

Evaluation of seismic migration process before volcanic eruption using modified SARA method

Rasaneh, Gh.¹  | Hajian, A. R.²  | Hodhodi, M.²  | Kimiaefar, R.² 

1. Department of Physics, Fal.c., Islamic Azad University, Esfahan, Iran.

2. Department of Physics, Na.c., Islamic Azad University, Esfahan, Iran.

Corresponding Author E-mail: Gh.Rasaneh@iau.ac.ir

(Received: 24 Feb 2025, Revised: 24 May 2025, Accepted: 29 July 2025, Published online: 20 Sep 2025)

Summary

Volcanic eruptions represent significant natural hazards, posing considerable risks to both the environment and human populations. Accurate prediction of these events remains a complex challenge due to the inherent intricacies of volcanic systems and the uncertainties inherent in their monitoring data. Traditional methods for analyzing seismic activity often necessitate the identification of seismic phases, a process that can be both time-intensive and subject to interpretation errors.

This study presents an advanced approach to the seismic monitoring utilizing Seismic Amplitude Ratio Analysis (SARA), a technique designed to infer seismic activity patterns through the examination of amplitude variations in continuous seismic data recorded across a network of stations. SARA obviates the requirement for phase identification, thereby enhancing the efficiency of volcanic activity monitoring. However, a primary limitation of SARA lies in its reliance on visual and qualitative assessment for determining the onset time and trends of amplitude ratio changes, potentially compromising precision, particularly in cases of subtle variations or low signal-to-noise ratios. To mitigate the effects of these limitations, an enhanced methodology termed Automatic Seismic Amplitude Ratio Analysis (ASARA) has been introduced. This approach leverages a time series of amplitude ratios from all station pairs and incorporates Seasonal Trend Decomposition using Loess (STL) to establish an automated anomaly detection system. ASARA offers the capability to automatically identify the onset time of changes in seismic amplitude ratios and the frequency of these anomalies, thus providing a more robust and quantitative analytical framework. A sudden increase in seismic amplitude ratios across multiple stations suggests a shift in the location of the seismic source and the migratory behavior of seismicity, which can serve as a precursor to volcanic eruptions. This method was applied to seismic data acquired from Mount Etna over a five-year period. Through the analysis of observed anomalies in amplitude ratios, the patterns of seismic activity were successfully identified and the magma migration pathway leading up to an eruption was traced. Findings indicate that an increase in seismic amplitude ratios at specific frequencies is strongly correlated with the movement of magma and the increase in pressure within the volcanic system. These changes were interpreted as evidence of seismic migration toward the surface, indicative of impending volcanic activity. Furthermore, our analyses demonstrate that the refined ASARA method exhibits a high degree of effectiveness in detecting early warning signs of volcanic unrest and forecasting the potential timing of eruptions. This study underscores the potential of ASARA as a valuable tool for enhancing the accuracy and reliability of volcanic eruption forecasts. By automating the detection of seismic anomalies and providing quantitative insights into magma dynamics, ASARA represents a significant advancement in volcanic monitoring and hazard mitigation efforts.

The evaluation results using error metrics including mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and coefficient of determination (R²) show that the accuracy of the modified model is improved compared to the original model. Finally, a modified model was introduced to evaluate the pre-eruption seismic migration process for continuous monitoring and surveillance of volcanoes. Considering its advantages and results, this model can serve as a suitable alternative approach, especially in volcanic environments with sparse seismic station distribution, where conventional monitoring infrastructure is limited (Rasaneh et al., 2022).

Keywords: Volcano eruption, Seismic migration, Seismic Amplitude Ratio Analysis method, Seasonal Trend Decomposition using Loess (STL).

Cite this article: Rasaneh, Gh., Hajian, A. R., Hodhodi, M., & Kimiaefar, R. (2025). Evaluation of seismic migration process before volcanic eruption using modified SARA method. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 339-352. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.390333.1007669>

E-mail: (2) dralirezahajian@gmail.com | hodhodil355@gmail.com | kimiaefar@gmail.com



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.390333.1007669>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

ارزیابی روند مهاجرت لرزه‌ای قبل از فوران آتشفشان با استفاده از روش اصلاح شده SARA

غزاله رسانه^۱ ✉ | علیرضا حاجیان^۱ | مریم هدهدی^۱ | روح الله کیمیایی^{فر}

۱. گروه فیزیک، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. گروه فیزیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: Gh.Rasaneh@iaau.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۶، بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۵/۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

چکیده

فوران‌های آتشفشانی یکی از پدیده‌های طبیعی و خطرناک هستند. پیش‌بینی این فوران‌ها، به‌دلیل پیچیدگی‌های ذاتی فعالیت آنها و نیز عدم قطعیت موجود در داده‌ها، چالش‌برانگیز است. اگرچه با استفاده از روش تحلیل نسبت دامنه امواج لرزه‌ای می‌توان روند مهاجرت ماگما را با استناد به تحلیل پیوسته داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مختلف شبکه، تشخیص داد، ولی همچنان تشخیص بصری و کیفی زمان شروع ناهنجاری‌ها، یکی از محدودیت‌های این روش می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از الگوریتم تشخیص زمان شروع ناهنجاری بر مبنای تحلیل تجزیه روند فصلی، روش تعمیم‌یافته‌ای معرفی شده است که این الگوریتم خودکار می‌تواند زمان شروع تغییرات در نسبت دامنه‌های لرزه‌ای و همچنین فراوانی این ناهنجاری‌ها را به‌عنوان پیش‌نشانگری برای وقوع فوران تعیین کند. در این تحقیق، روش اصلاح‌شده بر روی داده‌های لرزه‌ای آتشفشان اتنا در یک بازه زمانی ۵ ساله، آزمایش شد و الگوی فعالیت‌های لرزه‌ای قبل از وقوع فوران‌ها با موفقیت شناسایی شد. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که عملکرد مدل اصلاح‌شده بر اساس معیارهای خطای میانگین مربعات، جذر میانگین مربعات، میانگین قدرمطلق خطا، نسبت به مدل اولیه بهبود یافته است و افزایش ۳۰ درصدی در ضریب تشخیص R^2 نیز نشانه قدرت برآزش بالای مدل معرفی شده می‌باشد. با توجه به سرعت و کارایی این روش و عدم نیاز آن به ابزارهای پیچیده، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی باشد.

واژه‌های کلیدی: فوران آتشفشان، مهاجرت لرزه‌ای، تجزیه روند فصلی، تحلیل نسبت دامنه امواج لرزه‌ای.

۱. مقدمه

۲۰۱۹؛ مانلی و همکاران، ۲۰۲۰؛ فاریاس و همکاران، ۲۰۲۳؛ کابرا و همکاران، ۲۰۲۴)، مشاهدات گازهای آتشفشانی (آلارد و همکاران، ۱۹۹۱؛ چویدینی و همکاران، ۱۹۹۸؛ همندز و همکاران، ۲۰۰۱؛ نوستو و همکاران، ۲۰۰۶؛ کیل، ۲۰۱۸؛ بونو و همکاران، ۲۰۲۲؛ پرز و همکاران، ۲۰۲۴)، تغییرات حرارتی (سونگ و همکاران، ۲۰۰۰؛ فو و ریچ، ۲۰۰۲؛ ریتز و همکاران، ۲۰۰۶؛ گاناس و همکاران، ۲۰۱۰؛ کوپر و کنت، ۲۰۱۴؛ اسکندری و همکاران، ۲۰۱۸؛ پو و همکاران، ۲۰۲۰؛ چان و همکاران، ۲۰۲۳) و تغییرات زمین‌شناختی (فرانکات و چلاپا، ۱۹۹۰؛ توتین و گری، ۲۰۰۰؛ توردرسن و سلف، ۲۰۰۳؛ جاکویت و همکاران، ۲۰۰۵؛ مارزوکی و همکاران، ۲۰۰۸؛ گارماندن و

فوران‌های آتشفشانی یکی از پدیده‌های طبیعی و ویرانگر هستند که تأثیرات عمیقی بر محیط‌زیست، جامعه و اقتصاد منطقه‌ای و جهانی دارند. همچنین، پیش‌بینی دقیق این فوران‌ها می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از آنها و بهبود آمادگی و واکنش جامعه کمک کند. با توجه به اهمیت این مسئله، پژوهشگران به دنبال روش‌های نوین و مؤثری برای پیش‌بینی و شناسایی پیش‌نشانه‌های فوران هستند.

