



فصلنامه زمین ساخت

زمستان ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۸

doi 10.22077/jt.2025.9696.1207

مقاله پژوهشی

استفاده از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) در تعیین میدان جابجایی حاصل از زمین لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار (Mw 7.7) لطفاله عمادعلی^{۱*}، ساسان معتقد^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

زمین لرزه یکی از ویران کننده ترین حوادث طبیعی می باشد که بسته به مشخصات و منطقه وقوع رخداد می تواند منجر به تلفات جانی و خسارات مالی فراوان گردد. برای کاهش این خسارت لازم است مشخصات زمین لرزه های آینده بر اساس مفروضات ارگودیک اطلاعات زلزله های گذشته تعیین و دستورالعمل های طراحی، ارزیابی و بهسازی لرزه ای تدوین و مورد استفاده قرار گیرد. یکی از مشخصه های مهم و پایه زمین لرزه های حوزه نزدیک مقدار جابجایی ماندگار زمین است. جابجایی ماندگار می تواند باعث تشدید خسارت سازه ها در حوزه نزدیک گسل شود. روش های سنتی تعیین جابجایی مثل روش های نقشه برداری زمینی، GNSS، ... صرفاً قادر به تعیین میزان جابجایی زمین راداری مثل روش InSAR بطور گسترده ای برای تعیین میدان جابجایی حاصل از زمین لرزه مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، جابجایی سطحی ناشی از رخداد زمین لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار با استفاده از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی و به کمک تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1 مربوط به قبل و بعد از وقوع زمین لرزه در حالت مداری صعودی ارزیابی شده است. این زمین لرزه در اثر حرکات گسل امتداد لغز Sagaing در نزدیکی شهر ماندالی واقع در کشور میانمار به وقوع پیوست. نتایج پردازش تصاویر راداری - در حالت مداری بالارونده ماهواره - نشان داد که بیشترین میزان جابجایی به میزان ۸۲ سانتیمتر در راستای خط دید ماهواره در امتداد خط گسل و در نزدیکی مرکز وقوع زمین لرزه اتفاق افتاده است.

کلمات کلیدی: جابجایی، زمین لرزه حوزه نزدیک، گسل Sagaing، گسل راستالغز، روش DInSAR

*ایمیل: emadali@bkatu.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۶۶۱۸۲۵۴۰

The use of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) technique for determining the displacement field caused by the March 28, 2025 Myanmar earthquake (Mw 7.7)

Lotfollah Emadali¹, Sasan Motaghed²

1- Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Faculty of Civil engineering and architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Abstract

Earthquake is one of the most devastating natural disasters that, depending on its characteristics and the region of occurrence, can cause significant human casualties and financial losses. To reduce such damages, it is necessary to use past earthquake data based on ergodic assumptions for determining the characteristics of future earthquakes and for developing design guidelines, seismic assessment, and retrofitting procedures. Paying attention to these issues is especially important in the near-fault region, where very limited information is available. One of the key and fundamental parameters of near-fault earthquakes is the amount of permanent ground displacement. Permanent displacement can exacerbate structural damage in the near-fault zone. In recent decades, the method of DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) has been widely used to determine the displacement field resulted by earthquakes. In this study, the surface displacement caused by the March 28, 2025 Myanmar earthquake (Mw 7.7) was evaluated using the DInSAR method with the Sentinel-1 radar images. The processing results showed that the maximum displacement of approximately 82 cm along the satellite line of sight occurred along the fault line near the earthquake epicenter.

Keywords: Displacement, Near-field earthquake, Sagaing fault, Strike-slip fault, DInSAR

*Email: emadali@bkatu.ac.ir

Tel: +989166182540

۱- مقدمه

سالانه حدود ۲۰ زلزله با بزرگای بالای ۷ در دنیا رخ می‌دهد. متوسط تعداد سالانه زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۸ حدود ۱ است. این رخدادهای نادر حاوی اطلاعات بسیار ارزشمندی است. در این میان تعیین میدان جابه‌جایی زمین‌لرزه‌های بزرگ در سرتاسر کره زمین برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل در برابر لرزه‌های آتی و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در مناطق لرزه‌خیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به فرضیات ارگودیک^۱ در محاسبات لرزه‌خیزی، استفاده از پارامترهای رفتاری گستره‌های جغرافیایی مختلف در سایر مناطق امکان‌پذیر است (Nicknam et al., 2017). نتایج این مطالعات در به‌روزرسانی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی لرزه‌ای بسیار مؤثر بوده و به ارزیابی دقیق‌تر خطر لرزه‌خیزی مناطق مختلف خصوصاً در حوزه نزدیک گسل کمک می‌کند.

روش‌های متعددی برای تعیین جابجایی سطحی نقاط زمین در اثر حوادث طبیعی و غیرطبیعی مختلف مثل زمین‌لرزه، فرونشست، زمین‌لغزش و... وجود دارد. در اکثر این روش‌ها - از جمله روش نقشه‌برداری کلاسیک یا روش‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای - با اندازه‌گیری متناوب مختصات تعداد محدودی نقطه در اطراف و یا بر روی سازه مورد نظر و یا در منطقه مورد مطالعه و مقایسه مختصات متوالی نقاط، بردار جابجایی برای این نقاط محدود بدست آمده و سپس، با انجام روش‌های درونیایی، میدان جابجایی برای سازه یا منطقه مورد نظر تعیین می‌شود (Emadali et al., 2017). از مزایای این روش‌ها می‌توان به دقت بالای آنها اشاره نمود؛ با اینحال، محدود بودن تعداد نقاط اندازه‌گیری شده و محدودیت‌های روش‌های زمینی به عنوان مشکلات این روش‌ها محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، روش‌های مبتنی بر تصویربرداری راداری ماهواره‌ای می‌توانند علاوه بر پوشش یک منطقه وسیع، امکان ارزیابی دقیق جابجایی برای تعداد نقاط بسیار زیادی را در بازه‌های زمانی چند روزه فراهم نمایند.

