



## بررسی تغییر شکل پوسته زمین و آسیب زیرساختها ها بعد از زلزله شبه جزیره نوتو ۲۰۲۴ ژاپن با استفاده از سنجش از دور راداری باند L

صدرا کریم زاده\*

استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

### چکیده

اگر چه زلزله ها فقط در چند ثانیه رخ می دهند اما متاسفانه آثار آنها تا سال ها و شاید دهه ها در محیط باقی می ماند. زلزله ها قابل پیش بینی در بلند مدت نیستند اما با این حال فناوری های فضایی از جمله سنجش از دور راداری می تواند کمک بسزایی در کاهش ریسک و تلفات زلزله بازی کنند. در این مطالعه تصاویر رادار با گشودگی مصنوعی (SAR) ماهواره ALOS-2 موسوم به PALSAR-2 در باند L با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (InSAR) و سنجش همدوسی (Coherence) برای ارزیابی تخریب ساختمان ها و زیرساختهای جاده ای تحت تاثیر از زلزله ۱ ژانویه ۲۰۲۴ نوتو ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که داده های باند L در محدوده طیفی ۲۴ سانتی متر قدرت نفوذ مناسبی در مناطق با پوشش گیاهی متراکم و بلند (همانند شبه جزیره نوتو) دارد که از این ویژگی میتوان برای استخراج میدان جابجایی زمین و همینطور آسیب ساختمان ها و جاده ها استفاده کرد. نتایج بدست آمده حاکی از جابجایی بیشینه حدوداً یک متری در راستای خط دید ماهواره می باشد.

**کلمات کلیدی:** زلزله، خطر، سنجش از دور SAR، ALOS-2، همدوسی

### ۱- مقدمه

زلزله یکی از پدیده های طبیعی است که از زمان های قدیم تأثیرات زیادی بر زندگی انسان ها و محیط زیست داشته است. این پدیده به واسطه حرکت های مختلف پوسته زمین، غالباً به دلیل جابجایی صفحات تکتونیکی، رخ

می‌دهد که می‌تواند خسارات جدی مالی و جانی در پی داشته باشد. موضوع وقتی اهمیت بیشتری پیدا میکند که زلزله در مناطق با جمعیت بالا رخ می‌دهد که تأثیرات آن بسیار خطرناک‌تر می‌شود. برای مدیریت و کاهش خطرات ناشی از زلزله، نیاز به ابزارها و تکنیک‌های پیشرفته برای پیش‌بینی، نظارت و تحلیل این پدیده وجود دارد. زلزله‌ها به‌عنوان یک تهدید طبیعی همواره در تاریخ بشر موجود بوده‌اند. تخریب‌های ناشی از زلزله‌های بزرگ، مانند زلزله بم ایران در سال ۲۰۰۳ میلادی یا زلزله قهرمان مرعش ترکیه در سال ۲۰۲۳ میلادی، یادآور این واقعیت هستند که بشر باید به‌دنبال راهکارهای مؤثری برای پیش‌بینی و کاهش خطرات باشد. این الزامات منجر به تحقیقات گسترده در زمینه فناوری‌های نوین زمینی و فضایی شده است. از آنجا که زلزله‌ها اغلب به‌طور ناگهانی و بدون هشدار قبلی رخ می‌دهند، تکنیک‌های پیش‌بینی به‌تنهایی کافی نیستند. بنابراین، نظارت مداوم بر فعالیت‌های لرزه‌ای و تغییرات زمین‌شناسی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین مانند رادار با گشودگی مصنوعی به‌عنوان یک ابزار کارآمد و دقیق، مورد توجه محققان قرار گرفته است (Karimzadeh et al., 2022).

از جمله ابزارهای نوین در این زمینه، فناوری رادار با گشودگی مصنوعی (SAR) است که به‌طور خاص در مطالعه و تحلیل مکانیزم زمین‌لرزه‌ها و هم‌منظور میزان آسیب ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها کاربرد دارد. این فناوری امکان شناسایی تغییرات زمین و حرکات سطحی ناشی از زلزله را با دقت و سرعت بالا فراهم می‌کند. رادار با گشودگی مصنوعی، به‌واسطه ارسال امواج میکروویو با طول موجی از حدود ۳ سانتی‌متر تا ۱ متر به زمین و تحلیل داده‌های برگشتی، می‌تواند تصاویر دقیقی از سطح زمین و تغییرات آن فراهم آورد (Karimzadeh et al., 2018 and Cigna et al., 2022).

فناوری رادار با گشودگی مصنوعی (SAR) به‌منظور تصویربرداری از سطح زمین و تحلیل تغییرات آن توسعه یافته است. این فناوری به‌ویژه در زمینه‌های مختلف جغرافیایی و زمین‌شناسی کاربرد دارد. در این سیستم، یک رادار بر روی یک پلتفرم (مانند هواپیما یا ماهواره) قرار می‌گیرد و امواج رادیویی را به زمین ارسال می‌کند. این امواج پس از برخورد با سطح زمین و بازتاب، به پلتفرم بازمی‌گردند و داده‌های مربوط به تغییرات زمین را ثبت می‌کنند. یکی از مزایای کلیدی رادار با گشودگی مصنوعی، توانایی آن در تولید تصاویری با وضوح بالا است که می‌تواند به شناسایی تغییرات کوچک در سطح زمین کمک کند. این ویژگی به‌ویژه در زمان وقوع زلزله و بررسی آسیب‌های ناشی از آن اهمیت پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال، با استفاده از این فناوری می‌توان حرکت زمین و تغییرات سطحی را در نواحی زلزله‌زده تحلیل کرد و اطلاعات دقیقی‌تری از شدت و وسعت تخریب‌ها به‌دست آورد (Karimzadeh et al., 2022).

