

مطالعه دگر یختی بین لرزه‌ای با استفاده از حل سری‌های زمانی InSAR در گستره شهداد، کرمان (شواهد پیش‌نشانگر زمینلرزه)

لیلا مهشادنی^{۱*}، سید احمد علوی^۲، محمدرضا قاسمی^۳ و زهرا موسوی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ استاد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۴ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان، زنجان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸)

چکیده

نرخ تجمع کرنش روی یک گسل ممکن است مستقیماً با نرخ رویداد زمینلرزه‌ها مرتبط باشد بنابراین مشاهدات زمین‌پیمایی کرنش پوسته در مرحله بین‌لرزه‌ای و شناسایی ناپایداری‌های پیش‌لرزه‌ای علاوه بر این که می‌تواند در ارزیابی دقیق‌تر نرخ لغزش گسل‌ها موثر باشد، سهم مهمی در ارزیابی خطر لرزه‌ای دارد. تغییر شکل سطحی و فرگشت زمانی آن در پهنه همگرایی فعال گسلی شهداد با استفاده از داده‌های ماهواره راداری Sentinel-1 و ESA و بهره‌برداری از مجموعه‌های بزرگی از داده‌های باندهای C (۳۸ ماه قبل و ۵۵ ماه پس از زمینلرزه‌های اصلی دسامبر ۲۰۱۷ هجری کرمان)، در بازه زمانی ۸ ساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ برآورد شد. پشته‌های تداخل‌نگاشت با نرم‌افزار ISCE2 ساخته شد. نتایج به‌دست‌آمده برای ایجاد سری‌های زمانی InSAR با استفاده از بسته نرم‌افزاری MintPy پردازش شد. خطاها در سری‌های زمانی فاز برای مطالعه دگر یختی تصحیح شد و از مدل زمانی خطی و چند جمله‌ای درجه ۳ برای تولید نقشه‌های سرعت و شتاب در سه مسیر پایین‌گذر و بالاگذر استفاده شد. نقشه‌های سرعت میانگین علاوه بر جابجایی‌های پایدار در روکانون زمینلرزه‌ها، وجود دگر یختی غیرخطی و ناپایدار پیش‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای را تأیید کردند. این مطالعات منجر به شناسایی نواحی با ناهنجاری‌های طول موج کوتاه و بلند، شواهد سیگنال‌های پیش‌نشانگر لرزه‌ای و اندازه‌گیری آن شد. نتایج نشان داد که در مسیر پایین‌گذر بیش از ۲۰ میلی‌متر فرونشست در جهت دید ماهواره از سه سال قبل از زمینلرزه‌های اصلی در حوضه کواترنری و آبرفتی شمال گسل لکر کوه رخ داده است. در مرحله پس‌لرزه‌ای، همان حوضه‌ها تا ۷۰ میلی‌متر بالا آمدن را در طول تقریباً ۴۰ ماه نشان دادند. نتایج پردازش سری زمانی وجود مراحل فرونشست و تورم متعدد در بازه‌های زمانی-مکانی مختلف در منطقه رومرکزی را تأیید کرد. بخشی از فرونشست تدریجی مشاهده شده در مقیاس زمانی طولانی‌تر (به‌صورت بطئی) قبل از رخداد زمینلرزه‌ها و پس از آن یک دوره زمانی تورم و بالا آمدگی مشاهده شد که نوسانات ناپایدارتر دگر یختی LOS بر روی آن قرار می‌گیرند. این فرونشست آرام احتمالاً مرتبط با شکستگی‌های سطحی و زهکشی آب‌های زیرزمینی در اثر بازشدگی گسیختگی‌ها و تحکیم در مناطق اطراف رومرکز قبل از رخداد زمینلرزه‌ها است. این مشاهدات ضرورت حل سری‌های زمانی InSAR در مناطق لرزه‌خیز برای یافتن الگوهای زمانی و مکانی تغییر شکل سطحی در تعامل با سازوکار و بزرگی زمینلرزه‌ها را نشان می‌دهد. این تغییرات برای الگوسازی و کالیبره‌سازی دگر یختی پیش‌لرزه‌ای می‌تواند به‌طور موثر کاربردی باشد. بر اساس مطالعه توابع زمانی در سری‌های InSAR و جداسازی محدوده‌های دارای تغییر شتاب جابجایی در جهت LOS، توزیع بخش‌های متاثر از فرونشست و تورم، می‌توان بخش‌های پیش‌لرزه‌ای را از مرحله میان‌لرزه‌ای چرخه لرزه‌ای جدا کرد. این مطالعات می‌تواند برای شناسایی رومرکز و سازوکار زمینلرزه‌های آتی کارساز باشد.

کلمه‌های کلیدی: فروانش مکران، پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی، خطر زمین‌لرزه، قطعه‌بندی ابراندگی، مکران غربی، مکران شرقی

۱ مقدمه

گسیختگی لرزه‌ای نتیجه تعامل پیچیده بین تنش بارگذاری و فرگشت زمانی مقاومت گسل است که با فرآیندهای غیرخطی با مقیاس‌های بسیار متفاوت کنترل می‌شوند (Tolomei et al., 2015). تنش پوسته‌ای در مرحله بارگذاری یا بین‌لرزه‌ای، به تدریج روی سطح گسل قفل شده تجمع می‌یابد. سیگنال‌های تغییرشکل ناپایدار پوسته (میان‌مدت یا کوتاه‌مدت)، با توجه به سری‌های زمانی تغییرشکل طولانی‌مدت به صورت غیرعادی تظاهر می‌کنند که ممکن است به رخداد زمینلرزه ختم شود. تغییرشکل‌های میان‌مدت در طول ماه‌ها یا سال‌ها و در مقیاس‌های مکانی ده‌ها یا صدها کیلومتر اندازه‌گیری شده‌اند (Hashimoto 2013). از سویی محاسبات نرخ لغزش و تحلیل خطر لرزه‌ای نیاز به شناسایی توزیع مکانی و زمانی ناهنجاری‌های طول‌موج کوتاه زمینلرزه‌ها در بازه‌های زمانی چرخه زمینلرزه‌ها برای حذف از محاسبات نرخ لغزش دارد. دوره‌های پیش‌لرزه‌ای با کاهش ناگهانی نرخ لرزه‌خیزی در کانون زمینلرزه‌ها مشخص می‌شوند. بنابراین نیاز به تحلیل سایر پارامترهای ژئوفیزیکی است. یکی از پدیده‌های ژئوفیزیکی در مرحله پیش‌لرزه‌ای، توالی مراحل تورم و فرونشست سطح زمین است که در مقیاس میان‌مدت یا کوتاه‌مدت رخ می‌دهد. این تغییرات با پردازش InSAR بررسی شده است (Moro et al., 2017; Vaka et al 2023). فرآیند شکست در مرحله پیش‌لرزه‌ای عمدتاً شامل هسته‌زایی، رشد، تجمع وادغام ترک‌هاست که مکان‌یابی کرنش را با مدل‌های میکرومکانیکی فراهم می‌کند (به عنوان مثال: کمنی و کوک، ۱۹۹۱)، مدل‌ها با در نظر گرفتن شکستگی منفذی و ترک‌های لغزشی بالی شکل (بود و همکاران، ۲۰۱۴)، اثرات اصطکاکی (مک کلینتاک، ۱۹۶۲) و فروپاشی منفذی (زو و همکاران، ۲۰۱۰) توسعه یافته است. مطالعات آزمایشگاهی مختلف برای پیوند این مدل‌ها با شواهد میدانی برای زمینلرزه‌های

صورت گرفته است (به‌عنوان مثال، بن سون و همکاران، ۲۰۰۷؛ فازیو و همکاران، ۲۰۱۷). شواهد زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی (مانند رگه‌های هیدروترمال) در پهنه‌های گسلی فعال، تهاجم موضعی سیال‌های تحت فشار را در بخش‌های پایین پوسته لرزه‌زا (خصوصاً پهنه‌های فشاری و ترافشاری) در ژرفای ۲۰-۱۰ کیلومتر نشان می‌دهد. این رفتارها با افزایش فشار سیالی در ناحیه لرزه‌زا، کاهش مقاومت اصطکاکی گسل و افزایش تنش برشی، شکست لرزه‌ای را تسریع می‌کند. زمین‌لرزه‌های بزرگ پوسته‌ای عموماً با پهنه‌های کم سرعت با درازای ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلومتر در بخش‌های پایین پوسته لرزه‌زا به همراه پهنه‌های با ناهنجاری‌های محلی V_p/V_s بالا با درازای ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر و هدایت الکتریکی بالا مرتبط با هسته‌زایی گسیختگی همراه هستند (Sibson 2020).

تجزیه و تحلیل داده‌های InSAR در مناطق فعال، به‌عنوان یک ابزار ارزشمند برای تخمین خطر لرزه‌ای امکان‌ارزیابی تجمع کرنش و شناسایی گسل‌ها را فراهم می‌کند. پردازش DInSAR از دو تصویر SAR برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل‌های سطحی بین دو زمان اخذ متفاوت، با به کارگیری روش‌های درون‌یابی به منظور همبستگی زمانی زمینلرزه‌ای، استفاده می‌کند (یاسین و همکاران، ۲۰۱۳). مدل‌های آماری اعمال شده برای داده‌های InSAR با هدف بررسی ناپایداری‌ها در دگرریختی میانلرزه‌ای به دو دسته روش‌های تحلیل سری زمانی چند زمانی و روش‌های آمار مکانی بکار رفته است که از وابستگی‌های زمانی و مکانی داده‌ها استفاده می‌کنند. اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی با دامنه کوچک و زمان استمرار بالا در چرخه لرزه‌ای با دگرریختی کم ژرفا، توانایی استخراج سیگنال‌ها و اثرات پیش‌لرزه‌ای وابسته به زمینلرزه‌های متوسط و بزرگ را از منابع مختلف نوین دارد (به‌عنوان مثال: فیلدینگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ گراندین و همکاران، ۲۰۱۷). پردازش سری زمانی با تخمین‌های مکرر جابجایی سطحی در طول زمان، انعطاف‌پذیری بهتری

پیش‌لرزه‌ای با داده‌ها InSAR، انتخاب شد. این منطقه در محل همگرایی چند راستای گسلی به‌طور معمول پدیده‌های ژئوفیزیکی محلی مختلف مانند زمینلرزه، فرونشست و تورم سطح زمین را تجربه می‌کند. گسل‌های ژرف در یک بلوک ساختاری با مرزهای گسلی راستالغز ژرف، نقش مهمی در تکامل تنش‌های محلی دارند (افلاکی و موسوی، ۲۰۲۱). در این مطالعه شواهد تغییرشکل زمین قبل از رخداد‌های لرزه‌ای با استفاده از روش‌های InSAR چند زمانی بر اساس سری‌های زمانی، توزیع سرعت و شتاب جابجایی LOS در چرخه زمینلرزه‌ای زمین‌لرزه‌های سه‌گانه ۲۰۱۷ هج‌دک (کرمان) با نرخ لرزه‌خیزی بالا بررسی شد. نتایج این مطالعه محدوده‌های زمانی و مکانی تاثیرگذاری مراحل آماده‌سازی زمینلرزه‌ها بر نرخ لغزش گسل‌های مرزباختری بلوک لوت را مشخص می‌سازد. مطالعات لرزه‌ای، ساختاری، زمین‌پیمایی و مدل‌سازی بر اساس جفت تداخل‌نگاشتهای هم‌لرزه (واج‌دیان و همکاران ۲۰۲۳، ساویج و همکاران، ۲۰۱۹ و نعمتی و همکاران، ۲۰۲۰) در محل رو مرکز زمین لرزه‌های سه‌گانه هج‌دک انجام شده است که نتایج آن‌ها به‌طور کامل بر هم منطبق نیست. این ابهامات می‌تواند به این دلیل باشد که گسیختگی‌های لرزه‌ای، همانند حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، معرف تمام راستای فعال گسل‌ها نیست و از سویی ابهاماتی برای جداسازی سطح نودال از صفحه گسیختگی در حل سازوکار کانونی می‌تواند سبب سوگیری در نتایج مدل‌سازی صفحه گسل زمینلرزه شود. همچنین این مطالعات تنها چشمه زمینلرزه‌ها را در زمان گسیختگی لرزه‌ای مبنا قرار داده‌اند که معرف تمام راستای گسل‌های لرزه‌ای نیست. بنابراین سعی شد میدان‌های کرنش زمین ساختی با توجه به راستای گسل‌های فعال و گسل‌های مرتبه دوم از حل سری‌های زمانی InSAR، در چرخه زمینلرزه و بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲، شناسایی شود و همزمان در تفسیر پیش‌نشانگرها به کار رود.

