

مطالعه فرونشست زمین در مسیرهای خطوط انتقال نیرو با استفاده از گرادیان‌های جابه‌جایی مستخرج از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری

حامد امیرخانی^۱، بهزاد وثوقی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

hamed.amirkhani@email.kntu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

vosoghi@kntu.ac.ir

(دریافت: خرداد ۱۴۰۴، تصویب: مهر ۱۴۰۴)

چکیده

مطالعه پدیده فرونشست زمین و جابه‌جایی‌های ناشی از آن به یکی از موضوعات مهم تحقیقاتی در جهان و به‌ویژه ایران تبدیل شده‌است. آنچه در بررسی این پدیده اهمیت دارد، ارزیابی مخاطرات آن است. اگرچه فرونشست زمین به‌عنوان پدیده‌ای مخرب شناخته می‌شود، اما هنگامی که گرادیان جابه‌جایی در پوسته زمین ایجاد گردد، فرونشست به‌صورت نامتقارن ظاهر شده و تهدیدی جدی برای سازه‌ها و زیرساخت‌ها خواهد بود. شواهد میدانی و مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد بخشی از دشت اشتهارد و قزوین به‌دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی برای مصارف صنعتی و کشاورزی دچار فرونشست شده‌است. در این محدوده، چندین خط انتقال نیرو با دکل‌های فشارقوی برق قرار دارند که فرونشست نامتقارن می‌تواند برای آن‌ها خطراتی جدی و جبران‌ناپذیر ایجاد کند. لذا این پژوهش به مطالعه فرونشست رخ داده در این دشت و در امتداد یکی از خطوط انتقال نیرو بین سال‌های ۲۰۱۸ الی ۲۰۲۳ با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری و گرادیان‌های جابه‌جایی مستخرج از آن می‌پردازد. به‌منظور بهره‌گیری از فناوری تداخل‌سنجی راداری، داده‌های سامانه LiCSAR توسط نرم‌افزار سری زمانی LiCSBAS پردازش شدند و برای محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی از روش عددی کمترین مربعات متحرک بازگشتی (RMLS) استفاده شد. نتایج نشان داد خط انتقال نیروی مورد مطالعه کاملاً در معرض فرونشست قرار دارد و بیشینه نرخ فرونشست در این منطقه و در امتداد خط انتقال نیروی مورد مطالعه به ترتیب ۸۰- و ۵۷- میلی‌متر بر سال تخمین زده شد. همچنین بیشینه اندازه گرادیان نرخ فرونشست در این منطقه و در امتداد خط انتقال نیروی مورد مطالعه به ترتیب ۱۱۴ و ۶۸ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال به‌دست آمد. در انتها با بررسی نیم‌رخ طولی گرادیان فرونشست در مسیر خط انتقال نیرو، مشاهده شد در مکان دکل‌های شماره ۸۳ و ۸۴ با نرخ فرونشست ۵۲- و ۵۱- میلی‌متر بر سال، اندازه گرادیان ۲۷ و ۲۴ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال و در مکان دکل‌های شماره ۳۰ و ۹۷ با نرخ فرونشست ۲۷- و ۱۳- میلی‌متر بر سال، اندازه گرادیان ۳۱ و ۳۹ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال برآورد شده‌است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که بین نرخ فرونشست و گرادیان آن رابطه مستقیمی وجود ندارد؛ از این‌رو، مطالعه گرادیان جابه‌جایی در تحلیل پدیده فرونشست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری، گرادیان جابه‌جایی، خطوط انتقال نیرو، فرونشست نامتقارن

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

از دیرباز یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی تهدیدکننده امنیت بشر، پدیده جابه‌جایی سطح زمین بوده‌است. ازجمله این پدیده‌ها می‌توان به جابه‌جایی‌های حاصل از تکتونیک، زلزله، زمین‌لغزش، آتشفشان و فرونشست^۱ اشاره کرد. فرونشست عبارت است از حرکت قائم رو به پایین یا نشست سطح زمین که در اثر عوامل طبیعی یا فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد و می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی باشد [۱]. فرونشست زمین یکی از پدیده‌های مخرب زمین‌شناسی شایع در سراسر جهان می‌باشد [۲] و به علت تلفات انسانی پایین در مقایسه با سایر پدیده‌های طبیعی و انسانی، کمتر موردتوجه جوامع انسانی قرار گرفته‌است [۳].

اگر جابه‌جایی ناشی از فرونشست در مناطق مجاور اختلاف چشمگیری داشته‌باشد، فرونشست نامتقارن رخ می‌دهد، بنابراین ساختمان‌ها و زیرساخت‌های در معرض آسیب، لزوماً در مناطقی با نرخ فرونشست زیاد قرار ندارند. خطر در جایی که یک گرادبان بزرگ در نرخ تغییر شکل وجود دارد، بالاتر است [۴]، زیرا فرونشست نامتقارن باعث ایجاد کرنش و خمش در لایه سطحی می‌شود که در نهایت منجر به ترک و شکستگی می‌شود [۵]. بنابراین، پدیده فرونشست زمین یکی از مخاطرات امروزی جوامع بشری است که می‌تواند به ساختمان‌ها، سازه‌ها، زیرساخت‌های حیاتی و ... آسیب‌های شدیدی وارد نماید.

از گذشته تا به امروز، تکنیک‌های متفاوتی به‌منظور پایش و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های ناشی از فرونشست زمین معرفی و به کار گرفته شده‌اند. تکنیک ترازیابی به‌واسطه جمع‌آوری مشاهدات زمینی، به‌عنوان قابل اطمینان‌ترین روش برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های قائم در سطح زمین شناخته شده‌است و دقتی در حد میلی‌متر دارد. اما برای رسیدن به پوشش مکانی و زمانی وسیع از میدان جابه‌جایی سطح زمین، مشاهده حجم گسترده‌ای از نقاط روی سطح زمین موردنیاز است که این کار عملاً با ترازیابی غیرممکن است. سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۲ می‌تواند اطلاعات جابه‌جایی سطح زمین را به‌صورت پیوسته در زمان

جمع‌آوری کند. اما همانند تکنیک ترازیابی قادر به پایش جابه‌جایی سطح زمین در تعداد محدودی از نقاط بر روی سطح زمین است. بنابراین این دو تکنیک علی‌رغم دقت بالا، به علت محدودیت‌های فوق و هزینه زیاد، برای پایش مستمر تغییر شکل زمین در ابعاد وسیع مناسب نیستند.

در حدود سه دهه گذشته، تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)^۳ تحولی گسترده در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرد. این تکنیک در مقایسه با روش‌های سنتی نظیر ترازیابی و سامانه تعیین موقعیت جهانی، می‌تواند در محدوده‌ای وسیع مقدار جابه‌جایی پوسته زمین را با دقتی در مقیاس میلی‌متر و قدرت تفکیک مکانی بالا برآورد کند [۶]. یکی از محدودیت‌های InSAR، برآورد جابه‌جایی پوسته زمین در راستای خط دید ماهواره (LOS)^۴ است که برای غلبه بر آن باید این جابه‌جایی را در جهات محورهای مختصات تجزیه کرد که در مطالعه فرونشست زمین، جابه‌جایی عمودی پوسته زمین، نسبت به جابه‌جایی‌های افقی از اهمیت بالاتری برخوردار است. همچنین برای آشکارسازی مناطق دارای فرونشست نامتقارن، می‌توان از مشتقات مکانی (گرادیان) جابه‌جایی عمودی (فرونشست) نسبت به محورهای افقی سیستم‌مختصات بهره گرفت. مسئله‌ی مهمی که در برآورد مشتقات مکانی موردتوجه قرار می‌گیرد، استفاده از یک روش عددی مناسب خواهد بود به‌صورتی که از پتانسیل بالای InSAR در تولید حجم وسیع و متراکم داده‌ای جابه‌جایی، بهره‌برداری کافی صورت پذیرد [۷].

در سال‌های اخیر، مطالعاتی درباره پایش فرونشست زمین در امتداد زیرساخت‌های خطی و برآورد نرخ آن با استفاده از تداخل‌سنجی راداری انجام شده‌است. برای مثال در تحقیقات پیشین، طریقت و همکاران (۲۰۲۱)، فرونشست بخش جنوبی تهران را با هدف بررسی پایداری دکل‌های برق مطالعه کردند. در این پژوهش نرخ جابه‌جایی عمودی بر اساس داده‌های دو ماهواره Sentinel-1 (باند C) و CSK^۵ (باند X) و روش سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی^۶، به ترتیب ۸۶- و ۷۹- میلی‌متر بر سال در بازه زمانی ۲۰۱۴ الی ۲۰۱۶ به دست آمد. این پژوهش نشان داد

۳ Interferometric Synthetic Aperture Radar

۴ Line of Sight

۵ COSMO-SkyMed

۶ Persistent Scatterer

۱ Subsidence

۲ Global Positioning System

که بیشتر دکل‌های برق در امتداد خط انتقال نیرو تحت تأثیر فرونشست زمین قرار دارند که آن‌ها را در معرض خطر جدی قرار می‌دهند [۸]. جنگ و همکاران (۲۰۲۲)، با استفاده از ۷۰ تصویر Sentinel-1A که از ژانویه ۲۰۱۹ تا مه ۲۰۲۱ اخذ شده بودند، میانگین سرعت تغییر شکل سطح زمین را به کمک روش زیرمجموعه خط مبنای کوتاه (SBAS)^۱ در اطراف دکل‌های برق واقع در شهر یانگکوان در کشور چین، به دست آوردند. آن‌ها تغییر شکل تجمعی سطح فونداسیون شش دکل برق را در حدود ۴۰ میلی‌متر تخمین زدند [۹]. شامی و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی فرونشست دشت کاشان و تأثیر آن بر راه‌آهن قم-کاشان پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش زیرمجموعه خط مبنای کوتاه اصلاح‌یافته (NSBAS)^۲، جابه‌جایی عمودی و شرقی-غربی سطح زمین را از دو مجموعه تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر ماهواره Sentinel-1 بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۱، استخراج کردند. این پژوهش نشان داد دشت کاشان فرونشستی را با سرعتی بیشتر از ۹۰ میلی‌متر بر سال تجربه می‌کند. همچنین سرعت جابه‌جایی عمودی نواحی اطراف راه‌آهن، در برخی نقاط به ۲۳ میلی‌متر بر سال می‌رسد در حالی که سرعت جابه‌جایی شرقی-غربی ناچیز و تقریباً ± 2 میلی‌متر بر سال است [۱۰].

