

پایش فرونشست زمین تحت تاثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب با روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: شهر اراک)

محمود اکبری^{*۱}

*۱) استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه اراک، اراک، ایران
ایمیل نویسنده مسئول مکاتبات: m-akbarii@araku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

چکیده:

ممنوعه‌شدن تمام مساحت دشت‌های استان مرکزی و عدم امکان برداشت جدید آب و رخداد فرونشست، باعث اهمیت پایش فرونشست شده است. از طرفی تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR)، روشی کارآمد در پایش فرونشست به‌صورت پیوسته، با دقت بالا و در گستره وسیع می‌باشد. در این پژوهش، از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در بررسی فرونشست زمین در شهر اراک استفاده شد. بدین‌منظور ۱۴ تصویر مختلط منفردنگر از سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT در محدوده C-Band توسط نرم افزار EOLi-sa دریافت گردید. تصاویر مذکور از فریم ۲۹۲۵ مسیر پایین‌رونده ۴۲۱ با قطبیدگی VV و با مود IMS بودند. ده مرحله پردازش توسط افزونه SARscape 4.3 نرم‌افزار ENVI 4.8 بر مبنای چهار تداخل نما که هر دو معیار زمانی و مکانی را داشتند، صورت گرفت. از طرفی سازمان نقشه‌برداری کشور، مشاهدات ترازیبی شبکه درجه یک کشور را برای شهر اراک واقع در مسیر BHBH (بروجرد-سلفچگان) در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۸۳ تکرار نموده است و در این ۱۹ سال، $190\text{mm} \pm 0.8 \text{ mm/km}$ فرونشست را اندازه‌گیری کرده است. بر مبنای چهار تداخل‌نمای بازیابی‌شده مسطح زمین‌مرج برای مناطق مرکزی شهر اراک (حوالی میدان شهدای اراک)، نرخ فرونشست کمابیش یک سانتی‌متر در سال بدست آمد. همچنین مناطق شهری، نرخ فرونشست تقریباً یکسان داشتند. لذا نتایج اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با استفاده از مشاهدات ترازیبی سازمان نقشه‌برداری کشور، دقت مناسب روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را تأیید نمود. نتایج این پژوهش، تأثیرپذیری پدیده فرونشست از عوامل زمین‌شناسی و منابع آب و لزوم حفاظت از منابع آب و خاک در طرح‌های توسعه در شهر اراک را نشان داد.

کلید واژه‌ها: افزونه SARscape 4.3؛ فرونشست زمین؛ ماهواره ENVISAT؛ نرم‌افزار EOLi-sa

مقدمه

است (Hu et al., 2004). همچنین بیش از ۵۰ دشت در ۱۸ استان کشور، به‌ترتیب گسترش شامل استان‌های اصفهان، تهران، کرمان، خراسان رضوی، البرز، فارس، یزد، همدان، مرکزی، چهارمحال و بختیاری، آذربایجان شرقی، زنجان، قم، اردبیل، کردستان، آذربایجان غربی، خراسان شمالی و کرمانشاه، درگیر این پدیده هستند (شمشکی و همکاران، ۱۳۹۵).

در سالیان اخیر، به‌دنبال اضافه برداشت از آبخوان‌ها و افت سطح آب‌های زیرزمینی، پدیده‌های فرونشست (به‌طور تدریجی) و فروچاله (به‌طور ناگهانی) رخ داده است. این پدیده در بیش از ۱۵۰ کشور جهان مانند آمریکا، انگلیس، فرانسه، ونزوئلا، ایتالیا، چین، هند، لهستان، مکزیک، اسپانیا، اندونزی و ژاپن گزارش شده

در سال‌های اخیر از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری که یکی از روش‌های محاسباتی برای پایش فرونشست است، در نقاط مختلف جهان (Chang et al., 2018; DePrekel et al., 2019) و ایران (آقاییار و همکاران، ۱۳۹۹؛ جانباز فوتمی و همکاران، ۱۳۹۹) استفاده شده است. بسیاری از مطالعات دیگر نیز خطرات فرونشست را با استفاده از آنالیزهای ژئوتکنیکی، احتمالی، آماری، تصمیم‌گیری و فازی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد بررسی قرار دادند (طاهری زنگی و واعظی هیر، ۱۳۹۹).

فرونشست و پیامدهای ناخوشایند آن، متأسفانه سرشتی بازگشت‌ناپذیر دارند و به‌سختی می‌توان آنها را کند و مهار نمود. شالوده هر پروژه ملی برای رویارویی با خطر فرونشست بر سه اصل پیش‌بینی، تشخیص و پایش استوار است و مدیریت درست منابع آب از طریق اقداماتی نظیر سند ملی آب، نقش کلیدی در جلوگیری از رخداد این پدیده دارد. ممنوعه‌شدن تمام مساحت دشت‌های استان مرکزی و عدم امکان برداشت جدید آب و رخداد فرونشست، باعث توجه به مقوله فرونشست شده است. در استان مرکزی، مناطقی نظیر ساوه، کمیجان، اراک و خمین با احتمال خطر زیاد و مناطقی نظیر شازند، دلیجان، فراهان و زرنده با احتمال خطر متوسط، درگیر پدیده فرونشست هستند (شمشکی و همکاران، ۱۳۹۵). از طرفی روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، قابلیت پایش فرونشست شهر اراک را دارد. لذا اهداف تحقیق حاضر، بررسی فرونشست زمین در شهر اراک با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، بررسی تاثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب در رخداد این پدیده و اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با استفاده از تکرار مشاهدات ترازیبی سازمان نقشه‌برداری کشور در نظر گرفته شد. علی‌رغم درگیری شهر اراک با فرونشست زمین، تاکنون در زمینه اندازه‌گیری و محاسبه میزان آن، گزارشی ارائه نشده است.

فرونشست زمین، به‌عنوان یک مخاطره مستند، یا طبیعی و یا با دخالت انسان ایجاد می‌گردد (Tony et al., 2005). بررسی جامعی در خصوص پی‌آمدهای فرونشست و تهدیدات جدی برای منابع آب و خاک در دشت‌های ایران (که بخش زیادی از آن در مناطق با جمعیت زیاد نظیر استان‌های تهران، خراسان‌رضوی، اصفهان، البرز، کرمان و قم، هرکدام با جمعیتی بالای یک میلیون نفر است)، توسط شریفی‌کیا (۱۳۹۱) انجام شده است.

پدیده فرونشست، در نواحی مرکزی دشت، به‌علت ضخامت بیشتر رسوبات، به‌صورت تراکمی ظاهر می‌شود. رشد ظاهری لوله جدار چاه‌ها (چاه‌زایی) از نمودهای آن می‌باشد. در نواحی حاشیه‌ای دشت که ضخامت رسوبات کمتر است، حرکت جانبی رسوبات قابل توجه‌تر می‌باشد. نمود آن به‌صورت ترک‌های سطحی با عمق متغیر و موازی با یکدیگر و در امتداد حاشیه دشت^۱ می‌باشد. گاهی اوقات در بخش‌های میانی دشت‌ها نیز ترک‌های کششی با پهنای متفاوت شکل می‌گیرند. این پدیده ناشی از تغییرات توپوگرافی سنگ کف و به تبع آن، پدیده خطرناک نشست‌های نامساوی می‌باشد.

میزان فرونشست، قابل اندازه‌گیری و محاسبه (شامل پایش یا پیش‌بینی) است. برای اندازه‌گیری میزان فرونشست می‌توان از روش‌های ترازیبی دقیق، شبکه سامانه موقعیت‌یاب جهانی GPS (دائمی یا موقت)، انبساط‌سنج یا نشست‌سنج^۲ داخل چاه و شکاف‌سنج روی سطح زمین استفاده کرد. روش‌های محاسباتی برای پایش فرونشست شامل ژئودتیکی (تداخل‌سنجی راداری^۳ و تغییرات میدان جاذبه زمین) و ژئوتکنیکی (در اثر تراکم رسوبات، تئوری الاستیک و تئوری لگاریتمی) هستند. روش‌های محاسباتی برای پیش‌بینی میزان فرونشست نیز شامل سه دسته روش‌های تجربی، نیمه‌تئوری و تئوری است (Ren et al., 2014).

