور، در ادامه روند پردازش تداخل‌سنجی بایستی تمامی فازهای دیگر به غیر از فاز ناشی از تغییرات سطح زمین، از سطح تداخل‌نگار حاصله حذف شود.

ساده‌ترین روش به منظور مقابله با مولفه توپوگرافی به کمینه رساندن خط مبنای عمودی زوج تصویر انتخابی است، در این صورت، قسمت اعظم اثر توپوگرافی در ایجاد اختلاف فاز از بین می‌رود. در فرایند انجام تعدیل اثر توپوگرافی عامل ورودی و کلیدی مدل رقومی ارتفاعی زمین است. عملیات مربوطه شامل تبدیل مختصات هندسی مدل رقومی

¹ Conjugate

را به صورت محلی اجرا می‌کند. این فیلتر با بهره‌گیری از متغیر عرض نوار که به صورت مستقیم از همبستگی توان طیفی تداخل‌نگار تفاضلی به دست می‌آید، تنظیم می‌شود. بدین ترتیب که در مناطق با همبستگی بالا، با عرض نوار کم یا تعداد پیکسل محدود و در نواحی با همبستگی پایین با عرض نوار زیاد و تعداد پیکسل بیشتر عمل می‌کند. با توجه به این که مقدار همدوسی در هشت زوج تصویر مورد استفاده کمتر از حد بحرانی (۰/۵) می‌باشد (جدول ۲)، در نتیجه از تمامی زوج تصاویر به منظور تهیه میزان فرونشست استفاده شده است.

نویزها را از روی تداخل‌نگارها حذف کرد. نتیجه این فرایند، ضمن حذف نویز از فاز مربوط به جابه‌جایی و بهبود کیفیت بصری فرینچ‌های تداخل‌نگار، منجر به تولید تصویر هم‌دوس نیز خواهد شد. این تصویر بیانگر شاخص همبستگی مقادیر توان سیگنالی در دو تصویر اخذ شده در دو زمان متفاوت است که به نوبه خود شاخص مناسبی از کیفیت تداخل‌نگار و مناسب بودن آن به منظور ادامه فرایند پردازش تداخل‌سنجی خواهد بود. در این پژوهش، از فیلتر گلدشتاین برای پاک‌سازی تداخل‌نگار استفاده شد (شکل ۶). این فیلتر به صورت توافقی و دینامیک عمل کرده، عملیات فیلتر



شکل ۵- تداخل‌نگار مسطح شده حاصل از زوج تصاویر ۲۰۰۴/۰۸/۲۴-۲۰۰۶/۱۱/۰۷

مناطق که همبستگی نسبتاً بالا در تصاویر هم‌دوس دارند، دارا می‌باشد. در این تحقیق نیز با توجه به مقادیر همبستگی در تداخل‌نگارهای حاصل، از روش اول برای تداخل‌نگارهای حاصل از سنجنده ASAR استفاده شد (شکل ۷). مقادیر آستانه این الگوریتم نیز با توجه به میانگین مقدار همبستگی در تصویر هم‌دوسی محاسبه و تنظیم شد.

به منظور تبدیل صحیح فاز اصلاح شده به مقادیر ارتفاعی و محاسبه میزان جابه‌جایی سطح زمین، حتماً لازم است تا مرحله پایش یا تسطیح مجدد اجرا شود. اجرای این مرحله باعث می‌شود تا فازهای احتمالی مزاحم دیگر از قبیل فازهای باقی‌مانده از اثرات توپوگرافی و همچنین، فاز باقی‌مانده از جابه‌جایی‌های مداری از فاز موجود حذف شود. انجام این عمل، برای تداخل‌نگارهایی که نشان‌هایی از لرزش سکوی در فرم پلکان (Ramp) دارند، ضروری بوده و حتماً می‌بایست