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی فعالیت‌های آتشفشانی به کار گرفته شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به تحلیل داده‌های لرزه‌نگاری (تکارن، ۱۹۶۳؛ شیروکو و زوبین، ۱۹۶۸؛ اندو و موری، ۱۹۹۱؛ منگا و برداسکای، ۲۰۰۶؛ ریچاردسون و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرانکو و همکاران،

استناد: رسانه، غزاله؛ حاجیان، علیرضا؛ هدهدی، مریم و کیمیایی، فر، روح الله (۱۴۰۴). ارزیابی روند مهاجرت لرزه‌ای قبل از فوران آتشفشان با استفاده از روش اصلاح‌شده SARA.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱(۲)، ۳۳۹-۳۵۲. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.390333.1007669>

رایانامه: (۲) kimiaefar@gmail.com | hodhodi1355@gmail.com | dralirezahajian@gmail.com



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.390333.1007669>

شکاف‌های فوران ارائه کردند.

این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی برای مکان‌یابی سیگنال‌های لرزه‌ای و پیش‌بینی مسیر حرکت ماگما، قبل از فوران بسیاری از آتشفشان‌ها استفاده شد (کوماگای و همکاران، ۲۰۱۳؛ ایبل و همکاران، ۲۰۱۴؛ اوگیسو و یوموگیدا، ۲۰۱۵؛ کوردون و همکاران، ۲۰۱۵؛ کوروکاو و همکاران، ۲۰۱۶؛ موریکا و همکاران، ۲۰۱۷؛ والش و همکاران ۲۰۱۷).

تان و همکاران (۲۰۱۹) این روش را توسعه داده و روش اصلاح‌شده را تحت عنوان Red Flag SARA معرفی کردند که یک ابزار کمی برای تجزیه و تحلیل نسبت‌های دامنه بین ایستگاه‌ها در یک شبکه و تشخیص تغییرات زمانی در این نسبت‌ها ارائه داد که برای بحران‌های آتشفشانی در زمان‌های واقعی قابل استفاده است.

رسانه و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از آزمون من کندال، یک شاخص عددی برای تغییرات نسبت دامنه‌ها در روش SARA ارائه دادند و توانستند با توجه به میزان ناهنجاری در نسبت دامنه‌ها و تعداد ایستگاه‌هایی که این ناهنجاری‌ها را نشان می‌دهد، روند مهاجرت لرزه‌ای و به تبع آن مسیر حرکت ماگما قبل از فوران ۱۳ می ۲۰۰۸ آتشفشان اتنا در ایتالیا را به‌درستی مشخص کنند.

با وجود تلاش‌هایی که برای توسعه این روش صورت گرفته است، همچنان تشخیص دقیق زمان شروع ناهنجاری‌ها در نسبت دامنه‌های لرزه‌ای و همچنین فراوانی آنها در ایستگاه‌های مختلف در زمان واقعی، از چالش‌های این روش می‌باشد. در این مطالعه یک نسخه اصلاح‌شده و اتوماتیک از روش SARA را معرفی کرده ایم که با تلفیق این روش با تجزیه روند فصلی با استفاده از تابع STL، یک سیستم خودکار تشخیص ناهنجاری و هشدار زود هنگام فوران را ارائه می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی این مدل از داده‌های پنج‌ساله آتشفشان اتنا استفاده شده است و زمان شروع و فراوانی تغییرات ناگهانی در نسبت دامنه‌ها برای چندین فوران مختلف در این بازه زمانی به‌صورت خودکار تعیین شد و به‌عنوان پیش‌نشانگر فوران در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بین شروع ناهنجاری‌ها در نسبت دامنه‌های لرزه‌ای قبل از فوران

همکاران، ۲۰۱۲؛ کپولا و همکاران، ۲۰۱۵؛ هاول و همکاران، ۲۰۱۹؛ انگارینا و همکاران، ۲۰۲۲) اشاره کرد. یکی از رویکردهای نوین که در سال‌های اخیر توجه زیادی را جلب کرده است، استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های آماری برای تحلیل داده‌های لرزه‌ای در محیط‌های آتشفشانی می‌باشد (حاجیان و همکاران ۲۰۲۳). در این راستا، روش SARA به‌عنوان یک ابزار تحلیل لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد فعالیت‌های لرزه‌ای آتشفشان‌ها ارائه دهد. استفاده از تحلیل نسبت دامنه‌های لرزه‌ای، اولین بار توسط نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۷۱) پیشنهاد شد و با استفاده از منحنی‌های نسبت حداکثر دامنه به حداقل دامنه (HVSr Horizontal to Vertical Spectral Ratio) فرکانس‌های خاص و ویژگی‌های ساختاری زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. ناکامورا (۱۹۸۹)، این روش را توسعه داد و به نام روش ناکامورا معرفی کرد که تکنیکی برای تخمین فرکانس تشدید و تقویت حرکات زمین بود و به‌طور سنتی برای محاسبه نسبت‌های H/V از نویز محیطی زمین استفاده می‌کرد. این روش به ثبت نویز محیطی از طریق اندازه‌گیری امواج زلزله در سه مؤلفه عمود بر هم می‌پرداخت.

بعدها این روش با تغییراتی برای مکان‌یابی منبع زلزله نیز استفاده شد. مکان‌یابی منبع دامنه در اصل توسط باتاگلیا و اکی (۲۰۰۳) برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی برای مکان‌یابی زلزله پیشنهاد شد. روش پیشنهادی آنها بر خلاف روش‌های قدیمی، برای تعیین محل یک منبع لرزه‌ای به ورودی‌های امواج P و S متکی نبود. این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی برای مکان‌یابی سیگنال‌های آتشفشانی - لرزه‌ای مختلف نیز استفاده شد. برای اولین بار باتاگلیا و همکاران (۲۰۰۵) از این روش برای ردیابی مهاجرت زیر سطحی ماگما برای آتشفشان پیتون در فرانسه استفاده کردند و نتایج موفقیت‌آمیزی به‌دست آوردند.

تایسن و همکاران (۲۰۱۱)، این روش را به اختصار SARA (Seismic Amplitude Ratio Analysis) نامیدند و آن را به‌عنوان یک روش لرزه‌ای جدید برای تصویربرداری در زمان واقعی از دینامیک انتشار ماگما و استنباط موقعیت

آتشفشان‌ها و احتمال وقوع فوران رابطه نزدیکی وجود دارد.

هدف اصلی این پژوهش، بهبود دقت و کارایی این روش با استفاده خودکار سازی آن در تشخیص ناهنجاری‌های نسبت دامنه امواج لرزه‌ای می‌باشد. همچنین، به بررسی چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از این روش خواهیم پرداخت و پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد آن ارائه خواهیم کرد.

۲. محاسبه نسبت دامنه‌های لرزه‌ای با استفاده از روش SARA

در این بخش تجزیه و تحلیل نسبت دامنه‌ها با استفاده از روش SARA، به عنوان یک ابزار مفید برای شناسایی و مکان‌یابی رویدادهای لرزه‌ای مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی، معرفی می‌شود. در این روش پس از جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها، سیگنال‌های فعال که مرتبط با فعالیت آتشفشان هستند توسط نرم‌افزار شناسایی می‌شوند و نسبت طیف دامنه‌های لرزه‌ای برای سیگنال‌های شناسایی شده و جفت ایستگاه‌های مناسب، محاسبه و در بازه زمانی مورد مطالعه رسم می‌شود. نسبت دامنه امواج لرزه‌ای در این روش با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$I_i = I_0 \frac{e^{-Br_i}}{r_n^i} \quad (1)$$

$$I_i = I_0 \frac{e^{-Br_i}}{r_n^i} \quad (2)$$

که در آن I_i شدت لرزه‌ای ثبت شده در گیرنده i است، r_i فاصله از منبع، I_0 شدت لرزه تابش شده منبع، f فرکانس، β سرعت موج برشی و Q ضریب کیفیت برای میرایی است. شاخص $n=1$ را برای امواج حجمی و $n=0.5$ را برای امواج سطحی در نظر می‌گیریم. همچنین فرض می‌کنیم که الگوی تابش امواج سطحی در فرکانس‌های بالاتر از یک هرتز ایزوتروپیک است.