اما در برخی از پژوهش‌ها، اهمیت و کاربرد تحلیل‌های عددی در مطالعات فرونشست زمین به اثبات رسیده است. به عنوان مثال، کابرال-کانو و همکاران (۲۰۱۰)، گرادیان افقی فرونشست را با تقسیم تفاضل مقدار فرونشست بین سلول‌های مجاور بر فاصله افقی بین آن‌ها برآورد کردند. آن‌ها ادعا کردند در شناسایی مناطق پرخطر ناشی از فرونشست زمین، تحلیل گرادیان افقی فرونشست نسبت به نرخ فرونشست عملکرد بهتری دارد. همچنین پتانسیل توسعه گسل در منطقه مورد مطالعه را با استفاده از نقشه گرادیان افقی فرونشست نشان دادند [۴]. عامریان و وثوقی (۲۰۱۲)، با نگرشی مبتنی بر آنالیز ذاتی، به مدلسازی هندسی تغییر شکل رویه زمین پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های شبکه دائم GPS و با بهره‌گیری از تنسور تغییر انحنای ناوردهای آن (تغییر انحنای متوسط و تغییر انحنای گاوس)، تغییر شکل‌های ارتفاعی زمین ناشی از برداشت

بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد و نیشابور را با دقت بالا تحلیل کردند. این پژوهش نشان داد که چگونه کمیت‌های مبتنی بر مشتق مکانی می‌توانند الگوهای تغییر شکل را با جزئیاتی ظریف‌تر از نرخ مطلق فرونشست آشکار سازند [۱۱]. ترمذی و همکاران (۲۰۲۳) و ترمذی و خان (۲۰۲۳)، با استفاده از فیلتر سوبل^۳، نقشه گرادیان افقی فرونشست را برای تعیین مناطق پرخطر ناشی از فرونشست به ترتیب برای جنوب کشور پاکستان و شهر کیتی در ایالت تگزاس به دست آوردند [۱۲، ۱۳].

در این پژوهش مسئله اصلی، محاسبه جابه‌جایی پوسته زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و برآورد گرادیان‌های جابه‌جایی به منظور بررسی نقش و اهمیت این مقادیر در موضوع مطالعه پدیده زمین‌ساخت فرونشست است. در تمایز با رویکردهای متداول پیشین، این مطالعه از یک روش عددی پیشرفته برای محاسبه گرادیان‌ها بهره می‌برد. در این راستا محدوده‌ای در دشت اشتهارد و قزوین که از سالیان گذشته به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی با پدیده فرونشست روبه‌رو بوده است [۱۴-۱۶] و دارای چندین خط انتقال نیرو می‌باشد، انتخاب شد و پردازش تداخل‌سنجی راداری به کمک نرم‌افزار سری زمانی LiCSBAS و براساس داده‌های سامانه LiCSAR^۴ انجام گرفت و برای محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی، از روش بدون المان کمترین مربعات متحرک بازگشتی بهره گرفته شد [۱۷].

۲- معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه برای محاسبه فرونشست زمین، شامل بخش‌هایی از استان البرز و استان قزوین که در همسایگی یکدیگر هستند، می‌باشد و از نظر جغرافیایی در محدوده $50^{\circ}03'$ تا $50^{\circ}32'$ طول شرقی و $35^{\circ}37'$ تا $35^{\circ}35'$ عرض شمالی قرار دارد. محوریت مطالعه، بررسی فرونشست زمین در امتداد مسیر خط انتقال نیرویی (به طول حدوداً ۳۰ کیلومتر) است که دو پست برق واقع در دشت قزوین (استان قزوین) و دشت اشتهارد (استان البرز) را به هم متصل می‌کند. همچنین در قسمت شمال شرقی

^۳ Sobel

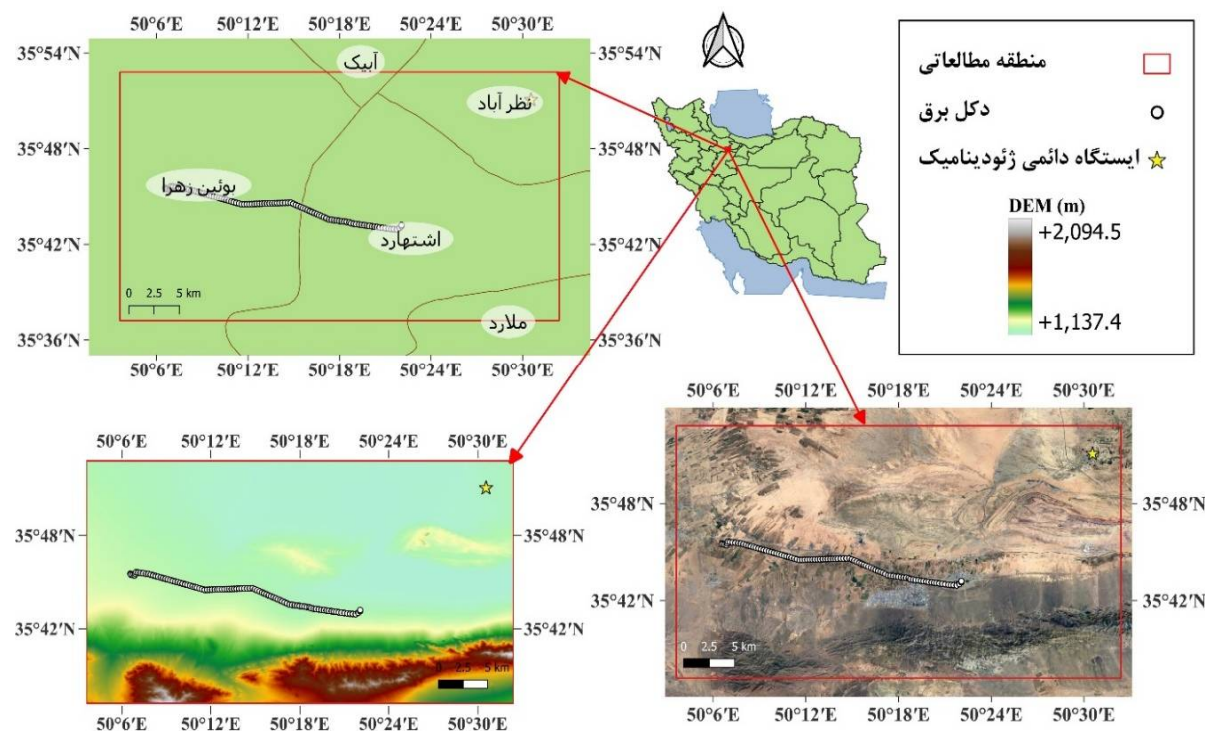
^۴ Looking Into the Continents from Space with Synthetic Aperture Radar

^۱ Small Baseline Subset

^۲ New Small Baseline Subset

نیمه‌خشک می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی، تقسیم‌بندی سیاسی، مدل ارتفاعی رقومی و تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه به نمایش درآمده است.

منطقه مورد مطالعه، ایستگاه دائمی ژئودینامیک نجم‌آباد (NJBD) قرار دارد که در بهداری روستای نجم‌آباد (از توابع شهرستان نظرآباد، استان البرز) تجهیز شده‌است. این منطقه (دشت اشتهارد و دشت قزوین) دارای آب و هوای



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی، تقسیم‌بندی سیاسی و مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه

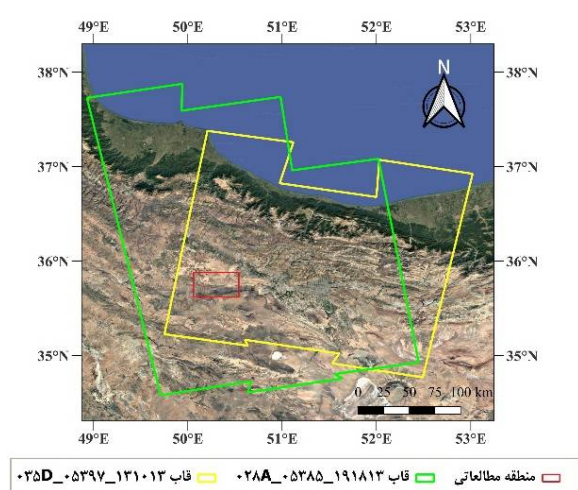
جزئیات تصاویر راداری که در پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی راداری استفاده شده‌است، در جدول ۱ آورده شده‌است.

