

بررسی فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری

کوروش شیرانی^{۱*}، مهرداد پسندی^۲ و بابک ابراهیمی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۳)

چکیده

امروزه پایش و مطالعه فرونشست زمین به‌عنوان پدیده‌ای هیدروژئومورفولوژی به‌علت برداشت بی‌رویه آب از آبخوان‌های کشور ضروری است. در این پژوهش نرخ فرونشست سطح زمین در آبخوان نجف‌آباد اصفهان با استفاده از پردازش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) داده‌های سنجنده‌های ASAR و PALSAR تعیین و توسط مقایسه با داده‌های ترازیبی و افت سطح آب زیرزمینی اعتبارسنجی شده است. پردازش داده‌های رقومی ماهواره‌ای راداری سنجنده ASAR میزان فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد را با نرخ متوسط سالانه ۶/۷ سانتی‌متر و در مجموع ۴۱ سانتی‌متر در مدت ۶ سال برآورد کرده و پردازش داده‌های سنجنده PALSAR نرخ سالانه ۷/۷ سانتی‌متر و در مجموع ۳۰ سانتی‌متر فرونشست در مدت ۴ سال را نشان می‌دهد. بیشترین جابه‌جایی‌های رخ داده مربوط به شهرهای تیرانچی، کوشک، قهدریجان، گلدشت و فلاورجان است که داده‌های ترازیبی دقیق نیز آن را تأیید می‌کند. داده‌های سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد هم‌زمان با دوره زمانی اخذ داده‌های تصاویر ماهواره‌ای راداری در بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳ میزان افت سطح آب زیرزمینی را بین ۰/۵ تا ۴۶/۵ متر در منطقه جنوب، شرق تا شمال شهر نجف‌آباد متناسب با مناطق برآورد فرونشست زمین نشان می‌دهد. به‌طور کلی داده‌های راداری سنجنده PALSAR در پردازش به‌روش DInSAR از دقت مکانی و کیفیت مناسب‌تری برخوردار هستند. نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ای راداری مذکور در زمینه تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر، پیش‌بینی و روند فرونشست زمین از نظر رخداد مکانی می‌تواند به‌طور مستقیم مبنای مدیریت و برنامه‌ریزی برای الویت‌بندی اقدامات کنترلی و پیش‌گیرانه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، آبخوان نجف‌آباد، تداخل‌سنجی راداری، ترازیبی، ASAR، PALSAR

۱. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
 ۲. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
 ۳. معاونت برنامه‌ریزی آب، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران
- * مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: k.shirani@areeo.ac.ir

مقدمه

پیامدهای محیطی پدیده فرونشست ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب بوده و اساساً شامل ایجاد شکاف روی سطح زمین، آسیب رساندن به سازه‌های انسانی مانند پی ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها، راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و فاضلاب، تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصل‌خیز کشاورزی و ایجاد خسارت به چاه‌ها است. همچنین پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز سیلاب شود. این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در جهت، سرعت جریان و توازن آب زیرزمینی نیز مخاطرات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد.

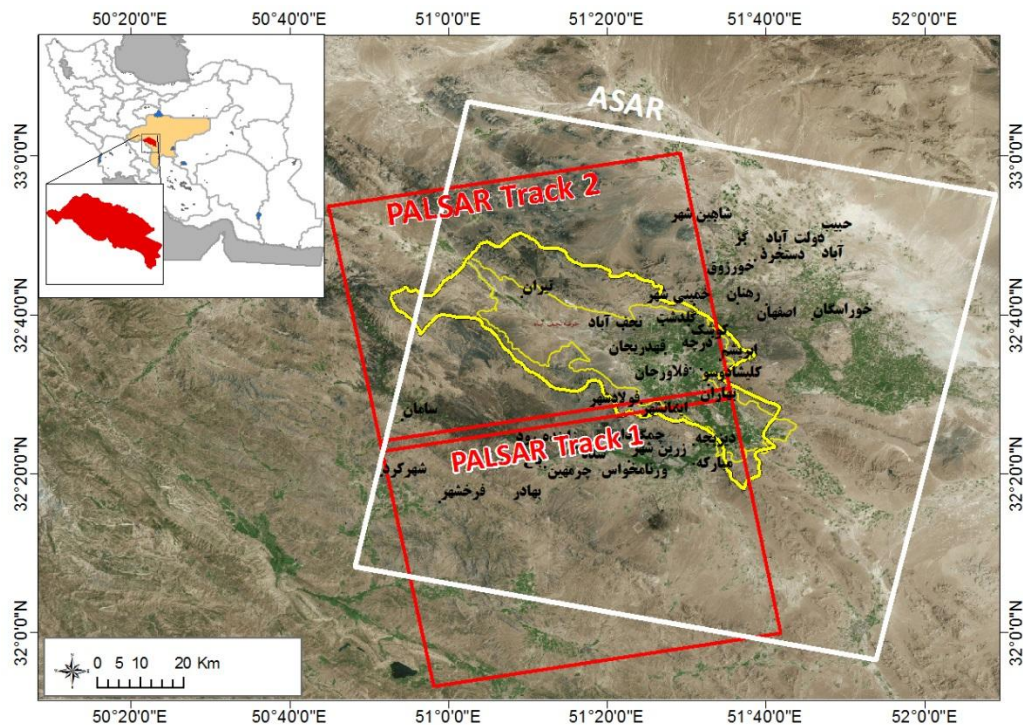
عوامل متعددی سبب رخداد پدیده فرونشست زمین می‌شوند که می‌توان به انحلال و ریزش سنگ‌ها، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، فعالیت‌های آتشفشانی، تحکیم خاک‌های رسی و فعالیت‌های تکتونیکی، فعالیت معدن‌کاری، تراکم آبی خاک‌های ریزشی، زهکشی و اکسیداسیون خاک‌های آلی، رخداد زمین‌لرزه، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، نشست ناشی از بارگذاری بیش از حد روی زمین، نشست ناشی از استخراج آب در مناطق ژئوترمال، تغییر کاربری زمین و استخراج نفت اشاره کرد. همچنین مقدار فرونشست زمین توسط نوع خاک، هندسه (ضخامت) و خصوصیات خاک‌ها (سفتی و تراکم پذیری) و تاریخچه بارگذاری کنترل می‌شود. به دلیل تغییر اقلیم و کاهش بارندگی، رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز آبی، هجوم انسان به سفره‌های آب زیرزمینی برای رفع نیازهای آبی بیشتر شده است و برداشت آب زیرزمینی معمول‌ترین دلیل برای فرونشست است. استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی به علت افت سطح ایستابی و کاهش فشار سیال و در نتیجه افزایش فشار میان ذره‌ای شده که می‌تواند منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست زمین شود (۲۰، ۲۷ و ۳۴).

رویارویی با مخاطرات فرونشست بر مبنای تشخیص و پیش‌بینی آنها استوار است. روش‌هایی که برای پیمایش و اندازه‌گیری فرونشست سطح زمین استفاده می‌شود، شامل

ترازیابی دقیق و استفاده از گمانه، انبساط‌سنج (Extensometer)، شکاف‌سنج (Fissurometer)، تیلتر، انحراف‌سنج و سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) است. برداشت‌ها در این روش‌ها به صورت نقطه‌ای بوده و لذا برای یک منطقه به تعداد زیادی اندازه‌گیری نیاز است (۶).

امروزه تداخل‌سنجی راداری در پیچه مصنوعی InSAR و به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (D-InSAR) به‌عنوان یک ابزار سنجش از دور قوی برای پیمایش تغییرات زمانی جابه‌جایی قائم سطحی استفاده می‌شود. پوشش سراسری و قدرت تفکیکی مکانی خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول، این روش را به‌عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در اثر پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، فرونشست زمین، زمین‌لغزش و ... مطرح کرده است (۲، ۲۴ و ۳۳). این روش از دو یا تعداد بیشتری تصویر SAR و استفاده از تداخل در فاز موج برگشتی به ماهواره یا هواپیما برای تولید نقشه‌های تغییر شکل زمین یا مدل رقومی ارتفاعی استفاده می‌کند. این تکنیک به‌طور بالقوه می‌تواند تغییرات در شکل زمین را در حد میلی‌متر در سال اندازه بگیرد (۱۳، ۱۶ و ۳۶).

بیش از ۱۵۰ شهر در جهان وجود دارند که با مشکلات جدی فرونشست به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی مواجه هستند (۱۹). در سال‌های اخیر پدیده فرونشست در اغلب نواحی ایران به واسطه وقوع پدیده خشکسالی و در نتیجه بهره‌برداری فزاینده از منابع آب زیرزمینی رخ داده است. از جمله نواحی که رخداد این پدیده در آن مورد بررسی قرار گرفته می‌توان به دشت‌های رفسنجان، کرمان، زنگی آباد و زرد در استان کرمان (۲۶، ۳۱ و ۳۵)، اردکان و یزد در استان یزد (۱)، مشهد، نیشابور و سرخس در استان خراسان رضوی (۴، ۹، ۱۰ و ۲۵)، کبوترآهنگ در استان همدان (۳ و ۱۴)، سلماس در استان آذربایجان غربی (۳۰)، قرچک - ورامین، تهران - اسلام‌شهر و هشتگرد در استان تهران (۵، ۱۱ و ۳۲) و مهیار و دامنه در استان اصفهان (۸ و ۱۸) اشاره کرد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و گذرهای تصاویر راداری ASAR، PALSAR استفاده شده در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد

ASAR (DInSAR) داده‌های ماهواره‌ای راداری سنجنده‌های (برداشت شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹) و PALSAR (برداشت شده بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰) تعیین شده است. با بررسی و مقایسه داده‌های ترازیبی بین سال‌های ۶۳ تا ۸۳ و افت سطح آب زیرزمینی ایجاد شده بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳، تعیین میزان و گستره فرونشست زمین مورد اعتبارسنجی و ارزیابی قرار گرفته و دقت تصاویر ASAR و PALSAR در شناسایی فرونشست زمین ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی دشت نجف‌آباد در بین مدارهای ۳۲" و ۳۳" و ۵۰° تا ۵۰° و ۰۰' و ۴۰' و ۵۱° طول شرقی و بین مدارهای ۱۴" و ۱۹' و ۳۲° تا ۳۲" و ۰۰' و ۳۳° عرض شمالی واقع است (شکل ۱). محدوده مطالعاتی نجف‌آباد از شمال به محدوده مطالعاتی برخوار، از غرب و جنوب به محدوده مطالعاتی لنجان و از شرق به محدوده مطالعاتی مهیار شمالی و کوهپایه

آبخوان نجف‌آباد با وسعت ۱۷۲۰ کیلومتر مربع از حدود ۳۰ کیلومتری غرب اصفهان به طول حدود ۷۰ کیلومتر در جهت غرب و شمال غرب امتداد می‌یابد. این حوضه از شمال به حوضه‌های اصفهان-برخوار و علویجه-دهق، از شرق به حوضه کوهپایه-سگزی، از غرب به حوضه کرون و چادگان و از جنوب به حوضه لنجان و مهیار شمالی محدود شده است. رودخانه زاینده‌رود از ناحیه جنوب شرق دشت نجف‌آباد عبور می‌کند. این منطقه به دلیل موقعیت خاص از لحاظ کشاورزی در استان از پتانسیل بالایی برخوردار است و با وجود اجرای طرح‌های تأمین آب حوضه زاینده‌رود در این محدوده، سطح آب زیرزمینی به علت برداشت بی رویه از آبخوان آبرفتی توسط بیش از ۱۴۰۰۰ چاه بهره‌برداری به شدت افت کرده است. بنابراین پایش فرونشست حاصل از این افت و تعیین نرخ و دامنه فرونشست در مدیریت منابع آب زیرزمینی منطقه امری کاملاً ضروری است.

در این پژوهش نرخ فرونشست سطح زمین در آبخوان نجف‌آباد با استفاده از پردازش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی

سگزی محدود می‌شود. مهم‌ترین مناطق مسکونی واقع در این محدوده شامل شهرهای فلاورجان، درچه، قهدریجان، کلیشاد، فولادشهر، پیربکران، باغ ابریشم، و آب نیل هستند. عبور رودخانه زاینده‌رود در بخش جنوب شرقی منطقه و تأثیر آن بر سفره آب زیرزمینی موجب شده تا در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد بخش‌های با شرایط هیدروژئولوژی و هیدرولوژی بسیار متفاوتی به‌وجود آید. مرتفع‌ترین نقطه محدوده حدود ۲۸۴۱ متر از سطح دریاهاى آزاد ارتفاع دارد. پست‌ترین نقطه با ارتفاع حدود ۱۵۸۴ متر در سمت شمال شرق محدوده و در محل خروج رودخانه زاینده‌رود از محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است.

متوسط درازمدت بارش سالانه در ایستگاه دامنه به‌عنوان پرباران‌ترین ایستگاه به میزان ۳۴۹/۴ میلی‌متر و در ایستگاه مورچه خورت به مقدار ۱۱۵/۱ میلی‌متر به‌عنوان کم‌باران‌ترین ایستگاه منطقه است. میزان متوسط بارش سالانه در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد برابر ۱۸۵/۲ میلی‌متر برآورد می‌شود. میانگین بارش سالانه در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ به مقدار ۶۹/۶ میلی‌متر است که حداقل بارش و سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ به میزان ۲۸۰/۳ میلی‌متر به‌عنوان سال پر بارش طی ۳۴ سال گذشته محسوب می‌شوند.