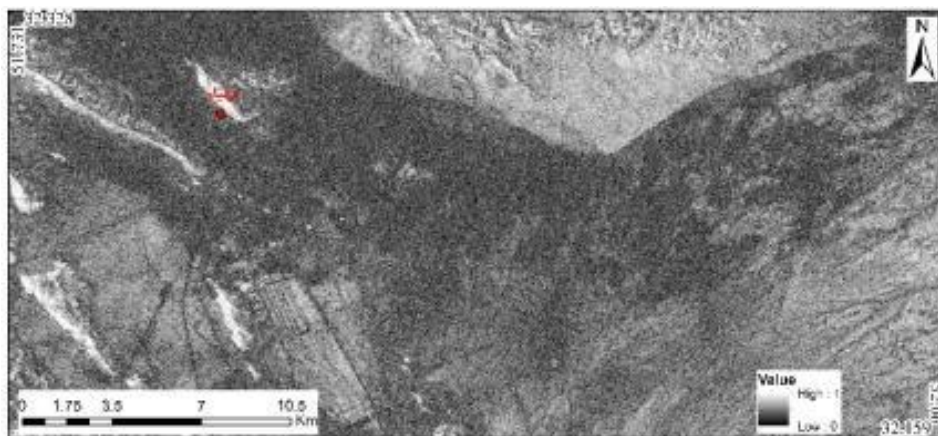
یکی از پیچیده‌ترین و مهمترین مراحل در پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی، مرحله اصلاح فاز می‌باشد. از آنجایی که در سامانه رادیانسی فاز یک تداخل‌نگار می‌تواند تنها به اندازه 2π تغییر کند، بعضی مواقع ممکن است تغییرات آن بیشتر از مقدار یاد شده باشد که فرایند اصلاح فاز باعث خواهد شد تا مقادیر واقعی فاز تداخل‌نگار مجدداً محاسبه شده، بدین وسیله ابهام 2π اصلاح شود. در این راستا، الگوریتم‌های متنوع و پیچیده‌ای تا کنون ارائه شده‌اند که هر کدام بسته به نوع داده و منطقه مورد مطالعه مزیت‌های خاص خود را دارا هستند. عمومی‌ترین روش‌هایی که تا کنون در این زمینه به کار گرفته شده‌اند، شامل الگوریتم‌هایی موسوم به رشد ناحیه‌ای^۲ و جریان با کمترین هزینه^۳ هستند. الگوریتم اول قابلیت انطباق بیشتری با

^۲ Region growing

^۳ Minimum cost flow

تبدیلات ژئودتیک، معادله دامنه داپلر نیز به صورت همزمان بر دو آنتن دریافت کننده و تشکیل دهنده تصویر SAR اعمال می‌شود. در نتیجه، اولاً مقدار جابه‌جایی و متعاقب آن مختصات کارترین هر پیکسل زمینی همزمان به دست خواهد آمد. نقشه خروجی نشانگر شدت میزان جابه‌جایی به ازای هر پیکسل در واحد متریک است. در نقشه‌های حاصل مقادیر مثبت جابه‌جایی 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 (فرونشست). نتایج حاصل از جابه‌جایی زوج تصاویر در شکل ۸ و مقادیر بیشینه جابه‌جایی در هر یک از تصاویر در جدول ۳ نشان داده شده است.

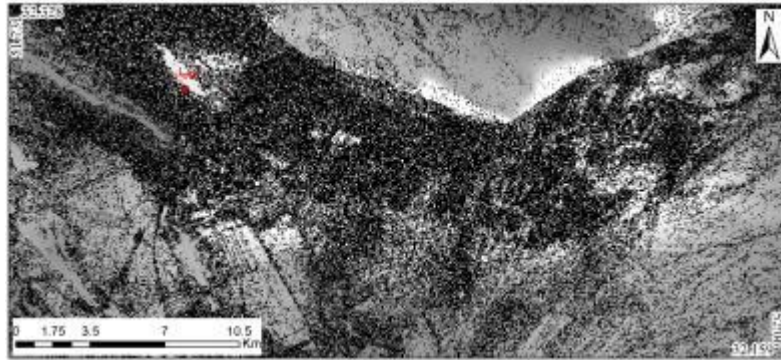
انجام پذیرد. از اختلاف فاز حاصل در مرحله اصلاح فازی از فازهای ناشی از توپوگرافی و خطاهای مداری، فاز مطلق به دست می‌آید که مربوط به جابه‌جایی‌های رخ داده در زمین در بازه زمانی برداشت دو تصویر راداری است. فرایند مذکور بر روی هر زوج از تداخل‌نگارهای حاصل از سنجنده ASAR به طور مستقل اعمال شده است. بعد از پالایش و تصحیح مضاعف فاز، اینک می‌توان فاز مطلق حاصل را به مقادیر جابه‌جایی یا نقشه جابه‌جایی تبدیل و زمین مرجع کرد. این فرایند می‌تواند با استفاده از تبدیلات ژئودتیک و با کمک معادله دامنه داپلر انجام پذیرد. روش کار مشابه با روش‌های معمول در تبدیلات سامانه تصویر به سامانه مرجع جهانی است. تنها تفاوت و وجه تمایز آن این است که علاوه بر