¹ Fissures

² Extensometer

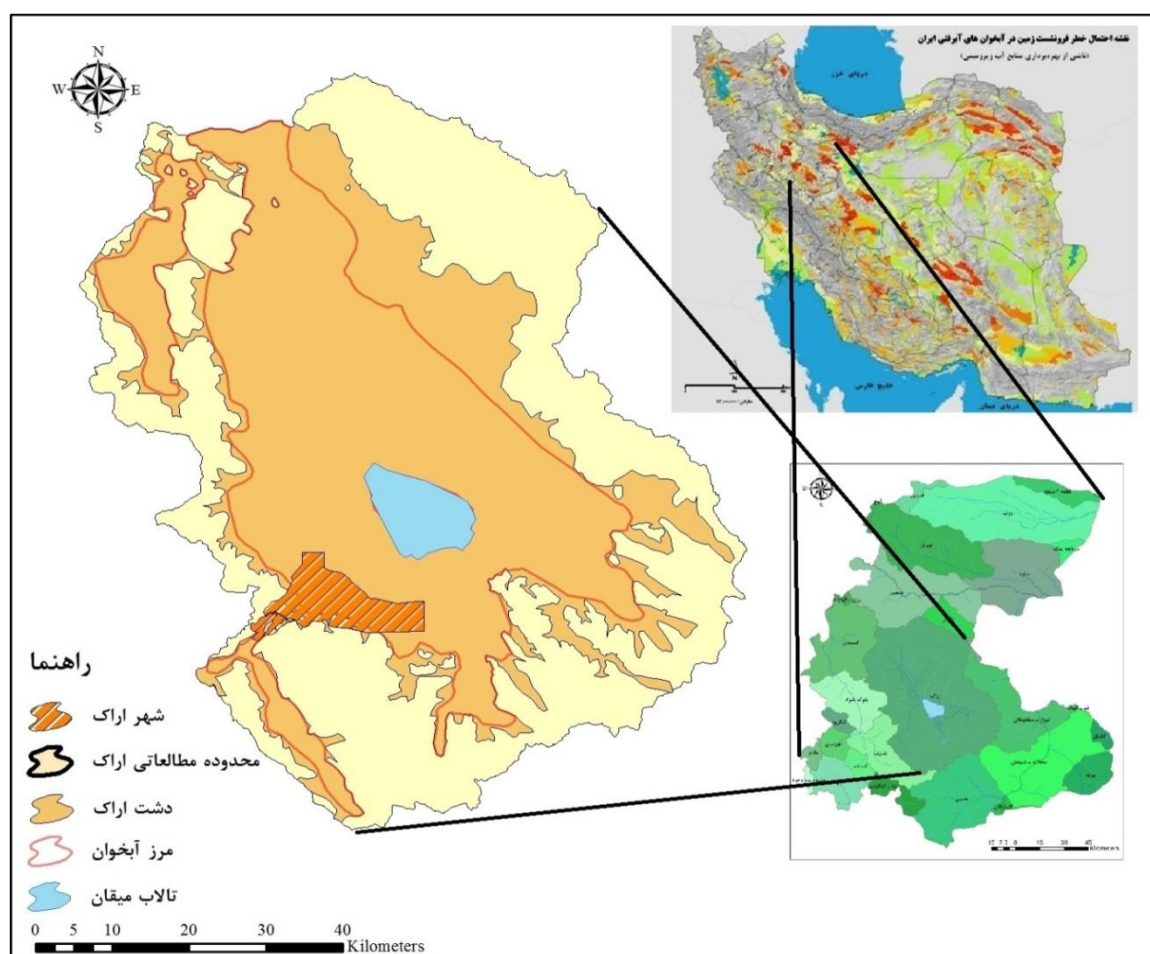
³ InSAR

مواد و روش‌ها

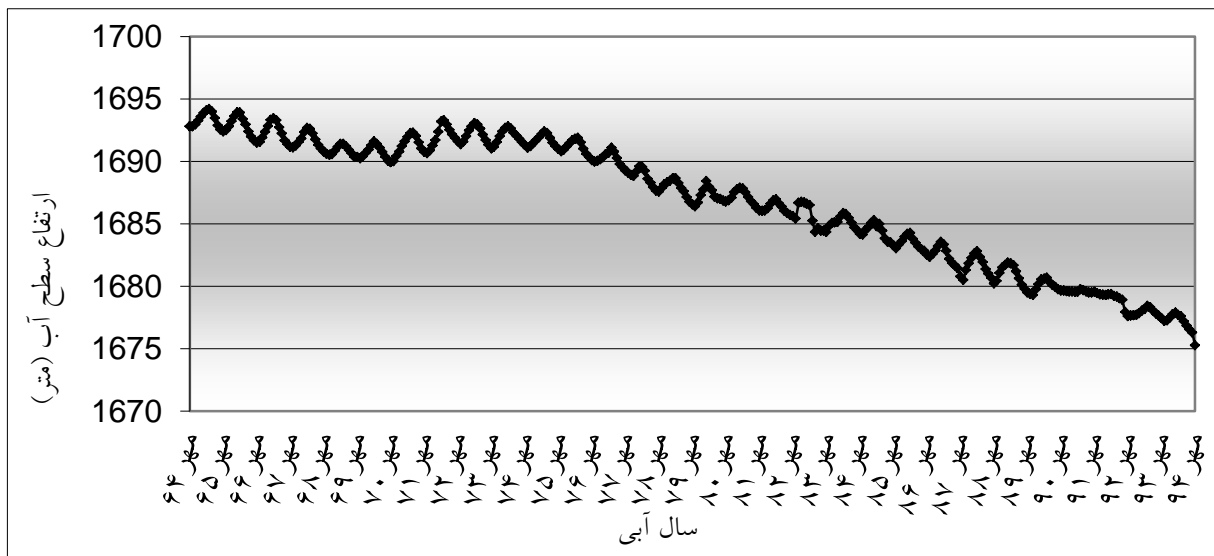
منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی اراک با کد ۴۱۲۴، با مساحت ۵۵۱۸ کیلومترمربع به شکل بسته بوده که تمام جریان‌های سطحی آن به دریاچه میقان (با مساحت ۱۰۶ کیلومتر مربع و در رقوم ارتفاعی ۱۶۵۰ تا ۱۷۰۰ متر از سطح دریا) منتهی می‌شود (شکل ۱). حدود ۳۱۷۱ کیلومتر مربع این محدوده را دشت و ۲۳۴۷ کیلومترمربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهد و در حوضه آبریز میقان بعنوان یکی از زیرحوضه‌های ایران مرکزی در حد فاصل طولهای جغرافیایی ۲۱' ۴۹° تا ۱۸' ۵۰° شرق و عرض جغرافیایی ۴۸' ۳۲° تا ۴۴' ۳۴° شمالی و مختصات متریک $X=349221-436647$ و $Y=3741635-3844819$ واقع

شده است. براساس هیدروگراف دشت (شکل ۲)، میزان کسری ذخیره مخزن در طی دوره ۳۰ ساله (۱۳۹۴-۱۳۶۴) حدود ۱۰۲۳/۶۰۸ میلیون متر مکعب و میزان افت سطح ایستابی ۱۷/۵۳۸ متر و در نتیجه کسری ذخیره مخزن متوسط سالانه ۳۴/۱۲ میلیون متر مکعب و افت متوسط سالانه ۰/۵۸۵ متر می‌باشد. در حالی که طبق آخرین گزارش ممنوعیت، در طی شش سال (۱۳۹۴-۱۳۸۸)، میزان کسری ذخیره مخزن دشت حدود ۲۸۹/۳۱۵ میلیون متر مکعب، میزان افت سطح ایستابی ۴/۹۵۷ متر و کسری ذخیره مخزن متوسط سالانه ۴۸/۲۱۹ میلیون متر مکعب و افت متوسط سالانه ۰/۸۲۶ متر می‌باشد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. هیدروگراف دشت اراک

تقریباً ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اقلیم شهر اراک بر اساس طبقه‌بندی دمارتن، نیمه خشک و بر اساس طبقه‌بندی آمبروزه، نیمه‌خشک و سرد می‌باشد. کوه‌های اطراف اراک و دریاچه میقان و دشت فراهان در آب و هوای این منطقه مؤثر است. بلندترین نقطه ارتفاعی در کوه نظم‌آباد، در جنوب شرق شهر اراک با ارتفاع ۲۶۳۰ متر از سطح دریا و کوتاه‌ترین نقطه در جنوب غرب روستای داودآباد (حاشیه شمال غربی دریاچه کویر میقان اراک) با ارتفاع ۱۶۵۳ متر از سطح دریا می‌باشد.

روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری^۱

اساس کار این روش، استفاده از اطلاعات فاز رادار بازتابی از زمین است. به نحوی که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین، سبب اختلاف فاز دو تصویر رادار در دو زمان مختلف از منطقه‌ای مشابه می‌شوند که با بررسی این اختلاف فاز و مدل‌سازی آن، تغییرات سطح زمین قابل کمی‌سازی می‌باشند. در این تکنیک، به منظور به‌دست‌آوردن اختلاف فاز، پیکسل‌های متناظر در دو تصویر، شناسایی (ثبت هندسی) شده و معادلات مربوط به هر کدام در هم ضرب مختلط می‌شوند. تصویر اختلاف فاز

آبخوان دشت اراک بر اساس ۵۳ حلقه پیزومتر موجود در دشت، چاه‌های بهره‌برداری، نقشه زمین‌شناسی و سایر اطلاعات موجود تعیین گردیده است. مساحت کلی این آبخوان حدود ۲۲۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. در قسمت‌های میانی دشت عمق برخورد به آب کمتر از ۲۰ متر می‌باشد و از محدوده کویر میقان به اطراف عمق سطح آب افزایش می‌یابد. عمیق‌ترین قسمت‌های آبخوان نیز در جنوب آبخوان و سمت ارتفاعات (محدوده پیزومتر رودباران) می‌باشد که دارای عمق آبی حدود ۱۰۰ متر می‌باشد. تغییرات تراز سطح آب نشان می‌دهد که بیشترین تراز آب زیرزمینی با سطح آبی بیش از ۱۸۷۰ متر در شمال آبخوان است. کمترین مقدار تراز سطح آب آبخوان در مرکز دشت به ۱۶۷۰ متر می‌رسد.

این مطالعه در شهر اراک دارای موقعیت ۲۸۸ کیلومتری جنوب غربی تهران و در جنوب غربی محدوده مطالعاتی اراک انجام شد. آب و هوای اراک با زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک، خصوصیات اقلیمی فلات مرکزی ایران را داراست. تعداد روزهای یخبندان از ۶۵ تا ۱۲۰ روز در سال‌های مختلف متغیر است. مقدار بارندگی بین ۲۳۰ تا ۶۳۸ میلی‌متر در سال با میانگین حدود ۳۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه

^۱ D-InSAR

بکارگیری روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری داده‌های ورودی

طبق روندنمای مطالعه (شکل ۳)، چهار نوع داده ورودی به شرح زیر از منابع مختلف دریافت گردید:

۱- دریافت تصاویر راداری منفردنگر توسط نرم‌افزار EOLi-sa (Data Files): توسط نسخه 9.7.0 نرم‌افزار آنلاین EOLi-sa (Earth Observation Link)، تعداد ۱۴ تصویر مختلط منفردنگر (SLC) از سنجنده ASAR ماهواره منابع زمینی ENVISAT دریافت شد. ماهواره فوق که دارای ۱۰ ابزار سنجنده است و به ارتفاع ۸۰۰ کیلومتری پرتاب شده‌است، از سال ۲۰۰۲ با حداقل دوره بازگشت ۳۵ روزه با طول موج ۵/۶ سانتیمتر اقدام به تصویربرداری می‌کند. تصاویر مذکور از فریم ۲۹۲۵ مسیر پایین‌رونده ۴۲۱ (دید رادار به غرب) با قطبیدگی VV با مود IMS در محدوده C-Band و در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ بودند (جدول ۱). با توجه به این‌که شهر اراک چندان پوشش‌های گیاهی متراکم ندارد، نیازی به استفاده از ماهواره‌های L-Band (مثل ALOS) نبود و ماهواره ENVISAT پاسخگو بود

۲- دریافت فایل‌های ماهواره Doris (Doris Files): ماهواره Envisat، تحت کشند ماه، خورشید، برخورد ذرات خورشیدی و ... قرار می‌گیرد. با توجه به بی‌وزنی آن در خلا، ممکن است ماهواره از مدار خود جابجا شود. لذا ماهواره Doris، ۲۴ ساعت پس از Envisat در همان مدار می‌چرخد و با استفاده از حساسه‌های زمینی که با لیدار کار می‌کنند، مدار ماهواره Envisat را با دقت دهم میلی‌متر اصلاح می‌کند. بدین منظور ۱۴ داده ماهواره Doris دریافت شد.