حوضه آبریز دشت نجف‌آباد از دیدگاه زمین‌شناسی در بین ارتفاعات پهنه تکتونیکی سنندج- سیرجان محصور شده است. پهنه سنندج- سیرجان به‌عنوان قسمت حاشیه‌ای ایران مرکزی محسوب شده و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی، آذرین و رسوبی به سن پرکامبرین تا عهد حاضر است. این پهنه بیشتر از سنگ‌های دگرگونی دوران دوم تشکیل شده و سنگ‌های دوران سوم گسترش خیلی کمی در این پهنه دارد.

هیدروژئولوژی دشت نجف‌آباد

محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به وسعت ۱۷۵۴/۹ کیلومتر مربع در ناحیه میانی حوضه آبریز گاوخونی قرار دارد. این منطقه از حدود ۳۰ کیلومتری غرب اصفهان و به طول حدود ۷۰ کیلومتر در جهت غرب و شمال غرب امتداد می‌یابد و از

شمال به حوضه‌های اصفهان- برخوار و علویجه-دهق، از شرق به حوضه کوهپایه-سگزی، از غرب به حوضه کرون و چادگان و از جنوب به حوضه لنجانان و مهیار شمالی محدود شده است. آبخوان نجف‌آباد با مساحتی بالغ بر ۹۴۱ کیلومتر مربع از لحاظ زمین‌شناسی به‌صورت یک ناودیس با امتداد محور شمال غربی-جنوب شرقی است که توسط واریزه‌ها و رسوبات آبرفتی پر شده است. در ارتفاعات این محدوده مطالعاتی برخی سازندهای کربناته و غیرکربناته با وسعت ۷۲۲/۵ کیلومتر مربع آبخوان‌های سازند سخت ضعیفی را تشکیل داده‌اند که نقش اندکی در تغذیه آبخوان آبرفتی دشت دارد (۲۳). در حال حاضر ۵ دهنه چشمه با تخلیه سالانه ۰/۰۱ میلیون متر مکعب و ۱۱۵ رشته قنات با تخلیه سالانه ۲۱/۵۴ میلیون متر مکعب در سطح محدوده مطالعاتی وجود دارد که سهم ارتفاعات و پهنه‌های آبرفتی خارج از آبخوان آبرفتی از این آمار یک دهنه چشمه با تخلیه سالانه ۰/۰۱ میلیون متر مکعب و ۵۲ رشته قنات با تخلیه سالانه ۴/۴۵ میلیون متر مکعب است (۳۷). رودخانه زاینده‌رود از قسمت جنوبی وارد این محدوده مطالعاتی شده و از قسمت شمال شرقی خارج می‌شود. ضخامت رسوبات بر اساس اطلاعات چاه‌های حفاری شده به حدود ۲۰۰ متر می‌رسد و از حاشیه‌ها به سمت مرکز آبخوان افزوده می‌شود. از شهر نجف‌آباد به طرف غرب تا محدوده ملک‌آباد و جلال‌آباد ضخامت آبرفت نسبتاً کم (حدود ۵۰ متر) است و رسوبات ریزدانه با درصد رس زیاد گسترش دارند. به‌طور کلی گسترش رسوبات ریزدانه در نواحی جنوب شرق آبخوان نجف‌آباد بیشتر است و نهشته‌های با دانه‌بندی درشت در سایر نواحی بیشتر گسترش دارند. سنگ کف آبخوان متشکل از شیست و شیل‌های خاکستری و آهک‌های نازک لایه مارنی دوره کرتاسه است. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی آبخوان از شمال غرب و جنوب به سمت میانه دشت و از سمت رودخانه به سمت طرفین در حاشیه رودخانه است (۲۳). طبق مطالعات بیلان آب زیرزمینی، نرخ متوسط کاهش حجم ذخیره آبخوان نجف‌آباد ۱۳۸/۳۰ میلیون متر مکعب در

است. همچنین تعداد و جزئیات داده‌های مورد استفاده در جدول ۱ بیان شده است. علاوه بر این از DEM سنجنده ALOS با دقت ارتفاعی حداکثر ۱۲/۵ متر برای انجام پردازش‌های تداخل‌سنجی و تهیه نقشه Hillshade به‌عنوان زمینه نقشه‌های خروجی تولید شده استفاده شد. تصاویر سنجش از دور اپتیکی سنجنده ETM⁺ 2002 ماهواره لندست ۷ و OLI ماهواره لندست ۸ به‌منظور استخراج کاربری اراضی، داده‌های مربوط به چاه‌های پیژومتری و داده‌های مربوط به شبکه پیمایش ترازیبی دقیق در بازه‌های زمانی مورد پژوهش نیز مورد استفاده واقع شده‌اند. همچنین در این تحقیق از نرم‌افزارهای Arc GIS 10.5, ENVI 5.3, SURFER16 و SARscape 5.2 برای انجام روش تداخل‌سنجی تفاضلی، مدیریت و نمایش اطلاعات مکانی استفاده شده است.

روش تحقیق

مراحل روش تحقیق در دو بخش اصلی انجام شده است. ابتدا تکنیک پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی تصاویر ماهواره‌ای راداری به‌منظور تعیین نرخ، میزان و تهیه نقشه فرونشست اجرا و سپس اعتبارسنجی، مقایسه و تطبیق نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مکانی ترازیبی، افت سطح آب زیرزمینی و کاربری اراضی دشت صورت گرفته است.

تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با دهانه ترکیبی (DInSAR)

فن تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) با برخورداری از پوشش زمینی وسیع، مکرر و پیوسته و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین (در مقیاس میلی‌متر) و کم هزینه‌ترین فنون سنجش از دور برای شناسایی و نمایش جابه‌جایی‌های به‌وجود آمده در سطح زمین است. ساده‌ترین تکنیک در این زمینه به‌صورت تداخل‌نگاری با استفاده از گرفتن حداقل دو تصویر از سنجنده‌های راداری با روزه مصنوعی است (۲۹). مقدار عددی هر پیکسل در تصویر

سال است و رودخانه زاینده‌رود در مسیر گذر از دشت نجف‌آباد به دلیل افت شدید سطح آب زیرزمینی، تغذیه‌کننده آبخوان بوده است و میزان نشت از رودخانه معادل ۱۸۹/۲ میلیون متر مکعب است (۳۷). مخروط‌های افت وسیع در سطح آب زیرزمینی در اطراف شهرهای کوشک، قهدریجان، شمال شرق فولادشهر و جنوب شرق بهاران در اثر حفاری چاه‌های عمیق و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی ایجاد شده و تغذیه آبخوان توسط رودخانه زاینده‌رود در تمامی مسیر جریان رودخانه در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد مشاهده می‌شود. همچنین شوری متوسط آب زیرزمینی محدوده نیز در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی، افزایش نشان داده است. این افت شدید سطح آب زیرزمینی مستقل از بارش بوده و تنها در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی رخ داده است و همچنین به دلیل شکل‌پذیری سنگ کف آبخوان نمی‌تواند در اثر فرار از سنگ کف باشد. به‌طور کلی ذخیره آب زیرزمینی حوضه کفاف تأمین مصارف مختلف را نداشته و ذخیره آبخوان به آب برگشتی کشاورزی و تغذیه منابع آب سطحی وارد شده از خارج محدوده حوضه یعنی رودخانه زاینده‌رود و شبکه آبیاری نکوآباد وابسته است به‌طوری که حدود ۱۹۰ میلیون متر مکعب از تغذیه آبخوان از طریق آب‌های سطحی جاری در منطقه تأمین می‌شود (۲۳).

داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق از تعداد ۲۳ تصویر راداری سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT سازمان فضایی اروپا (ESA) از تاریخ ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱، باند C، بسامد ۵/۳۳۱ گیگاهرتز، قطبیت HH و مدار نزولی و همچنین تعداد ۱۲ تصویر راداری سنجنده PALSAR ماهواره ALOS سازمان فضایی اروپا از تاریخ ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ با باند L، بسامد ۱/۲۷ گیگاهرتز، قطبیت HH و مدار صعودی همگی در فرمت اولیه SLC به‌عنوان داده‌های اصلی پردازش استفاده شده است. گذر و عبور تصاویر راداری مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده

جدول ۱. اطلاعات داده‌های SAR مورد استفاده

ALOS PALSAR	ENVISAT ASAR	سنجنده
L	C	باند
۲۳/۶	۵/۶	طول موج (سانتی‌متر)
-۱۰/۲۷۴۰۴۰۰	-۱۱/۹۳۲۶۵۵۵	سمت (درجه)
۳۸/۷۲۳۶	۲۲/۷۹۹۸	زاویه فرود (درجه)
HH	VV	قطبش
صعودی	نزولی	حرکت مداری
۱۰	۳۰	دقت مکانی (متر)
۱۲	۲۳	تعداد تصویر
۱ ژانویه ۲۰۰۶ - ۲۲ ژانویه ۲۰۱۰	۱ آوریل ۲۰۰۳ - ۱۷ آگوست ۲۰۱۰	دوره زمانی داده‌ها

ترکیبی (DInSAR) روی تصاویر سنجنده‌های ASAR و PALSAR به منظور تعیین نرخ و میزان فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان در قالب ۶ مرحله ذیل انجام شده است.

انتخاب زوج تصاویر

پیش‌پردازش راداری مربوط به هر سنجنده از لحاظ خط مبنای مکانی و زمانی به صورت مستقل به صورت دو به دو انجام گرفت و انتخاب زوج مناسب تصویر مطابق با خط مبنای مکانی و زمانی قابل قبول انجام شد. از نظر تئوریک خط مبنای عمودی کمتر از بحرانی (در حالت ایده آل کمتر از ۱/۳) و خط مبنای زمانی کمتر از یک سال بایستی در نظر گرفته شود. بنابراین انتخاب تصاویر SAR مناسب برای ایجاد تداخل‌نگار بر این اساس انجام شده است. این یک مرحله کلیدی است، زیرا معیارهایی که برای انتخاب تصاویر اتخاذ می‌شود، تأثیر زیادی بر کیفیت نتایج پایانی دارد. همچنین معیارهای انتخاب تصاویر SAR مناسب، تابع زاویه دید (عبور بالارونده و پایین رونده)، زمان کسب داده‌ها، هم‌دوستی و شرایط هواشناسی نیز است. در نظر گرفتن این معیارها منوط به این است که کدام یک از کاربردهای ویژه تصاویر SAR مورد نیاز است (۱۵). معمولاً پارامترهای مربوط به همپوشانی مکانی به صورت همپوشانی

(Single Look Complex) SLC از یک عدد مختلط شامل دامنه و فاز تشکیل یافته است. این فاز به صورت مطلق معلوم نیست ولی بر مبنای مقدار 2π اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف فاز دریافتی از بازتاب‌های ناشی از دو مدار نزدیک به آهستگی تغییر می‌کنند. این اختلاف فاز محاسبه شده برای هر پیکسل، همان تداخل‌نگار است. به عبارت دیگر مقدار تغییرات مربوط به فاصله عارضه تا سنجنده راداری در تداخل‌نگار موجود است. این تغییرات مربوط به خطای مداری ماهواره $(\Delta\phi G)$ ، اثر توپوگرافی $(\Delta\phi T)$ ، اثرات اتمسفری $(\Delta\phi Atm)$ و جابه‌جایی عارضه $(\Delta\phi D)$ است. برای استخراج میزان تغییرات سطح $(\Delta\phi D)$ می‌بایست تمام اثرات دیگر از تداخل‌نگار حذف شود (۱۲).

$$\phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi G + \Delta\phi T + \Delta\phi Atm + \Delta\phi D + \Delta\phi noise \quad (1)$$

ساده‌ترین روش به منظور مقابله با مؤلفه توپوگرافی استفاده از تصاویری است که دارای حداقل خط مبنای عمودی است و به این ترتیب، قسمت اعظم تأثیر توپوگرافی در ایجاد اختلاف فاز از بین می‌رود. به منظور بهبود نتایج می‌توان از یک مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده کرد تا بدین ترتیب باقی‌مانده اثر توپوگرافی را نیز از تصاویر تداخل‌نگار ایجاد شده، حذف کرد. در این پژوهش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با دهانه