با توجه به این که مبنای این روش بر محاسبه نسبت دامنه‌های لرزه‌ای جفت ایستگاه‌ها می‌باشد و مقادیر مطلق شدت دامنه‌های هر ایستگاه را به طور مطلق محاسبه نمی‌کند در نهایت می‌توان برای محاسبات سری زمانی نسبت دامنه‌های

لرزه‌ای از معادله (۳) استفاده کرد:

$$\frac{I_i}{I_j} = \left(\frac{r_i}{r_j}\right)^n \exp [-B(r_i - r_j)] \quad (3)$$

از آنجا که از جفت ایستگاه‌های مستقل استفاده می‌کنیم میرایی در مقیاس زمانی دوره‌های ازدحام لرزه‌ای کوتاه قبل از فوران نسبتاً پایدار می‌ماند، هرگونه تغییر در نسبت‌های دامنه را باید به تغییر مکان و مهاجرت منبع لرزه‌ای نسبت داد، که در نهایت به تنش اشاره می‌کند.

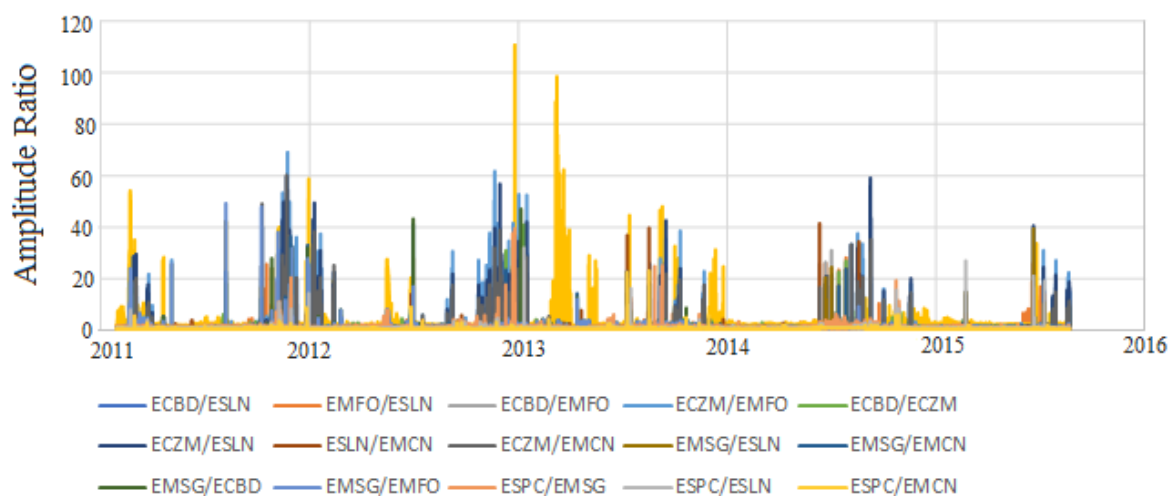
۳. مجموعه داده و روش پردازش

در این مطالعه، از داده‌های پیوسته نوفه‌های لرزه‌ای آتشفشانی ۱۵ ایستگاه لرزه‌ای در بازه زمانی ۱ ژانویه ۲۰۱۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۵ استفاده شده است. این داده‌ها، به طور معمول در ایستگاه‌های لرزه‌ای اطراف آتشفشان اتنا توسط مؤسسه ملی ژئوفیزیک و آتشفشان‌شناسی ایتالیا (INGV)، ثبت می‌شوند. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در نظر گرفته شده، در جدول ۱ گزارش شده است.

مراحل آماده‌سازی و پردازش داده‌ها توسط بسته نرم‌افزار MSNoise انجام شده است (لکوک و همکاران، ۲۰۱۴). در ابتدا مؤلفه‌های قائم داده‌های ۲۴ ساعته جمع‌آوری شده و در نرم‌افزار فراخوانی شده‌اند. لازم به ذکر است در هنگام فراخوانی در نرم‌افزار علاوه بر حذف اتوماتیک میانگین، نگاشت‌ها به صورت تدریجی قطع می‌شوند. سپس داده‌ها با توجه به فرکانس نمونه‌برداری، کاهش نمونه داده شده و فیلتر میان‌گذر در بازه ۰/۵ تا ۵/۵ هرتز بر روی آنها اعمال شده است. دلیل انتخاب این محدوده فرکانسی این است که طبق مطالعات انجام شده، این بازه فرکانسی بخش اصلی انرژی لرزه‌ای آزاد شده را شامل می‌شود (نوناری، ۲۰۲۱). سپس بهنجار سازی با روش جذر میانگین مربعات انجام شد و داده‌ها در فرکانس ۰/۱ تا ۵ هرتز سفید شدند. پس از آماده‌سازی و پردازش داده‌ها، با استفاده از روش SARA، نسبت طیف دامنه تمام جفت ایستگاه‌ها محاسبه و نمودار آنها نسبت به زمان رسم شد (شکل ۱).

جدول ۱. شناسه و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده در این مطالعه.

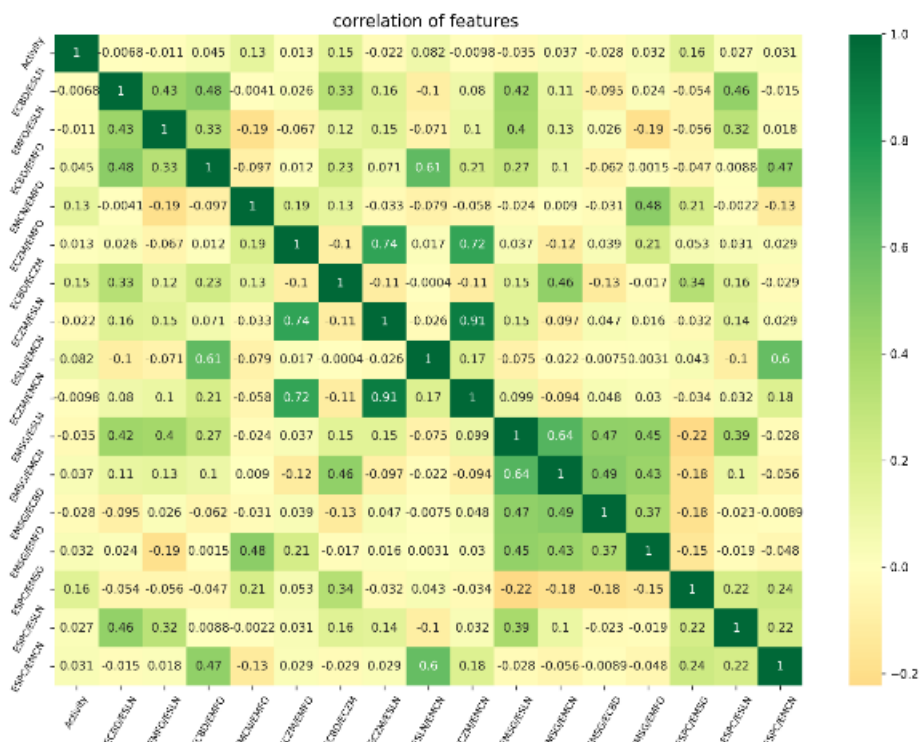
نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع	موقعیت مکانی
ECNE	۳۷/۷۶۵۳	۱۵/۰۰۱۸	۲۹۴۶	Etna Cratere Nord Est
ECBD	۳۷/۷۸۰۲	۱۵/۰۸۶۵	۱۴۶۵	Etna Case Bada
ECZM	۳۷/۷۳۱۳	۱۴/۹۰۴۱	۱۳۹۱	Etna Case Zampini
ECPN	۳۷/۷۴۳۷	۱۴/۹۸۶۵	۳۰۳۸	Etna Cratere del Piano
EMCN	۳۷/۷۹۱۲	۱۵/۰۳۳۶	۱۹۱۶	Monte Conca
EMFO	۳۷/۷۳۵۷	۱۵/۰۹۰۲	۱۲۰۹	Etna Monte Fontane
EMFS	۳۷/۷۱۹۶	۱۴/۹۹۷۹	۲۵۵۲	Etna Monte Frumento
EMNR	۳۷/۶۱۶۸	۱۵/۰۲۶۰	۱۸۴۵	Etna Monte Nero
EMPL	۳۷/۶۷۹	۱۴/۹۷۰۳	۱۴۸۴	Etna Monte Parmentelli
EMSG	۳۷/۸۲۰۸	۱۴/۹۴۹۸	۱۴۳۵	Etna Monte Spagnolo
EPDN	۳۷/۷۶۵۹	۱۵/۰۱۶۸	۲۸۶۲	Etna Pizzi Deneri
EPIT	۳۷/۸۱۱۳	۱۵/۰۵۶۷	۱۶۵۷	Etna Pozzo Pitarrone
ESLN	۳۷/۶۹۳۴	۱۴/۹۷۴۴	۱۷۸۷	Etna Serra La Nave
ESPC	۳۷/۶۹۲۵	۱۵/۰۲۷۴	۱۶۵۵	Etna Serra Pizzuta Calvarina
ESVO	۳۷/۷۷۳۱	۱۴/۹۴۶۹	۱۷۳۶	Etna Monte Scavo