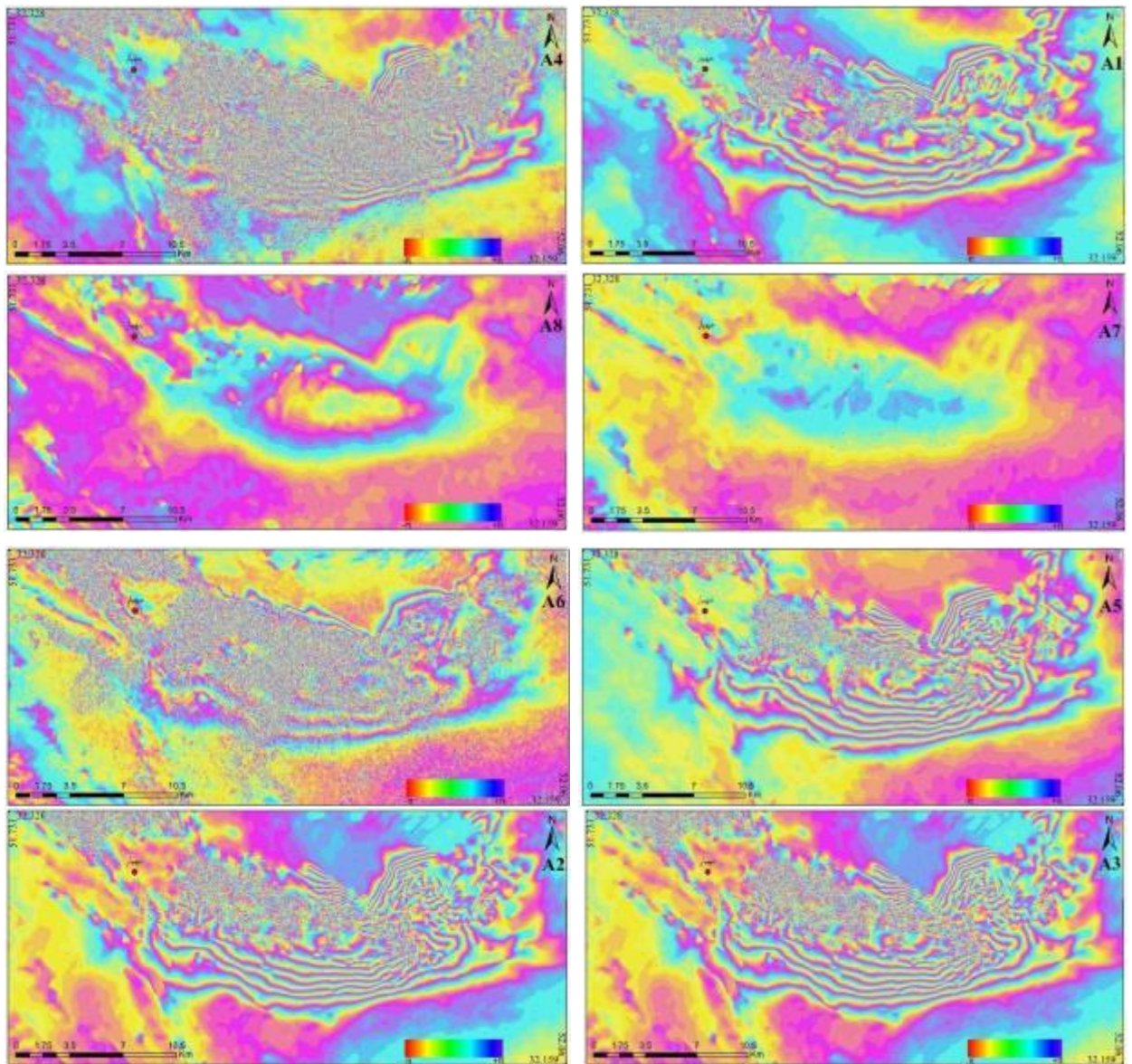
شکل ۶- تصویر همدوسی برای زوج تصویر ۲۰۰۶/۱۱/۰۷-۲۰۰۴/۰۸/۲۴

جدول ۲- مقادیر همبستگی برای زوج تصاویر راداری در تصاویر همدوسی

زوج تصویر	خط مبنای زمانی (روز)	کمترین مقدار	میانگین	بیشترین مقدار	انحراف معیار
A ₁	۸۰۳	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۹۹	۰/۱۶
A ₂	۱۰۷۱	۰/۰۰	۰/۲۶	۰/۹۸	۰/۱۳
A ₃	۸۳۹	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۹۸	۰/۱۱
A ₄	۱۱۱۸	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۹۹	۰/۱۳
A ₅	۱۰۴۵	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۹۹	۰/۱۵
A ₆	۴۵۴	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۹۸	۰/۱۳
A ₇	۶۹	۰/۰۰	۰/۴۳	۰/۹۸	۰/۱۶
A ₈	۱۳۷	۰/۰۰	۰/۳۹	۰/۹۸	۰/۱۶



شکل ۷- تصویر حاصل از اصلاح فازی زوج تداخل نگار ۲۰۰۴/۰۸/۲۴-۲۰۰۶/۱۱/۰۷



شکل ۸- نقشه‌های فرونشست حاصل از پردازش زوج تصاویر

تغییرات سطح را در طول زمان مورد بررسی قرار داد. تجزیه سری زمانی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری روشی مناسب برای بر آورد نرخ تغییرات سطح

