

پایش فعالیت آتشفشان با تحلیل هم‌زمان نسبت دامنه امواج لرزه‌ای و سرعت نسبی داده‌های نوفه‌های لرزه‌ای محیطی

غزاله رسانه^۱، علیرضا حاجیان^{۲*}، مریم هدهدی^۳، روح‌الله کیمیایی فر^۳ و سالواتوره گامبینو^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۳ استادیار، گروه فیزیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۴ استادیار، موسسه ملی ژئوفیزیک و آتش‌فشان‌شناسی، شعبه کاتانیا، کاتانیا، ایتالیا

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳)

چکیده

از تابع همبستگی متقابل نوفه‌های لرزه‌ای محیطی به کرات برای نظارت بر فعالیت آتشفشان‌ها استفاده شده است. این روش معمولاً محدود به آتشفشان‌های مجهز به شبکه‌های بزرگ و با ایستگاه‌های متراکم و باندپهن است. در این مقاله روشی پیشنهاد شده است که می‌تواند به‌طور خودکار و بدون نیاز به تجهیزات پیشرفته، تابع همبستگی متقابل نوفه‌های لرزه‌ای محیطی را محاسبه کند و با استفاده از آن، تغییرات سرعت نسبی و همچنین تغییرات نسبت دامنه‌های لرزه‌ای را به‌عنوان دو پیش‌نشانگر فوران، تحلیل و بررسی کند. برای این منظور از داده‌های لرزه‌ای پیوسته پنج ایستگاه لرزه‌نگاری نزدیک آتشفشان اتنا در ایتالیا استفاده شده است. ابتدا مؤلفه‌های قائم داده‌های روزانه به نداشت‌های سی دقیقه‌ای تبدیل و پس از حذف میانگین، قسمت‌هایی از نداشت با دامنه بیشتر از سه برابر جذر مربع میانگین حذف شدند. در ادامه، تابع همبستگی متقابل بین جفت ایستگاه‌ها محاسبه و در بازه‌های فرکانسی مختلف فیلتر شد. سپس تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای با استفاده از بسته پایتون MSNoise و روش پنجره‌های متحرک طیف متقابل برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه شد.

در مرحله دوم، تجزیه و تحلیل نسبت دامنه‌های لرزه‌ای با روش SARA (Seismic Amplitude Ratio Analysis) انجام و نمودارهای نسبت دامنه‌ها رسم شد. در نهایت، با استفاده از آزمون تحلیل روند من-کندال و آزمون تخمین شیب سن، مقدار عددی شیب هر نمودار، جداگانه محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش سرعت نسبی به میزان ۰/۲ درصد و همچنین افزایش نسبت دامنه‌های امواج لرزه‌ای در ۹۰ درصد جفت ایستگاه‌ها از چند روز قبل از فوران اصلی است. اندازه‌گیری خودکار و مداوم این دو پیش‌نشانگر و تلفیق نتایج آنها، می‌تواند پتانسیل این روش را برای بهبود روند نظارت بر آتشفشان‌ها به‌خوبی نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: پایش آتشفشان، نوفه‌های لرزه‌ای محیطی، تحلیل نسبت دامنه‌های امواج لرزه‌ای، تغییرات سرعت امواج، بسته پایتون MSNoise

۱ مقدمه

نوفه‌های لرزه‌ای محیطی می‌توانند ابزار مفیدی برای پایش آتشفشان‌ها باشند؛ زیرا امکان تشخیص تغییرات بسیار جزئی در سرعت لرزه‌ای مرتبط با حرکت ماگمای انتقال یافته به سطح را فراهم می‌کنند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییر و آشفتگی در نوفه‌های محیطی می‌تواند به سبب اختلالاتی در ساختمان آتشفشان باشد (کلارک و همکاران، ۲۰۱۱؛ آلویسی و همکاران، ۲۰۰۹؛ بهنکه و همکاران، ۲۰۰۹ و بوناکورسو و همکاران، ۲۰۱۱).

مییر و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند با نمونه‌برداری مداوم از محیط و محاسبه همبستگی متقابل نوفه‌های لرزه‌ای ثبت شده در هر جفت ایستگاه، می‌توان تغییرات نسبی سرعت قبل از وقوع فوران را بررسی کرد.

کدهای مختلفی برای محاسبه همبستگی متقابل بین نوفه‌های لرزه‌ای ارائه شده است. هرمان (۲۰۰۲) نرم‌افزاری به نام CPS 3.3 (Computer Programs in Seismology) معرفی کرد که تابع همبستگی متقابل را محاسبه می‌کرد، اما امکان استفاده از داده‌های خام را نداشت و باید داده‌ها جداگانه پردازش و آماده می‌شدند. گلدشتاین و همکاران (۲۰۰۳) کد مشابهی به نام (Seismic Analysis Code) ارائه کردند که برای تحلیل داده‌های سری زمانی استفاده می‌شد و به زبان C نوشته شده بود. هیچ کدام از این برنامه‌ها راه‌حل یکپارچه‌ای برای استفاده مستقیم از داده‌های خام، پردازش خودکار آرشو داده‌ها، دسته‌بندی داده‌ها به صورت روزانه یا ساعتی، محاسبات لازم و رسم نمودارها نداشتند. این موارد با استفاده از بسته نرم‌افزار MSNoise (لکوک و همکاران، ۲۰۱۴) به طور کامل اجرا می‌شود. این نرم‌افزار به زبان پایتون نوشته شده است و کدهای آن در دسترس و با توجه به نیاز، تغییرپذیر هستند. در این مقاله برای دسته‌بندی، پردازش داده‌ها، محاسبه تابع همبستگی متقابل و سایر محاسبات لازم از این بسته نرم‌افزاری استفاده شده است. یکی از امکانات این نرم‌افزار،

افزونه SARA (Seismic Amplitude Ratio Analysis) است که با تجزیه و تحلیل نسبت دامنه‌های امواج لرزه‌ای ثبت شده در ایستگاه‌های مختلف می‌تواند روند مهاجرت زیرسطحی ماگما را قبل از فوران آتشفشان‌ها ردیابی کند. این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی مکان‌یابی زلزله است و بدون نیاز به تعیین زمان رسید امواج P و S و فقط با استفاده از تغییرات نسبت دامنه‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مختلف، مکان انرژی لرزه‌ای انباشته شده و روند مهاجرت آن و در نتیجه، مسیر حرکت ماگما را تعیین می‌کند. روش یادشده حتی در صورت نبود زمین لرزه می‌تواند انرژی لرزه‌ای را به طور مداوم شناسایی و مکان‌یابی کند (لکوک و همکاران، ۲۰۱۴).

در سال‌های اخیر، از بسته MSNoise و روش SARA برای پایش بسیاری از آتشفشان‌های فعال دنیا استفاده شده است. برای اولین بار از این برنامه برای تعیین سرعت امواج لرزه‌ای با استفاده از تابع همبستگی متقابل نوفه‌های لرزه‌ای محیطی، قبل از دو فوران اکبر و دسامبر ۲۰۱۰ آتشفشان پیتون در فرانسه استفاده شد. نتایج، کاهش سرعت نسبی امواج لرزه‌ای را از دو روز قبل از فوران اصلی به وضوح نشان دادند (لکوک و همکاران، ۲۰۱۴). پس از آن، این روش برای پایش آتشفشان هولوهرون در سال ۲۰۱۲، آتشفشان‌های کیلاویا و کاتلا در سال ۲۰۱۸، آتشفشان اتنا در سال ۲۰۱۹ و آتشفشان پلیستوسن در سال ۲۰۲۰ به کار رفت و از کاهش نسبی سرعت امواج لرزه‌ای قبل از فوران اصلی به عنوان یک پیش‌نشانگر لرزه‌ای استفاده شد. همچنین از روش SARA برای تجزیه و تحلیل نسبت دامنه‌ها در آتشفشان تولباجیک در سال ۲۰۱۲، آتشفشان ویرونگا در سال ۲۰۱۷، آتشفشان بارداریونگا در سال ۲۰۱۸ و در نهایت، آتشفشان گده در سال ۲۰۲۰ استفاده شد که توانست مسیر حرکت ماگما و روند مهاجرت لرزه‌ای را قبل از فوران این آتشفشان‌ها درست تشخیص دهد. در تمام این

مجموعه‌ای شامل n ایستگاه، m جفت ایستگاه جهت محاسبه وجود خواهد داشت که تعداد آنها از رابطه (۱) به دست می‌آید (لکووک و کایتون، ۲۰۱۴):

$$m = n \times (n - 1) / 2 \quad (1)$$

اگر محاسبه خودهمبستگی نیز لازم باشد، m از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$m = \left(n \times \frac{n-1}{2} \right) + n \quad (2)$$

سپس سری‌های زمانی خام روزانه و همبستگی متقابل را که می‌توان به صورت هفتگی، ماهانه و سالانه محاسبه کرد، با روش خطی برانبارش می‌شوند و به صورت یک سری زمانی درمی‌آیند. معمولاً همبستگی از منفی ۵۰۰۰ تا مثبت ۵۰۰۰ ثانیه است، اما طول سری زمانی به سرعت گروه امواج لرزه‌ای و همچنین بیشترین فاصله بین ایستگاه‌ها وابسته است (بنسن و همکاران، ۲۰۰۷).