۳- داده‌ها و روش تحقیق

در تحقیق صورت گرفته جهت محاسبه نرخ فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه، از فناوری تداخل‌سنجی راداری بهره گرفته شده‌است. بدین منظور اخذ داده‌های راداری در بازه زمانی مورد نظر و همچنین نرم‌افزار پردازشی مناسب ضروری است. در این بخش پس از معرفی داده‌های مورد استفاده، روش تداخل‌سنجی راداری و نحوه محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی شرح داده خواهد شد.

۳-۱- داده‌ها

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره Sentinel-1 با حالت تصویربرداری IWS که بین تاریخ‌های ژانویه ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۲۳ با فاصله زمانی ۱۲ روز اخذ شده‌اند، به عنوان منبع اصلی داده‌های راداری استفاده شده‌است [۱۸].



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی تصاویر راداری مورد استفاده در پردازش تداخل‌سنجی راداری

۱ Interferometric Wide-Swath

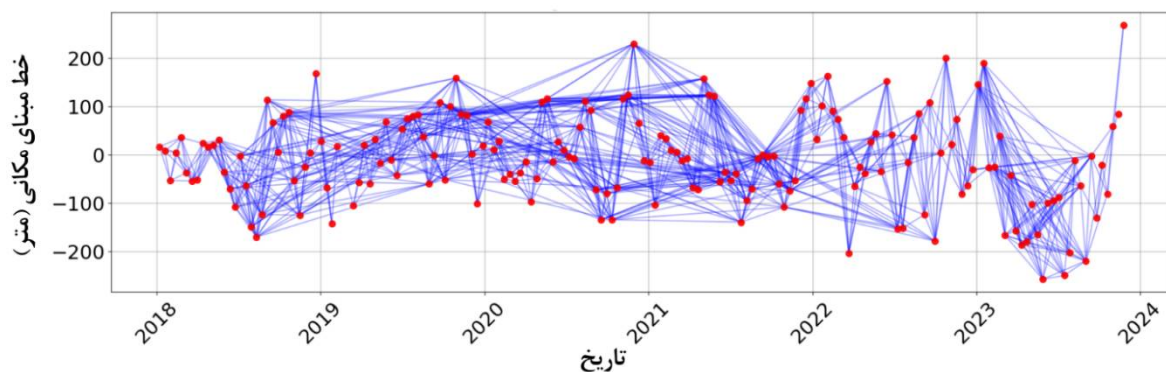
جدول ۱- اطلاعات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره مسیر	مدار	متوسط زاویه فرود	آزیموت	تعداد تصاویر (دوره)	پوشش زمانی
۲۸	بالاگذر	۳۹.۵°	-۱۰.۵°	۱۷۸	۲۰۱۸/۰۱/۰۷ ۲۰۲۳/۱۱/۲۵
۳۵	پایین گذر	۳۹.۵°	-۸.۱۶۹°	۱۷۲	۲۰۱۸/۰۱/۰۸ ۲۰۲۳/۱۱/۲۶

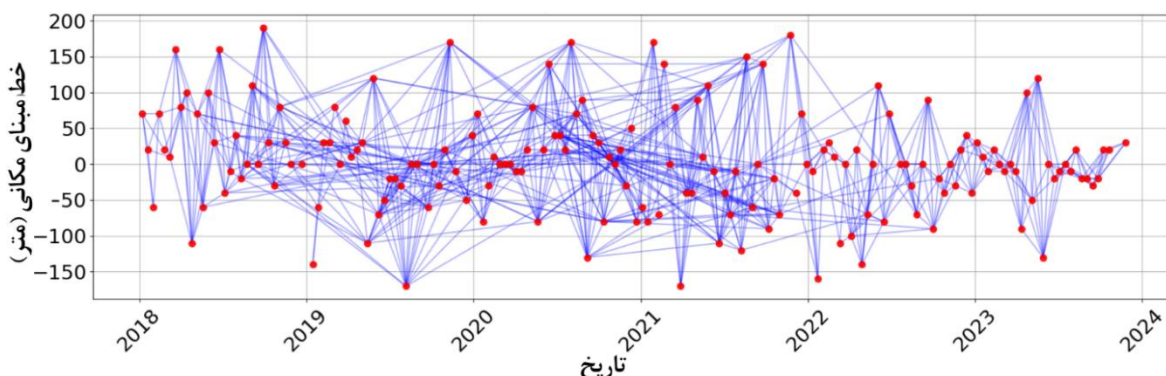
برای بهره‌برداری از تصاویر ماهواره Sentinel-1، از تداخل‌نماهای تولیدی دو قاب (چارچوب) LiCSAR با شناسه‌های 028A_05385_191813 و

035D_05397_131013 و با قدرت تفکیک مکانی ۰.۰۰۰۵ درجه (حدود ۵۰ متر)، استفاده شد. موقعیت جغرافیایی این دو قاب که به ترتیب در مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر، منطقه مطالعاتی را پوشش می‌دهند، در شکل ۲ به نمایش درآمده‌است.

در این تحقیق، تعداد ۱۰۷۶ و ۸۱۳ تداخل‌نما به ترتیب برای مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر بارگیری شدند. در شکل‌های ۳ و ۴ شبکه تداخل‌نماهای بارگیری‌شده برای مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر ترسیم شده‌است.



شکل ۳- شبکه تداخل‌نماهای بارگیری‌شده برای مسیر بالاگذر (نقاط قرمز نشان‌دهنده تصاویر هستند)



شکل ۴- شبکه تداخل‌نماهای بارگیری‌شده برای مسیر پایین‌گذر (نقاط قرمز نشان‌دهنده تصاویر هستند)

در دسترس می‌باشد^۴. این نرم‌افزار از محصولات اصلی LiCSAR (تداخل‌نماهای بازپایی‌شده و تصاویر همدوسی) استفاده می‌کند و می‌تواند جابه‌جایی‌های نسبی در مقیاس بزرگ (بزرگتر از ۱۰۰ کیلومتر) و محلی (حدود ۲ کیلومتر) را با دقت بهتر از ۱ سانتی‌متر در هر دوره ۲ و میلی‌متر در سال شناسایی کند [۱۹]. این نرم‌افزار شامل ۱۱ مرحله می‌باشد که با اجرای آن‌ها می‌توان به سری زمانی جابه‌جایی و سرعت جابه‌جایی دست پیدا کرد.

۲-۳- پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی راداری

LiCSBAS یک نرم‌افزار متن‌باز^۱ برای پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی راداری است که بر اساس پایتون^۲ در سیستم عامل لینوکس^۳ توسعه داده شده‌است و در سامانه

^۱ Open-Source

^۲ Python3

^۳ Linux

^۴ <https://github.com/yumorishita/LiCSBAS>

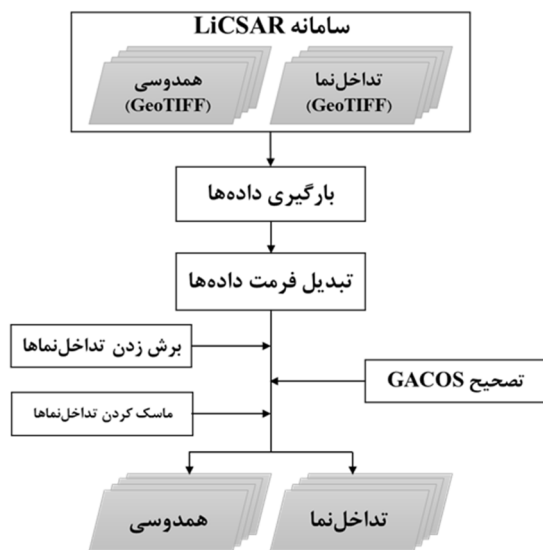
مراحل بسته LiCSBAS به دو بخش تقسیم می‌شود: آماده‌سازی مجموعه‌ای از داده‌های موردنیاز و پردازش سری زمانی. مراحل LiCSBAS با بارگیری محصولات LiCSAR که منطقه مورد نظر را پوشش می‌دهد، آغاز می‌شود و با تبدیل فرمت داده‌ها ادامه پیدا می‌کند. تصحیح تأخیر تروپوسفری با استفاده از داده‌های خارجی سرویس آنلاین تصحیح اتمسفری عمومی برای تداخل‌سنجی راداری (GACOS)^۱، ماسک کردن و برش دادن داده‌ها، گام‌های اختیاری هستند که می‌توانند برای بهبود دقت و کارآمدتر کردن پردازش انجام شوند. در پردازش سری زمانی، تداخل‌نمایی که ممکن است صحت نتایج را تضعیف کنند، بر اساس همدوسی و درصد پوشش تداخل‌نماها و بر اساس بررسی حلقه بسته حذف می‌شوند و از ادامه پردازش کنار گذاشته می‌شوند. مجموعه‌ای از تداخل‌نماهای پالایش‌شده و مناسب، که حاوی جابه‌جایی‌های تجمعی هستند، با استفاده از روش کمترین مربعات (LS)^۲ برای به دست آوردن سری زمانی جابه‌جایی و نرخ جابه‌جایی، وارون می‌شوند، سپس انحراف معیار (STD)^۳ نرخ (سرعت) جابه‌جایی محاسبه می‌شود و براساس چند شاخص نویز، پیکسل‌های نویزی ماسک (حذف) می‌شوند. در انتها، یک فیلتر زمانی-مکانی بر روی سری زمانی اعمال می‌شود تا نویز باقیمانده کاهش یابد و سری زمانی و نرخ (سرعت) جابه‌جایی فیلترشده به دست آید.