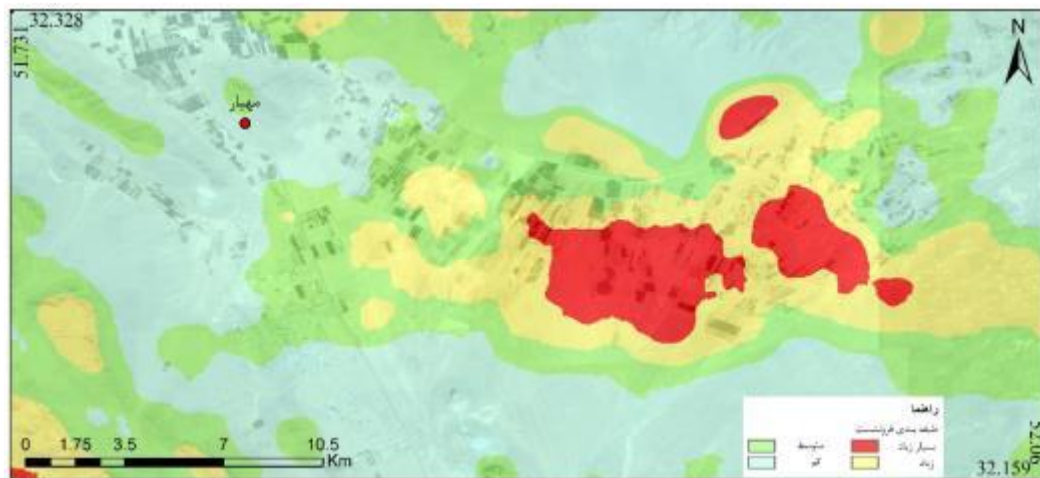
هر اینترفروگرام به‌طور مجزا فقط حاوی تغییرات سطح در یک بازه زمانی است با به‌کار بردن تعدادی اینترفروگرام به همراه تجزیه سری زمانی می‌توان

در جدول ۴ نشان داده شده است. نقشه نهایی نرخ میانگین فرونشست حاصل از تجزیه سری زمانی برای کل منطقه فرونشست به صورت طبقه‌بندی شده در چهار طبقه در شکل ۹ نشان داده شده است. بیشینه نرخ فرونشست در منطقه حدود ۶/۴ سانتی‌متر در سال برآورد شده است.

زمین در قدرت تفکیک مکانی بالا است. با در دست داشتن تعداد قابل توجهی اینترفروگرام می‌توان با استفاده از روش کمترین مربعات مقدار جابه‌جایی سطح زمین را برای هر نقطه و در هر تاریخ محاسبه کرد. در این نوشتار، هشت اینترفروگرام از تصاویر ASAR در تجزیه سری زمانی مورد استفاده قرار گرفت. میزان فرونشست برای هر یک از اینترفروگرام‌ها

جدول ۳- یافته‌های مربوط به بیشینه مقادیر فرونشست استخراج شده از زوج‌های تصویر سنجنده ASAR

نام تداخل‌نگار	بازه زمانی (روز)	بیشینه نشست (سانتی‌متر)
A ₁	۸۰۳	-۱۳/۹
A ₂	۱۰۷۱	-۱۲/۹
A ₃	۸۳۹	-۸/۶
A ₄	۱۱۱۸	-۱۰/۴
A ₅	۱۰۴۵	-۱۴/۰۶
A ₆	۴۵۴	۱۲/۸
A ₇	۶۹	-۱/۳
A ₈	۱۳۷	-۶/۱



شکل ۹- طبقه‌بندی فرونشست در منطقه مطالعاتی

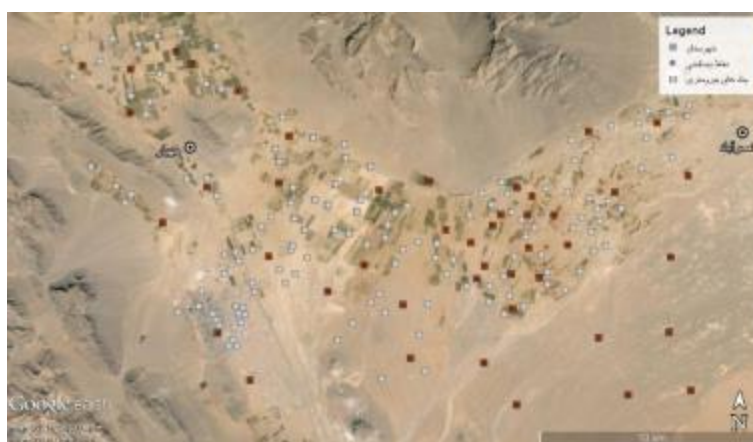
جدول ۴- طبقات فرونشست در منطقه مطالعاتی

درصد	مساحت (هکتار)	طبقات فرونشست
۴۸/۵۱	۲۸۲۳۲/۷۵	کم
۲۹/۷۳	۱۷۳۰۰/۵۳	متوسط
۱۶/۷۳	۹۷۳۵/۴	زیاد
۵/۰۲	۲۹۲۲/۲۸	خیلی زیاد

مشاهده‌ای، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. بدین‌منظور، یافته‌های تحقیق به کمک داده‌های لیتولوژی، کاربری اراضی و پیمایش میدانی مورد