در مرحله بعد، زمان تأخیر (dt) بین دو تابع همبستگی متقابل مرجع محاسبه و سپس برانبارش مرجع و کنونی مشخص می‌شود. معمولاً برانبارش مرجع با کل بازه زمانی داده‌ها برابر است و برانبارش کنونی را با پنجره‌هایی با طول‌های مختلف در نظر می‌گیرند. پس از آن، تابع گرین محاسبه می‌شود. جهت محاسبه تغییر سرعت از تابع همبستگی امواج کدا استفاده می‌شود؛ زیرا تغییر سرعت این امواج حساسیت بیشتری نسبت به موج مستقیم دارد، ولی نسبت به توزیع چشمه نوفه و ویژگی‌های آن حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهد (چاوس و شوارتز، ۲۰۱۶).

در آخرین مرحله، تأخیر زمانی بین همبستگی مرجع و همبستگی همه جفت ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود. اگر میدان آشفتگی تنش، همگن فرض شود، آشفتگی سرعت لحظه‌ای (dv/v) در منطقه نیز همگن و به لحاظ عددی، مخالف تغییرات زمان تأخیر خواهد بود (راتدوموپوربو و پوپینت، ۱۹۹۵):

$$-dt/t = dv/v \quad (3)$$

در رابطه فوق، dt/t تأخیر زمانی بین تابع همبستگی متقابل

مطالعات، تنها از یکی از توانمندی‌های این نرم‌افزار استفاده شده است. در مطالعه حاضر برای اولین بار از تلفیق هر دو روش (تغییرات سرعت نسبی و تغییرات نسبت دامنه‌ها) برای داده‌های لرزه‌ای آتشفشان اتنا استفاده شد. بررسی هم‌زمان هر دو پیش‌نشانگر برای پایش و نظارت بهتر آتشفشان‌ها پیشنهاد می‌شود.

۲ روش مطالعاتی

در این پژوهش برای محاسبه نسبت طیف دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده در تمام جفت ایستگاه‌ها و همچنین تعیین سرعت نسبی امواج با استفاده از نوفه‌های لرزه‌ای محیطی، از بسته نرم‌افزار MSNoise استفاده شده که به زبان پایتون نوشته شده است. این نرم‌افزار می‌تواند به طور خودکار به پایگاه داده‌ها متصل شود و پس از آماده‌سازی و دسته‌بندی داده‌ها، مراحل پیش‌پردازش را انجام دهد تا داده‌ها برای محاسبات لازم آماده شوند. پس از محاسبه تابع همبستگی طیف متقابل برای همه جفت ایستگاه‌ها می‌توان تغییرات سرعت و تغییرات نسبت دامنه‌ها را محاسبه کرد.

برای محاسبه سرعت نسبی امواج از روش پنجره‌های متحرک طیف متقابل (MWCS) و برای تجزیه و تحلیل نسبت دامنه‌ها از روش SARA استفاده شده است. در ادامه، هر دو روش به تفصیل بررسی خواهند شد.

۱-۲ روش پنجره‌های متحرک طیف متقابل برای

محاسبه سرعت

مرحله اول در این روش، آماده‌سازی داده‌های نوفه‌های لرزه‌ای محیطی است. برای این منظور ابتدا داده‌های یک‌روزه به پنجره‌های زمانی مورد نظر تبدیل می‌شوند سپس میانگین و اثر روند حذف و بعد از اعمال فیلترهای مناسب، بهنجارسازی و در نهایت، طیف سفیدکننده اعمال می‌شود. پس از آن، همبستگی متقابل بین تمام جفت ایستگاه‌ها در حوزه فرکانس انجام می‌شود. برای

که A_1 و A_2 دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده در ایستگاه‌های ۱ و ۲ و r_1 و r_2 فاصله بین چشمه لرزه‌ای و ایستگاه‌های ۱ و ۲ هستند. n مقدار ثابتی است که برای امواج حجمی ۱ و برای امواج سطحی 0.5 فرض می‌شود. B از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \frac{\pi f}{Q\beta} \quad (۵)$$

که π مقدار ثابت، f فرکانس مرکزی، Q ضریب کیفیت و β سرعت امواج لرزه‌ای است. بهتر است از سرعت موج برشی استفاده شود؛ زیرا دامنه امواج S بزرگ‌تر از دامنه امواج P است و همچنین الگوی تابش موج S را در فرکانس‌های بالاتر از 1 هرتز می‌توان همسانگرد فرض کرد (باتاگلیا و آکی، ۲۰۰۳). مقادیر مناسب Q و β با توجه به لرزه‌خیزی و مطالعات انجام شده در منطقه مورد مطالعه انتخاب می‌شوند (نوناری، ۲۰۲۱).

پس از محاسبه طیف نسبت دامنه‌های تمام جفت ایستگاه-ها، این نسبت در بازه‌های زمانی مختلف رسم و تغییرات آن قبل از فوران بررسی می‌شود. این روش به‌طور مداوم، حتی در صورت نبود زمین لرزه، انرژی لرزه‌ای و روند مهاجرت آن را شناسایی و مکان‌یابی می‌کند. از آنجاکه انرژی هر نوع مهاجرت لرزه‌ای نشان‌دهنده حرکت بالقوه ماگما است، روند مهاجرت ماگما را قبل از فوران نیز می‌توان ردیابی کرد.

روش SARA مقادیر مطلق دامنه‌های لرزه‌ای را محاسبه نمی‌کند، اما با بررسی روند تغییرات نسبت دامنه‌ها، بینش خوبی درباره مهاجرت ماگما فراهم می‌کند. تغییرات زمانی در نسبت دامنه‌های لرزه‌ای به دو دلیل ممکن است اتفاق بیفتد: قانون میرایی؛ تغییر فاصله بین منبع و گیرنده. از آنجاکه در این روش از یک جفت ایستگاه مستقل و نزدیک هم استفاده می‌شود، میرایی در این فاصله بعید به نظر می‌رسد و دلیل تغییرات مربوط به محل منبع لرزه‌ای ناشی از مهاجرت تنش و مهاجرت ماگما است.

مرجع و تابع همبستگی کنونی است و dv/v تغییرات سرعت را نشان می‌دهد.

شکل ۱ طرح کلی مراحل آماده‌سازی داده‌ها و محاسبات لازم را برای تعیین سرعت امواج با استفاده از نرم‌افزار MSNoise نشان می‌دهد.

از بررسی تغییرات سرعت لرزه‌ای با استفاده از این نرم‌افزار، می‌توان علاوه بر پیش‌نشانگری آتشفشان، برای پیش‌نشانگری زلزله نیز استفاده کرد؛ برای نمونه از این روش به‌عنوان پیش‌نشانگر در زلزله کرمانشاه (سیروس و همکاران، ۱۳۹۸) و همچنین چند زلزله مختلف در کرمان (ربیع‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۹) استفاده شده است.

۲-۲ روش لرزه‌ای SARA

روش SARA مبتنی بر محاسبه نسبت دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده در ایستگاه‌های مختلف لرزه‌نگاری مستقر در اطراف آتشفشان و نزدیک دهانه یا دهانه‌های فعال است. جهت اجرای این روش برای یک آتشفشان، ابتدا یک جفت ایستگاه لرزه‌ای با فاصله مناسب از هم و نزدیک به دهانه آتشفشان انتخاب می‌شود و نسبت دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده در این جفت ایستگاه به صورت نظری و عملی محاسبه و مقایسه می‌شود. با مقایسه این نسبت‌ها و تغییرات ناگهانی در مقدار آنها، که معمولاً چند ساعت و حتی چند روز قبل از وقوع آتشفشان رخ می‌دهد، روند مهاجرت لرزه‌ای و به دنبال آن، مهاجرت ماگما را می‌توان تشخیص داد. هرگونه تغییر ناگهانی در نسبت دامنه‌ها را می‌توان به جابه‌جایی منبع لرزه‌ای و مهاجرت تنش و در نهایت، مهاجرت ماگما نسبت داد و با ردیابی روند این تغییرات، می‌توان مسیر حرکت ماگما در عمق را قبل از فوران تعیین کرد. از لحاظ نظری نسبت دامنه امواج لرزه‌ای هر جفت-ایستگاه در این روش از رابطه زیر به دست می‌آید (کادرون و همکاران، ۲۰۱۵):

$$\frac{A_1}{A_2} = \exp(-B(r_1 - r_2)) \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^n \quad (۴)$$

در این پژوهش برای اعتبارسنجی روش از داده‌های لرزه‌ای فوران سال ۲۰۰۸ آتشفشان اتنا در ایتالیا استفاده و با توجه به تغییرات نسبت دامنه‌ها قبل از فوران، روند لرزه‌خیزی و مهاجرت ماگما تعیین شده است.