یکی از روش‌های تعیین جابجایی، روش تداخل سنجی

راداری تفاضلی با رادار روزنه ترکیبی (DInSAR)^۲ است. این روش امکان تحلیل دقیق تغییر شکل سطح زمین و شناسایی مناطق پرخطر را فراهم می‌کند، به گونه‌ای که پیش‌بینی بهتر رفتار سازه‌ها و زیرساخت‌ها در برابر زمین‌لرزه‌های بزرگ را امکان‌پذیر می‌سازد (Lanari et al., 2007). همچنین، تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور مانند InSAR امکان پایش سریع و دقیق خسارات ناشی از زلزله را فراهم می‌کنند که در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی برای بازسازی و امداد پس از وقوع زلزله بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Orellana et al., 2022). به کارگیری این فناوری‌های نوین، دانش فنی مهندسان را ارتقا داده و آن‌ها را قادر می‌سازد تا با تحلیل جامع‌تر خطرات لرزه‌ای، تصمیمات بهتری در طراحی و بهسازی سازه‌ها اتخاذ کنند (Li et al., 2023). زمین‌لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار (بزرگای ۷/۷ در مقیاس بزرگای گشتاوری (Mw)) یکی از ویران‌کننده‌ترین رویدادهای لرزه‌ای در تاریخ معاصر جنوب شرق آسیا محسوب می‌شود که می‌تواند اطلاعات بسیار ارزنده‌ای را در مورد تکنیک منطقه، ساز و کار گسل‌ها و پیامدهای ناشی از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ احتمالی در آینده ارائه دهد (مرادی طیبی و همکاران، ۱۳۹۹). این زمین‌لرزه که در عمق کم ۱۰ کیلومتری و نزدیک به مرز ساگاین - ماندالای^۳ رخ داد، خسارات فاجعه‌باری را در سراسر مرکز میانمار به بار آورد و اثرات آن به کشورهای همسایه از جمله تایلند نیز سرایت کرد. بر اساس مطالعات پیشین (شکل ۱) این منطقه پتانسیل تنش لرزه‌ای بالایی دارد (Xiong et al., 2017).

هدف اصلی این مطالعه، استفاده از داده‌های تداخل سنجی راداری (InSAR) سنجنده Sentinel-1 برای پایش دقیق تغییر شکل سطحی ناشی از زمین‌لرزه است. این فرایند شامل دریافت تصاویر راداری پیش و پس از وقوع زمین‌لرزه، تولید اینترفروگرام‌ها، و تحلیل الگوهای جابه‌جایی زمین در امتداد گسل ساگاین می‌شود. نتایج برای تعیین گستره گسیختگی، توزیع لغزش، و حداکثر جابه‌جایی به کار می‌رود و داده‌های ضروری برای ارزیابی خطر لرزه‌ای و پشتیبانی از اقدامات پاسخ

2 Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

3 Sagaing-Mandalay border

1 Ergodic assumptions

به فاجعه و بازسازی را فراهم می کند.

۲- منطقه مطالعاتی

۱-۲ جایگاه زمین ساختی و گسل فعال در

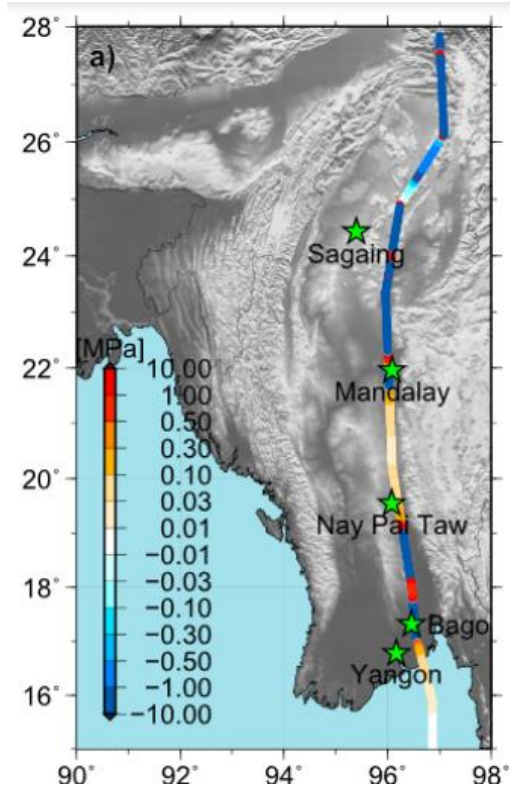
منطقه میانمار

گسل ساگاین^۱ با طول تقریبی حدود ۱۲۰۰ کیلومتر و در راستای شمالی- جنوبی امتداد داشته و از مرکز میانمار عبور می کند (شکل ۲). نتایج حاصل از پردازش مشاهدات شبکه ایستگاه های دائم GPS در مجاورت این گسل و در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۴ نشان داد که بخش شرقی این گسل با نرخ لغزش تقریبی ۳۲-۴۰ میلی متر در سال در جهت جنوب غربی حرکت می کند، در حالی که بخش غربی گسل با نرخ ۳۱-۳۵ میلی متر در سال در جهت شمال شرقی حرکت داشته است (Aung et al., 2016).

همچنین، بر اساس تحقیق انجام شده در سال ۲۰۲۲ مشخص گردید که نرخ لغزش برابر با ۲۳-۲۴ میلی متر در سال برای بخش مرکزی گسل و ۱۶ میلی متر در سال برای بخش جنوبی گسل ثبت گردیده است (Tin et al., 2022). این سامانه گسلی، تنش ناشی از مرز صفحه هند-سوندای را تفکیک نموده و تجمع تنش در آن منجر به آزادسازی دوره های انرژی از طریق زمین لرزه های بزرگ می شود. رخداد ۲۰۲۵ در بخشی از گسل رخ داد که پیش تر در مطالعات ژئودزی ماهواره ای به عنوان شکاف لرزه ای^۲ شناسایی شده بود. بررسی های دیرینه لرزه شناسی^۳ توسط وانگ و همکاران (2014) نشان داده اند که بازه زمانی تکرار زلزله های با بزرگای $M \leq 5.7$ در این گسل بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ سال است که با ویژگی های گسیختگی ۲۰۲۵ همخوانی دارد (Shiddiqi et al., 2018; Fadil et al., 2023).