استفاده از رادار با گشودگی مصنوعی در زلزله‌شناسی مزایای متعددی دارد. اولاً، این فناوری قادر است تصاویر با وضوح بالا از مناطق آسیب‌دیده ارائه دهد که می‌تواند به شناسایی تغییرات ساختاری و زمین‌شناسی کمک کند. ثانیاً، با استفاده از داده‌های SAR می‌توان به سرعت به تجزیه و تحلیل و نقشه‌برداری از نواحی زلزله‌زده پرداخت و اطلاعات مورد نیاز برای عملیات امدادرسانی و بازسازی را فراهم آورد.

از دیگر کاربردهای SAR در زلزله‌شناسی می‌توان به پایش فعالیت‌های لرزه‌ای قبل و بعد از وقوع زلزله اشاره کرد. این اطلاعات می‌تواند به محققان کمک کند تا الگوهای حرکتی و جابجایی‌های زمین را شناسایی کنند و پیش‌بینی‌های بهتری در مورد فعالیت‌های آینده داشته باشند. با توجه به دقت و کارایی بالای این فناوری، استفاده از آن در مطالعات زمین‌شناسی و مدیریت خطرات زلزله به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (Karimzadeh et al., 2022).

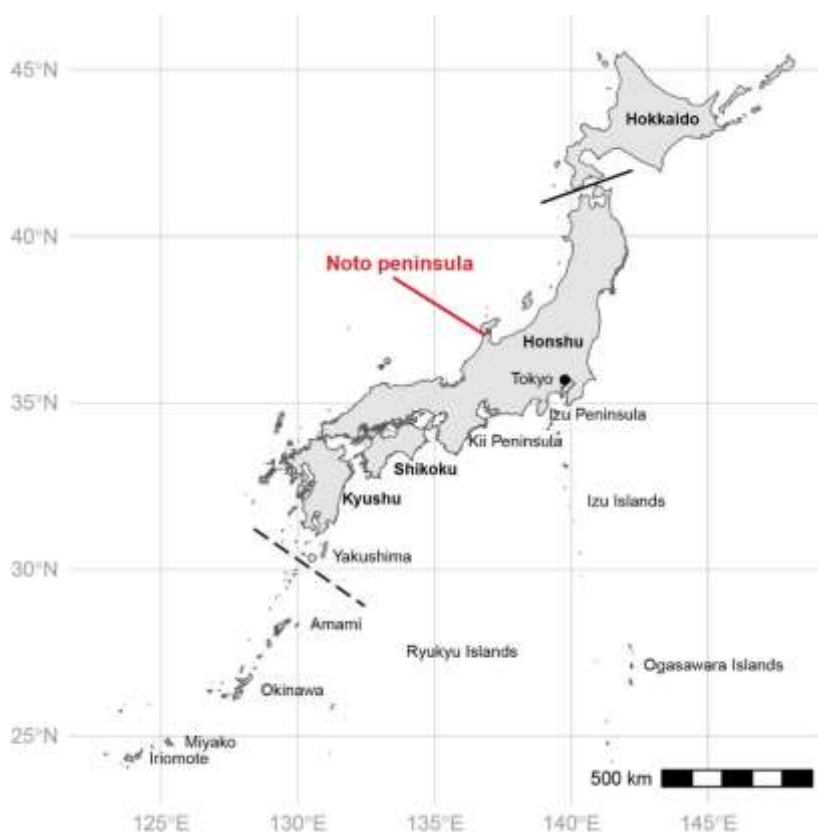
در این مطالعه جابجایی پوسته زمین با استفاده از داده‌های چندزمانه ALOS-2 از مدارات پایین گذر محاسبه شد. همچنین از روش آنالیز تداخل سنجی (InSAR) و همدوسی (Coherence) تصاویر قبل و بعد از زلزله، گستره تخریب ساختمان‌ها و احتمال تغییرات جاده‌ها در بخش مهمی از شبه جزیره نوتو مورد بررسی قرار گرفت (ALOS-2/PALSAR-2 product format).

## ۲- منطقه مطالعاتی، مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شبه‌جزیره نوتو در استان ایشیکاوا، واقع در سواحل غربی ژاپن، به دلیل موقعیت زمین‌شناسی خاص خود و نزدیکی به صفحات زمین‌ساختی، یکی از مناطق لرزه‌خیز مهم این کشور است. نوتو در نزدیکی مرزهای دو صفحه زمین‌ساختی بزرگ صفحه اقیانوس آرام و صفحه اوراسیا قرار دارد. حرکات بین لرزه‌ای این صفحات به‌طور مداوم می‌تواند منجر به زلزله شود. اگر چه در نوتو و سایر مناطق لرزه‌خیز ژاپن، استانداردهای ساخت و ساز سخت‌گیرانه‌ای وجود دارد که به کاهش خطرات ناشی از زلزله کمک می‌کند اما ساختمان‌ها باید قادر به تحمل لرزش‌های شدید نیز باشند. نوتو در طول تاریخ خود زلزله‌های متعددی را تجربه کرده است. زلزله‌های نوتو می‌توانند از زلزله‌های خفیف تا شدید متغیر باشند. معمولاً، زلزله‌ها در این منطقه از نوع زلزله‌های سطحی هستند، اما گاهی اوقات زلزله‌های عمیق‌تر نیز رخ می‌دهند که می‌توانند خسارات کمتری را ایجاد کنند. یکی از زلزله‌های مهم این منطقه، زلزله نوتو در سال ۲۰۰۷ با بزرگی ۶/۹ ریشتر بود که خسارات جدی به زیرساخت‌ها و ساختمان‌ها وارد کرد و چندین نفر کشته و زخمی شدند. زلزله مورد بحث در این مطالعه در ژانویه ۲۰۲۴ با

مکانیزم فشاری به وقوع پیوست و بزرگای آن ۷/۵ بود. زلزله‌های شدید این منطقه باعث زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی و همچنین ایجاد سونامی در سواحل شده اند. که در این مطالعه با استفاده از تصاویر ALOS-2 PALSAR-2 این موارد نیز بصورت اجمالی مورد بررسی قرار میگیرد ( ALOS-2/PALSAR-2 product ).(format



شکل (۱): نقشه ژاپن و محل وقوع زلزله نوتو در اول ژانویه ۲۰۲۴.