۳- دریافت فایل‌های واسنجی اضافی (XCA Files): با توجه به دریافت داده‌های مختلط منفردنگر (SLC)، برای اصلاح شاخص‌هایی از مدار ماهواره (فاکتورهای مقیاس واسنجی اضافی و الگوهای ارتفاع پرواز)، اقدام به دریافت ۱۴ فایل واسنجی اضافی گردید.

به‌دست‌آمده تداخل‌نما^۱ نام دارد. تداخل‌نما برای منطقه‌ای که در حد فاصل زمانی دو تصویر دچار هیچ‌گونه تغییری نشده است، می‌تواند بیانگر ارتفاع منطقه باشد.

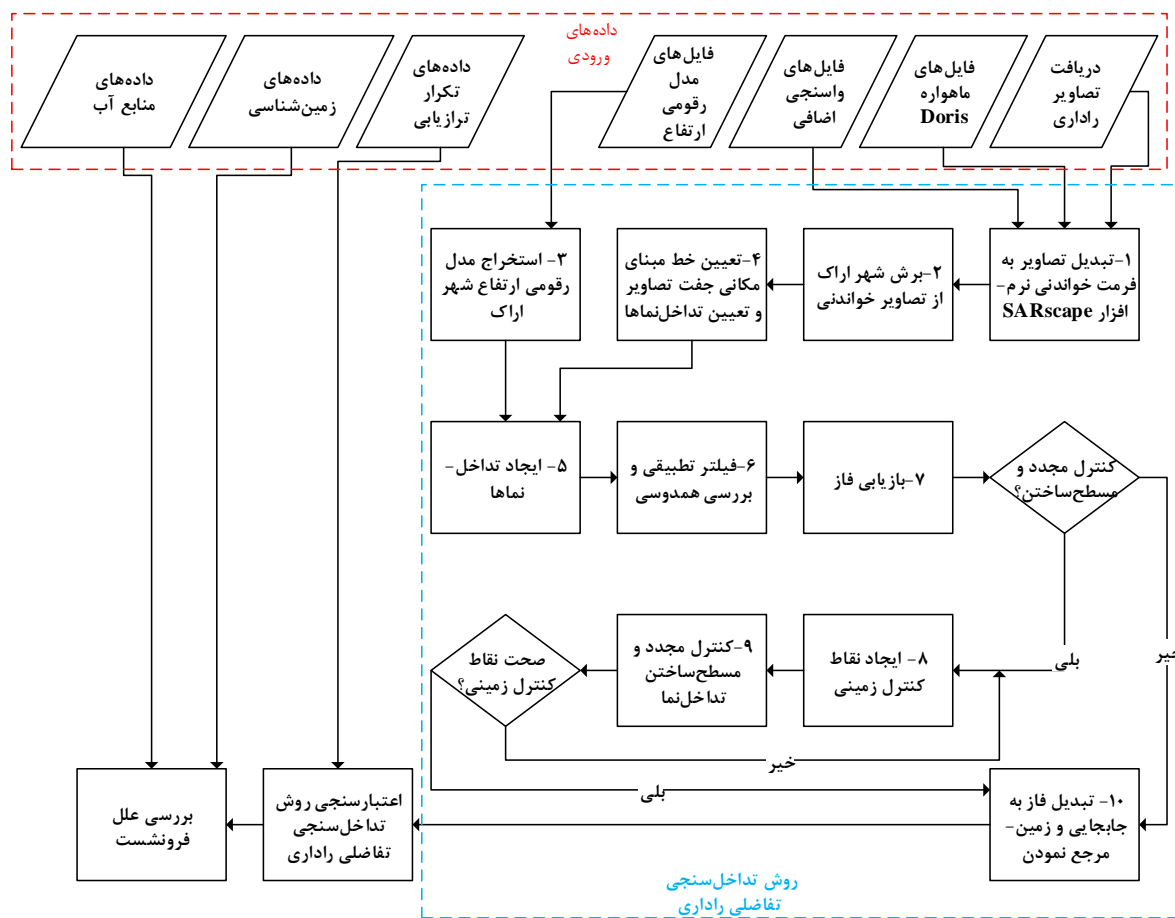
دو روش برای تداخل‌سنجی شامل تک‌گذره (برای نظارت بر توپوگرافی، حرکت یخچال‌ها و سرعت امواج اقیانوسها) و با گذر تکراری (برای نظارت بر تغییر شکل زمین، زمین‌لغزش، فرونشست زمین و مطالعات آتشفشان) وجود دارد. در این پژوهش، روش گذر تکراری استفاده شد. کاربرد اولیه تداخل‌سنجی (روش InSAR)، تخمین توپوگرافی است. اما یکی از کاربردهای پیشرفته این روش در شناسایی جابجایی سطح ناشی از حوادث طبیعی مانند زمین‌لرزه و زمین‌لغزش و یا غیرطبیعی همانند فرونشست ناشی از استخراج آبهای زیرزمینی است. در این روش از تصاویر SAR در دو زمان مختلف استفاده می‌شود تا جابجایی سطح در آن دوره شناسایی گردد. نخست یک تداخل‌نما ایجاد می‌شود و با آن توپوگرافی قبل از حادثه تعیین می‌گردد. سپس تداخل‌نمای دوم، توپوگرافی بعد از حادثه را نمایان می‌کند. با تفریق یک تداخل‌نما از دیگری، فرینج‌های مربوط به توپوگرافی معمول حذف شده و آنچه باقی می‌ماند، جابجایی ایجادشده است. به این روش که اثرات توپوگرافی در آن حذف می‌شود، تداخل‌سنجی تفاضلی راداری گویند.

این روش از تعدادی جفت‌تصویر با زاویه دید نزدیک به هم که در هر جفت‌تصویر، یکی به عنوان تصویر مرجع^۲ و دیگری تصویر فرعی^۳ است، استفاده می‌کند. این روش دارای دقت زیاد (زیر سانتی‌متر ارتفاعی)، پوشش وسیع (۱۰۰ کیلومتر در ۱۰۰ کیلومتر)، قدرت تفکیک مکانی زیاد (حدود ۲۰ متر در ۲۰ متر) و هزینه کم است، اما قدرت تفکیک زمانی آن نسبت به GPS دائمی کم است. این روش ضمن ارائه پوشش زمینی وسیع، نیاز به اندازه‌گیری‌های زمینی را مرتفع می‌سازد.

¹ interferogram

² Master

³ Slave



شکل ۳. روندنمای مطالعه

جدول ۱. تاریخ اخذ چهارده تصویر ماهواره‌ای

۲۰۰۳/۰۸/۰۶	۲۰۰۴/۰۱/۲۸	۲۰۰۴/۰۶/۱۶	۲۰۰۴/۰۷/۲۱	۲۰۰۴/۰۹/۲۹	۲۰۰۵/۰۲/۱۶	۲۰۰۵/۰۴/۲۷
۲۰۰۵/۰۸/۱۰	۲۰۰۵/۰۹/۱۴	۲۰۰۵/۱۱/۲۳	۲۰۰۶/۰۳/۰۸	۲۰۰۶/۰۴/۱۲	۲۰۰۷/۱۱/۲۸	۲۰۰۹/۰۹/۲۳

پردازش توسط افزونه SARscape 4.3 نرم‌افزار ENVI 4.8 و ایجاد اطلاعات خروجی

۱۰ مرحله پردازش در افزونه SARscape 4.3 نرم‌افزار

ENVI 4.8 انجام شد.

۱- تبدیل تصاویر به فرمت خواندنی نرم‌افزار SARscape: تصاویر SLC دریافت‌شده، قابل بارگذاری در نرم‌افزارها نبودند. لذا تبدیل هر ۱۴ تصویر به فرمت خواندنی نرم‌افزار SARscape انجام شد.

۲- برش شهر اراک از تصاویر خواندنی: از آنجاکه زمان پردازش برای کل تصویر (به ابعاد تقریبی ۱۰۰

۴- دریافت فایل‌های مدل رقومی ارتفاع (SRTM Files): به منظور حذف اثر توپوگرافی، نیاز به یک مدل رقومی ارتفاعی وجود داشت. ماهواره راداری شاتل ناسا^۱ طی ۱۱ روز در سال ۲۰۰۰ شروع به جمع‌آوری داده با پوشش جهانی ۸۰ درصد و فاصله نمونه‌برداری ۳ ثانیه کمانی (۹۰ متر) نمود. نتایج مدل ارتفاعی رقومی قاره‌های زمین بین ۶۰ + و ۶۰ - درجه و با رزولوشن ۹۰ متر در بیضوی مبنای WGS84 در سال ۲۰۰۳ ارائه شد که برای کاربری‌های تداخل‌سنجی بسیار مناسب است. لذا داده‌های نسخه ۲/۱ مدل رقومی ارتفاعی SRTM دریافت شد.

¹ Shuttle Radar Topography Mission, SRTM

ثبت هندسی: برای ایجاد تداخل‌نما، ابتدا بایستی تصویر پیرو نسبت به تصویر پایه با دقتی در حدود $1/100$ بعد پیکسل، در هر دو مولفه‌های فاز و دامنه ثبت هندسی گردند. ثبت تصاویر شامل دو مرحله است: اول تغییر موقعیت هر پیکسل در تصویر پیرو نسبت به تصویر پایه و دوم محاسبه مجدد دامنه و فاز پیکسل‌ها با درونیابی برای هر پیکسل در تصویر پیرو. بعد از ثبت هندسی کردن دو تصویر، پیکسل‌های مشابه در هر تصویر متناظر با نقطه‌ای مشابه در روی زمین خواهند بود.

