

بررسی امکان شناسایی پیش‌نشان‌گر فروریزش در منطقه شهری با تکیه بر سری زمانی تداخل‌سنجی تصاویر سنتینل-۱

نیلوفر علیزاده^۱، یاسر مقصودی^۲، طیبه مناقبی^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

niloofar.alizade@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ymaghsoudi@kntu.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

t.managhebi@ut.ac.ir

(دریافت: تیر ۱۴۰۳، تصویب: شهریور ۱۴۰۳)

چکیده

فروریزش ناگهانی به ویژه در مناطق شهری علاوه بر صدمات مالی به دلیل تخریب و تهدید زیرساخت‌ها و بروز مشکلات در مدیریت شهری و از آن مهم‌تر تهدید جان انسان‌ها در مجموعه حوادث پرخطر شهری به حساب می‌آید. بدیهی است که تشخیص احتمال رخداد حادثه پیش از وقوع حادثه تأثیر به‌سزایی در کاهش عواقب و اثرات وقوع فروریزش خواهد داشت. در این مقاله قابلیت سنجش از دور راداری در تشخیص پیش‌نشانگر فروریزش در مناطق شهری مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، سری زمانی ۱۵ ماهه تصاویر راداری سنتینل-۱ جهت بررسی رخداد فروریزش در دو منطقه بلوار آشناسان و خیابان کریمخان واقع در شهر تهران مورد استفاده قرار گرفت. مناطق مورد مطالعه به ترتیب در اردیبهشت ۱۴۰۱ و بهمن ۱۴۰۰ دچار حادثه شدند رخ دادند و از این رو تصاویر مورد استفاده از ۱۵ ماه پیش از رخداد حادثه تا زمان وقوع فروریزش مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در مرحله اول نقشه‌های نرخ فرونشست هر دو منطقه با استفاده از دو تکنیک سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر نقاط پراکنش گر دائمی و خط مبنای کوتاه تولید شد. نتایج عملی این پژوهش، همبستگی بالای مقادیر نرخ متوسط ۱۵ ماهه فرونشست حاصل از دو تکنیک مذکور را در هر دو منطقه مطالعاتی با ضریب تعیین ۰/۹ تایید می‌کند. در مرحله دوم و در مقوله شناسایی پیش‌نشانگر، اعمال یک تحلیل مکانی-زمانی بر مجموعه منحنی‌های سری زمانی ۱۵ ماهه در محدوده شعاع ۵۰ متری هر دو محل بروز حادثه فروریزش مد نظر قرار گرفت. بررسی نتایج حاصل از هر دو تکنیک تداخل‌سنجی مؤید قابلیت و برتری تکنیک تداخل‌سنجی مبتنی بر خط مبنای کوتاه در مقایسه با تکنیک مبتنی بر نقاط پراکنش گر دائمی در شناسایی پیش‌نشانگر رخداد فروریزش در روزهای منتهی به حادثه است. به گونه‌ای که روش خط مبنای کوتاه منجر به شناسایی نقطه هشدار در مجاورت هر دو حادثه بلوار آشناسان و خیابان کریمخان و به ترتیب در فاصله ۱ و ۲/۵ متر از محل رخداد حادثه شد، در حالیکه روش مبتنی بر نقاط پراکنش گر دائمی در این زمینه موفق عمل نکرد.

واژگان کلیدی: فروریزش، تکنیک تداخل‌سنجی راداری، سنتینل-۱، تحلیل مکانی-زمانی، خط مبنای کوتاه، پراکنش گر دائمی

۱- مقدمه

رخداد فروریزش به دلیل تهدید و تخریب زیرساخت‌ها اعم از خطوط لوله، شبکه راه‌ها، ساختمان‌ها و ... از یک سو و آسیب جانی از سوی دیگر یکی از مسائل مهم در مدیریت شهری است. قنات‌های رها شده در زیر بستر شهر، عدم گودبرداری و حفاری اصولی، عدم اجرای صحیح سازه نگهبان در گودها، نقص در شبکه فاضلاب شهری، عدم رعایت اصول ایمنی در حفاری‌های شهری و بالاخره سستی خاک از مهم‌ترین عوامل بروز فروریزش در مناطق شهری هستند [۱]. علیرغم تعداد کم این حوادث، این فروریزش‌ها به دلیل تخریب زیرساخت‌ها، اختلال در برنامه تردد شهری، ایجاد حس ناامنی در شهروندان و در مواردی از دست رفتن جان و سلامتی شهروندان جزو پرخطرترین حوادث شهری محسوب می‌شوند. بدیهی است که هشدار احتمال رخداد حادثه گام مؤثری در کاهش صدمات جانی و مالی حادثه است. شناسایی پیش‌نشان‌گر فروریزش مستلزم مطالعه و بررسی جابجایی زمین^۱ در بازه‌های زمانی منظم و استخراج ناهنجاری (آنومالی) در وضعیت نشست است [۳].

سنجش از دور ماهواره‌ای^۲ به دلیل دریافت تصاویر از سکوی فضایی، امکان مطالعه سری زمانی^۳ را در حوزه‌های مختلف فراهم می‌کند. در این میان، سنجش از دور راداری با بهره‌گیری از فاز بازپراکنش^۴ راداری برآورد جابجایی زمین با دقت بالا را میسر می‌کند [۴]. تکنیک تداخل‌سنجی راداری^۵ ابزاری قدرتمند در برآورد دقیق جابجایی زمین با دقت بهتر از سانتیمتر و در وسعت مکانی بالا است. تاکنون تحقیقات متنوعی در خصوص ارزیابی جابجایی زمین و مطالعه فروریزش در زیر ساخت‌های مختلف و دشت‌ها صورت گرفته‌است [۵، ۶].

بیکون^۶ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از سری زمانی تصاویر انویست^۷، وضعیت جابجایی ساختمان‌ها را در محدوده‌ای از شهر براتیسلاوا^۸، در کشور اسلواکی، با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر نقاط پراکنش‌گر

دائمی^۹ (PSI) بررسی کردند. مشاهده روند جابجایی غیر خطی در ساختمان‌های مجاور با یک محدوده گودبرداری در مقایسه با جابجایی خطی در سایر ساختمان‌های منطقه مؤید تاثیر گودبرداری بر روند جابجایی ساختمان‌های مذکور بود [۷]. وو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۹) تغییر شکل ساختمان‌ها در منطقه فیاتن^{۱۱} شهر شنژن^{۱۲} چین را در بازه سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های تراسارایکس^{۱۳} مطالعه کردند. در این پژوهش، تغییر نرخ جابجایی ساختمان‌ها همزمان با تبدیل بافت روستایی منطقه به شهری دلیلی بر تاثیر افزایش بار بر تغییرات نشست منطقه عنوان شده‌است [۸]. روگینی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹) برای بررسی فروریزش زمین در منطقه جنوا^{۱۵} در ایتالیا که علت آن حفر تونل فرجیانو^{۱۶} بود، از ۳۲۰ داده سنتینل-۱^{۱۷} در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده کردند [۹]. نتایج تحلیل سری زمانی جابجایی مبتنی بر روش PSI جابجایی ۳۰ میلیمتری در جهت دید سنجنده^{۱۸} (LOS) را نشان داد. نکته قابل تأمل در این مطالعه اینکه جابجایی رخ داده مربوط به بعد از احداث تونل (سال ۲۰۱۶) بوده و در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ یعنی پیش از حفاری تونل، جابجایی در سری زمانی تصاویر دیده نمی‌شد. میلیلو^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه فروریزش پل موراندی^{۲۰} ایتالیا در سال ۲۰۱۸ را با استفاده از سری زمانی سه مجموعه داده S1 و کاسمواسکای مد^{۲۱} (CSK) و انویست انجام دادند. در این مطالعه وضعیت جابجایی پل در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده انویست بررسی شد و هیچگونه نشانی از جابجایی غیر طبیعی در پل رؤیت نشد [۱۰]. بررسی داده CSK در بازه ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ و داده S1 در بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، نشان از بروز رفتاری غیر خطی فرونشست^{۲۲} پل بود که این رفتار از مارس ۲۰۱۷ شدت بیشتری پیدا کرد. خوش لهجه و همکاران (۲۰۲۱) سری زمانی ۴ ساله تصاویر S1 را در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸

۱۲ Shenzhen

۱۳ TerraSAR-X

۱۴ Roccheggiani

۱۵ Genoa

۱۶ Fereggiano tunnel

۱۷ Sentinel-1

۱۸ Line of Sight

۱۹ Milillo

۲۰ Morandi Bridge

۲۱ Cosmo SkyMed

۲۲ Subsidence

۱ Land movement

۲ Space remote sensing

۳ Time series analysis

۴ Back scattering

۵ SAR Interferometry

۶ Bakon

۷ Envisat

۸ Bratislava

۹ Persistent Scatterer Interferometry

۱۰ Wu

۱۱ Futian

برای مطالعه فروچاله^۱ کردآباد همدان مورد استفاده قرار دادند [۱۱]. این مطالعه نرخ فرونشست^۲ بین ۰ تا ۱۰ میلیمتر در سال را تا ماه مارس ۲۰۱۸ برای منطقه مذکور تایید می‌کند. نرخ فرونشست منطقه از مارس ۲۰۱۸ به شکل فزاینده‌ای تغییر می‌کند و در ۴ ماه منتهی به رخداد فروچاله، به ۳۰ میلیمتر در سال افزایش می‌یابد. در این مقاله تغییر شیب سری زمانی جابجایی به عنوان پیش‌نشان‌گری برای رخداد ریزش معرفی شده‌است. مونتیسکی^۳ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای امکان شناسایی پیش‌نشان‌گر فروریزش در محدوده شهری را با استفاده از تحلیل سری زمانی جابجایی مد نظر قرار دادند. در این مطالعه در مرحله اول منحنی‌های سری زمانی جابجایی در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ برای ۴۱۱۵۸۲ نقطه در شهر ناپل^۴ ایتالیا با استفاده از تکنیک PSI مبتنی بر تصاویر CSK تولید شد. در مرحله بعد، تحلیل و شناسایی نقاط محتمل فروریزش با استخراج مقادیر شیب در مقاطع زمانی متوالی از منحنی‌های سری زمانی و با استفاده از یک الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی^۵ (ANN) انجام شد. این پژوهش شناسایی نقاط هشدار را صرفاً بر اساس تحلیل زمانی منحنی‌های سری زمانی انجام داد [۱۲].

با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی با هدف بررسی فروریزش در شهر تهران انجام نشده‌است، در این مقاله دو نقطه حادثه دیده در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین در مقالات مرتبط تنها یک روش (PSI و یا SBAS) مورد بررسی قرار گرفتند. ضمن اینکه در مطالعات گذشته عموماً روش SBAS برای مطالعه مناطق غیر شهری و تکنیک PSI برای مطالعه مناطق شهری و با تمرکز بر یک عارضه مانند پل به کار گرفته شده‌اند. این در حالی است که ریزش رخ داده در هر دو منطقه مطالعاتی مد نظر این پژوهش در مناطق مسطح و بدون عارضه بازپراکنش‌کننده گوشه‌ای رخ داده‌است. به این ترتیب در این مقاله ضمن بررسی امکان شناسایی نقاط محتمل فروریزش شهر تهران با استفاده از تحلیل مکانی-زمانی منحنی‌های سری زمانی جابجایی مبتنی بر تصاویر رایگان S1، قابلیت هر دو روش تداخل‌سنجی SBAS و PSI در مناطق مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. نکته قابل تأمل این‌که در این مقاله از تصاویر S1 استفاده شد، تا با توجه به امکان دسترسی رایگان به این تصاویر، امکان استفاده

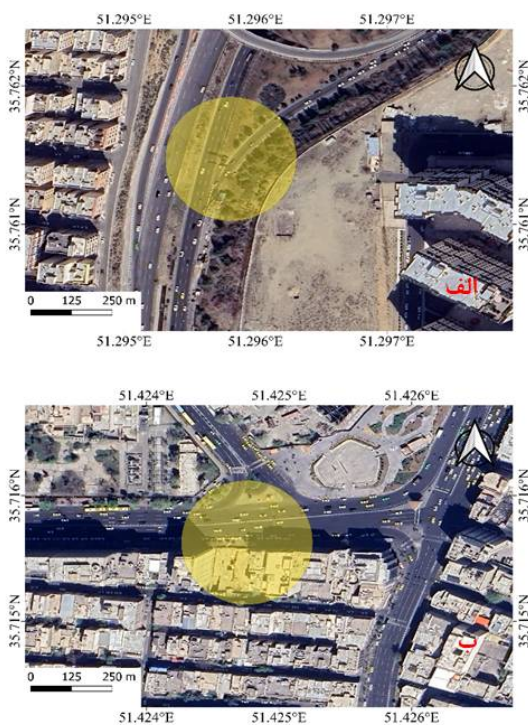
از نتایج این پژوهش در توسعه یک سامانه هشدار سریع فروریزش در شهر تهران، برای ارائه اطلاعات به مدیران شهری، ممکن باشد.

۲- منطقه مطالعه و داده مورد استفاده

۲-۱- منطقه مطالعه

تهران، شهری به وسعت ۷۳۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۹ میلیون نفر، دومین کلان شهر پرجمعیت در خاورمیانه و پایتخت ایران است.

رخداد فروریزش ناگهانی زمین در دهه اخیر به یکی از معضلات جدی، به ویژه در مناطق شهری، تبدیل شده‌است. از مهم‌ترین عوامل وقوع این حادثه در شهر تهران می‌توان به شبکه قنات‌های متروکه و جنس خاک به ویژه در مناطق مرکزی شهر، نقص در شبکه فاضلاب شهری، حفاری غیر اصولی تونل شهری، گودبرداری غیر اصولی و عدم اجرای صحیح سازه نگهبان در گودها اشاره نمود.



شکل ۱- موقعیت دو منطقه مطالعاتی در شهر تهران. الف) بلوار آبشناسان، ب) خیابان کریمخان

در این مقاله دو حادثه فروریزش در بلوار آبشناسان و خیابان کریمخان تهران جهت مطالعه انتخاب شده‌اند. در

۴ Naples
۵ Artificial Neural Network

۱ Sinkhole
۲ Land subsidence rate
۳ Montischi

ساعت ۲ تاریخ ۲۱ بهمن ۱۴۰۰ حادثه فروریزش در پیاده‌رو ضلع جنوبی خیابان کریمخان و در فاصله کمتر از صد متر از میدان هفت تیر تهران گزارش شده است. فروریزش بلوار آبشناسان در ساعت ۱۹ تاریخ ۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۱ رخ داده و در اثر آن گودالی به ابعاد ۴ متر در ۴ متر و به عمق ۴ متر ایجاد شده است. خوشبختانه هیچ‌یک از این دو حادثه منجر به صدمات جانی و مالی برای شهروندان نشده اند. مختصات دقیق گزارش شده از محل وقوع حوادث یادشده در جدول ۱ و موقعیت آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نام و موقعیت منطقه مطالعاتی

نام منطقه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
بلوار آبشناسان	۳۵° ۴۵' ۴۱"	۵۱° ۱۷' ۴۶"
خیابان کریمخان	۳۵° ۴۲' ۵۴"	۵۱° ۲۵' ۲۸"

۲-۲- داده مورد استفاده

در میان روش‌های مختلفی که برای پایش جابجایی وجود دارد (نظیر تراز یابی دقیق^۱ و شبکه ایستگاه‌های سیستم موقعیت‌یابی جهانی^۲)، سنجش از دور راداری فضایی به دلیل امکان پوشش وسیع منطقه، امکان پایش سری زمانی و در عین حال صرف زمان و هزینه بهینه، روش مناسبی جهت برآورد جابجایی زمین است. تصاویر راداری سنتینل-۱ متعلق به آژانس فضایی اروپا^۳ (ESA) که به صورت رایگان در دسترس هستند، به لحاظ حد تفکیک مکانی و زمانی نیز پاسخگوی دقت مورد نیاز در بسیاری از مطالعات جابجایی زمین هستند. از این رو، در سال‌های اخیر این تصاویر یکی از رایج‌ترین داده‌های مورد استفاده چه در حوزه پژوهش و چه در پروژه‌های اجرایی هستند. در این مقاله از سری زمانی ۱۵ ماهه تصاویر سنتینل-۱ برای بررسی هر یک از دو رخداد مد نظر استفاده شده است. جدول ۲ مشخصات فنی تصاویر مورد استفاده را نشان می‌دهد.

همچنان که در جدول ۲ نیز نشان داده شده است، داده‌های مربوط به هر دو منطقه مطالعاتی، داده‌های

پایین‌گذر مربوط به گذر ۳۵ ماهواره سنتینل-۱ است. با توجه به بازه زمانی ۱۲ روزه برداشت تصویر این ماهواره در ایران، تعداد ۳۶ تصویر برای بررسی هر یک از این مناطق استفاده شد.