Fig. (1): Japan map together with the location of Noto peninsula where the Noto earthquake happened on 1<sup>st</sup> January 2024.

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده و روش تحقیق

داده‌های ALOS-2 PALSAR-2 (Advanced Land Observing Satellite 2)، متعلق به ماهواره ALOS-2 (Satellite 2) ژاپن، یکی از منابع مهم در زمینه مطالعه تغییرات سطح زمین و ارزیابی تخریب زیرساخت‌ها می‌باشد. PALSAR-2 یک رادار سنجش از دور است که به صورت فعال عمل می‌کند و می‌تواند در هر شرایط آب

و هوایی داده جمع‌آوری کند (ALOS-2/PALSAR-2 product format). این سنسور قادر است تصاویر (SLC) (Single Look Complex) با قدرت وضوح بالا را در باند L با طول موج تقریبی ۲۴ سانتی متر ثبت کند. نمونه حالت هایی که این سنسور ثبت میکند ScanSAR، StripMap و Spotlight هستند. برای انجام تداخل سنجی و بررسی همدوسی (Coherence) که معیار مهم شناسایی تغییرات می باشد ۳ تصویر راداری در حالت StripMap-1 از مدارات پایین گذر از JAXA سفارش داده شد (جدول ۱).

جدول شماره (۱): خصوصیات تصاویر SAR اخذ شده برای این مطالعه

Table (1): The characteristics of the acquired SAR images for this study.

تاریخ تصاویر	زاویه فرود (°)	پلاریزاسیون و حالت
۲۰۲۲/۱۱/۲۲	۳۹/۶	StripMap-1 HH/HV
۲۰۲۳/۶/۶	۳۹/۶	StripMap-1 HH/HV
۲۰۲۴/۱۱/۲	۳۹/۶	StripMap-1 HH/HV

در این مطالعه روش تداخل سنجی راداری دو زمانه برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین استفاده شده است که این فرآیند شامل مراحل زیر است:

۱- اخذ جفت تصویر راداری از یک منطقه در زمان‌های مختلف (قبل و بعد از زلزله)، ۲- مقایسه فاز جفت تصویر و شناسایی الگوهای تداخل سنجی (Fringe) که این الگوها می‌توانند اطلاعات دقیقی از تغییرات سطح زمین ارائه دهند، ۳- تحلیل تغییر شکل و استخراج اطلاعات مربوط به میزان و جهت تغییر شکل سطح زمین که این تغییر شکل‌ها می‌توانند به صورت عمودی و افقی اندازه‌گیری شوند (Aslan et al., 2018 and Karimzadeh et al., 2020).

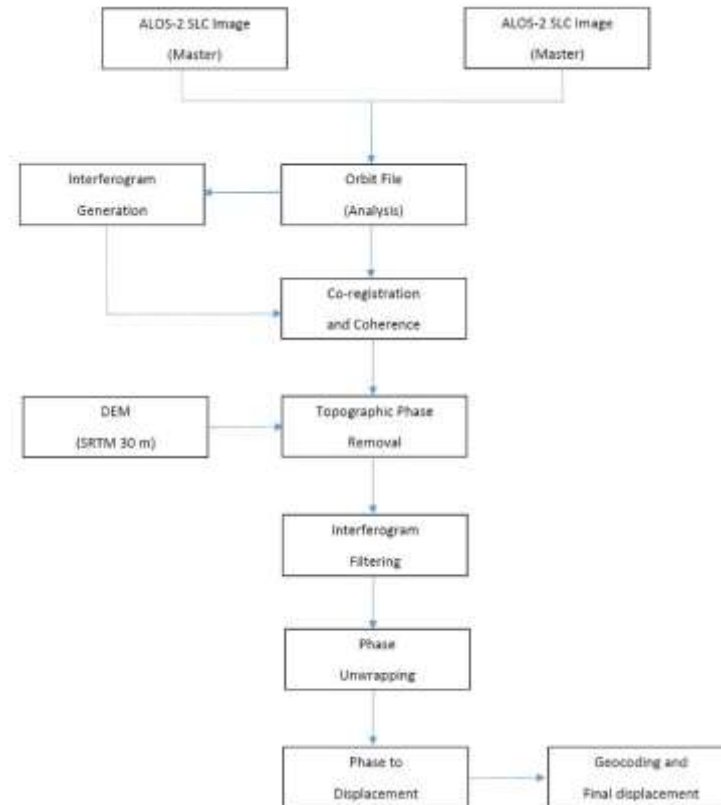
در واقع تداخل سنجی راداری یکی از تکنیک‌های پیشرفته در سنجش از دور است که با استفاده از داده‌های ALOS-2 PALSAR-2 می‌تواند به تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین بپردازد. این روش بر مبنای تجزیه و تحلیل تغییرات فاز سیگنال‌های راداری است که دو یا چند تصویر راداری از یک منطقه در زمان‌های مختلف جمع‌آوری شده و به یکدیگر نسبت داده می‌شوند بطوری که داده‌ها باید از لحاظ هندسی تصحیح شوند تا خطاهای ناشی از وضعیت ماهواره و تغییرات زمین در طول زمان کاهش یابد. با استفاده از تصاویر تصحیح شده،

اختلاف فاز بین دو تصویر محاسبه می‌شود. این اختلاف فاز به تغییرات سطح زمین مرتبط است. تغییر شکل سطح زمین از طریق تبدیل اختلاف فاز به اطلاعات جغرافیایی محاسبه می‌شود.