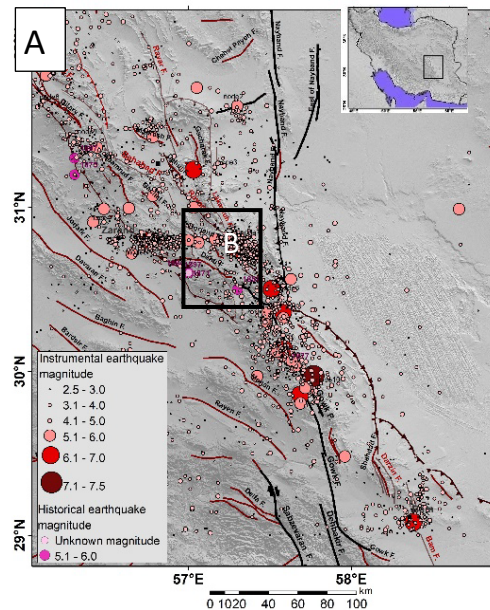
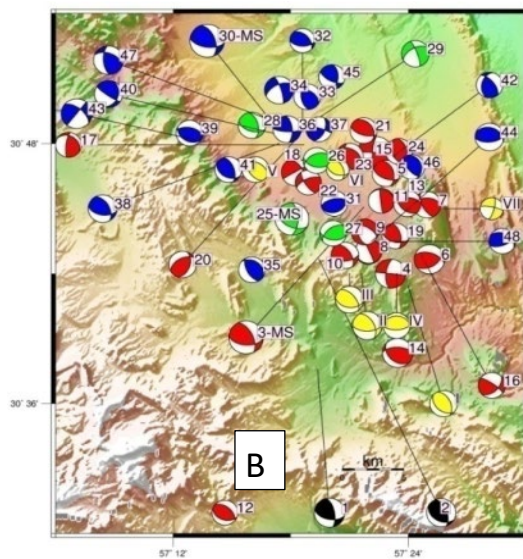
نسبت به حذف تاثیرات نویزی دارد (برناردی و همکاران، ۲۰۲۱) و تهیه نقشه‌های نرخ کرنش در مراحل چرخه لرزه‌ای دارد (کرستو و همکاران، ۲۰۱۶؛ هوپر و همکاران، ۲۰۱۲). در حل سری زمانی، پیکسل‌های پایدار با همدوسی بالا برای حذف سیگنال‌های متاثر از decoration و تاخیر فاز اتمسفری مشخص می‌شوند و فیلتر مکانی-زمانی به همراه تصحیح تاخیر فاز اتمسفری اعمال می‌شود (گلدستاین و ورنر، ۱۹۹۸). مورو و همکاران (۲۰۱۷) سیگنال‌های هشدار اولیه زمینلرزه را بر اساس نقشه‌های سرعت زمین و شتاب به‌دست آمده از پردازش InSAR شناسایی کردند. مطالعه برخط تغییرات پیش‌نشانگر با استفاده از کمی‌سازی انحراف سری‌های زمانی و شاخص‌های انحراف برای شناسایی سیگنال‌های هشدار اولیه انجام شده است (سیگنا و همکاران، ۲۰۱۲؛ کوهن‌وبر، ۲۰۱۸). از روش‌های مختلف تعریف شده برای سری‌های زمانی می‌توان به روش خوشه‌بندی (میلون و سپی، ۲۰۱۱) k-medoids و روش طبقه‌بندی، شامل توالی آزمون‌های آماری برای تخصیص خودکار روندهای ۶ گانه مرجع و ترکیب آن‌ها به سری‌های زمانی بر اساس آزمون B-method نام برد (برتی و همکاران، ۲۰۱۳؛ چنگ و هانسن، ۲۰۱۵).

محاسبات نرخ لغزش و تحلیل خطر لرزه‌ای نیاز به شناسایی توزیع مکانی و زمانی ناهنجاری‌های طول‌موج کوتاه زمینلرزه‌ها در چرخه لرزه‌ای برای حذف از محاسبات نرخ لغزش دارد. سیگنال‌های پیش‌نشانگر می‌تواند در میدان‌های کرنش مخفی شود. شناسایی و مطالعه هر یک از سیگنال‌های زمین ساختی و پیش‌نشانگر با شناخت و در نظر گرفتن دیگری نتایج قابل اعتمادی را به‌دست می‌دهد. برای مطالعه نرخ لغزش گسل‌های فعال در مرحله اول، جابجایی‌های سطحی در بازه‌های زمانی مختلف بررسی می‌شود. منطقه گسلی شه‌داد با فعالیت لرزه‌ای بالا برای مطالعه مرحله میان‌لرزه‌ای و شناسایی ناپایداری‌های

۲ لرزه زمین ساخت و لرزه خیزی

اختلاف زیاد بین کوتاه‌شدگی زاگرس و مکران سبب ایجاد برش شمالی-جنوبی بزرگ بین ایران مرکزی و افغانستان و منطقه مورد مطالعه شده است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). منطقه مطالعه محل همگرایی و تلاقی سامانه‌های گسلی در شمال خاور کرمان و موقعیت گسل سیرچ (شامل سامانه‌های گسلی شمالی-جنوبی نایبند، گوک و سبزواری و شمال باختری کوهبنان)، محل تمرکز تنش و رخداد زمینلرزه‌های ویرانگر متعدد است (واکر و همکاران، ۲۰۱۰). گسل‌های اصلی راستالغز راستبر دیگر با مؤلفه فشاری و راستای تقریبی شمالی-جنوبی شامل گسل‌های لکر کوه، راور، تکدر و بم است (شکل ۱). گسل‌های گدار لکر کوه و دهران با راستای شمال باختر - جنوب خاور پایانه

جنوبی گسل لکر کوه را در اتصال با پهنه گسلی کوهبنان تشکیل می‌دهد. سامانه گسلی راور هم در بخش‌های جنوبی با سامانه گسلی لکر کوه و کوهبنان به صورت همگرا امتداد دارد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که توزیع تنش‌های محلی، دارای تغییر شدیدی در امتداد سامانه گسلی لوت باختری عمدتاً در بخش کوهبنان و شهداد-بم است (طبس: N044°E، باختر لوت-کوهبنان: N13°E-10°N، شهدادبم: N26°E-13°N و کوه‌های شهبوران: N077°E). وضعیت تنش لرزه‌ای، تغییرات بین تنش راستالغز منطقه‌ای با محور تنش σ_1 شمالی-جنوبی در ایران مرکزی و تنش فشاری محلی محور تنش σ_1 در جهت N035°E در بخش‌های جنوبی بلوک طبس را نشان می‌دهد (افلاکی و موسوی، ۲۰۲۱).



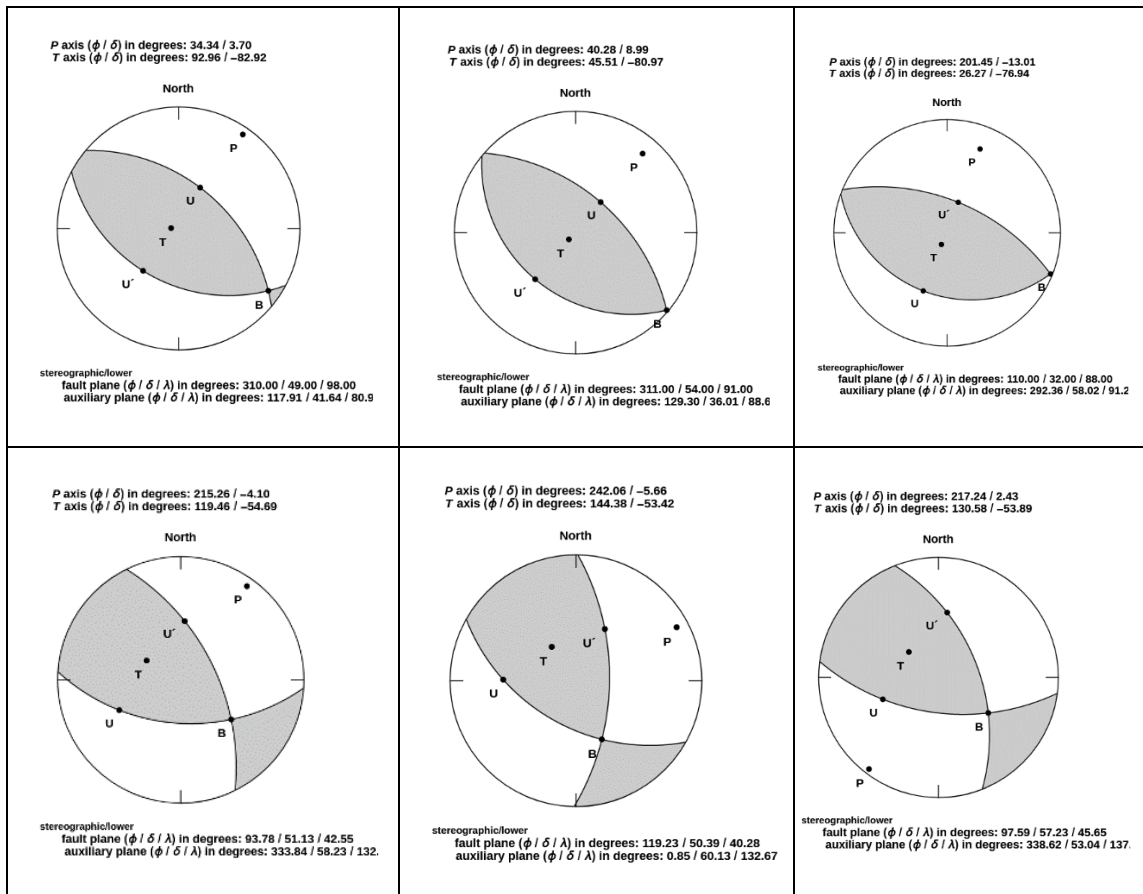
شکل ۱. راست) گسل‌های فعال (با تغییرات از: حسامی و همکاران، ۲۰۰۳؛ شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲) و لرزه‌خیزی دستگاهی (کاتالوگ IIEES) و تاریخی (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲) در بازه زمانی ۱۹۰۹ تا ۲۰۲۳. چپ). سازوکار کانونی زمین لرزه‌های اصلی و پس لرزه‌های بزرگ با بزرگای $M_N > 4.6$ به روش پلاریته: پیش‌لرزه از ۲۴/۰۹/۲۰۱۴ (سبزه)، پس لرزه‌های زمینلرزه اول (قرمز)، پس لرزه‌ها بعد زمینلرزه دوم و قبل از زمینلرزه سوم (سبز) و پس لرزه‌های بعد از زمینلرزه سوم (آبی) (نعمتی و همکاران، ۲۰۲۰).

بزرگ گسیخته شده است. سامانه گسلی کوهبنان با لرزه‌خیزی بالا در انتهای جنوب خاوری خود به شاخه‌های ترفشارشی ختم می‌شود. گسل گلباف بیشینه سطح لرزه

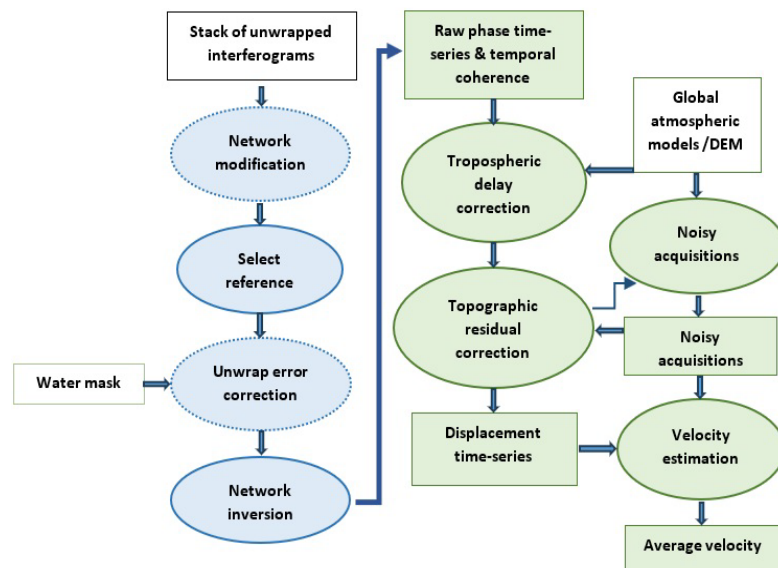
قطعات شمالی پهنه گسلی گوک یا گلباف در مجاورت همگرایی شهداد، با سازوکار امتداد لغز راست‌بر و آرایش پلکانی پله به راست در چند دهه پیش، با زمین‌لرزه‌های

واجدیان و همکاران (۲۰۲۳) با ترکیب روش‌های زمین‌پیمایی، لرزه‌ای و زمین‌شناسی نشان دادند که توالی زمین‌لرزه‌های هجدک در یک پله فشاری ضخیم پوسته رخ داده است که بین گسل‌های ژرف راست‌بر شمالی-جنوبی تشکیل شده است. ساویج و همکاران (۲۰۱۹) پارامترهای چشمه را با زمان‌های رسید و تداخل‌نگاشت‌های دوتایی، ارزیابی کردند و دو زمینلرزه اصلی اول را به یک گسل کور و با شیب NE و گسیختگی زمینلرزه سوم را یک راندگی مزدوج با شیب SW در فرادواره گسل اول نسبت دادند. واجدیان و همکاران (۲۰۲۳) برای شناسایی گسیختگی‌های هم‌لرزه، پردازش داده‌های زمین‌پیمایی ماهواره‌ای را به کار بردند و صفحات گسلی رویدادهای

خیزی ثبت شده و گسل نایبند فعالیت تاریخی یا دستگامی نسبتاً کمی را داراست (بربریان و همکاران، ۱۹۹۹). سازوکار کانونی زمینلرزه‌ها در این منطقه رخداد رویدادهای فشاری و راست‌الغز را نشان می‌دهد (ساویج و همکاران، ۲۰۱۹؛ نعمتی و همکاران، ۲۰۲۰). زمینلرزه‌های سه‌گانه ۱ و ۱۲ (UTC ۰۸:۴۳, UTC ۲۱:۴۱) دسامبر ۲۰۱۷ با بزرگای تقریبی Mw 6 در محل همگرایی گسل‌های راست‌الغز راست‌بر گوک، نایبند، لکرکوه و کوه‌بان رخ داده است. چشمه‌های زمین‌لرزه‌های سه‌گانه به روش‌های مختلف لرزه‌ای، میدانی و جفت تداخل‌نگاشت هم‌لرزه‌ای، مطالعه شده‌اند. این نتایج اختلافاتی را با هم نشان می‌دهند و بر هم منطبق نیستند (شکل ۲).