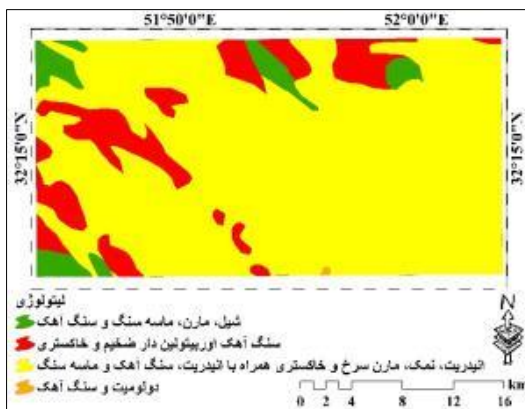
صحت‌سنجی: در پژوهش حاضر، نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده به‌وسیله تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی از طریق اطلاعات پیمایشی و

لبه فرنچ‌ها بازدید به عمل آمده که با عنایت به این که لبه فرنچ‌ها بر روی مناطق مسکونی منطبق شد، در این منطقه شواهدی دال بر وجود این مخاطره مشاهده شد که در شکل ۱۳ نمونه‌هایی از آن‌ها آورده شده است. همچنین، با توجه به گفته کشاورزان این منطقه در زمان آبیاری غرقابی برخی از مناطق زمین شکاف-هایی ایجاد شده که حجم زیادی از آب در زمان آبیاری به‌هدر رفته که این مسئله باعث کاهش سطح زیرکشت منطقه شده، که با ادامه این روند اراضی کشاورزی تبدیل به اراضی بایر شده و اقتصاد منطقه را تحت‌الشعاع قرار داده است.



شکل ۱۰- پراکنش نقاط پیمایشی به همراه چاه‌های پی‌زومتری در منطقه مطالعاتی

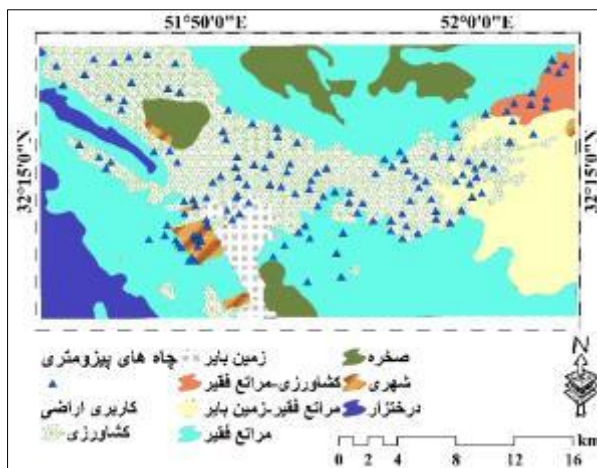
است. میزان تراز آب در سال آبی ۱۳۸۳، ۱۵۱۹ متر بوده است که با دو متر افت به ۱۵۱۷ متر در سال آبی ۱۳۸۹ رسیده است. بنابراین، افت متوسط سالیانه تراز آب طی دوره شش ساله برابر با ۳۳/۳۳ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱۴).



شکل ۱۱- نقشه لیتولوژی

کنترل و اعتبارسنجی قرار گرفته است. در اولین گام به‌منظور تعیین اعتبار یافته‌های تکنیک مورد استفاده و همچنین، جمع‌آوری شواهد مکانی از حدود مخاطره فرونشست به همراه پیمایش رخنمون‌های موجود و تماماً پی‌جویی و مشاهده علل و عوامل ایجابی پدیده فرونشست، عملیات پیمایشی به انجام رسید. پراکنش نقاط بازدید شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی‌های میدانی مؤید وجود تعدادی از رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از نشست زمین در عرصه مورد مطالعه است. با توجه به فرنچ‌های تشکیل شده در شکل ۸ نسبت به یافتن شواهد زمینی بر روی