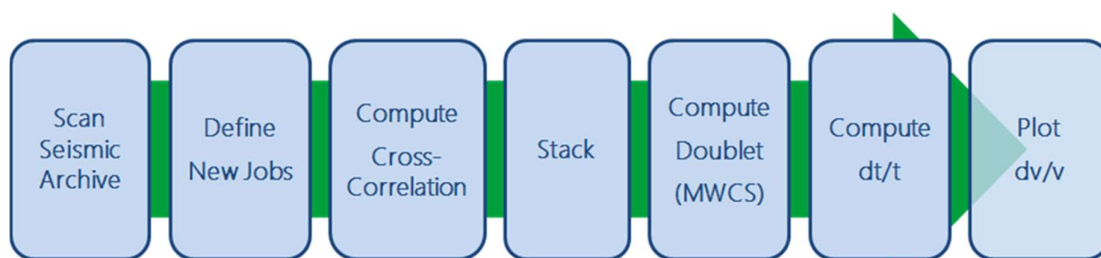
۳ مکان مورد مطالعه

اتنا بلندترین کوه ایتالیا است که در جنوب آلپ قرار گرفته است و محدوده‌ای به مساحت ۳۹۰ هزار کیلومتر مربع و شعاع محیطی ۱۴۰ کیلومتر را می‌پوشاند. به‌طور دقیق‌تر، اتنا در شمال شرقی جزیره سیسیل ایتالیا و میان صفحات همگرای حاشیه‌ای آفریقا و اوراسیا واقع است. این کوه از مرتفع‌ترین کوه‌های اروپا است و ارتفاع آن به ۳۳۵۰ متر از سطح دریا می‌رسد، اما به دلیل فعالیت‌های آتشفشانی و فوران‌های مداوم، ممکن است ارتفاع آن تا حدودی تغییر کند. آتشفشان اتنا از نوع آتشفشان‌های چینه‌ای یا استراتوولکانو (stratovolcano) است. این آتشفشان‌ها معمولاً بسیار بلند و مخروطی شکل هستند و از انباشته شدن لایه‌های سفت شده‌ای از گدازه‌ها، سنگ‌های آذرین، تفر و خاکسترهای آتشفشانی به وجود آمده‌اند. از مشخصه این نوع آتشفشان‌ها، شیب زیاد و انفجارهای ناگهانی است (شکل ۲). اتنا نه تنها فعال‌ترین آتشفشان اروپا بلکه یکی از فعال‌ترین آتشفشان‌های جهان محسوب می‌شود. اولین فعالیت آتشفشانی این کوه در حدود پانصد هزار سال پیش انجام شد و فوران‌هایی در زیر دریا در سواحل باستانی سیسیل رخ داد. حدود سیصد هزار سال پیش، آتشفشان‌ها در جنوب غربی قله (مرکز بالای آتشفشان) شروع به فعالیت کردند و ۱۷۰ هزار سال پیش، فعالیت‌ها به سمت مرکز کنونی حرکت کرد. فوران در آن زمان اولین بنای آتشفشانی بزرگ را ایجاد کرد و یک آتشفشان چینه‌ای را در تناوب فوران‌های انفجاری تشکیل داد (آلارد و

همکاران، ۲۰۰۶).

اتنا تاکنون بیش از صد بار طغیان کرده است. فوران‌های اتنا هر سه تا پنج سال یک‌بار تکرار می‌شود. این فوران‌ها از الگوهای متعددی پیروی می‌کنند. بیشتر آنها در قله رخ می‌دهند، جایی که پنج دهانه متمایز وجود دارد. فوران‌های دیگر از بیش از سیصد دریاچه، در کناره‌ها رخ می‌دهند. عرض دهانه بعضی از این دریاچه‌ها به صدها متر می‌رسد. فوران‌هایی که در قله رخ می‌دهند، بسیار انفجاری هستند، اما به ندرت مناطق مسکونی اطراف آتشفشان را تهدید می‌کنند. در مقابل، فوران‌های کناری با ارتفاع چند صد متری، می‌توانند به شهرهای کوچک و روستاهایی که در اطراف یا دامنه کوه اتنا واقع شده‌اند، خسارات و آسیب‌های زیادی وارد آورند. از عوارض جانبی فعالیت‌های آتشفشانی این کوه، زمین‌لرزه‌های شدیدی است که وقوع یکی از آنها در سال ۱۹۰۸، تعداد ۸۳ هزار کشته به همراه داشت. از سال ۱۶۰۰ میلادی، حداقل شصت فوران جانبی و فوران‌های بی‌شماری در قله این آتشفشان رخ داده است. تقریباً نیمی از این موارد از آغاز قرن بیستم اتفاق افتاده است. از سال ۲۰۰۰ به بعد، اتنا چهار فوران جانبی داشته است که در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۳-۲۰۰۲، ۲۰۰۵-۲۰۰۴ و ۲۰۰۹-۲۰۰۸ رخ داده‌اند. فوران‌های دیگری نیز در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸-۲۰۰۷، ژانویه-آوریل ۲۰۱۲، ژولای-اکتبر ۲۰۱۲، دسامبر ۲۰۱۸ و فوریه ۲۰۲۱ رخ داده‌اند.

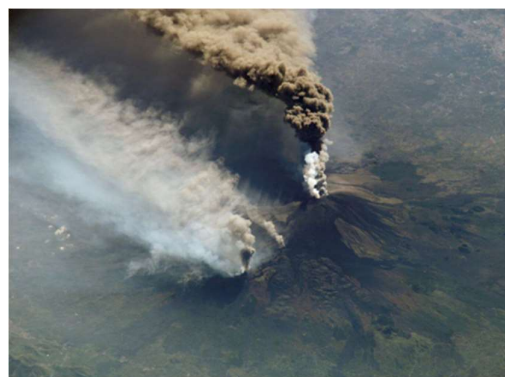
در شکل ۳ شبیه‌سازی حرکت مواد مذاب ناشی از یک مجموعه از فوران‌های آتشفشان اتنا (از مارس ۲۰۰۷ تا ژولای ۲۰۰۹) با نرم‌افزار گروه شبیه‌سازی مؤسسه ملی ژئوفیزیک و آتشفشان‌شناسی ایتالیا (INGV) نشان داده شده است. این نقشه‌ها از این لحاظ حائز اهمیت هستند که می‌توانند بانک اطلاعاتی خوبی برای پیش‌بینی مسیر حرکت ماگما در فوران‌های احتمالی آینده باشند.



شکل ۱. مراحل کار نرم‌افزار MSNoise برای محاسبه و رسم منحنی تغییرات سرعت (لکوک و همکاران، ۲۰۱۴).

۴ جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

شبکه لرزه‌ای دائمی کوه اتنا شامل ۳۳ ایستگاه باندپهن و ۱۲ ایستگاه کوتاه‌دوره است. هر ایستگاه به لرزه‌سنج تریلیوم سه جزء مجهز و سرعت نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز است. داده‌های لرزه‌ای استفاده‌شده در این مطالعه را پنج ایستگاه لرزه‌نگاری واقع در نزدیکی محل فوران آتشفشان اتنا به‌طور پیوسته ثبت کرده‌اند (شکل ۴). مشخصات جغرافیایی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

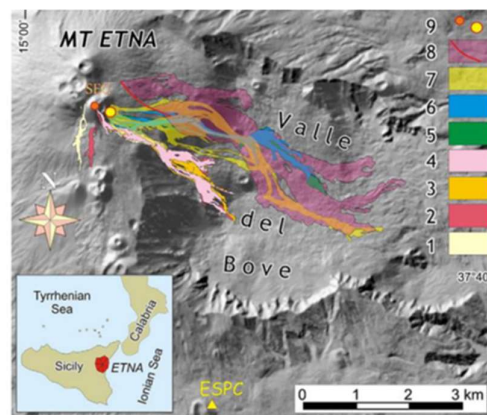


شکل ۲. نمایی هوایی از آتشفشان اتنا به همراه دهانه اصلی در سمت راست و دو دهانه فرعی در میانه و سمت چپ (ناسا، ۲۰۱۰).