۲-۲ زمین لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار

زمین لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار، خطر لرزه خیزی پایدار در امتداد گسل ساگاین را برجسته می سازد؛ این گسل دارای یک ساختار اصلی راستالغز^۴ است که همگرایی مورب بین صفحه هند و اوراسیا را



شکل ۱- تغییر در تنش لرزه ای در گسل ساگاین (XIONG و همکاران، ۲۰۱۷)

جذب می کند (Emadali et al., 2025; Zebker & Chen, 2001). سوابق تاریخی نشان می دهد که فعالیت های لرزه ای متعددی در این منطقه وجود داشته، از جمله زلزله های ۱۹۳۰ باگو^۵ (۳/۷M) و ۲۰۱۲ تابی کین^۶ (۸/۶M)، که ظرفیت گسل برای تولید لرزه های بزرگ را تأیید می کند (Funning & Garcia, 2019; Tiongson, 2022; Ramirez et al., 2021).

کانون این زمین لرزه در موقعیت ۲۲/۰۰۱° شمالی و ۹۵/۹۲۵° شرقی واقع شده است [USGS Earthquake, 2025]. زمین لرزه اصلی (با بزرگای گشتاوری ۷/۷) با چندین پس لرزه همراه بود که قوی ترین آنها بزرگایی معادل ۶/۴ داشت. زمین لرزه با عمق کانونی کم و مکانیسم راستالغز، باعث ایجاد ماکزیمم سرعت زمین (PGV) معادل ۱۲۰ سانتیمتر بر ثانیه در نزدیکی ماندالای شد. مدل سازی های انتقال تنش کولمب در سال های قبل از وقوع زلزله، افزایش خطر لرزه خیزی در بخش های مجاور گسل، به ویژه بخش شمالی گسل ساگاین نزدیک به بامو را نشان می دهد که با

5 Bago
6 Thabeikkyin

1 Sagaing Fault
2 seismic gap
3 paleo seismology
4 Strike-Slip fault



جدول ۱- مشخصات تصاویر Sentinel-1A مورد استفاده در این تحقیق

Sentinel-1A	Sentinel-1A	سنجنده
۲۰۲۵/۰۴/۰۳	۲۰۲۵/۰۳/۲۲	تاریخ اخذ تصویر
IW	IW	پرتو
SLC	SLC	نوع تصویر
صعودی (بالارونده)	صعودی (بالارونده)	حالت مداری ماهواره
۵۸۵۹۲	۵۸۴۱۷	شماره مدار
۴	۴	شماره تصویر
~ ۱۵۹°	~ ۱۵۹°	آزیموت مدار ماهواره
VV	VV	قطبش

۳- روش‌شناسی

در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 توسعه‌یافته توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) برای تعیین میدان جابجایی زمین‌لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار با تکنیک InSAR استفاده می‌شود. ماهواره‌های Sentinel-1 در مدارهای صعودی^۲ و نزولی^۳ عمل می‌کنند و تصاویر راداری از سطح زمین را با بازه‌های تکرار^۴ ۱۲ روزه (که با پرتاب ماهواره دوم به ۶ روز کاهش یافت) ثبت می‌نمایند. تصاویر راداری مورد استفاده، SLC^۵ هستند که در حالت (IW) اخذ شده‌اند. در این پژوهش، تصاویر سنجنده Sentinel-1A در مدار صعودی ماهواره با استفاده از نرم‌افزار SNAP، ابزاری متن‌باز توسعه‌یافته توسط ESA برای تحلیل داده‌های Sentinel پردازش شدند.

از آنجایی که جابجایی اندازه‌گیری شده توسط InSAR در امتداد خط دید ماهواره (LOS) می‌باشد، برای تعیین مؤلفه‌های جابجایی در راستای محورهای مختصات (dx, dy, dz) ، حداقل سه مشاهده از سه هندسه مستقل ماهواره لازم می‌باشد (Emadali & Motaghd, 2025). با این حال، با تنها دو مشاهده LOS (از مدارهای صعودی و نزولی)، یک مؤلفه - معمولاً مؤلفه شمالی - جنوبی که به دلیل مدار قطبی ماهواره از دقت کمتری برخوردار است - نادیده گرفته می‌شود (Emadali et al., 2024). به منظور اطمینان از مناسب بودن تصاویر برای تحلیل تداخل سنجی، میزان همدوسی بین جفت تصاویر محاسبه شد. مقدار همدوسی ۰/۹۸ می‌باشد

نظریه‌های اندرکنش تنش اشتاین و همکاران (1992) همخوانی دارد (Wang et al., 2022; Tiongsong & Ramirez, 2022).

در بعد تلفات انسانی، براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی تا ۷ آوریل، بیش از ۳۵۰۰ کشته و حدود ۵۰۰۰ زخمی تأیید شده و بیش از ۲۰۰ نفر نیز مفقود گزارش شده‌اند (WHO, 2025). بیش از ۱۰۰ هزار نفر از مناطق آسیب‌دیده در ماندالای و ساگاین مجبور به تخلیه محل سکونت خود شدند. زیرساخت‌های حیاتی از جمله بناهای مهم فرهنگی همچون پاگودای مهمانی در ماندالای و پل استراتژیک آوا در ساگاین دچار خسارات فاجعه‌بار شدند. حدود ۶۰ درصد از سازه‌های مسکونی در منطقه کانونی زلزله نابود شدند. برآوردهای اولیه خسارات را بین ۱۰ تا ۲۰ میلیارد دلار نشان می‌دهد، رقمی که از تولید ناخالص داخلی سالانه میانمار نیز فراتر می‌رود. اثرات لرزه‌ای در گستره حدود ۵۰۰,۰۰۰ کیلومتر مربع قابل احساس بود و لرزش آن تا تایلند، شمال شرق هند و جنوب غرب چین گزارش شد. حدود ۱۲۷ پس‌لرزه با بزرگای بیش از ۰/۴ در ۷۲ ساعت ثبت شده است؛ به ویژه یک پس‌لرزه قوی با بزرگای ۴/۶ که حدود ده دقیقه پس از زلزله اصلی رخ داد (Howard & Krishna, 2025). **مطالعات پیشین نیز چنین نیجی را ممکن دانسته بودند (Thin et al., 2009).**

۲-۳ داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از دو تصویر راداری سنجنده Sentinel-1A در حالت مداری بالارونده (صعودی) مربوط به قبل و بعد از وقوع زمین‌لرزه استفاده گردید. شکل ۲ محدوده اثر تصاویر مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هر تصویر سنجنده Sentinel-1 در مد تصویربرداری IW از سه نوار^۱ تشکیل شده است، برای پردازش باید یکی از این سه نوار - بسته به موقعیت جغرافیایی پدیده مورد مطالعه - انتخاب گردد. در این تحقیق، با توجه به حالت مداری بالارونده ماهواره، از نوار IW1 برای بررسی جابجایی‌های ناشی از زمین لرزه استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات تصاویر مورد استفاده در این تحقیق آمده است.