ایجاد تصویر همدوسی و اعمال فیلتر

جابه‌جایی (تغییر) طیفی و فیلتر پهنای باند عمودی داپلر در طول فرایند تولید تداخل‌نگار انجام می‌شود. تغییر طیفی با توجه به دامنه تغییر طیفی ناشی از متغیر زاویه دید SAR روی اهداف پراکنده مورد نیاز است. همچنین فیلترگذاری پهنای باند داپلر نیز به منظور جبران کردن طیف آزیموتی جابه‌جا شده برای داپلرهای مختلف مورد احتیاج است. فیلتر آزیموتی اعمال شده در طول فرایند تولید تداخل‌نگار قادر به ضبط کامل صحنه‌های با هم‌دوسی بالقوه است. فیلتر کردن تداخل‌نگار مسطح تولید شده در مرحله قبل باعث می‌شود تا یک خروجی با فاز نویز کاهش یافته به عنوان تداخل‌نگار فیلتر شده تولید شود. همچنین در این مرحله نقشه همدوسی تداخل‌سنجی که نشان‌دهنده کیفیت فاز است و تصویر پایه فیلتر شده نیز تولید می‌شوند. در این پژوهش فیلترهای راداری مناسب نظیر فیلترهای تطابقی، باکس کار و گلداشتاین مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس خط مبنای زمانی طولانی بین دو داده مورد استفاده از فیلتر گلداشتاین به منظور پاکسازی تداخل‌نگارهای تفاضلی حاصل استفاده شده است. بر اساس این روش متغیر پهنای باند فیلتر به طور مستقیم از توان طیفی فرینج‌ها مشتق می‌شود. به منظور بهینه‌سازی عملکرد فیلتر، پارامتر آلفا که مشخصه قدرت فیلتر است در یک روش تطبیقی بر اساس همدوسی محلی به کار برده می‌شود. به عبارت دیگر همدوسی پایین‌تر باعث به کار بردن فیلتر قوی‌تر می‌شود. این روش فیلترگذاری که تعمیمی از روش گلداشتاین است، به طور قابل توجهی قابلیت دید فرینج‌ها را بهبود می‌بخشد و نویز حاصل از ناهمبستگی مربوط به زمان و خط مبنا را کاهش می‌دهد. در انجام این روش پارامتر آلفا وابسته به همدوسی است: بدین صورت که مناطق ناهمدوس بیشتر از مناطق همدوس فیلتر می‌شوند. این بدین معنی است که از دست دادن یک سیگنال به حداقل می‌رسد، در حالی که سطح نویز نیز به شدت کاهش می‌یابد. همبستگی یا همدوسی تداخل‌نگار (۷) نسبت بین مجموع همدوسی و ناهمدوسی است:

حداقل ۵۰ درصد و همپوشانی طیفی حداقل ۹۰ درصد در راستای آزیموتال در نظر گرفته می‌شوند (۷).

تولید تداخل‌نگار

اختلاف فاصله بین یک نقطه روی زمین و موقعیت سنجنده در دو موقعیت تصویربرداری می‌تواند با استفاده از اختلاف فاز (φ) بین دو تصویر مختلط بازیابی شده SAR اندازه‌گیری شود. به عبارت دیگر این اختلاف فاز، از حاصل ضرب یک تصویر در تصویر دیگر تداخل‌نگار بدست می‌آید. فاز تداخل‌سنجی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Phase = \text{Atan} [\text{Imag}(I) / \text{Real}(I)] \quad (2)$$

در اینجا $\text{Imag}(I)$ و $\text{Real}(I)$ به ترتیب بخش‌های مجازی و واقعی تداخل‌نگار هستند. به عبارت دیگر پس از همخوانی دو تصویر، فاز حاصل از دو تصویر SLC نسبت به یکدیگر تفاضل یافته و در نتیجه تداخل‌نگار تولید می‌شود. این تفاضل فازی با ضرب مختلط (Complex Conjugate) دو تصویر حاصل می‌شود. خروجی نهایی این مرحله تداخل‌نگار مسطح است که فاز ثابت (با توجه به هندسه تصویربرداری) و فاز توپوگرافی (اگر فایل DEM به عنوان ورودی ارائه شده باشد) حذف شده‌اند. در این تحقیق جفت‌های تداخل‌نگار تصاویر راداری برای سنجنده ASAR بین ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و برای PALSAR بین ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ در زمان‌های مختلف تهیه شد.

ثبت دو تصویر نسبت به همدیگر

در حالت کلی برای تولید تداخل‌نگار، دو تصویر SLC بایستی با دقت بسیار زیادی نسبت به هم در هر دو مؤلفه‌های فاز و دامنه ثابت هم مرجع (Coregister) شوند. ثبت دو تصویر بایستی با دقتی در حدود ۱/۱۰۰ بعد پیکسل انجام گیرد. روش‌های هم‌مرجع سازی شامل همبستگی تقاطعی (Cross Correlation) مقادیر دامنه برای پیکسل‌ها، مقدار ماکزیمم برای وابستگی (۲۸)، مقدار ماکزیمم سیگنال به نویز (SNR) در طیف حاشیه (۱۷) و مینیمم‌سازی تغییرات میانگین در تغییرات تفاضلات فازی (۲۱) هستند.

یک‌سری از الگوریتم‌های خودکار تعیین شود. قابل ذکر است که الگوریتم‌های متنوعی در این باره مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۲). در این تحقیق از مدل رقومی ارتفاعی سنجنده ALOS با دقت ۱۲/۵ متر برای تعدیل تأثیرات توپوگرافی استفاده شد.

تبدیل فاز به جابه‌جایی و ژئوکدینگ

در این مرحله مقادیر مطلق فاز اصلاح و کالیبره شده به جابه‌جایی تبدیل شده و به‌طور مستقیم ژئوکد می‌شود. ژئوکدینگ در این مرحله مشابه با روش ژئوکدینگ معمولی است که با توجه به روش دامنه- داپلر (Range-Doppler) و تبدیل مختصات با استفاده از روش‌های کارتوگرافی انجام می‌شود. اختلاف اساسی با ژئوکدینگ معمولی این است که معادلات دامنه- داپلر به‌صورت همزمان در هر دو آنتن اعمال می‌شود و نه تنها به‌دست آوردن جابه‌جایی هر پیکسل را ممکن می‌سازد بلکه مکان آنها (مختصات شرقی و شمالی) را نیز در یک سیستم مرجع داده شده به‌دست می‌دهد. علاوه بر این نقشه همدوسی نیز به‌عنوان خروجی این مرحله ژئوکد می‌شود.

هر چرخه 2π (فرینج تداخل‌سنجی) از فاز تفاضلی مربوط به نصف طول موج جابه‌جایی در امتداد جهت برد مایل (Slant Range Direction) (جهت دید سنجنده SAR) است. ممکن است به‌منظور تعیین هر بردار که در آن جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در جهت برد مایل، مؤلفه تغییر شکل در جهت دید ماهواره، تصویر شود. از این‌رو این بردار مؤلفه تغییر شکل در جهت برد مایل که مجدد در یک جهت روی زمین تصویر شده است (که توسط کاربر مشخص شده است) را نشان می‌دهد (جابه‌جایی عمودی در مورد فرونشست؛ جابه‌جایی در جهت شیب در مورد زمین‌لغزش، جابه‌جایی در جهت دلخواه در دیگر موارد مطرح است). در نهایت نقشه خروجی مقدار جابه‌جایی را در واحد متر نشان می‌دهد. در حالت جابه‌جایی در جهت برد مایل، اگر حرکات به‌صورت کاهش یا افزایش فاصله در جهت برد مایل سنجنده تا هدف باشد، به‌ترتیب علامت عدد نهایی مثبت یا منفی (تصویر پیرو یا فرعی نسبت به تصویر پایه یا اصلی) خواهد شد.

$$\gamma = \frac{|\sum s_1(x) \cdot s_2(x)^*|}{\sqrt{\sum |s_1(x)|^2 \cdot \sum |s_2(x)|^2}} \quad (3)$$

مقادیر S_1 و S_2 به‌ترتیب مقادیر مختلط مربوط به تصاویر SAR در فرم SLC و γ همبستگی بین دو تصویر در نمونه‌های معین است.

با افزایش ارتفاع عوارض، اختلاف فاز نیز به‌تبع آن افزایش می‌یابد. از آنجا که تغییرات فاز تناوبی تابعی از مقدار 2π است، با افزایش تفاضلات از این مقدار به‌صورت خودکار به 2π محدود می‌شوند. در نتیجه فاز حاصل از تداخل‌سنجی بایستی به‌کمک تکنیک‌های خاص به‌منظور رفع پیچیدگی و عبور از مقادیر 2π مجدد اصلاح شود.

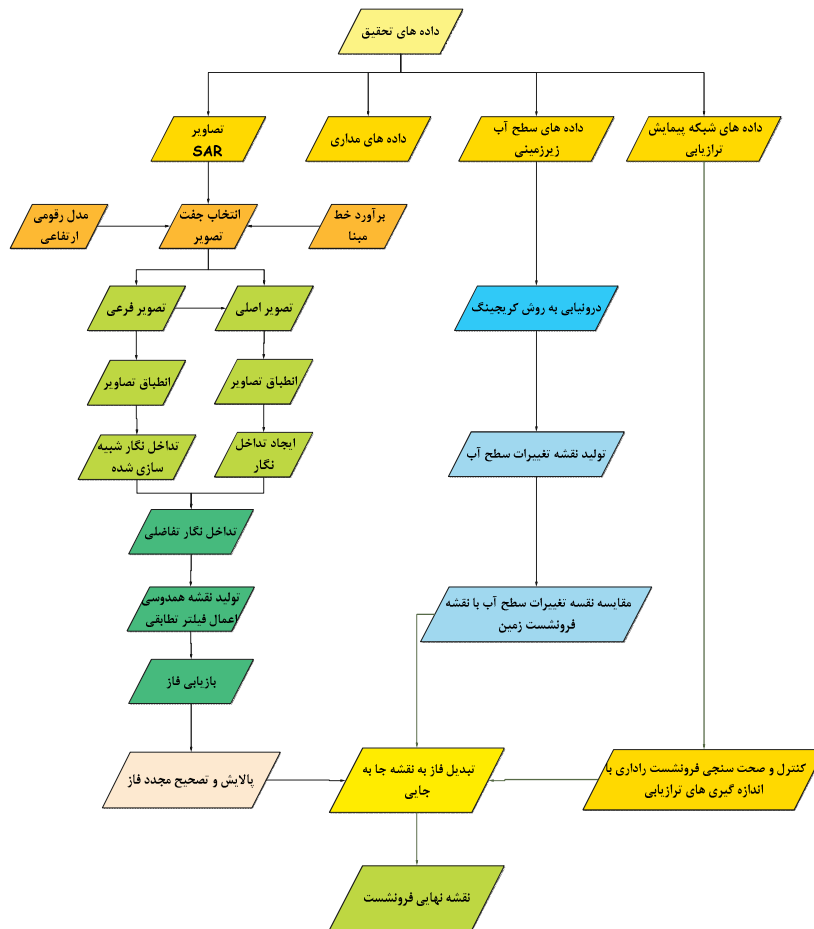
پالایش و تصحیح فاز

این مرحله برای یک تبدیل صحیح اطلاعات فاز اصلاح شده به ارتفاع یا مقادیر جابه‌جایی بسیار مهم است. در واقع این مرحله اجازه می‌دهد که مدار اصلاح و به‌عبارتی اشتباهات ممکن تصحیح شوند و انحراف فاز محاسبه (گرفتن مقادیر فاز مطلق) یا رمپ‌های ممکن فاز حذف شوند. اجرای این مرحله به‌منظور تولید مدل رقومی ارتفاع و همچنین برای ساخت نقشه جابه‌جایی ضروری است. همچنین باید توجه داشت که برای اجرای این مرحله فایل مربوط به نقاط کنترل زمینی از قبل باید ایجاد شود.

درواقع بعد از اصلاح کردن فاز، بایستی تعداد ضرایب از 2π برای افزودن به مقدار فاز حاصل تعیین و مقدار فاز مطلق محاسبه شود. این مرحله به کالیبره کردن فاز نیز معروف است. مقدار مطلق فاز در هر نقطه می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$\varphi_{abc} = \varphi_{up} + \varphi_{offset} \quad (4)$$

یک روش ساده برای تعیین φ_{offset} ، پیدا کردن نقطه‌ای در روی تداخل‌نگار است به‌صورتی که اطلاعات مربوط به موقعیت و ارتفاع آن معلوم باشد. با استفاده از این اطلاعات، مقدار عدد صحیح مربوط به تعداد سیکل‌های فازی برای کل تداخل‌نگار محاسبه می‌شود. این مقدار می‌تواند به‌صورت مستقیم از روی داده بدون داشتن اطلاع قبل از سطح مورد بررسی و تنها با



شکل ۲. نمودار روش تحقیق در قالب یک مدل مفهومی

نقشه‌های هم‌افت سطح زمین (فرونشست) در بازه‌های زمانی مورد مطالعه تهیه شده و نواحی بحرانی مشخص و به‌صورت نقشه ارائه شده و نتایج به‌دست آمده به‌همراه بازدیدهای میدانی کنترل و بررسی شد.