اختلاف فاز به میزان تغییر جابجایی سطح زمین مرتبط است و این ارتباط از طریق معادله زیر بیان می‌شود:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi$$

که  $\Delta d$  همان اختلاف جابجایی،  $\lambda$  طول موج ماهواره مربوطه (تقریباً ۲۴ سانتی متر) و  $\Delta\varphi$  نیز همان اختلاف فاز می باشد (Cigna et al., 2021). در این مطالعه تصاویر در تاریخ ۲۰۲۲/۱۱/۲۲ و ۲۰۲۳/۶/۶ برای انجام تداخل سنجی راداری و محاسبه همدوسی در حالت Pre-seismic مورد استفاده قرار گرفتند و همچنین تصاویر با تاریخ ۲۰۲۳/۶/۶ و ۲۰۲۴/۱/۲ برای انجام تداخل سنجی در حالت Co-seismic مورد استفاده قرار گرفتند. در این مطالعه مراحل انجام تداخل سنجی راداری (InSAR) که در شکل ۲ نیز نمایش داده شده است به ترتیب به شرح زیر می باشد:



شکل (۲): فلوچارت مربوط به مراحل انجام پردازش های تصاویر ALOS-2.

Fig. (شکل 2): Flowchart of the ALOS-2 analysis.

۱- ثبت تصاویر (Coregistration): دو تصویر راداری جمع‌آوری شده در هر دو حالت Pre-seismic و Co-seismic باید دقیقاً روی یکدیگر قرار داده شوند. به عبارت دیگر، هر پیکسل در یک تصویر باید با پیکسل مربوطه در تصویر دیگر منطبق شود. این مرحله بسیار مهم است زیرا عدم دقت در ثبت تصاویر می‌تواند باعث بروز خطاهای جدی در مراحل بعدی، به ویژه در محاسبه فاز تداخلی، شود. ۲- تولید تصویر تداخلی (Interferogram Generation): پس از ثبت تصاویر، مرحله تولید تداخل نگاشت (Interferogram) آغاز می‌شود. در این مرحله، اختلاف فاز بین هر پیکسل از دو تصویر محاسبه می‌شود. اختلاف فاز نشان‌دهنده تفاوت مسیر سیگنال‌های راداری از سطح زمین به ماهواره در دو زمان مختلف است. این اختلاف فاز اطلاعات کلیدی درباره توپوگرافی یا تغییرات سطح زمین را فراهم می‌کند. ۳- حذف فاز توپوگرافی ( Topographic Phase

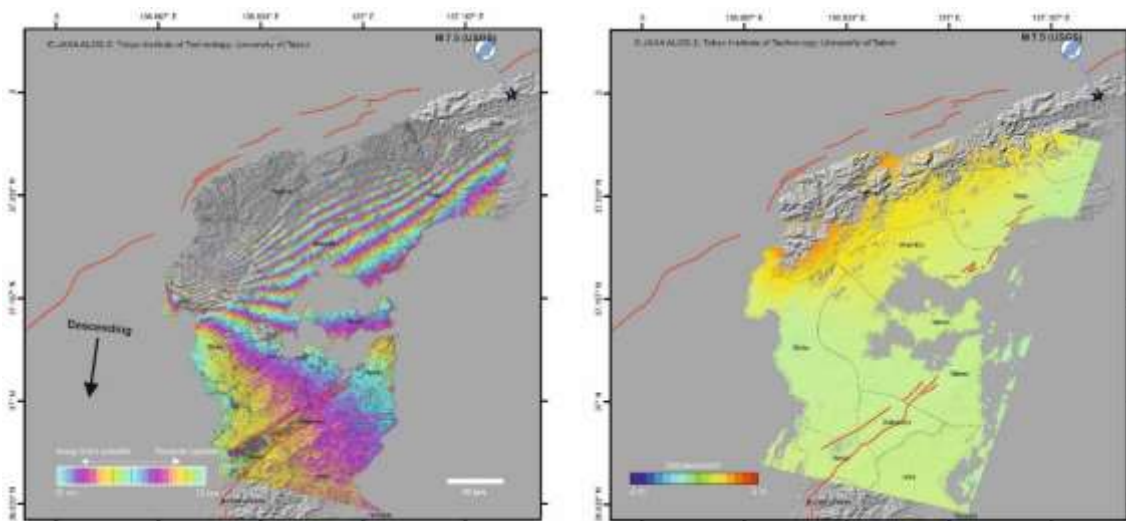
Removal): برای تمرکز بر تغییرات سطح، لازم است اثرات فاز مربوط به توپوگرافی سطح حذف شود. این کار معمولاً با استفاده از یک مدل رقومی ارتفاع (DEM) انجام می‌شود. مدل DEM به حذف بخش توپوگرافی فاز کمک می‌کند تا فقط فاز مرتبط با جابجایی‌های سطح زمین باقی بماند. در این مطالعه داده‌های توپوگرافی ماموریت شاتل (SRTM) با قدرت تفکیک ۳۰ متری برای رفع فاز ایجاد شده توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفت. ۴- فیلتر کردن و بهبود کیفیت تصویر (Filtering): پس از تولید تداخل نگاشت، اغلب نویزهایی در تصویر وجود دارد که باید فیلتر شوند. یکی از رایج‌ترین فیلترها، فیلتر گلدشتاین (Goldstein filter) است که برای کاهش نویز فاز تداخلی استفاده می‌شود. این مرحله کیفیت تصویر تداخل نگاشت را بهبود می‌بخشد و دقت نتایج را افزایش می‌دهد. ۵- محاسبه هم‌دوسی (Coherence Calculation): هم‌دوسی یا coherence معیاری از کیفیت تصویر تداخلی و میزان همبستگی سیگنال‌های بازتابی بین دو تصویر است. هم‌دوسی بالا نشان‌دهنده تغییرات کمتر (اغلب با رنگ روشن) سطح زمین و کیفیت بالاتر اطلاعات است. این مرحله برای تشخیص مناطقی که تغییرات سریع یا نویز زیاد دارند، بسیار حیاتی است. ۶- رفع ابهام فاز (Phase Unwrapping): فاز تداخلی که در تصویر تداخلی محاسبه شده است، بین ۰ تا  $\pi$  تغییر می‌کند. اما برای دستیابی به اطلاعات دقیق درباره تغییرات ارتفاع یا جابجایی‌های سطح زمین، باید این فاز پیچیده (Wrapped Phase) به یک فاز واقعی تبدیل شود که به این فرآیند رفع ابهام فاز (Phase Unwrapping) گفته می‌شود. ۷- تخمین جابجایی یا توپوگرافی (Displacement or Topography Estimation): پس از رفع ابهام فاز، می‌توان تغییرات جابجایی سطح زمین یا اطلاعات توپوگرافی منطقه مورد مطالعه را محاسبه کرد. این مرحله نتایج نهایی از جمله نقشه‌های جابجایی سطح یا نقشه‌های دقیق ارتفاع را تولید می‌کند. ۹- ژئوکدینگ و تفسیر نتایج: در این مرحله، نتایج به صورت نقشه‌ها یا تصاویر قابل تفسیر ارائه می‌شوند. این نقشه‌ها ممکن است جابجایی‌های سطح زمین (مانند فرونشست، زلزله یا حرکات زمین) یا مدل‌های دقیق توپوگرافی را نشان دهند. داده‌های خروجی می‌توانند به صورت نقشه‌های دوبعدی یا سه‌بعدی ارائه شوند.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۳ چپ تداخل نگاشت هم لرزه حاصل از زوج تصویر از مدارات پایین گذر (۲۰۲۳/۶/۶ و ۲۰۲۴/۱/۲) را نشان می‌دهد. که هر فرینچ در این شکل به اندازه ۱۲ سانتی متر جابجایی را در راستای خط دید ماهواره نشان