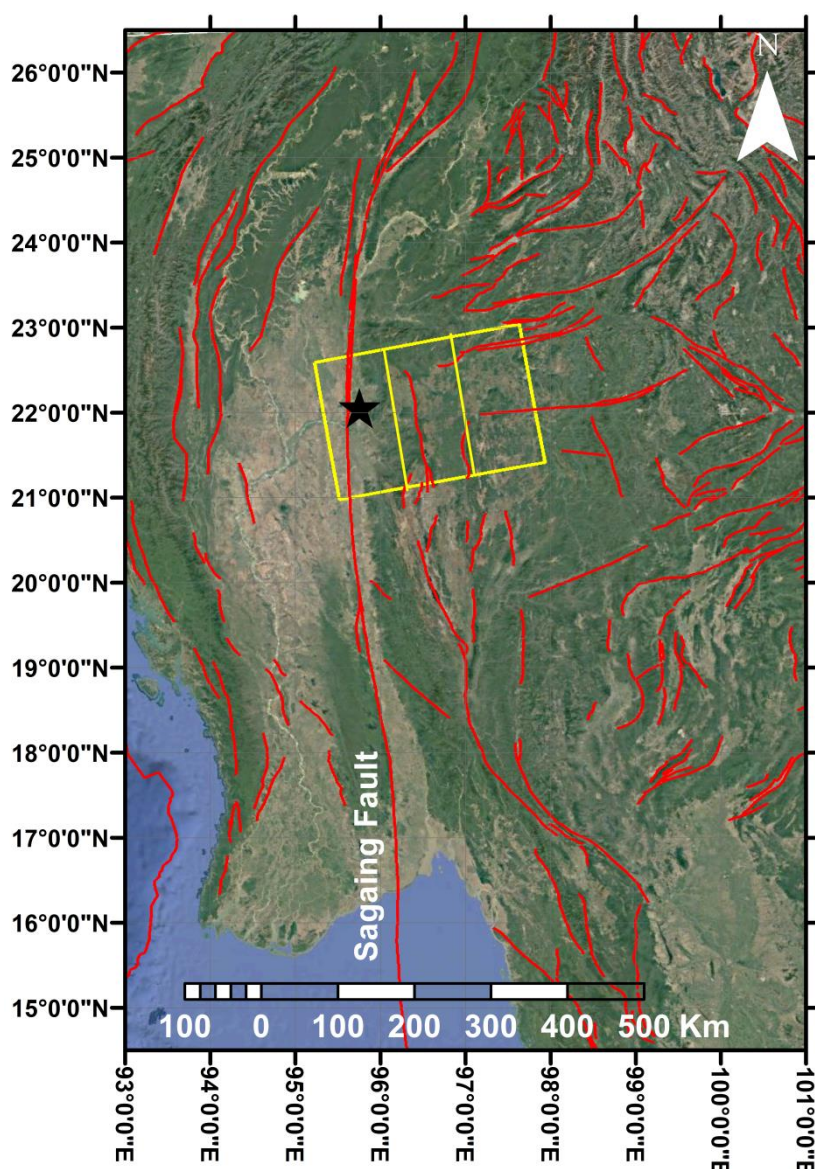
2 Ascending
3 Descending
4 Revisit Time
5 Single Look Complex

1 Swath

نصف طول موج سیگنال راداری سنجنده مورد استفاده $(\lambda/2)$ می‌باشد. برای تصاویر Sentinel-1 در باند C با طول موج ۵۶ میلی‌متر ($\lambda=56\text{ mm}$)، هر فرینج در اینترفروگرام نشان‌دهنده جابجایی به میزان ۲۸ میلی‌متر است. اختلاف فاز اندازه‌گیری شده (Φ_{Int}) شامل مؤلفه‌هایی از توپوگرافی، تغییر شکل، اثرات اتمسفر، خطاهای مدار ماهواره و نویز است:

$$\Phi_{Int} = \Phi_{Topo} + \Phi_{Def} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Orb} + \Phi_{Noise} \quad (1)$$

که نشان‌دهنده کیفیت بالای تصاویر برای سنجش جابجایی است (شکل ۳ b). پس از این مرحله، تصاویر هم‌مرجع‌سازی شدند تا هر پیکسل در دو تصویر به ویژگی زمینی یکسانی اشاره کند. با توجه به ویژگی مختلط تصاویر راداری - که دارای دامنه و فاز می‌باشند - با ضرب تصویر اول در مزدوج مختلط تصویر دوم اینترفروگرام‌ها تولید می‌شوند که امکان تخمین اختلاف فاز برای هر پیکسل را فراهم می‌کند. اینترفروگرام حاصل، جابجایی را به صورت طیف‌های رنگی (فرینج) نمایش می‌دهد که هر فرینج معادل



شکل ۲: تصویر منطقه مطالعاتی (میانمار): خطوط قرمز رنگ نشان‌دهنده گسل‌های موجود در منطقه می‌باشند. محدوده گسل Sagaing در راستای شمالی - جنوبی و با طول تقریبی ۱۲۰۰ کیلومتر در تصویر مشخص می‌باشد. مستطیل زرد رنگ نشان‌دهنده محدوده تصاویر Sentinel-1 در مدار صعودی ماهواره است. کادر مشخص شده با عبارت IW1 محدوده پردازش شده می‌باشد که نتایج آن در تصاویر بعدی مقاله آمده است. شیپ فایل نقشه گسل‌ها از سایت زیر اکتباس شده است:

<https://github.com/GEMScienceTools/gem-global-active-faults>

(۲) نشان‌دهنده بالاآمدگی^۵ است. این قرارداد علامت، تضاد تفسیر بین نقشه‌های فاز و نتایج جابجایی را رفع می‌کند. استفاده از تصویر دوم به عنوان مبنا این تناقض ظاهری را در تفسیر اینترفروگرام از بین می‌برد.