جدول ۲- مشخصات سری زمانی تصاویر مورد استفاده

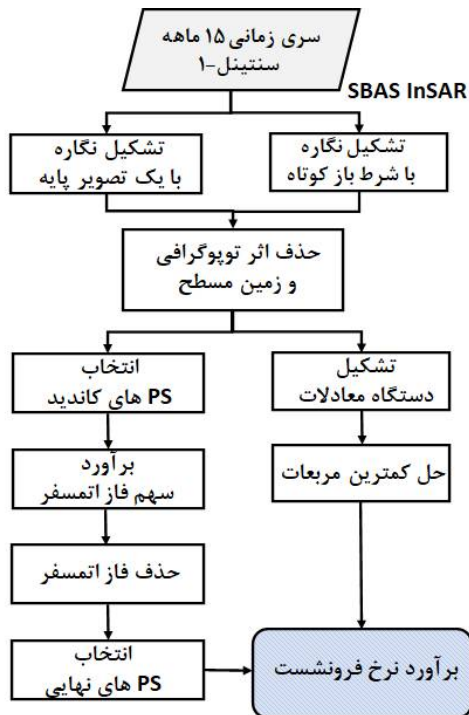
مقدار	مشخصه
۵ متر	حد تفکیک مکانی در جهت برد ^۴
۲۰ متر	حد تفکیک مکانی در جهت آزیموت ^۵
۱۲ روز	دوره بازدید ^۶
پایین‌گذر ^۸	جهت گذر ^۷
۳۵	شماره گذر
۷۷	قطبش ^۹
۱۹ بهمن ۱۳۹۹	تاریخ شروع سری زمانی (آبشناسان)
۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۱	تاریخ پایان سری زمانی (آبشناسان)
۲۶ آبان ۱۳۹۸	تاریخ شروع سری زمانی (کریمخان)
۲۱ بهمن ۱۳۹۹	تاریخ پایان سری زمانی (کریمخان)

۳- مواد و روش تحقیق

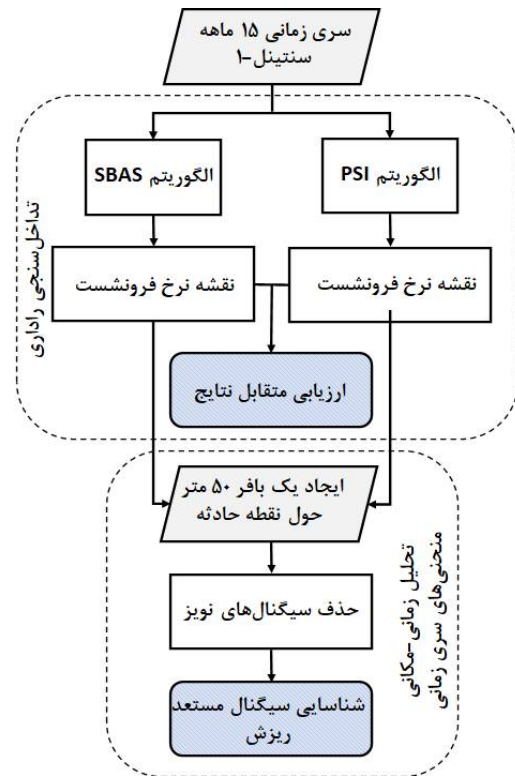
مطابق الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، جهت شناسایی پیش‌نشانگر رخداد فروریزش لازم است منحنی سری زمانی جابجایی در نقطه مذکور مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. در واقع طبق تعریف، رخداد فروریزش در یک نقطه حاصل تغییر مدل جابجایی نقطه مذکور در زمان و به عبارتی افزایش نرخ جابجایی در نقطه ریزش است. همچنین بر خلاف پدیده فرونشست که به صورت منطقه‌ای رخ می‌دهد، در حوادث فروریزش تفاوت الگوی جابجایی در نقطه ریزش نسبت به نقاط اطراف منجر به وقوع حادثه می‌شود. از این رو، در روش پیشنهادی برای شناسایی پیش‌نشانگر وقوع فروریزش از تحلیل مکانی-زمانی منحنی جابجایی ۱۵ ماه پیش از رخداد حادثه استفاده شده است. شکل ۲ روندنمای الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۶ Revisit time
۷ Pass direction
۸ Descending
۹ Polarization

۱ Precise levelling
۲ Geographical positioning system
۳ European space agency
۴ Range resolution
۵ Azimuth resolution



شکل ۳- روندنمای تداخل‌سنجی راداری سری زمانی تصاویر با استفاده از روش‌های PSI و SBAS



شکل ۲- روندنمای الگوریتم پیشنهادی

در ادامه به الگوریتم‌های تولید منحنی سری زمانی، حذف نویز و شناسایی سیگنال ریزش پرداخته می‌شود.

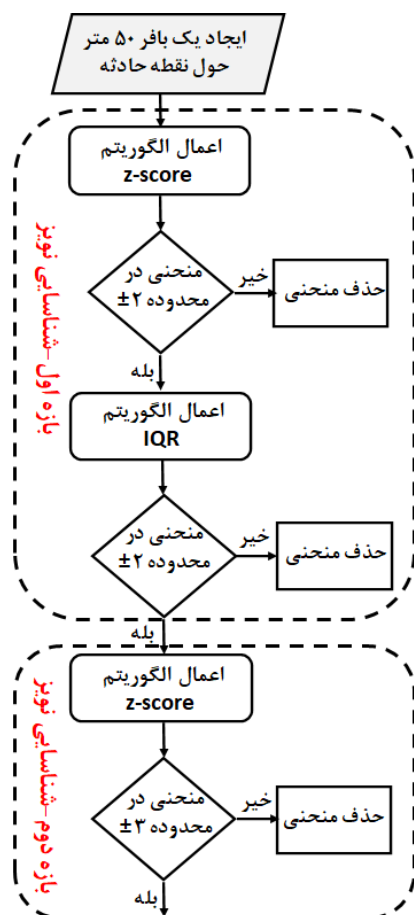
۳-۱- تداخل‌سنجی راداری

جهت شناسایی پیش‌نشانگر رخداد فروریزش لازم است منحنی سری زمانی جابجایی در نقطه مذکور مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. در واقع طبق تعریف رخداد فروریزش در یک نقطه حاصل تغییر مدل جابجایی در نقطه مذکور و افزایش نرخ جابجایی و در نتیجه تفاوت الگوی جابجایی در نقطه ریزش نسبت به نقاط اطراف است. بنابراین در گام نخست باید بر اساس تداخل‌سنجی سری زمانی راداری منحنی جابجایی تولید شود. در این مطالعه قابلیت دو روش تداخل‌سنجی مبتنی بر خط مبنای کوتاه^۱ (SBAS) [۱۳] و روش مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PSI) [۱۴] در شناسایی پیش‌نشانگر رخداد ریزش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. شکل ۳، روندنمای تداخل‌سنجی راداری سری زمانی تصاویر با استفاده از روش‌های PSI و SBAS را نشان می‌دهد.

همچنان که در روندنمای شکل ۲ نشان داده شده‌است، در روش تداخل‌سنجی PSI، پس از حذف فاز توپوگرافی و اثر زمین مسطح^۲، جابجایی به صورت نقطه‌ای و در نقاط پراکنش‌گر دائمی^۳ (PS) با ویژگی بازپراکنش قوی و پایداری دامنه و فاز در زمان برآورد می‌شود. از جمله عوارضی که دامنه بازپراکنش در آن‌ها قوی است، عوارض ساخت بشر مانند ساختمان، برج، پل و نیز عوارض طبیعی نظیر صخره‌ها، خط ساحلی، درختان واقع بر سطح آب را می‌توان نام برد. برای این منظور نقاط PS در دو مرحله و به ترتیب بر اساس معیار پراکنش دامنه^۴ و پس از آن همدوسی زمانی^۵ انتخاب می‌شوند و در نهایت پس از اعمال الگوریتم بازیابی فاز^۶، مقدار جابجایی در این نقاط برآورد می‌شود. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش برآورد جابجایی با دقت بالا در نقاط PS است. اگرچه گسستگی نقشه حاصل از این روش و لزوم انجام درونیابی برای تولید یک نقشه پیوسته، از نقاط ضعف آن محسوب می‌شود، اما اعمال الگوریتم روی نقاطی با ویژگی پایداری فاز در منطقه شهری می‌تواند موجب افزایش کمیت و کیفیت نقاط PS شود.