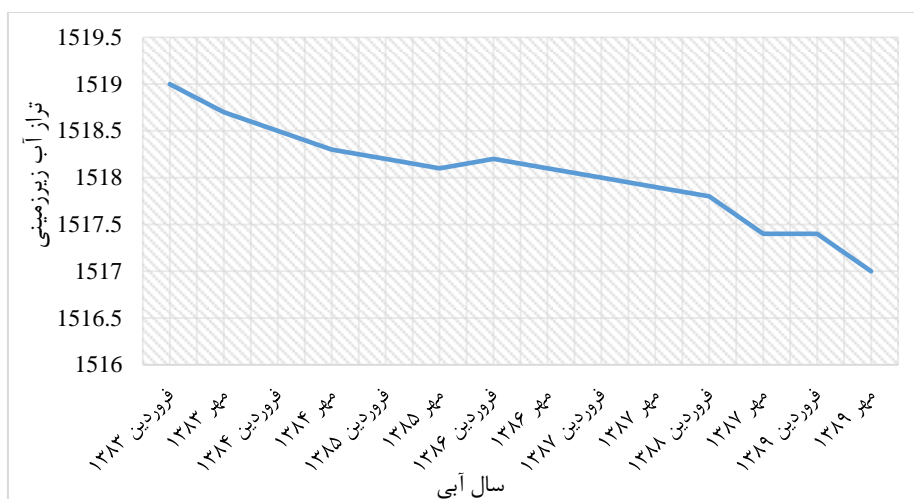
نتایج حاصل از انطباق نقشه کاربری اراضی و نقشه فرونشست منطقه (شکل ۱۲) نشان داد که بالاترین میزان فرونشست به کاربری کشاورزی و کشت آبی در سطح منطقه اختصاص دارد. این مسئله می‌تواند به‌طور عمده به موضوع استحصال آب زیرزمینی به‌منظور کشاورزی و شرب و احتمالاً سایر عوامل موثر همچون زمین‌شناسی (شکل ۱۱) و تکتونیکی مرتبط باشد. تمرکزپذیری نرخ بیشینه فرونشست در مناطق مسکونی شرایط زیستی نسبتاً نامنی را برای ساکنین فراهم آورده و درجه خطرپذیری آن‌ها را از مخاطرات زمین افزایش داده است (شکل ۱۳). در مطالعات مربوط به علل فرونشست سطح زمین بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی دارد. به‌منظور صحت‌سنجی اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۹ که از ۴۰ چاه مشاهده‌ای واقع در دشت مهیار استفاده شده



شکل ۱۲- نقشه کاربری اراضی



شکل ۱۳- نمونه‌ای از عوارض مشاهداتی در منطقه



شکل ۱۴- نمودار هیدروگراف دشت مهبیار بین سال‌های آبی ۸۳ تا ۸۹

نتیجه‌گیری

دشت مهبیار با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به‌منظور آشکارسازی نرخ و دامنه این

در این پژوهش، به مسئله فرونشست زمین در

پیزومتری موجود در سطح دشت استفاده شد. هم‌نهادسازی نقشه رقومی زمین‌شناسی با الگوی توزیعی نواحی در معرض نشست موید قابلیت‌پذیری پدیده نشست در سطوح معرفی شده، به لحاظ ساختارهای لیتولوژیکی زیرین بوده است. در این زمینه، مسئله تکتونیک و ساختمانی بودن دشت و تأثیر آن در پدیده نشست نیز مورد بررسی قرار گرفت. هم‌نهادسازی نقشه‌های فرونشست با لایه‌های کاربری اراضی نیز مؤید رخداد بیشینه عرصه‌های نشست در کاربری زراعت آبی است. هم‌نهادسازی نقشه نهایی میزان و دامنه فرونشست در این دشت با کانون‌های استقرار سکونتگاه‌ها به‌منظور تبیین مخاطره و آسیب‌پذیری ناشی از این پدیده روشن کرد که به سبب ارزش زراعی اراضی و مهیا بودن امکان استقرار، شهرها و روستاها در داخل این عرصه واقع شده‌اند. بنابراین، مخاطره و تهدید فراوانی برای کانون‌های متراکم جمعیتی ایجاد کرده است. بررسی‌های میدانی در دشت نیز مؤید وجود تعداد کثیری از رخنمون‌های مرفولوژیکی (ایجاد ترک در ساختمان‌ها، تاسیسات و زیرساخت‌های ارتباط و برآمدگی‌های شدید در راس لوله چاه و ...) ناشی از نشست زمین در عرصه مورد مطالعه است. بررسی چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه نشان داد که از تاریخ ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۹ سطح آب زیرزمینی به ارتفاع دو متر کاهش یافته است که در پدیده فرونشست دشت تأثیرگذار بوده است. به سبب تداوم شرایط ایجابی مسئله نشست در این دشت، تداوم پایش سنجش از دوری و تعبیه ایستگاه‌های اندازه‌گیری ادواری (GPS) می‌تواند ضمن فراهم آوردن امکان پایش تغییرات میزان و دامنه نشست، امکان مناسبی برای سنجش دقت یافته‌های این روش و بهینه‌سازی آن در عرصه ملی فراهم آورد.