۴- آنالیز و بحث

بر اساس موارد اشاره شده در قسمت روش‌شناسی، پردازش تصاویر قبل و بعد از زمین‌لرزه با استفاده از نرم‌افزار SNAP و به روش DInSAR انجام پذیرفت. شکل ۳a اینترفروگرام حاصل از زمین‌لرزه میانمار را نشان می‌دهد. در تصویر اینترفروگرام، هر فرینج تغییرات فاز از $\pi - \pi + 2\pi$ را نشان می‌دهد. این تصویر الگوهای تغییر شکل زمین را نمایش می‌دهد، به‌طوری که هر طیف کامل رنگی (فرینج) معادل نصف طول موج جابجایی (تقریباً ۲۸ میلی‌متر) در امتداد خط دید ماهواره است. فرینج‌های هم‌مرکز یا نزدیک به هم، مناطق دارای تغییر شکل شدید، به‌ویژه نزدیک گسل (خط قرمز رنگ در شکل ۳a) را نشان می‌دهند.

رنگ‌ها بیانگر اختلاف فاز و جهت و مقدار حرکت زمین هستند. مناطق با فرینج‌های بیشتر، تغییر شکل بیشتری را نشان می‌دهند و رنگ‌های یکنواخت، حرکت کمتر را نمایان می‌سازند. این الگو به تجسم گستره مکانی و شدت اثر زمین‌لرزه بر سطح زمین کمک می‌کند.

شکل ۳b نقشه همدوسی پیکسل‌های متناظر دو تصویر تشکیل دهنده اینترفروگرام را نشان می‌دهد. در تصویر همدوسی، مناطق با رنگ روشن نشان‌دهنده همدوسی بالا و مناطق با رنگ تیره نشان‌دهنده همدوسی پایین مناطق می‌باشند. همانگونه که از نقشه مشخص می‌باشد، بیشترین میزان همدوسی در حدود ۰/۹۸ می‌باشد. مناطقی که در امتداد و مجاور گسل می‌باشند، با توجه به اینکه جابجایی بیشتری را تجربه می‌کنند، همدوسی پایین‌تری را نشان می‌دهند که این موضوع در تصویر به‌وضوح نمایان می‌باشد. مناطقی که در تصویر اینترفروگرام (شکل ۳a) دارای فرینج‌های بیشتر و متراکم‌تری می‌باشند، در نقشه همدوسی (شکل ۳b) با رنگ تیره مشخص شده‌اند.

برای تعیین مؤلفه فاز ناشی از تغییر شکل، سایر مؤلفه‌های فاز اینترفروگرام باید حذف شوند. به این منظور، فاز توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM^۱) با قدرت تفکیک مکانی ۳ ثانیه کمانی (۹۰ متر) از مدل SRTM حذف گردید. اثر خطای مداری با استفاده از اطلاعات دقیق مداری ماهواره در حین پردازش حذف می‌شود. مؤلفه فاز اتمسفری در نرم‌افزار SNAP و با استفاده از روش‌های فیلتر کردن حذف می‌گردد. برای کاهش نویز و افزایش وضوح فرینج‌ها از فیلتر گلد اشتاین استفاده گردید. پس از پردازش اولیه و تشکیل اینترفروگرام، از آنجایی که مقادیر فاز بین $[0, 2\pi]$ محدود شده‌اند، یکپارچه سازی فاز^۲ با استفاده از الگوریتم Snaphu (Chen & Zebker, 2001) انجام شد تا فاز کل جابجایی در بازه زمانی اخذ تصاویر به دست آید. این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل پردازش تصاویر در روش InSAR می‌باشد، زیرا فاز کلی بدست آمده ارتباط مستقیم با میزان جابجایی برآورد شده دارد. از این‌رو، در این مرحله می‌بایست دقت لازم در تعیین پارامترهای مورد استفاده در پردازش بعمل آید تا نتیجه مناسب حاصل گردد. فاز استخراج شده با استفاده از فرمول زیر به جابجایی در امتداد خط دید ماهواره تبدیل می‌شود:

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi_d \quad (2)$$

در این رابطه:

d : جابجایی در امتداد خط دید ماهواره (LOS) بین تصاویر پردازش‌شده،

$\Delta\phi_d$: اختلاف فاز باز شده^۳،

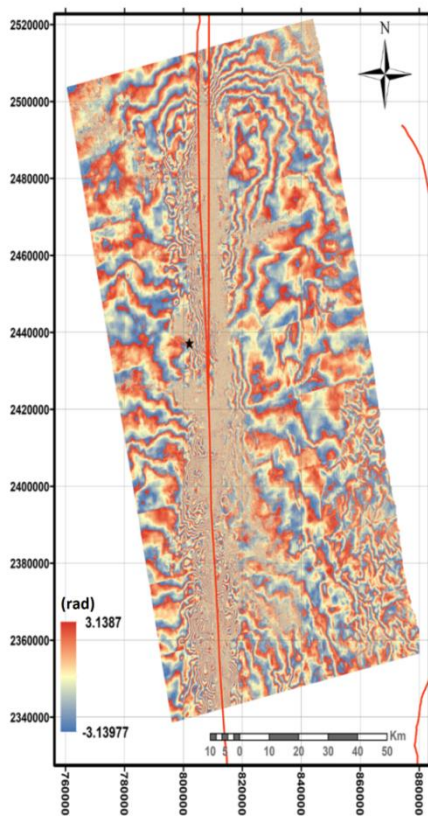
λ : طول موج سیگنال سنجنده Sentinel-1 در باند C طیف الکترومغناطیس می‌باشد.

تفسیر مقادیر مثبت و منفی فاز به انتخاب تصویر مبنا^۴ بستگی دارد. زمانی که تصویر اولیه به عنوان تصویر مبنا انتخاب می‌شود مقادیر فاز مثبت نشان‌دهنده فرونشست (حرکت هدف در راستای دور شدن از ماهواره) است و مقادیر جابجایی مثبت (به دلیل علامت منفی در معادله