شکل ۱. نسبت دامنه‌های امواج لرزه‌ای ۱۵ جفت ایستگاه در محیط آتشفشانی اتنا که توسط روش SARA محاسبه و رسم شده است.

داده‌ها اعمال شده است. سپس برای انتخاب جفت ایستگاه‌های مناسب، وابستگی داده‌ها به ستون فعالیت آتشفشان محاسبه و رسم شده است (شکل ۲). شبکه جفت ایستگاه‌هایی را که بیشترین وابستگی را به ستون فعالیت آتشفشان دارند، به‌طور خودکار به‌عنوان جفت ایستگاه مناسب انتخاب می‌کند.

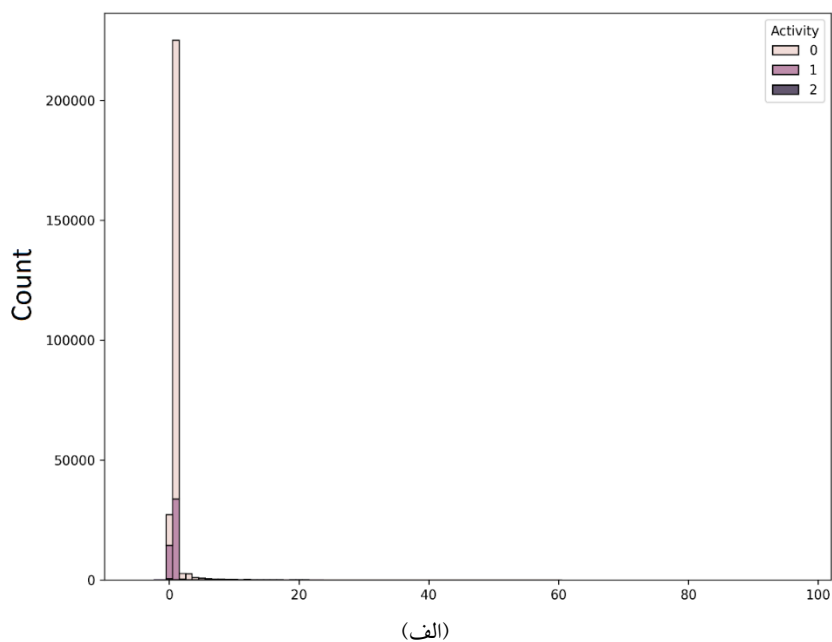
به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات صورت گرفته در نسبت دامنه‌ها، یکی از جفت ایستگاه‌ها انتخاب و ادامه روند بر روی داده‌های آن انجام شده است. برای پیدا کردن ایستگاه‌های مناسب و تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا سری‌زمانی نسبت دامنه‌ها ایستا شده، به این صورت که عملگر میانگین متحرک با ضریب فاصله شش، بر روی

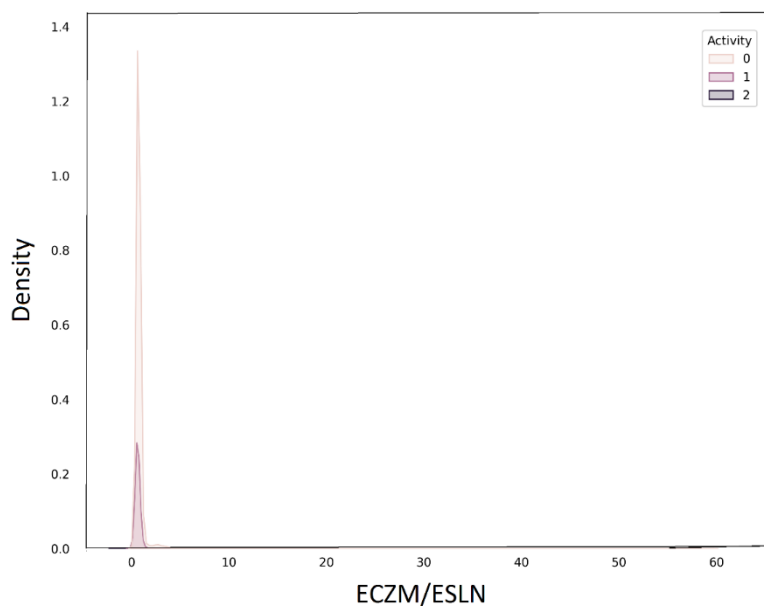


شکل ۲. بررسی وابستگی و شباهت داده‌ها. داده‌هایی که همبستگی نزدیک به یک یا منفی یک دارند، بیشترین شباهت را دارند و هر چه این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، وابستگی داده‌ها کمتر است.

شکل مشهود است، توزیع داده‌ها نرمال نیست و بیشترین توزیع فعالیت آتشفشان در بین داده‌های این جفت ایستگاه، در رنج نسبت دامنه‌های نزدیک به یک قرار دارد که مربوط به حالت خاموش آتشفشان است و برای نسبت دامنه‌های بیش از ۱۰ عموماً فوران نوع ۱ (استرومبولی) و نوع ۲ (پاروکسیم) اتفاق افتاده است.

در این مرحله، برای بررسی نحوه توزیع فعالیت آتشفشان بین داده‌ها، از نمودار هیستوگرام استفاده شده است. تابع توزیع چگالی احتمال نیز روی نمودار هیستوگرام برآزش شده و دید بهتری در اختیار قرار می‌دهد. نمودار هیستوگرام و منحنی تابع توزیع احتمال یکی از جفت ایستگاه‌ها، به‌عنوان نمونه، در شکل ۳ آمده است. همان‌طور که در





(ب)

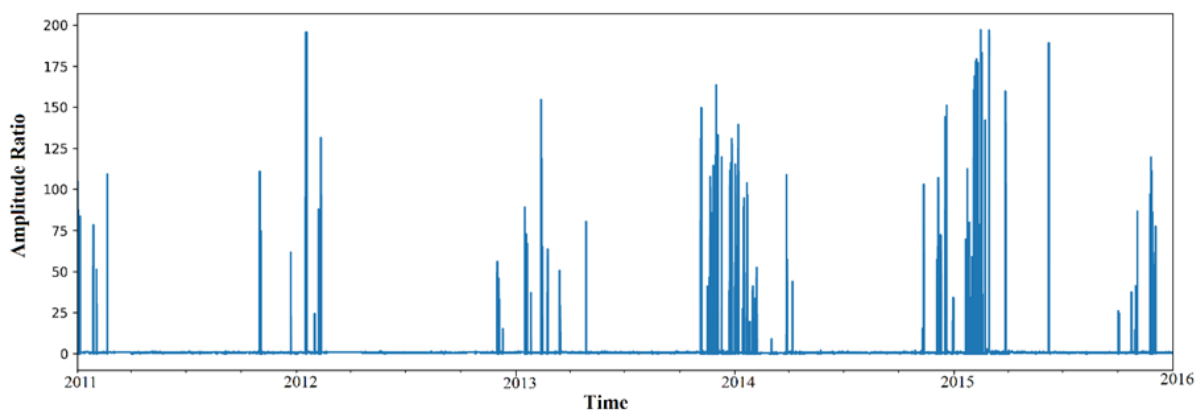
شکل ۳. الف) نمودار هیستوگرام و ب) منحنی تابع چگالی احتمال جفت ایستگاه ECZM/ESLN.