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی نقشه‌های فرونشست زمین

نقشه‌های هم‌افت سطح آب زیرزمینی، نقشه‌های تراز و جهت حرکت آب‌های زیرزمینی با استفاده از اطلاعات ۴۶ حلقه چاه مشاهده‌ای موجود در دشت نجف‌آباد تهیه شده و با نتایج فرونشست به‌دست آمده از داده‌های راداری مطابقت و مقایسه شد. همچنین نقشه‌ها و نتایج داده‌های مکانی فرونشست زمین با استفاده از پردازش تصاویر راداری (روش تداخل‌سنجی تفاضلی) با اندازه‌گیری‌های شبکه پیمایش

همچنین فایل با عنوان Precision نیز به‌عنوان خروجی در این مرحله تولید می‌شود که از پارامترهایی از قبیل همدوسی و طول موج مشتق شده و در واقع برآوردی از دقت اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته را فراهم می‌کند که بر اساس آن مقادیر بالای این پارامتر بیانگر دقت پایین اندازه‌گیری‌ها است. فرمول مورد استفاده برای محاسبه دقت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{2\gamma^2}} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \quad (5)$$

γ بیانگر همدوسی تداخل‌سنجی است. در نمودار گردشی شکل ۲ کلیه مراحل انجام تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی آورده شده است. در نهایت جفت‌های انتخابی در بازه‌های زمانی مورد پژوهش از فاز به نقشه فرونشست تبدیل می‌شود. بر این اساس

ترازیابی سازمان نقشه برداری مطابقت، کنترل و صحت‌سنجی شد. در نهایت همبستگی و ارتباط بین نقشه‌های فرونشست با داده‌هایی همچون، سطح و تراز آب زیرزمینی، افت سطح آب زیرزمینی و نوع کاربری زمین و نیز پیمایش ترازیابی صورت گرفته توسط سازمان نقشه‌برداری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

انتخاب زوج تصاویر SAR برای تداخل‌سنجی

زوج تصاویر مورد نظر با توجه به خط مبنای زمانی و مکانی و آستانه بحرانی این مقادیر در هر یک از مجموعه داده ASAR و PALSAR با استفاده از ابزار Baseline Estimation در افزونه SARscape انتخاب شده‌اند. از بین ۴۵ جفت تصویر تداخل‌سنجی ASAR و ۳۱ جفت تصویر PALSAR تشکیل شده، ۱۱ و ۱۰ جفت تصویر به ترتیب مربوط به سنجنده‌های ASAR و PALSAR برای ادامه پردازش‌ها مناسب تشخیص داده شد (جدول‌های ۲ و ۳). ویژگی‌های جفت تصاویر در فرم SLC منتخب سنجنده‌های ASAR و PALSAR به‌منظور تداخل‌سنجی تفاضلی در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. جفت‌هایی که دارای خط مبنای مکانی و زمانی کمتری باشند (مانند جفت‌های An1، An5، و Pn5) دارای متوسط هم‌دوسی بالاتری بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری جابه‌جایی قائم با استفاده از آنها دقیق‌تر خواهد بود.

با استفاده از نرم‌افزار ENVI و افزونه SARscape و طبق روش DInSAR اقدام به تولید تداخل‌نگار برای هر یک از جفت تصاویر انتخابی شد. پارامترهای مربوط به فیلتر از قبیل اندازه پنجره و پارامتر آلفا با توجه به مقادیر آماری (مقادیر کمترین، بیشترین و میانگین) از فایل هم‌دوسی محاسبه و منظور شد. نتیجه اعمال فیلتر، تولید تداخل‌نگار تفاضلی فیلتر شده و همچنین تصویر هم‌دوس است. با توجه به نقشه‌های جابه‌جایی به دست آمده از مجموعه تصاویر ASAR در محدوده دشت نجف‌آباد بیشترین جابه‌جایی‌های

رخ داده مربوط به شهرهای کوشک، قهدریجان، گلدشت و در نهایت فلاورجان و حوالی این مناطق است. همچنین این جابه‌جایی‌ها در دوره‌های مختلف با توجه به جفت تصویر انتخاب شده متفاوت بوده است. از این‌رو بیشترین مقدار جابه‌جایی رخ داده مربوط به جفت تصویر شماره An9 در تاریخ ۲۰۰۷/۱۱/۰۶ و ۲۰۰۹/۱۰/۰۶ و در محدوده بین شهرهای قهدریجان و فلاورجان در دشت نجف‌آباد و به میزان ۱۸- سانتی‌متر در طول یک دوره ۷۰۰ روزه با خط مبنای نرمال ۳۰۹/۴۳۷ متر است (جدول ۲). باید توجه داشت که یکی از دلایل افزایش جابه‌جایی در این دوره بالا بودن مقدار خط مبنای زمانی و یا به عبارتی فاصله زمانی بین دو تصویر اخذ شده در این جفت تصویر است. آنچه که مسلم است با افزایش فاصله زمانی میزان جابه‌جایی به دست آمده در طول زمان نیز افزایش خواهد یافت. البته این افزایش در خط مبنای زمانی موجب کاهش هم‌دوسی نیز خواهد شد.

با توجه به جدول ۲ بیشترین فاصله زمانی بین دو جفت انتخابی مربوط به جفت تصویر شماره An8 و به میزان ۱۰۵۰ روز است و از این لحاظ جفت تصویر An9 که دارای بیشترین میزان جابه‌جایی است در رتبه دوم قرار دارد. قابل توجه هست که میزان جابه‌جایی در جفت تصویر شماره An8 نیز ۲۴- سانتی‌متر و از لحاظ بیشترین جابه‌جایی در رتبه دوم قرار دارد. بنابراین هرچه فاصله زمانی بین اخذ دو تصویر یک جفت بیشتر باشد میزان جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد. نکته دیگری که باید در نظر داشت این است که مقدار خط مبنای نرمال در جفت تصویر شماره An8 و An9 به ترتیب برابر ۱۳/۷۴۴ و ۳۰۹/۴۳۷ متر است. بنابراین خط مبنای نرمال کوتاه‌تر سهم به‌سزایی در به‌دست آوردن نتایج نزدیک به واقعیت دارد. هرچند تفاوت جابه‌جایی به دست آمده در این دو جفت یک سانتی‌متر است ولی اختلاف بین خط مبنای زمانی آنها نزدیک به یک سال (۳۵۰ روز) است. با توجه به جدول ۲ مقادیر بالای جابه‌جایی به دست آمده ناشی از خط مبنای زمانی و مکانی بلند و میزان هم‌دوسی پایین است. همچنین کمترین میزان فرونشست رخ

جدول ۲. زوج تصاویر انتخابی از سنجنده ASAR

نام (شماره اختصاصی)	تاریخ تصویر اصلی	تاریخ تصویر فرعی	خط مبنای نرمال به متر	خط مبنای بحرانی به متر	خط مبنای زمانی (روز)	مقادیر متوسط همدوسی	بیشترین میزان فرونشست در محدوده به سانتی‌متر	بیشترین میزان فرونشست در گذر کامل به سانتی‌متر
A _{n1}	۲۰۰۳/۰۴/۰۱	۲۰۰۳/۰۸/۱۹	-۸۳/۴۷۴	۹۳۱/۲۹۱	۱۴۰	۰/۵۱۱	-۶	-۱۱
A _{n2}	۲۰۰۴/۰۳/۱۶	۲۰۰۴/۰۹/۰۷	۹۸/۰۵۲	۹۳۱/۵۶۸	۱۷۵	۰/۴۶۱	-۵,۵	-۱۴
A _{n3}	۲۰۰۴/۰۲/۱۰	۲۰۰۴/۱۲/۲۱	۱۳۴/۱۲۹	۹۳۱/۵۳۶	۳۱۵	۰/۴۴۶	-۹	-۱۳
A _{n4}	۲۰۰۳/۰۴/۰۱	۲۰۰۵/۰۴/۰۵	-۳۶/۳۱۰	۹۳۱/۲۹۱	۷۳۵	۰/۳۷۹	-۱۱	-۱۸
A _{n5}	۲۰۰۵/۰۳/۰۱	۲۰۰۵/۰۶/۱۴	-۱۲/۶۷۰	۹۳۱/۹۷۶	۱۰۵	۰/۵۵۹	-۳,۵	-۸,۵
A _{n6}	۲۰۰۵/۰۴/۰۵	۲۰۰۶/۰۲/۱۴	۳۹/۰۷۲	۹۳۱/۸۹۹	۳۱۵	۰/۴۶۳	-۵,۵	-۹
A _{n7}	۲۰۰۵/۰۶/۱۴	۲۰۰۵/۰۹/۲۷	۵۸/۵۷۷	۹۳۱/۹۵۵	۱۰۵	۰/۶۵۷	-۳,۵	-۷,۵
A _{n8}	۲۰۰۳/۰۴/۰۱	۲۰۰۶/۰۲/۱۴	۱۳/۷۴۴	۹۳۱/۲۹۱	۱۰۵۰	۰/۳۳۴	-۱۲,۵	-۲۴
A _{n9}	۲۰۰۷/۱۱/۰۶	۲۰۰۹/۱۰/۰۶	۳۰۹/۴۳۷	۹۳۱/۵۷۸	۷۰۰	۰/۳۷۰	-۱۸	-۲۴
A _{n10}	۲۰۰۷/۱۱/۰۶	۲۰۱۰/۰۳/۳۰	۱۵۸/۷۲۶	۹۳۱/۵۷۸	۸۷۵	۰/۳۵۰	۱۳	-۲۰
A _{n11}	۲۰۰۹/۱۰/۰۶	۲۰۱۰/۰۸/۱۷	۱۱۷/۵۳۲	۹۳۱/۱۳۶	۳۱۵	۰/۴۸۹	-۶	-۹

جدول ۳. زوج تصاویر انتخابی از سنجنده PALSAR

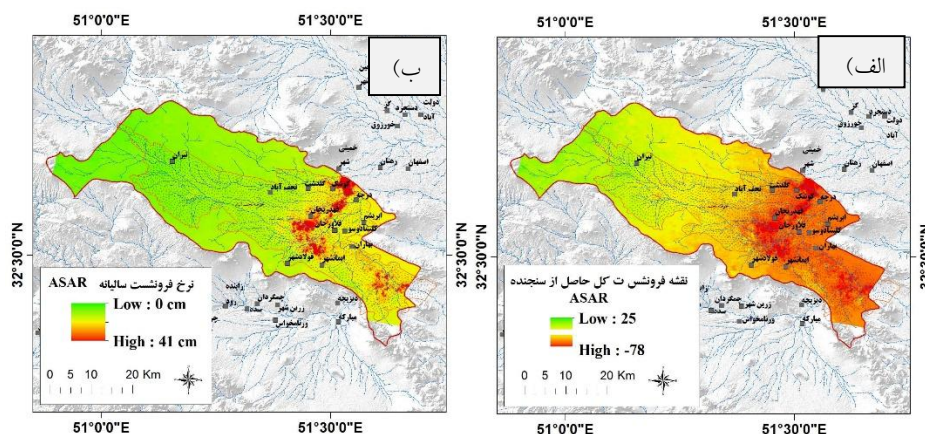
نام	تاریخ تصویر اصلی	تاریخ تصویر فرعی	خط مبنای نرمال به متر	خط مبنای بحرانی به متر	خط مبنای زمانی (روز)	مقادیر متوسط همدوسی	بیشترین میزان فرونشست در محدوده به سانتی‌متر
P _{n1}	۲۰۰۶/۱۲/۱۱	۲۰۰۷/۱۲/۱۴	۹۸۱/۹۲۴	۱۳۰۶۶/۸۹۷	۱۶۸	۰/۳۰۷	-۱۱
P _{n2}	۲۰۰۷/۱۲/۱۴	۲۰۰۸/۰۳/۱۵	۴۶۴/۳۹۱	۱۳۰۷۰/۶۲۶	۹۲	۰/۴۷۲	-۶,۵
P _{n3}	۲۰۰۸/۰۳/۱۵	۲۰۰۸/۰۴/۳۰	۷۳۵/۳۸۹	۹۸۰۲/۰۰۵	۴۶	۰/۳۸۴	-۴
P _{n4}	۲۰۰۸/۰۹/۱۵	۲۰۰۸/۱۲/۱۶	۴۷۳/۰۸۱	۹۷۹۰/۰۵۱	۹۲	۰/۴۴۹	-۵
P _{n5}	۲۰۰۹/۰۶/۱۸	۲۰۰۹/۰۹/۱۸	۱۰۲/۶۱۹	۶۵۳۲/۳۹۹	۹۲	۰/۵۵۸	-۹
P _{n6}	۲۰۰۹/۰۹/۱۸	۲۰۰۹/۱۱/۰۳	۴۷۴/۹۱۲	۹۷۹۱/۰۸۰	۴۶	۰/۴۲۴	-۵
P _{n7}	۲۰۱۰/۰۲/۰۳	۲۰۱۰/۰۳/۲۱	۳۵۳/۵۵۲	۱۳۰۷۶/۹۲۵	۴۶	۰/۴۰۱	-۵
P _{n8}	۲۰۱۰/۰۳/۲۱	۲۰۱۰/۰۵/۰۶	۱۰۸/۴۲۵	۹۸۰۲/۸۷۱	۴۶	۰/۴۵۰	-۴
P _{n9}	۲۰۱۰/۰۵/۰۶	۲۰۱۰/۱۱/۰۶	۵۹۵/۸۶۷	۶۵۲۷/۶۶۲	۱۸۴	۰/۴۵۴	-۱۰
P _{n10}	۲۰۱۰/۱۱/۰۶	۲۰۱۰/۱۲/۲۲	۶۵۱/۱۸۸	۹۷۹۲/۳۴۰	۴۶	۰/۴۹۳	-۲

دوره ۶ ساله است. همچنین نقشه سالیانه به‌دست آمده نیز بیانگر میزان فرونشست به اندازه ۶۷- میلی‌متر در سال است.