1 Digital Elevation Model
2 Phase Unwrapping
3 unwrapped phase difference
4 Master

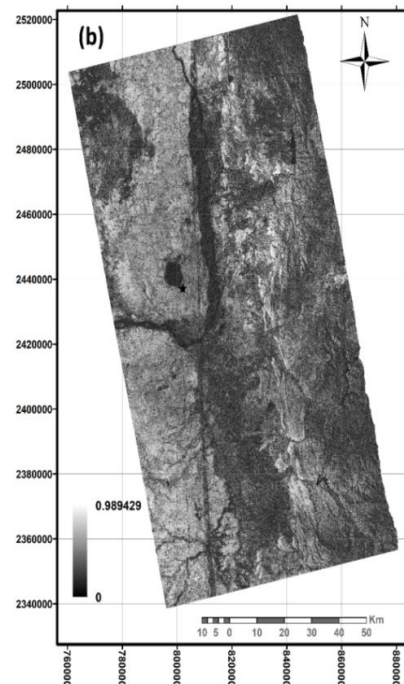
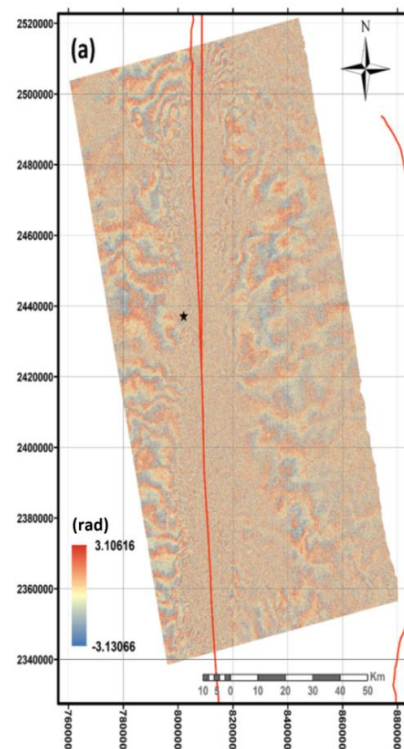
لازم به ذکر است که مختصات تمامی نقشه‌ها در سیستم تصویر UTM^۱ با شماره زون ۴۶^۲ و بیضوی مبنای WGS84^۳ محاسبه گردیده است.

چنانچه گفته شد، تراکم فرینج‌ها بیانگر شدت تغییر شکل است؛ فرینج‌های نزدیک به هم، تغییر شکل بیشتر را بیان می‌کنند. فرینج‌های متراکم، به‌ویژه در امتداد محور مرکزی گسل، نشان‌دهنده تغییر شکل قابل توجه (چندین سانتی‌متر) هستند. تغییر شکل تقریباً ۱۶۰ کیلومتر در امتداد خط گسل را پوشش می‌دهد و با دور شدن از خط گسل، میزان تراکم فرینج‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۴- اینترفروگرام صعودی ایجاد شده با تصاویر ۲۵ مارس و ۵ آوریل) در حالت $6 \times$ Multi-look (ML) (۲ با اعمال فیلتر گلد اشتاین)

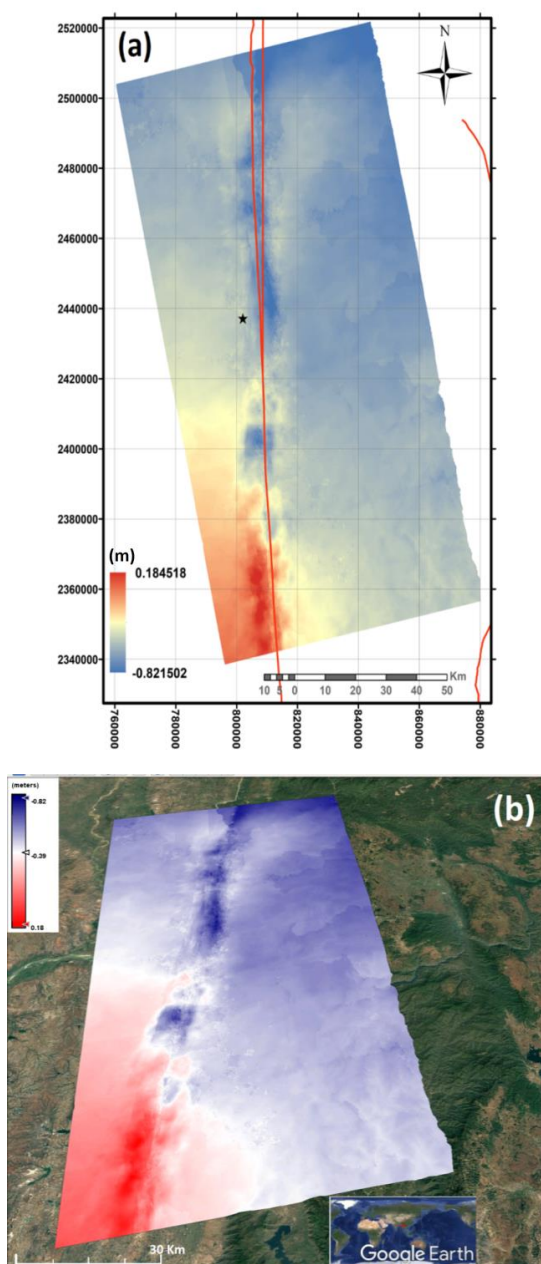
شکل ۴ اینترفروگرام Multi-Look منطقه زلزله میانمار را نشان می‌دهد. تکنیک Multi-Looking با میانگین‌گیری چند پیکسل مجاور در راستای آزیموت و راستای دید



شکل ۳- (a): اینترفروگرام حاصل از تصاویر سنجنده Sentinel-1 در مدار صعودی ماهواره مربوط به زمین لرزه میانمار (۲۸ مارس ۲۰۲۵)؛ خط قرمز رنگ راستای شمالی - جنوبی گسل Sagaing را نمایش می‌دهد؛ (b): میزان همدوسی بین پیکسل‌های متناظر دو تصویر تشکیل دهنده

1 Universal Transverse Mercator
2 Zone Number
3 World Geodetic System 1984

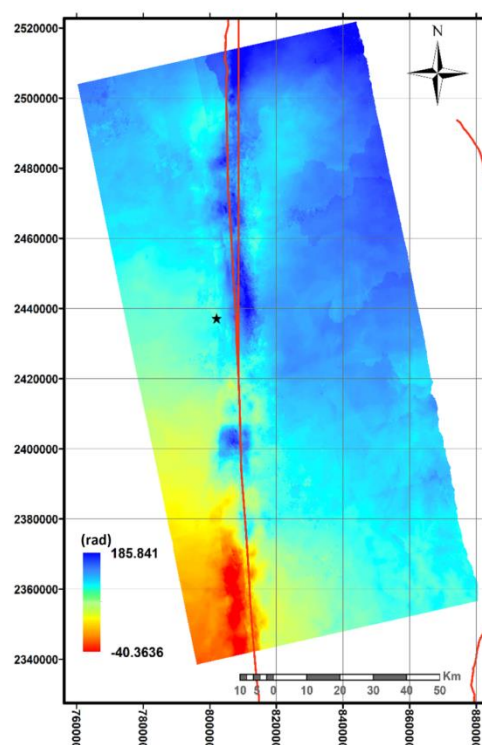
شکل سطح زمین را ارائه می‌دهد.