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های لرزه‌ای مورد مطالعه.

ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	نام اختصاری ایستگاه
۲۹۴۰	۱۵/۰۸	۳۷/۷۳	EBEL
۲۶۵۵	۱۵/۰۳	۳۷/۷	ECCS
۳۰۳۸	۱۴/۹۸	۳۷/۷۴	ECPN
۳۰۰۵	۱۵/۰۶	۳۷/۷۶	EPDN
۲۹۶۸	۱۴/۹۸	۳۷/۷۶	EPLC

بازه زمانی مورد مطالعه از ۸ تا ۱۵ مه سال ۲۰۰۸ است. در این بازه زمانی کوتاه، دو رویداد مهم آتشفشانی وجود دارد. در تاریخ ۱۰ مه، فوران شدید گدازه و در تاریخ ۱۳ مه فوران اصلی آتشفشان اتنا رخ داد. در ابتدا برای پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، مؤلفه‌های قائم داده‌های روزانه ثبت‌شده از پنج ایستگاه آتشفشانی اطراف آتشفشان اتنا به نگاشت‌های ۶۰ دقیقه‌ای تبدیل و برای بررسی کیفیت



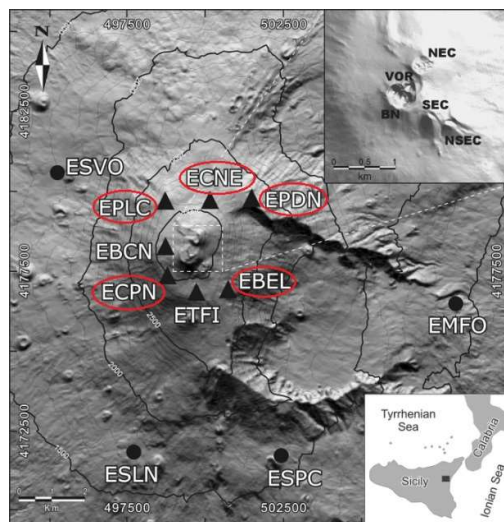
شکل ۳. نقشه شبیه‌سازی حرکت مواد مذاب ناشی از فوران آتشفشان اتنا از مارس ۲۰۰۷ تا ژوئیه ۲۰۰۹. شماره‌های ۱ تا ۸ به ترتیب فوران‌های ۲۹ مارس، ۱۰ تا ۱۱ آوریل، ۲۹ آوریل، ۶ تا ۷ مه، ۴ تا ۵ سپتامبر، ۲۳ تا ۲۴ نوامبر ۲۰۰۷، ۱۰ مه ۲۰۰۸، ۱۳ مه ۲۰۰۸ و ۶ ژوئیه ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد. شماره ۹ معرف موقعیت مراکز دوران در دهانه جنوب شرقی است (لانگر و همکاران، ۲۰۰۹).

منظور، ابتدا با استفاده از مؤلفه عمودی نگاشت لرزه‌ای پیوسته پنج ایستگاه مورد مطالعه تغییرات سرعت محاسبه شد. شکل ۷ نمودار تابع گرین مؤلفه عمودی تمام جفت‌ایستگاه‌ها و شکل ۸ نتایج محاسبات سرعت با روش MWCS را برای جفت‌ایستگاه EBEL و EPLC برای انباشت‌های یک روز، دو روز، پنج روز، ده روز و انباشت مرجع در بازه فرکانسی ۰/۵ تا ۵/۵ هرتر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشهود است، برای انباشت ده‌روزه، تغییرات سرعت در حدود ۰/۲ درصد قبل از فوران اصلی اتفاق افتاده و بلافاصله پس از فوران، روند صعودی را طی کرده و به سطح اولیه برگشته است. دلیل این تغییرات سرعت را می‌توان به تحریک مایع درون بدنه ماگمایی قبل از فوران نسبت داد که باعث تورم در اعماق کمتر و باز شدن ترک‌ها می‌شود. باز شدن مداوم ترک‌ها باعث کاهش سرعت قبل از فوران می‌شود که با وقوع فوران و کاهش فشار ماگما، سرعت لرزه‌ای به سرعت بازیابی می‌شود.

برای بررسی پیش‌نشانگر دوم و تجزیه و تحلیل نسبت دامنه‌ها، پس از وزن‌دهی مناسب فازها و محاسبه فاز لحظه‌ای طیف دامنه هر ایستگاه، نسبت طیف دامنه‌های هر ده جفت‌ایستگاه مورد مطالعه، با نرم‌افزار، محاسبه و رسم شد (شکل ۱۰). در بازه زمانی مطالعه‌شده در این مقاله (۷ تا ۱۵ مه ۲۰۰۸)، دو رویداد آتشفشانی شدید که با وقوع طوفان‌های لرزه‌ای همراه بودند، در آتشفشان اتنا رخ داده است. در روز هشتم ماه مه، یک طوفان لرزه‌ای در امتداد شکاف شمال شرقی کوه اتنا آغاز و انتشار گازه‌ها از دهانه‌های جنوب شرقی و شمال شرقی مشاهده شد. در دهم ماه مه، یکی از شدیدترین مراحل انفجاری از سال ۲۰۰۳ تا آن زمان، در کوه اتنا رخ داد که به فوران توده‌های خاکستر و مهاجرت ماگما به سمت شمال منجر و باعث ایجاد شکاف جدیدی در دهانه شرقی آتشفشان شد. سه روز پس از این انفجار، فوران اصلی در روز ۱۳ مه رخ داد.

همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، اولین تغییرات

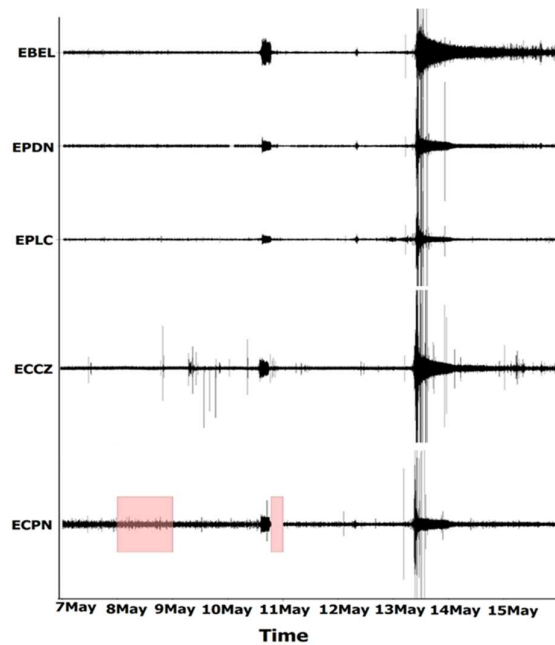
داده‌ها، شکل موج هر ایستگاه، جداگانه رسم شد (شکل ۵). همان‌طور که در شکل مشهود است، غیر از ایستگاه‌های EPDN و ECPN که در بازه زمانی کوتاهی داده نداشتند، داده‌های سایر ایستگاه‌ها پیوسته بود و کیفیت مطلوبی داشتند. پس از رسم شکل موج، به ترتیب مراحل حذف پاسخ دستگاهی، حذف میانگین، روند، فیلتر لرزه‌نگار، بهنجارسازی در حوزه زمان و سفید کردن طیف با نرم‌افزار انجام شد. این روال برای داده‌های هر روز جداگانه اعمال شد و داده‌های با دقت کمتر از ۸۰ درصد حذف شدند. شکل ۶ مراحل آماده‌سازی و پردازش داده‌ها و همچنین مراحل محاسباتی نسبت طیف دامنه‌ها را با استفاده از نرم‌افزار MSnoise در قالب یک نمودار نشان می‌دهد.



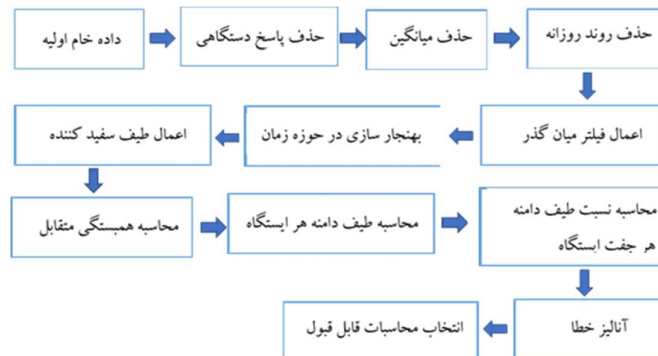
شکل ۴. موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌ای مورد مطالعه (به‌نکه و همکاران، ۲۰۰۹).

