

مکان‌یابی مجدد سریع زمین‌لرزه با استفاده از شبکه عصبی - فازی آموزش‌دیده بر مبنای روش اختلاف زمانی دوگانه

حمیدرضا صمدی^۱، روح‌الله کیمیایی‌فر^{۲*} و علیرضا حاجیان^۲

^۱ گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه فیزیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده

یکی از مهم‌ترین پارامترهای زلزله‌شناسی، تعیین مرکز زمین‌لرزه است زیرا دقت مطالعات وابسته مانند تحلیل خطر زمین‌لرزه، سازوکار گسلش و ... همگی به دقت پارامتر یاد شده وابسته می‌باشند. روش اختلاف دوگانه یکی از روش‌های نسبی پرکاربرد مورد استفاده در مراکز زلزله‌شناسی می‌باشد. در این پژوهش، روش یاد شده مبنای ارائه الگوریتمی است که مکان‌یابی مجدد رویدادها را با سرعت نسبتاً بالا در حدود ۴ میلی‌ثانیه امکان‌پذیر می‌سازد. در این روش، شبکه استنتاج عصبی-فازی تطبیق‌پذیر (انفیس) بر مبنای کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی مجدد شده یک منطقه، آموزش داده شده و پس از وقوع هر رویداد جدید، صرفاً برای آن رویداد تعمیم می‌یابد. در آموزش شبکه پارامترهای مدل سرعتی یک‌بعدی، موقعیت مکانی رویدادهای کاتالوگ مبنای و نیز شبیه‌ترین رویدادهای مربوط به هر رویداد که توسط الگوریتم k نزدیک‌ترین همسایه مشخص شده‌اند، همگی، به‌عنوان داده ورودی و مختصات رویدادهای مکان‌یابی مجدد شده به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش، با استناد به داده‌های حدود ۸۰۰۰ زمین‌لرزه که به عنوان داده‌های آموزشی استفاده شده‌اند، داده‌های ۴۹۰ رویداد، مکان‌یابی مجدد شده و بررسی نتایج نشان‌دهنده خطای جذرمیانگین مربعات ۰/۰۰۲ برای طول و عرض جغرافیایی و ۰/۴۵ برای عمق رویدادها نسبت به روش اختلاف زمانی دوگانه می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

مکان‌یابی مجدد زلزله

شبکه انفیس

روش اختلاف دوگانه

تحلیل نزدیک به بلادرنگ

۱- پیش‌نوشتار

مکان‌یابی زمین‌لرزه یکی از پایه‌ای‌ترین و مهمترین مسائل زلزله‌شناسی است و تعیین محل دقیق زمین‌لرزه، داده ورودی بسیاری از پژوهش‌های دیگر زلزله‌شناسی مانند تحلیل خطر زمین‌لرزه و تعیین ساختار درونی زمین است (Kamranzad et al., 2020; Ghayoumian and Fatahi, 2003). به‌طور مرسوم، مکان وقوع زمین‌لرزه توسط اپراتور شبکه لرزه‌نگاری، چند دقیقه پس از وقوع زمین‌لرزه محاسبه شده و به اطلاع مقامات محلی رسانده می‌شود. این گزارش اولیه در مورد مرکز و رومرکز، بر مبنای اطلاعات مربوط به زمین‌لرزه مثل شکل موج و زمان رسید فازهای امواج است و معمولاً در پایگاه داده‌های زمین‌لرزه به‌منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه منطقه و همچنین تعیین ساختار زمین‌شناسی منطقه ثبت و بایگانی می‌شود. فرایند یاد شده، خودکار یا دستی یا ترکیبی از هر دو بوده و از طریق روش معکوس و بر مبنای مدل سرعتی مشخص برای منطقه زلزله به وقوع پیوسته انجام می‌شود (Geiger, 1910; Douglas, 1967; Kayal, 2008).

به سبب وجود ساختارهای متنوع زمین‌شناسی، ناکارآمدی مدل‌های سرعتی مورد استفاده و همچنین تغییر در زمان رسید فازها و ارتباط آنها با یکدیگر، الگوریتم‌های تعیین مکان زلزله معمولاً فاقد قطعیت در تعیین مکان زمین‌لرزه می‌باشد (Pavlis, 1983; Husen and Hardebeck, 2010) و به‌عنوان یک نتیجه مستقیم، حتی

در مناطقی که از نظر ساختار زمین‌شناسی به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند نیز به‌سختی می‌توان زمین‌لرزه‌های رخ داده را به گسل‌های شناخته شده منطقه مرتبط نمود (Romanowicz, 2008). این مشکل امروزه به‌صورت مرسوم توسط به‌کارگیری روش‌های تعیین مکان مجدد زمین‌لرزه مرتفع می‌شود و معمولاً کاتالوگ‌های زلزله هر از چند گاهی مجدداً توسط الگوریتم‌های تعیین مکان مجدد تحلیل می‌شوند (Florez and Prieto, 2017). یک دسته از روش‌های مؤثر در تعیین مکان مجدد زمین‌لرزه، روش‌های نسبی تعیین مکان هستند که در آنها، مسئله مکان‌یابی هر زمین‌لرزه را نه به‌عنوان یک مسئله مجزا، بلکه به‌عنوان مکان‌یابی یک رویداد در میان سایر رویدادها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله روش‌های شناخته‌شده و مورد اقبال در این حوزه، روش ارائه شده توسط والدهازر (Waldhauser, 2000) است که بر مبنای تفاوت در زمان رسید فازها و زمان محاسبه شده آنها در یک کاتالوگ می‌باشد (Waldhauser, 2000; Wolf, 2002). با توجه به نیاز مبرم به اطلاعات صحیح هر رویداد جدید و نیز زمان‌بردن و وابستگی گزارش یاد شده به نظر متخصص تهیه آن، والدهازر (Waldhauser, 2009) روشی ارائه نمود که خروجی آن دست‌یابی به روشی نیمه بلادرنگ است که می‌تواند در زمان قابل قبول با جستجوی در پایگاه داده‌های مورد استفاده در تعیین مکان مجدد رویدادها، رویدادهای جدید را تعیین