ایجاد تداخل‌نماها: فاز حاصل از دو تصویر SLC نسبت به یکدیگر تفاضل یافته و در نتیجه تداخل‌نگار تولید شد. این اختلاف فاز بین دو تصویر با ضرب مختلط دو تصویر حاصل می‌شود.

حذف اثر توپوگرافی: از آنجا که اختلاف فازهای حاصل (Df_{int}) علاوه بر میزان جابجایی سطح زمین (Df_{def})، دارای اثر توپوگرافی (Df_{topo})، نویز (Df_{noise})، اتمسفر (Df_{atm})، کرویت زمین ($Df_{earth-cur}$) و خطای مداری ماهواره (Df_{orbit}) می‌باشد، بایستی این اثرات از تداخل‌نماها حذف می‌شدند تا بتوان به میزان جابجایی سطح زمین پی‌برد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، اثر توپوگرافی حذف می‌شود. در همین گام، حذف اثر توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ماهواره راداری ناسا (SRTM) با توان تفکیک مکانی ۹۰ متر منطقه صورت گرفت. در گام‌های بعد نیز سایر اجزای دیگر این معادله حذف شدند تا میزان جابجایی سطح زمین مشخص شود.

۶- فیلتر تطبیقی و بررسی همدوسی: سه عارضه که در تداخل‌نما ممکن است موجود باشند، شامل Ramp (خطوطی با جهت دلخواه مثل برفک و قابل اصلاح با فیلتر تطبیقی یا گلدشتاین)، Jump (پریش از یک مقدار فاز به مقداری بیش از ۳ برابر آن با اختلاف یک پیکسل و باعث نوارنوار شدن تصویر) و Bamp (مثل یک کوه تنها که با اطراف خود تفاوت ارتفاع بسیاری دارد و مثل یک

کیلومتر در ۱۰۰ کیلومتر) زیاد بود و تنها شهر اراک نیاز بود، در مرحله دوم، برش شهر اراک صورت گرفت.

۳- استخراج مدل رقومی ارتفاع شهر اراک: با توجه به این‌که کشور ایران دارای ژئوئید نیست، از مدل رقومی ارتفاع SRTM استفاده شد. مبنای مدل رقومی ارتفاع SRTM، ژئوئید می‌باشد؛ اما مبنای محاسبات، الیپسویید است. لذا در مرحله سوم، مدل رقومی ارتفاع شهر اراک استخراج و الیپسویید از ژئوئید جدا شد. همچنین فرمت آن نیز به فرمت خواندنی نرم‌افزار SARscape تبدیل شد. مدل رقومی ارتفاع باید دارای سیستم کارتوگرافی باشد. لذا سیستم مبنای WGS84 انتخاب شد.

۴- تعیین خط مبنای مکانی جفت تصاویر و تعیین تداخل‌نماها: از نظر تئوری، با داشتن ۱۴ تصویر، تعداد $\binom{14+13}{2}$ تداخل‌نما می‌توان تشکیل داد. اما انتخاب تداخل‌نما باید براساس طول خط مبنا (معیار مکانی) و مدت‌زمان بین دو تصویر (معیار زمانی) صورت گیرد. از نظر تئوری بایستی ماهواره در گذر بعد، دقیقاً منطقه مورد پوشش در گذر قبل را بپوشاند تا طول خط مبنا صفر شود. اما این اتفاق به ندرت رخ می‌دهد. چراکه ماهواره به‌جای مسیر مستقیم، در تیوب حرکت می‌کند. لذا به طول خط مبنای کوچک در تصاویر، اکتفا می‌شود. از طرفی تکنیک تداخل‌سنجی راداری قادر به کشف و شناسایی پدیده‌هایی با فرکانس بالا مانند زلزله و آتشفشان است و برای جابجایی‌های آهسته جوابگو نمی‌باشد؛ چرا که با عدم همبستگی زمانی روبرو می‌شویم. بنابراین نمی‌توان از تداخل‌نماهای حاصل از فواصل زمانی طولانی، اطلاعات را بازیابی کرد. فاصله زمانی بین دو تصویر نباید به اندازه‌ای طولانی باشد که باعث ایجاد ناهمدوسی شود. در نهایت ۴ تداخل‌نما که هر دو معیار مکانی و زمانی را داشتند، انتخاب شدند.

۵- ایجاد تداخل‌نماها: ابتدا ثبت هندسی، سپس ایجاد تداخل‌نماها و در نهایت حذف اثر توپوگرافی انجام شد.

۸- ایجاد نقاط کنترل زمینی: قبل از تعیین میزان جابجایی، نقاطی به عنوان نقاط کنترل زمینی (GCP) مشخص شدند. این نقاط دارای سه شرط عدم جابجایی، عدم ناهمبستگی و عدم قرارگیری روی توپوگرافی بودند.

۹- کنترل مجدد و مسطح‌ساختن تداخل‌نما: پس از انجام مراحل قبل و قبل از تعیین میزان جابجایی، خروجی‌ها یک بار دیگر فراخوانده شدند تا دوباره تمام خروجی‌ها این بار با هم چک شوند.^۳ از طرفی فرینج‌های موجود در یک تداخل‌نما فقط از توپوگرافی تاثیر نمی‌پذیرفتند. بلکه انحنای زمین نیز در آن دخیل بود. اثر فاز ناشی از انحنای بیضوی زمین از تداخل‌نما حذف شد و فقط فرینج‌های مربوط به جابجایی باقی ماند. به این عمل مسطح‌ساختن تداخل‌نما گویند.^۴ در این مرحله ممکن است Ramp‌هایی در تصویر باقی مانده باشد که یک صفحه برازش داده و فاز آنها از کل تصویر کم می‌شود. یک نقطه رفرنس که فاز صفر دارد نیز مشخص نموده تا سایر اعداد نسبت به آن حساب شوند.

اجرای این مرحله برای تبدیل صحیح اطلاعات فاز اصلاح‌شده به ارتفاع (به منظور تولید مدل رقومی ارتفاع در روش InSAR) یا مقادیر جابجایی (ساخت نقشه جابجایی در روش D-InSAR) ضروری است. این مرحله باعث می‌شود مدار، اصلاح شود (اشتباهات ممکن تصحیح شوند)؛ انحراف فاز محاسبه شود و رمپ‌های ممکن فاز حذف شوند تا فاز تداخل‌نما در مرحله ۵، صرفاً میزان جابجایی در راستای خط دید رادار را نشان دهد. برای اجرای این مرحله، فایل نقاط کنترل زمینی از قبل مطابق گام قبل می‌بایست ایجاد شود.

۱۰- تبدیل فاز به جابجایی و زمین‌مرجع نمودن: مقادیر مطلق فاز بازیابی‌شده مسطح‌شده در مرحله قبل، به جابجایی تبدیل شده و زمین‌مرجع شد. هر چرخه 2π (یک فرینج) از فاز تفاضلی، مربوط به نصف طول موج جابجایی در امتداد جهت Slant Range (جهت دید

گنبد، همه فازها را تاثیر می‌دهد و قابل اصلاح با فیلتر Boxcar) هستند. به منظور کاهش نویز، فیلتر تطبیقی اعمال شد. فیلتر تطبیقی، یک فیلتر گوسین است که ماهیت داده‌ها و مقادیر فاز را تغییر نمی‌دهد و صرفاً درون‌یابی انجام می‌دهد. برای مواقعی که جابجایی سطح زمین وجود دارد، مناسب است و مشکل تداخل‌نما را حل می‌کند.

فرایند تداخل‌نگاری زمانی موفقیت‌آمیز است که درجه‌ای از شباهت یا همبستگی در ویژگی‌های سطحی زمین بین دو زمان برداشت تصویر وجود داشته باشد. در مناطق معتدل، همبستگی بین تصاویر با توجه به تغییرات پوشش گیاهی و متفاوت بودن شرایط آب و هوایی کاهش می‌یابد که به آن عدم همبستگی زمانی گویند و در مناطق خشک و بیابانی، همبستگی بین تصاویر تا حد بالایی حفظ می‌شود. در زنجیره فرایند تداخل‌نگاری، در این مرحله، تصویری با عنوان تصویر همبستگی^۱ ایجاد می‌شود که همبستگی موجود بین پیکسل‌های متناظر را در دو تصویر نشان می‌دهد. همبستگی باید همواره برای پی‌بردن به مناسب بودن یا نبودن تصاویر SAR برای تشکیل تداخل‌نما اندازه‌گیری شود.

۷- بازیابی فاز: با افزایش ارتفاع عوارض، اختلاف فاز نیز افزایش می‌یابد. به دلیل طبیعت تصویربرداری رادار با درجه مصنوعی، مقدار مطلق فاز هر کدام از تصاویر (و به تبع آن اختلاف فاز در یک تداخل‌نما) نامعلوم است. اما داده‌های فاز موجود، به صورت نهان‌شده در بازه ۰ تا 360 درجه است. برای محاسبه ارتفاع زمین و تولید DEM، بازیابی مقدار مطلق فاز با استفاده از فاز نهان‌شده انجام گرفت. به بیان ساده‌تر در این مرحله، ناپیوستگی‌های موجود در فاز (در مناطق با همبستگی زیاد) از بین می‌رود و فاز ایتترفروگرام که بصورت دوره‌ای می‌باشد، بصورت پیوسته در می‌آید. از الگوریتم جریان با کمترین هزینه^۲ به منظور بازیابی فاز استفاده شد.

³ Refinement⁴ Re-flattening¹ Coherence Image² Minimum Cost Flow, MCF

۱۳۸۳ انجام گردیده و بررسی‌ها و تفاسیر بر روی این دوره زمانی ۱۹ ساله انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج بکارگیری روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری

نتایج پردازش ۱۰ مرحله‌ای داده‌ها توسط روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به شرح زیر است:

۱- خروجی مرحله ۱ (تصویر راداری) به خوانایی تصویر اپتیکی نیست و از ارائه آن خودداری شده است. چرا که در آن دامنه و فاز مخلوط هستند. در گام پنجم، پس از جداسازی این دو، تصویر دامنه خوانا می‌شود. ضمن اینکه تصویر راداری در راستای رنج کشیده می‌شود و اصطلاحاً Side Look است و آزیموت در آن کمپرس می‌شود. در گام پنجم، با تعریف یک نسبت، آزیموت و رنج به جای خود شیفت داده می‌شوند. وسعت تصویر (حدود ۱۰۰ کیلومتر در ۱۰۰ کیلومتر) بود که بخش‌های وسیعی از استان‌های مرکزی و لرستان را دربرگرفته است. لذا شهر اراک از این تصویر بزرگ، برش زده شد.