۵ نتایج و یافته‌ها

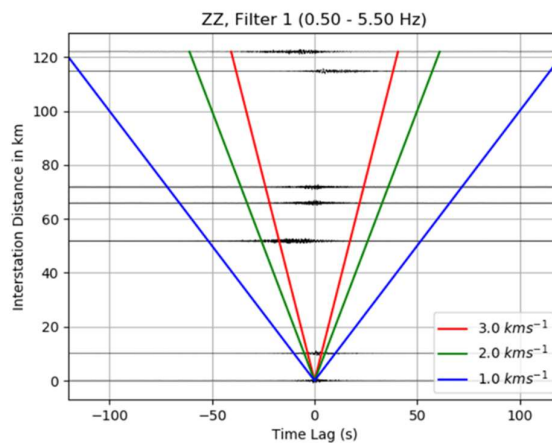
پس از آماده‌سازی و پردازش اولیه، همبستگی متقابل مؤلفه‌های قائم داده‌ها برای تمام روزهای مورد نظر محاسبه و تغییرات سرعت و نسبت طیف دامنه‌های تمام ایستگاه‌ها، به‌عنوان دو پیش‌نشانگر مستقل، بررسی شد. برای این



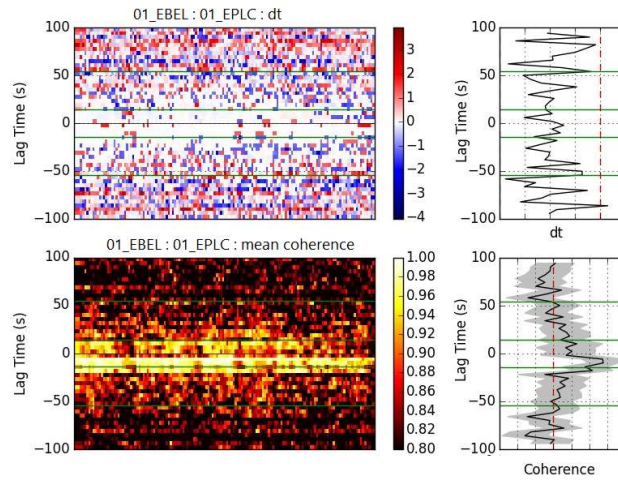
شکل ۵. شکل موج داده‌های خام ثبت شده در پنج ایستگاه مورد مطالعه.



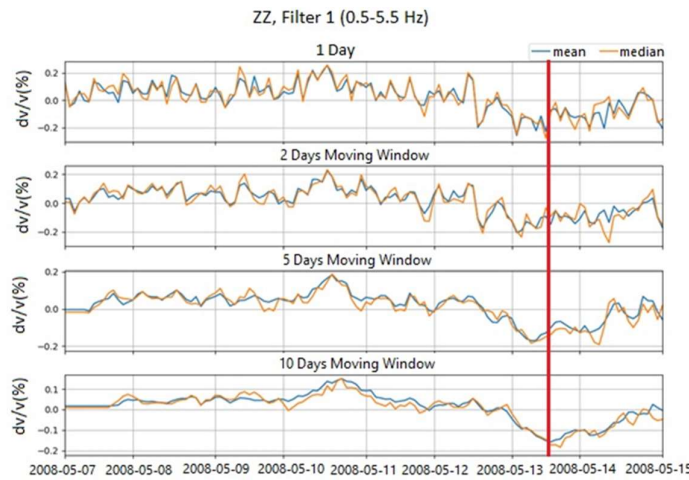
شکل ۶. نمودار آماده‌سازی و پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSNoise.



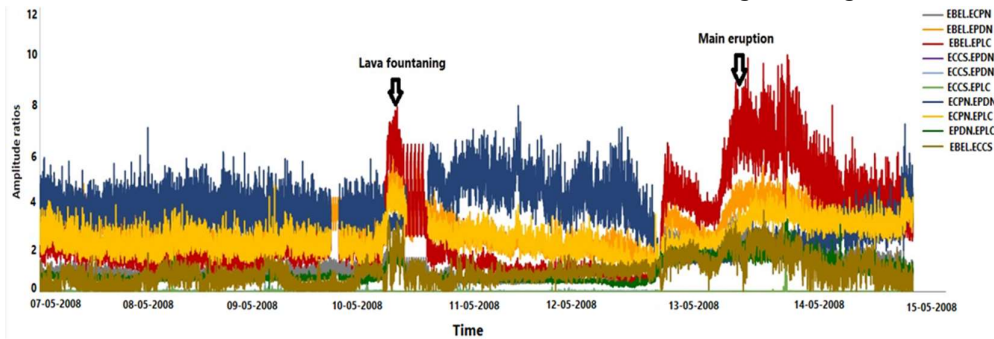
شکل ۷. نمودار تابع گرین از مؤلفه‌های عمودی تمام جفت ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدود فرکانسی فیلتر شده بین ۰/۵ تا ۵/۵ هرتز. محور عمودی نشان‌دهنده فاصله بین ایستگاه‌ها و محور افقی بیانگر تأخیر زمانی محاسبه شده است.



شکل ۸ این نمودار نتیجه محاسبات MWCS برای جفت‌ایستگاه EBEL و EPLC را در دو تصویر جداگانه نشان می‌دهد. تصویر سمت چپ بالا، dt محاسبه‌شده را در مقابل تأخیر زمانی و تصویر سمت چپ پایین، dt محاسبه‌شده را در مقابل میانگین همدوسی نشان می‌دهد. تصویر با برآیند افقی MWCS پنج‌روزه ساخته شده است. دو تصویر سمت راست، میانگین و انحراف استاندارد را در هر تأخیر زمانی کل تصویر نشان می‌دهند. تأخیرهای زمانی انتخاب‌شده برای محاسبه dt/t با خطوط افقی سبز و حداقل همدوسی یا حداکثر dt با رنگ قرمز مشخص شده است.



شکل ۹. تغییرات سرعت محاسبه‌شده از مؤلفه‌های قائم نوفه‌های لرزه‌ای محیطی جفت‌ایستگاه EBEL و EPLC آتشفشان Etna در ایتالیا، برای روزهای مختلف و برآیند آن، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ روزه. فوران در تاریخ ۱۳ مه ۲۰۰۸ رخ داده است که با خط عمودی قرمز رنگ مشخص شده است.



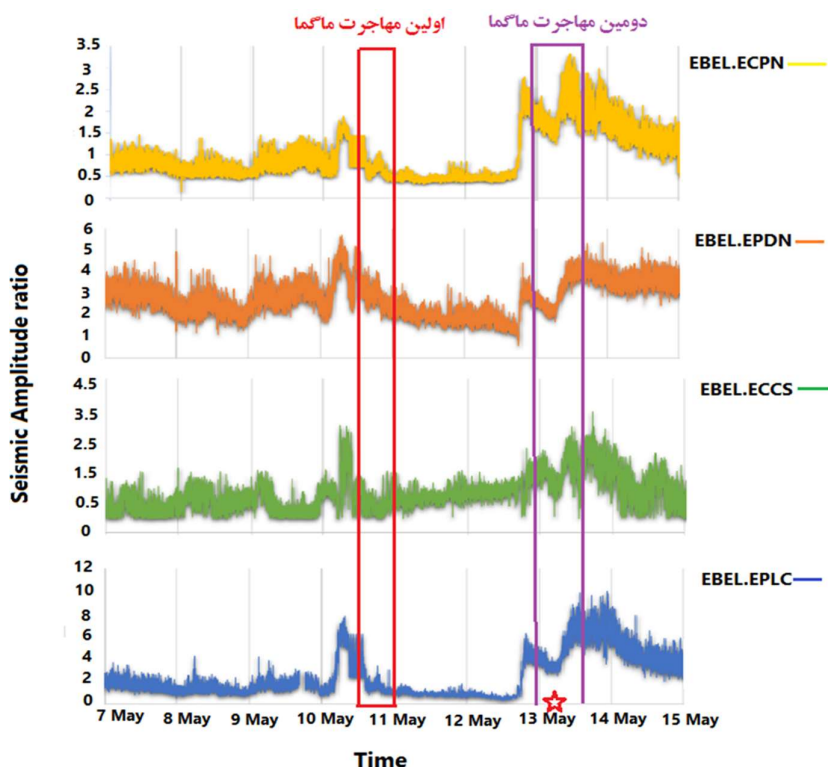
شکل ۱۰. نمودار تغییرات طیف نسبت دامنه‌های ده جفت‌ایستگاه در بازه زمانی ۷ تا ۱۵ مه ۲۰۰۸. فوران گدازه در روز ۱۰ مه و فوران اصلی در روز ۱۳ مه رخ داده است.