۴ Amplitude dispersion
۵ Temporal coherence
۶ Unwrapping

۱ Small Baseline SubSet
۲ Flat earth
۳ Permanent scatterer



شکل ۴- روندنمای شناسایی سیگنال‌های نویز در روش پیشنهادی

مطابق تعریف صورت گرفته از فروریزش (تفاوت رفتار جابجایی نقطه در زمان و مکان)، سیگنال‌های نویز نیز می‌توانند در زمره سیگنال‌های محتمل رخداد حادثه طبقه‌بندی شوند. بنابراین لازم است نمودارهای سری زمانی جابجایی، مورد بررسی و در صورت نیاز پالایش قرار گیرند. الگوریتم‌های مختلفی برای شناسایی نویز وجود دارد که در این مقاله از دو روش مرسوم شناسایی نویز استفاده شده‌است. همچنان که در روندنمای شکل ۴ ملاحظه می‌شود، در الگوریتم پیشنهادی از تحلیل مکانی سری زمانی جابجایی در شعاع مکانی ۵۰ متر اطراف نقطه حادثه استفاده شده‌است. کلیه نقاط موجود در شعاع ۵۰ متری محل رخداد حادثه در دو بازه زمانی پنج ماهه اول و دوم مطالعه وارد یک پروسه شناسایی نویز می‌شوند. در واقع ایده شناسایی نویز بر تفاوت بین رفتار سیگنال نویز با سایر نقاط همسایه در پنج ماهه اول و دوم مطالعه استوار است. به این ترتیب، تفاوت رفتار یک

بر اساس آنچه که در روندنمای شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در روش تداخل‌سنجی SBAS بر خلاف روش PSI، میزان جابجایی در کل تصویر و به عبارتی در همه پیکسل‌ها برآورد می‌شود. در این روش همچنان که از نام آن بر می‌آید نگاره^۱ تداخل‌نماها با شرط کمینه بودن خط مبنای مکانی^۲ و زمانی^۳ تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر در این روش برای نیل به همدوسی^۴ مطلوب، تداخل‌نماهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که مقدار خط مبنای زمانی و مکانی آن‌ها کمینه باشد. به این ترتیب در این روش امکان تولید تداخل‌نما و برآورد جابجایی در مناطقی با تغییرات پوشش زیاد (مانند مناطقی با پوشش گیاهی) وجود دارد. به عبارتی یکی از مهم‌ترین مزایای روش SBAS امکان برآورد سری زمانی جابجایی در کلیه مناطق از جمله مناطق با پوشش گیاهی است و برخلاف روش PSInSAR امکان برآورد جابجایی در مناطق با بازپراکنش‌کننده‌های توسعه‌یافته^۵ (DS) را ممکن می‌کند. در روش معمول SBAS افزایش همدوسی در مناطق شامل DS، از طریق اعمال فیلترهای بالاگذر^۶ در حوزه مکان^۷ و به عبارتی چند منظرسازی^۸ تداخل‌نماها تامین می‌شود. در الگوریتم استفاده شده در این پژوهش با توجه به اینکه SBAS در منطقه شهری مورد استفاده قرار گرفته است، نیازی به اعمال چند منظرسازی برای بهبود همدوسی وجود نداشت و این مرحله حذف شد. به این ترتیب، در الگوریتم مورد استفاده پس از تشکیل نگاره بهینه مقدار فاز جابجایی با استفاده از روش کمترین مربعات^۹ در هر پیکسل برآورد می‌شود.

۳-۲- شناسایی و حذف نویز

پس از تولید منحنی‌های سری زمانی لازمست تا با تحلیل رفتار جابجایی نقاط، احتمال رخداد حادثه بررسی شود. همچنان که پیش از این نیز اشاره شد، فروریزش رخدادی نقطه‌ای است که تغییر رفتار جابجایی نقطه در طول زمان و نیز تفاوت رفتار آن با نقاط همسایه می‌تواند راهنمایی برای شناسایی نقطه مزبور باشد. شکل ۴ روندنمای حذف نویز در الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۶ Distributed scatterer
۷ High pass filter
۸ Spatial domain
۹ Multilooking
۱۰ Least squared method

۱ Graph
۲ Interferogram
۳ Spatial Baseline
۴ Temporal Baseline
۵ Coherency

نقطه با نقاط مجاور در پنج ماهه سوم مطالعه و به عبارتی زمان‌های منتهی به رخداد حادثه، می‌تواند هشدار برای احتمال رخداد حادثه باشد اما در مورد نقاطی که از ابتدای زمان مطالعه رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند، شائبه رفتار نویزگونه وجود دارد و این نقاط بر اساس فیلترهای مختلف حذف می‌شوند.

یکی از الگوریتم‌های مرسوم شناسایی نویز که در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد الگوریتم Z-score است [۱۵]. در این الگوریتم با فرض گوسی بودن مشاهدات، آماره Z-score مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود

$$Z - Score = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن x مقدار متغیر تصادفی، μ میانگین متغیر تصادفی و σ انحراف معیار آن است. حد آستانه ۹۵ درصد و ۹۸ درصد در این الگوریتم مقادیر ۲ و ۳ است. مطابق رابطه (۲) در الگوریتم پیشنهادی حد آستانه ۲ مد نظر قرار گرفت و سپس مقدار میانگین و انحراف معیار در هر زمان محاسبه شده منحنی‌های سری زمانی جابجایی $\mu \pm 2\sigma$ جهت حذف مقادیر پرت استخراج شد.

$$\begin{cases} X > \mu + 2\sigma & \text{داده پرت} \\ \mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma & \text{نیاز به بررسی بیشتر} \\ X < \mu - 2\sigma & \text{داده پرت} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن μ و σ به ترتیب منحنی‌های میانگین و انحراف معیار هستند. آماره دیگری که در بازه اول و برای پیرایش نقاط باقیمانده مورد استفاده قرار گرفت الگوریتم دامنه چارکی^۱ (IQR) بود که بر اساس آماره‌های مرتبه دوم چارک اول و سوم متغیر تصادفی و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۶]

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

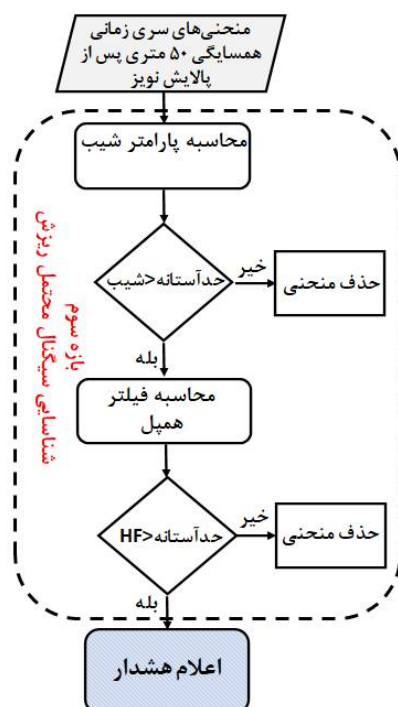
که در آن، Q_1 و Q_3 به ترتیب مقادیر چارک اول و سوم نمونه تصادفی هستند. مطابق الگوریتم حذف نویز IQR داده‌های پرت در خارج از محدوده‌ای هستند که به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} X < Q_1 - a \times IQR & \quad \text{داده پرت} \\ \text{نیاز به بررسی بیشتر} & \quad \text{در غیر این صورت} \\ X > Q_3 + a \times IQR & \quad \text{داده پرت} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن a ضریبی ثابت و عددی بین ۱/۵ تا ۳ است. در الگوریتم پیشنهادی این ضریب ۲ در نظر گرفته شد. در مرحله سوم و برای حذف نهایی منحنی‌های نویزگونه، آنالیز بازه دوم یعنی پنج ماهه دوم مطالعه مد نظر قرار گرفت. در این مرحله مجدداً، میانگین و انحراف معیار داده‌ها محاسبه شد و بر اساس بردار میانگین و انحراف معیار محدوده $\mu \pm 3\sigma$ به عنوان محدوده داده‌های مورد قبول و خارج از آن به عنوان داده‌های پرت در نظر گرفته شد. کلیه نمودارهای سری زمانی باقیمانده در این مرحله، به عنوان ورودی الگوریتم شناسایی سیگنال محتمل ریزش مورد توجه قرار گرفتند.

۳-۳- شناسایی سیگنال محتمل ریزش

جهت شناسایی پیش‌نشانگر رخداد فروریزش منحنی سری زمانی نقاطی که در مرحله حذف نویز حذف نشدند مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۵ روندنمای شناسایی سیگنال محتمل ریزش را در الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد.



شکل ۵- شناسایی سیگنال محتمل ریزش در الگوریتم پیشنهادی

^۱ Inter Quartile Range

۴- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی تصاویر سری زمانی ۱۵ ماهه مناطق خیابان کریمخان و بلوار آشناسان تهران تشریح می‌شود. همچنان که در جدول ۱ نیز آورده شده‌است با توجه به تاریخ رخداد این دو حادثه، سری زمانی تصاویر بلوار آشناسان از ۱۹ بهمن ۱۳۹۹ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۱ (۷ فوریه ۲۰۲۱ تا ۲۹ آوریل ۲۰۲۲) و سری زمانی تصاویر مربوط به منطقه خیابان کریمخان نیز از تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۹۸ تا ۲۱ بهمن ۱۳۹۹ (۱۷ نوامبر ۲۰۱۹ تا ۹ فوریه ۲۰۲۱) در نظر گرفته شده‌است. در هر دو سری زمانی تصاویر پایین‌گذر و مربوط به گذر ۳۵ ماهواره سنیتل-۱ هستند.