۴. الگوریتم STL برای تعیین روند سری زمانی

تجزیه سری‌های زمانی شامل در نظر گرفتن یک سری به عنوان ترکیبی از اجزای سطح، روند، فصلی و نویز است. الگوریتم STL (Seasonal Trend decomposition using Loess) هموارسازی سری‌های زمانی را با استفاده از تابع خطای LOESS در دو حلقه انجام می‌دهد. حلقه داخلی بین هموارسازی فصلی و روند تکرار می‌شود و حلقه بیرونی اثر نقاط پرت را به حداقل می‌رساند. در طول حلقه داخلی، ابتدا مؤلفه فصلی محاسبه شده و برای محاسبه مؤلفه روند حذف می‌شود. باقی‌مانده با کم کردن مؤلفه‌های فصلی و روند از سری زمانی محاسبه می‌شود.

در نهایت از بین ایستگاه‌های مناسب، جفت ایستگاه ECZM/ESLN انتخاب شد که خروجی روش SARA بر روی داده‌های این جفت ایستگاه در شکل ۴ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشهود است، تغییرات مشاهده شده در نسبت دامنه‌ها قبل از وقوع فوران محسوس می‌باشد که عمدتاً ناشی از جابه‌جایی منبع لرزه‌ای است. با وجود عدم محاسبه مقادیر مطلق دامنه‌های لرزه‌ای، از طریق تحلیل دینامیک نسبت‌های دامنه، ابزار SARA روش قدرتمندی برای ردیابی تحرکات ماگمایی ارائه می‌دهد.



شکل ۴. نمودار نسبت دامنه‌های لرزه‌ای جفت ایستگاه ECZM و ES LN.

سه جزء تحلیل STL به صورت زیر به سری زمانی اولیه مرتبط می شود:

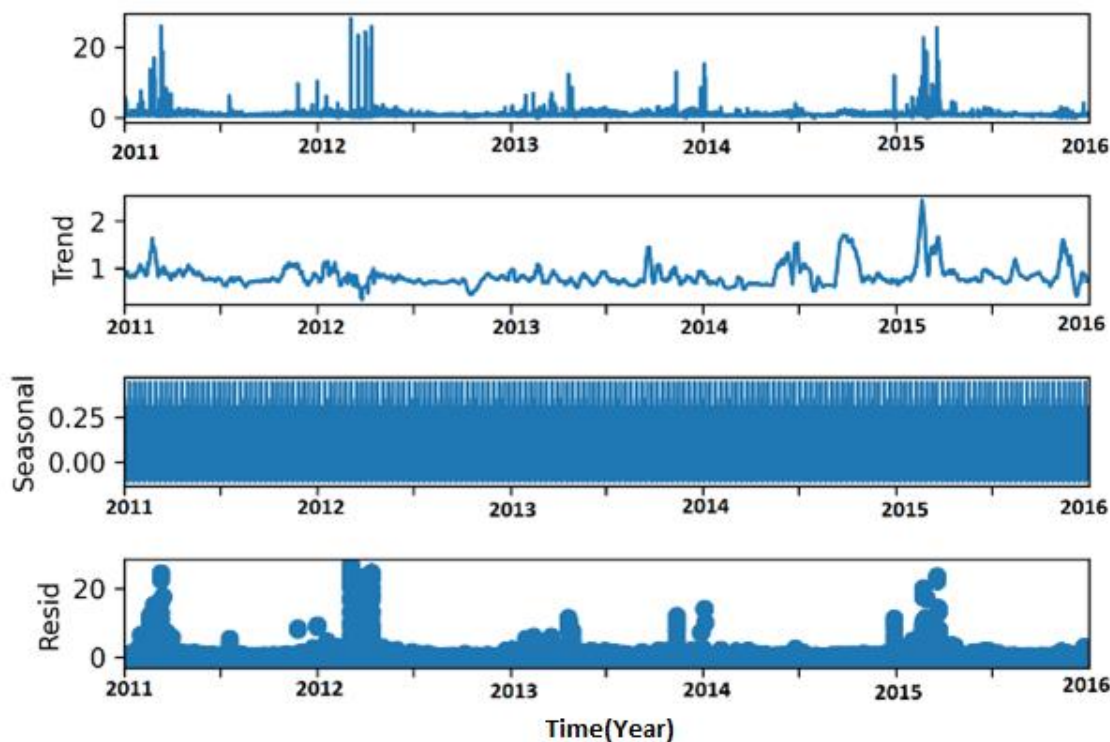
$$y_i = s_i + t_i + r_i \quad (4)$$

که در آن y_i مقدار سری زمانی در نقطه i ، s_i مقدار مؤلفه فصلی در نقطه i ، t_i مقدار مؤلفه روند در نقطه i و r_i مقدار مؤلفه باقی مانده در نقطه i می باشد.

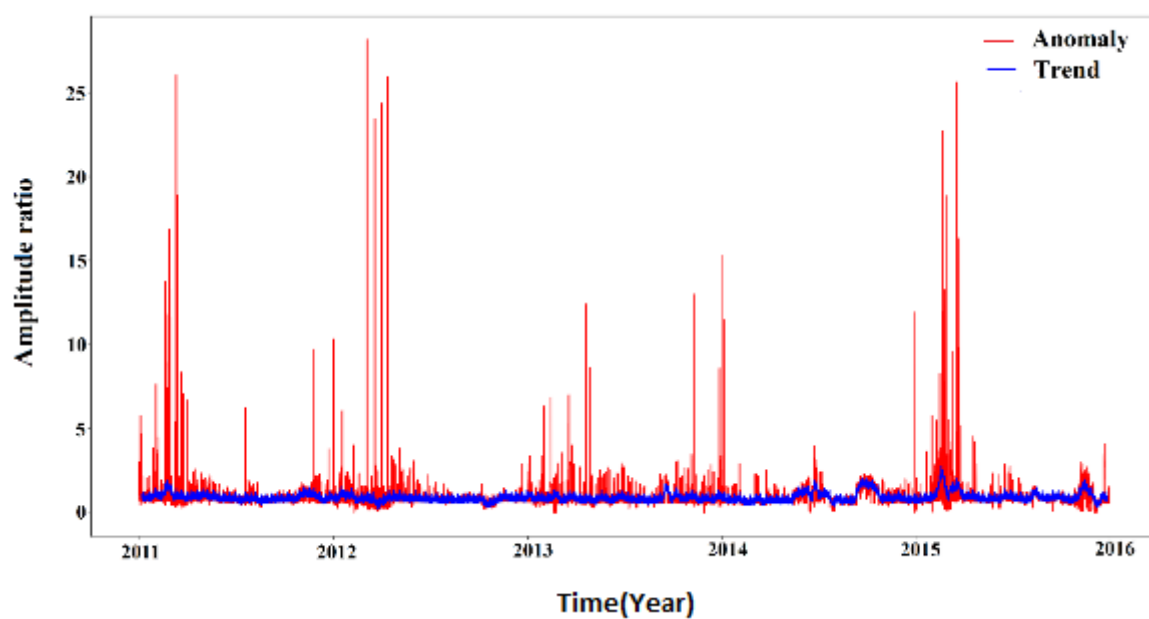
در این قسمت با استفاده از سری زمانی نسبت دامنه های تمام جفت ایستگاه ها، یک سیستم تشخیص زمان شروع ناهنجاری با روش تجزیه روند فصلی با استفاده از الگوریتم STL طراحی شد. به این منظور، ابتدا سری زمانی نسبت دامنه های هر جفت ایستگاه، به طور جداگانه به اجزای روند، فصلی و تغییرات باقی مانده تجزیه شد و بعد از جدا کردن روند و مؤلفه فصلی از سری های زمانی، داده های باقی مانده که در اصل همان ناهنجاری ها در نسبت دامنه ها هستند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، با محاسبه انحراف معیار داده ها، آستانه ای معرفی شده و یک الگوریتم تشخیص ناهنجاری به دست آمده است.