۲- به دو دلیل، محدوده انتخاب‌شده برش، نسبتاً بزرگ‌تر از شهر اراک بود. دلیل اول شیفت تصاویر بود که با انتخاب محدوده وسیع‌تر، محدوده شهری در همه تصاویر وجود داشته باشد. دلیل دوم، توانایی انتخاب نقاط کنترل زمینی بود. مناطق روی توپوگرافی و مناطق شهری نمی‌توانند نقاط کنترل زمینی مناسبی باشند. لذا دامنه انتخاب این نقاط، با انتخاب محدوده وسیع‌تر افزایش یافت. مناطق جنوبی شهر به سبب قرارگرفتن در توپوگرافی، صرفاً به‌خاطر شیفت تصاویر ادامه یافت. اما مناطق شمال، شمال غرب و شمال شرق اراک (تا تالاب میقان) به‌خاطر شیفت تصاویر و عدم قرارگرفتن در توپوگرافی، اندکی بیشتر ادامه یافت. تالاب میقان در محدوده برش قرار نگرفت. به این‌خاطر که تغییرات وسعت و سطح آب در آن زیاد است و با توجه به این‌که ماهواره ENVISAT در محدوده C-Band قرار دارد، توانایی گذر آن از سطح آب به اندازه کافی نیست و نتایج

سنجنده (SAR) می‌باشد. زمین‌مرجع نمودن نیز با توجه به روش Range-Doppler و تبدیل مختصات با استفاده از روش‌های کارتوگرافی انجام شد. اختلاف اساسی با زمین‌مرجع نمودن معمولی این است که معادلات Range-Doppler به صورت همزمان در هر دو آنتن اعمال می‌شود و نه تنها بدست آوردن جابجایی هر پیکسل را ممکن می‌سازد، بلکه مکان آن‌ها (مختصات شرقی و شمالی) را نیز در یک سیستم مرجع داده‌شده بدست می‌دهد.

اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری

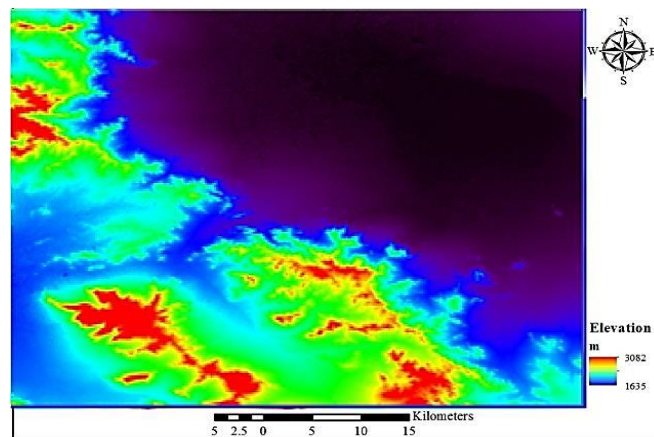
یکی از روش‌هایی که با استفاده از آن می‌توان تغییرات ارتفاعی مناطق را بررسی نمود، استفاده از مشاهدات ترازیبی است. سازمان نقشه‌برداری کشور که متولی ایجاد شبکه‌های مبنایی درجه ۱، ۲ و ۳ در کشور است و شبکه نسبتاً متراکمی برای تعیین ارتفاع در کشور دارد، با استفاده از روش ترازیبی دقیق، دو مرتبه اقدام به تعیین ارتفاع شبکه درجه یک کشور نمود (آمیغی و همکاران، ۱۳۸۸). با توجه به تکرار مشاهدات ترازیبی شبکه درجه یک کشور به طول ۳۱۰۰۰ کیلومتر، امکان بررسی تغییرات ارتفاعی این مسیرها موجود بود. مشاهدات این شبکه یک‌بار به طور کامل از سال ۱۳۶۰ شروع و تا سال ۱۳۷۷ با تجهیزات اپتیکی (دستگاه ترازیب N3 WILD با دقت ۰/۲ میلیمتر در یک کیلومتر) انجام شده است. سری دوم با بهینه‌سازی طراحی و سرعت مشاهدات طی سال‌های ۸۰ تا ۸۸ با تجهیزات رقومی (دستگاه ترازیب DINI2 ZEISS با دقت ۰/۳ میلیمتر در یک کیلومتر به صورت ترازیبی رفت و برگشت) صورت گرفت.

در این تحقیق برای بررسی میزان فرونشست شهر اراک، از نتایج مسیر BHBT (بروجرد-سلفچگان) که از شبکه‌های ترازیبی درجه یک کشور محسوب می‌شود، استفاده شد. این مسیر از حوزه آبخوان‌های درود-بروجرد، ملایر، نهرمیان، شازند، اراک و نزار-سلفچگان عبور می‌کند. سری اول مشاهدات ترازیبی در محدوده مورد نظر مربوط به سال ۱۳۶۴ و سری دوم مشاهدات در سال

ارتفاعات موثر می‌باشد. بریدگی موجود در شکل ۴ که به سمت جنوب غرب است، جاده اراک شازند است. ۴- سعی شد داده‌هایی که مربوط به ماه‌های ابتدایی سال میلادی هستند انتخاب نشوند. در این ماه‌ها به احتمال فراوان سطح زمین دارای برف است. با توجه به این‌که سطح برف، C-Band را برمی‌گرداند، سطح بالای برف به عنوان سطح زمین در نظر گرفته می‌شود و نتایج حاصله دچار مشکل می‌شوند. چهار تداخل‌ناما که دو معیار زمانی و مکانی را داشتند انتخاب و پردازش روی آن‌ها انجام گردید (جدول ۲). محاسبات مراحل ۵ تا ۱۰ برای هریک از ۴ تداخل‌نمای انتخابی صورت گرفت.

را دچار مشکل می‌کند. مقایسه حجم تصاویر بدون برف (خروجی مرحله اول با سایز ۱/۳ گیگابایت) و با برف (خروجی مرحله دوم با سایز ۵۰ مگابایت)، نشانگر اهمیت برف محدود است که تاثیر بسیاری در زمان پردازش داشت.

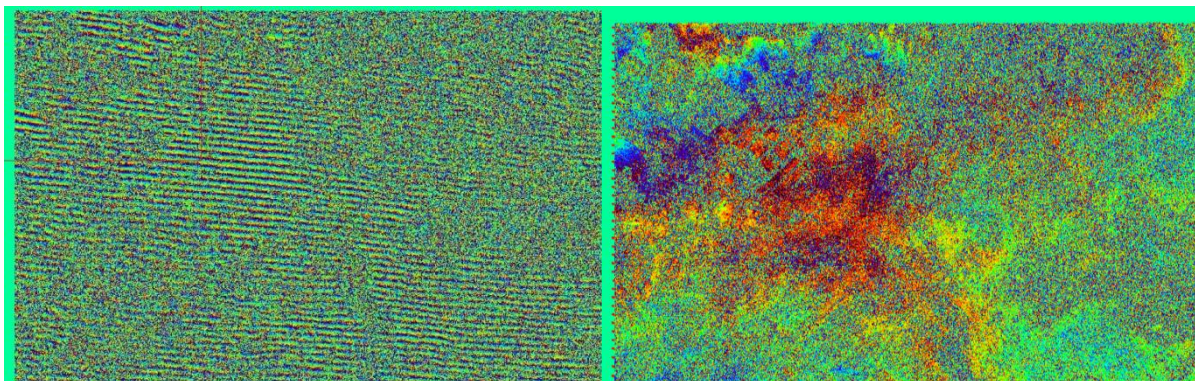
۳- افزونه SARscape، برگه‌های دریافت‌شده مدل رقومی ارتفاع SRTM را کنار هم قرار داد. سپس سطح مورد نیاز به ابعاد اجتماع ۱۴ تصویر را برف زد. با استخراج الیسوید از ژئوئید، مدل رقومی ارتفاع شهر اراک حاصل شد (شکل ۴). قسمت مرکز، شمال و شرق شکل ۴، شهر اراک را نشان می‌دهد. قسمت جنوب شکل ۴، ارتفاعات نظم‌آباد و سفیدخانی و قسمت غرب آن