پدیده پرداخته شده است. بدین منظور تعداد ۱۲ زوج تصویر سری زمانی از سنجنده ASAR در نوار C راداری در عبور صعودی به‌کار گرفته شد. با استفاده از داده‌های موجود از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ میلادی ۴۸ اینترفروگرام تهیه شد که از این بین با توجه به خط مبنای زمانی، مکانی و همچنین، میزان همدوسی، تعداد هشت زوج تصویر انتخاب و برای تعیین نقشه فرونشست منطقه با استفاده از روش کمترین مربعات در نرم‌افزار Matlab کدنویسی شد. نتایج حاصل در این تحقیق بیانگر این بود که بیشینه نرخ فرونشست در منطقه به حدود ۶/۴ سانتی‌متر در سال می‌رسد که این مقدار در بازه زمانی شش ساله به‌دست آمد. Salehi و همکاران (Error! Reference source not found) و Davoudijam (۲۰۱۰) نیز به بررسی پدیده فرونشست دشت مهبیار به‌ترتیب در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ و ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ پرداخته‌اند و میزان بیشینه سالانه فرونشست را به‌ترتیب در حدود ۸/۲ و هفت سانتی‌متر بیان کرده‌اند. نتایج این پژوهش در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با نتایج Davoudijam (۲۰۱۰) نزدیک‌تر و یافته‌های ایشان را تأیید می‌کند. داده‌های ASAR به‌دلیل کوتاه بودن طول موج (۵۶ میلی‌متر) برتری منحصر به فردی را در آشکارسازی فرونشست نسبت به داده‌های PALSAR (طول موج ۲۳ سانتی‌متر) در سنجش مقادیر اندک فرونشست، در بازه‌های کوتاه از خود نشان داده‌اند. Shirani و همکاران (Error! Reference source not found.) نیز به دقت بالاتر داده‌های ASAR نسبت به داده‌های PALSAR در زمینه جابه‌جایی‌های قائم زمین اشاره کرده‌اند که از این نظر، نتایج با این پژوهش مشابه می‌باشد. به‌منظور بررسی سازگاری نتایج حاصل از تداخل‌سنجی با دیگر داده‌های تکمیلی از پیمایش‌های میدانی، کاربری اراضی، نقشه زمین‌شناسی و چاه‌های

منابع مورد استفاده

1. Almodaresi, S.A. and Sh. Heshmati. 2015. Modeling the subsidence of the Neyshabour Plain using time series and DINSAR. *Geography and Environmental Planning*, 26(1): 67-84 (in Persian).
2. Alemi, A. 2002. The causes of subsidence in the plain of Yazd-Ardakan. *Conference papers* (in Persian).
3. Amato, V., P.C. Aucelli, E. Bellucci Sessa, M. Cesarano, P. Incontri, G. Pappone, E. Valente and G. Vilardo. 2017. Multidisciplinary approach for fault detection: Integration of PS-InSAR, geomorphological, stratigraphic and structural data in the Venafro intermontane basin (Central-Southern Apennines, Italy). *Geomorphology*, 283: 80-101.

4. Avallone, A., A. Zollo, P. Briole, C. Delacourt and F. Beauducel. 1999. Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26(15): 2303–2306.
5. Chung, Y., R. Chen, G. Yue and J. Angelier. 2005. Estimation of subsidence using GPS measurements and related hazard: the Pingtung Plain. *Southwestern Taiwan*, 337: 1184–1193.
6. Chatterjee, R.S., B. Fruneau, J.P. Rudan, P.S. Roy, P. Frison, R.C. Lakhara, V.K. Dadhwal and R. Saha. 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102: 176–185.
7. Davoudijam, M. 2010. Determine the scope of the meeting and the time variations using InSAR in plain Mahyar. MSc Thesis, Isfahan University, 125 pages (in Persian).
8. Dehghani, M., M.J. ValadanZoej, I. Entezam, S. Saatchi and A. Shemshaki. 2011. Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(2010): 56-73.
9. Ding, X.L., G.X. Liu, Z.W. Li, Z.L. Li and Y.Q. Chen. 2004. Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10): 1151–1156.
10. Fruneau, B. and F. Sarti. 2000. Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric artefacts using correlation. *Geophysical Research Letters*, 27(24): 3981–3984.
11. Galloway, D.L. 2001. Geological subsidence interest group conference. *Proceeding of Technical Meeting*, Galveston, 15: 27-29.
12. García-Davalillo, J., J. Herrera, D. Notti, T. Strozzi and I. Álvarez-Fernández. 2014. DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study. *Landslides*, 11: 225–246
13. Gloppe, R.J. 1989. Land subsidence and soil ripening. *Flevobericht 306*. Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, Lelystad, 49 pages.
14. Herrera, G., F. Gutiérrez, J.C. García-Davalillo, J. Guerrero, D. Notti, J.P. Galve, J.A. Fernández-Merodo and G. Cooksley. 2013. Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 128: 31–43.
15. Kampes, B.M. 2006. Radar interferometry, persistent scatterer technique. German Aerospace Center (DLR), Germany.
16. Ketelaar, V.B.H. 2008. Satellite radar interferometry: subsidence monitoring techniques (*Remote Sensing and Digital Image Processing*), (Book 14), Springer, 244 pages.
17. Liu, C.W., W.S. Lin and L.H. Cheng. 2006. Estimation of land subsidence caused by loss of smectite-interlayer water in shallow aquifer systems. *Hydrogeology Journal*, 14: 508-525.
18. Lashkaripour, Gh.R., H.R. Rostamibarani, A. Kohandel and H. Torshizi. 2006. Decline in groundwater levels and ground subsidence in the valley of Kashmar. 10th Congress of the Geological Society of Iran, Tarbiat Modares University.
19. Lashkaripour, Gh.R., M. Ghafouri and H. Rostamibarani. 2008. The causes of the formation of fissures and land subsidence in West Plains Kashmar. *Journal of Sedimentary Facies*, 1: 95-113.
20. Motaghi, M., Y. Djamour, T.R. Walter, H.U. Wetzel, J. Zschau and S. Arabi. 2006. Land subsidence in Mashhad Valley, north-east Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168, doi: 10.1111/j.1365–246X.2006.03246.x.
21. Motaghi, M., T. R. Walter, M. A. Sharifi, E. Fielding, A. Schenk, J. Anderssohn and J. Zschau. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir over exploitation. *Geophysical Research Letters*, 35, L 16403, doi:10.1029/2008GL033814.
22. Neamah Jebur, M., B. Pradhan and M.S. Tehrany. 2014. Detection of vertical slope movement in highly vegetated tropical area of Gunung pass landslide, Malaysia, using L-band InSAR technique. *Geosciences Journal*, 18: 61-68.
23. Raucoules, D., C. Colesanti and C. Carnec. 2007. Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. Elsevier
24. *Comptes Rendus Geoscience*, 339: 289–302.
25. Roustaei, S., M. Roustaei, M. Sharifikia and J. Yarahamadi. 2013. Application of differential interferometry synthetic aperture RADAR on detection and monitoring landslides, case study: Garmchaei Watershed, Miyaneh. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5(4): 190-198 (in Persian).
26. Pacheco, J., J. Arzate, E. Rojas, M. Arroyo, V. Yutsis and G. Ochoa. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data. *Engineering Geology*, 84(40636): 143-160.