شکل ۲. سازوکار کانونی سه زمینلرزه اصلی دسامبر ۲۰۱۷ هجدک. ستون چپ: زمینلرزه ۱ دسامبر، ستون وسط: زمینلرزه دوم در ۱۲ دسامبر، ستون راست: زمینلرزه سوم در ۱۲ دسامبر ۲۰۱۷. بالا: سازوکار کانونی و پارامترهای چشمه با شکل موج‌های منطقه‌ای و دور لرزه‌ای و زمان‌های رسید (ساویج و همکاران، ۲۰۱۹)؛ پایین: سازوکار کانونی با مدل‌سازی شکل موج تنه‌ای (نعمتی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۳. فلوجارت مراحل حل سری‌های زمانی InSAR در نرم افزار Mintpy. گردش کار از دو مرحله اصلی تشکیل شده است: (۱) تصحیح خطاهای بازیابی فاز و حل وارون برای سری‌های زمانی فاز خام (بیضی‌های آبی)، و (۲) تصحیح خطاهای فازی مربوط به منابع مختلف برای به دست آوردن سری‌های زمانی جابجایی (بیضی‌های سبز). انجام مراحل که با خط چین مشخص شده ضروری نیست (با کمی تغییرات برگرفته از: یانجون و همکاران، ۲۰۱۹).

زمینلرزه‌های ۲۰۰۵ زرنند) و ۱۹ کیلومتر (توزیع عمق پس‌لرزه‌های ثبت شده محلی رویداد ۲۰۰۵) پیشنهاد کردند. تأثیر جهت‌پذیری بر خطر لرزه‌ای با وجود ضخامت پوشش رسوبی کمتر از ۴ کیلومتر در خاور ایران (تکنیک و قدس، ۱۳۹۶)، از نظر خطر لرزه‌ای می‌تواند حیاتی باشد.

۳ مطالعه مراحل چرخه لرزه‌ای

۱-۳ داده‌ها

داده‌های سنتینل-۱ (۱۹۰ تاریخ اخذ داده در مسیر پایین گذر ۹۳ و ۶۱۶ تاریخ در مسیر بالاگذر ۱۵۹ و ۲۳۴ تاریخ در مسیر پایین گذر ۱۶۶) از ۱۶ اکتبر ۲۰۱۴ تا ۱۹ ژوئیه ۲۰۲۲ در دوره تقریباً ۸ ساله در محدوده N۲۹.۵ تا N۳۲ و E۵۷ تا E۵۸.۵ انتخاب شدند. پارامترهای مداری دقیق ارائه شده توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) و داده‌های مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با وضوح ۳۰ متر ماموریت توپوگرافی رادار شاتل (SRTM) برای تصحیح مداری و ارتفاعی پشته‌ها، به کار رفت. تصحیح تأخیر فاز تروپوسفر با مدل‌های تحلیلی آب و هوایی جهانی که توسط سرویس تغییرات

E1 و E2 را با شیب به سمت شمال خاور با بیشینه لغزش به ترتیب در ژرفای ۵ و ۹ کیلومتر نسبت دادند و گسیختگی زمین لرزه سوم را با یک صفحه گسلی شکن شده (Kinked fault plane) به سمت جنوب باختر با بیشینه لغزش در ژرفای ۲/۲ کیلومتر، معرفی کردند. نعمتی و همکاران (۲۰۲۰) با مدل‌سازی شکل موج تنه‌ای، چشمه زمینلرزه‌های اول و دوم را گسل لکرکوه با شیب به سمت جنوب باختر با بیشینه تغییر شکل عمودی و لغزش خالص شیب‌لغز در قسمت میانی گسیختگی‌ها مرتبط دانستند. نسبت بالای لغزش کلی (میانگین ۱/۵ متر و بیشینه ۲/۵ متر) نسبت به درازای گسیختگی سطحی (تقریبی ۷ کیلومتر) و عرض باریک جابجایی در جهت شیب (تقریبی ۶ کیلومتر) نشان دهنده افت تنش بسیار زیاد در زمین لرزه سوم است. ساویج و همکاران (۲۰۱۹) ضخامت ناحیه لرزه زا را با توجه به گستره عمق پس لرزه ای ۵ تا ۱۴ کیلومتری به دست آوردند. طالبیان و همکاران (۲۰۰۶) و نعمتی و قیطانچی (۲۰۱۱) ضخامت ناحیه لرزه زایی را به ترتیب کمتر از ۱۳ کیلومتر (مدل‌سازی شکل‌موج تنه‌ای

interferogram) ساخته شدند. در روش تنوع طیفی، تداخل‌نگاشت‌ها اختلاف دوگانه (double difference interferogram) فقط جابه‌جایی‌ها را در جهت آزمون ثابت می‌کند.

$$\Delta\Phi_{ESD} = \Delta\Phi_{bot} * conj(\Delta\Phi_{top}) \quad (1)$$

فاز تداخل‌نگاشت اختلاف دوگانه برای هر همپوشانی برست‌ها با استفاده از فرکانس آزمون و اختلاف فرکانس داپلر مرکز همپوشانی، بین هندسه رو به جلو و عقب‌گرد به جابجایی پیکسل تبدیل می‌شود. کورجیستر پشته تصاویر SAR با استفاده از مدارهای دقیق و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) انجام شد. هر تصویر SAR با نزدیکترین ۳ تصویر همسایه آن در حوزه زمان جفت شد (multilooking) و تداخل‌نگاشت‌های خط مبنا زمانی کوچک در مسیرهای ۳ گانه ایجاد شد. تصحیح مداری و ارتفاعی پشته‌ها بر اساس اطلاعات رقومی ارتفاعی، مداری و کالیبراسیون ماهواره همزمان با ساخت پشته‌های تداخل‌نگاشت انجام شد. تعداد ۲۲، ۹ و ۱۸ تاریخ به ترتیب برای مسیرهای شماره ۹۳، ۹۶، ۱۶۶ و ۱۵۹ به دلیل همدوسی کم حذف شد. ما مجموعاً از تعداد ۱۶۴۵ تداخل‌نگاشت (به ترتیب ۵۹۶، ۵۶۴ و ۴۸۵) تداخل‌نگاشت خط مبنا زمانی کوچک در مسیرهای ۱۵۹، ۹۳ و ۱۶۶) برای ساخت سری‌های زمانی جابجایی، میدان‌های سرعت منطقه‌ای به همراه نقشه‌های انحراف معیار استفاده کردیم. کیفیت داده‌ها و شناسایی پیکسل‌های قابل اعتماد با محاسبه همدوسی مکانی و حد آستانه آن برای تداخل‌نگاشت‌ها در نرم افزار Mintpy ارزیابی شد و تداخل‌نگاشت‌ها با همدوسی پایین با معیار ۰/۷ و رویکرد خط مبنا کوچک قبل از اعمال حل وارون، حذف شد که می‌تواند سبب کاهش تأثیر نویز همدوسی و افزایش پوشش مکانی شود. همچنین از همدوسی زمانی برای حذف پیکسل‌های غیرقابل اعتماد با حد آستانه ۰/۷ استفاده شد. همدوسی زمانی نشان‌دهنده سازگاری سری‌های زمانی با شبکه تداخل‌نگاشت‌ها است (پیه و لاناری، ۲۰۰۶). مقادیر

آب و هوایی کوپرنیک (ERA5) با دقت متوسط (ECMWF) و به صورت ساعتی بر روی شبکه طول و عرض ۰/۲۵ درجه ای ارائه می‌شود، استفاده شد (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۳ پردازش پشته‌ها و ساخت سری‌های زمانی

InSAR

تمام تداخل‌نگاشت‌های چندنگاهی با الگوریتم Tops و روش تنوع طیفی در نرم‌افزار ISCE2 محاسبه شد. رویکرد مشاهده زمین با اسکن پیشرونده TOPS (مشاهده از دو زاویه نگاه با اختلاف حدود ۱ درجه) که برای حالت تداخل‌نگاشتی سوات‌های گسترده طراحی شده است، تنوع طیفی بیشتری را در مناطق همپوشانی برست‌ها ایجاد می‌کند و دارای پتانسیل اندازه‌گیری حرکات در شمال-جنوب است. هر تصویر سنتینل-۱ با پوشش ۲۵۰ در ۲۵۰ کیلومتر از ۲۷ بخش فرعی به نام برست با عرض ۲۰ کیلومتر تشکیل شده است که در ۳ ساب سوات یا نوار فرعی موازی با زوایای دید مختلف برداشت می‌شوند و با هم در هر نوار و نیز با نوارهای مجاور همپوشانی دارند. برست‌ها به صورت یک SLC جداگانه پردازش و نتایج با هم ترکیب می‌شوند. الگوریتم Tops برای ساخت پشته‌های تداخل‌نگاشت برای تمام داده‌ها و سراسر سامانه اعمال شد. مناطق همپوشانی برست‌ها با خطوط چندگانه دید تصویر می‌شوند و با تعیین اختلاف بین تداخل‌نگاشت‌های تشکیل شده برای هر خط دید، جابجایی در راستای آزمون حذف می‌شود. انجام این مراحل سبب تخمین جابجایی آزمون با دقت بالاتر از ۰/۰۰۰۵ پیکسل می‌شود (لازکی و همکاران، ۲۰۲۰). در مرحله ESD، تداخل‌نگاشت اختلاف دوگانه (Double difference interferogram) پس از ساخت تک تداخل‌نگاشت‌های پایین و بالای هر برست با همپوشانی با دو برست مجاور، با اعمال روش تنوع طیفی (Spectral diversity)، محاسبه و تداخل‌نگاشت‌های چندنگاهی (Multi-looked)

استخراج جابجایی‌های غیرخطی مناسب است. تأخیر تروپوسفر نسبی در t_i بین یک پیکسل معین p و یک پیکسل مرجع بر حسب رادیان با رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\Phi_{tropo}^i(p) = (\delta L_p^i - \delta L_p^L) \frac{4\pi}{\lambda} - (\delta L_{ref}^i - \delta L_{ref}^L) \frac{4\pi}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن $i \in [1, \dots, N]$ و δL_x^i تاخیر مطلق یکپارچه تروپوسفری تک مسیر در زمان t_i و پیکسل x بر حسب متر در جهت دید ماهواره (LOS) است (δL_p^L برای t_i) و λ برابر با طول موج رادار بر حسب متر است.

تاریخ‌های SAR نویزی با تأثیرات شدید جوی شناسایی و در مرحله تخمین باقیمانده‌های توپوگرافی و سرعت متوسط حذف شدند. اثر کشش گرانشی خورشید و ماه و جزر و مد‌های جامد زمین با کد پایتونی PySolid تصحیح شد (Yunjun et al 2022).

۳-۳ شناسایی الگوی سیگنال‌های پیش‌نشانگر در سری‌های زمانی در مرحله میان‌لرزه ای

سری‌های زمانی تغییرشکل InSAR چند زمانی را می‌توان برای مطالعه روند حرکت و شناسایی الگوهای تغییرشکل مربوط به زمینلرزه‌ها استفاده کرد. اولین مرحله شناسایی روندهای خاص جابجایی و دسته بندی سری‌های زمانی داده به کلاس‌های دارای رفتار مشابه با الگوریتم‌های طبقه‌بندی سری‌های زمانی است (برتی و همکاران، ۲۰۱۳، چانگ و هانسن، ۲۰۱۵) (شکل‌های ۴ و ۵). سیگنا و همکاران (۲۰۱۲) یک روش نیمه خودکار را با تعریف دو شاخص انحراف برای تعیین کمیت واگرایی سری‌های زمانی از یک روند جابجایی پیشین مبتنی بر کمی‌سازی خطای برآورد رگرسیون خطی ارائه کردند (تاپته و کسالی، ۲۰۱۳). الگوریتم یک زمان شکست ثابت (breaking time) t_b را برای شناسایی و کمی کردن انحراف سری زمانی در نظر می‌گیرد. سری‌های زمانی ممکن است تغییراتی در سرعت و یا شتاب در t_b (پیش‌نشانگر

پایین معمولاً به معنای عدم همبستگی و decorrelation بالا (مانند همدوسی مکانی متوسط) و یا وجود خطاهای بازایی فاز است. این معیار بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد:

$$\gamma_{temp} = \frac{1}{M} [H^T \exp [j(\Delta\phi - A\phi)]] \quad (2)$$

j برابر با واحد تصویر، H برابر با $M \times 1$ بردار ستون همه یک هاست. γ_{temp} فاز بدون پوشش تداخل نگاشتی است، A ماتریس طراحی است، ϕ سری زمانی تخمین زده شده است، j واحد imaginary unit است. پیش از حل وارون، تصحیح خطای ادغام فاز های بازایی نشده یا بازایی فاز برای حذف سوگیری احتمالی سری های زمانی انجام شد. حل وارون پشته‌های تداخل نگاشت (NSBAS) و ساخت سری زمانی با نرم‌افزار Mintpy و برآوردگر حداقل مربعات وزنی و معکوس کوواریانس به عنوان وزن انجام شد (شکل ۳). تصحیح انحنای زمین و توپوگرافی تداخل نگاشتها در نرم‌افزار Mintpy نیز انجام شد و همه سری‌های زمانی به تصویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۲۱/۰۴/۰۷ (در مسیر 166) ۲۰۲۱/۰۱/۲۴ (در مسیر ۱۵۹) و ۲۰۲۱/۰۲/۱۳ (در مسیر ۹۳) ارجاع داده شدند.