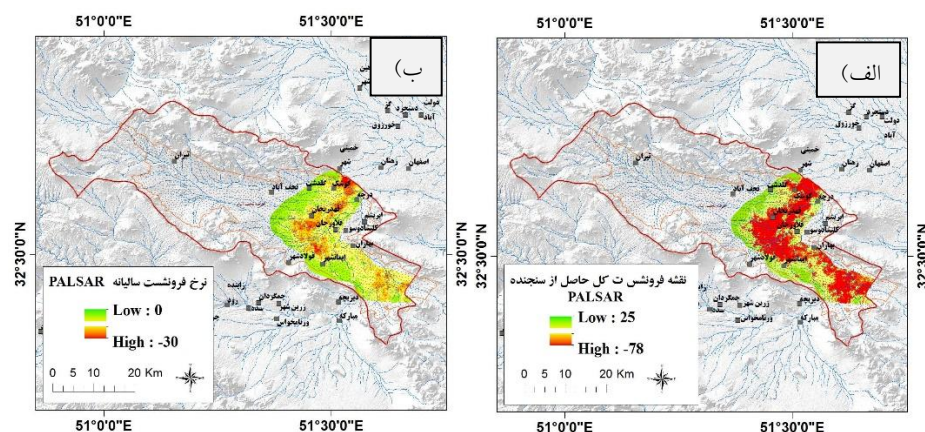
طبق نقشه‌های نرخ فرونشست حاصل از زوج تصاویر سنجنده PALSAR در مناطق بین شهرهای کوشک، قهدریجان، شهر ابریشم و فلاورجان یک طوقه فرونشست با مقدار حداکثر ۶/۵- سانتی‌متر مشاهده می‌شود (جدول ۳). این فرونشست بین تاریخ ۲۰۰۷/۱۲/۱۴ تا ۲۰۰۸/۳/۱۵ (جفت تصویر P_{n2}) حادث

داده مربوط به جفت تصاویر A_{n5} و A_{n7} و به‌میزان مشترک ۳/۵- سانتی‌متر است.

با استفاده از مجموع داده‌های ASAR اقدام به تهیه نقشه فرونشست کل برحسب سانتی‌متر (شکل ۳- الف) و نقشه فرونشست سالیانه برحسب میلی‌متر (شکل ۳- ب) در کل دوره مورد مطالعه (۲۰۰۳-۲۰۱۰) شد. نقشه مجموع به‌دست آمده نشان‌دهنده یک فرونشست کلی به‌میزان ۴۱- سانتی‌متر در یک



شکل ۳. الف) نقشه فرونشست کل حاصل از سنجنده ASAR و ب) نقشه نرخ فرونشست سالیانه حاصل از سنجنده ASAR



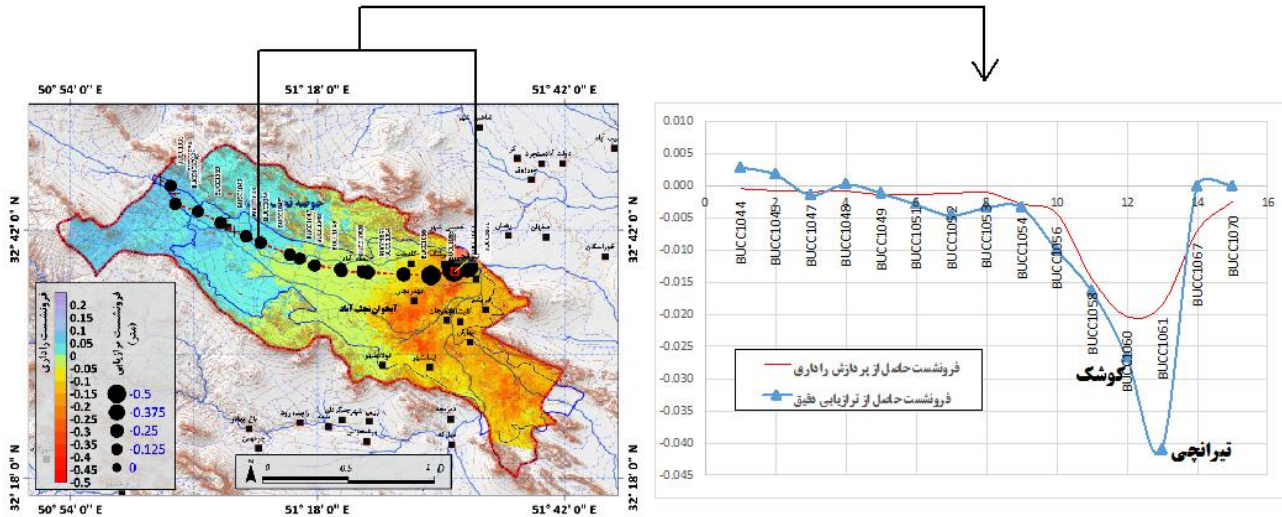
شکل ۴. الف) نقشه نرخ فرونشست سالیانه حاصل از سنجنده PALSAR و ب) نقشه فرونشست کل حاصل از سنجنده PALSAR

خط مبنای زمانی نیز در رتبه دوم بالاترین خط مبنای زمانی و به میزان ۱۶۸ روز است. کمترین میزان جابه‌جایی رخ داده مربوط به جفت تصویر شماره P_{n10} با مقدار هم‌دوسی ۰/۴۹۲۹ و مقدار خط مبنای زمانی ۴۶ روز و خط مبنای نرمال ۶۵۱/۱۸۸ متر است. برای مجموع داده PALSAR نیز اقدام به تهیه نقشه‌های مجموع و سالیانه شد. نتایج حاکی از آن است که در یک دوره ۴ ساله (۲۰۱۰-۲۰۰۶) برای داده PALSAR میزان جابه‌جایی سالیانه در این دوره (شکل ۴-الف) برابر ۷۸- میلی‌متر و در مجموع دوره ۴ ساله جابه‌جایی کل به‌دست آمده (شکل ۴-ب) برابر ۳۰- سانتی‌متر بوده است.

الگوی فرونشست همچنان مشابه دوره‌های زمانی پیشین است و محدوده وسیعی بین شهرهای کوشک، شهر ابریشم،

شده است. جدول ۳ بیانگر بیشترین میزان جابه‌جایی رخ داده و مقادیر هم‌دوسی و خط مبنای زمانی و نرمال مجموعه داده PALSAR است.

مطابق جدول ۳ همانند نتایج به‌دست آمده برای مجموعه داده ASAR، بیشترین میزان جابه‌جایی متأثر از خط مبنای زمانی و نرمال بلند و همچنین مقادیر هم‌دوسی پایین در مجموعه داده PALSAR است. بیشترین میزان جابه‌جایی مربوط به جفت تصویر P_{n1} و مقدار ۱۱- سانتی‌متر در طی دوره ۲۰۰۶/۱۲/۱۱ تا ۲۰۰۷/۱۲/۱۴ است. میزان هم‌دوسی در این جفت تصویر پایین‌ترین مقدار را داشته و به‌میزان ۳/۳۰۷۴ است. همچنین مقدار خط مبنای نرمال نیز بالاترین مقدار در بین تمام جفت تصاویر را دارد و به مقدار ۹۸۱ و ۹۴۲ است. علاوه بر آن مقدار



شکل ۵. مطابقت فرونشست راداری و فرونشست به‌دست آمده از شبکه پیمایش ترازیبی

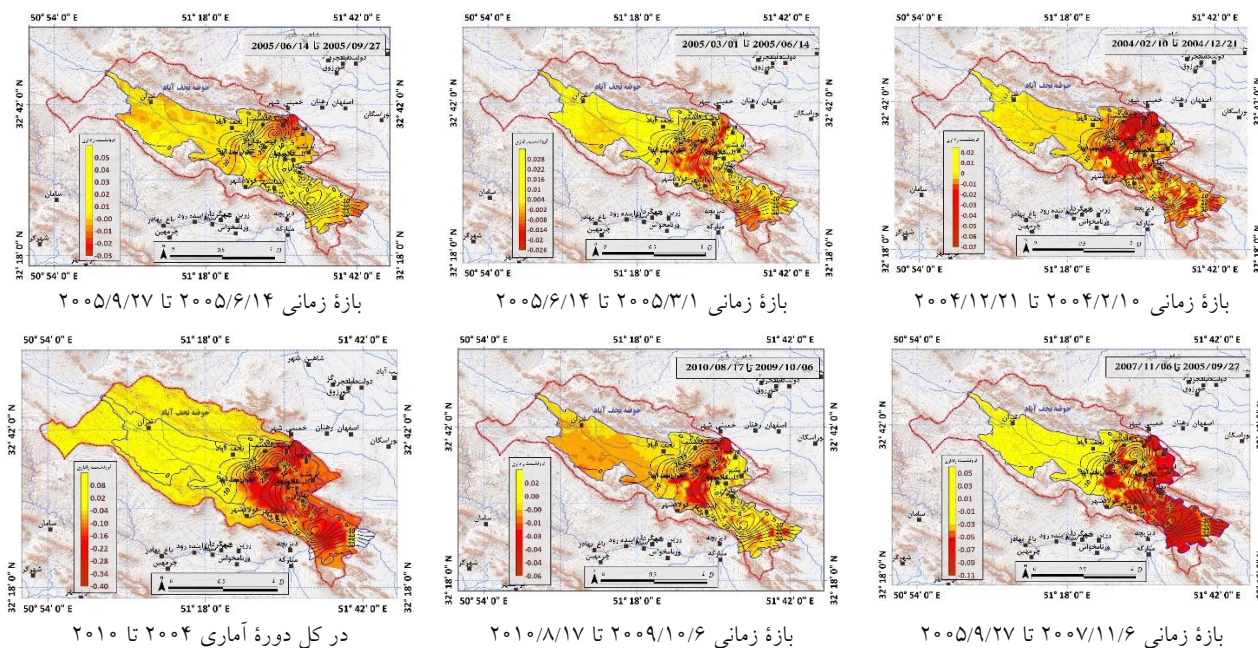
بیشترین مقدار اختلاف ارتفاع منفی (فرونشست زمین) در محدوده تیرانچی، کوشک و سپس اسلام‌آباد و کهریزسنگ رخ داده است. با مقایسه مکانی نتایج حاصل اندازه‌گیری‌های ترازیبی و داده‌های حاصل از پردازش تصاویر راداری ASAR (۲۰۰۳-۲۰۱۰) و PALSAR (۲۰۰۶-۲۰۱۰) روند فرونشست زمین تأیید می‌شود (نمودار شکل ۵).

لازم به ذکر است که با وجود تفاوت دوره زمانی داده‌های حاصل از ترازیبی و داده‌های راداری، موقعیت مکانی نشست در محل روستای تیرانچی بیشترین مقدار را نشان می‌دهد و مقدار اختلاف ارتفاع حاصل از داده‌های ترازیبی بین سال‌های ۱۳۶۳ و ۱۳۸۳ به مقدار ۴۱- سانتی‌متر است. این درحالی است که بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ برای داده‌های راداری ASAR فرونشست به میزان ۴۱- سانتی‌متر و بین سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰ برای داده‌های راداری PALSAR به میزان ۳۰- سانتی‌متر نشست حاصل شده است. نکته قابل توجه آن است که شدت فرونشست در منطقه مورد نظر بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ (۴۱- سانتی‌متر در دوره ۶ ساله) نسبت به سال‌های بین ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۳ (۴۴- سانتی‌متر در دوره ۲۰ ساله) افزایش یافته است. ضمن اینکه بر اساس نتایج حاصل از پردازش داده‌های راداری PALSAR (۳۰- سانتی‌متر فرونشست بین سال‌های

فلاورجان، قهدریجان تا فولادشهر را درگیر کرده است. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، نرخ فرونشستی در حدود ۵ تا ۷/۸- سانتی‌متر در این مناطق حادث شده است. همچنین نرخ سالیانه فرونشست با توجه به پردازش تصاویر ASAR در مدت ۷ سال برای بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ معادل ۶۷- میلی‌متر و برای تصاویر PALSAR فقط در مدت ۴ سال در بازه ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ معادل ۷۸- میلی‌متر برآورد شد. به‌عبارت دیگر مقایسه میزان نرخ فرونشست ASAR و PALSAR، بیانگر آن است که با گذشت زمان از ۲۰۰۳ به ۲۰۱۰ نرخ فرونشست افزایش یافته است.

مقایسه میزان فرونشست حاصل از پردازش تصاویر راداری و داده‌های حاصل از پیمایش ترازیبی

به منظور صحت‌سنجی، نقشه فرونشست حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای راداری با نتایج پیمایش ترازیبی دقیق که مسیر آن روی آبخوان مشخص شده است، مطابقت داده شد (نقشه شکل ۵). داده‌های ترازیبی توسط سازمان نقشه‌برداری کشور از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۳ در امتداد جاده اصلی نجف‌آباد تیران برداشت شده است. بر اساس مقادیر ترازیبی در سال‌های ۶۳ و ۸۳ اختلاف ارتفاع در امتداد نقاط ترازیبی ترسیم شد (نمودار در شکل ۵).