۶ تحلیل نتایج با استفاده از آزمون من- کندال

در این قسمت برای تحلیل وجود یا نبود روند در سری زمانی نسبت طیف دامنه‌های هر جفت ایستگاه، از آزمون من- کندال استفاده و شیب خط روند با استفاده از آزمون شیب تخمین گر سن (Sens slope) محاسبه شد (سن، ۱۹۶۳). آزمون من- کندال آزمونی ناپارامتریک است که آن را من در سال ۱۹۴۵ ارائه کرد و کندال در سال ۱۹۷۵ بسط داد. این آزمون بر مبنای مقایسه فرض صفر و یک است (H_0 و H_1) و بررسی می‌کند که فرض صفر را بپذیرد یا رد کند. در اینجا فرض صفر بر تصادفی بودن و نبود روند معنادار در سری زمانی داده‌ها دلالت دارد. رد کردن فرض صفر (H_0) به معنای پذیرش فرض یک (H_1) و نشان‌دهنده وجود روند مشخصی در سری داده‌ها است (کندال و همکاران، ۱۹۶۲).

در نسبت دامنه‌های بیشتر جفت ایستگاه‌ها در روز ۱۰ مه، هم‌زمان با انفجار اولیه ماگما صورت گرفته است سپس این نسبت به حالت عادی برگشته و در روز قبل از فوران (۱۲ مه) دوباره روند افزایشی خود را آغاز و در هنگام فوران، این روند افزایشی به اوج خود رسیده است.

برای بررسی دقیق‌تر، ایستگاه EBEL که نزدیک‌ترین ایستگاه به محل فوران است، ایستگاه مرجع فرض و نسبت طیف دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده در این ایستگاه مرجع به طیف ثبت شده در چهار ایستگاه دیگر (EPDN، EPLC، ECPN و ECCS) محاسبه و رسم شد (شکل ۱۱). در این بازه زمانی، دو بار مهاجرت ماگما رخ داده است که چندین ساعت قبل از هر دو، شروع روند افزایشی در نسبت دامنه‌ها در شکل ۱۱ به‌طور محسوس دیده می‌شود.



شکل ۱۱. نسبت طیف دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده چهار ایستگاه (EPLC، ECPN، EPDN) به ایستگاه مرجع (EBEL). بازه زمانی مرتبط با اولین مهاجرت ماگما با مستطیل قرمز رنگ و دومین مهاجرت که به فوران اصلی منجر شده است، با مستطیل بنفش رنگ مشخص شده است. زمان فوران اصلی نیز با ستاره قرمز نشان داده شده است.

همان‌طور که در این جدول مشهود است، مقدار احتمال (P value) برای τ جفت از ده جفت ایستگاه از مقدار α کمتر است که نشانه وجود روندی مشخص در سری زمانی داده‌ها است و فقط در یک جفت ایستگاه (ECPN.EPLC) مقدار ضریب P از α کمتر است که نشانه نبود روند مشخص در داده‌های این جفت ایستگاه است که احتمالاً به دلیل فاصله نسبی بیشتر این ایستگاه‌ها از محل فوران است. از طرفی، با توجه به مثبت بودن علامت ضریب همبستگی کندال (τ) در همه جفت ایستگاه‌ها، روندها صعودی است که مقدار شیب آنها نیز با استفاده از آزمون شیب سن تعیین شده است و روند افزایشی داده‌ها را تأیید می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت در ۹۰ درصد جفت ایستگاه‌های مورد مطالعه، روند افزایشی معنی‌داری در نسبت دامنه‌ها در روز فوران و روز قبل از آن، با سطح احتمالاتی ۰/۰۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۲. ضرایب محاسبه‌شده آزمون من-کندال و آزمون تخمین شیب سن برای تحلیل روند نسبت دامنه‌های همه جفت ایستگاه‌های مورد مطالعه.

نام جفت - ایستگاه‌ها	مقدار احتمال (P-Value)	(ضریب همبستگی کندال) τ	شیب سن (Sen's slope)
EBEL.ECPN	<۰/۰۰۰۱	۰/۴۹۸	۰/۴۸۸
EBEL.EPDN	<۰/۰۰۰۱	۰/۱۸۲	۰/۲۶۱
EBEL.EPLC	<۰/۰۰۰۱	۰/۲۰۸	۰/۸۵۸
ECCS.ECPN	<۰/۰۰۰۱	۰/۱۵۴	۰/۰۰۱
ECCS.EPDN	<۰/۰۰۰۱	۰/۱۴۷	۰/۰۱
ECCS.EPLC	<۰/۰۰۰۱	۰/۱۴۶	۰/۰۱
EPDN.ECPN	<۰/۰۰۰۱	۰/۵۶۰	۰/۲۹۵
ECPN.EPLC	۰/۸۹۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
EPDN.EPLC	<۰/۰۰۰۱	۰/۳۴۹	۰/۵۴۹
EBEL.ECCS	<۰/۰۰۰۱	۰/۲۶۶	۰/۸۳۱

در مرحله بعدی، از آزمون نموداری من-کندال استفاده و نمودار سری زمانی داده‌های هر جفت ایستگاه، جداگانه برای روز فوران (۱۳ مه ۲۰۰۸) و روز قبل از آن رسم شد.

ضریب همبستگی کندال را کندال در سال ۱۹۳۸ معرفی کرد که به تائید کندال (Kendall's correlation coefficient) مشهور است و با حرف τ نمایش داده می‌شود. این شاخص برای سنجش همبستگی آماری و میزان وابستگی بین دو متغیر تصادفی به کار می‌رود. برای محاسبه این ضریب در حالت کلی، فرض می‌شود زوج‌های $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ متغیرهای X و Y را تشکیل می‌دهند. اگر $x_i < x_j$ باشد آنگاه $y_i < y_j$ شود، آن زوج را هماهنگ (concordant) و در غیر این صورت، ناهماهنگ (discordant) می‌گویند. در این صورت اگر داده‌های زوج (x_i, y_i) و (x_j, y_j) بر اساس یکی از مؤلفه‌ها مرتب شود و رتبه‌های یکسانی داشته باشند، ضریب همبستگی کندال از رابطه (۶) به دست می‌آید (تینگ تان و همکاران، ۲۰۱۹):

$$\tau = (|Con| - |Dis|) / (1/2n(n-1)) \quad (6)$$

که $|Con|$ نمایانگر تعداد جفت ایستگاه‌های هماهنگ، $|Dis|$ نشان‌دهنده تعداد جفت ایستگاه‌های ناهماهنگ و n تعداد کل نقاط داده است. از آنجا که مخارج این کسر همواره از صورت آن بزرگ‌تر است، ضریب تائید کندال همیشه بین +۱ و -۱ است که این دو مقدار به ترتیب نشانه تطابق کامل و نبود تطابق کامل دو سری زمانی است. اگر دو سری از هم مستقل باشند، مقدار این ضریب نزدیک به صفر خواهد بود. اگر علامت ضریب تائید کندال مثبت باشد، روند داده‌ها صعودی و اگر این ضریب منفی باشد، روند نزولی در سری داده‌ها مشاهده خواهد شد.

مقدار احتمال (P value) شاخص دیگری است که در تحلیل این آزمون استفاده می‌شود. اگر مقدار احتمال از مقدار سطح احتمالاتی آزمون (α) کمتر باشد، نشان‌دهنده وجود روند در سری داده‌ها است.

در مرحله اول، آزمون آماری من-کندال با سطح اطمینان ۹۵ درصد (سطح احتمالاتی $\alpha = 0/05$) برای هر ده جفت ایستگاه مورد مطالعه اجرا شد. ضرایب و نتایج محاسبات آماری این آزمون در جدول ۲ آورده شده است.