۴-۱- ارزیابی متقابل^۴ نقشه‌های جابجایی

مطابق روندنمای شکل ۳، سری زمانی ۱۵ ماهه تصاویر مربوط به هر یک از دو رخداد مورد مطالعه، از ۱۵ ماه پیش از رخداد حادثه تا قبل از وقوع حادثه جمع‌آوری شد و پس از آن با استفاده از دو روش PSI و SBAS مورد پردازش قرار گرفت. پیش‌پردازش تصاویر در محیط ISCE انجام شد و پس از آن جهت پردازش سری زمانی تصاویر بر مبنای الگوریتم PSI از نرم‌افزار StaMPS استفاده شد. همچنین برای پردازش داده‌ها بر مبنای الگوریتم خط مبنای کوتاه، از کتابخانه MintPy استفاده شد.

در گام نخست لازم است تا نقشه‌های نرخ فرونشست حاصل از روش‌های SBAS و PSI برای هر دو منطقه مطالعاتی با هم مقایسه شوند. این مقایسه در واقع روشی برای ارزیابی نتایج حاصل از پردازش انجام شده در غیاب داده‌های معتبر زمینی است. شکل ۶ نقشه‌های نرخ جابجایی در بازه مذکور را در منطقه بلوار آشناسان نشان می‌دهد. همچنان که انتظار می‌رفت نقشه جابجایی حاصل از روش SBAS یک نقشه پیوسته است که تنها در بخش محدودی از تصویر به دلیل همدوسی پایین برآورد جابجایی انجام نشده‌است. در مقابل، نقشه حاصل از روش PSI، نقشه‌های گسسته و محدود به نقاط بازپراکنش‌گر دائمی است.

همچنان که در روندنمای شکل ۵ ملاحظه می‌شود، سیگنال محتمل ریزش بر اساس تفاوت رفتار جابجایی آن با نقاط همسایه در ماه‌های منتهی به ریزش (۵ ماهه سوم سری زمانی جابجایی) شناسایی می‌شود. این شناسایی در دو مرحله و بر اساس مقایسه سیگنال‌های همسایه در بازه سوم مطالعه انجام شد. در مرحله اول مقدار شیب نمودارهای سری زمانی با شیب نمودار میانگین مقایسه می‌شود و تنها منحنی‌هایی به عنوان نقاط مستعد فروریزش حفظ می‌شوند که شیب آن‌ها تفاوت معنی‌داری با شیب منحنی میانگین محدوده داشته باشد.

در مرحله دوم از فیلتری به نام همپل^۱ استفاده شده‌است. کاربرد این فیلتر در شناسایی داده‌های پرت^۲ در میان یک مجموعه داده است [۱۷]. این فیلتر برای پیدا کردن داده پرت در میان متغیرهای تصادفی به صورت رابطه (۵) عمل می‌کند.

$$HF = \frac{x - M}{\sigma} \quad (5)$$

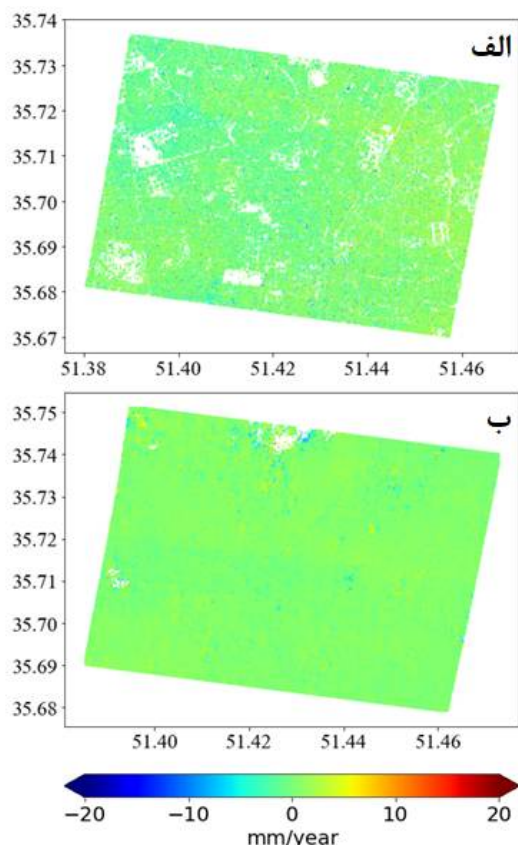
که در آن x مقدار متغیر تصادفی، M میانه^۳ متغیر تصادفی و σ انحراف معیار آن است. بنا به تعریف، سیگنال مستعد فروریزش در بازه سوم زمانی (ماه‌های منتهی به ریزش) رفتاری متفاوت با سایر نقاط همسایه دارد و از این رو در واقع شناسایی داده پرت در این بازه منجر به شناسایی این سیگنال متفاوت خواهد شد. جهت اعمال این فیلتر ابتدا منحنی میانه محاسبه می‌شود و سپس در هر نقطه زمانی انحراف معیار بین منحنی‌های متناظر با همه نقاط همسایه محاسبه می‌شود. سیگنال فروریزش سیگنالی است که خارج از بازه تعریف شده بر اساس میانه و انحراف معیار باشد. تابع شناسایی سیگنال فروریزش بر اساس این فیلتر به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود

$$(6) \quad \begin{cases} X > M + 3\sigma & \text{احتمال ریزش} \\ M - 3\sigma < X < M + 3\sigma & \text{متناسب با همسایه} \\ X < M - 3\sigma & \text{احتمال ریزش} \end{cases}$$

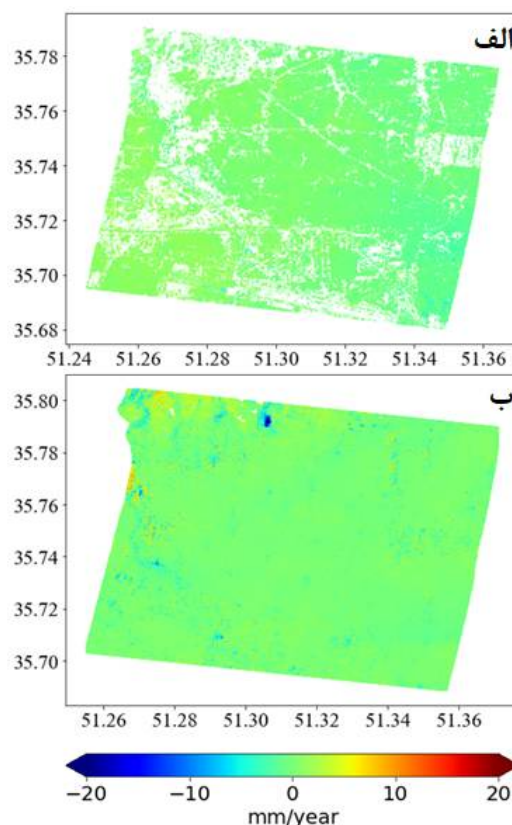
که در آن، M منحنی میانه، σ منحنی انحراف معیار و حد آستان فیلتر همپل مقدار ± 3 است.

^۳ Median
^۴ Cross validation

^۱ Hampel filter
^۲ Outlier



شکل ۷- نقشه نرخ جابجایی در منطقه خیابان کریمخان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS

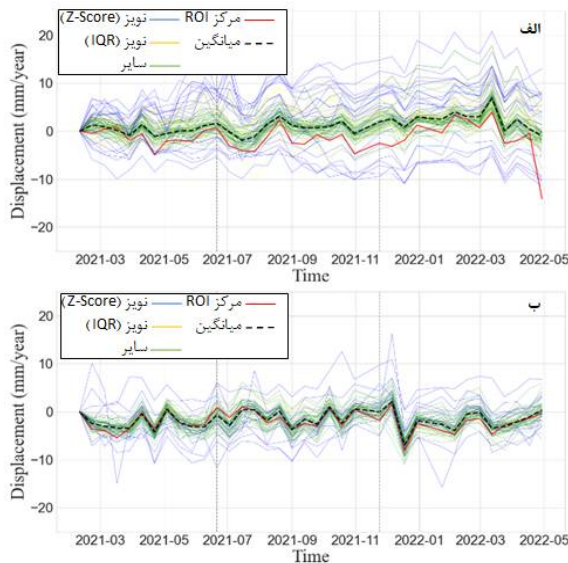


شکل ۶- نقشه نرخ جابجایی در منطقه بلوار آشناسان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS

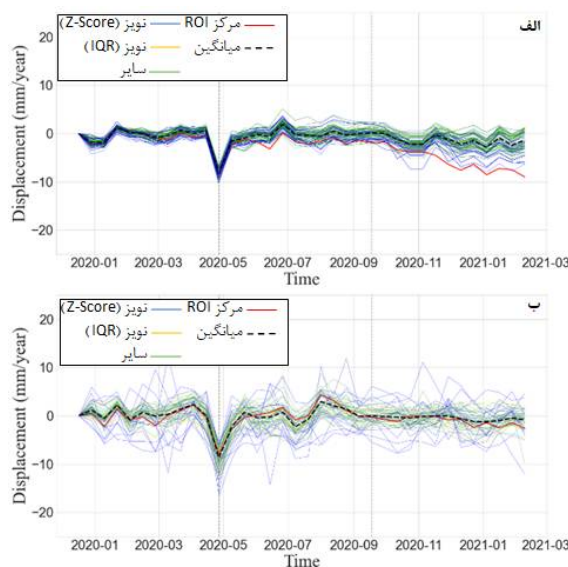
جهت ارزیابی متقابل نقشه حاصل از دو روش تداخل‌سنجی مورد استفاده (PSI و SBAS) و بررسی کمی میزان تطابق نتایج حاصل از این دو روش، از ترسیم توزیعی نتایج و معیار ارزیابی ضریب تعیین^۱ استفاده شده‌است. شکل ۸ ترسیم توزیعی نرخ جابجایی حاصل از دو روش را برای هر دو منطقه نشان می‌دهد. همچنان که در شکل ۸ دیده می‌شود، همبستگی نتایج با توجه به نزدیکی توزیع داده‌ها به خط $y=x$ مشهود است. با این حال برای بررسی کمی و دقیق این همبستگی از پارامتر ضریب تعیین استفاده شده‌است. ضریب تعیین $0/9$ بین نتایج حاصل از PSI و SBAS، برای هر دو منطقه مطالعاتی، مؤید همبستگی بالای نقشه‌های نرخ فرونشست حاصل از دو روش تداخل‌سنجی مذکور است. با توجه به عدم دسترسی به داده زمینی برای کنترل و ارزیابی نتایج برآورده شده در دو منطقه مطالعاتی، استفاده از این روش ارزیابی متقابل در واقع مهر تأییدی بر صحت نتایج به‌دست آمده به صورت نسبی است.

بر اساس آنچه که از شکل ۶ برمی‌آید، منطقه مطالعاتی درگیر فرونشست نیست و انتظار می‌رود مجموعه منحنی‌های سری زمانی منطقه دارای نرخ جابجایی نزدیک به صفر باشند. همچنین با توجه به پوشش گیاهی موجود در محدوده رخداد حادثه، ملاحظه می‌شود که نقاط PS در نقشه نرخ فرونشست این منطقه از تراکم بالایی برخوردار نیست (شکل ۶-الف). نقشه‌های نرخ جابجایی در منطقه خیابان کریمخان نیز در شکل ۷ نشان داده شده‌است. همچنان که ملاحظه می‌شود به دلیل بافت شهری در این منطقه، تراکم نقاط PS در نقشه نرخ بالا است (شکل ۷-الف). همچنین نقشه‌های جابجایی مربوط به منطقه کریمخان نیز مؤید عدم وجود فرونشست منطقه‌ای در این محدوده و نرخ جابجایی نزدیک به صفر است. مقایسه ظاهری نقشه‌های حاصل از دو روش SBAS و PSI در هر دو منطقه مطالعاتی نیز، همبستگی نتایج حاصل از این دو روش را به صورت دیداری تأیید می‌کند.

^۱ Determination of coefficient

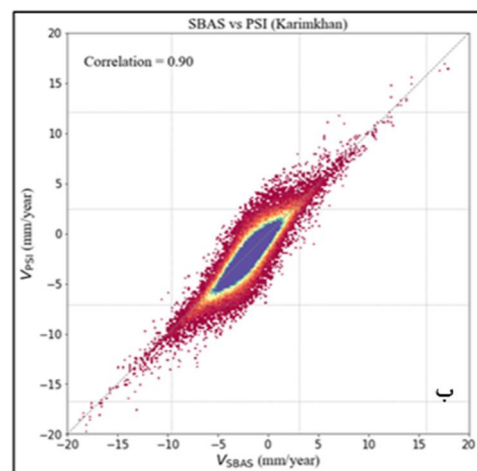
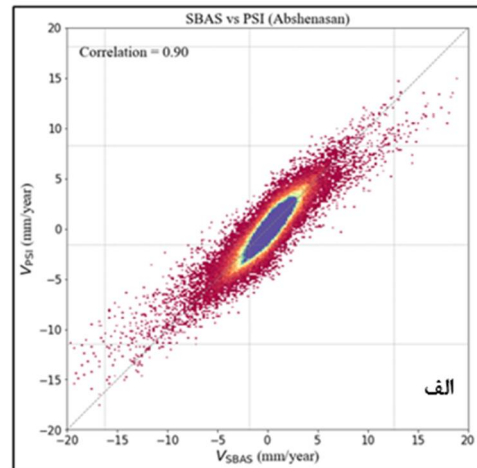


شکل ۹- سری زمانی همسایگی محل رخداد حادثه در بلوار آبشناسان.
(الف) روش PSI، (ب) روش SBAS



شکل ۱۰- سری زمانی همسایگی محل رخداد حادثه در خیابان کریمخان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS

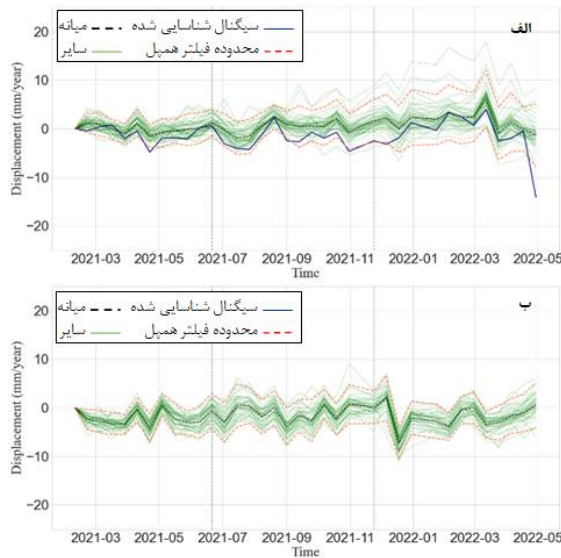
مطابق شکل ۹ و ۱۰، در شناسایی نویز بر مبنای آماره Z-score، محدوده سطح اطمینان ۹۵ درصد بر پایه میانگین و انحراف معیار مجموعه داده در بازه اول به عنوان محدوده امن در نظر گرفته می‌شود و منحنی‌های خارج از این محدوده در هر دو الگوریتم به عنوان نویز شناسایی می‌شوند (منحنی‌های با رنگ آبی). در یک تفسیر چشمی نیز منحنی‌های آبی در هر دو شکل رفتاری نویزگونه و متفاوت با میانگین منطقه از خود نشان می‌دهد. در مرحله شناسایی نویز بر اساس شاخص IQR، تعداد کمتری از منحنی‌ها شناسایی می‌شوند (منحنی‌های زردرنگ).



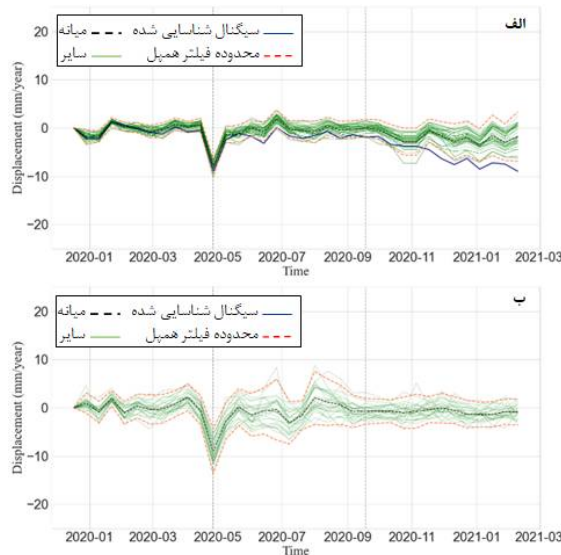
شکل ۸- ترسیم توزیعی نرخ جابجایی حاصل از دو روش PSI و SBAS.
(الف) بلوار آبشناسان، (ب) خیابان کریمخان

۴-۲- حذف داده‌های پرت

مطابق روندنمای شکل ۴ برای شناسایی داده‌های پرت در بازه مکانی به شعاع ۵۰ متر حول محل وقوع حادثه، تمرکز بر دو بازه زمانی اول و دوم مطالعه یعنی ۱۰ ماهه اول سری زمانی است. شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب منحنی سری زمانی نقاط را در شعاع مذکور برای منطقه بلوار آبشناسان و خیابان کریمخان نشان می‌دهد. در این دو شکل، منحنی‌های سری زمانی کلیه پیکسل‌های واقع در شعاع ۵۰ متری محل حادثه در روش SBAS و کلیه PS های واقع در شعاع مذکور در روش PSI نمایش داده شده‌اند. خطوط خط چین عمودی مربوط به مرز بین سه بازه زمانی است و برای مشخص شدن نویزهای شناسایی شده توسط الگوریتم‌های Z-score و IQR در بازه اول، به ترتیب با رنگ آبی و زرد نشان داده شده‌است. همچنین منحنی میانگین به صورت خط چین مشکی و منحنی مربوط به مرکز بافر با رنگ قرمز نمایش داده شده‌است.