سیرها از روی اختلاف زمانی دو زمین‌لرزه تعیین می‌شود، نمی‌توان به‌صورت مستقیم از معادله زیر استفاده کرد (Mottaghi et al., 2010).

$$\Delta d = G \Delta m \quad (2)$$

برای حل این مشکل، روش دیگری ابداع گردید که از اطلاعات مربوط به دو زمین‌لرزه استفاده می‌شود به‌عبارت دیگر معادله (۲) به‌صورت مستقیم با یک جفت زمین‌لرزه به شکل زیر به کار گرفته می‌شود (Frechet, 1985).

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (3)$$

که در آن:

$$\Delta m^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta t^{ij}) \quad (4)$$

می‌باشد که بیانگر اختلاف مکانی نسبی دو زمین‌لرزه می‌باشد (زمان وقوع زمین‌لرزه است). مشتقات جزئی نسبت به m عناصر بردار کندی مسیر موج از چشمه تا ایستگاه بوده و در چشمه محاسبه می‌شوند (Aki and Richards, 1980). نیز اختلاف بین زمان باقی‌مانده بین دو رویداد و همچنین اختلاف بین زمان مشاهده‌ای و محاسباتی می‌باشد که به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$dr^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (5)$$

معادله (۵) را معادله اختلاف زمانی دوگانه می‌نامیم که می‌توان آن را هم برای اختلاف زمان سیر مطلق و هم برای اختلاف زمانی نسبی داده‌های همبستگی عرضی به کار برد. بردار کندی در جفت زمین‌لرزه‌های کاملاً نزدیک به یکدیگر را ثابت در نظر می‌گیریم ولی در جفت زمین‌لرزه‌های دور از یکدیگر این شرط ثابت ماندن بردار کندی امکان‌پذیر نیست. در حالت کلی برای دو زمین‌لرزه i و j با بسط رابطه (۳) می‌توان نوشت (Waldhauser, 2000):

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta t^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta t^j = dr_k^{ij} \quad (6)$$

۲-۲- شبکه استنتاج عصبی- فازی تطبیق‌پذیر

معماری انفیس در سال ۱۹۹۳ توسط جانگ بیان شد (Jang, 1993). شبکه انفیس، سیستمی عصبی- فازی بر اساس یک پروسه آموزش ترکیبی است که ورودی‌ها را بر مبنای پایگاه قوانین اگر- آنگاه فازی به منظور تولید خروجی به کار می‌گیرد. این عملیات، بر مبنای به کارگیری توابع عضویت (membership functions) مناسب بر روی ورودی‌ها صورت می‌پذیرد (Hajian et al., 2016). با توجه به قابلیت بالای یادگیری شبکه‌های عصبی در حل مسئله و عملکرد مناسب سیستم‌های فازی در تعمیم آن، ترکیب این دو مفهوم، منجر به ایجاد یک ابزار مناسب حل مسئله است که در حوزه‌های متنوع، با سرعت بالا و دقت مناسب به کار برده می‌شود. الگوریتم انفیس بر مبنای سیستم فازی سوگنو (Takagi and Sugeno, 1985) بنا شده که در واقع یک الگوریتم پس انتشار مبتنی بر اندازه‌گیری حداقل مربعات است (Kimiaefar et al., 2018). در شکل ۱، نمونه‌ای از یک معماری پنج لایه از شبکه انفیس با دو قاعده اگر- آنگاه فازی به تصویر کشیده شده است.

مکان مجدداً کند. فرایند یاد شده در حدود چند ده ثانیه برای هر رویداد به درازا می‌انجامد (Waldhauser, 2009).

از آنجا که در روش اختلاف زمانی دوگانه، دسته‌ای از رویدادها همزمان مورد تحلیل واقع می‌شوند و این فرایند نمی‌تواند به‌صورت مستقل برای هر زلزله جدید تکرار شود، در این پژوهش، روشی ارائه شده که تعیین مکان رویداد جدید در آن، بر اساس آموزش شبکه استنتاج عصبی- فازی تطبیق‌پذیری می‌باشد. داده‌های آموزشی شبکه، داده‌های متناظر با مکان‌یابی مجدد رویدادهای اصلی تحلیل شده توسط روش اختلاف زمانی دوگانه می‌باشند. برتری روش یاد شده بر مبنای محاسبات کمتر برای دست‌یابی به خروجی نیمه بلادرنگ سریع‌تر می‌باشد. تعیین مکان مجدد یاد شده می‌تواند استفاده از روش در الگوریتم‌های هشدار زلزله را امکان‌پذیر ساخته و همچنین فرایند تهیه گزارش‌های زلزله را بهبود بخشد. در ادامه این مقاله، به ترتیب پس از اشاره اجمالی به روش اختلاف زمانی دوگانه و الگوریتم‌های هوشمند به کار رفته در این پژوهش، روش ارائه شده به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و سپس، با استفاده از داده‌های زمین‌لرزه‌های یک کاتالوگ مربوط به کشور آمریکا، آزمایشات صورت گرفته در خصوص عملکرد الگوریتم آورده و در نهایت نتایج آزمایشات مورد بررسی واقع شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