در شکل‌های ۵ و ۶ روندنمای این نرم‌افزار نمایش داده شده‌است که به دو بخش آماده‌سازی داده‌ها و پردازش سری زمانی تفکیک شده‌است.

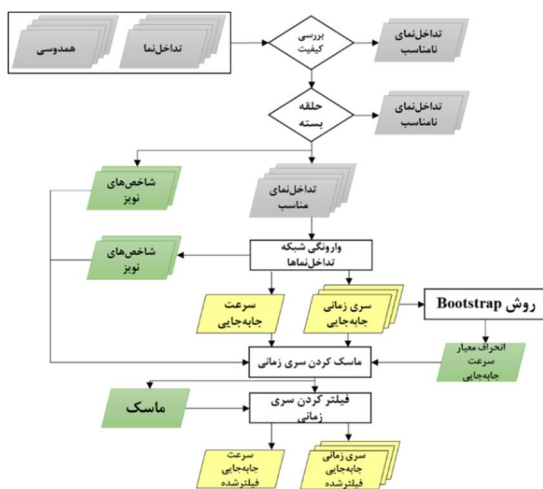
تداخل‌سنجی راداری، مؤلفه‌های مشاهداتی جابه‌جایی را در راستای خط دید ماهواره و در دو عبور بالاگذر و پایین‌گذر اندازه‌گیری می‌کند. برای یک مجموعه واحد از تصاویر راداری، می‌توان سرعت جابه‌جایی را که برای هر پیکسل در راستای خط دید ماهواره (LOS) به دست می‌آید، به صورت رابطه (۱) بیان کرد [۲۰]:

$$V_{los} = V_v \cos \theta - (V_e \cos \alpha - V_n \sin \alpha) \sin \theta \quad (1)$$

که در آن α زاویه آزیموت ماهواره، θ زاویه فرود و V_v ، V_n و V_e به ترتیب مؤلفه‌های سرعت جابه‌جایی در راستای شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و عمودی در یک سیستم مختصات محلی است.



شکل ۵- روندنمای آماده‌سازی داده‌ها در نرم‌افزار LiCSBAS [۱۹]



شکل ۶- روندنمای پردازش سری زمانی در نرم‌افزار LiCSBAS [۱۹]

با توجه به آن‌که مدار ماهواره‌های راداری نزدیک قطب است، حساسیت جابه‌جایی اندازه‌گیری شده به راستای شمالی-جنوبی کم است. با نادیده گرفتن این مؤلفه (یعنی با فرض $V_n = 0$)، رابطه (۱) با رابطه (۲) جایگزین می‌شود [۲۱]:

$$V_{los} = V_v \cos \theta - V_e \cos \alpha \sin \theta \quad (2)$$

^۱ Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR

^۲ Least Squares

^۳ Standard Deviation

اگر برای هر پیکسل دو اندازه‌گیری مستقل، در مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر وجود داشته باشد، دستگاه معادلات رابطه (۳) تشکیل می‌شود و با حل آن، V_e و V_n برای هر پیکسل برآورد می‌شود.

$$\begin{pmatrix} V_{los}^a \\ V_{los}^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \alpha^a \sin \theta^a & \cos \theta^a \\ -\cos \alpha^d \sin \theta^d & \cos \theta^d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_e \\ V_v \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در آن حروف a و d به ترتیب به مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر اشاره می‌کند.

۳-۳- نقش و اهمیت گرادیان‌های جابه‌جایی عمودی در مطالعه فرونشست و محاسبه آن‌ها

گرادیان فرونشست نشان‌دهنده تغییرات مکانی در میزان جابه‌جایی عمودی زمین بوده و نقش کلیدی در شناسایی فرونشست نامتقارن زمین ایفا می‌کند. افزایش گرادیان فرونشست با افزایش تنش‌های کششی در لایه‌های سطحی همراه است و می‌تواند منجر به گسیختگی خاک، تشکیل گسل‌ها و ایجاد آسیب‌های جدی در زیرساخت‌های حیاتی شود [۲۲]. در مقابل، هنگامی که فرونشست زمین به‌صورت یکنواخت و همگن در یک منطقه رخ می‌دهد، احتمال وقوع آسیب در زیرساخت‌ها به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد [۲۳].

طبق پژوهش‌های پیشین، تحلیل گرادیان فرونشست، به‌ویژه با بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، ابزاری مؤثر برای شناسایی مناطق مستعد شکاف در پوسته زمین به‌شمار می‌رود. نقشه‌های گرادیان فرونشست به‌دست‌آمده از داده‌های InSAR، با نواحی دارای شکاف‌های توسعه‌یافته همبستگی بالایی نشان می‌دهند و در نتیجه، برای ارزیابی خطر و برنامه‌ریزی مهندسی پیشگیرانه بسیار ارزشمند هستند [۲۴، ۲۵].

با این حال، باید توجه داشت که گرادیان بالای فرونشست به‌تنهایی به معنای وقوع ترک‌خوردگی‌های سطحی نیست. ارزیابی دقیق ریسک شکاف‌های زمین نیازمند در نظر گرفتن عوامل مکملی چون شرایط زمین‌شناسی، نوع خاک، و الگوی کاربری زمین نیز می‌باشد، اما به‌طور کلی، گرادیان فرونشست به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل حساسیت زمین نسبت به

شکاف‌ها شناخته شده و می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت خطر زمین‌ساختی ایفا کند [۵].

فناوری InSAR، داده‌هایی گسسته اما با تراکم مکانی خوب در اختیار کاربران قرار می‌دهد، بنابراین در تجزیه و تحلیل جابه‌جایی و محاسبه گرادیان‌های آن، بهتر است از روش‌های عددی بهره گرفته شود که از این قابلیت InSAR استفاده کند و نتایجی دقیق و قابل اعتماد در اختیار قرار دهد. در این راستا می‌توان از روش کمترین مربعات متحرک بازگشتی (RMLS) برای تقریب میدان‌های جابه‌جایی مستخرج از InSAR بهره گرفت [۱۷]. این روش که یک روش بدون المان است، حاصل تلفیق دو روش کمترین مربعات متحرک (MLS^۱) و کمترین مربعات بازگشتی (RLS^۲) می‌باشد. راهبرد تقریب در روش MLS براساس این فرض قرار گرفته است که تقریب یک تابع بسیار متأثر از مقادیر این تابع در نقاط واقع در همسایگی نقطه گرهی^۳ می‌باشد. در این روش المانی ایجاد نمی‌شود و دسته‌ای از نقاط واقع در دامنه تأثیر^۴ نقطه گرهی وارد مسئله تقریب می‌شوند. اگر $u(\mathbf{x})$ یک تابع اسکالر (مانند تابع جابه‌جایی) باشد و تقریب آن در نقطه گرهی با $u^h(\mathbf{x})$ نمایش داده شود، تقریب این تابع به روش MLS که ترکیب خطی از توابع پایه چندجمله‌ای است، به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود [۲۶]:

$$u^h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m a_i(\mathbf{x}) p_i(\mathbf{x}) \equiv \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{a}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، m تعداد ترم‌های توابع پایه $p_i(\mathbf{x})$ می‌باشد و $a_i(\mathbf{x})$ ضرایب مجهولی هستند که تابعی از موقعیت مکانی $\mathbf{x}$ می‌باشند. با در نظر گرفتن توابع چندجمله‌ای خطی در فضای دوبعدی، در یک دامنه تأثیر می‌توان برای نقطه گرهی و هر نقطه مشاهداتی واقع در دامنه تأثیر، به ترتیب روابط (۵) و (۶) تشکیل داد:

$$a_1 x + a_2 y + a_3 = u \quad (5)$$

$$a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 = u_j \quad (6)$$

^۱ Moving Least Squares

^۲ Recursive Least Squares

^۳ Nodal Point

^۴ Influence Domain

در رابطه (۵)، u مقدار مشاهداتی تابع در نقطه گرهی و (x, y) مختصات نقطه گرهی می باشد. به طور مشابه در رابطه (۶) مقدار مشاهداتی تابع در نقطه ای در دامنه تأثیر، (x_j, y_j) مختصات آن و z شمارنده نقاط واقع در دامنه تأثیر و ضرایب a_1, a_2, a_3 ضرایب مجهول تابع تقریب می باشند. با تفاضل دو رابطه (۵) و (۶) از یکدیگر، رابطه (۷) حاصل می شود.

$$a_1(x - x_j) + a_2(y - y_j) = u - u_j \quad (7)$$

بدین صورت با توجه به ماهیت مسئله و در صورت عدم نیاز به مقدار ثابت a_3 در تابع تقریب، می توان یکی از مجهولات را نادیده گرفت و یک مسئله دو مجهولی را حل نمود. با فرض n نقطه در دامنه تأثیر، دستگاه معادلات رابطه (۸) تشکیل می شود.

$$\begin{bmatrix} x - x_1 & y - y_1 \\ x - x_2 & y - y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x - x_n & y - y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_1 \\ u - u_2 \\ \vdots \\ u - u_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