ریشه میانگین مربع (فاز باقیمانده RMS) به عنوان معیار کیفیت داده‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۳). بازماند توپوگرافی و باقیمانده فاز حاصل از خطای DEM، با استفاده از روابط آن با سری‌های زمانی خط منبهای عمودی تصحیح شد (Fattahi & Amelung 2013). برای هر سری زمانی، تاریخ داده‌ای که مقدار RMS کمینه دارد، تاریخ مرجع بهینه انتخاب و تاریخ‌های نویزی با RMS فراتر از حد آستانه (معیار cutoff با پیش فرض ۳ برابر انحراف معیار مطلق میانه)، مشخص و همزمان با باقیمانده توپوگرافی و سرعت میانگین، از حل وارون حذف شد. فاز تاخیر لایه‌ای تروپوسفر با استفاده از مدل‌های جوی جهانی (ERA-Interim)، داده‌های ERA-5 و نرم‌افزار PyAPS تصحیح شد (Jolivet et al 2014). این روش به مدل‌های تغییر شکل اولیه و یا فیلتر زمانی نیاز ندارد و بنابراین برای

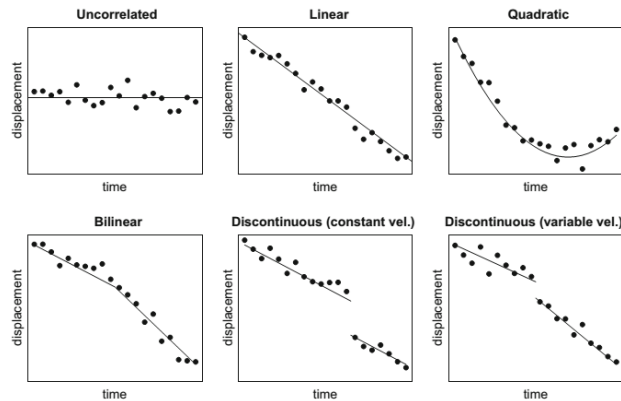
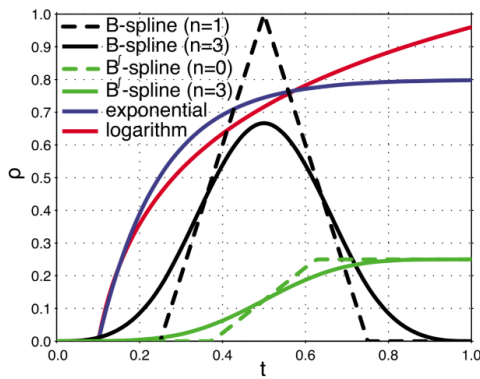
در سری‌های زمانی تغییرشکل سطحی ارائه کردند. حالت‌های شناسایی‌شده شامل حرکت خطی پیوسته و چرخه‌های فصلی یا سالانه مرتبط با بارندگی است که سبب تورم خاک و تغییر در فشار منافذ می‌شود. این راهکار یک روش بهبود یافته در پیش‌بینی خطر محسوب می‌شود و امکان جداسازی حالت‌های مکانی-زمانی تغییرات جابجایی و جداسازی سازوکارهای عامل را فراهم می‌کند (برناردی و همکاران، ۲۰۲۱).

رویدادهای اصلی) و یا یک ناپیوستگی و تغییر ناگهانی را در t_b نشان دهد که بر سری‌های زمانی به صورت محلی تأثیر می‌گذارد. برای محاسبه از دو شاخص انحراف (DI_1) و (DI_2) که رخ داده‌های زمین‌ساختی با آن‌ها قابل ارزیابی است، استفاده می‌شود (شکل ۵):

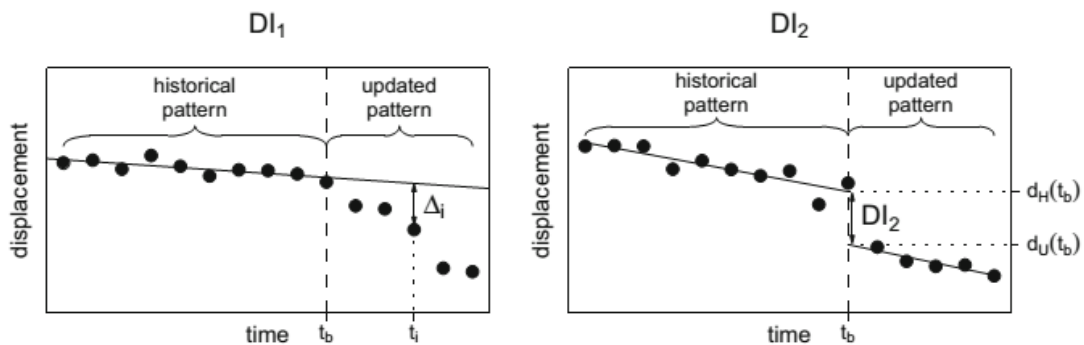
$$DI_1 = \frac{\frac{1}{N_U} \sum_{i=N_H+1}^{N_H+N_U} |\Delta_i|}{s} \quad (4)$$

$$DI_2 = d_U(t_b) - d_H(t_b) \quad (5)$$

کوهن-ویبر و همکاران (۲۰۱۸)، روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مستقل را برای تشخیص الگوهای مکانی و زمانی



شکل ۴. راست) طبقه‌بندی توالی آزمون‌های آماری برای تخصیص روندهای مرجع: خطی، درجه دوم، دوخطی، ناپیوسته با سرعت ثابت، و ناپیوسته با سرعت متغیر (برتی و همکاران، ۲۰۱۳)، چپ) توابع زمانی برای اعمال بر روی سری‌های زمانی (هتلند و همکاران، ۲۰۱۲).

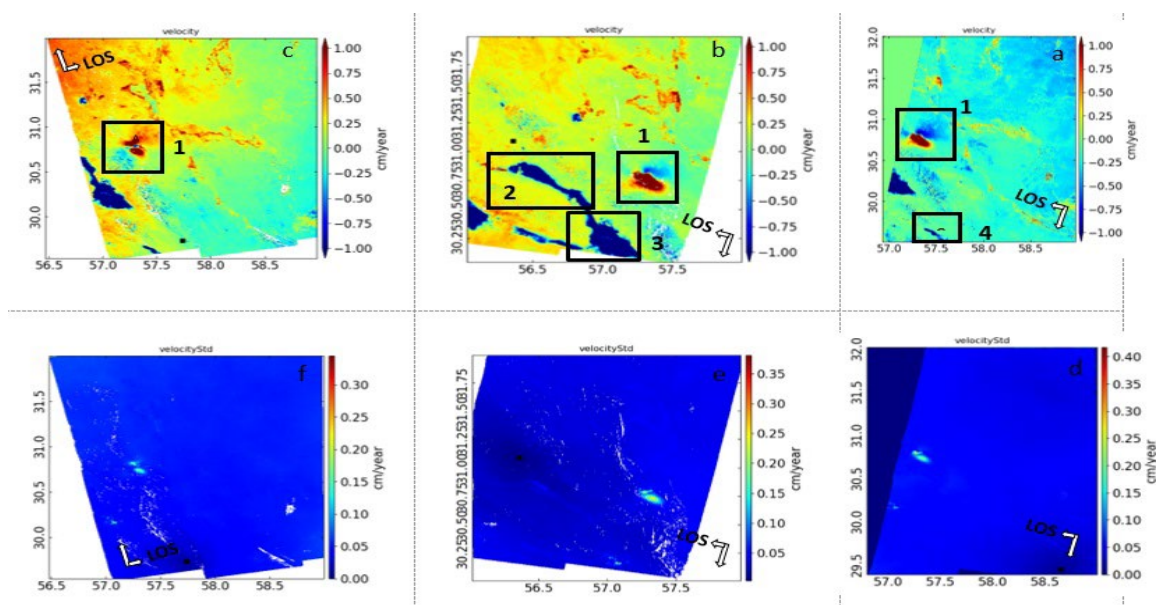


شکل ۵. نمایش روش محاسبه DI_1 (پانل سمت چپ) و DI_2 (پانل سمت راست) (سیگنا و همکاران، ۲۰۱۲).

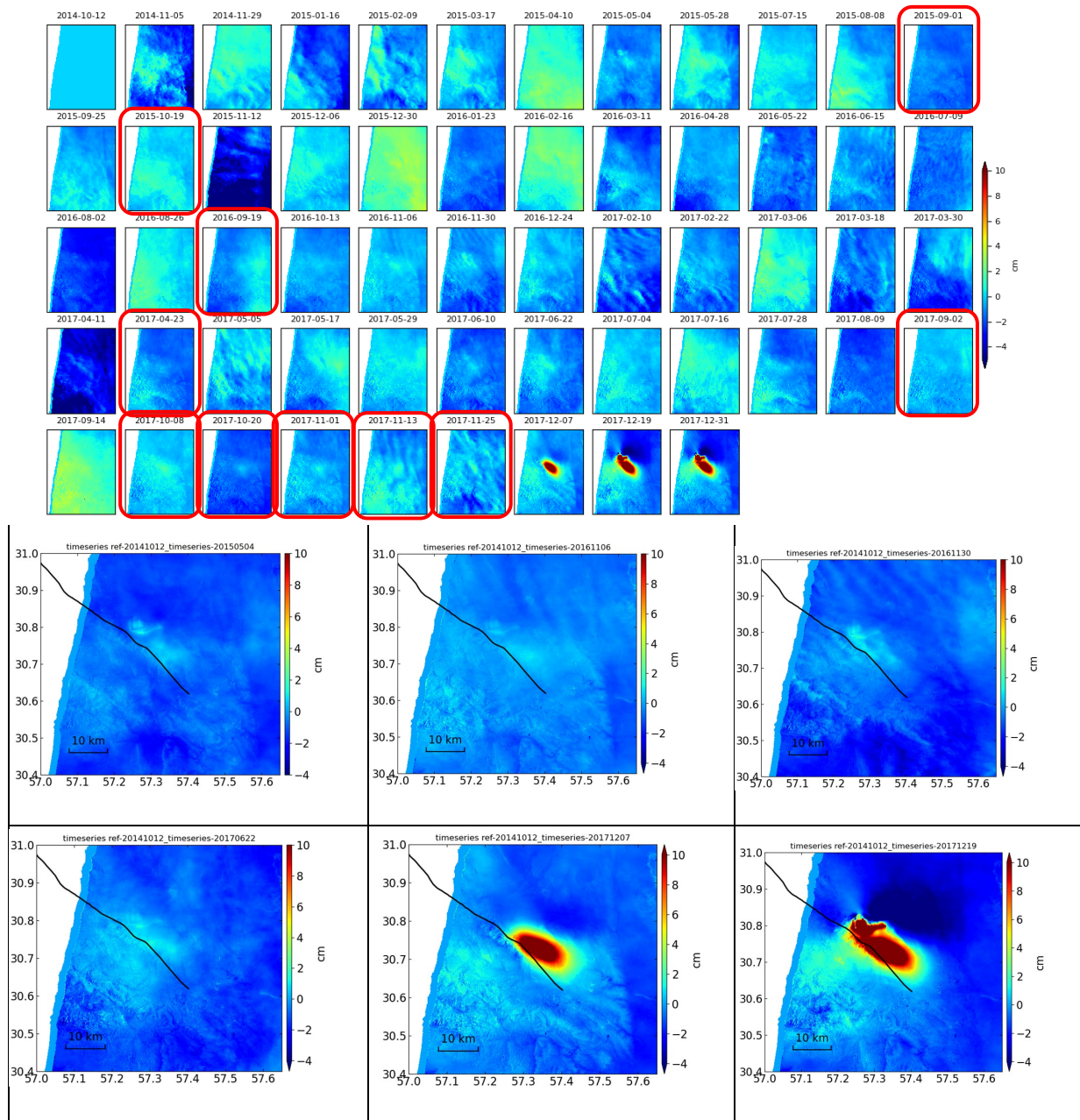
۴ نتایج و بحث

در مرحله بعد اثرات فاز سالانه و نیمه سالانه در سری‌های زمانی جابجایی، تخمین زده شد. نقشه‌های منطقه‌ای سرعت و شتاب پس از انجام تصحیحات (خطاهای بازیابی فاز و فازهای جابجایی مربوط به جزر و مد جامد زمین، باقیمانده‌های جزء تروپوسفر، تاخیر مربوط به خطای DEM از سری زمانی فاز LOS) تهیه شد. نقشه سرعت باقیمانده که سیگنال‌های سالانه و نیمه سالانه از آن حذف شده است، تغییرات سرعت با طول موج بلند را با بزرگی‌های کوچک نشان می‌دهد. از سوی دیگر این نقشه سرعت، بسیاری از تغییرات برجسته سرعت با طول موج کوتاه و با مقادیر بزرگتر را نشان می‌دهد (شکل ۶). از مدل زمانی درجه ۳