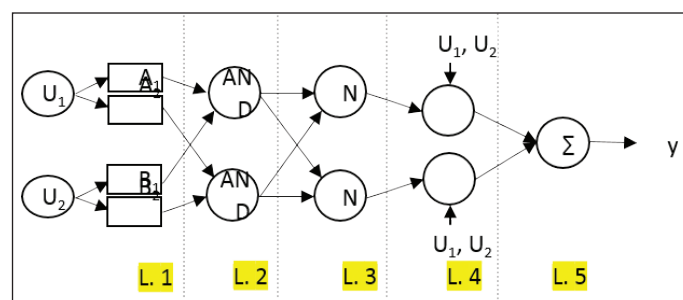
۲-۱- روش اختلاف زمانی دوگانه

روش اختلاف (زمانی) دوگانه روشی مؤثر است که به‌وسیله آن می‌توان مکان نسبی زمین‌لرزه‌ها را تخمین زد. در این روش زمان سیر امواج s و p همچنین اختلاف زمان باقیمانده مربوط به این امواج، برای جفت زمین‌لرزه‌ها و مربوط به یک ایستگاه مشخص تعیین می‌شود. مهم‌ترین توجیه استفاده از این روش نادیده گرفتن تأثیرات ساختار سرعتی برای رویدادهایی است که به یکدیگر نزدیک می‌باشند که این مسئله همان مشکلی ذاتی روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های گایگر (Geiger, 1910) و گات (Got, 1994) می‌باشد.

در روش اختلاف زمانی دوگانه، برای بیان رابطه بین اختلاف زمانی محاسبه شده و مشاهده شده برای جفت زمین‌لرزه‌ها از معادلات خطی مشابه معادلات گایگر استفاده می‌شود. زمان رسید (T) برای یک زمین‌لرزه (i) در یک ایستگاه (k) به‌صورت زیر بیان می‌شود (Geiger, 1910).

$$T_i = t + \int U ds \quad (1)$$

که در این معادله t زمان وقوع زمین‌لرزه نام است، u بردار کندی و ds المان مسیر موج است. به علت وجود رابطه غیر خطی بین مکان وقوع زمین‌لرزه و زمان سیر آن، از بسط تیلور برای بیان خطی‌سازی رابطه (۱) استفاده می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان معادله زیر را به‌صورت مستقیم برای زمان سیرهای مشخص استفاده کرد (Geiger, 1912) ولی در روش‌های همبستگی عرضی در خوانش فازها چون زمان

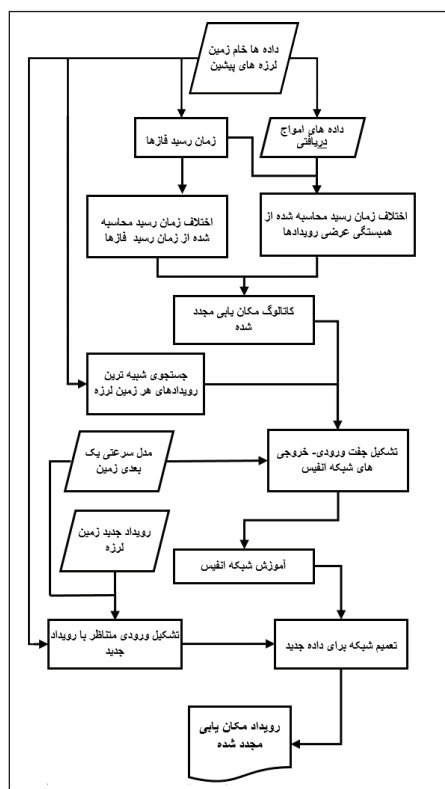


شکل ۱- معماری شماییک سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی پنج لایه با دو قاعده اگر و آنگاه فازی (Kimiaefar et al., 2018).

۳- مکان‌یابی بلادرنگ زمین‌لرزه با استفاده از شبکه انفیس

کاهش ابعاد ورودی‌های شبکه می‌باشد. در قدم بعدی، شبکه استنتاج عصبی- فازی تطبیق‌پذیر آموزش داده شده و در نهایت و در آخرین قدم، برای هر رویداد جدید، شبکه آموزش دیده بر روی ورودی تهیه شده متناظر با رویداد تعمیم داده می‌شود. با توجه به این که اساس روش اختلاف دو گانه مبتنی بر محاسبه اختلاف زمان رسید دو رویداد نزدیک به هم (شبهه به هم از لحاظ مرکز زلزله) می‌باشد، در روش ارائه شده در این پژوهش نیز، تهیه جفت ورودی- خروجی‌ها در الگویی مشابه بدین صورت بوده است که برای تهیه جفت داده‌های گفته شده، شبهه‌ترین داده‌ها، توسط الگوریتم جستجوی k نزدیک‌ترین همسایه (KNN search) انتخاب شده و در مجموعه داده‌های ورودی، به جای یک رویداد، دو رویداد مشابه با هم در فرایند آموزش شبکه مشارکت داده می‌شوند. این عمل همچنین در فرایند تعمیم شبکه برای داده‌های تست یا داده‌های جدید نیز تکرار می‌شود. فلوچارت روش ارائه شده در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