شکل ۶. تطابق پهنه‌های فرونشست و خطوط هم افت آب در بازه‌های زمانی مختلف از ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰

نقشه‌های شکل ۶ پهنه‌های فرونشست آبخوان نجف‌آباد در بازه‌های زمانی و در کل دوره آماری مورد نظر پژوهش را نشان می‌دهند که کاملاً با مناطق دارای افت بیشینه آب زیرزمینی (منحنی‌های میزان افت سطح آب زیرزمینی) تطابق و هماهنگی دارند.

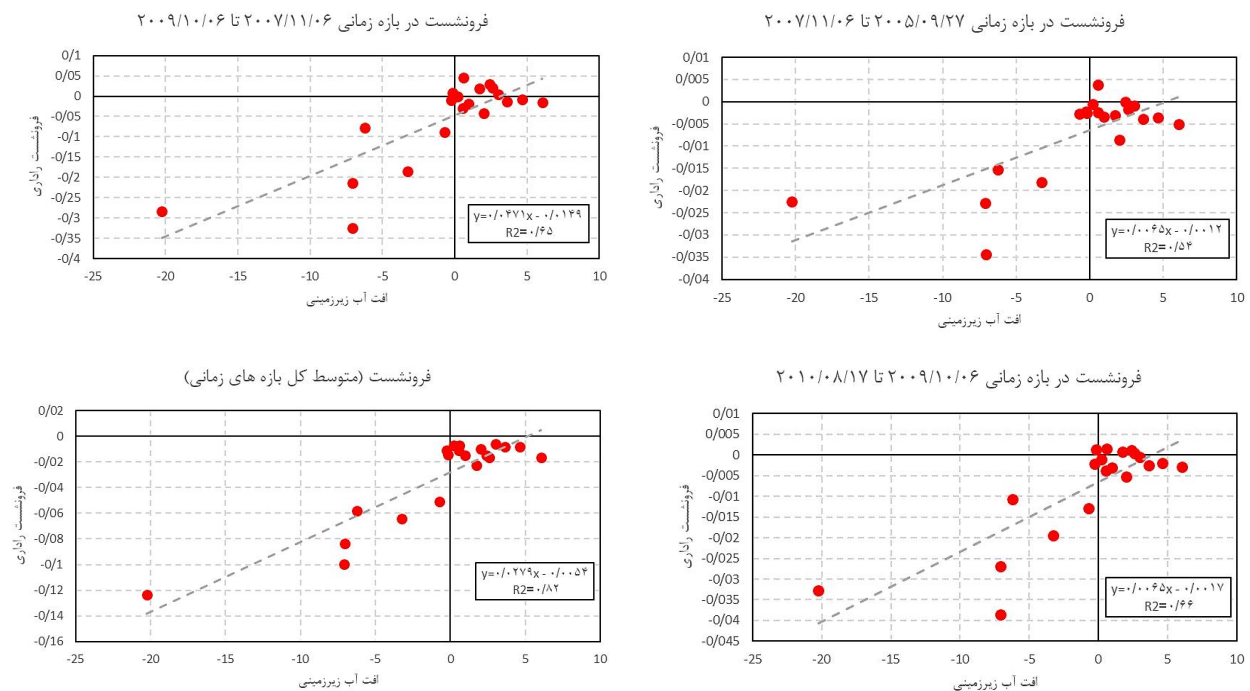
صحت‌سنجی و مقایسه آماری با داده‌های موجود

صحت و دقت نتایج به‌دست آمده از روش‌های تداخل‌سنجی راداری، توسط داده‌های دیگر از جمله داده‌های افت آب زیرزمینی، پیمایش ترازیبی و نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه به‌صورت آماری (همبستگی رگرسیون) مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۷). نقشه هم افت آب در طول دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ رابطه کاملاً معناداری با نتایج به‌دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد (شکل ۷). جابه‌جایی‌های به‌دست آمده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری دقیقاً در مناطقی رخ داده که طبق نقشه دارای بیشترین افت آب در طی دوره مورد مطالعه بوده است. ضریب تبیین معادلات رگرسیون بین افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین با گذشت زمان از

۲۰۰۷-۲۰۱۰) و ASAR (۴۱- سانتی‌متر فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۳) نرخ فرونشست در سال‌های آخر افزایش نشان می‌دهد.

ارتباط فرونشست با تراز و افت آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد

داده‌های مکانی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان، نقشه‌های خطوط تراز آب زیرزمینی، خطوط هم افت و جهت حرکت آب در آبخوان نجف‌آباد با مناطق نشست حاصل از پردازش راداری در بازه‌های زمانی مشابه (بین سال‌های ۸۱ تا ۹۳) مطابقت دارد. میزان افزایش نرخ و منطقه تحت تأثیر فرونشست و افت سطح آب در دو بازه زمانی ۸۵-۱۳۸۳ و ۸۹-۱۳۸۶ به‌سمت حاشیه رودخانه زاینده‌رود در منطقه مورد مطالعه تمایل پیدا می‌کند. این موضوع بیانگر آن است که با خشک شدن رودخانه و گذشت زمان منطقه فرونشست از جنوب حوضه به‌سمت مرکز حوضه (حاشیه رودخانه زاینده‌رود) انتقال یافته است. به‌طورکلی روند کاهشی سطح منطقه فرونشست اما افزایش نرخ آن در آبخوان نجف‌آباد در دو دوره زمانی مذکور مشهود است.



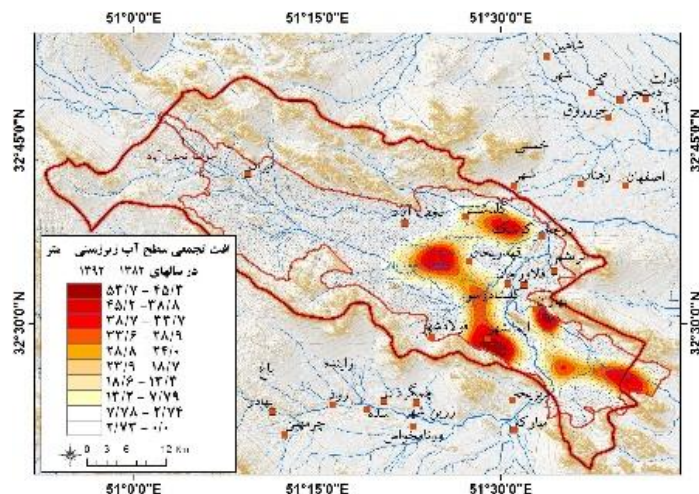
شکل ۷. ارتباط متوسط فرونشست در دوره‌های مورد بررسی و افت آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد

دیگر تخمین زده شده است، که می‌تواند با گسترش بیشتر رسوبات ریزدانه در این نواحی مرتبط باشد. میزان فرونشست سطح زمین در برخی نواحی تا ۵۰ سانتی‌متر نیز در این بازه زمانی برآورد شده که مقدار قابل توجه و بالقوه خطرآفرینی است. فرونشست قابل ملاحظه‌ای نیز در محل خروجی آبخوان واقع در شرق و جنوب شرق پیربرکان مشاهده می‌شود. در این ناحیه نیز رسوبات ریزدانه به نسبت فراوانی بیشتری دارند. در نواحی اطراف رودخانه زاینده‌رود میزان فرونشست به دلیل تغذیه آبخوان به توسط رودخانه، کاهش یافته است.

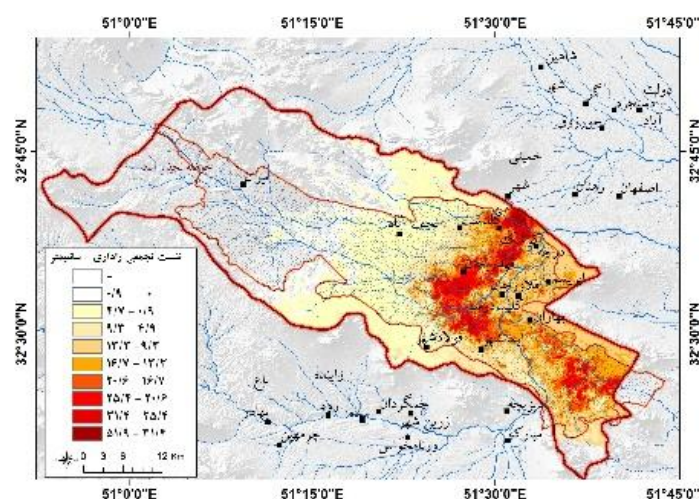
شکل ۱۰ نشان‌دهنده نقشه میزان هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۲ است. تطابق قسمتی از آبخوان که میزان هدایت الکتریکی اندک بوده و حاکی از برداشت در اثر پمپاژ و ماندگاری کمتر آب است با قسمتی که بیشترین فرونشست را متحمل شده به‌وضوح مشاهده می‌شود. در حوالی رودخانه زاینده‌رود به دلیل تغذیه میزان EC و فرونشست کاهش یافته است.

۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ از ۰/۵۴ به ۰/۶۶ و برای کل دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ به ۰/۸۲ افزایش یافته است (شکل ۷). بنابراین با گذشت زمان، همبستگی بین فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی افزایش یافته و برداشت آب زیرزمینی عامل مؤثر و اصلی در فرونشست زمین در این منطقه است.

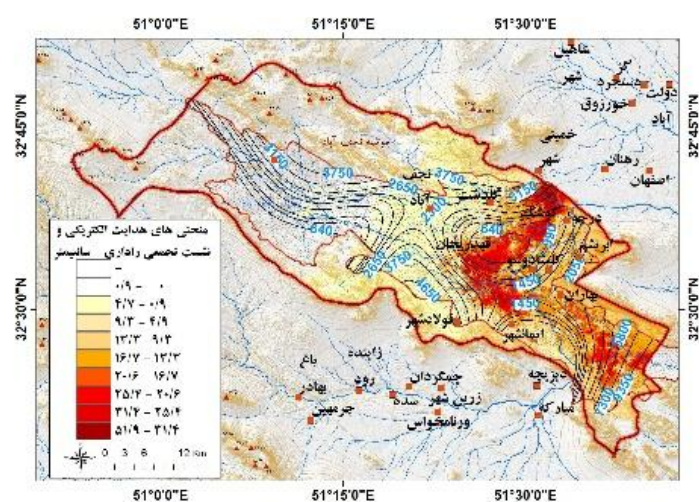
به دلیل دسترسی به داده راداری مناسب در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۲، تجزیه و تحلیل فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی تنها به این ده سال منحصر شده است (شکل ۸). بدین منظور نقشه افت جمعی سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۲ ترسیم شده که محل مخروط‌های افت که حاصل افت زیاد سطح آب زیرزمینی است در این نقشه هویدا است. حداکثر افت سطح آب زیرزمینی در محل مخروط‌های افت جمعی به حدود ۵۴ متر در این بازه زمانی بالغ می‌شود. شکل ۹ فرونشست جمعی سطح زمین حادث شده در طی سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۲ را نشان می‌دهد. طبق این نقشه میزان فرونشست در قسمت شرق و جنوب شرق شهر نجف‌آباد به مراتب بیشتر از قسمت‌های



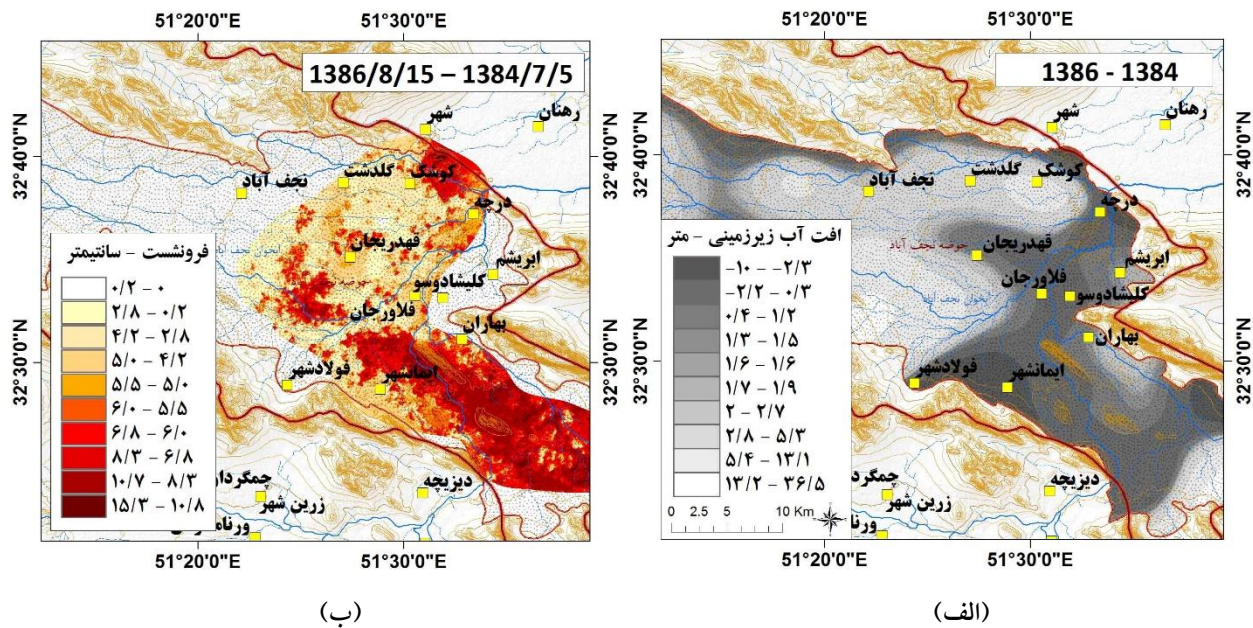
شکل ۸. افت تجمعی سطح آب زیرزمینی بین سالهای ۱۳۸۲-۱۳۹۲ در آبخوان نجف‌آباد