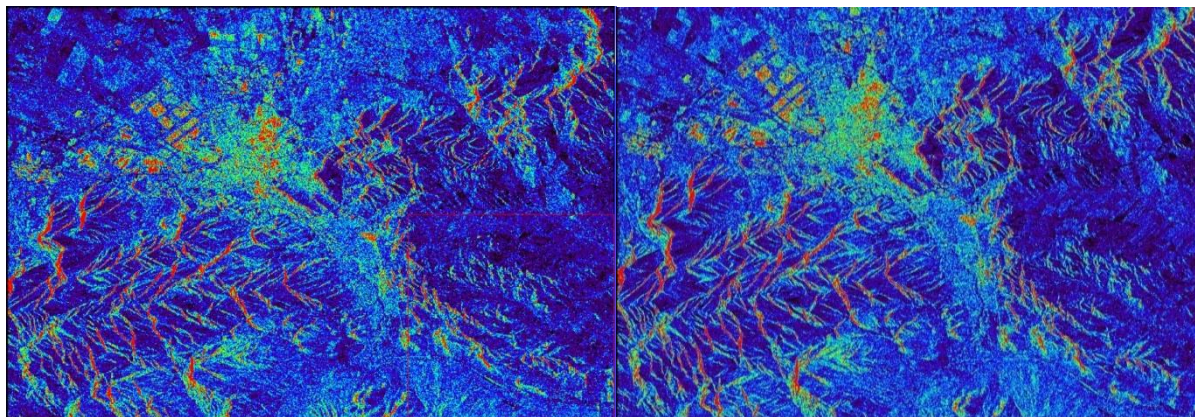
شکل ۴. مدل رقومی ارتفاع شهر اراک

جدول ۲. مشخصات تداخل‌نماهای انتخاب‌شده

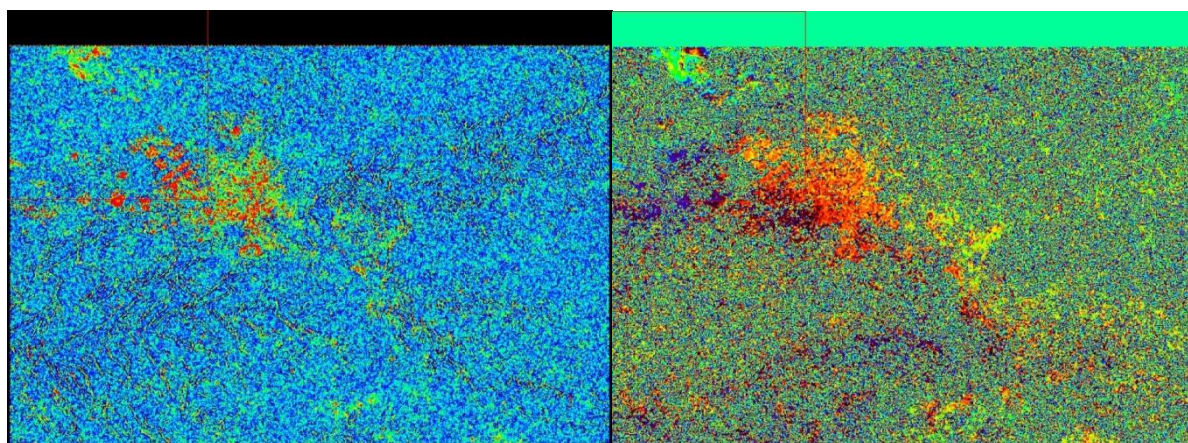
تداخل‌نما	۲۰۰۳/۰۸/۰۶-۲۰۰۴/۰۹/۲۹	۲۰۰۴/۰۶/۱۶-۲۰۰۵/۱۱/۲۳	۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۵/۰۸/۱۰	۲۰۰۵/۰۹/۱۴-۲۰۰۷/۱۱/۲۸
طول خط مبنا (m)	۱۹	۷۰	۷۸	۹۳



شکل ۵. تداخل‌نماها با (چپ) و بدون (راست) اثر توپوگرافی



شکل ۶. جدایی مقادیر دامنه از فاز دو تصویر



شکل ۷. تداخل‌نمای فیلترشده (راست) و نقشه همدوسی تداخل‌سنجی (چپ) برای تداخل‌نمای ۲۰۰۵/۰۹/۱۴-۲۰۰۷/۱۱/۲۸

دامنه^۱ زیاد) هستند. نکته مهم در این تصاویر، چپ‌وراست‌شدن^۲ است. به عبارت دیگر، مناطق نسبت به مرکز عمودی، قرینه شده‌اند. تفاوت هندسه مایل^۳ و زمینی^۴، علت این امر است. اما به بیان ساده‌تر، تصاویر اخذشده، نزولی (دید رادار به غرب) بودند. لذا اولین سلولی که توسط ماهواره برداشت می‌شود، در سمت شمال شرق تصویر است. در حالی که اولین سلول در نرم‌افزار، در سمت شمال غرب است. لذا تصاویر چپ‌وراست‌شدند. با همین منطق، اگر داده‌ها صعودی بودند، تصاویر، بالاپاین^۵ می‌شدند.

۵- مهم‌ترین خروجی‌ها (به‌عنوان نمونه بر مبنای تداخل‌نمای ۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۵/۰۸/۱۰) شامل تداخل‌نماها با و بدون اثر توپوگرافی (شکل ۵) و تصاویر دارای جدایی مقادیر دامنه از فاز (شکل ۶) بودند. اثر توپوگرافی به این خاطر از تداخل‌نماها حذف می‌شود که با محاسبه فازها، سطح مبنای آنها، سطح زمین نباشد و الپسوید باشد. در تصویر با اثر توپوگرافی، فرینج‌های زیادی موجود است که در تصویر بدون اثر توپوگرافی بسیاری از آنها از بین رفته‌اند. لذا توپوگرافی، فرینج کاذب ایجاد می‌کند. مناطق شمالی هر دو شکل که دارای سیگنال نیست، مناطقی است که در اشتراک دو تصویر نبوده است. در شکل ۶، خوانایی تصاویر بسیار بهتر شده است. چراکه نسبت Multi-Look در آن رعایت شده است. در این تصاویر، مناطق شهری به خاطر پراکنش جانبی، روشن

¹ Power

² FlipLR

³ Slant Range

⁴ Ground Range

⁵ FlipUD

برای مناطق غیرشهری با تغییرات زیاد (به‌خصوص زمین‌های کشاورزی) را تایید می‌کند. با این توضیح که روش D-InSAR بیشتر مناسب مناطق شهری است و مبتنی بر پهنه است. دو اثر عدم همبستگی زمانی به دلیل پوشش گیاهی و عدم همبستگی مکانی به دلیل بزرگ بودن فاصله تصویربرداری دو سنجنده باعث این مشکل می‌شوند. سال ۲۰۰۱ کشف شد که تعدادی عوارض روی سطح زمین مثل جاده و پل، ویژگی بازپراکنشی ثابتی در طول زمان دارند. حال اگر این عوارض شناسایی شوند و پایش فرونشست روی این نقاط صورت گیرد، می‌توان به خطاهای عدم همبستگی زمانی و مکانی فائق آمد و این امر منجر به ارائه روش پراکنش‌کننده‌های دائمی^۱ گردید. این روش مبتنی بر نقاط است و در مناطق غیرشهری هم جواب می‌دهد.

۸- نمونه‌ای از انتخاب نقاط کنترل زمینی، (به‌منظور نمایش بهتر با بهره‌گیری از نرم‌افزار Paint)، در شکل ۸-۸ راست ارائه شده است. محدوده‌هایی که روی آنها خط کشیده شده است، روی توپوگرافی و مناطق شهری هستند که نقاط مناسبی نبودند. این نقاط هر سه شرط را داشتند. برخی از این نقاط روی جاده‌های اصلی (بدون جابجایی) در مناطق غیر شهری و غیر کوهستانی انتخاب شدند.

۹- مهم‌ترین خروجی‌ها شامل تداخل‌نمای فیلترشده مسطح و تداخل‌نمای بازیابی‌شده مسطح بود. اگر پس از این مرحله، هنوز تصویر راداری نوارنوار بود، انتخاب نقاط GCP اشتباه بوده است و باید مجدداً مراحل ۸ و ۹ را انجام داد.

۱۰- مهم‌ترین خروجی‌ها شامل تداخل‌نمای بازیابی‌شده مسطح زمین‌مرجع (آخرین و مهم‌ترین محصول فرایند تداخل‌نگاری به روش D-InSAR که مقدار جابجایی را در واحد متر بیان می‌کند) و فایل مناسب برای نرم‌افزار Google Earth حاصل شدند. چهار تداخل‌نمای بازیابی‌شده مسطح زمین‌مرجع که بیانگر میزان جابجایی

۶- مهم‌ترین خروجی‌ها (به‌عنوان نمونه بر مبنای تداخل‌نمای ۲۸/۱۱/۲۰۰۷-۱۴/۰۹/۲۰۰۵) شامل تداخل‌نمای فیلترشده با فاز نویز کاهش‌یافته و نقشه همدوسی تداخل‌سنجی که نشان‌دهنده کیفیت فاز است، بود (شکل ۷). هر دو شکل در هندسه Slant Range هستند. لذا مناطق نسبت به مرکز عمودی، قرینه شده‌اند. در شکل ۷-۷ راست، مناطق درگیر جابجایی سطح زمین (شهر اراک) کاملاً مشخص هستند. در شکل ۷-۷ چپ نیز مناطق شهری دارای همدوسی بیشتری نسبت به سایر نقاط هستند.

بنا به تجربه در مناطقی که نرخ فرونشست زیاد است، حداکثر فاصله زمانی بین تصاویر کمتر از یک سال و در مناطق دارای نرخ فرونشست کم، حداکثر فاصله زمانی بین تصاویر کمتر از سه سال باید انتخاب شود. مثلاً می‌توان یک تداخل‌نما حاصل از تصویر ۲۸/۰۱/۲۰۰۴ تا ۲۳/۰۹/۲۰۰۹ (با بیش از ۵ سال فاصله زمانی و با طول خط مبنای مناسب ۲۳ متر) ایجاد نمود و تغییرات حاصل را مورد ارزیابی قرار داد. اما هرچه فاصله زمانی بین تصاویر زیاد شود به همان نسبت، همدوسی تصاویر کاهش یافته و نویز تصاویر افزایش می‌یابد و دقت نتایج کاهش پیدا می‌کند. لذا باید تداخل‌نگارهایی با فاصله زمانی کوتاه ساخت.

۷- مهم‌ترین خروجی (به‌عنوان نمونه بر مبنای تداخل‌نمای ۲۹/۰۹/۲۰۰۴-۰۶/۰۸/۲۰۰۳) تداخل‌نمای بازیابی‌شده (شکل ۸-۸ چپ) می‌باشد. در این شکل، مناطق شهری که در گام قبل دارای همبستگی مناسبی بودند، دارای سیگنال بودند. اما مناطق غیرشهری به‌سبب همبستگی کم، نویز بودند و با رنگ سیاه مشخص هستند. به‌جز شهر اراک، بقیه مناطق دارای همبستگی کم بودند و پایش فرونشست آنها با روش D-InSAR امکان‌پذیر نبود. با این توضیح که در بررسی‌های اولیه برای تصاویر برش-نخورده، برای قسمت اعظمی از دشت اراک، به‌جز شهر اراک بقیه مناطق دارای سیگنال نبودند. این مورد، دانسته‌های قبلی در مورد عدم کارایی روش D-InSAR

^۱ Persistent Scatterers, PS

داشتند.