27. Komakpanah, A. 2007. Studying the causes of ground failure in Yazd-Ardakan. *Journal of Transportation*, 2: 429-434.
28. Sharifikia, M. 2009. D-InSAR data processing and analysis for mapping land subsidence phenomenon in Rafsanjan area, Iran. MSc Thesis, Andra University, India.
29. Sharifikia, M. 2011. Check consequence of subsidence in land and residential. *Plains Country*, 3: 43-58.
30. Sharifikia, M., A. Afzali and S. Shayan. 2013. Extraction and evaluation of the geomorphological effects of subsidence in the valley of Damghan. *Quantitative Geomorphological Researches*, 4: 60-74 (in Persian).
31. Sharifikia, M. 2011. Determining the extent and scope of land subsidence using InSAR (D-InSAR) in plain Noogh-Bahreman. *Spatial Planning*, 3: 56-73 (in Persian).
32. Shirani, K. 2013. Detection, monitoring and landslide risk assessment using RADAR satellite images, case study: Dena Mountains. PhD Thesis, University of Isfahan, 268 pages (in Persian).
33. Salehi, R., M. Ghafouri, Gh.R. Lashkaripoor and M. Dehghani. 2013. South Mahyar check subsidence using InSAR. *Irrigation and Water*, 11: 47-57.
34. Tomas, R., G. Herrera, J. Delgado, J.M. Lopez-Sanchez, J.J. Mallorqu'I and J.A. Mulas. 2009. Ground subsidence study based on DInSAR data: calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain). *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2009.11.004.
35. Terranova, C., G. Ventura and G. Vilaro. 2015. Multiple causes of ground deformation in the Napoli metropolitan area (Italy) from integrated persistent scatterers DinSAR, geological, hydrological, and urban infrastructure data. *Earth-Science Reviews*, 146: 105-119.
36. Zebker, H.A., P.A. Rosen, R.M. Goldstein, A. Gabriel and C.L. Werner. 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 99: 19617-19634.

Estimation of land subsidence rate using InSAR technique and analysis of the effective parameters in Mahyar Plain

Alireza Arabameri^{*1}, Mojtaba Rafiee², Khalil Rezaei³, Kourosh Shirani⁴ and Nasrin Mohamadi Sabet⁵

¹ PhD, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Iran, ^{2 and 5} MSc, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Iran, ³ Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Iran and ⁴ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

Received: 17 July 2017

Accepted: 20 December 2017

Abstract

Identification of areas that prone to subsidence and estimation of its rate plays an important role in the control management of this phenomenon. Differential interferometry radar technique (D-InSAR) with very high accuracy is one of the most suitable ways for identify and measure the rate of subsidence. In this study, to identify and measure the subsidence in Mahyar Plain differential radar interferometry techniques have been used in the period of 2004 to 2010. For this purpose, eight pair images of time series were used from ASAR sensor in C-band radar in ascending passage. The method used in this study is based on laboratory-field surveys. For validation of technique, survey data such land use and geology maps and data of observation wells in the region were used. As a result, maximum rate of annual subsidence in the area was 6.4 cm yr^{-1} . Also, results showed that the highest amount of subsidence occurred in areas under cultivation and due to excess extraction of groundwater and subsidence of aquifer surface. The rate of subsidence was obtained 0.384 cm for each two cm drop of water table according to the relationship between subsidence and the changes of piezometric wells surface.

Keywords: ASAR sensor, Isfahan Province, Laboratory-field survey method, Piezometric well, Validation

* Corresponding Author: alireza.ameri91@yahoo.com