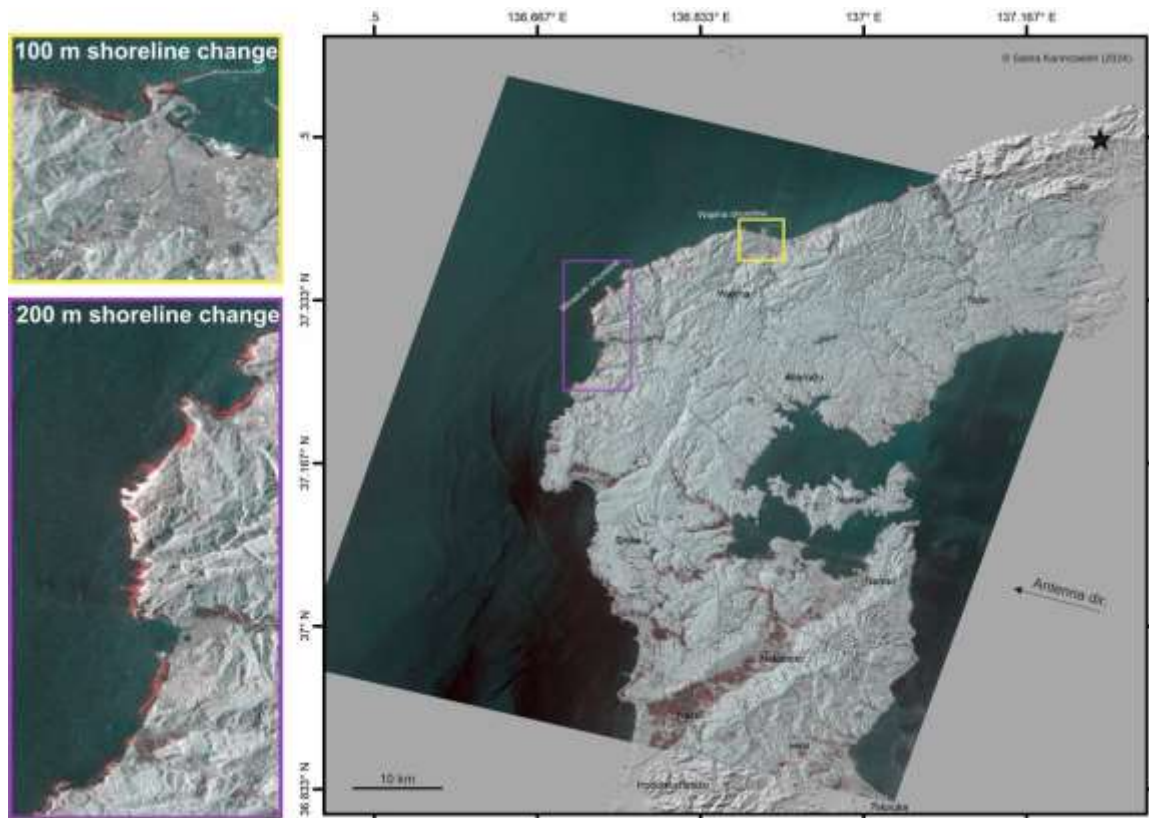
می دهد. که این جابجایی با توجه به مشخص بود مکانیزم زلزله و ساز و کار فشاری آن در انطباق می باشد. وجود نویز در برخی مناطق بیشتر به دلیل عدم حذف مناسب فاز توپوگرافی و همچنین وجود تغییرات بارز اتمسفری در فاصله بین دو تصویر مورد استفاده می باشد. شکل ۳ راست نیز نقشه جابجایی زمین پس از ابهام فاز بر حسب متر را نمایش می دهد. همانطور که دیده میشود بیشینه این جابجایی در حدود ۱ متر می باشد که در راستای خط دید ماهواره محاسبه شده است. خطوط قرمز نشانگر گسل ها در منطقه می باشند و ساز و کار کانونی زلزله با استفاده از داده های USGS در مرکز زلزله نمایش داده شده است.