نمایش ماتریسی دستگاه معادلات رابطه (۸) در رابطه (۹) آورده شده است.

$$\mathbf{Pa} = \mathbf{L} \quad (9)$$

که در رابطه (۹)، $\mathbf{P}$ ماتریس ضرایب، $\mathbf{a}$ بردار ضرایب (بردار مجهولات) و $\mathbf{L}$ بردار مشاهدات هستند و به صورت رابطه (۱۰) تعریف می شوند.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x - x_1 & y - y_1 \\ x - x_2 & y - y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x - x_n & y - y_n \end{bmatrix}, \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} u - u_1 \\ u - u_2 \\ \vdots \\ u - u_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

بردار ضرایب $\mathbf{a}$ بر اساس روش سرشکنی کمترین مربعات وزن دار (WLS)^۱، به کمک رابطه (۱۱) برآورد می شود.

$$\mathbf{a} = (\mathbf{P}^T \mathbf{WP})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{WL} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، $\mathbf{W}$ ماتریس وزن مشاهدات خواهد بود که مرتبط با نقاط تشکیل دهنده دامنه تأثیر می باشد. وزن مشاهدات می تواند براساس دقت اندازه گیری هر مشاهده در نقاط تعریف شود ولی متداول است که این وزن با فاصله هر نقطه از نقطه گرهی، نسبت عکس داشته باشد [۲۷]. پس از انجام سرشکنی، آزمون فاکتور وریانس ثانویه جهت ارزیابی جواب به دست آمده صورت می پذیرد.

روش کمترین مربعات متحرک (MLS) بر این فرض استوار است که تغییرات مقادیر مشاهداتی در سطح دامنه تأثیر پیوسته است. این در حالی است ممکن است در سطح دامنه تأثیر ناپیوستگی وجود داشته باشد و پیوسته فرض نمودن آن باعث ایجاد خطا در برآورد مجهولات شود. در روش RMLS به جای در نظر گرفتن یک شعاع ثابت برای دامنه تأثیر یا وارد نمودن تعداد مشخصی از نقاط در دامنه تأثیر برای همه نقاط گرهی، از روش کمترین مربعات بازگشتی (RLS) برای برآورد مجهولات استفاده می شود، بدین صورت که نقاط به ترتیب فاصله از نقطه مرکزی وارد فرایند محاسبات می شوند، سپس با تعریف یک معیار برای تعیین آستانه ناپیوستگی، نقاطی که باعث رد شدن شرط می شوند، از فرایند محاسبات حذف می شوند [۱۷].

در ابتدا مدل خطی معادلات مشاهدات مطابق با رابطه (۱۲) تشکیل می شود:

$$\mathbf{y} + \mathbf{v} = \mathbf{Px} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) $\mathbf{y}$ بردار مشاهدات، $\mathbf{x}$ بردار مجهولات، $\mathbf{P}$ ماتریس ضرایب و $\mathbf{v}$ بردار باقی مانده هاست. اگر در فرایند محاسبات همه مشاهدات به صورت یکجا وارد معادلات شوند، مجهولات با فرض کامل بودن مرتبه ماتریس نرمال ($\mathbf{P}^T \mathbf{WP}$) از رابطه (۱۳) برآورد می شوند:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{P}^T \mathbf{WP})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{Wy} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) $\mathbf{W}$ ماتریس وزن مشاهدات و $\hat{\mathbf{x}}$ بردار مجهولات برآورد شده می باشند. تشکیل ماتریس $\mathbf{P}$ در مواقعی که نیاز است به صورت متوالی مشاهده جدیدی وارد معادلات شود و مقادیر مجهولات دوباره برآورد شود، بسیار پرهزینه و زمان بر است، زیرا برای هر مشاهده جدید، باید کل فرایند سرشکنی برای برآورد $\mathbf{x}$ تکرار

^۱ Weighted Least Squares

شود. برای حل این مسئله، بهتر است از سرشکنی بازگشتی استفاده شود [۱۷].

اگر مشاهده جدید $\mathbf{y}_k$ به $k-1$ مشاهده قبلی افزوده شود، معادله رابطه (۱۴) تشکیل می‌شود و می‌توان بردار مجهولات را با استفاده از رابطه (۱۵) به‌روز نمود [۲۸].

$$\mathbf{y}_k + \mathbf{v}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{x} \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{P}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}), \quad k > 1 \quad (15)$$

ماتریس $\mathbf{K}_k$ با رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}} \mathbf{P}_k^T (\mathbf{P}_k \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}} \mathbf{P}_k^T + \mathbf{W}_k^{-1})^{-1} \quad (16)$$

ماتریس واریانس-کوواریانس بازگشتی نیز از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k)}} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_k) \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}} \quad (17)$$

جذر عناصر قطر اصلی ماتریس $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k)}}$ انحراف معیار مجهولات برآوردشده در مرحله k می‌باشند که به عنوان معیار دقت مجهولات در نظر گرفته می‌شوند. همچنین باقی‌مانده مشاهدات در مرحله k از رابطه (۱۸) برآورد می‌شود.

$$\hat{\mathbf{v}}_k = \mathbf{W}_k^{-1} (\mathbf{P}_k \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}} \mathbf{P}_k^T + \mathbf{W}_k^{-1})^{-1} (\mathbf{y}_k - \mathbf{P}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}) \quad (18)$$

بزرگ شدن ناگهانی بردار باقی‌مانده‌ها، ابزاری مناسب برای تشخیص خطاهای بزرگ و اشتباهات در مشاهدات و همچنین ناشی از هر نوع شکستگی یا ناپیوستگی در دامنه تأثیر خواهد بود [۷]، بنابراین می‌توان از آزمون فاکتور وریانس ثانویه جهت تشخیص ناپیوستگی یا ناسازگاری در مشاهدات استفاده کرد. بدین منظور می‌توان شرط ورود یک مشاهده جدید را در فرایند سرشکنی بازگشتی، پذیرفته شدن آزمون فاکتور وریانس ثانویه پس از سرشکنی بازگشتی تعیین نمود؛ چنانچه این آزمون رد شود، این مشاهده کنار گذاشته می‌شود و مشاهده بعدی وارد فرایند سرشکنی می‌شود و این روند برای همه نقاط دامنه تأثیر اجرا می‌شود.

اما برای محدود کردن اندازه شعاع دامنه تأثیر می‌توان از معیارهای مختلف اندازه‌گیری دقت استفاده نمود. برای مثال، می‌توان به کمک مقادیری مانند نرم $\| \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_k} \|$ یا اثر $trace(\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_k})$ ماتریس واریانس-کوواریانس مجهولات، شعاع دامنه تأثیر را محدود کرد. برای این کار، می‌توان از آستانه همگرایی اثر ماتریس واریانس-کوواریانس مجهولات براساس آهنگ تغییرات این معیار استفاده کرد و با تعیین یک حد آستانه برای آن، عملیات سرشکنی بازگشتی را متوقف و ورود نقاط جدید را قطع کرد. شرط توقف را به صورت رابطه (۱۹) می‌توان تعریف کرد [۲۷]:

$$\frac{Trace(\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k)}}) - Trace(\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}})}{Trace(\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}})} > value \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) k شمارنده ورود نقطه جدید در فرایند سرشکنی بازگشتی و $value$ حد آستانه است.

۴- پیاده‌سازی و نتایج

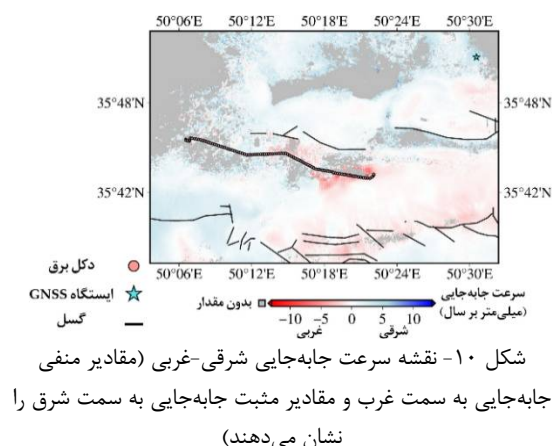
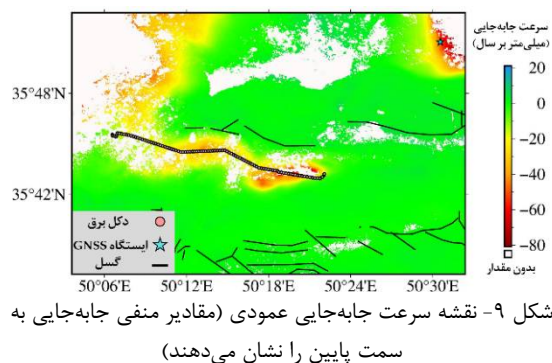
در این بخش نتایج حاصل از پردازش سری زمانی داده‌های سامانه LiCSAR با استفاده از نرم‌افزار LiCSBAS به نمایش درآمده است. در ادامه اعتبارسنجی نتایج حاصل برای نرخ فرونشست زمین، با استفاده از ایستگاه دائمی ژئودینامیک انجام شده‌است و سپس نتایج به‌دست آمده از روش عددی RMLS برای محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی ارائه شده‌است.