شکل ۶- (a): نقشه جابجایی سطحی اندازه‌گیری شده در راستای LOS ناشی از زمین‌لرزه ۲۸ مارس ۲۰۲۵، میانمار با بزرگای ۷.۷ در حالت مدار صعودی ماهواره؛ (b): نقشه جابجایی نمایش داده شده در محیط Google Earth؛ موقعیت محدوده مورد مطالعه در نقشه جهانی در پایین نقشه آمده است.

اینترفروگرام باز شده مقادیر فاز پیوسته را نشان می‌دهد که مستقیماً متناسب با جابجایی زمین در امتداد خط دید ماهواره است. بر اساس مقیاس رنگی راهنمای نقشه (شکل ۵)، دامنه جابجایی فاز از حدود -40.4π تا

ماهواره، میزان نویز را کاهش داده و الگوی تغییر شکل را شفاف‌تر می‌سازد. هر فرینج همچنان معادل نصف طول موج جابجایی در امتداد خط دید است. گذارهای رنگی نرم‌تر نسبت به اینترفروگرام SLC، روندهای تغییر شکل منطقه‌ای را بهتر آشکار می‌سازد. فرینج‌های متراکم، مناطق تغییر شکل شدید سطحی (احتمالاً نزدیک گسل) را نشان می‌دهند، در حالی که مناطق یکنواخت‌تر، پایداری منطقه را نشان می‌دهند.



شکل ۵- اینترفروگرام باز شده unwrapped در حالت مداری صعودی ماهواره

شکل ۵ اینترفروگرام تجمیع شده (unwrapped) منطقه وقوع زمین‌لرزه میانمار را نشان می‌دهد. برخلاف اینترفروگرام‌های پیچیده (wrapped) که چرخه‌های فاز مبهم در بازه $[\pi, \pi]$ هستند، این تصویر مقادیر فاز پیوسته را نمایش می‌دهد که مستقیماً متناسب با جابجایی زمین در امتداد خط دید ماهواره است. مقیاس رنگی مقدار تغییرات فاز کلی را نشان می‌دهد. این امر امکان ارزیابی کمی تغییر شکل را فراهم می‌کند و مناطق بالاآمدگی (مقادیر منفی) را از نشست (مقادیر مثبت) متمایز می‌سازد. نبود ابهام در فاز، تفسیر را ساده کرده و نقشه‌ای شفاف از توزیع مکانی و مقدار تغییر



185.8 π است. همانگونه که انتظار می‌رود، بیشترین گرا دیان‌ها در نزدیکی خط گسل مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تمرکز تغییر شکل می‌باشد.

شکل ۶ نقشه جابجایی زمین حاصل از زلزله میانمار در امتداد خط دید ماهواره را نشان می‌دهد. دامنه جابجایی ناشی از رخداد این زمین‌لرزه از حدود ۸۲- سانتیمتر تا ۱۸+ سانتیمتر متغیر است. بر اساس این نقشه، مناطق قرمز بالا آمدگی تا ۰/۱۸ متر و مناطق آبی نشست تا ۰/۸۲- متر را نشان می‌دهند. بیشترین نشست (۰/۸۲- متر) در مختصات جغرافیایی حدوداً ۲۲ درجه شمالی و ۹۶ درجه شرقی در نزدیکی مختصات رو مرکز زمین‌لرزه رخ داده است که امری طبیعی می‌باشد. در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه بیشتر بالا آمدگی مشاهده می‌شود، در حالی که در بخش جنوبی بیشتر پدیده فرونشست اتفاق افتاده است.

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل میدان جابجایی زمین‌لرزه‌ای مانند رویداد ۲۸ مارس ۲۰۲۵ میانمار با استفاده از تداخل سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های بزرگ توانایی ایجاد تغییر شکل‌های گسترده و قابل توجه در سطح زمین را دارا می‌باشند که مستقیماً بر رفتار سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری تأثیر می‌گذارند. نتایج این مشاهدات از چند جهت بسیار حائز اهمیت است. نخست آنکه، درک دقیق الگوهای جابه‌جایی و توزیع مکانی آن‌ها، امکان شناسایی مناطق پرخطر و آسیب‌پذیر را فراهم می‌سازد. این اطلاعات به کارشناسان کمک می‌کند تا در طراحی و اجرای سازه‌ها، پارامترهای مناسب برای تحمل تغییر شکل‌های ناشی از زلزله را به کار گیرند و از وقوع خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری کنند.

استفاده از داده‌های InSAR به‌منظور تعیین میدان جابجایی ناشی از زمین‌لرزه، به مهندسان کمک می‌کند تا با دقت بیشتری رفتار سازه‌ها را در برابر تغییر شکل‌های زمین مدلسازی کنند و سازه‌هایی طراحی شوند که قابلیت انعطاف و تغییر شکل بیشتری داشته و در برابر نیروهای زلزله، عملکرد بهتری از خود نشان دهند. این اطلاعات در تعیین پارامترهای

طراحی نظیر حداکثر جابجایی مجاز، ضریب رفتار و شکل‌پذیری سازه بسیار مؤثر است. همچنین، شناسایی مناطق با تمرکز جابجایی و تغییر شکل شدید، امکان اولویت‌بندی اقدامات مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های موجود را فراهم می‌کند.

نتایج حاصل از این پردازش نشان داد که گسل با طولی بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر توانایی ایجاد زمین‌لرزه‌های بزرگ را داشته و پیشینه لرزه خیزی گسل در منطقه نیز مؤید این مسأله می‌باشد. از آنجایی که با توجه به وسعت منطقه و طول گسل، امکان پایش مداوم حرکات لرزه‌ای گسل با روش‌های معمول زمینی وجود ندارد، بکارگیری روش‌های سنجش از دور مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای از جمله روش InSAR با استفاده از تصاویر راداری Sentinel-1 امکان بررسی این زمین‌لرزه را فراهم نمود. جابجایی اندازه‌گیری شده در این تحقیق - که بالغ بر ۸۲ سانتیمتر در راستای خط دید ماهواره می‌باشد - نشان از اهمیت پایش مداوم حرکات این گسل به منظور کاهش خطرات جانی و مالی ناشی از وقوع زمین‌لرزه‌های احتمالی بعدی دارد. میزان همدوسی بین دو تصویر مورد استفاده بالغ بر ۰/۹۸ است.