شکل (۳): چپ: تداخل نگاشت هم لرزه حاصل از زوج تصویر از مدارات پایین گذر. راست: نقشه جابجایی زمین پس از ابهام فاز بر حسب متر. خطوط قرمز نشانگر گسل ها در منطقه می باشند و ساز و کار کانونی زلزله با استفاده از داده های USGS در مرکز زلزله نمایش داده شده است.

**Fig. (2): Left: Co-seismic interferogram of descending orbits. Right: Phase unwrapped displacement map (in meters). Red lines show the faults. Focal mechanism is referred from USGS.**

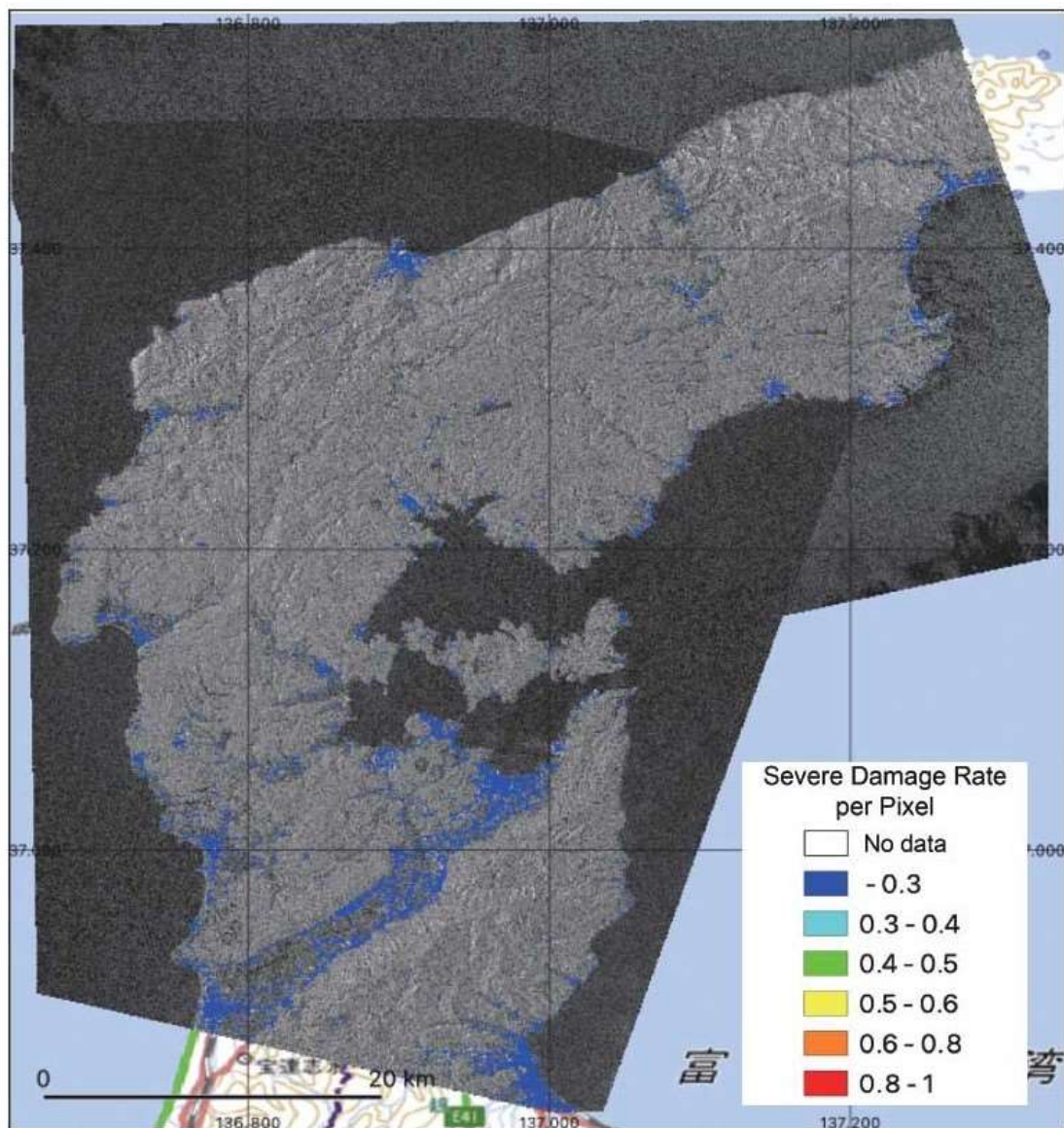
شکل ۴ ترکیب رنگی RGB حاصل از بازپراکنش راداری زوج تصویر از مدارات پایین گذر (۲۰۲۳/۶/۶) و (۲۰۲۴/۱/۲) را نشان می دهد. تصویر بعد از زلزله (۲۰۲۴/۱/۲) در کانال قرمز و تصویر قبل زلزله (۲۰۲۳/۶/۶) در کانال های سبز و آبی برای بارزسازی تغییرات مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که مشخص است تغییرات رو به جلو (Forward Changes) در شکل ۳ با رنگ قرمز نشان دهنده آسیب زیرساخت ها یا تغییراتی از قبیل خطوط ساحلی می باشند. در خطوط ساحلی Wajima این تغییرات ساحلی در حدود ۱۰۰ متر و این تغییرات در Minazuki به ۲۰۰ متر می رسد. البته بایستی خاطر نشان کرد که تغییرات در قسمت های جنوبی در Haku بیشتر مرتبط با آب گیری شالیزار های برنج می باشد.