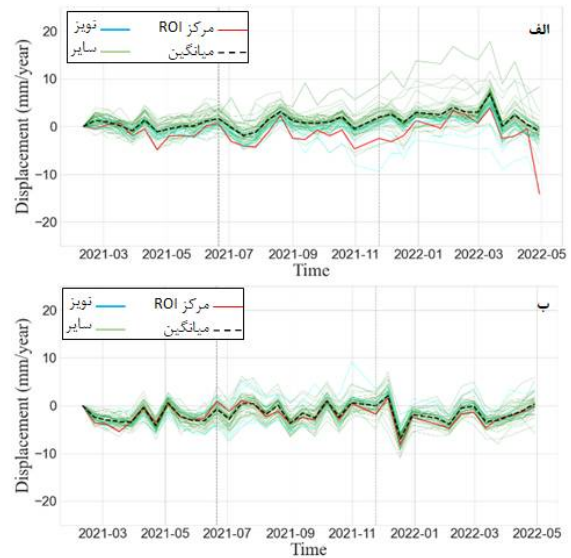
شکل ۱۳- شناسایی پیش‌نشانگر فروریزش در همسایگی محل رخداد حادثه در بلوار آبشناسان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS



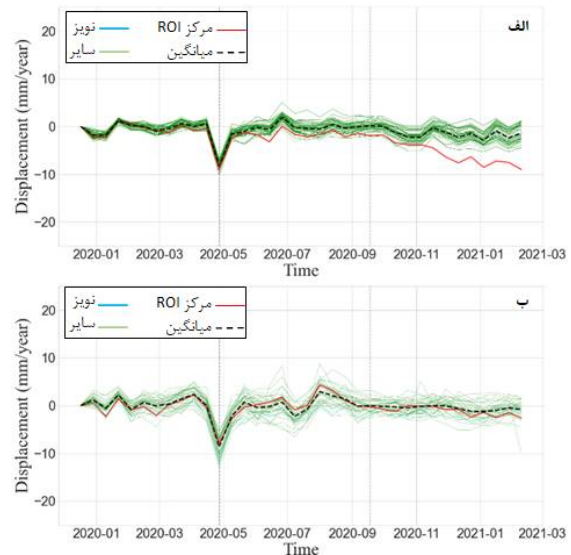
شکل ۱۴- شناسایی پیش‌نشانگر فروریزش در همسایگی محل رخداد حادثه در خیابان کریمخان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS

شکل ۱۳ و شکل ۱۴ به ترتیب سری زمانی پالایش شده را در مرحله شناسایی سیگنال محتمل ریزش در دو منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.

در هر دو شکل ۱۳ و شکل ۱۴ منحنی میانه با خط چین مشکی و بازه مربوط به فیلتر همپل با خطچین قرمز نشان داده شده‌است. در هر دو شکل ۱۳ و ۱۴، منحنی‌هایی که به رنگ سرمه‌ای نمایش داده شده‌اند، مربوط به نقاطی هستند که در این مرحله به عنوان پیش‌نشان‌گر رخداد حادثه فروریزش شناسایی شده‌اند. مطابق الگوریتم ارائه شده، سیگنال محتمل ریزش باید در بازه‌های زمانی اول و دوم در محدوده تعیین شده برای آماره Z-score قرار گیرد تا به



شکل ۱۱- شناسایی نقاط پرت بر اساس بازه دوم در همسایگی محل رخداد حادثه در بلوار آبشناسان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS



شکل ۱۲- شناسایی نقاط پرت بر اساس بازه دوم در همسایگی محل رخداد حادثه در خیابان کریمخان. (الف) روش PSI، (ب) روش SBAS

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ سری زمانی پالایش شده بر اساس بازه اول و شناسایی نقاط پرت بر اساس بازه دوم (منحنی با رنگ فیروزه‌ای) در محدوده سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان می‌دهد. با پالایش مجموعه داده در بازه اول، تعداد نویز شناسایی شده در بازه دوم بسیار کمتر است. به عبارت دیگر عمده سیگنال‌های نویزی در مرحله قبل شناسایی و حذف شده‌اند.

۴-۳- شناسایی سیگنال محتمل ریزش

مطابق روندنمای شکل ۵ برای شناسایی پیش‌نشانگر وقوع فروریزش، تمرکز بر ۵ ماه منتهی به رخداد حادثه است.

عنوان نویز از مجموعه داده‌ها حذف نشود. به عبارت دیگر هماهنگی رفتار سری زمانی سیگنال محتمل ریزش با منحنی‌های همسایه باید در بازه اول و دوم، به ترتیب در سطح اطمینان ۹۵ درصد و ۹۹ درصد پذیرفته شود. لازم به توضیح است که، اگر چه در مرحله شناسایی نویز، تعداد منحنی‌های حذف شده از مجموعه منحنی‌های SBAS بیش از منحنی‌های حذف شده از مجموعه منحنی‌های PS بود اما در هر دو روش منحنی‌هایی که در بازه اول و دوم (۱۰ ماه اول بررسی) رفتاری مشابه پیکسل‌های همسایه داشتند حفظ شده و وارد مرحله شناسایی سیگنال شدند. در مرحله شناسایی سیگنال محتمل ریزش، شیب غیر معمول این منحنی و نیز تفاوت معنادار آن با میانه نشان از احتمال رخداد حادثه در هفته‌های آتی خواهد بود.

همچنان که ملاحظه می‌شود، روش PSI در هیچ یک از مناطق رخداد حادثه موفق به شناسایی پیش‌نشانگر نشده‌است (شکل ۱۳-الف و شکل ۱۴-الف). به عبارتی، در این روش نقطه‌ای که منحنی سری زمانی آن می‌توانست به عنوان پیش‌نشانگر رخداد شناسایی شود، در جریان انتخاب نقاط PS حذف شده‌است. در واقع، از آنجایی که در روش PSI نقاط با پراکنش غالب و پایداری فاز به عنوان نقاط انتخاب می‌شوند در محدوده‌های با تغییرات فاز بالا امکان شناسایی PS وجود ندارد. این تغییرات بالا می‌تواند ناشی از نرخ جابجایی بالا و یا تغییر پراکنش‌گرها در منطقه (مانند آنچه که در محدوده‌های با پوشش گیاهی اتفاق می‌افتد) باشد.

بر خلاف آنچه که در نتایج حاصل از پردازش به روش PSI مشاهده می‌شود، نتایج پردازش سری زمانی تصاویر با استفاده از روش SBAS منجر به شناسایی نقاط پیش‌نشانگر در هر دو حادثه شده‌است (شکل ۱۳-ب و شکل ۱۴-ب). در روش SBAS به دلیل استفاده از تداخل‌نماها با طول خط مبنای کوتاه از یک سو و نیز چند منظرسازی^۱ تداخل‌نماها از سوی دیگر، با تداخل‌نمایی مواجه هستیم که مقادیر همدوسی در آن‌ها بالا است و لذا مقادیر فاز جابجایی در پیکسل‌های تصویر قابل‌بازیابی^۲ است. با این حال، باید توجه داشت که در روش به کار رفته در این پژوهش به دلیل پیاده‌سازی SBAS در منطقه شهری، عملیات چند منظرسازی صورت نگرفته و در نتیجه تراکم پیکسل‌ها در منطقه مطالعاتی بیشتر شده و منجر به شناسایی پیش‌نشانگر شده‌است.

اکنون لازم است فاصله بین پیش‌نشانگر شناسایی شده بر اساس تحلیل مکانی-زمانی منحنی سری زمانی روش SBAS، با موقعیت واقعی رخداد حادثه سنجیده شود. جدول ۱ موقعیت رخداد حادثه را در هر یک از مناطق یادشده نشان می‌دهد. شکل ۱۵، موقعیت نقاط شناسایی شده با استفاده از روش SBAS را در هر دو منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد. همچنان که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، بر اساس تحلیل سری زمانی حاصل از روش SBAS پیش‌نشانگر رخداد فروریزش در هر دو منطقه مطالعاتی بلوار آشناسان و خیابان کریمخان و به ترتیب با فاصله ۱ و ۲/۵ متر از محل رخداد حادثه شناسایی شده‌است. این فاصله به دلیل حد تفکیک مکانی سنجیده است و در واقع به عنوان خطای شناسایی نیست.