نتایج اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری

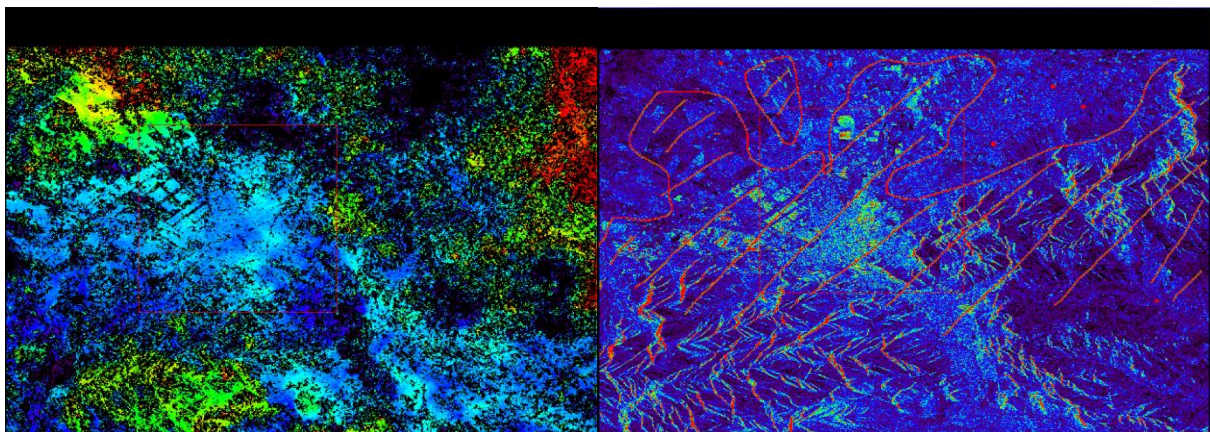
با توجه به نتایج سری اول مشاهدات ترازیبی در مسیر بروجرد-سلفچگان، مربوط به سال ۱۳۶۴ و نتایج سری دوم مشاهدات در سال ۱۳۸۳، فرونشست زمین در برخی از نقاط این مسیر مشاهده گردید که حداکثر میزان فرونشست مشاهده‌شده، در اراک به میزان $190\text{mm} \pm 0.8$ mm/km ایجاد شده است. به عبارت دیگر، در این ۱۹ سال، شهر اراک ۱۹ سانتی‌متر فرونشست کرده است. لذا نتایج اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی راداری (نرخ کمایش یک سانتی‌متر در سال)، با استفاده از مشاهدات ترازیبی سازمان نقشه‌برداری کشور، دقت زیاد روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را تایید نمود.

بررسی تاثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب در رخداد پدیده فرونشست شهر اراک

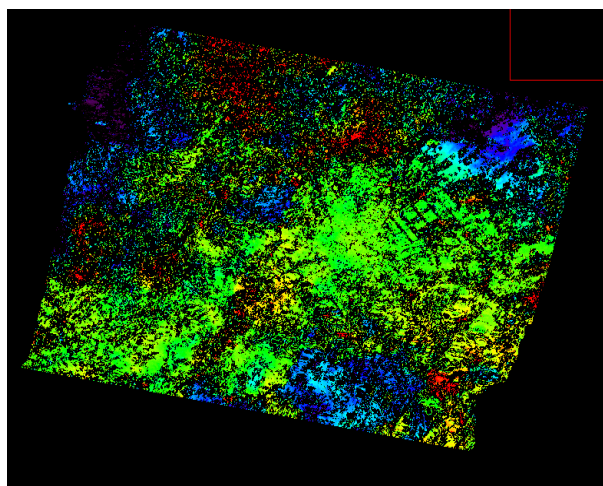
بر اساس نتایج تحقیق حاضر، شهر اراک بیش از استاندارد جهانی (۴ میلی‌متر در سال) دارای فرونشست می‌باشد. اما نسبت به برخی از شهرهای ایران (مانند تهران، مشهد، شیراز، اصفهان و کرمان)، درگیری کمتری با فرونشست داشت. این مساله از دو دیدگاه زمین‌شناسی و منابع آب قابل بررسی است.

عمودی در فاصله زمانی دو تصویر است، در شکل ۹ ارائه شده است. در شکل ۹، به سبب زمین‌مرجع‌شدن، شکل‌ها در هندسه Ground Range هستند و جهات موجود در آن‌ها، منطبق بر واقعیت است.

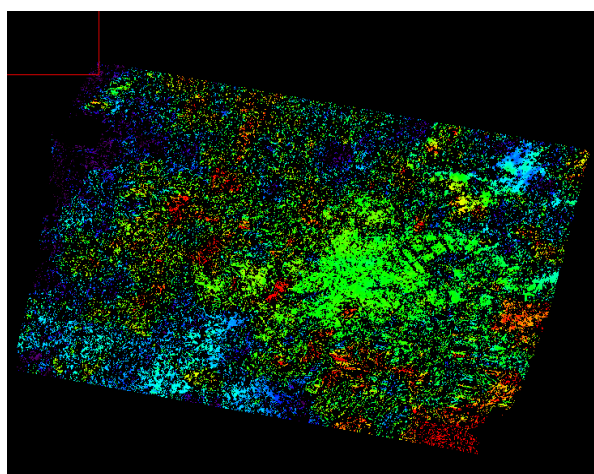
به نتایج مناطقی می‌توان اعتماد نمود که پیکسل‌های زیادی در آن مناطق همبسته هستند. چراکه دقت تداخل‌سنجی طبق رابطه $\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{2\gamma^2}} \cdot \frac{\lambda}{4\pi}$ با همدوسی γ ارتباط دارد. مقادیر بالای این پارامتر، بیانگر دقت پایین تداخل‌سنجی می‌باشد. به جز مناطق شهری (در مرکز تصویر رو به شرق)، بقیه نقاط دارای گسستگی (همدوسی کمتر از حد آستانه) زیادی هستند که دقت نتایجشان را با خطا مواجه می‌سازد. مقایسه تداخل‌نمای ۲۰۰۷/۱۱/۲۸-۲۰۰۵/۰۹/۱۴ (با بازه زمانی حدود ۲۶ ماه در شکل ۹-د) با تداخل‌نمای ۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۵/۰۸/۱۰ (با بازه زمانی حدود ۱۰ ماه در شکل ۹-ج) نشان می‌دهد تعداد پیکسل‌های ناهمبسته با افزایش فاصله زمانی دو تصویر، به شدت افزایش می‌یابد. برای تداخل‌نماهای ۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۵/۰۸/۱۰ و ۲۰۰۳/۰۸/۰۶-۲۰۰۵/۱۱/۲۳-۲۰۰۴/۰۶/۱۶-۲۰۰۵/۱۱/۲۸ و ۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۵/۰۸/۱۰ مقدار فرونشست به ترتیب ۱/۴۷، ۰/۷، ۰/۵ و ۲ سانتی‌متر برای میدان شهدای اراک محاسبه گردید. همچنین مناطق شهری، نرخ فرونشست تقریباً یکسان



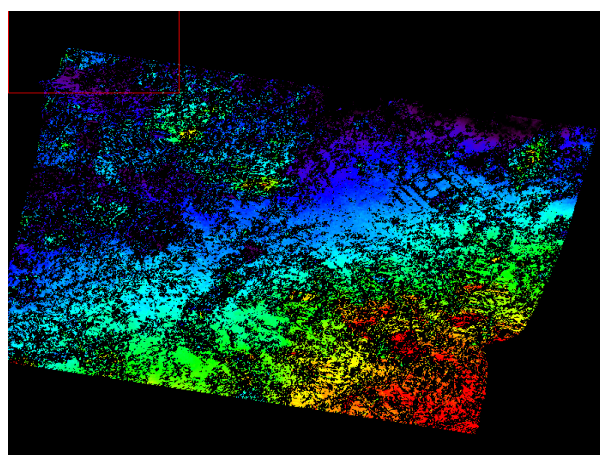
شکل ۸- نقشه بازیابی فاز تداخل‌نمای ۲۰۰۳/۰۸/۰۶-۲۰۰۴/۰۹/۲۹ (چپ) و تولید نقاط GCP (راست)



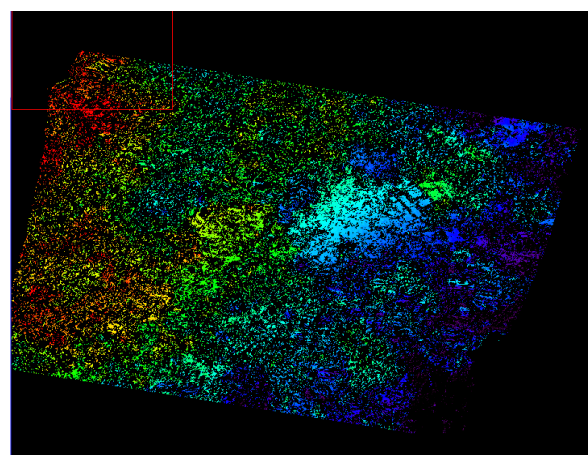
الف - ۲۰۰۳/۰۸/۰۶-۲۰۰۴/۰۹/۲۹



ب- ۲۰۰۴/۰۶/۱۶-۲۰۰۵/۱۱/۲۳



ج- ۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۵/۰۸/۱۰



د- ۲۰۰۵/۰۹/۱۴-۲۰۰۷/۱۱/۲۸

شکل ۹- چهار تداخل‌نمای بازیابی شده مسطح زمین مرجع شده

بیشترین استحکام را گرفته و خوب روی هم می‌نشینند. ضمن اینکه موقعیت مخروطافکنه اراک باعث می‌شود ریزدانه‌ها شسته شوند و باقی نمانند. وقتی ریزدانه زیاد و وزن رسوبات سنگین باشد و دانه‌ها توانایی فشرده شدن داشته باشند، فرونشست رخ می‌دهد. دانه‌های گرد در ابتدا آرایش مکعبی به خود می‌گیرند و خیلی فشرده شده و رومبوه‌ای می‌شوند و بیش از آن توانایی فشرده شدن ندارند. همچنین سنگ کف دشت اراک آهکی نیست و مارن و اسلیت است. لذا برخلاف دشت کیودراهنگ که دارای سنگ کف آهکی است، انتظار فروچاله در دشت اراک وجود ندارد.