شکل (۴): نقشه ترکیب رنگی RGB از منطقه مورد مطالعه

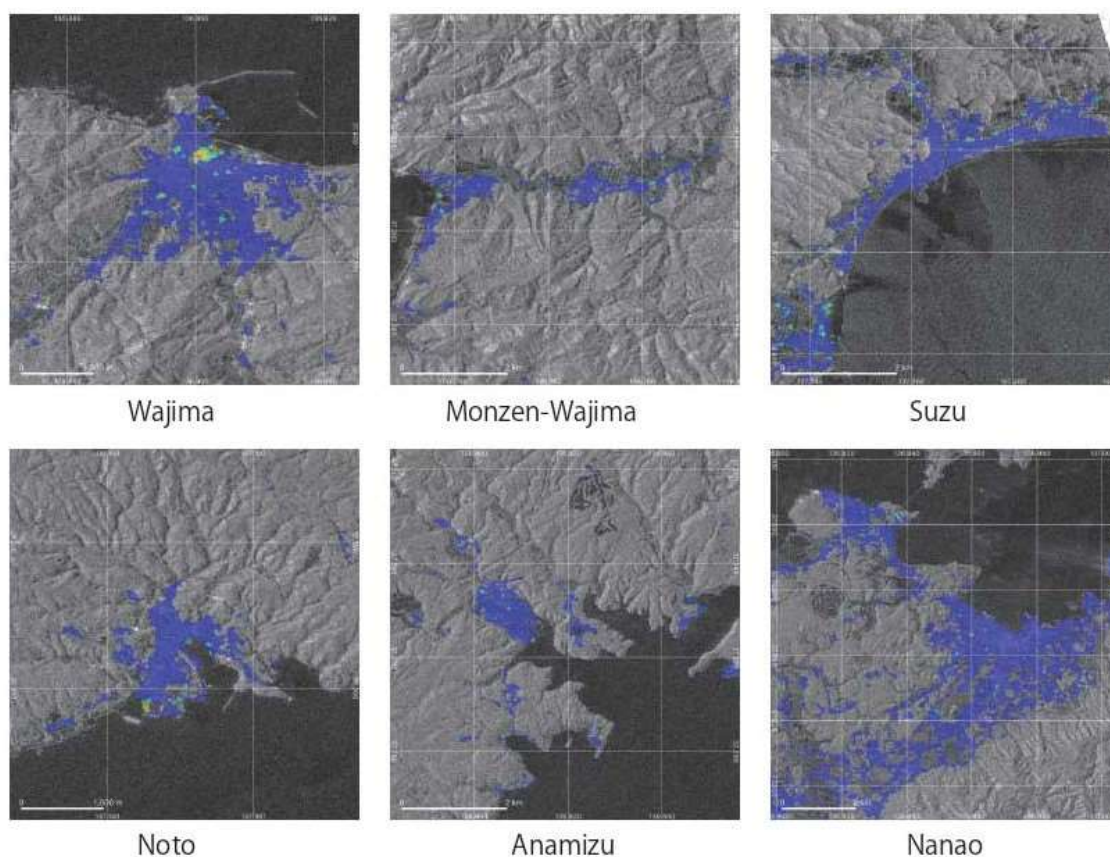
Fig. (3): RGB color composite of the study area.

شکل ۵ شدت آسیب ساختمان ها در شبه جزیره نوتو را نشان می دهد. با افزایش این مقادیر احتمال آسیب نیز افزایش یافته است. شکل ۶ نیز نمایی نزدیک از مناطق آسیب دیده شهری در همان مقیاس مطرح شده در شکل ۵ می باشد. شهر ساحلی Wajima در این نقشه ها بیشترین آسیب را متحمل شده است که نتایج بدست آمده با گزارش های اولیه منتشره از دانشگاه ها و موسسات علمی در تطابق کامل می باشد. لازم به ذکر است که ساختمان هایی که قبل از سال ۱۹۸۱ میلادی و طبق آیین نامه کدهای قبلی ساخت و ساز در ژاپن ایجاد شده اند آسیب پذیری بیشتری داشتند.



شکل (۵): نقشه آسیب ساختمان ها بعد از زلزله.

Fig. (4): Damage map of the study area after the earthquake.



شکل (۶): چند نمونه از نقشه های آسیب شهری از نمایی نزدیک  
Fig. (5): Some samples of the urban damages from a closer look.

شکل ۷ احتمال آسیب پذیری یا تغییرات راه ها و جاده های شبه جزیره نوتو را نشان می دهد. این تغییرات که از همدوسی تصاویر بدست آمده اند میتواند حکایت از آسیب جاده ها (بافر ۲۰ متری) یا تغییرات دیگر باشد. که متأسفانه به دلیل عدم دسترسی به داده های کمی یا داده های زمینی از آسیب جاده ها امکان اظهار نظر دقیق در این مورد وجود ندارد.



شکل (۷): آسیب پذیری جاده ها و خیابان های درجه ۱ و ۲ بر اساس اختلاف همدوسی.

**Fig. (6):** Damage map of the roads and streets (1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> degree) based on differential coherence values.