۴-۱- استخراج میدان‌های سرعت جابه‌جایی با استفاده از تداخل‌سنجی راداری

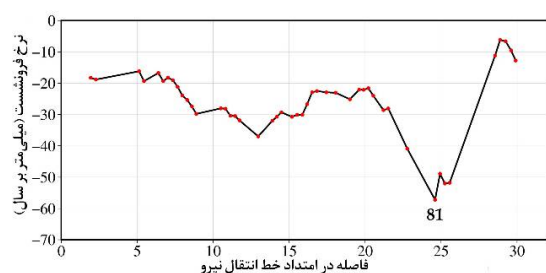
با اجرای مراحل نرم‌افزار LiCSBAS بر روی تداخل‌نماها، سرعت جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره برای مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر به‌دست می‌آید که به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ به تصویر کشیده شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود خطاهای قابل توجه در فرایند بازیابی فاز منجر به نویزی شدن و حذف برخی از پیکسل‌ها در منطقه مورد مطالعه شده‌است.

۱ Norm

۲ Trace

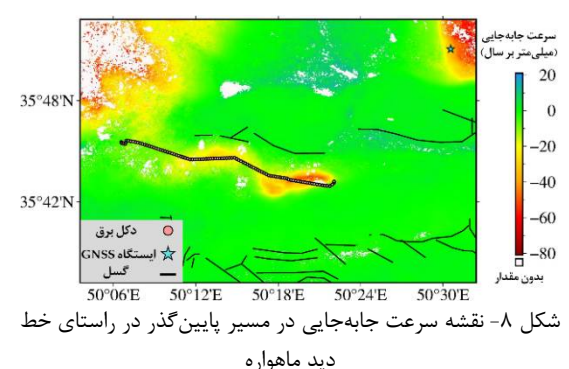
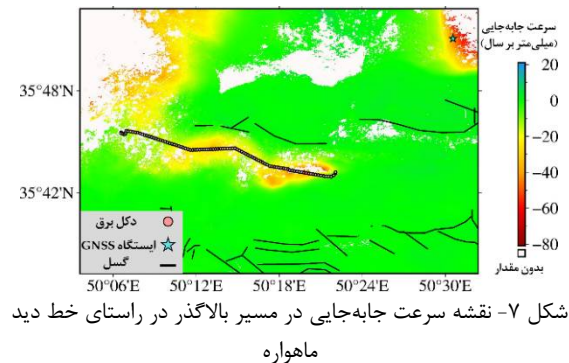


در شکل ۱۱ نیم‌رخ طولی نرخ فرونشست زمین در مسیر خط انتقال نیرو ترسیم شده‌است. با توجه به این شکل، بیشترین نرخ فرونشست در بین این دکل‌ها به دکل شماره ۸۱ با مقدار ۵۷- میلی‌متر بر سال اختصاص دارد.



۳-۴- اعتبارسنجی نتایج حاصل از InSAR با ایستگاه دائمی ژئودینامیک

به‌منظور بررسی و تایید نتایج InSAR، سری زمانی تغییرات مختصات مؤلفه عمودی ایستگاه دائمی NJBD (متعلق به سازمان نقشه‌برداری ایران، NCC^۱) و سری زمانی



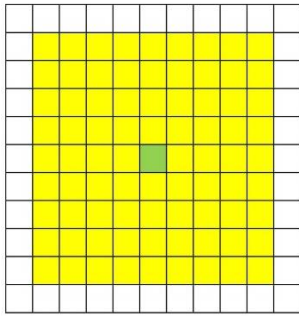
یک سری از این خطاهای بازیابی، به دلیل وجود مناطق کشاورزی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که با توجه به شکل ۱ قابل مشاهده هستند. همچنین این مناطق کشاورزی به دلیل استحصال آب‌های زیرزمینی باعث ایجاد فرونشست زمین خواهند شد [۲۹].

۴-۲- تجزیه سرعت جابه‌جایی در راستای عمودی و شرقی-غربی

پس از انجام مراحل پردازش تداخل‌سنجی راداری برای دو مجموعه داده‌ی مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر، نقشه سرعت جابه‌جایی محاسبه شده‌است (شکل‌های ۷ و ۸). با استفاده از حل معادلات رابطه (۳) برای هر پیکسل، مقادیر سرعت جابه‌جایی تجزیه می‌شوند و سرعت جابه‌جایی در راستاهای عمودی و شرقی-غربی برای هر پیکسل به‌دست می‌آید. در شکل ۹ نقشه سرعت جابه‌جایی عمودی و در شکل ۱۰ نقشه سرعت جابه‌جایی شرقی-غربی به نمایش درآمده است.

با توجه به شکل ۹، مشاهده می‌شود خط انتقال نیروی مورد مطالعه، کاملاً در محدوده فرونشست قرار دارد؛ همچنین در قسمت مرکزی منطقه مورد مطالعه، فرونشست با مقدار ۸۰- میلی‌متر بر سال به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

^۱ National Cartographic Center of Iran



شکل ۱۳- نحوه تعیین اندازه دامنه تأثیر در روش RMLS برای محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی

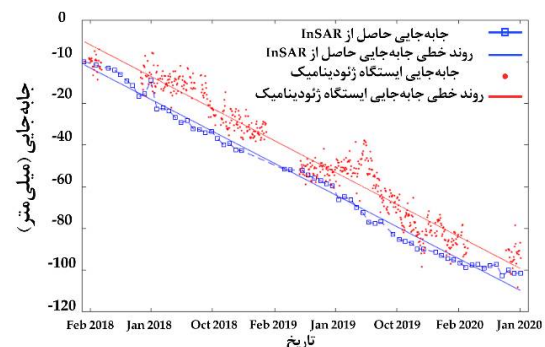
در این پژوهش برای راه‌اندازی فرایند سرشکنی و برآورد مقدار اولیه مجهولات با استفاده از روابط (۷) الی (۱۱)، از ۴ پیکسل معتبر که نزدیک‌ترین فاصله را از نقطه گرهی دارند، استفاده می‌شود. در مرحله راه‌اندازی چنانچه آزمون فاکتور وریانس ثانویه رد شود، ماتریس وزن در فاکتور وریانس ثانویه ضرب می‌شود تا پس از سرشکنی مجدد با ماتریس وزن جدید، آزمون فاکتور وریانس ثانویه پذیرفته شود.

پس از برآورد اولیه مجهولات، دیگر نقاط واقع در دامنه تأثیر به ترتیب فاصله‌ای که از نقطه گرهی دارند، وارد فرایند سرشکنی بازگشتی می‌شوند و چنانچه آزمون فاکتور وریانس ثانویه پذیرفته شود، مجهولات با استفاده از رابطه (۱۵) به‌روز می‌شوند. در صورت رد شدن آزمون فاکتور وریانس ثانویه، آن نقطه حذف می‌شود و نقطه بعدی وارد مسئله می‌شود. در این مقاله برای تعیین آستانه پیوستگی (عدم شکستگی) مقادیر مشاهداتی و محدود کردن دامنه تأثیر از رابطه (۱۹) استفاده شده‌است. چنانچه آهنگ تغییرات تریس ماتریس واریانس-کوواریانس مجهولات از ۵ درصد بیش‌تر شود ($value = 0.05$)، روند ورود نقاط به فرایند سرشکنی متوقف خواهد شد. در همه این روابط ماتریس وزن متناسب با معکوس فاصله نقاط دامنه تأثیر از نقطه گرهی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش میانگین تعداد نقاط استفاده‌شده در روش RMLS برای محاسبه مجهولات (گرادیان‌های جابه‌جایی) در منطقه مورد مطالعه، ۷.۷ می‌باشد.

۴-۵- بررسی گرادیان سرعت جابه‌جایی عمودی

در این مسئله، ضرایب تابع تحلیلی در رابطه (۵) همان گرادیان‌های سرعت جابه‌جایی‌های عمودی هستند؛ یعنی ضریب x در تابع تحلیلی برآوردی از گرادیان سرعت

جابه‌جایی حاصل از InSAR در این ایستگاه مقایسه می‌شود. اطلاعات سری زمانی تغییرات مختصات ایستگاه NJBD، تا ژوئن سال ۲۰۲۰ موجود است، به همین دلیل برای مقایسه نتایج InSAR و اطلاعات سری زمانی تغییرات مختصات این ایستگاه، بازه زمانی از اوایل سال ۲۰۱۸ تا اواسط سال ۲۰۲۰ در نظر گرفته می‌شود که بین هر دو مشترک می‌باشد. بنابراین تغییرات مختصات مؤلفه عمودی ایستگاه و جابه‌جایی عمودی حاصل از InSAR، در یک نمودار ترسیم شده‌است (شکل ۱۲).

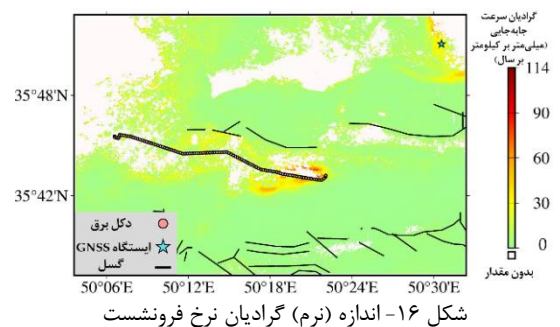


شکل ۱۲- نمایش سری زمانی مؤلفه‌های عمودی جابه‌جایی حاصل از InSAR و ایستگاه دائمی ژئودینامیک NJBD در بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۱/۲۰ الی ۲۰۲۰/۰۶/۱۲ میلادی

ملاحظه می‌شود توافق نسبتاً خوبی بین سری زمانی InSAR و ایستگاه دائمی ژئودینامیک در نمایش رفتار فرونشست وجود دارد و مقدار سرعت جابه‌جایی عمودی حاصل از این دو روش به ترتیب مقادیر -۴۵.۷ و -۴۶ میلی‌متر بر سال می‌باشد.