در روش ارائه شده در این پژوهش، از قابلیت بالای شبکه عصبی در حل مسئله و تخمین مدل، از سیستم استنتاج فازی در قابلیت بالای آن در تعمیم پاسخ مسئله و در نهایت و به عنوان هسته اصلی، از الگوریتم اختلاف دو گانه به عنوان یک روش مؤثر در مکان‌یابی نسبی زلزله استفاده شده است. در قدم اول، داده‌های مکان‌یابی مجدد یک کاتالوگ لرزه‌ای به عنوان داده مرجع یادگیری شبکه تهیه می‌شود. به منظور تهیه چنین کاتالوگی، داده‌های اولیه رویدادها که توسط تخمین زمان رسید فازهای لرزه‌ای تعیین مرکز شده‌اند را به صورت نسبی توسط روش اختلاف دو گانه، مکان‌یابی مجدد می‌کنیم. سپس، جفت ورودی- خروجی‌های شبکه عصبی را آماده‌سازی می‌کنیم. این مجموعه شامل داده‌های اولیه زمین‌لرزه‌ها (مکان‌یابی مجدد نشده)، شبهه‌ترین داده‌های متناظر با هر رویداد (از منظر مرکز زمین‌لرزه‌ها) و زمان فرضی رسید موج از مرکز تا رومرکز رویداد هستند که آخرین ورودی با استناد به مدل سرعتی یک بعدی زمین برای منطقه محاسبه شده است. تبدیل مدل سرعتی به زمان رسید موج به خاطر

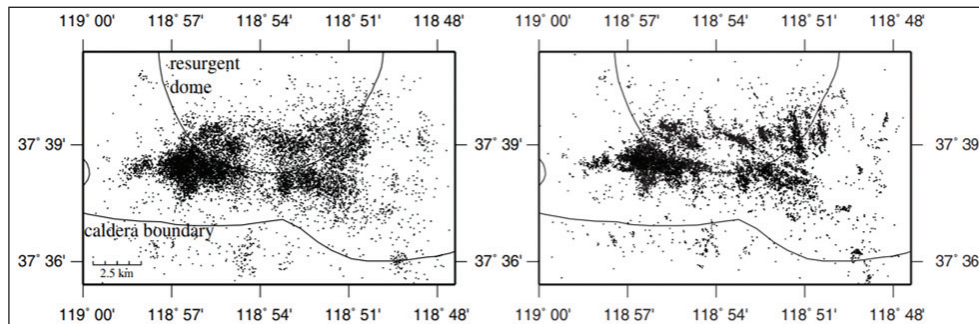


شکل ۲- روند نمای روش ارائه شده جهت تعیین مکان مجدد زمین لرزه به صورت بلادرنگ بر مبنای شبکه عصبی انفیس.

۴- کاتالوگ مبنای مورد استفاده

در این پژوهش، کاتالوگ مبنای مورد استفاده، مربوط به زمین لرزه‌های به وقوع پیوسته در منطقه لانگ ولی کلرادو در ایالت کالیفرنیا آمریکا می‌باشد. کاتالوگ یاد شده توسط مرکز داده‌های زمین لرزه کالیفرنیا شمالی (Northern California Earthquake Data Center, NCEC) گزارش شده و رویدادهای آن توسط پرچین و همکاران (Prejean et al., 2002) توسط الگوریتم اختلاف دو گانه مکان‌یابی مجدد شده‌اند. رویدادهای مد نظر، در فاصله زمانی جولای ۱۹۹۷ تا ژانویه ۱۹۹۸ روی داده و کاتالوگ اصلی شامل ۱۱۳۸۲ زمین لرزه با بزرگای بزرگ‌تر از ۱ می‌باشد. در فرایند تعیین مکان مجدد رویدادهای یاد شده، از شعاع ۴ کیلومتری هر رویداد

جهت انتخاب رویداد دوم (در الگوریتم اختلاف دو گانه) استفاده شده است. لازم به یادآوری است که مکان‌یابی اولیه رویدادهای یاد شده با استفاده از زمان رسید فازهای موج P در داده‌ها محاسبه شده و فرایند تعیین مکان اولیه در بستر نرم افزار HYPO71 صورت گرفته است. دلیل انتخاب داده‌های یاد شده، فشرده بودن ایستگاه‌های ثبت، دقت شبکه و نیز تعداد بالای رویدادهای ثبت شده به علت رژیم فعال لرزه‌ای حاکم بر منطقه است. رومرکز زلزله‌های کاتالوگ مورد استفاده پیش و پس از مکان‌یابی توسط روش اختلاف دو گانه در شکل ۳ به تصویر کشیده شده‌اند. کاهش پراکندگی رویدادها و به خط‌شدگی دسته‌ای آنها پس از تعیین مکان مجدد، قابل توجه می‌باشد.



شکل ۳- داده‌های کاتالوگ مبنای رکورد شده توسط مرکز داده‌های زمین لرزه کالیفرنیا شمالی پیش (بالا) و پس (پایین) از مکان‌یابی مجدد توسط روش اختلاف دو گانه.

۵- آماده‌سازی داده‌های ورودی شبکه

پیش‌پردازش داده‌ها شامل حذف داده‌های ناقص، حذف داده‌های مکان‌یابی مجدد نشده، بهنجارسازی داده‌های ورودی و نیز تغییر مدل سرعتی (باتوجه به ژرفای رویداد) به یک متغیر از جنس زمان می‌باشد. مدل سرعتی استفاده‌شده، یک مدل ۱۲ لایه است که جزئیات ژرفا و سرعت آن در جدول ۱ آورده شده‌اند. برای هر رویداد ثبت شده در کاتالوگ، از طریق رابطه (۷)، زمان سیر موج از مرکز تا رومرکز محاسبه شده است:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{v_i} \quad (7)$$

در این رابطه، v_i لایه‌ای است که مرکز زلزله در آن واقع شده و L_i به جای ستبرای لایه i ، فاصله مرکز تا مرز (بالایی) لایه در نظر گرفته می‌شود. چنانچه پیش‌تر گفته شد، تغییر متغیر اعمال‌شده باعث کاهش ابعاد ورودی خواهد شد و در این مثال، ۲۴ متغیر مربوط به ژرفا و سرعت لایه‌ها با یک متغیر زمانی جایگزین می‌شوند و این در حالی است که همچنان تأثیر فیزیک زمین در

محاسبات شبکه اعمال شده است. لازم به یادآوری است که ژرفای لایه آخر مربوط به مرز موهو می‌باشد.