نسبت در دو جفت ایستگاه دیگر (EBEL/EPLC و EBEL/EPDN) ابتدا کاهش به نسبت شدیدی را نشان می‌دهد و سپس دوباره مطابق با جریان‌های گدازه افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). مشاهدات نشان می‌دهند قبل از فوران، لرزه‌خیزی در حال مهاجرت به سمت ایستگاه EBEL است که نزدیک‌ترین ایستگاه به محل فوران است (شکل ۴ را برای موقعیت ایستگاه EBEL ببینید). از آنجا که محل فوران مشخص است، می‌توان مسیر احتمالی ماگما را تعیین کرد. افزایش مداوم نسبت EPDN/EPLC در روز فوران (شکل ۱۳) که مصادف با شروع ازدحام لرزه‌ای است، احتمال مهاجرت عمودی ماگما را بین این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. از طرفی، در ایستگاه‌های دیگر در همان دوره نسبت‌ها کاهش می‌یابد که می‌تواند نشانه‌ای از مهاجرت جانبی ماگما به ایستگاه EBEL باشد. مسیر احتمالی ماگما که با این روش تعیین شده است، با مطالعات قبلی در این زمینه مطابقت دارد (بناکورسو و همکاران، ۲۰۱۱؛ آلویسی و همکاران، ۲۰۰۹ و واندرمن، ۲۰۰۹).

یکی از محدودیت‌های این روش، تشخیص تغییرات نسبت دامنه‌ها به صورت چشمی و کیفی است. اگر تغییرات صورت گرفته در نسبت دامنه‌ها ناگهانی و واضح باشند، می‌توان به صورت ظاهری و از روی نمودارها آن را تشخیص داد، اما برای تغییرات کمتر و همچنین نسبت سیگنال به نوفه پایین‌تر، تشخیص ظاهری دقت کافی را ندارد. در این پژوهش برای برطرف کردن این محدودیت، آزمون تحلیل روند سری‌های زمانی من-کندال هم به صورت آماری و هم به صورت گرافیکی به کار رفت. همچنین از آزمون تخمین شیب روند سن برای کمی کردن نتایج استفاده شد. نتایج هر دو آزمون روند افزایشی نسبت دامنه‌ها را در ۹۰ درصد جفت ایستگاه‌ها از یک روز قبل از فوران اصلی تأیید کردند.

نتایج مطالعه حاضر، پتانسیل این روش را برای شناسایی روند مهاجرت ماگما و به دنبال آن، مهاجرت لرزه‌ای و

نتایج آزمون نموداری نیز روند صعودی در نسبت دامنه‌های اکثر جفت ایستگاه‌ها را به خوبی تأیید می‌کند. در شکل ۱۲، نتایج این آزمون نموداری برای سه جفت ایستگاه نزدیک‌تر به محل فوران نشان داده شده است.

۷ بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای محاسبه و پایش هم‌زمان تغییرات سرعت نسبی و نسبت دامنه امواج لرزه‌ای به عنوان دو پیش‌نشانگر آتشفشانی معرفی شده است. نتایج، حاکی از کاهش سرعت نسبی امواج تا حدود ۰/۲ درصد و افزایش معنی‌دار نسبت دامنه امواج لرزه‌ای در ۹۰ درصد جفت ایستگاه‌ها قبل از فوران آتشفشان است.

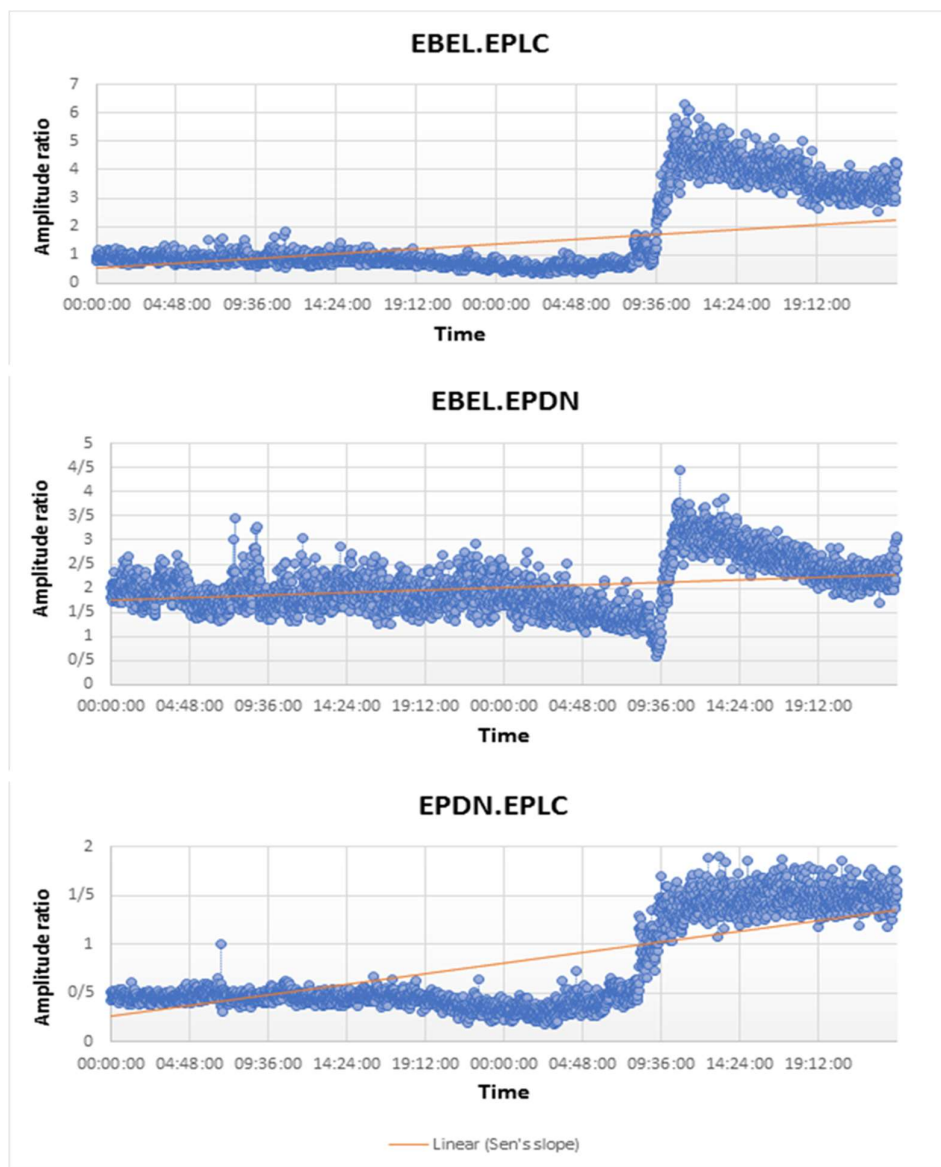
این روش برای داده‌های واقعی پنج ایستگاه لرزه‌نگاری در نزدیکی کوه اتنا در یک بازه زمانی کوتاه (۸ روز) استفاده شد. علی‌رغم محدود بودن داده‌ها، نتایج امیدوارکننده بود. یکی از مزایای این روش این است که با داده‌های محدود و تعداد ایستگاه‌های کم نیز می‌توان آن را اجرا کرد و برای مکان‌هایی که فاقد شبکه لرزه‌ای گسترده هستند نیز کاربرد دارد.

در تجزیه و تحلیل نسبت‌های دامنه لرزه‌ای برای پنج ایستگاه مورد استفاده، در دو بازه زمانی مختلف، تغییرات موقتی و محسوسی در نسبت دامنه‌ها مشاهده شد (شکل ۹). اولین تغییر درخور توجه در ۱۰ مه، هم‌زمان با فوران گدازه در دهانه شرقی آتشفشان دیده شد و دومین مرحله تغییرات ناگهانی در نسبت دامنه‌ها، بین ۱۲ و ۱۳ مه، از سه ساعت قبل از فوران اصلی شروع شد و پس از فوران، دوباره به تدریج به سطح اولیه خود بازگشت. پرائرژی‌ترین مرحله در ساعت ۱۰:۰۰ (GMT) در ۱۳ مه، مصادف با یک طوفان لرزه‌ای قوی رخ داد که در ساعت ۸:۴۰ (GMT) آغاز شده بود (الویسی و همکاران، ۲۰۰۹).

با شروع این طوفان لرزه‌ای، نسبت دامنه‌ها در جفت ایستگاه EPDN/EPLC افزایش یافته است، اما این

لرزه‌ای، روش مذکور می‌تواند برای نظارت مداوم بر آتشفشان‌ها مفید باشد. از این روش می‌توان برای پایش پیوسته تغییرات زمین و به‌عنوان پیش‌نشانگر وقوع زلزله نیز استفاده کرد.