۴-۴- محاسبه گرادیان‌های سرعت جابه‌جایی عمودی

در پدیده فرونشست زمین، مطالعه گرادیان جابه‌جایی در راستاهای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین با استفاده از روش RMLS، در هر پیکسل دارای مقدار جابه‌جایی، این مقادیر برآورد شد. بدین منظور برای هر پیکسل، دامنه تأثیری با در نظر گرفتن ۸۰ پیکسل مجاور تشکیل شد، به صورتی که پیکسل مورد نظر (نقطه گرهی) در مرکز این دامنه قرار بگیرد. در شکل ۱۳ نحوه تعیین دامنه تأثیر به صورت نمادین به تصویر کشیده شده‌است که در آن پیکسل سبزرنگ نشان‌دهنده نقطه گرهی و پیکسل‌های زرد رنگ نشان‌دهنده نقاط دامنه تأثیر می‌باشند.



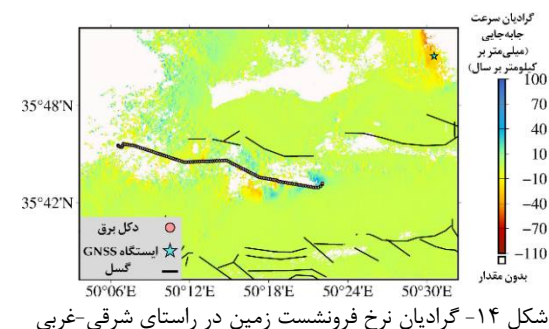
با توجه به شکل‌های ۱۴ الی ۱۶، ملاحظه می‌شود خط انتقال نیرو در مکان‌هایی با گرادیان بالای نرخ فرونشست قرار گرفته است. همچنین دکل‌هایی که در محدوده مرکزی منطقه مورد مطالعه قرار دارند، با گرادیان بزرگتر فرونشست نسبت به دکل‌های دیگر مواجه شده‌اند. بنابراین خطرپذیری این ناحیه بیشتر از نواحی دیگر می‌باشد و پتانسیل ایجاد شکاف در پوسته زمین بیشتر خواهد بود.

در شکل ۱۵، در صورتی که منظر مشاهده از جنوب به شمال در نظر گرفته شود، در مجاورت خط انتقال نیرو، گرادیان منفی (رنگ قرمز) به گرادیان مثبت (رنگ آبی) تبدیل شده‌است که با توجه به آنچه بیان شد، در این محدوده رفتار فرونشست زمین در راستای شمالی-جنوبی تغییر کرده است و خط انتقال نیرو در معرض نرخ فرونشست زیاد نسبت به پیکسل‌های شمالی و جنوبی قرار دارد.

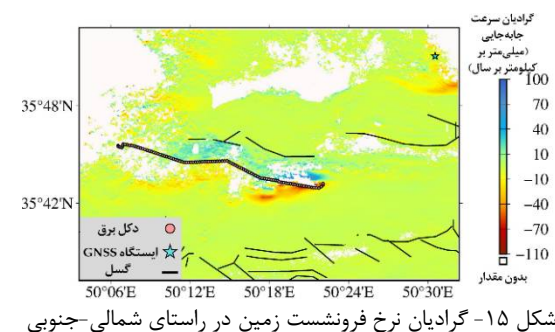
با مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۴ مشاهده می‌شود در برخی مناطق، جابه‌جایی شرقی-غربی و گرادیان فرونشست در راستای شرقی-غربی، رفتاری مشابه دارند. به عبارت دقیق‌تر، مقادیر منفی شکل ۱۰ که بیانگر جابه‌جایی به سمت غرب هستند، با مقادیر مثبت شکل ۱۴ متناسب هستند و مقادیر مثبت شکل ۱۰ که بیانگر جابه‌جایی به سمت شرق هستند، با مقادیر منفی شکل ۱۴ متناسب هستند. به طور کلی جابه‌جایی افقی با مشتق مکانی اول جابه‌جایی عمودی متناسب است [۳۰] و این موضوع در نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه و پیرامون خط انتقال نیرو به وضوح دیده می‌شود.

برای بررسی بیشتر گرادیان جابه‌جایی در راستای خط انتقال نیرو، نیم‌رخ طولی نرخ فرونشست و نیم‌رخ طولی گرادیان فرونشست در امتداد خط انتقال نیرو در یک نمودار ترسیم شده‌اند و در شکل ۱۷ نمایش داده شده‌است.

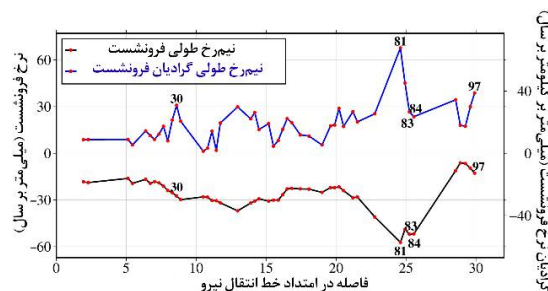
جابه‌جایی در راستای شرقی-غربی و ضریب γ در تابع تحلیلی برآوردی از گرادیان سرعت جابه‌جایی را در راستای شمالی-جنوبی به دست می‌دهد. مقادیر گرادیان سرعت جابه‌جایی عمودی (نرخ فرونشست) در راستای شرقی-غربی و در راستای شمالی-جنوبی به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به نمایش درآمده است. همچنین اندازه گرادیان که نرم این دو مقدار می‌باشد، در شکل ۱۶ نمایش داده شده‌است.



در شکل ۱۴، مقادیر منفی گرادیان (قرمز) نشان می‌دهد با حرکت به سمت شرق، نرخ فرونشست افزایش می‌یابد و مقادیر مثبت گرادیان (آبی) نشان می‌دهد با حرکت به سمت شرق، نرخ فرونشست کاهش می‌یابد. بنابراین تغییر ناگهانی گرادیان در یک ناحیه (تبدیل رنگ قرمز به آبی) نشان‌دهنده بیشترین نرخ فرونشست در آن ناحیه نسبت به پیکسل‌های شرقی و غربی می‌باشد.



در شکل ۱۵، مقادیر منفی گرادیان (قرمز) نشان می‌دهد با حرکت به سمت شمال، نرخ فرونشست افزایش می‌یابد و مقادیر مثبت گرادیان (آبی) نشان می‌دهد با حرکت به سمت شمال، نرخ فرونشست کاهش می‌یابد. بنابراین تغییر ناگهانی گرادیان در یک ناحیه (تبدیل رنگ قرمز به آبی) نشان‌دهنده بیشترین نرخ فرونشست در آن ناحیه نسبت به پیکسل‌های شمالی و جنوبی می‌باشد.



شکل ۱۷- نیمرخ طولی نرخ فرونشست زمین (خط سیاه) و گرادیان نرخ فرونشست زمین (خط آبی) در امتداد خط انتقال نیرو، نقاط قرمز نشان دهنده دکل‌ها می‌باشند.

همانطور که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود، دکل شماره ۸۱ هم بیشترین مقدار نرخ فرونشست با مقدار ۵۷- میلی‌متر بر سال و هم بیشترین مقدار گرادیان نرخ فرونشست با مقدار ۱۱۴ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال را به خود اختصاص داده‌است. اما در مکان برخی از دکل‌ها، مانند دکل‌های شماره ۸۳ و ۸۴ با نرخ فرونشست ۵۲- و ۵۱- میلی‌متر بر سال، اندازه گرادیان ۲۷ و ۲۴ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال و در مکان دکل‌های شماره ۳۰ و ۹۷، با نرخ فرونشست ۲۷- و ۱۳- میلی‌متر بر سال، اندازه گرادیان ۳۱ و ۳۹ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال برآورد شده‌است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که بین نرخ فرونشست و گرادیان آن رابطه‌ی مستقیمی برقرار نیست؛ به‌طوری‌که در برخی مناطق با نرخ فرونشست پایین‌تر، گرادیان جابه‌جایی بزرگ‌تر از مناطقی با نرخ فرونشست بالاتر مشاهده شده‌است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه فرونشست زمین با هدف بررسی نقش و اهمیت گرادیان جابه‌جایی در رابطه با این پدیده، صورت گرفت. برای رسیدن به این هدف، از نرم‌افزار سری زمانی تداخل‌سنجی راداری LiCSBAS برای برآورد سرعت جابه‌جایی در مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر استفاده شد و از نتایج این نرم‌افزار برای برآورد سرعت جابه‌جایی عمودی (نرخ فرونشست) استفاده شد.

به دلیل وجود زمین‌های کشاورزی و پوشش گیاهی در برخی از نواحی منطقه مورد مطالعه که منجر خطای بازبایی فاز می‌شود، برآورد فرونشست زمین با مشکل مواجه می‌شود و در انتهای پردازش تداخل‌سنجی راداری، این نواحی ماسک می‌شوند. همچنین یکی از عوامل اصلی

فرونشست زمین در این منطقه، وجود زمین‌های کشاورزی و پوشش گیاهی پراکنده است.