شکل ۹. فرونشست تجمعی بین سالهای ۱۳۸۲-۱۳۹۲ در آبخوان نجف‌آباد



شکل ۱۰. ارتباط متوسط هدایت الکتریکی با فرونشست تجمعی بین سالهای ۱۳۸۲-۱۳۹۲ در آبخوان نجف‌آباد



شکل ۱۱. تناظر: الف) متوسط افت سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد با ب) متوسط فرونشست در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۸۴

فرونشست را با آن مرتبط دانست. از این رو نقشه کاربری اراضی منطقه نجف‌آباد با استفاده از داده‌های مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان تهیه شد (شکل ۱۳). با توجه به نتایج به‌دست آمده از پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری و مطابقت نقشه کاربری اراضی، نتیجه گرفته می‌شود که این پدیده در مناطقی رخ داده که دارای کاربری کشاورزی هستند (شکل ۱۴). با توجه به اینکه آب زیادی برای کشت محصول در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و علاوه بر آن، این ناحیه طبق نقشه هم باران واجد کمترین میزان بارش است، بنابراین برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی بهره‌برداری از چاه‌های منطقه افزایش یافته، به طوری که این میزان از بهره‌برداری در بعضی موارد بیشتر از توان احیای چاه‌هاست. بنابراین با بهره‌برداری بی‌رویه در این بخش شاهد افت سطح چاه‌های منطقه در گذر زمان شده و این عامل تأثیر بسزایی در رخ دادن پدیده فرونشست زمین دارد.

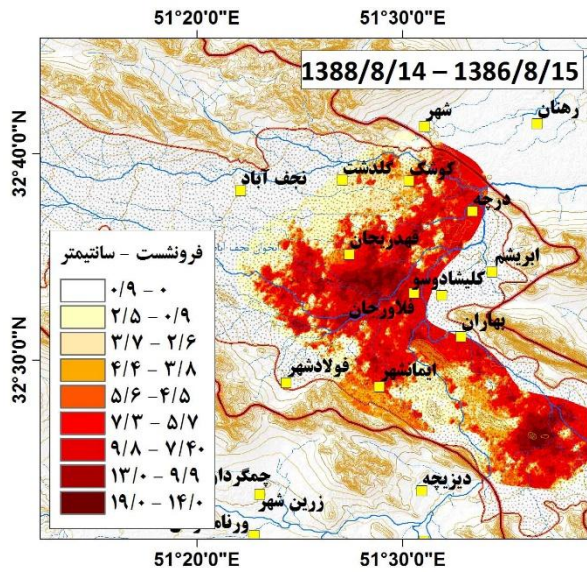
نتیجه‌گیری

در این پژوهش پدیده فرونشست در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با دهانه ترکیبی

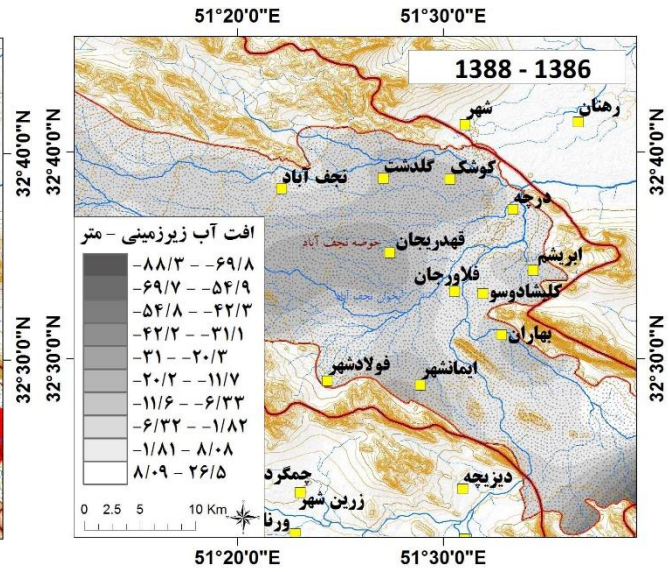
به‌منظور اثبات هرچه بیشتر ارتباط فرونشست زمین با افت سطح آب زیرزمینی، نقشه‌های افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در تک تک سال‌های بازه زمانی مورد مطالعه ترسیم و مطالعه شده‌اند. میزان فرونشست متناظر با مقدار افت سطح آب زیرزمینی نوسان دارد و در سال‌هایی که میزان افت سطح آب زیرزمینی بیشتر بوده، میزان فرونشست نیز افزون‌تر شده است. به‌عنوان مثال در بازه زمانی دو ساله ۱۳۸۶-۱۳۸۴ میزان فرونشست حداکثر ۱۵ سانتی‌متر تخمین زده شده است (شکل ۱۱). در صورتی که در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۸۸ که میزان افت سطح آب زیرزمینی نسبت به سال‌های دیگر بیشتر بوده، میزان فرونشست نیز افزایش یافته و تا حداکثر ۱۹ سانتی‌متر برآورد شده است (شکل ۱۲). بنابراین به‌دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در سال‌های اخیر میزان فرونشست سطح زمین نیز افزوده شده و تطبیق بیشتری با محل مخروط‌های افت ایجاد شده در سطح آب زیرزمینی پیدا کرده است.

بررسی ارتباط فرونشست، افت و کاربری اراضی در آبخوان نجف‌آباد

کاربری اراضی یکی از فاکتورهایی است که می‌توان پدیده

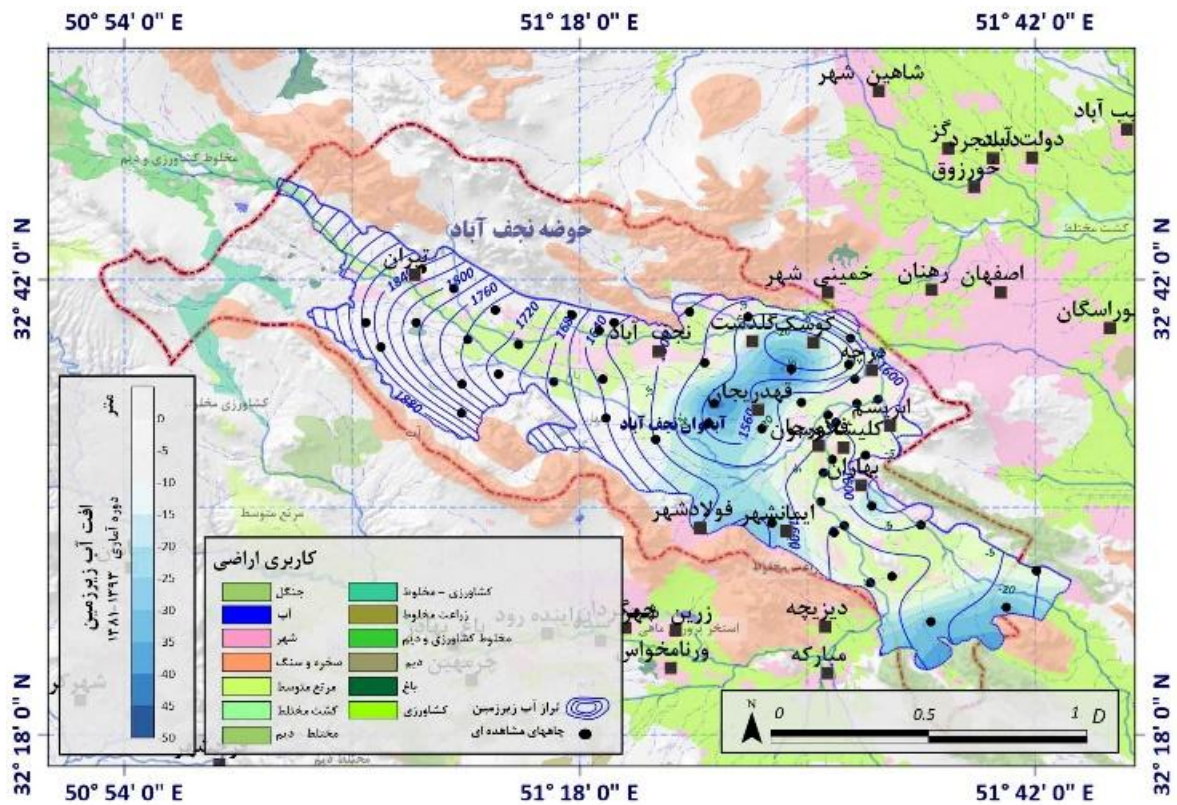


(ب)

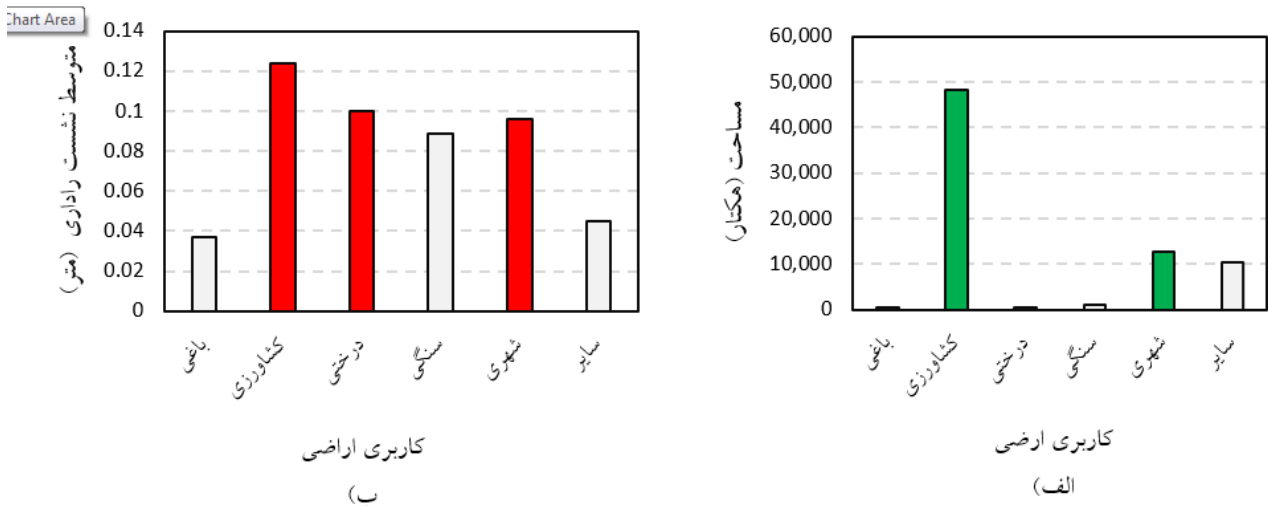


(الف)

شکل ۱۲. تناظر: الف) متوسط افت سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد با ب) متوسط فرانشست در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۸۸



شکل ۱۳. کاربری زمین، خطوط تراز و هم افت آب زیرزمینی



شکل ۱۴. الف) مساحت رده‌های مختلف کاربری ارضی و ب) متوسط فرونشست راداری در رده‌های مختلف کاربری ارضی

سانتی‌متر در فریم کامل تصویر ASAR و به مقدار ۳/۵- سانتی‌متر در محدوده دشت نجف‌آباد است. بیشترین نشست رخ داده در زوج تصویر شماره P_{n9} مربوط به مناطق شمالی شهر اصفهان شامل شهرهای حبیب‌آباد، سین و هفت شویه و همچنین مربوط به دشت مهباز در جنوب شرقی شهر اصفهان و دشت نجف‌آباد در حفاصل بین شهرهای قهدریجان و فلاورجان است.

در مورد تصاویر سنجنده PALSAR بیشترین فرونشست رخ داده مربوطه به زوج تصویر P_{n9} به میزان ۱۰- سانتی‌متر در زمان بین ۲۰۱۰/۰۵/۰۶ و ۲۰۱۰/۱۱/۰۶ و کمترین مقدار مربوط به زوج تصویر شماره P_{n10} و به میزان ۲- سانتی‌متر است. بیشترین فرونشست اتفاق افتاده در زوج تصویر شماره P_{n9} در امتداد شهرهای کوشک، قهدریجان و فولادشهر در محدوده دشت نجف‌آباد است.