#### ۴- نتیجه گیری

همانطور که در بخش قبلی ارائه شد، تصاویر راداری ALOS-2 و روش تداخل سنجی راداری به عنوان یکی از ابزارهای کارآمد در پایش آسیب پذیری ناشی از زلزله، نقش مهمی در ارزیابی های علمی و عملیاتی ایفا می کنند. نتایج این آنالیزها می توانند تغییرات زمینی و حرکت های زمین در مناطق زلزله زده را با دقت بالا ثبت کنند. کاربرد این داده ها به طور گسترده ای برای بررسی قبل، حین و بعد از وقوع زلزله به کار می رود و به ارزیابی دقیق تر و سریع تر آسیب های ناشی از زمین لرزه کمک می کند. مزایای اصلی استفاده از ALOS-2 برای پایش زلزله شامل قابلیت ثبت داده ها در شرایط آب و هوایی مختلف و شبانه روزی، و پوشش مناطق وسیع در مدت زمان کوتاه است. این ویژگی ها به ویژه در مناطق کوهستانی و جنگلی نظیر شبه جزیره نوتو که پوشیده از ابر هستند بر روش های سنتی برتری دارد. همچنین، این تصاویر امکان تهیه نقشه های جابه جایی زمین را با استفاده

از روش تداخل‌سنجی برای زلزله فوق را فراهم کرد که می‌تواند میزان تغییرات سطحی زمین ناشی از زلزله را با دقت میلی‌متری شناسایی کند. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین با استفاده از داده‌های سنتینل-۱ بدلیل استفاده از طول موج‌های کوتاه‌تر برای بررسی این زلزله امکان‌پذیر نبود. علاوه بر این، استفاده از ALOS-2 در مدل‌سازی پیش‌بینی خطرات زلزله نیز اهمیت دارد. داده‌های تاریخی این ماهواره می‌توانند به مدل‌سازی حرکات گسل‌ها و الگوهای پیش‌بینی زلزله کمک کنند و این اطلاعات به‌طور مستقیم در مدیریت خطرات زلزله و کاهش آسیب‌پذیری مناطق پرخطر کاربرد دارند. یکی دیگر از کاربردهای مهم ALOS-2 که در این مقاله بدان پرداخته شد، امکان ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها پس از وقوع زلزله است. با استفاده از داده‌های پیش و پس از حادثه، تغییرات ساختاری و آسیب‌های احتمالی را شناسایی شد و به ارزیابی میزان خسارت‌های وارده پرداخت. این اطلاعات می‌توانند به تصمیم‌گیری‌های سریع‌تر و موثرتر در خصوص امدادسانی و بازسازی کمک کنند.

در نهایت، می‌توان گفت که تصاویر راداری ALOS-2 به‌عنوان یک ابزار مهم در پایش و ارزیابی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله، می‌توانند داده‌های ارزشمندی برای تحلیل سریع و دقیق مناطق آسیب‌دیده ارائه دهند. این قابلیت‌ها نه تنها در بهبود واکنش سریع پس از زلزله مؤثر هستند، بلکه در برنامه‌ریزی بلندمدت برای کاهش خسارات و بهبود پایداری زیرساخت‌ها نیز نقش حیاتی دارند. استفاده از این فناوری می‌تواند به بهبود آمادگی و مدیریت بهتر بحران‌های زلزله در سطح ملی و منطقه‌ای کمک کند.

#### تقدیر و تشکر

مؤلف از آژانس اکتشافات هوا و فضای ژاپن (JAXA) برای تهیه تصاویر راداری و همچنین پروفیسور میاجیما و پروفیسور ماتسوکا برای به اشتراک گذاری نتایج تقدیر و تشکر می‌نماید.

## ۵-منابع

- ALOS-2/PALSAR-2 level 1.1/1.5/2.1/3.1 CEOS SAR product format description, Japan Aerospace Exploration Agency, May. (2014).
- Aslan, G., Cakır, Z., Ergintav, S., Lasserre, C., & Renard, F. (2018). Analysis of secular ground motions in Istanbul from a long-term InSAR time-series (1992–2017). *Remote Sensing*, 10(3), 408. <https://doi.org/10.3390/rs10030408>.
- Cigna, F., Esquivel Ramírez, R., & Tapete, D. (2021). Accuracy of sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*, 13 (23), 4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800> .
- Karimzadeh, S., Ghasemi, M., Matsuoka, M., Yagi, K., & Zulfikar, A. C. (2022). A deep learning model for road damage detection after an earthquake based on synthetic aperture radar (SAR) and field datasets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 5753–5765. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3189875>.
- Karimzadeh, S., & Matsuoka, M. (2020). Ground displacement in east azerbaijan province, Iran, revealed by L-band and C-band InSAR analyses. *Sensors*, 20(23), 6913. <https://doi.org/10.3390/s20236913>.
- Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Ogushi, F. (2018). Spatiotemporal deformation patterns of the lake urmia causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Scientific Reports*, 8(1), 5357. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23650-6>.







## ***An investigation of ground deformation and infrastructure damages following Noto peninsula earthquake (2024) using L-band remote sensing***

### **Abstract**

Earthquakes are among the natural hazards that can have significant impacts. Although earthquakes occur within just a few seconds, their effects can persist in the environment for years, or even decades. Earthquakes cannot be predicted in the long term, but space technologies, such as radar remote sensing, can play a crucial role in reducing earthquake risks and losses. In this study, Synthetic Aperture Radar (SAR) images from the ALOS-2 satellite, known as PALSAR-2, operating in the L-band, were used to assess the damage to buildings and road infrastructure resulting from the January 1, 2024, Noto earthquake in Japan. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and Coherence analyses have been used in this study. The results show that L-band data, with a wavelength of approximately 24 centimeters, have good penetration capability in areas with dense and tall vegetation cover (such as the Noto Peninsula). This advantage can be utilized to extract ground displacement fields and assess damage to buildings and roads in which the results show that the maximum displacement is about 1 meter in the line of sight of satellite.

**Keywords:** Earthquake, Hazard, SAR Remote Sensing, ALOS-2, Coherence