شکل ۵، سری زمانی نسبت دامنه های یکی از جفت

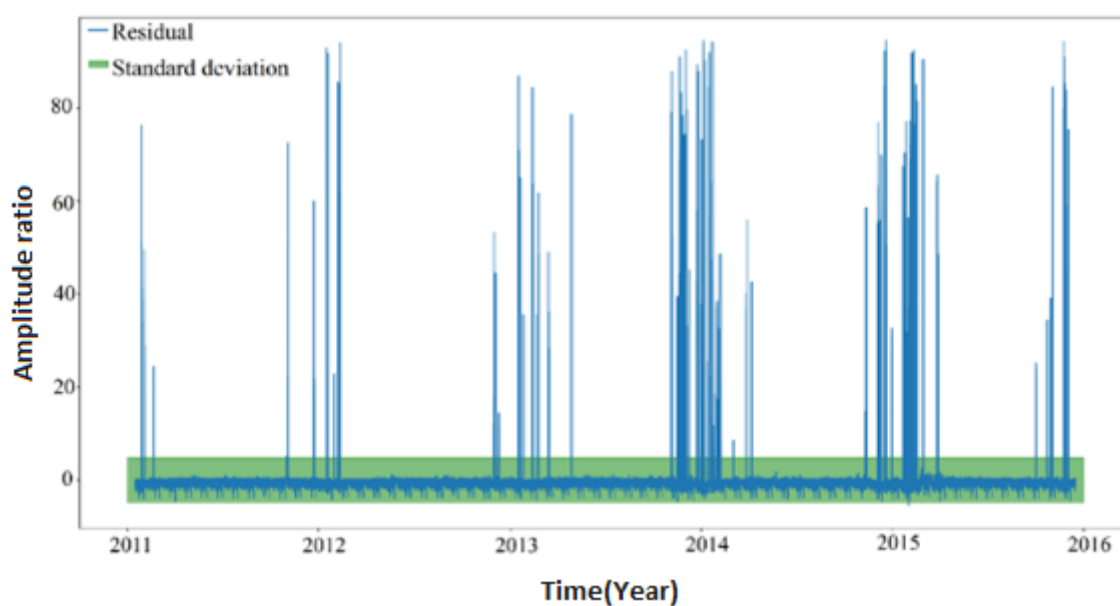
ایستگاه ها را که به مؤلفه های تجزیه شده است، نشان می دهد. پس از جدا کردن مؤلفه های روند و فصلی از سری زمانی اصلی، ناهنجاری های سری زمانی باقی مانده است. اکنون باید یک مدل پیش بینی بر روی داده های باقی مانده اجرا شود تا بتوان مقادیر آنها و زمان شروع ناهنجاری ها را پیش بینی کرد. به این منظور، از الگوریتم STL استفاده شده است. شکل ۶، مؤلفه روند را بر روی مؤلفه باقی مانده، نشان می دهد تا داده های دور افتاده از روند اصلی مشخص شوند. پس از جدا کردن مؤلفه فصلی و روند از سری زمانی اصلی، مؤلفه باقی مانده که نشان دهنده ناهنجاری در نسبت دامنه ها می باشد، به جای می ماند. سپس، انحراف از معیار هر ستون از داده ها که نسبت دامنه های یک جفت ایستگاه می باشد، به طور جداگانه محاسبه شده اند. نقاط غیرعادی که همان ناهنجاری های نسبت دامنه ها می باشند، با مقادیری با انحرافات نامنظم بزرگ در مؤلفه تصادفی مشخص شده اند که مربوط به تغییرات بزرگ غیر قابل توضیح فراتر از مؤلفه های روند و فصلی است و به عنوان ناهنجاری تشخیص داده شده اند (شکل ۷).



شکل ۵. اولین شکل از بالا، سری زمانی نسبت دامنه های جفت ایستگاه ECZM/ESLN را نشان می دهد. شکل دوم و سوم، به ترتیب مؤلفه های روند و مؤلفه فصلی از سری زمانی می باشند. شکل آخر، مؤلفه باقی مانده (Residual) سری زمانی را پس از جدا کردن مؤلفه های روند و فصلی نشان می دهد.



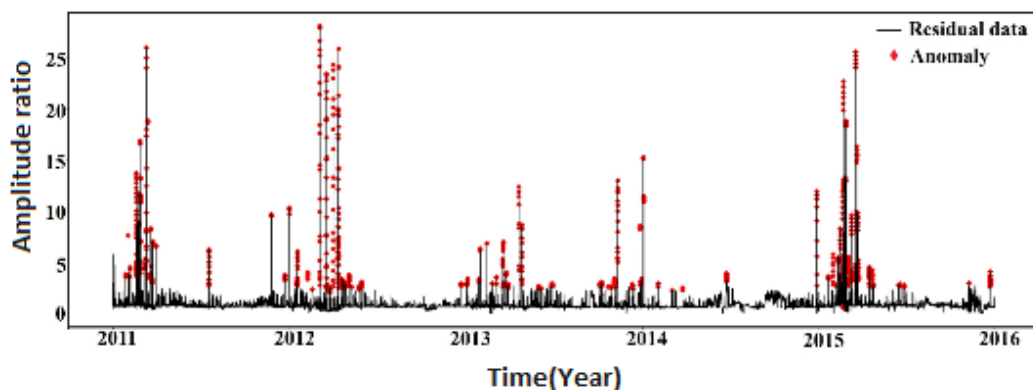
شکل ۶. مؤلفه روند و ناهنجاری‌های باقی‌مانده که با الگوریتم SLT از سری زمانی نسبت دامنه‌های جفت ایستگاه ECZM/ESLN جدا شده‌اند.



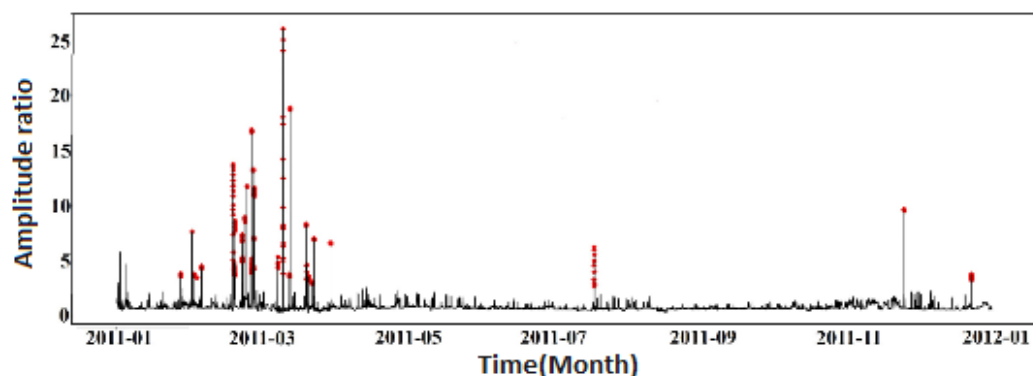
شکل ۷. داده‌های باقی‌مانده پس از جداکردن مؤلفه‌های فصلی و روند از سری زمانی نسبت دامنه‌های جفت ایستگاه ECZM/ESLN. حاشیه سبز رنگ، حد بالا و پایین انحراف از میانگین داده‌ها را مشخص می‌کند.

یک‌ساله و ماهانه، به‌طور جداگانه در شکل ۸ رسم شده است.