همچنین تعیین درصد تغییرات سرعت قبل از فوران نشان می‌دهد. با توجه به پیوستگی نوفه‌های محیطی و نیاز نداشتن به وقوع فوران یا طوفان‌های لرزه‌ای و همچنین سادگی و سریع بودن این نرم‌افزار در ارائه هم‌زمان دو پیش‌نشانگر



شکل ۱۲. نمودار سری زمانی نسبت طیف دامنه‌های سه جفت‌ایستگاه با رسم شیب سن برای روزهای ۱۲ و ۱۳ مه ۲۰۰۸.

منابع

- سیروس، ن.، ۱۳۹۸، بررسی تغییرات ناهمسانگردی قبل از زلزله ۳۱ تیرماه ۱۳۹۷ تازه آباد کرمانشاه با استفاده از توموگرافی نوفه‌های محیطی: پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Allard, P., Behncke, B., Amico, S. D., Neri, M., and Gambino, S., 2006, Mount Etna 1993-2005: anatomy of an evolving eruptive cycle: *Earth-Science Reviews*, **78**, 85-114, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.04.002>.
- Aloisi, M., Bonaccorso, A., Cannavò, F., Gambino, S., Mattia, M., Puglisi, G., and Boschi, E., 2009, A new dyke intrusion style for the Mount Etna May 2008 eruption modelled through continuous tilt and GPS data: *Terra Nova*, **21**(4), 316-321, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00889.x>.
- Alparone, S., Barberi, G., Cocina, O., Giampiccolo, E., Musumeci, C., and Patané, D., 2012, Intrusive mechanism of the 2008–2009 Mt. Etna eruption: Constraints by tomographic images and stress tensor analysis: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **229–230**, 50-63, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.001>.
- Battaglia, J., and Aki, K., 2003, Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **108**(B8), 615–631, <https://doi.org/10.1029/2002JB002193>.
- Behncke, B., Falsaperla, S., and Pecora, S., 2009, Complex magma dynamics at Mount Etna revealed by seismic, thermal, and volcanological data: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, **114**, B03211, doi:10.1029/2008JB005882.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M., Barmin, M. P., et al., 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements: *Geophysical Journal International*, **169**(3), 1239-1260, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x>.
- Bonaccorso, A., Cannata, A., Corsaro, R. A., Di Grazia, G., Gambino, S., Greco, F., Miraglia, L., and Pistorio, A., 2011, Multi-disciplinary investigation on a lava fountain preceding a flank eruption: The 10 May 2008 Etna case: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**(7), <https://doi.org/10.1029/2010GC003480>.
- Caudron, C., Taisne, B., Kugaenko, Y., and 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, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.010>.
- Chaves, E. J., and Schwartz, S. Y., 2016, Monitoring transient changes within overpressured regions of subduction zones using ambient seismic noise: *Science Advances*, **2**, e1501289–e1501289, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501289>.
- Clarke, D., Zaccarelli, L., Shapiro, N. M., and Brenguier, F., 2011, Assessment of resolution and accuracy of the Moving Window Cross Spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise: *Geophysical Journal International*, **186**(2), 867-882, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05074.x>.
- De Plaen, R. S. M., Cannata, A., Cannavo, F., Coentlin, C., Lecocq, T., and Francis, O., 2019, Temporal changes of seismic velocity caused by volcanic activity at Mt. Etna revealed by the autocorrelation of ambient seismic noise: *Frontiers in Earth Science*, **6**, 251, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00251>.
- Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M., and Minner, L., 2003, SAC2000: signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, in Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C., eds., invited contribution to The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology: London, Academic Press.
- 62**(2), <https://doi.org/10.4401/ag-8049>.
- Herrmann, RB., 2002, Computer Programs in Seismology, [Available from: <http://www.eas.slu.edu/eqc/eqccps.html>].
- ربیع‌نژاد، ج.، رحیمی، ح.، ملکی، ب.، ۱۳۹۹، پایش تغییرات سرعت زلزله هجدک منطقه کرمان با استفاده از روش طیف متقابل پنجره متحرک و فاز وزنی: مجموعه مقالات نوزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۲۴۴–۱۲۴۸.

- Kendall, M.G., 1962. Rank correlation methods (No. 310/K23).
- Langer, H. S., Falsaperla, M., Masotti, R., Campanini, S., Spampinato, and Messina, A., 2009, Synopsis of supervised and unsupervised pattern classification techniques applied to volcanic tremor data at Mt. Etna, Italy: *Geophysical Journal International*, **178**(2), 1132-1144, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04179.x>.
- Lecocq, T., Caudron, C., and Brenguier, F., 2014, MSNoise, a Python package for computing and monitoring seismic velocity changes using ambient noise: *Seismological Research Letters*, **85**, 715-726, <https://doi.org/10.1785/0220130073>.
- Meier, U., Shapiro, N. M., and Brenguier, F., 2010, Detecting seasonal variations in seismic velocities within Los Angeles basin from correlations of ambient seismic noise: *Geophysical Journal International*, **181**(2), 985-996, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04550.x>.
- Nunnari, G., 2021, Clustering activity at Mt. Etna based on volcanic tremor: A case study: *Earth Science Informatics*, **14**(6572), 1-23, <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00606-5>.
- Ratdomopurbo, A., and Poupinet, G., 1995, Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: Application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia): *Geophysical Research Letters*, **22**(7), 775-778, <https://doi.org/10.1029/95GL00302>.
- Sen, P.K., 1963, On the estimation of relative potency in dilution (-direct) assays by distribution-free methods: *Biometrics*, **19**, 532-52.
- Ting Tan, C., Taisne, B., Neuberg, J., and 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>.
- Wunderman, R., 2008, Global Volcanism Program, Report on Etna (Italy): *Bulletin of the Global Volcanism Network*, **33**(5), <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN200805-211060>.
- Yukutake, Y., Ueno, T., and Miyaoka, K., 2016, Determination of temporal changes in seismic velocity caused by volcanic activity in and around Hakone volcano, central Japan, using ambient seismic noise records: *Progress in Earth and Planetary*, **3**(1), 29, <http://doi.org/10.1186/s40645-016-0106-5>.

Volcano monitoring with simultaneous analysis of amplitude ratio and velocity of ambient seismic noise

Ghazaleh Rasaneh¹, Alireza Hajian^{2*}, Maryam Hodhodi³, Roohollah Kimiaefar³ and Salvatore Gambino⁴

¹Ph.D. Student, Department of physics, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Associate professor, Department of physics, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³Assistant professor, Department of physics, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

⁴Assistant professor, National Institute of Geophysics and Volcanology, Catania, Italy

(Received: 12 July 2022, Accepted: 04 December 2022)

Summary

Volcanic eruptions are usually done by increasing magma pressure. Monitoring this process in real-time can provide useful information for predicting eruptions. The cross-correlation function of ambient seismic noises has been used many times to monitor the activity of volcanoes around the world. Still, this method is usually limited to volcanoes equipped with large networks and broadband stations.

In this article, a technique has been proposed that automatically and without the need for advanced equipment or lots of data can calculate a cross-correlation function of seismic waves, then using the calculated cross-correlation function, it analyzes and examines the temporary changes in the relative velocity of seismic waves as well as the anomaly of the amplitude ratio of continuous data recorded in all pairs of stations as two eruption attributes.

The SARA (Seismic Amplitude Ratio Analysis) method was used to investigate the changes in the amplitude ratio, and the MWCS (Moving-Window Cross-Spectral) method was used to calculate the relative speed of environmental seismic wave data. Both methods have been implemented using MSNoise software package.

In order to validate these methods, the continuous data of 5 seismic stations near Etna volcano in Italy were used. First, in order to process the data, daily vertical recordings of all stations were divided into 30-minute segments. Then, the segments were demeaned, tapered and normalized to three times the root-mean-square (RMS). Next, the daily cross-correlation between all pairs of stations was calculated and the cross-correlation function was filtered in different frequency ranges. Finally, the velocity variations were measured with the MWCS method. The results showed a decrease of about 0.2 percent in the velocity before the main eruption and an increase rapidly after the eruption.

In the second step, the amplitude ratio of all pairs of stations was calculated with the SARA method. The increasing trend of the amplitude ratio was observed from three hours before the main eruption. To quantify the results, the Mann-Kendall trend analysis test was used for all pairs of stations. By using Sen's slope estimation test, the slope value of each figure was calculated separately. The results showed a temporary increase in the seismic amplitude ratio in 90 percent of pairs of stations before the main eruption. Automatic and continuous measurement of these attributes and combining their results can show the potential of this method to improve volcano monitoring and eruption early warning for active volcanoes.

Keywords: Volcano monitoring, ambient seismic noises, Seismic Amplitude Ratio Analysis (SARA), velocity changes, MSNoise Python package