با توجه به نقشه‌های فرونشست، ملاحظه می‌شود که در مرکز منطقه مطالعاتی، فرونشست به بیشترین میزان خود می‌رسد و نشان می‌دهد خط انتقال نیرویی که دو پست برق واقع در اشتهاورد و بوبین‌زهر را به یکدیگر متصل می‌کند، با پدیده فرونشست مواجه شده‌است. مقدار بیشینه نرخ فرونشست در کل منطقه مطالعاتی ۸۰- میلی‌متر بر سال و در امتداد خط انتقال نیرو ۵۷- میلی‌متر بر سال برآورد شده‌است.

گرادیان فرونشست زمین نشان‌دهنده تغییرات مکانی در میزان جابه‌جایی عمودی پوسته زمین بوده و مقدار بالای آن ناشی از تنش‌های کششی در لایه‌های سطحی خواهد بود. مناطقی که گرادیان فرونشست در آن‌ها بیشتر است، به دلیل تمرکز تنش‌های کششی در پوسته زمین، بیش‌تر در معرض بروز شکاف‌های سطحی و گسیختگی‌های زمین قرار دارند. به‌منظور محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی، از روش بدون المان RMLS استفاده شد. با توجه به نقشه اندازه گرادیان فرونشست، ملاحظه شد که نواحی مرکزی محدوده مورد مطالعه، گرادیان بالاتری نسبت به بقیه نواحی دارند. بیشترین مقدار گرادیان نرخ فرونشست در کل منطقه مطالعاتی ۱۱۴ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال و در امتداد خط انتقال نیرو ۶۸ میلی‌متر بر کیلومتر بر سال برآورد شد. با رسم نیمرخ طولی اندازه گرادیان فرونشست در امتداد خط انتقال نیرو، مشاهده شد در مکان برخی دکل‌ها، نرخ فرونشست زیاد نیست و یا با نرخ فرونشست مکان دکل‌های مجاور تفاوت چشمگیری ندارد، اما گرادیان بالایی برای آن برآورد شده‌است که به دلیل پتانسیل بالای ایجاد شکاف و شکستگی در سطح زمین، آن‌ها را در معرض خطر نشان می‌دهد. همچنین ممکن است مکان برخی از دکل‌ها فرونشست زیادی را تجربه کنند، درحالی‌که گرادیان فرونشست نسبت به دیگر مکان‌ها مقدار کمتری داشته باشد.

جهت تحقیق‌های آتی پیشنهاد می‌شود گرادیان فرونشست زمین برای دیگر زیرساخت‌های حیاتی اعم از نقطه‌ای و خطی برآورد و بررسی شود و نتایج حاصل از گرادیان جابه‌جایی با افت سطح آب‌های زیرزمینی و پارامترهای زمین‌شناسی مقایسه شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس از سازمان نقشه‌برداری کشور برای در اختیار گذاردن داده‌های ایستگاه دائمی ژئودینامیک نجم‌آباد به‌عمل می‌آید.

مراجع

- [۱] Jackson, J. A., Mehl, J. P., Neuendorf, K. K. E. and Institute, A. G. (2005). "Glossary of Geology." Springer Science & Business Media. Alexandria, Virginia.
- [۲] Angornai, S., Memarian, H., Shariat Panahi, M. and Bolourchi, M. J. (2016). "Dynamic Modeling of Land Subsidence in Tehran Plain." Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 25, 97, 211-220.
- [۳] Karimi, m., Ghanbari, A. and Amiri, s. (2013). "Measurement of the level of risk of land subsidence in No.18 urban residence area of Tehran." Spatial Planning. 3, 1, 37-56.
- [۴] Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Demets, C., Cigna, F. and D'Iaz-Molina, O. (2010). "Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico." IAHS-AISH publication. 339, 255-259.
- [۵] Sun, Y., Jiewei, Z., Fei, Q., Quanzhong, L., Cong, L., Zhaowei, Y. and Peng, J. (2024). "Spatio-temporal evolution of land subsidence and susceptibility zonation of associated ground fissures in the urban area of loess plateau: a case in Xianyang city, China." Geomatics, Natural Hazards and Risk. 15, 1, 2341181.
- [۶] Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993). "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry." Nature. 364, 6433, 138-142.
- [۷] Mehrabi, H. (2017). "Intrinsic Analysis of the Earth Crustal Deformation by InSAR Technology and Meshless Numerical Methods", Ph.D Thesis, K.N. Toosi University of Technology.
- [۸] Tarighat, F., Foroughnia, F. and Perissin, D. (2021). "Monitoring of Power Towers' Movement Using Persistent Scatterer SAR Interferometry in South West of Tehran." Remote Sensing. 13, 3, 407.
- [۹] Geng, H., Peng, J., Wen, G., Zhou, F., Zhe, M., Wu, X. and Dai, S. (2022). "Monitoring of Surface Deformation of Transmission Tower Based on SBAS-InSAR Technology." Proc. 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET), (Eds). ,
- [۱۰] Shami, S., Azar, M. K., Nilfouroushan, F., Salimi, M. and Reshadi, M. A. M. (2022). "Assessments of ground subsidence along the railway in the Kashan plain, Iran, using Sentinel-1 data and NSBAS algorithm." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 112, 102898.
- [۱۱] Amerian, Y. and Vosooghi, B. (2012). "Subsidence Monitoring in Mashhad and Neyshabour area based on Change of Curvature Analysis Method Using Displacement Field from GPS Observations." Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 21, 82, 133-138.
- [۱۲] Tirmizi, O. and Khan, S. D. (2023). "Factors of Subsidence in Katy, Texas, USA." Remote Sensing. 15, 18, 4424.
- [۱۳] Tirmizi, O., Khan, S. D., Mirzaee, S. and Fattahi, H. (2023). "Hazard Potential in Southern Pakistan: A Study on the Subsidence and Neotectonics of Karachi and Surrounding Areas." Remote Sensing. 15, 5, 1290.
- [۱۴] Najafian, D., Ghasemzadeh, F., Naghdi, S. and Ghadami, H. (2019). "Assessment of the status of subsidence in the plains of Alborz Province." Proc. First Conference of Alborz Engineering Opportunities & Challenges, (Eds), Kharazmi University, Karaj, Iran.
- [۱۵] Ranjbar, M. and Jaafari, N. (2009). "Investigating the effective factors in the subsidence of the Eshtehard plain." Geography. 6, 19, 155-166.
- [۱۶] Rezaei, K. (2021). "Soil erosion and land subsidence effects in the vicinity of power transport lines in Eshtehard Plain using sedimentology and Geoelectric studies." Applied Sedimentology. 8, 16, 28-44.
- [۱۷] Mehrabi, H. and Voosoghi, B. (2015). "Recursive moving least squares." Engineering Analysis with Boundary Elements. 58, 119-128.
- [۱۸] EO.Portal."Copernicus: Sentinel-1".Available online: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-1> (accessed on 2025).
- [۱۹] Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliott, J. R. and Hooper, A. (2020). "LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor." Remote Sensing. 12, 3, 424.

- [۲۰] Fialko, Y., Simons, M. and Agnew, D. (2001). "The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 M7.1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations." *Geophysical Research Letters*. 28, 16, 3063-3066.
- [۲۱] Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghighi, M., Wetzell, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S. (2017). "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements." *Engineering Geology*. 218, 134-151.
- [۲۲] Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Chaussard, E., Salazar-Tlaczani, L., Cigna, F., DeMets, C. and Pacheco-Martínez, J. (2015). "Satellite geodesy tools for ground subsidence and associated shallow faulting hazard assessment in central Mexico." *Proc. IAHS*. 372, 255-260.
- [۲۳] Fernández-Torres, E., Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Havazli, E. and Salazar-Tlaczani, L. (2020). "Land Subsidence risk maps and InSAR based angular distortion structural vulnerability assessment: an example in Mexico City." *Proc. IAHS*. 382, 583-587.
- [۲۴] Awasthi, S., Jain, K., Bhattacharjee, S., Gupta, V., Varade, D., Singh, H., Narayan, A. B. and Budillon, A. (2022). "Analyzing urbanization induced groundwater stress and land deformation using time-series Sentinel-1 datasets applying PSInSAR approach." *Sci Total Environ*. 844, 157103.
- [۲۵] Hu, J., Motagh, M., Guo, J., Haghighi, M. H., Li, T., Qin, F. and Wu, W. (2022). "Inferring subsidence characteristics in Wuhan (China) through multitemporal InSAR and hydrogeological analysis." *Engineering Geology*. 297, 106530.
- [۲۶] Belytschko, T., Krongauz, Y., Organ, D., Fleming, M. and Krysl, P. (1996). "Meshless methods: An overview and recent developments." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 139, 1, 3-47.
- [۲۷] Mehrabi, H. and Tashayo, B. (2019). "Spatial Data Interpolation Through Recursive Solution of Moving Least Squares." *Journal of Geomatics Science and Technology*. 9, 2, 15-27.
- [۲۸] Simon, D. (2006). "Least squares estimation." in *Optimal State Estimation*, Simon, D., Eds., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 79-105.
- [۲۹] Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. and Zschau, J. (2008). "Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation." *Geophysical Research Letters*. 35, 16, .
- [۳۰] Kratzsch, H. (1983). "Mining Subsidence Engineering." Springer. Berlin, Heidelberg.