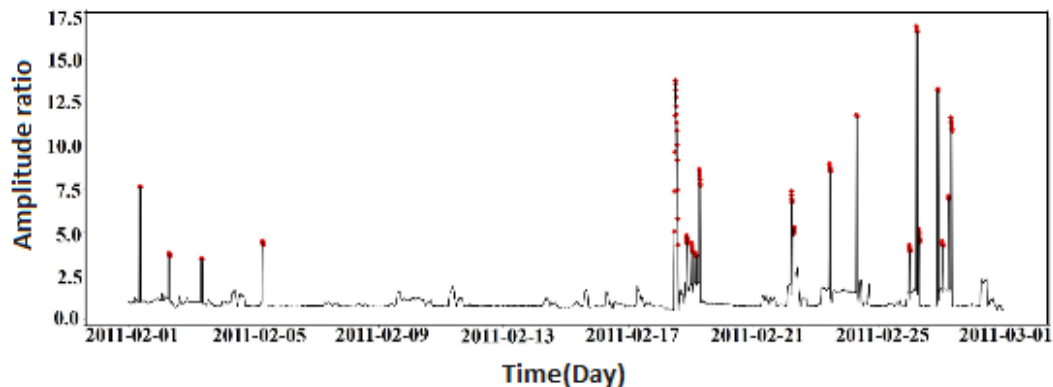
ناهنجاری‌های مشخص‌شده در سری زمانی نسبت دامنه‌های جفت ایستگاه ECZM/ESLN، در بازه‌های زمانی ۵ساله،



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸. تشخیص ناهنجاری‌ها با الگوریتم SLT. نمودار الف) ناهنجاری‌ها در داده‌های باقی‌مانده از تجزیه سری‌زمانی نسبت دامنه‌های جفت ایستگاه ECZM/ESLN، در بازه‌زمانی ۵ ساله. نمودارهای ب و ج، همین ناهنجاری را به ترتیب در بازه‌های زمانی یک‌ساله و یک ماهه نشان می‌دهند.

۵. مقایسه معیارهای سنجش دقت مدل اصلاح‌شده با مدل اولیه
برای ارزیابی دقت مدل اصلاح‌شده و مقایسه آن با مدل اولیه SARA، از چهار معیار، خطای میانگین مربعات

(MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تعیین R^2 استفاده شده است. مقادیر هر چهار معیار ارزیابی خطا، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. معیارهای خطای مدل اصلاح شده با الگوریتم LST

نام مدل	MSE	RMSE	MAE	R2
SARA	۰/۰۰۷۲۷۲	۰/۰۶۷۵۱۹	۰/۰۵۸۹۵۶	۰/۴۵۳۹۳۲
اصلاح شده (ASARA)	۰/۰۰۱۱۳۹	۰/۰۰۳۵۷۶۱	۰/۰۰۲۳۶۶۵	۰/۸۳۳۲۲۵

پایش دقیق مانند دماوند و تفتان وجود دارد. بهبودهای آینده این سیستم می‌تواند بر ادغام با شبکه‌های عصبی برای کاهش عدم قطعیت‌های مکانی و توسعه پایگاه داده پیش‌آموخته برای آتشفشان‌های ایران متمرکز شود، به‌ویژه با توجه به شواهد افزایش فعالیت در آتشفشان‌های دماوند و تفتان، پیاده‌سازی عملی این روش به‌عنوان بخشی از سامانه پایش ملی، با هزینه‌ای کمتر از روش‌های مرسوم، می‌تواند در بازه زمانی نسبتاً کوتاهی محقق شود و علاوه بر پایش آتشفشان‌ها، برای رصد تغییرات تنش در گسل‌های فعال نیز تطبیق داده شود. این یافته‌ها گامی اساسی در ایجاد سیستم‌های هشدار زود هنگام چندمنظوره برای مخاطرات زمین‌شناسی در ایران محسوب می‌شود.

در مجموع، نتایج تحقیق حاضر، پتانسیل مدل خودکار ارائه شده را برای شناسایی روند مهاجرت انرژی لرزه‌ای قبل از فوران، نشان می‌دهد. با توجه به پیوسته بودن رکورد لرزه‌ای و عدم نیاز به وقوع فوران و یا طوفان‌های لرزه‌ای و همچنین سادگی و سریع بودن این روش در ارائه پیش‌نشانگر فوران، می‌تواند یک ابزار کارآمد برای نظارت مداوم بر آتشفشان‌ها باشد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مؤسسه ژئوفیزیک و آتشفشان‌شناسی ایتالیا (INGV) انجام شده است. نویسندگان از این مؤسسه برای ارائه داده‌های لرزه‌نگاری آتشفشان اتنا (دسترسی از طریق سامانه داده‌افزایی: <https://esplorazione-dati.ingv.it>) تقدیر می‌کنند. همچنین سپاس ویژه از پروفسور Salvatore Gambino (پژوهشگر مؤسسه INGV) برای مشاوره و همکاری با نویسندگان به‌منظور دسترسی و استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری آتشفشان اتنا.

همان‌طور که مشهود است، مقادیر هر سه خطای RMSE، MSE و MAE در مدل اصلاح شده کاهش محسوسی داشته است که نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل می‌باشد، همچنین ضریب تشخیص R^2 که میزان همبستگی بین دو سری داده را نشان می‌دهد، در مدل اصلاح شده به عدد یک نزدیک‌تر است که نشان‌دهنده قدرت بالای پیش‌بینی مدل اصلاح شده در تعیین روند سری زمانی نسبت دامن‌ها می‌باشد. افزایش ۳۰ درصدی در ضریب تشخیص مدل اصلاح شده نسبت به مدل اولیه، کارایی مدل ASARA را نشان می‌دهد.

۶. نتیجه گیری

برای رصدخانه‌های آتشفشانی، استخراج هرچه بیشتر اطلاعات در مورد وضعیت آتشفشان و بررسی آن در سریع‌ترین زمان ممکن، بسیار حیاتی است. در این پژوهش، با ردیابی خودکار روند مهاجرت انرژی لرزه‌ای از طریق تکامل زمانی نسبت دامن‌ها، یک پارامتر مهم برای نظارت پیوسته، به‌خصوص در زمان بحران‌های آتشفشانی را ارائه داده‌ایم. این روش را می‌توان به سرعت و بدون نیاز به دانش قبلی از ویژگی‌های مکان و ابزارهای خاص، که معمولاً روش‌های مکان‌یابی سنتی نیاز دارند، به کار برد.

این مطالعه نشان داد که روش اصلاح شده ASARA با دقت ۸۹ درصد و حساسیت به تغییرات کوچک ($RMSE=0.12$)، امکان پایش خودکار فعالیت‌های آتشفشانی را از طریق تحلیل کمی ناهنجاری‌های نسبت دامن‌ها امواج لرزه‌ای فراهم می‌کند. نتایج حاصل از آتشفشان اتنا (۲۰۱۱-۲۰۱۶) گویای قابلیت این روش در شناسایی روند مهاجرت انرژی لرزه‌ای تا ۷۲ ساعت قبل از فوران است، که با توجه به سادگی اجرا و عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته، امکان توسعه آن برای آتشفشان‌های فاقد شبکه