شکل ۱۵- موقعیت نقاط مستعد فروریزش شناسایی شده با روش SBAS در مجاورت محل رخداد حادثه. الف) بلوار آشناسان، ب) خیابان کریمخان

با توجه به نقشه‌های نرخ فرونشست ارائه شده در شکل ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود که نرخ متوسط فرونشست در هر دو منطقه مطالعاتی نزدیک به صفر است. این موضوع در منحنی‌های سری زمانی شکل‌های ۹ تا ۱۴ نیز به خوبی دیده می‌شود.

۲ Inversion

۱ Multilooking

۵- جمع‌بندی و پیشنهادات

در این مقاله، سری زمانی تصاویر راداری S1 برای بررسی پیش‌نشان‌گر احتمال رخداد حادثه فروریزش در منطقه شهری مورد استفاده قرار گرفت. در این مقاله با تکیه بر تعریف فروریزش و تفاوت آن با پدیده فرونشست، نوعی تحلیل مکانی-زمانی روی منحنی‌های سری زمانی مبتنی بر تکنیک‌های تداخل‌سنجی SBAS و PSI انجام شد. از آنجایی که در روش PS، تمرکز بر روی نقاطی است که از پایداری فاز و نیز مقدار بالای دامنه در طول زمان برخوردار هستند، لذا ممکن است دقیقاً پیکسلی که مستعد رخداد حادثه است به دلیلی تغییرات فاز، در روند محاسبات حذف شود. از سوی دیگر، روش SBAS نیز برای بهبود میزان همدوسی در یک تداخل‌نما از تکنیک چند منظرسازی استفاده می‌کند. در این مطالعه بدون اعمال این تکنیک (به دلیل اجرا در منطقه شهری) و در نتیجه ضمن حفظ حد تفکیک مکانی از روش SBAS نیز استفاده شد تا با بررسی همه پیکسل‌ها در سطح تداخل‌نما (به جز محدود پیکسل‌هایی که به دلیل همدوسی خیلی پایین از روند محاسبات فیلتر می‌شوند) احتمال شناسایی پیکسل مستعد ریزش بیشتر شود. بر اساس این تحلیل پس از حذف سری‌های زمانی نویزگونه، شناسایی سیگنال‌های محتمل ریزش بر اساس تفاوت رفتار جابجایی نقاط در ماه‌های منتهی به رخداد حادثه مبنای کار قرار گرفت. این تفاوت رفتار جابجایی هم در بحث نرخ نشست (مقدار شیب نمودار جابجایی) و هم در تفاوت منحنی جابجایی با میانه منطقه (پس از حذف نویز) مورد توجه قرار گرفت. نکته مهم در تحلیل صورت گرفته اینکه حد آستانه شاخص‌های مختلف شناسایی نویز و سیگنال برای هر دو منطقه مطالعاتی و هر دو روش InSAR یکسان در نظر

مراجع

گرفته شد تا امکان تعمیم نتایج این مطالعه به سایر مناطق شهری نیز وجود داشته باشد. در نهایت تحلیل سری زمانی منتج از SBAS در هر دو منطقه مطالعاتی منجر به شناسایی سیگنال محتمل ریزش شد و تحلیل منحنی‌های حاصل از تکنیک PSI در هر دو منطقه مطالعاتی نتیجه مطلوبی را در پی نداشت. دلیل این امر را می‌توان احتمال عدم شناسایی نقطه ریزش به عنوان PS در مراحل اولیه روش PSI دانست. در این مقاله صرفاً از داده رایگان S1 استفاده شد، لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی بررسی نتایج بر اساس تصاویر تجاری با حد تفکیک مکانی بهتر و نیز تصاویر با طول موج راداری کمتر (مانند تصاویر باند X) مورد توجه قرار گیرد. بدیهی است که صرف بررسی جابجایی زمین نمی‌تواند ریزش یا عدم ریزش یک سازه را با قطعیت بالا پیش‌بینی کند. به عبارت دیگر، اعلام هشدار مستلزم بررسی سایر عوامل تأثیرگذار اعم از وضعیت استحکام سازه، وضعیت قنات‌های رها شده در زیر بستر شهر، شبکه فاضلاب شهری در منطقه مطالعه، ویژگی‌های خاک و ... است. از این رو پیشنهاد می‌شود وقوع ریزش بر اساس تلفیق داده‌های InSAR با سایر لایه‌های اطلاعات مکانی مؤثر در بروز حادثه و اعمال یک آنالیز مکانی بر لایه‌های مذکور بررسی شود. در چنین حالتی ضمن اینکه اعلام هشدار با قطعیت بالا می‌تواند منجر به جلوگیری از رخداد حوادث و کاهش عواقب مالی و جانی آن شود، تحلیل عوامل مؤثر و میزان تأثیر هر یک از این عوامل را نیز ممکن خواهد کرد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در راستای توسعه یک سامانه مبتنی بر تحلیل سری زمانی تصاویر راداری با هدف شناسایی پیش‌نشان‌گر رخداد فروریزش در منطقه شهری مورد توجه و اتکا باشد.

- [۱] W. F. Lee and K. Ishihara, (2010). "Forensic diagnosis of a shield tunnel failure." *Engineering Structures*, vol. 32, no. 7, pp. 1830-1837.
- [۲] A. Ede, C. Nwankwo, S. Oyeibisi, O. Olofinnade, A. Okeke, and A. Busari, (2019). "Failure trend of transport infrastructure in developing nations: Cases of bridge collapse in Nigeria," in *IOP conference series: materials science and engineering*, 2019, Jakarta.
- [۳] L. Ohenhen and M. Shirzaei, (2022). "Land subsidence hazard and building collapse risk in the coastal city of Lagos, West Africa." *Earth's Future*, vol. 10, no. 12, p. e2022EF003219.
- [۴] G. Chen et al., (2018). "Detection of land subsidence associated with land creation and rapid urbanization in the chinese loess plateau using time series insar: A case study of Lanzhou new district." *Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, p. 270.
- [۵] S. M. J. Mirzadeh et al., (2021). "Characterization of irreversible land subsidence in the Yazd-Ardakan plain, Iran from 2003 to 2020 InSAR time series." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, no. 11, p. e2021JB022258.

- [۶] A. Goorabi, Y. Maghsoudi, and D. Perissin, (2020). "Monitoring of the ground displacement in the Isfahan, Iran, metropolitan area using persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar technique." *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 14, no. 2, pp. 024510-024510.
- [۷] M. Bakon, D. Perissin, M. Lazecky, and J. Papco, (2014). "Infrastructure non-linear deformation monitoring via satellite radar interferometry." *Procedia Technology*, vol. 16, pp. 294-300.
- [۸] W. Wu, H. Cui, J. Hu, and L. Yao, (2019). "Detection and 3D visualization of deformations for high-rise buildings in Shenzhen, China from high-resolution TerraSAR-X datasets." *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, p. 3818.
- [۹] M. Roccheggiani, D. Piacentini, E. Tirincanti, D. Perissin, and M. Menichetti, (2019). "Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using Sentinel-1 SAR interferometry." *Remote Sensing*, vol. 11, no. 6, p. 639.
- [۱۰] P. Milillo, G. Giardina, D. Perissin, G. Milillo, A. Coletta, and C. Terranova, (2019). "Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy." *Remote Sensing*, vol. 11, no. 12, p. 1403.
- [۱۱] M. Khoshlahjeh Azar, A. Hamedpour, Y. Maghsoudi, and D. Perissin, (2021). "Analysis of the deformation behavior and sinkhole risk in Kerdabad, Iran using the PS-InSAR method." *Remote Sensing*, vol. 13, no. 14, p. 2696.
- [۱۲] A. Montisci and M. C. Porcu, (2022). "A satellite data mining approach based on self-organized maps for the early warning of ground settlements in urban areas." *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 2679.
- [۱۳] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, (2002). "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms." *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383.
- [۱۴] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, (2001). "Permanent scatterers in SAR interferometry." *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20.
- [۱۵] A. Ahmed, M. S. Khan, N. Gul, I. Uddin, S. M. Kim, and J. Kim, (2020). "A comparative analysis of different outlier detection techniques in cognitive radio networks with malicious users." *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, pp. 1-18.
- [۱۶] M. A. Samara, I. Bennis, A. Abouaissa, and P. Lorenz, (2022). "A survey of outlier detection techniques in IoT: Review and classification." *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 1, p. 4.
- [۱۷] D. C. Hoaglin, F. Mosteller, and J. W. Tukey, (2000), "Understanding robust and exploratory data analysis," John Wiley & Sons.