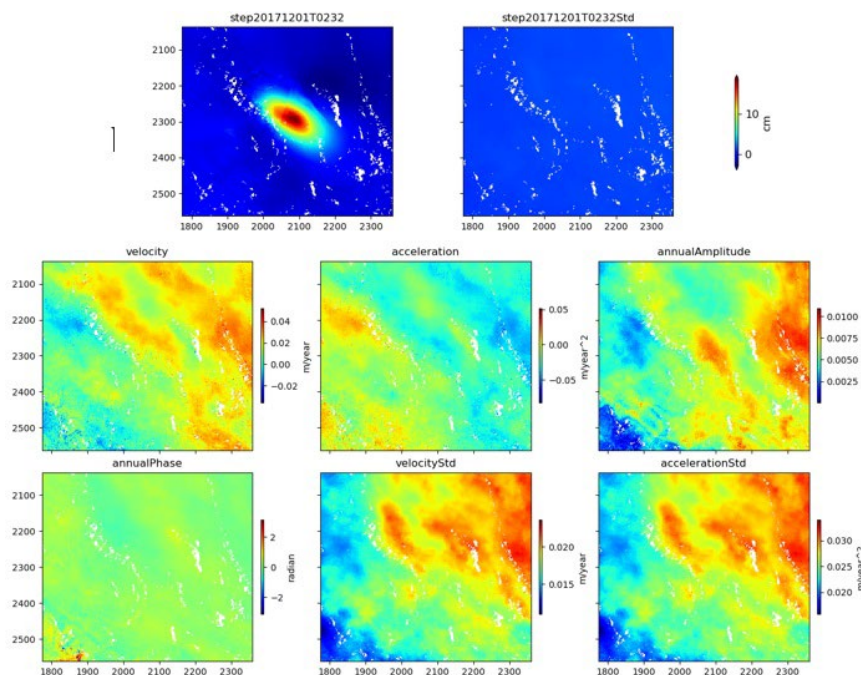
برای تولید نقشه سرعت محلی و سری‌های زمانی تک بعدی استفاده شد. ابتدا تخمین تابع زمان و کمیت‌سازی عدم قطعیت، روی چند پیکسل انتخاب شده بررسی شد. سپس این توابع زمانی برای تمام پیکسل‌ها اعمال شد تا نقشه پارامترهای تابع زمان تخمین زده شده بدست آید. با توجه به مراحل تورم و فرونشست مختلف در چرخه لرزه‌ای محلی در منطقه رومرکز، از توابع زمانی چند جمله‌ای درجه ۳ و دوره‌ای سالانه و نیمه سالانه برای تهیه نقشه‌های شتاب استفاده شد. پس از حل وارون، سری‌های زمانی دو بعدی (شکل ۷)، نقشه‌های شتاب، سرعت، انحراف معیار و نقشه‌های دوره‌ای سالانه (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰) برای سری‌های زمانی ترسیم شد.



شکل ۶. نقشه‌های سرعت خطی InSAR (طول جغرافیایی 56°-59° و عرض جغرافیایی 29.5°-32°) و توزیع انحراف معیار (پایین) (بازه زمانی ۸ ساله اکتبر ۲۰۱۴ تا جولای ۲۰۲۲) (راست: مسیر پایین گذر ۹۳، وسط: مسیر پایین گذر ۱۶۶؛ چپ: مسیر بالا گذر ۱۵۹) با لوب‌های پروانه‌ای شکل نزدیک شونده به ماهواره واقع در شمال خاور رومرکز. و دورشونده در جنوب باختر رومرکز. برای برجسته‌سازی تغییرات سرعت احتمالی با طول موج کوتاه، محدوده تغییرات سرعت در خروجی نقشه‌ها بین ۱ و -۱ محدود شد. مستطیل (۱) دگربرختی جمعی را در محل رومرکز زمینلرزه‌های دسامبر ۲۰۱۷ هجری و مستطیل‌های ۲، ۳ و ۴ فرونشست پیوسته را در دشت کرمان نشان می‌دهد.



شکل ۷. سری‌های زمانی دگرریختی دوبعدی در منطقه رومرکز در دوره سه ساله پیش از رخداد زمینلرزه‌های ۲۰۱۷ هجری (اکتبر ۲۰۱۴ تا نوامبر ۲۰۱۷). بخش‌هایی که جایجایی‌های LOS در آنها مثبت است به سمت ماهواره نزدیک می‌شوند (مسیر پایین گذر ۰۹۳ با تاریخ مرجع ۲۰۱۴/۱۰/۱۲). سرعت LOS برای آشکارسازی بهتر جایجایی‌ها در محل رومرکز در بازه (+۱۰، -۷) در نظر گرفته شد. تاریخ‌های ۲۰۱۵/۰۵/۰۴، ۲۰۱۶/۱۱/۰۶، ۲۰۱۶/۱۱/۳۰ و ۲۰۱۷/۰۶/۲۲ تورم مشخص را در محل رو مرکز زمینلرزه‌های دسامبر ۲۰۱۷ با الگوی مشابه با دگرریختی هم‌لرز نشان می‌دهند. خط سیاه راستای گسل گدار لکرکوه را نشان می‌دهد.



شکل ۸. میدان‌های سرعت، شتاب، تناوب سالانه میانگین و انحراف معیار در دوره پیش‌لرزه‌ای با اعمال توابع زمانی چند جمله‌ای درجه ۳، تناوبی سالانه-نیمه سالانه برای مسیر ۱۶۶. نقشه‌ها برای بازه‌های قبل از زمینلرزه (بازه ۲۰۱۴/۱۰/۲۹ تا ۲۰۱۷/۱۱/۳۰) تهیه شد. موقعیت شکل‌ها منطبق بر مستطیل شماره ۱ در شکل ۶ است.

۱-۴ سری‌های زمانی با دگرریختی ناپایدار (فرونشست و تورم) در چرخه لرزه‌ای

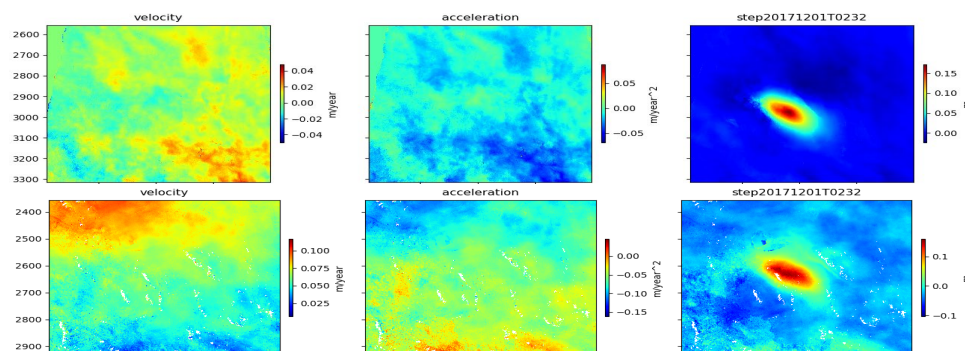
در حل سری‌های زمانی پشته‌های InSAR داده‌های سنتینل ۱ در نرم‌افزار Mintpy به دلیل خط‌مناهای کوچک، به فیلتر زمانی نیاز نیست (یانجون و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین برای استخراج جابجایی‌های غیرخطی مناسب است. توابع زمانی مناسب برای سری‌های زمانی جابجایی (از میان توابع چند جمله‌ای، دوره‌ای، مرحله‌ای، نمایی و لگاریتمی)، بر پایه تفسیر بصری تخمین زده شد (هتلند و همکاران، ۲۰۱۲) (شکل ۴). توزیع سرعت و شتاب تغییرات در مرحله پیش‌لرزه‌ای با انطباق منحنی‌های درجه سوم و توابع زمانی بر سری‌های زمانی بررسی شد. شکل ۷ سری‌های زمانی دگرریختی دو بعدی را در محل رومرکز زمینلرزه‌های دسامبر ۲۰۱۷ هجریک از اکتبر ۲۰۱۴ تا نوامبر ۲۰۱۷ در مسیر پایین‌گذر ۹۳ نشان می‌دهد. فریم‌های مربوط به میدان‌های دگرریختی هم‌لرزه‌ای زمینلرزه‌های ۱۲ و ۱۳ دسامبر ۲۰۱۷

برای نمایش موقعیت و مقایسه با دگرریختی پیش‌لرزه‌ای و میان‌لرزه‌ای در رومرکز نمایش داده شده است. فریم‌های همراه با دگرریختی لرزه‌ای برای جداسازی از تاریخ‌هایی که با زمینلرزه‌های کوچک همراه نبودند با مستطیل‌های قرمز مشخص شده‌اند. وجود تورم‌های پی در پی در محل رومرکز زمینلرزه‌های ۲۰۱۷ که بدون رخداد زمینلرزه‌های کوچک و پیش‌لرزه به وجود آمده‌اند، در این مرحله قایل توجه است (به‌عنوان مثال فریم‌های: ۲۰۱۵/۰۵/۰۴، ۲۰۱۶/۱۱/۰۶، ۲۰۱۶/۱۱/۳۰، ۲۰۱۷/۰۶/۱۰، ۲۰۱۷/۰۶/۲۲ و ۲۰۱۷/۰۶/۲۲ در شکل ۷). این تغییرات ناپایدار در سری‌های زمانی InSAR وجود تجمع تنش را در رومرکز زمینلرزه‌ها نشان می‌دهد که می‌تواند برای پیش‌بینی مکانی و زمانی به کار رود.

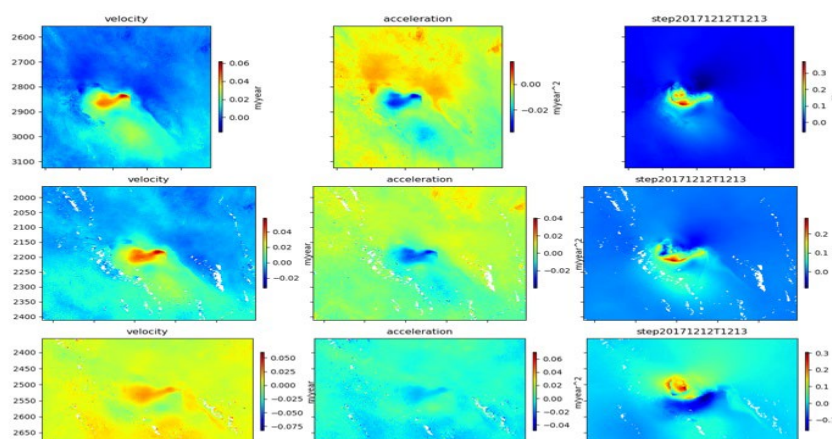
شکل‌های ۹ و ۱۰ میدان‌های سرعت و شتاب میانگین را در مقیاس محلی در رومرکز زمینلرزه‌ها و مراحل مختلف چرخه لرزه‌ای به صورت مجزا نشان می‌دهد. شکل ۹

اختصاص توابع زمانی درجه ۳ و پله‌ای (برای زمینلرزه‌های ۱ و ۱۲ دسامبر ۲۰۱۷) به سری‌های زمانی جابجایی محاسبه شده‌اند.