با در نظر گرفتن تمامی نقشه‌های حاصل از پردازش داده‌های هر دو سنجنده ASAR و PALSAR، بیشترین میزان فرونشست در شهرهای تیرانچی، کوشک، قهدریجان و فولادشهر در محدوده دشت نجف‌آباد رخ داده است. همچنین مقادیر فرونشست حاصل از داده‌های ترازبایی دقیق با میزان و گستره فرونشست به دست آمده از پردازش داده‌های راداری انطباق خوبی دارد. میزان فرونشست حاصل از نتایج داده‌های

(DInSAR) بررسی شده است. بدین منظور از دو مجموعه داده شامل تعداد ۲۳ تصویر از سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT در باند C و گذر نزولی با قطبیت HH و تعداد ۱۲ تصویر از سنجنده PALSAR ماهواره ALOS در باند L و در گذر صعودی با قطبیت HH استفاده شده است. از بین جفت تصاویر تداخل‌سنجی تشکیل شده برای سنجنده‌های ASAR و PALSAR به ترتیب ۱۱ و ۱۰ جفت تداخل‌نگار مناسب تشخیص داده شدند. نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR) نشان می‌دهد که فرونشست در منطقه مورد مطالعه شامل دشت نجف‌آباد و همچنین مناطق دیگر شامل شمال شهر اصفهان رخ داده است. همچنین با توجه به تداخل‌نگارهای انتخاب شده و گذر زمان از ابتدای دوره زمانی مورد استفاده یعنی تاریخ ۲۰۰۳/۰۴/۰۱ (در مورد تصاویر ASAR) تا انتهای دوره همیشه پدیده نشست وجود داشته است. با توجه به نتایج حاصل از پردازش داده‌های سنجنده ASAR بیشترین نشست رخ داده مربوط به زوج تصویر شماره A_{n9} (زمان بین ۲۰۰۷/۱۱/۰۶ و ۲۰۰۹/۱۰/۰۶) به میزان ۲۴- سانتی‌متر در فریم کامل تصویر ASAR و به مقدار ۱۸- سانتی‌متر در محدوده دشت نجف‌آباد است. همچنین کمترین میزان به دست آمده نشست مربوط به زوج تصویر شماره A_{n7} (زمان بین ۲۰۰۵/۰۶/۱۴ و ۲۰۰۵/۰۹/۲۷) به میزان ۷/۵-

اراضی، مناطق کشاورزی با مناطق افت آب زیرزمینی و فرونشست انطباق خوبی نشان می‌دهد که این خود دلیلی بر افزایش برداشت آب زیرزمینی به‌منظور مصارف کشاورزی است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس از سازمان‌های فضایی اروپا (ESA) و نقشه‌برداری کشور برای در اختیار گذاردن داده‌های راداری (SAR data) و ترازایی به‌عمل می‌آید. همچنین از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان به‌خاطر فراهم آوردن امور ستادی-اداری و از شرکت سهامی آب استان اصفهان نیز بابت حمایت مالی پژوهش (ESW94021) صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

ترازیابی در محدوده تیرانچی به میزان ۴۱- سانتی‌متر است که مقادیر حاصل از پردازش داده‌های راداری را تأیید می‌کند.

بر اساس پردازش‌های راداری انجام گرفته، فاکتورهای همدوسی و خط مبنای زمانی و نرمال تأثیر زیادی در نتایج به‌دست آمده از روش تداخل‌سنجی دارند. به‌طوری که هر زمان این سه فاکتور از حالت استاندارد و آستانه خود فراتر روند، بدین صورت که همدوسی کاهش و خط مبنای زمانی و نرمال افزایش یابد، میزان جابه‌جایی به‌دست آمده نیز به‌میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب در صورت وجود چنین حالاتی ممکن است نتایج حاصل از واقعیت موجود فاصله بگیرد و گمراه کننده باشد.

افت آب زیرزمینی به‌دست آمده از چاه‌های دشت نجف‌آباد نیز نشان دهنده این است که در همین منطقه بیشترین افت آب در طول دوره مورد مطالعه رخ داده است. همچنین افزایش میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی (EC) با محل‌های مخروط‌های افت آب زیرزمینی و افزایش فرونشست انطباق دارد. همچنین با توجه به نقشه کاربری

منابع مورد استفاده

1. Alami, A. 2002. Investigating the causes of land subsidence in the Yazd-Ardakan plain. Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran.
2. Amighpey, M., S. Arabi, A. Talebi and Djamour. 2006. Elevation changes of the precise leveling tracks in the Iran leveling network. Scientific Report Published in National Cartographic Center (NCC) of Iran, Tehran, Iran.
3. Amiri, M. 2006. Relationship between sinkholes of Famenin-Kabudrahang-Ghahvand plain with bed rock of the area. *Geosciences* 15(58): 134-147.
4. Anderssohn, J., H. Wetzell, T. R. Walter, M. Motagh, Y. Djamour and H. Kaufmann. 2008. Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International* 174(1): 287-294. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03805.x>.
5. Ashrafiyanfar, N., W. Busch, M. Dehghani and P. Haghigatmehr. 2010. Differential SAR interferometric technique for land subsidence monitoring due to ground water exploitation in the Hastherd. Proceeding of Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, ESA SP-677.
6. Buckley, S. J. and J. P. Mills. 2002. Synergy of GPS, Digital Photogrammetry and InSAR in Coastal Enviroments, Miami, Florida. USA.
7. Chamundeeswari, V. V., D. Singh, K. Singh and W. Wiesbeck. 2008. A Critical Analysis to Generate Change Detection Map using SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring of New Orleans City of USA. IEEE Xplore, IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 518-521. 10.1109/IGARSS.2008.4779772.
8. Davoodijam M., M. Motagh and M. Momeni. 2015. Land Subsidence in Mahyar Plain, Central Iran, Investigated Using Envisat SAR Data. *In: Kutterer, H., F. Seitz, H. Alkhatib and M. Schmidt. (Eds.), The 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). International Association of Geodesy Symposia, Vol 140. Springer, Cham*

9. Dehghani, M., M. J. V. Zoej, I. Entezam, A. Mansourian and S. Saatchi. 2009a. InSAR onitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International* 178 (1): 47-56.
10. Dehghani, M., M. J. V. Zoej, S. Saatchi, J. Biggs, B. Parsons and T. Wright. 2009b. Radar Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 37(1): 147-156.
11. Dehghani, M., M. J. ValadanZoej, I. Entezam, S. Saatchi and A. Shemshaki. 2010. Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing* 4(041864): 1-15.
12. Dehghan-Soraki, Y., S. K. Saha and M. Kumari. 2013. A modified polarimetric decomposition for applicability in complex agricultural environment, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W3, 2013 SMPR 2013, 5-8 October 2013, Tehran, Iran.
13. Engelbrecht, J. and M. R. Inggs. 2016. Coherence optimization and its limitations for deformation monitoring in dynamic agricultural environments. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(12): 5647-5654.
14. Fatemi Aghda, M., S. M. Nakhaei, M. Baitollahi and A. R. Aliyari. 2001. Study of cause of sinkhole development in Hamedan central plain. Proceeding of Second Iranian Conference of Engineering Geology and Environment, Tehran 2: 693-701.
15. Ferretti, A., A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca and D. Massonnet. 2007. InSAR Principles - Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Training Manual. 19.
16. Fiaschi, S., S. Tessitore, R. Boni, D. Di Martire, V. Achilli, S. Borgstrom, A. Ibrahim, M. Floris, C. Meisina and M. Ramondini. 2017. From ERS-1/2 to Sentinel-1: Two decades of subsidence monitored through a-dinsar techniques in the ravenna area (Italy). *GIS Science & Remote Sensing* 54(3): 305-328. doi: 10.1080/15481603.2016.1269404.
17. Gabriel, A. K. and R. M. Goldstein. 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing* 9(5): 857-872.
18. Ghazifard, A., E. Akbari, K. Shirani and H. Safaei. 2017. Evaluating land subsidence by field survey and D-InSAR technique in Damaneh City, Iran. *Journal of Arid Land* 9: 778-789. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0104-5>
19. Hu, R. L., Z. Q. Yue, L. C. Wang and S. J. Wang. 2004. Review on current status and challenging issues of and subsidence in china. *Engineering Geology* 76: 65-77.
20. Jacob, C. E. 1939. Fluctuations in artesian pressure produced by passing railroad trains as shown in a well on Long Island, New York. *Transactions, American Geophysical Union* 20: 666-674.
21. Lin, Q., J. F. Vesecky and H. A. Zebker. 1992. New approaches in interferometric SAR data processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30: 560-567.
22. Rosen, P. A., S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodríguez and R. M. Goldstein. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry, Proceedings of the IEEE Xplore, 88, 333-382. DOI: 10.1109/5.838084.
23. Mirmohammad Sadeghi, M., B. Ebrahimi and M. Pasandi. 2018. Groundwater depletion and stream-aquifer interaction (case study: The Najafabad aquifer in Zayandehroud river basin). *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 22(2): 107-125.
24. Motagh, M., J. Klotz, F. Tavakoli, Y. Djamour, S. Arabi, H. Wetzel and J. Zschau. 2006. Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake. *Pure and Applied Geophysics* 163(1): 1-18. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00024-005-0005-y>.
25. Motagh, M., Y. Djamour, T. R. Walter, H. Wetzel, J. Zschau and S. Arabi. 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International* 168(2): 518-526. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x>.
26. Mousavi, S. M., A. Shamsai, M. H. E. Naggar and M. Khomechiyan. 2001. A GPS-based monitoring program of land subsidence due to ground water withdrawal in Iran. *Cannadian Journal of Civil Engineering* 28(3): 452- 464.
27. Parker, G. G. and V. T. Springfield. 1950. Effects of earthquakes, rains, tides, winds, and atmospheric pressure changes on the water in geological information of southern Florida. *Economic Geology* 45: 441-460.
28. Prati, C. and F. Rocca. 1994. Use of the spectral shift in SAR interferometry. Second ERS-1 Symposium-Space at the Service of our Environment, Hamburg, Germany, 11-14 October 1993, ESA SP-361.
29. Rosen, P. A., S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodríguez and R. M. Goldstein. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE, 88: 333-382.
30. Sedighi, M., S. Arabi, H. R. Nankali, M. Amighpey, F. Tavakoli, A. Soltanpour and M. Motagh. 2010. Subsidence Detection Using InSAR and Geodetic Measurment in North-West of Iran. Proceeding 'Fringe 2009 Workshop', Frascati, Italy. Sens. 9: 857-872.
31. Sharifikia, M. 2009. Fault rupture Identification in Recent Satellite Imagery. Second International Conference on Geo-information Technology for Natural Disaster, Thailand.
32. Shemshaki, A. and M. J. Bolourchi. 2006. Land subsidence in the Tehran plain and the factors influencing its formation. 24th National Geosciences Congress.

33. Singhory, V., K. E. Mattar and A. L. Gray. 1998. Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research* 21(3): 465-476.
34. Sun, H., D. Grandstaff and R. Shagam. 1999. Land subsidence due to groundwater withdrawal: Potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA. *Environmental Geology* 34: 290-296.
35. Toufigh, M. M. and B. Shafbeisabet. 1995. Prediction of future land subsidence in Kerman, Iran, due to groundwater withdrawal. Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, IAHS Publ, No. 234.
36. Wempen, J. M. and M. K. McCarter. 2017. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah. *International Journal of Mining Science and Technology* 27: 159-163. doi:10.1016/j.ijmst.2016.11.012.
37. Zayandab Consulting Engineers. 2015. Updating the water resources balance of the Gavkhuni water basin during 2010-2011 water year, Vol. 5: Evaluation of water resources, Appendix 6: Report on the water resources balance in the Najafabad water basin (Code 4206).

Assessment of Land Subsidence in the Najafabad Plain Using the Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR) Technique

K. Shirani^{1*}, M. Pasandi² and B. Ebrahimi³

(Received: May 4-2020 ; Accepted: August 24-2020)

Abstract

Land subsidence as a hydrogeomorphology event is currently occurring dangerously in many plains of the country due to uncontrolled groundwater extraction from water bearing layers, and accordingly monitoring and studying this phenomenon seems to be necessary. In this study, land subsidence rate of the Najafabad aquifer was determined through the Differential Radar Interferometry (DInSAR) processing of the ASAR and PALSAR radar data and the results were validated by comparing with the differential leveling and groundwater level drawdown data. Processing of the ASAR sensor data estimates the land subsidence in the Najafabad plain at an average annual subsidence rate of 6.7 cm and a total of 41 cm during 6 years period and processing of the PALSAR data suggests an annual rate of 7.7 cm and total subsidence of 30 cm during 4 years period. Most of the occurred displacements are related to the Tiranchi, Koushk, Ghahderijan, Goldasht and Falavarjan cities. The simultaneous groundwater level data with acquisition date of the radar satellite images between 2002 and 2014 shows a drawdown ranging from 0.5 to 46.5 meters in the south and east to north of the Najafabad city consistent with the estimated land subsidence areas. The DInSAR processing of the PALSAR data has led to a more accurate results with higher spatial resolution. Results of the radar data processing can be employed for the hazard zonation directly utilized for management and planning of control and preventive measures.

Keywords: The Najafabad aquifer, Land subsidence, Radar interferometry, Differential leveling, ASAR, PALSAR

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.
2. Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
3. Water Planning Deputy, Isfahan Regional Water Company, Isfahan, Iran.
Corresponding author, Email: k.shirani@areeo.ac.ir