۶- تعیین مکان مجدد زمین‌لرزه‌های جدید به صورت بلادرنگ

همانگونه که گفته شد، مکان‌یابی مجدد رویدادها منوط به آموزش شبکه عصبی-فازی می‌باشد. شبکه مورد استفاده در این پژوهش، یک شبکه انفیس با توابع ورودی سیگموئیدی، تابع خروجی خطی، سیستم استنتاج فازی سوگنو، سه تابع عضویت برای هر ویژگی و روش غیرفازی‌سازی میانگین متحرک بوده است. با توجه به محدودیت منابع محاسباتی (عدم دسترسی به کامپیوتر با توان محاسباتی و حافظه موقت بالا)، برای هر رویداد، شبیه‌ترین زلزله مشابه از بین داده‌های کاتالوگ در نظر گرفته شده و بنابر این هر جفت داده آموزشی شامل ۸ ورودی و ۳ خروجی خواهد بود که در جدول ۲ توضیحات مربوط به آنها آورده شده است.

جدول ۱- مدل سرعتی استفاده شده جهت مکان‌یابی مجدد و نیز تهیه ورودی زمان رسید پرتو موج P از مرکز به رومرکز.

شماره لایه	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	یازدهم	دوازدهم
عمق کران بالایی لایه (km)	0	1.0	2.0	3.0	5.0	7.0	10	14	18	30	50	50<
سرعت سیر موج P (km/s)	3.55	3.57	3.7	5.35	5.67	5.9	6.02	6.07	6.10	6.18	6.67	8.0

جدول ۲- جزئیات مربوط به هر جفت داده ورودی شبکه انفیس.

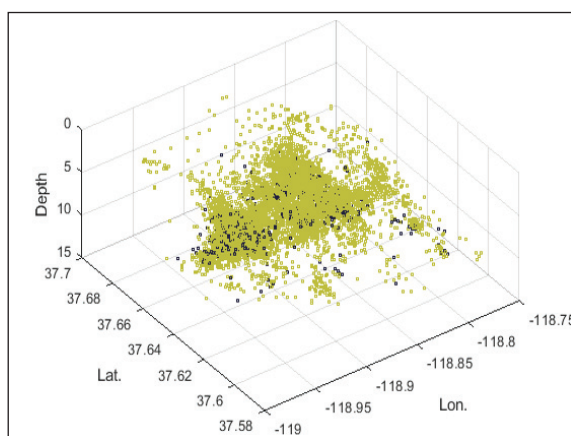
خروجی اول تا سوم	ورودی هفتم و هشتم	ورودی چهارم تا ششم	ورودی اول تا سوم
طول و عرض جغرافیایی و عمق رویداد مکان‌یابی مجدد شده	زمان سیر محاسباتی رویداد مرجع و شبیه‌ترین رویداد	طول و عرض جغرافیایی و عمق شبیه‌ترین رویداد	طول و عرض جغرافیایی و عمق رویداد مرجع

شبکه (برای ۳ شبکه مورد استفاده برابر ۳۰ تکرار در نظر گرفته است. مقدار کمینه خطای جذر میانگین مربعات برای آموزش شبکه متناظر با طول، عرض و ژرفا به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲۸۶۸، ۰/۰۰۲۸۱۶ و ۰/۴۵۶۳۸۴ به‌دست آمده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، مقدار خطای آموزش مربوط به پارامتر ژرفا بسیار بیشتر از مقادیر مربوط به پارامترهای رومرکزی است. این اختلاف آشکار ناشی از ذات آمیخته با خطای تخمین ژرفای رویدادهای زلزله است. میزان، تصادفی بودن (تحلیلی نبودن) یک داده می‌تواند پیش‌بینی پذیری و مدل شدن آن را توسط شبکه‌های عصبی دشوار سازد.