میدان‌های سرعت میانگین را در سه ساله انتهای دوره میانلرزه‌ای (شامل دگرریختی پیشلرزه‌ای) و شکل ۱۰ دگرریختی پس‌لرزه‌ای را نمایش می‌دهد. میدان‌های شتاب و سرعت با حذف مولفه‌های سالانه و نیمه سالانه و با



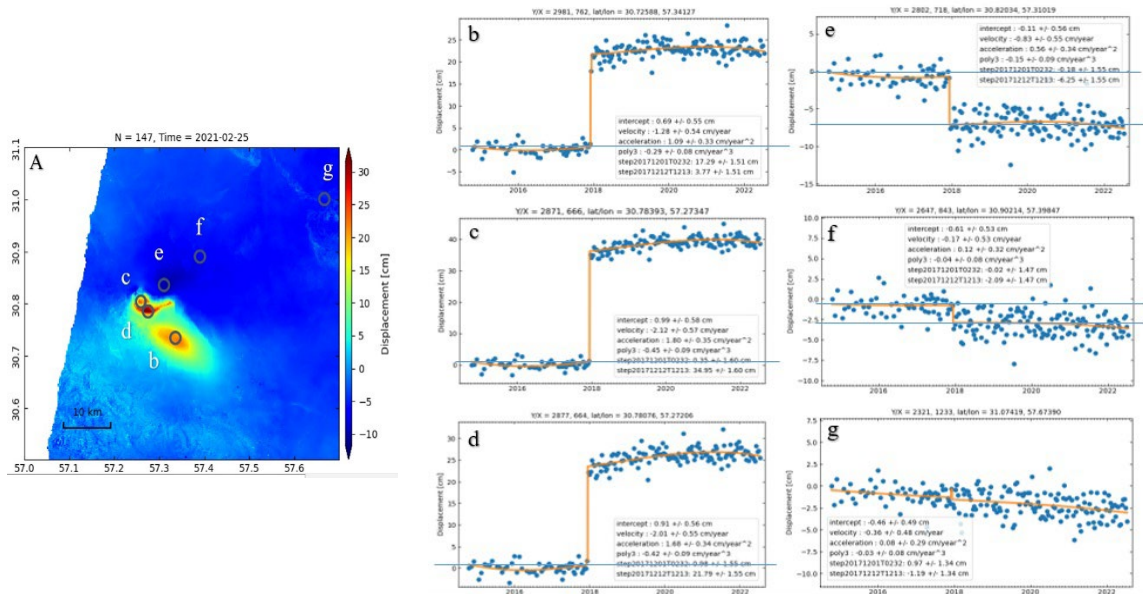
شکل ۹. میدان‌های سرعت و شتاب میانگین محاسبه شده در بازه سه ساله در انتهای مرحله میان لرزه‌ای و پیشلرزه‌ای (بالا): مسیر ۹۳ در بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۱۲ تا ۲۰۱۷/۱۲/۰۷؛ (پایین): مسیر ۱۵۹ در بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۱۶ تا ۲۰۱۷/۱۲/۰۵. موقعیت شکل‌ها منطبق بر مستطیل شماره ۱ در شکل ۶ است.



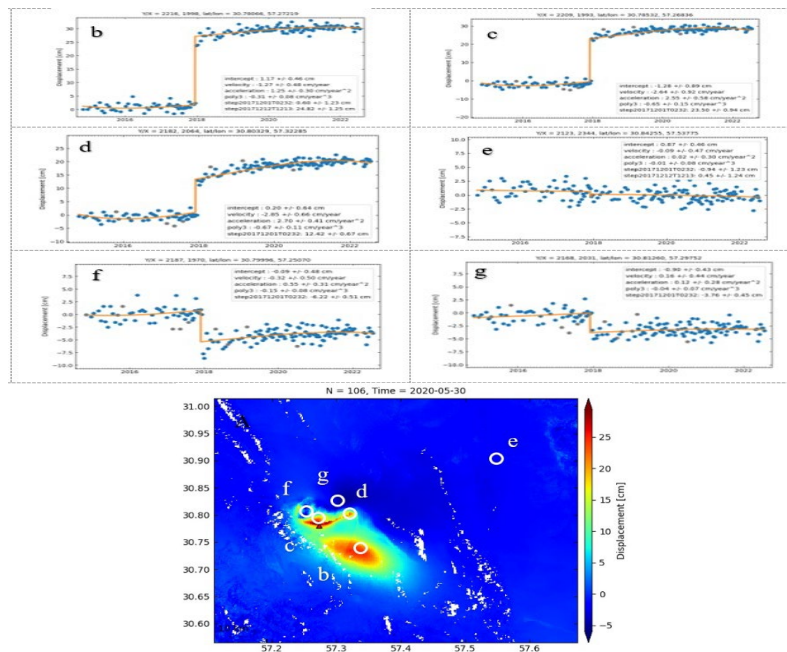
شکل ۱۰. میدان‌های سرعت و شتاب در مرحله پس‌لرزه‌ای به دست آمده از سری‌های زمانی تصحیح شده در سه مسیر: ۹۳ در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۲/۰۷ تا ۲۰۲۲/۰۷/۱۴ (شکل‌های بالا)، ۱۶۶ در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۲/۱۲ تا ۲۰۲۲/۰۷/۱۹ (شکل‌های وسط) و ۱۵۹ در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۲/۰۵ تا ۲۰۲۲/۰۷/۱۸ (شکل‌های پایین). سرعت در جهات دید ماهواره مثبت و همراه با تورم زمین است.

داده‌های رادار از ۲۰۱۷/۰۳/۱۰ تا رخداد زمینلرزه‌ها امکان بررسی دقیق روند تغییرات پیشلرزه‌ای در مسیر ۱۵۹ وجود ندارد (سری‌های زمانی در شکل ۱۳). در مرحله پس‌لرزه‌ای، سرعت در جهات دید ماهواره مثبت است و دگرریختی نواحی رومرکز به صورت بالآآمدگی و تورم است همچنین شتاب تورم منفی است و با زمان کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). میزان تورم در اواخر ۲۰۲۱ متوقف می‌شود (سری‌های زمانی در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳).

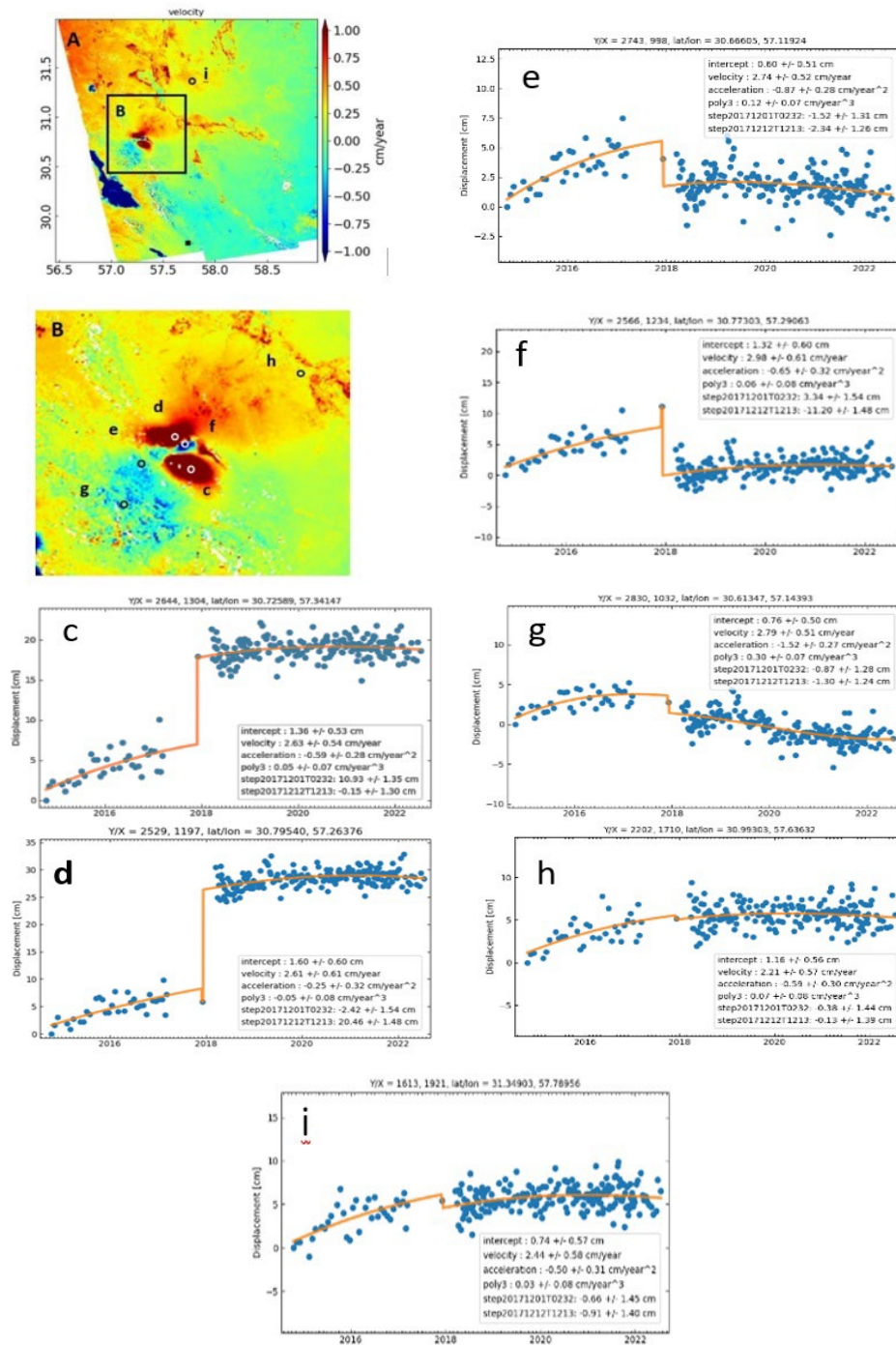
میانگین میدان سرعت در مسیر ۹۳ و محل رومرکز زمینلرزه اول در بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۱۲ تا ۲۰۱۷/۱۲/۰۷ منفی است (رومرکز از ماهواره دور می‌شود) در حالی که مقادیر شتاب مثبت در این مرحله، بازیابی جابجایی میدان سرعت را در مرحله پیشلرزه‌ای نشان می‌دهد (شکل ۹). در مسیر ۱۵۹ (در بازه بین دو تاریخ اخذ ۲۰۱۷/۰۳/۱۰ تا ۲۰۱۸/۰۳/۱۷ تنها یک تاریخ اخذ داده در ۲۰۱۷/۱۲/۰۵ در دسترس است و در پردازش به کار رفت) و به دلیل نبود



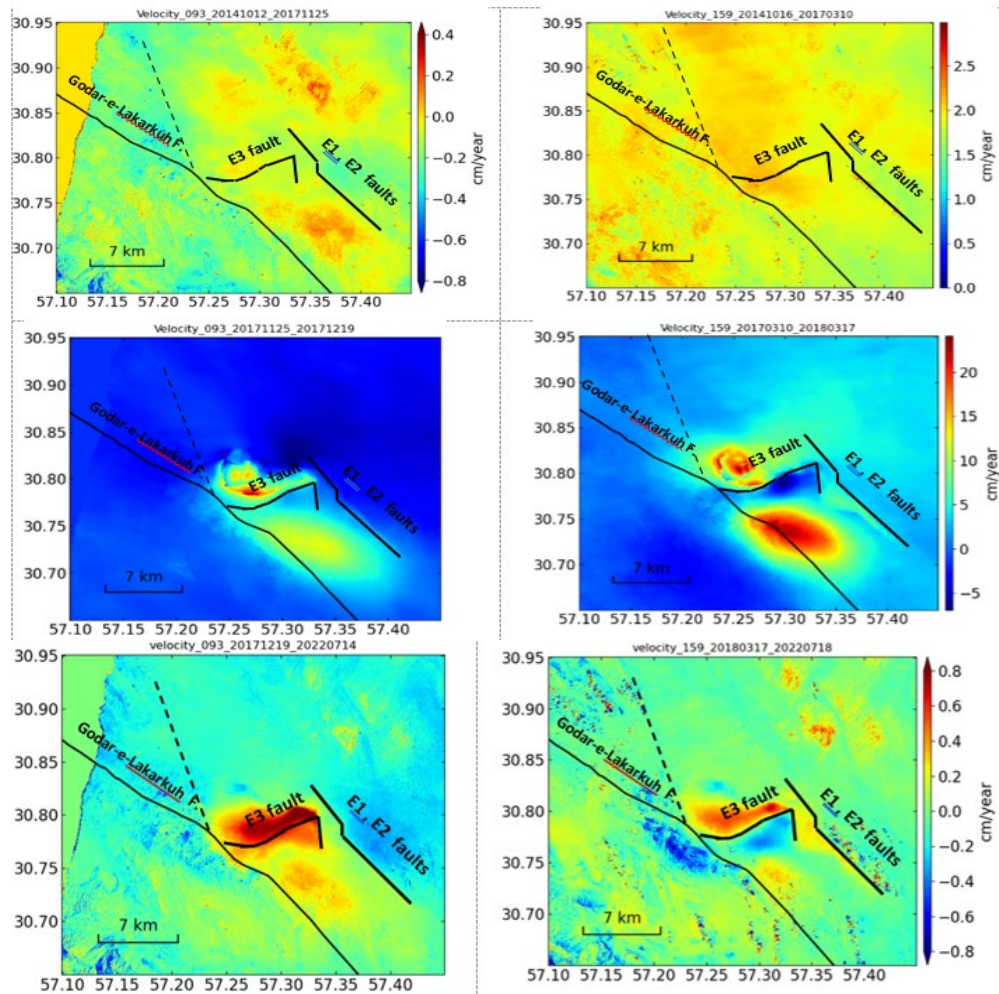
شکل ۱۱. سری‌های زمانی تک بعدی در اطراف رو کانون زمینلرزه‌های دسامبر ۲۰۱۷. چپ: نقشه سرعت LOS در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ (A). وسط: سری زمانی مربوط به بخش‌های رو کانونی (با جابجایی مثبت در جهت دید ماهواره و بالآمدگی هم‌مرز). فرونشست در این بخش‌ها قبل از رخداد زمینلرزه با یک الگوی متقارن با نرخ بالاتری به حالت قبل باز می‌گردد (منطبق بر نواحی فشاری در میدان‌های کرنش). راست: سری زمانی مربوط به نقاط واقع در بخش‌های با جابجایی منفی و پایین افتادگی هم‌مرز (شکل های 11f, 11e و 11g). خطوط افقی آبی مقدار اولیه دگربرختی LOS را در دوره‌های پیش‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای نمودار نشان می‌دهد. تورم پس‌لرزه‌ای تا اواخر ۲۰۲۱ ادامه دارد.