۶- منابع

عمادعلی، لطف اله، مهرپاک، مژگان، معتقد، ساسان، افتخاری، سید نصراله، تعیین مؤلفه‌های جابجایی ناشی از زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ شهرستان خوی (M5.9) با استفاده از روش تداخل سنجی راداری InSAR، چهارمین دوره کنفرانس ملی «مهندسی عمران، توسعه هوشمند و سیستم‌های پایدار» ۲۵ مهر ۱۴۰۳ - دانشگاه گلستان. <https://www.researchgate.net/publication/386021255>
مرادی طیبی، فریده، معتقد، ساسان و داستانیان، رضوان. (۱۳۹۹). ارزیابی رفتار آشوبی و پیش‌بینی سری‌های زمانی زمین‌لرزه‌های شهر تهران. مهندسی عمران مدرس، 20(3)، 147-160. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-15687-fa.html>

Bayramov, E., Buchroithner, M., Kada, M., &



- constraints on their seismogenic depth from a high-resolution regional focal mechanism catalog in Myanmar (2016–2021). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(2), 613-635. <https://doi.org/10.1785/0120220195>
- Funning, G. J., & Garcia, A. (2019). A systematic study of earthquake detectability using Sentinel-1 Interferometric Wide-Swath data. *Geophysical Journal International*, 216(1), 332-349. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy426>
- Howard, S., & Krishna, G. (2025). Myanmar junta blocking aid as earthquake death toll nears 3000. *BMJ: British Medical Journal (Online)*, 389, r657. <https://doi.org/10.1136/bmj.r657>
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., & Pepe, A. (2007). An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis. *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*, 637-661. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8417-3_2
- Li, J., Yan, Y., & Cai, J. (2023). LOS Deformation Correction Method for DInSAR in Mining Areas by Fusing Ground Data without Control Points. *Remote Sensing*, 15(19), 4862. <https://doi.org/10.3390/rs15194862>
- Nicknam A., Khanzadi M., Motagh S., Yazdani A. (2017) Applying b-value statistical variation to seismic hazard analysis, *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*: 46; 391-396. [https://nopr.niscares.in/bitstream/123456789/40768/1/IJMS%2046\(2\)%20391-396.pdf](https://nopr.niscares.in/bitstream/123456789/40768/1/IJMS%2046(2)%20391-396.pdf)
- Orellana, F., Moreno, M., & Yáñez, G. (2022). High-resolution focal mechanism solutions for the 2015 Mw 7.7 Myanmar earthquake. *Journal of Seismology*, 26(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-00988-8>
- Zhuniskenov, Y. (2021). Quantitative assessment of vertical and horizontal deformations derived by 3d and 2d decompositions of insar line-of-sight measurements to supplement industry surveillance programs in the tengiz oilfield (Kazakhstan). *Remote Sensing*, 13(13), 2579. <https://doi.org/10.3390/rs13132579>
- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2001). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms: erratum. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(5), 1192-1192. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.17.000401>
- Emadali, L., Mehrpak, M., Motagh S., Eftekhari, N., (2025), Determination of displacement components of Sisakht earthquake (M 5.4) by Radar Interferometry (InSAR), *Bulletin of Earthquake Science and Engineering – BESE* (in press), <https://doi.org/10.48303/bese.2025.2036596.1193>
- Emadali, L., Motagh, M., Haghshenas Haghighi, M. (2017), Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery; *Engineering Structures*, Volume 143, 15 July 2017, Pages 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.009>
- Emadali, L., Motagh S., Coseismic Displacement Field of the 28 March 2025 Myanmar Earthquake (Mw 7.7) Derived from InSAR, *Earthquake (2025) Volume 3 Issue 2* . <https://doi.org/10.59429/ear.v3i2.9744>
- Fadil, W., Wei, S., Bradley, K., Wang, Y., He, Y., Sandvol, E., ... & Htwe, Y. M. M. (2023). Active faults revealed and new

- 2025 Earthquake and Geological Factors Using Machine Learning. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.2354.v1>
- Xiong, X., Shan, B., Zhou, Y. M., Wei, S. J., Li, Y. D., Wang, R. J., & Zheng, Y. (2017). Coulomb stress transfer and accumulation on the Sagaing Fault, Myanmar, over the past 110 years and its implications for seismic hazard. *Geophysical Research Letters*, 44(10), 4781-4789. [doi:10.1002/2017GL072770](https://doi.org/10.1002/2017GL072770).
- Resolution Deformation Monitoring from DInSAR: Implications for Geohazards and Ground Stability in the Metropolitan Area of Santiago, Chile. *Remote Sensing*, 14(23), 6115. <https://doi.org/10.3390/rs14236115>
- Shiddiqi, H. A., Tun, P. P., Kyaw, T. L., & Ottemöller, L. (2018). Source study of the 24 August 2016 Mw 6.8 Chauk, Myanmar, earthquake. *Seismological Research Letters*, 89(5), 1773-1785. <https://doi.org/10.1785/0220170278>
- Tiongson, S. F., & Ramirez, R. (2022). Mapping of ground surface deformations and its associated damage using SAR interferometry: a case study of the 2020 Masbate earthquake. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 347, p. 03014). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234703014>
- Thein, M., Myint, T., Tun, S. T., & Swe, T. L. (2009). Earthquake and tsunami hazard in Myanmar. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 3(02), 43-57. <https://doi.org/10.1142/S1793431109000482>
- USGS Earthquakes (2025) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>
- Wang, Y., Sieh, K., Tun, S. T., Lai, K. Y., & Myint, T. (2014). Active tectonics and earthquake potential of the Myanmar region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4), 3767-3822. <https://doi.org/10.1002/2013JB010762>
- WHO (2025): Sagaing Earthquake in Myanmar: Situation Report - 5th Edition; 08 April 2025. <https://www.who.int/southeastasia/internal-publications-detail/who-mmreq-Srep2805258>
- Wibowo, A. (2025). Modeling Potential Earthquake Risk Zones in Myanmar Due to the March