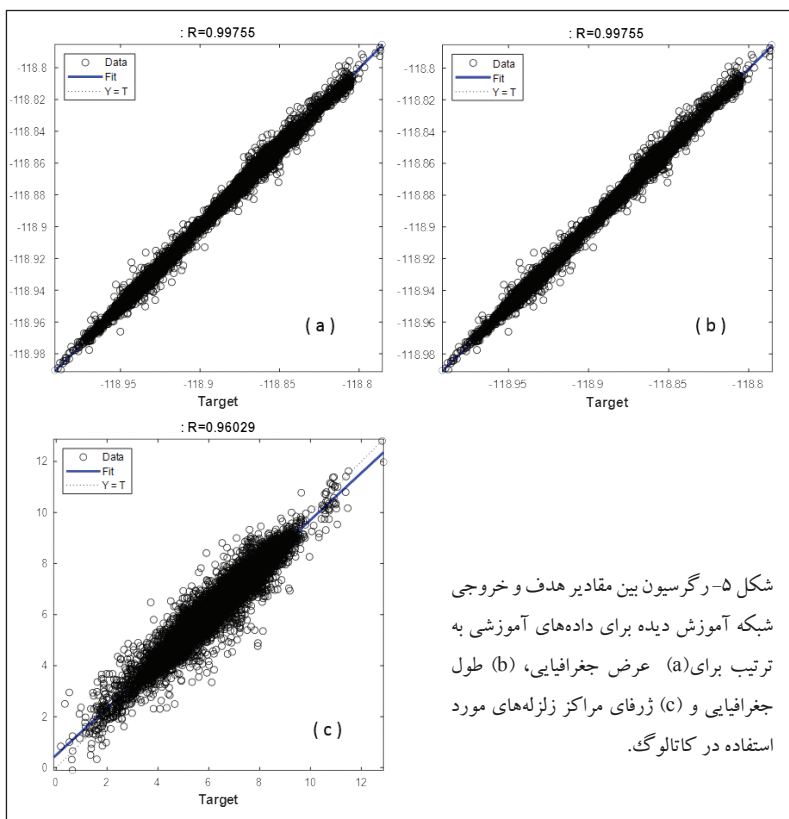
به صورت کلی، شبکه انفیس، یک شبکه تک خروجی است. بدین معنی اگر چه تعداد ورودی‌های شبکه به‌صورت تئوری محدود به عدد خاصی نیست، خروجی شبکه یک عدد بوده‌است. از این رو، آموزش شبکه به صورت جداگانه برای هر پارامتر خروجی صورت گرفته و برای پیش‌بینی هر خروجی، شبکه مخصوص به آن پارامتر فراخوانی می‌شود. از این رو، در این پژوهش ۳ شبکه انفیس برای طول، عرض و ژرفای رویدادها در نظر گرفته شده است که همه آنها با پارامترهای یاد شده، آموزش داده شده‌اند. برای آموزش شبکه خطای هدف برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده و تعداد اپک (epoch) به معنی تکرار تزریق داده‌ها به

بین داده‌های هدف و داده‌های خروجی شبکه (شکل ۵)، فرایند آموزش شبکه قابل قبول در نظر گرفته شد. خروجی تعمیم شبکه برای داده‌های ورودی آن در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. در این شکل، داده‌های هدف (آبی) و داده‌های خروجی (قرمز) جهت مقایسه بهتر، به صورت مجزا برای هر پارامتر خروجی نمایش داده شده‌اند. بررسی فرایند آموزش از لحاظ بیش‌آموزش‌یافتگی (Over-Trained) آن، توسط داده‌های آزمون صورت گرفت. نتیجه تعمیم شبکه بر روی داده‌های یاد شده، برای ۳ پارامتر خروجی در شکل ۶ آورده شده است. همچنین در این شکل، خطای جذر میانگین مربعات، محاسبه شده بین خروجی شبکه انفیس و الگوریتم اختلاف دوگانه، برای هر پارامتر آورده شده است و چنانچه مشاهده می‌شود، خطای یاد شده برای پارامترهای طول و عرض جغرافیایی در مقایسه با ژرفای مراکز زلزله بسیار پایین‌تر می‌باشد.

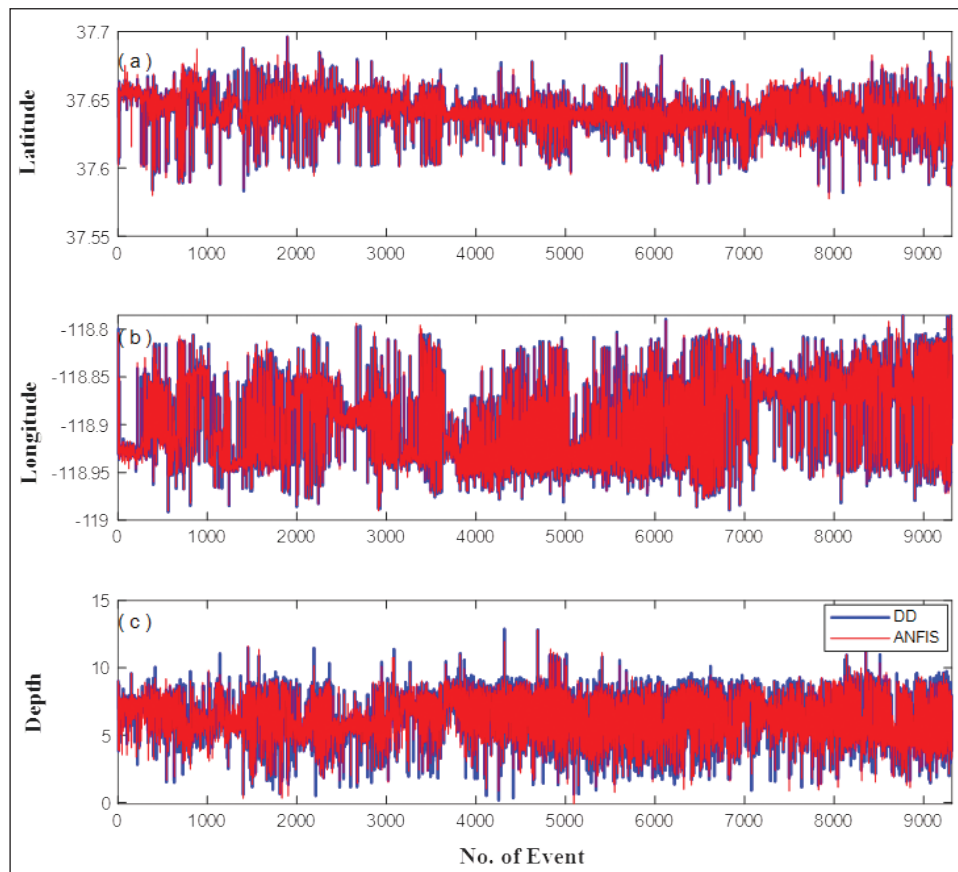
به‌منظور بررسی کمی شبکه آموزش دیده، پیش از آموزش شبکه، داده‌های ورودی آن به دو دسته داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون (test data) تفکیک گردید. لازم به تصریح است که داده‌های آزمون بر خلاف داده‌های اعتبار سنجی در خلال فرایند آموزش شبکه دخالت داده نشده و پس از آموزش شبکه، توسط تعمیم شبکه برای ورودی‌های داده‌های آزمون، خروجی متناظر با آنها به‌دست آورده شد. از میان ۹۸۰۸ زلزله انتخاب شده در این پژوهش، به صورت تصادفی ۴۹۰ رویداد (معادل گردشده ۵ درصد از حجم کلی داده‌ها) جهت آزمون شبکه آموزش دیده انتخاب شدند. داده‌های یاد شده در شکل ۴ با نقاط تیره نمایش داده شده‌اند. آموزش شبکه با مشخصات مورد اشاره برای داده‌های یاد شده، با یک کامپیوتر رومیزی با ۸ گیگابایت حافظه موقت، فرکانس محاسباتی ۲۲۰۰ مگاهرتز (در حالت تک هسته‌ای) ۳۸۲ دقیقه به طول انجامید. با توجه به تحلیل رگرسیون صورت گرفته