شکل ۱۲. سری‌های زمانی تک بعدی در اطراف رو مرکز (مسیر پایین گذر ۱۶۶). چپ: نقشه سرعت میانگین LOS در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲. سری‌های زمانی مربوط به بخش‌هایی با LOS مثبت هم‌مرز (f و g). سری‌های زمانی مربوط به نقاط واقع در بخش‌های با پایین افتادگی هم‌مرز (b و c) و جابجایی منفی (d, c, b).



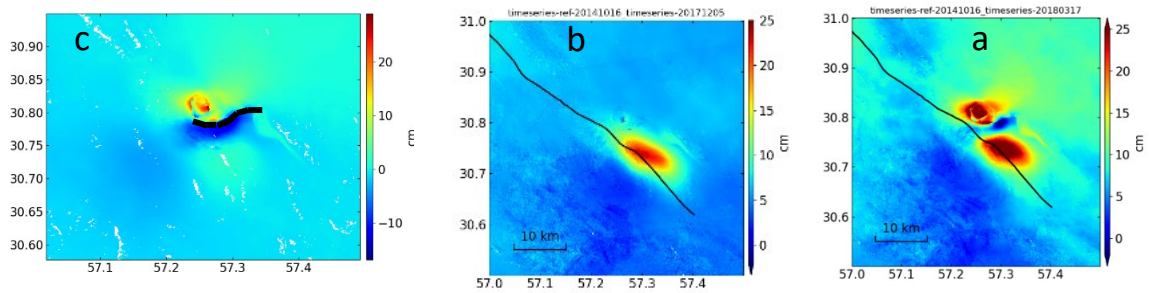
شکل ۱۳. نمودار های سری زمانی تک بعدی در اطراف رو مرکز زمینلرزه های دسامبر ۲۰۱۷ (در مسیر ۱۵۹). A و B: نقشه سرعت میانگین LOS بر اساس تحلیل سری زمانی در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲. C و d: سری زمانی تک بعدی در بخش های رومرکزی با مولفه بالآآمدگی هم‌لرزه ای. شکل های e ۱۳ تا i ۱۲ سری زمانی مربوط به بخش های با پایین افتادگی هم‌لرزه ای. شکل g ۱۲ در باله های پروانه ای نامتقارن با LOS منفی، جابجایی های دور شونده از ماهواره را در بلوک جنوبی گسل نشان می دهد (شکل ۱۴). سری زمانی بیشینه ۳۰ سانتی متر جابجایی بالآ آمدگی بر هم انباشته و بیشینه ۷/۵ سانتی متر فرونشست در جهت LOS را نشان می دهد.



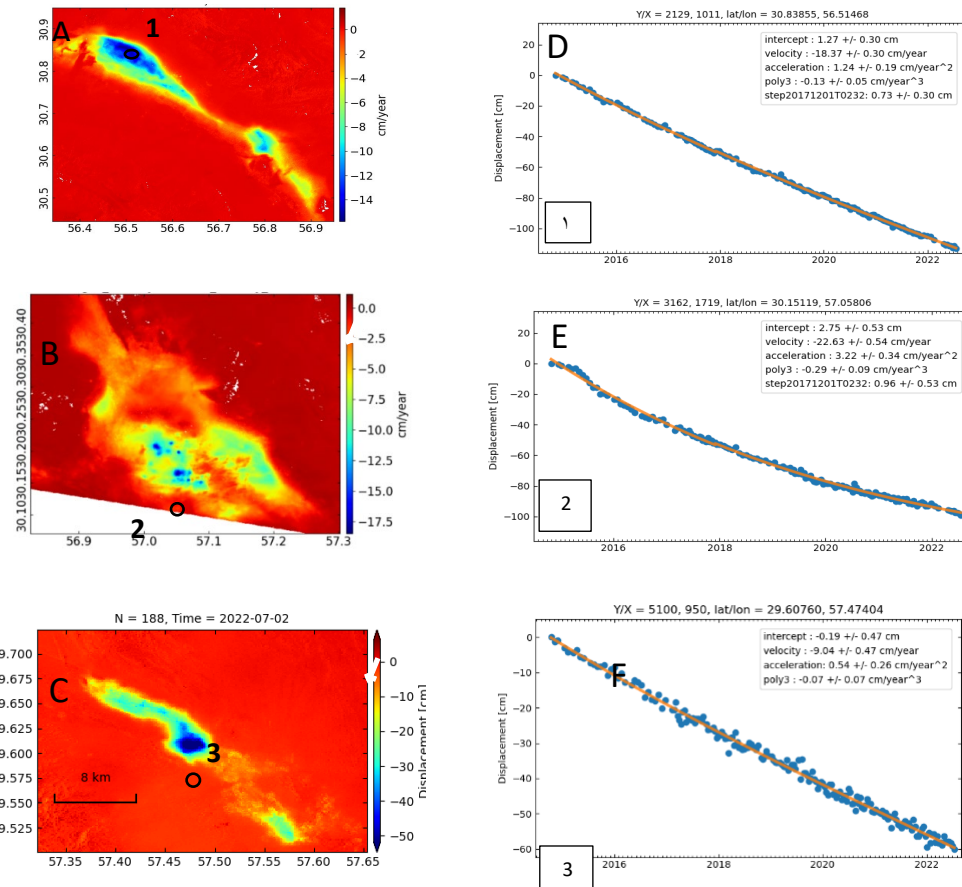
شکل ۱۴. جداسازی مراحل مختلف چرخه لرزه ای در رومرکز زمینلرزه های سه گانه هجدک: بالا- میان لرزه ای و پیشلرزه ای؛ وسط- هم لرزه ای؛ پایین- پس لرزه ای. ستون راست- مسیر بالاگذر ۱۵۹؛ ستون چپ- مسیر پایین گذر ۹۳. خط سیاه: گسل گذار لکر کوه را با شیب به سمت جنوب باخترا نشان می دهد. سایر خطوط سیاه گسل های فعال را نشان می دهد که از میدان های دگرریختی هم لرزه ای و پس لرزه ای استخراج شده است (گسیختگی زمینلرزه اول و دوم، E1 و E2 و گسل های شمالی-جنوبی احتمالی. بخش خمیده انتهای باختری گسل زمینلرزه سوم (E3) بر مشاهدات میدانی نعمتی و همکاران (۲۰۲۰) منطبق است.

شناسایی شد. ماهیت توزیع فرونشست مشاهده شده در دشت کرمان به دلیل انطباق با موقعیت فعالیت های زراعی و کشاورزی متأثر از تاثیرات انسانی و بهره برداری از آب های زیرزمینی است که ممکن است فرآیندهای تراکم را در یک سفره زیرزمینی سبب شود (شکل ۱۶، ستون سمت چپ) (کیارابا و همکاران، ۲۰۰۹). سری های زمانی تک بعدی سرعت در جهت LOS، نشان دهنده نرخ فرونشست LOS بیش از ۱۰۰ سانتی متر در دوره ۸ ساله است.

نقشه سرعت و شتاب که با استفاده از سری زمانی منطقه ای InSAR به دست آمده است و برازش مدل زمانی (مستطیل های ۲، ۳ و ۴ در شکل ۶) و سری های زمانی تک بعدی بر اساس نقشه های سرعت در جهت LOS، فرونشست پایدار را در دشت کرمان نشان می دهد (شکل ۱۶). مقدار این فرونشست بر اساس نقشه های سرعت در جهت LOS، قابل توجه است و به چندین سانتی متر در سال می رسد. الگوی فرونشست بلندمدت خطی (شکل ۱۶، ستون سمت راست) در دشت کرمان (با دخالت انسانی)



شکل ۱۵. جداسازی میدان های دگرریختی هم‌لرزه زمینلرزه های سه گانه در مسیر بالاگذر ۱۵۹. a: میدان تجمعی دگرریختی چرخه لرزه ای (در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۳/۱۰ تا ۲۰۱۸/۰۳/۲۹). b: میدان دگرریختی زمینلرزه اول دسامبر ۲۰۱۷ (در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۳/۱۰ تا ۲۰۱۷/۱۲/۰۵). c: میدان دگرریختی زمینلرزه های ۱۲ دسامبر (در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۲/۰۵ تا ۲۰۱۸/۰۳/۲۹). خط سیاه گسل گذار لکر کوه را در پایانه جنوبی گسل لکر کوه با شیب به سمت جنوب باختر نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. چپ: نقشه های سرعت خطی InSAR در مقیاس محلی (A, B, C) در مناطق کشاورزی و زراعی در دشت کرمان (موقعیت در شکل ۶ مشخص شده است). پیکان های سفید جهت دید ماهواره را نشان می‌دهد. (راست) سری زمانی تک بعدی (D, E و F). موقعیت مکان‌ها با دایره سیاه در شکل های سمت چپ مشخص شده است (دایره های ۱، ۲، ۳). نقاط آبی نشان دهنده سری های زمانی جایجایی است که در این مطالعه استفاده شده اند. سری های زمانی فرونشست پیوسته با بیش از ۱۰۰ سانتی متر جایجایی بر هم انباشته را نشان می‌دهد. شکل های A و B سرعت LOS را در مسیر ۱۶۶ و شکل C سرعت LOS را در مسیر ۹۳ نشان می‌دهد.

۵ نتیجه‌گیری

مطالعه فرگشت زمانی دگرریختی ناپایدار در چرخه زمینلرزه‌ها که می‌تواند نرخ لغزش گسل‌ها را متأثر سازد با ساخت ۱۶۴۵ تداخل‌نگاشت برای حل وارون سه سری زمانی جابجایی برای منطقه همگرایی گسلی شهداد انجام شد. سری زمانی فاز برای مطالعه دگرریختی در مقیاس محلی برای خطای تروپوسفر و DEM تصحیح شد و از مدل زمانی خطی و چند جمله‌ای درجه ۳ برای تولید نقشه‌های سرعت و شتاب منطقه در سه مسیر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده شد. این نقشه‌ها علاوه بر جابجایی‌های پایدار در رومرکز زمینلرزه‌ها، وجود دگرریختی غیرخطی و ناپایدار پیشلرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای و مراحل پی‌درپی تورم با الگوی مشابه میدان هم‌لرزه‌ای در محل روکانون زمینلرزه‌های ۲۰۱۷ هجکک را نیز تأیید کردند. این ناپایداری‌ها وجود تجمع تنش را در محل کانون در مرحله پیشلرزه‌ای نشان می‌دهد که می‌تواند برای پیش‌بینی مکانی و زمانی زمینلرزه‌ها به کار رود. نتایج نشان داد که بیش از ۲۰ میلی‌متر فرونشست LOS از سه سال قبل از زمینلرزه‌ها رخ داده است. در مقابل در مرحله پس‌لرزه‌ای، حوضه‌ها تا ۷۰ میلی‌متر تورم را نشان دادند. این شواهد را می‌توان به سازوکار اتساع سنگ‌ها در ژرفای کانونی قبل از رخداد زمینلرزه‌ها، بازشدگی گسیختگی‌ها و مهاجرت سیالات مرتبط دانست که سبب فرونشست و تحکیم الاستیک رسوبات ریزدانه در حوضه‌های سطحی می‌شود. شکستگی‌ها پس از رخداد زمینلرزه‌ها بسته شده و مایعات ژرف به بیرون از منطقه اتساع هدایت می‌شوند و جابجایی‌های زمین به قبل از رخداد زمینلرزه‌ها بازبایی می‌شود. مکان‌ها و مقادیر میدان‌های تغییرشکل بین مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر یکسان نیست. این مقادیر متفاوت متأثر از وجود مولفه‌های راستالغز گسل‌ها در محل رومرکز زمینلرزه‌ها است. بخش دیگر نابرابری‌ها می‌تواند متأثر از زاویه آزمون مداری ماهواره و یا زوایای فرود در

مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر باشد. نتایج زیر از مطالعه تغییرات جابجایی LOS سری‌های زمانی تک بعدی به دست آمد: سازوکار فرونشست در مسیرهای پایین‌گذر و در مرحله پیشلرزه‌ای مشاهده شد. دگرریختی در میانه دوره سه ساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ به بیشینه مقدار رسید و در انتهای مرحله پیشلرزه‌ای بازبایی شد. بازبایی تغییرات در نواحی با LOS مثبت بیشتر از نواحی با LOS منفی در هر رخداد لرزه‌ای است که این مقادیر قبل از رخداد زمینلرزه‌های اصلی به‌طور کامل بازبایی نمی‌شود. در مقابل سازوکار تورم پس‌لرزه‌ای در نواحی با LOS مثبت، قوی‌تر عمل می‌کند. دگرریختی پس‌لرزه‌ای به‌صورت تورم و جابجایی مثبت LOS در روکانون و مناطق اطراف تا بازه زمانی تقریبی ۴۰ ماه پس از رخداد زمینلرزه‌ها مشاهده شد. همچنین در بخش‌های فروافتاده هم‌لرزه، در مرحله پس‌لرزه‌ای، تورم (مقادیر مثبت LOS) با شدت کمتری نسبت به بخش‌های بالاآمده هم‌لرزه مشاهده شد. این مقادیر در مقایسه با بخش‌های بالاآمده قبل از رخداد زمینلرزه‌های اصلی به‌طور کامل بازبایی نمی‌شود. این وضعیت احتمالاً مشارکت جابجایی‌های پایدار و منفی LOS را که به چرخه فرونشست و تورم فرانهاد می‌شود نشان می‌دهد. در مسیر بالاگذر در مرحله پیشلرزه‌ای تغییرات LOS مثبت با شتاب منفی ثبت شد که متأثر از سازوکار راستالغز چپ‌بر یک گسل عرضی، کوتاه و خمیده در محل رومرکز زمینلرزه‌ها است. نقشه جابجایی میانگین هم‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای (۵ دسامبر ۲۰۱۷ تا جولای ۲۰۲۲) الگوی پروانه‌ای نامتقارن را با لوب‌های کشیده نشان می‌دهد که حاصل گسیختگی در راستای یک گسل چپ‌بر است. مقادیر شتاب تغییرات دگرریختی LOS با افزایش فاصله نسبت به رومرکز زمینلرزه‌ها کاهش می‌یابد. این مشاهدات ضرورت مطالعه سری‌های زمانی InSAR را در پهنه‌های لرزه‌خیز برای یافتن الگوهای زمانی و مکانی دگرریختی سطحی در تعامل با سازوکار و بزرگای زمینلرزه‌ها و تأثیرگذاری آن بر نرخ لغزش گسل‌ها نشان

- Cigna, F., Tapete, D., Casagli, N., 2012, Semi-automated extraction of Deviation Indexes (DI) from satellite Persistent Scatterers time series: tests on sedimentary volcanism and tectonically-induced motions. *Nonlinear Process Geophys* 19(6):643–655.
- Cohen-Waeber, J., Bürgmann, R., Chaussard, E., Giannico, C., Ferretti, A., 2018, Spatiotemporal patterns of precipitation-modulated landslide deformation from independent component analysis of insar time series. *Geophys Res Lett* 45(4):1878–1887.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., Crippa, B., 2016, Persistent scatterer interferometry: a review. *ISPRS J Photogram Remote Sens* 115:78–89.
- Fattahi, H., Amelung, F., 2013, DEM error correction in InSAR time series, *Geoscience and remote sensing. IEEE Transactions on* 51 (7), 4249–4259. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2227761>.
- Fazio, M., Benson, P. M., & Vinciguerra, S., 2017, On the generation mechanisms of fluid-driven seismic signals related to volcano-tectonics. *Geophysical Research Letters*, 44, 734–742. <https://doi.org/10.1002/2016gl070919>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., 2020, The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020, 146, 1999–2049.
- Hessami, K., Jamali, F., Tabassi, H., 2003, Map of Major Active Faults of Iran. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, IIEES Report, Iran.*
- Hetland, E., Musé, P., Simons, M., Lin, Y., Agram, P., DiCaprio, C., 2012, Multiscale insar time series (mints) analysis of surface deformation. *J Geophys Res Solid Earth* 117(B2).
- Jolivet, R., Agram, P.S., Lin, N.Y., Simons, M., Doin, M.P., Peltzer, G., Li, Z., 2014, Improving InSAR geodesy using global atmospheric models. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 119 (3), 2324–2341. <https://doi.org/10.1002/2013JB010588>.
- Joyce, K.E., Belliss, S.E., Samsonov, S.V., McNeill, S.J., Glassey, P.J., 2009, A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Prog Phys Geogr* 33(2):183–207.
- Kemeny, J.M., Cook, N.G., 1991., *Micromechanics of deformation in rocks. In Toughening Mechanisms in Quasi-Brittle Materials*; Springer: Berlin/Heidelberg,
- می‌دهد. این تغییرات می‌تواند برای الگوسازی و کالیبره کردن دگرریختی پیشلرزه‌ای به‌طور موثر کاربرد باشد. بر اساس مطالعه توابع زمانی در سری‌های InSAR جداسازی محدوده‌های دارای تغییر شتاب جابجایی در جهت LOS و بررسی توزیع بخش‌های متأثر از فرونشست و تورم، می‌توان بخش‌های پیشلرزه‌ای را از مرحله میانلرزه‌ای جدا کرد. این مطالعات می‌تواند برای شناسایی رومرکز و حتی سازوکار زمینلرزه‌های آتی کارساز باشد. شناسایی الگوهای متفاوت دگرریختی InSAR در بخش‌های مختلف فشاری و کششی میدان‌های کرنش زمین‌ساختی در مرحله پیشلرزه‌ای، امکان‌پذیری پیش‌بینی سازوکار، مکان و زمان زمینلرزه‌ها را مطرح می‌کند.

منابع

- Ambraseys, N.N., Melville, C.P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge University Press. <http://www.iiees.ac.ir/fa/eqcatalog>.
- Baud, P., Wong, T.f., Zhu, W., 2014, Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.08.031>.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Khatib, M.M., Priestley, K., Talebian, M., Ghafuri-Ashtiani, M., 1999, The 1997 May 10 Zirkuh (Qa'emat) earthquake (M 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. *Geophys J Int.* 136:671–694.
- Bernardi, M., S., Africa, P., C., Falco, C., 2021, On the Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for Monitoring and Forecasting Natural Hazards. *Mathematical Geosciences*, Volume 53. p.1781 – 1812.
- Berti, M., Corsini, A., Franceschini, S., Iannacone, J., 2013, Automated classification of Persistent Scatterers Interferometry time series. *Natl Hazards Earth Syst Sci* 13(8):1945–1958.
- Chang, L., Hanssen, R.F., 2015, A probabilistic approach for InSAR time-series postprocessing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 54(1):421–430.
- Chiarabba, C., et al., 2009, The 2009 L'Aquila (central Italy) Mw 6.3 earthquake: Main shock and aftershocks. *Geophys. Res. Lett.* 36, L18308.

- Germany, pp. 155–188.
- Lazecy, M., Spaans, K., González, P.J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., 2020, LiCSAR: an automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*. 12(15):2430. doi: 10.3390/rs12152430.
- McClintock, F. A., 1962, Friction on Griffith cracks in rocks under pressure. In *Proceedings of the Fourth U.S. National Congress of Applied Mechanics*, pp. 1015–1022.
- Milone, G., Scepi, G., 2011, A clustering approach for studying ground deformation trends in Campania region through PS-InSAR TM time series analysis. *J Appl Sci* 11:610–620.
- Moro, M., Saroli, M., Stramondo, S., Bignami, C., Albano, M., Falcucci, E., Gori, S., Doglioni, C., Polcari, M., Tallini, M., 2017, New insights into earthquake precursors from InSAR. *Sci Rep* 7(1):12035.
- Nemati, M., Hajati, F. J., Rashidi, A., Hassanzadeh, R., 2020, Seismology of the 2017 Hojedk earthquakes (MN 6.0–6.1), Kerman province, SE Iran. *Tectonophysics*, 780, 228398.
- Nemati, M., 2015c, Aftershocks investigation of 2010 Dec. and 2011 Jan. Rigan earthquakes in the southern Kerman province, SE Iran. *Journal of Tethys (Iran)*, 3(2): 96-113.
- Pepe, A., Lanari, R., 2006, On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 2374–2383.
- Savidge, E., Nissen, E., Nemati, M., Karasözen, E., Hollingsworth, J., Talebian, M., Bergman, E., Ghods, A., Ghorashi, M., Kosari, E., Rashidi, A., Rashidi, A., 2019, The December 2017 Hojedk (Iran) Earthquake Triplet - Sequential Rupture of Shallow Reverse Faults in a Strike-slip Restraining Bend. *Geophysical Journal International*, v.217, 909-925, doi: 10.1093/gji/ggz053.
- Sibson, R.H., 2020, Preparation Zones for Large Crustal Earthquakes Consequent on Fault-Valve Action. *Earth Planets Space*, 72, 31.
- Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B., Parsons, B., Priestley, K. and Saiidi, A., 2006, The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February, 22 in central Iran, *Geophysical Journal International*, v. 164, p. 137-148.
- Tapete, D., Casagli, N., 2013, Testing computational methods to identify deformation trends in RADARSAT persistent scatterers time series for structural assessment of archaeological heritage. In: *International conference on computational science and its applications*, Springer, pp 693–707.
- Tolomei, C., Salvi, S., Boncori, J.P.M., Pezzo, G., 2015, InSAR measurement of crustal deformation transients during the earthquake preparation processes: A review. *Boll. Geofis. Teor. Appl* 56, 151-166.
- Vaka, D.S., Rao, Y.S., Bhattacharya, A., 2023, Time series analysis of the pre-seismic and post-seismic surface deformation of the 2017 Iran–Iraq earthquake derived from Sentinel-1 InSAR data. *Journal of Earth System Science*. Volume 132, article number 64. DOI: 10.1007/s12040-023-02085-2.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Che'ry, J., 2004, Contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157, pp. 381-398.
- Yaseen, M., Hamm, N.A., Woldai, T., Tolpekin, V., Stein, A., 2013, Local interpolation of coseismic displacements measured by InSAR. *Int J Appl Earth Observ Geoinf* 23:1–17.
- Yunjun, Z., Fattahi, H., Pi, X., Rosen, P., Simons, M., Agram, P., & Aoki, Y., 2022, Range Geolocation Accuracy of C-/L-band SAR and its Implications for Operational Stack Coregistration. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 60, 5227219.
- Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F., 2019, Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction, *Computers and Geosciences*, 133, 104331, doi:10.1016/j.cageo.2019.104331, PDF, Supp, Code, Data & Figures.
- Zhu, W., Baud, P., & Wong, T., 2010, Micromechanics of cataclastic pore collapse in limestone. *Journal of Geophysical Research*, 115, B04405. <https://doi.org/10.1029/2009jb006610>.

Interseismic deformation study using InSAR time series resolution in the Shahdad area, Kerman (the precursors for the 1396 Hojedk earthquake triplet)

Leila Mahshadnia^{1*}, Seyed Ahmad Alavi², Mohammad Reza Ghassemi³ and Zahra Mousavi⁴

¹ Ph.D. Candidate, Department of Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran

(Received: 16 April 2024, Accepted: 18 August 2024)

Summary

The rate of strain accumulation on a fault may be directly related to the rate of occurrence of earthquakes. Therefore, the geodesic observations of crustal strain in the interseismic stage and identification of preseismic instabilities, in addition to being effective in more accurate evaluation of fault slip rates, also have an important contribution to seismic risk assessment. The deformation of the surface and its temporal evolution in the active Shahdad fault convergence zone was Estimated using ESA's Sentinel-1 radar satellite and using large sets of C-band data \sim months before and 55 months after the main earthquakes of December 2017, Hojedk Kerman, in the 8 years from 2014 to 2022.

Interferogram stacks were made with ISCE2 software. The obtained results were used to create InSAR time series using the MintPy software package. The corrected phase time series were extracted for deformation study, and linear and 3rd degree polynomial time model were used to produce velocity and acceleration maps in three ascending and descending tracks. The average velocity maps confirmed the presence of non-linear and unstable pre-seismic and post-seismic deformations in addition to stable displacements in the epicenter of earthquakes. These studies led to the identification of areas with short and long wavelength anomalies, evidence of seismic precursor signals, and their measurement. The results in descending tracks showed that More than 20 mm of subsidence in the direction of LOS occurred in the alluvial basins north of the Lakar Kuh fault three years before the main earthquakes.

The same basins, during the post-seismic phase, showed an uplift of up to 70 mm during approximately 40 months. The results of time series processing showed that multiple subsidence and inflation phases occurred in different time-spatial intervals in the epicentral region. Part of the observed gradual subsidence was observed on a longtime scale before the occurrence of earthquakes, followed by a period of swelling and uplift, on which more unstable fluctuations of LOS deformation are superimposed. This slow subsidence is probably related to surface fractures, drainage of underground water due to the opening of fractures, and consolidation in the surrounding areas of the epicenter before the earthquake. These observations show the necessity of solving InSAR time series in seismic zones to find temporal and spatial patterns of surface deformation in interaction with the mechanism and magnitude of earthquakes. These changes can be effectively used for modeling and calibrating pre-seismic deformation. Based on the study of time functions in InSAR series and separation of temporal-spatial ranges with acceleration change in the amount of displacement, as well as determining the parts affected by subsidence and swelling, it is possible to distinguish the pre-seismic from the interseismic phase in the seismic cycles. These studies can be useful for identifying the epicenter and the mechanism of future earthquakes.

Keywords: InSAR time series, earthquake precursor, intersiesmic instability, subsidence, inflation