از دید زمین‌شناسی، طبق شکل ۱، شهر اراک در جنوب غرب دشت اراک و در ناحیه کوهپایه‌ای قرار گرفته (برخلاف کرمان، کیودراهنگ و رفسنجان که در مرکز دشت هستند)، ضخامت آبخوان و عمق سنگ کف در آن کم است (برخلاف جنوب تهران که ضخامت آبخوان در آن زیاد است). از طرفی رسوبات دشت اراک به‌خصوص در مخروطافکنه دارای شکل دیسکی هستند (نسبت طول و عرض به ارتفاعشان زیاد است) و از تخریب ارتفاعات اسلیتی اطراف اراک حاصل شده‌اند و به صورت ورقه‌ای فرسایش می‌یابند. لذا با رسوب لایه‌ها روی هم، ساختاری به نام اینوریکاسیون ایجاد می‌شود. لذا

نتیجه‌گیری

در حوالی میدان شهدای اراک، فرونشست در فواصل زمانی ۲۰۰۴/۰۹/۲۹-۲۰۰۳/۰۸/۰۶، ۲۰۰۵/۱۱/۲۳-۲۰۰۴/۰۶/۱۶، ۲۰۰۵/۰۸/۱۰-۲۰۰۴/۰۹/۲۹ و ۲۰۰۷/۱۱/۲۸-۲۰۰۵/۰۹/۱۴ به ترتیب ۱/۴۷، ۰/۷، ۰/۵ و ۲ سانتی‌متر محاسبه گردید. لذا این ۴ تداخل‌نمای بازیابی شده مسطح‌شده زمین مرجع شده برای مناطق مرکزی شهر اراک، نرخ فرونشست کمابیش یک سانتی‌متر در سال را محاسبه نمودند. نقاط دیگر شهر نیز نرخ فرونشست تقریباً یکسان داشتند. نرخ نزولی ارتفاع سطح زمین، با نرخ نزولی هیدروگراف تطابق دارد؛ اما به‌خاطر موقعیت شهر اراک، فرونشست این شهر بیشتر تحت تاثیر عوامل زمین‌شناسی است و احتمالاً در دشت اراک، مقدار آن بیشتر و تحت تاثیر عوامل منابع آب باشد. نتایج اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با استفاده از مشاهدات ترازیبی سازمان نقشه‌برداری کشور ($190\text{mm} \pm 0.8\text{ mm/km}$ در ۱۹ سال برای شهر اراک)، دقت مناسب روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را تایید نمود.

پیشنهاد می‌شود مدل رقومی ارتفاع شهر اراک با روش InSAR و میزان فرونشست زمین با روش D-InSAR آبخوان دشت ساوه، غرب و جنوب کویر میقان تعیین شود. با توجه به اهمیت اکولوژیکی تالاب میقان، با روش D-InSAR می‌توان هم تغییرات وسعت و سطح آب در آن را (با استفاده از ماهواره‌های X-Band نظیر TerraSAR-X که قدرت نفوذ در آب را ندارند) بررسی نمود و هم میزان فرونشست احتمالی زمین در آن را (با استفاده از ماهواره‌های L-Band نظیر ALOS-PALSAR که قدرت نفوذ در آب را دارند) محاسبه نمود. استفاده از روش پراکنش‌کننده‌های دائمی برای پایش فرونشست زمین‌های کشاورزی و زمین‌های با تغییرپذیری زیاد، استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel برای بررسی فرونشست سال‌های اخیر در شهر و دشت اراک و مدل‌سازی

از آنجا که شهر اراک در جنوب غرب دشت اراک قرار دارد، با حرکت به شمال (دشت فراهان) و شرق (دشت خمین)، ضخامت رسوبات افزایش می‌یابد که پتانسیل فرونشست بیشتری را خواهد داشت. برای ادامه مطالعات در استان مرکزی، باید مناطقی که دارای ضخامت سفره زیادی هستند، برداشت زیادی دارند و سفره در آن مناطق تحت فشار است را در اولویت قرار داد. از جمله این مناطق می‌توان آبخوان دشت ساوه، غرب و جنوب کویر میقان را نام برد که دارای ضخامت سفره زیادی هستند. برای اطلاع از میزان ضخامت سفره، باید نقشه تراز سنگ کف را مدنظر قرار داد. مثلاً در شمال شرق دشت اراک نباید خیلی انتظار فرونشست داشت. چون در آن مناطق، بالآآمدگی سنگ کف وجود دارد. یا مثلاً در دشت فراهان خیلی نباید انتظار فرونشست داشت. چون ضخامت سفره در آنجا کم (حداکثر ۴۰ متر) است.

از دید منابع آب، با حرکت به شمال (دشت فراهان) و شرق (دشت خمین)، چاه‌های بیشتری (اعم از مجاز و غیرمجاز) وجود دارند و احتمال فرونشست با نرخ‌های بیشتر وجود دارد. با توجه به این‌که از سال ۱۳۹۱ به‌بعد، ورودی دشت اراک (۶۵ میلیون متر مکعب از حوضه خلیج فارس توسط سد کمال صالح) بیش از تخلیه (۵۰ میلیون متر مکعب) است، فرونشست مناطق شهری و جنوب شهر چندان تحت تاثیر برداشت نخواهد بود. به‌خصوص این‌که حدود ۴۰ چاه آب شرب از ابتدای سال ۱۳۹۱ از رده خارج شده‌اند. اگر فرونشست شمال دشت اراک (حداقل ۲۰ کیلومتر شمال شهر اراک) بررسی شود، احتمال تاثیر آب زیرزمینی بیشتر خواهد بود. گرچه نباید تاثیر اجرای شبکه فاضلاب و آسفالت خیابان‌ها که مانع تغذیه دشت اراک در شهر اراک شده را نادیده گرفت. با این توضیح که وزارت نیرو برای مقابله با فرونشست، علاوه بر بازنگری در جمع‌آوری فاضلاب شهری، طرح احیا و تعادل‌بخشی را مدنظر دارد.

مرکزی برای واگذاری طرح تحقیقاتی جایگزین خدمت سربازی تشکر می‌نماید. گزارش کامل طرح شامل توضیحات تکمیلی و پیاده‌سازی روش D-InSAR توسط افزونه SARscape 4.3 نرم‌افزار ENVI 4.8 برای خوانندگان محترم قابل ارسال است.

فرونشست اراک در اثر بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی با نرم‌افزار PMWIN نیز می‌تواند صورت گیرد.

سپاسگزاری

نگارنده از آژانس فضایی اروپا که داده‌های تحقیق را در اختیار قرار دادند و از شرکت سهامی آب منطقه‌ای

منابع مورد استفاده

- آقاییار، م.ص.، ملک‌پور، ا. و شفیع‌ی ثابت، ب. ۱۳۹۹. فرونشست ناشی از پمپاژ متغیر آب زیرزمینی در وضعیت لایه‌بندی خاک با کاربرد تابع تأثیر و داده‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله پژوهش آب ایران، ۱۴ (۳): .
- آمیغ‌پی، م.، عربی، س.، طالبی، ع. و جمور، ی. ۱۳۸۸. بررسی مناطق فرونشست در ایران با استفاده از روش ترازبایی دقیق. نقشه‌برداری، ۲۰ (۴): ۱-۱۲.
- جانباز فوتمی، م.، خلقی، م.، عبده کلاهچی، ع. و روستایی، م. ۱۳۹۹. بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی استان قزوین. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶ (۳): ۱۳۳-۱۴۷.
- شریفی‌کیا، م. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق - بهرمان. برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس)، ۱۶ (۳): ۷۷-۵۵.
- شمشکی، ا.، انتظام سلطانی، ا.، محمودپور، م. و بلورچی، م.ج. ۱۳۹۵. فرونشست زمین در ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۲۰ص.
- طاهری زنگی، ص.، واعظی هیر، ع. ۱۳۹۹. پتانسیل فرونشست دشت شازند ناشی از افت آب زیرزمینی با مدل وزن دهی و آنالیز صحت سنجی آن با استفاده از تداخل‌سنجی راداری. اکوهیدرولوژی، ۷ (۱): ۱۸۳-۱۹۴.

- Chang, Y. L., Tsai, T. L. and Yang, J. C. 2019. Flood hazard mitigation in land subsidence prone coastal areas by optimal groundwater pumping. *Journal of Flood Risk Management*. 12(2): 1-15.
- Hu, R.L , Yue ,Z.Q, Wang, L.C, & Wang, S.J. 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76: 65- 77.
- DePrekel, K., Bouali, E. H. and Oommen, T. 2018. Monitoring the impact of groundwater pumping on infrastructure using Geographic Information System (GIS) and Persistent Scatterer Interferometry (PSI). *Infrastructures*. 3(4): 57.
- Ren, G., Buckeridge, J. and Li, J. 2014. Estimating land subsidence induced by groundwater extraction in unconfined aquifers using an Influence Function Method. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 141(7): 1-10.
- Tony, W., Martin, G. C. and Fred, G. B. 2005. Sinkhole and subsidence. Springer and Praxis Publishing, 383 pp.



Monitoring land subsidence due to geological and water resources factors using Differential Radar Interferometry method (Case Study: Arak city)

Mahmood Akbari^{1*}

1*) Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Arak University, Arak, Iran.
Corresponding author email: m-akbarii@araku.ac.ir

Received: 08-03-2021

Accepted: 16-05-2021

Abstract

The prohibition of the entire area of the plains of the Markazi province and the impossibility of a new water withdrawal and occurrence of subsidence has caused the importance of monitoring of subsidence. On the other hand, the Differential Interferometry SAR (D-InSAR) is an efficient way to continuously, accurately and in a wide range monitor land subsidence. In this research, the D-InSAR method was used in the study of land subsidence in Arak city. To this purpose, 14 single-look complex images from the ASAR sensor of the ENVISAT mission were obtained in the range of C-Band by EOLi-sa software. The images were related to the Frame 2925 of the descending Track 421 with the VV polarization and the IMS mode. Ten processing steps were done by the SARscape software based on the four interferograms which had both the time and space criteria. On the other hand, the National Cartography Center has repeated the observations of the first-class network of the country for the city of Arak, located on the BHBT route (Borujerd-Salafchegan) in 1985 and 2004 and it measured $190\text{mm} \pm 0.8\text{mm} / \text{km}$ of subsidence in 19 years. Based on four geocoded reflat unwrapped interferograms, the subsidence rate was calculated about one centimeter at year, for the central regions of Arak (around the Shohada Square of Arak). The urban areas had also almost identical subsidence rate. Therefore, the results of validation of the D-InSAR method using the observations of the National Cartography Center confirmed appropriate accuracy of the D-InSAR method. The results of this study showed the impact of geological and water resources factors on subsidence and the necessity of protecting water and soil resources in development projects in Arak city.

Keywords: SARscape 4.3 extension; land subsidence; ENVISAT mission; EOLi-sa software.