شکل ۴- مراکز زلزله کاتالوگ مورد استفاده که به دودسته داده‌های آموزشی (روشن) و داده‌های آزمون (تیره) تفکیک شده‌اند.



شکل ۵- رگرسیون بین مقادیر هدف و خروجی شبکه آموزش دیده برای داده‌های آموزشی به ترتیب برای (a) عرض جغرافیایی، (b) طول جغرافیایی و (c) ژرفای مراکز زلزله‌های مورد استفاده در کاتالوگ.



شکل ۶- عرض و طول جغرافیایی و ژرفا (به ترتیب a، b و c) مراکز رویدادهای استفاده شده در آموزش شبکه. مقادیر هدف که در واقع خروجی روش اختلاف زمانی دوگانه (DD) هستند به رنگ آبی و خروجی شبکه انفیس به رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند.

۶- بحث

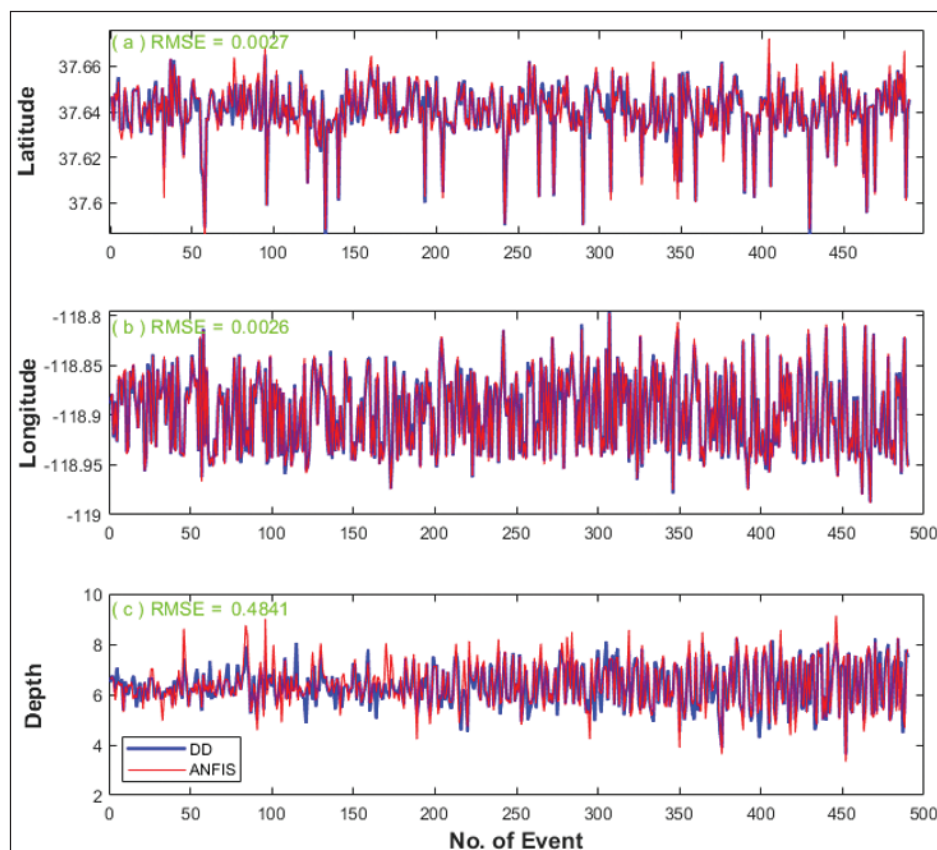
نداشته است و این در حالی است که برای ویژگی ژرفا که بر حسب کیلومتر گزارش شده است، میزان اختلاف در حد ۱/۵ کیلومتر برای رویدادی با بزرگای ۱/۶ که در گزارش اولیه در ژرفای ۷/۵۵ کیلومتری مکان‌یابی شده بوده است به چشم می‌خورد. با توجه به RMS گزارش شده در کاتالوگ در خصوص مکان‌یابی اولیه رویدادها که ارقامی در حد صدم اعشار می‌باشد، به نظر رابطه معنی‌داری بین خطای پیش‌بینی شبکه و مقدار یاد شده وجود ندارد. این مورد همچنین برای ارتباط بین ژرفای اولیه رویدادها نیز صدق می‌کند.