مراجع

- Allard, P., Carbonnelle, J., Dajlevic, D., Le Bronec, J., Morel, P., Robe, M. C., Maurenas, J. M., Faivre-Pierret, R., Martin, D., Sabroux, J. C., & Zettwoog, P. (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, 351(6325), 387–391.
- Angarita, M., Grapenthin, R., Plank, S., Meyer, F. J., & Dietterich, H. (2022). Quantifying large-scale surface change using SAR amplitude images: Crater morphology changes during the 2019–2020 Shishaldin volcano eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024344.
- Battaglia, J., & Aki, K. (2003). Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes. *Journal of Geophysical Research*, 108(B8), 2364.
- Battaglia, J., Aki, K., & Ferrazzini, V. (2005). Location of tremor sources and estimation of lava output using tremor source amplitude on the Piton de la Fournaise volcano: 1. Location of tremor sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(3), 268–290.
- Buono, G., Pappalardo, L., Petrosino, P., Annen, C., & Forni, F. (2022). New insights into the recent magma dynamics under Campi Flegrei caldera (Italy) from petrological and geochemical evidence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2021JB023773.
- Cabrera, L., Ardid, A., Melchor, I., Ruiz, S., Symmes-Lopetegui, B., Báez, J. C., Delgado, F., Martínez-Yáñez, P., Dempsey, D., & Cronin, S. (2024). Eruption forecasting model for Copahue volcano (Southern Andes) using seismic data and machine learning: A joint interpretation with geodetic data (GNSS and InSAR). *Seismological Research Letters*, 95(5), 2595–2610.
- Caudron, C., Taisne, B., Kugaenko, Y., & Saltykov, V. (2015). Magma migration at the onset of the 2012–13 Tolbachik eruption revealed by Seismic Amplitude Ratio Analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 307, 60–67.
- Chan, H.-P., Chan, Y.-C., & Sun, C.-W. (2023). Thermal pattern of Tatun volcanic system by satellite-observed temperatures and its correlation with earthquake magnitudes. *Scientific Reports*, 13, 19568.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., & Marini, L. (1998). Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5), 543–552.
- Cooper, K. M., & Kent, A. J. (2014). Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage. *Nature*, 506(7489), 480–483.
- Coppola, D., Laiolo, M., Cigolini, C., Delle Donne, D., & Ripepe, M. (2015). Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: Results from the MIROVA system. In A. J. L. Harris, T. De Groeve, F. Garel, & S. A. Carn (Eds.), *Detecting, modelling and responding to effusive eruptions*. Geological Society.
- Eibl, E., Bean, C. J., Vogfjörð, K., & Braiden, A. (2014). Persistent shallow background microseismicity on Hekla volcano, Iceland: A potential monitoring tool. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 224–237.
- Endo, E. T., & Murray, T. (1991). Real-time seismic amplitude measurement (RSAM): A volcano monitoring and prediction tool. *Bulletin of Volcanology*, 53(7), 533–545.
- Eskandari, A., Amini, S., & Masoudi, F. (2018). Monitoring thermal changes of Damavand Volcano using Landsat images. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28(109), 43–54.
- Farias, C., Lazo, J., Basualto, D., Saavedra, M., Muñoz-Quiroz, F., Zuñiga-Urrea, L., Martínez-Bravo, R., Huentenao-Inostroza, I., & Saéz-Opazo, R. (2023). One decade of b-value variations from volcano-tectonic seismicity as an early indicator of episodes of crisis in a volcano: The case of Copahue, Southern Andes. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1181177.
- Franco, L., Palma, J. L., Lara, L. E., Gil-Cruz, F., Cardona, C., Basualto, D., & San Martín, J. (2019). Eruptive sequence and seismic activity of Llaima volcano (Chile) during the 2007–2009 eruptive period: Inferences of the magmatic feeding system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 379, 90–105.
- Frankot, R. T., & Chellappa, R. (1990). Estimation of surface topography from SAR imagery using shape from shading techniques. *Artificial Intelligence*, 43(3), 271–310.
- Fu, P., & Rich, P. M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 25–35.
- Ganas, A., Lagios, E., Petropoulos, G., & Psiloglou, B. (2010). Thermal imaging of Nisyros volcano (Aegean Sea) using ASTER data: Estimation of radiative heat flux. *International Journal of Remote Sensing*, 31(15), 4033–4047.
- Gudmundsson, M. T., Thordarson, T., Höskuldsson, A., Larsen, G., Björnsson, H., Prata, F., Oddson, B., Magnusson, E., Hognadóttir, T., Petersen, G., Hayward, C. L., Stevenson, J. A., & Jonsdóttir, I. (2012). Ash

- generation and distribution from April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports*, 2(572), 1-12.
- Hajian, A., Nunnari, G., & Kimiaefar, R. (2023). Intelligent methods with applications in volcanology and seismology. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-15432-4>
- Hernández, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., & Shimoike, Y. (2001). Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, 292(5514), 83-86.
- Howell, S. E., Small, D., Rohner, C., Mahmud, M. S., Yackel, J. J., & Brady, M. (2019). Estimating melt onset over arctic sea ice from time series multi-sensor Sentinel-1 and Radarsat-2 backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 229, 48-59.
- Jaquet, O., Carniel, R., Namar, R., Cecca, M., Renard, P., Demougeot-Renard, H., & Froidevaux, R. (2005). Forecasting volcanic eruptions using geostatistical methods. In *Proceedings of a conference* (pp. 1-10).
- Kilburn, C. R. (2018). Forecasting volcanic eruptions: Beyond the failure forecast method. *Frontiers in Earth Science*, 6, 133.
- Kumagai, H., Lacson Jr, R., Maeda, Y., Figueroa II, M.S., Yamashina, T., Ruiz, M., Palacios, P., Ortiz, H., & Yepes, H., (2013). Source amplitudes of volcano-seismic signals determined by the amplitude source location method as a quantitative measure of event size. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 57-71.
- Kurokawa, A., Takeo, M., & Kurita, K. (2016). Two types of volcanic tremor changed with eruption style during 1986 Izu-Oshima eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 2727-2736.
- Lecocq, T., Caudron, C., & Brenguier, F. (2014). MSNoise, a Python package for monitoring seismic velocity changes using ambient seismic noise. *Seismological Research Letters*, 85(3), 715-726.
- Manga, M., & Brodsky, E. (2006). Seismic triggering of eruptions in the far field: Volcanoes and geysers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1), 263-291.
- Manley, G. F., Pyle, D. M., Mather, T. A., Rodgers, M., Clifton, D. A., Stokell, B. G., Thompson, G., Londoño, J. M., & Roman, D. C. (2020). Understanding the timing of eruption end using a machine learning approach to classification of seismic time series. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 401, 106917.
- Marzocchi, W., Sandri, L., & Selva, J. (2008). BET_EF: A probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting. *Bulletin of Volcanology*, 70, 623-632.
- Morioka, H., Kumagai, H., & Maeda, T. (2017). Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 6538-6551.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Nogoshi, M., & Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2). *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.)*.
- Notsu, K., Mori, T., Vale, S.C.D., Kagi, H., & Ito, T., (2006). Monitoring quiescent volcanoes by diffuse CO₂ degassing: Case study of Mt. Fuji, Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 163(5-6), 825-835.
- Nunnari, G. (2021). Clustering activity at Mt. Etna based on volcanic tremor: A case study. *Earth Science Informatics*, 14(6572), 1-23.
- Ogiso, M., & Yomogida, K. (2015). Estimation of locations and migration of debris flows on Izu-Oshima Island, Japan, on 16 October 2013 by the distribution of high frequency seismic amplitudes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298, 15-26.
- Pérez, N.M., Padrón, E., Melián, G., et al. (2024). Volcanic soil gas 4He/CO₂ ratio: A useful geochemical tool for real-time eruption forecasting. *Scientific Reports*, 14(1), 7985.
- Pu, H.C., Lin, C.H., Lai, Y.C., Shih, M.H., Chang, L.C., Lee, H.F., Lee, P.T., Hong, G.T., Li, Y.H., Chang, W.Y., & Lo, C.H., (2020). Active volcanism revealed from a seismicity conduit in the long-resting Tatun Volcano Group of Northern Taiwan. *Scientific Reports*, 10(1), 6153.
- Rasaneh, G., Hajian, A., Hodhodi, M., Kimiaefar, R., & Gambino, S. (2022). Monitoring magma migration at Mt. Etna using the Seismic Amplitude Ratio Analysis method. *Annals of Geophysics*, 65(4), VO429.
- Richardson, J., Waite, G., & Palma, J. (2014). Varying seismic-acoustic properties of the fluctuating lava lake at Villarrica volcano, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(7), 5560-5573.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., & Vernant, P. (2006). Active transtension inside Central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics. *Geology*, 34(6), 477-480.
- Shirokov, V. A., & Zobin, V. M. (1968). Seismic phenomena connected with Piip advective crater eruption in October-December, 1966. *Bulletin of Volcanological Stations*, 44. Nauka. (in Russian).

- Song, S.-R., Tsao, S., & Lo, H.-J. (2000). Characteristics of the Tatun volcanic eruptions, North Taiwan: Implications for a cauldron formation and volcanic evolution. *Journal of the Geological Society of China (Taiwan)*, 43(2), 361–377.
- Taisne, B., Brenguier, F., Shapiro, N. M., & Ferrazzini, V. (2011). Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity. *Geophysical Research Letters*, 38, L04304.
- Tan, C. T., Taisne, B., Neuberg, J., & Basuki, A. (2019). Real-time assessment of potential seismic migration within a monitoring network using Red-flag SARA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 384, 31–47. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.004>.
- Thordarson, T., & Self, S. (2003). Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: A review and reassessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 108(AAC-7).
- Tokaren, P. I. (1963). On a possibility of forecasting Bezymianniy volcano eruptions according to seismic data. *Bulletin of Volcanology*, 26, 379–386.
- Toutin, T., & Gray, L. (2000). State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(1), 13–33.
- Walsh, B., Jolly, A. D., & Procter, J. (2017). Calibrating the amplitude source location (ASL) method by using active seismic sources: An example from Te Maari volcano, Tongariro National Park, New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 44, 3591–3599.