باید به این مسئله اشاره نمود که روش اختلاف دوگانه، خود دارای عدم قطعیت در ارائه خروجی است و این عدم قطعیت می‌تواند به صورت مثبت یا منفی در پیش‌بینی خروجی شبکه انفیس تأثیرگذار باشد. اگر مبنای سنجش خطا را روش اختلاف دوگانه در نظر بگیریم، در این صورت در خصوص دو ویژگی متناظر با رومرکز رویدادها، یعنی طول و عرض جغرافیایی، خروجی شبکه انفیس قابلیت اطمینان قابل قبولی داشته و خطای جذر میانگین مربعات برای این دو بعد، در حد سه هزارم واحد است (شکل ۷). این مسئله یک امتیاز قابل توجه برای روش ارائه شده در این پژوهش برای دسته‌ای از تحلیل‌های علم زلزله‌شناسی است. مثلاً در الگوریتم‌های مرتبط با حوزه پیش‌بینی زلزله مانند روش اطلاعات الگو (Radan et al., 2013) و یا دیگر تحلیل‌های وابسته به فاصله رومرکزی (Epicentral Distance) مانند تحلیل شتاب‌نگاشت‌ها و پژوهش‌های وابسته به آن (Grecksh and Kumpel, 1997)، اطلاعات مرکز جهت انجام پژوهش مورد استفاده واقع می‌شود.

در مجموع، فرایند تعمیم شبکه برای هر ۴۹۰ داده آزمون ۰/۱۰۲۱۴۵ ثانیه به درازا انجامیده و به صورت میانگین می‌توان به این نتیجه رسید که ارائه خروجی برای هر ورودی جدید در حدود ۰/۰۰۴ ثانیه زمان می‌برد. توجه شود که ارتباط بین حجم داده‌های ورودی و زمان به صورت خطی تغییر نمی‌کند و آماده‌سازی انجام محاسبات، همواره زمان ثابتی برای اجرا در رایانه نیاز خواهد داشت. آنچه که مسلم است، با توجه به زمان تعیین مکان مجدد برای هر رویداد جدید، این فرایند می‌تواند یک فرایند نزدیک به بلادرنگ در نظر گرفته شود و اگر زمان محاسبات روش اختلاف دوگانه را نیز در نظر بگیریم، روش ارائه شده از این نظر با اختلاف فراوان برتر خواهد بود. مسئله قابل تأمل در مقایسه دو روش یاد شده، خطای پیش‌بینی شبکه انفیس برای تعیین مکان مجدد رویدادهای کاتالوگ نسبت به روش اختلاف دوگانه است. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، ۲۰ رویداد از رویدادهای متعلق به داده‌های آزمون که در فرایند آموزش شبکه منظور نشده بوده‌اند، به صورت تصادفی انتخاب شده و در جدول ۳ اطلاعات مربوط به آنها شامل طول و عرض جغرافیایی مکان‌یابی اولیه (با پیشوند Orig)، مکان‌یابی توسط روش اختلاف دوگانه (با پیشوند DD) و نیز خروجی تعمیم شبکه آموزش یافته (با پیشوند Net)، بر روی آنها آورده شده است. همچنین میزان اختلاف بین مقادیر محاسباتی روش اختلاف دوگانه و خروجی شبکه به عنوان هدف و خروجی شبکه آورده شده است. بررسی اختلافات یاد شده نشان از تفاوت جزئی میان خروجی روش اختلاف دوگانه تعمیم شبکه دارد. در خصوص طول جغرافیایی بین دو مقدار یاد شده در حد هزارم اعشار، رقم معنی‌داری وجود

جدول ۳- اطلاعات مربوط به مکان‌یابی مجدد ۲۰ رویداد از مجموعه رویدادهای داده‌های آزمون.

Orig_Lat	Orig_Lon	Orig_Depth	Mag	RMS	Net_Lat	Net_Lon	Net_Depth	DD_Lat	DD_Lon	DD_Depth	Lat_Dif	Lon_Dif	Depth_Dif
37.6445	-118.8873	6.41	1.9	0.09	37.65084	-118.886	6.185	37.64943	-118.886	6.5	0.001	0.000	0.315
37.6477	-118.8783	6.36	1.9	0.09	37.64553	-118.875	6.794	37.65163	-118.875	6.439	0.006	0.000	0.355
37.6293	-118.8662	6.36	1.9	0.07	37.63056	-118.865	6.280	37.63222	-118.865	6.478	0.002	0.000	0.198
37.648	-118.848	6.45	1.4	0.01	37.65007	-118.854	5.912	37.6452	-118.854	5.76	0.005	0.000	0.152
37.6343	-118.932	6.34	1.8	0.04	37.63575	-118.932	6.047	37.63727	-118.932	6.052	0.002	0.000	0.005
37.6445	-118.8433	6.34	1.9	0.08	37.64802	-118.841	6.106	37.64887	-118.841	6.138	0.001	0.000	0.032
37.6538	-118.9282	6.59	2.5	0.06	37.65454	-118.931	6.821	37.65584	-118.931	6.797	0.001	0.000	0.024
37.6347	-118.9437	6.63	3.2	0.08	37.63617	-118.939	6.441	37.63794	-118.939	6.643	0.002	0.000	0.202
37.6432	-118.852	6.7	1.4	0.02	37.64578	-118.858	6.529	37.64184	-118.858	5.792	0.004	0.000	0.737
37.624	-118.8562	6.11	1.4	0.02	37.62348	-118.862	6.195	37.62335	-118.862	5.516	0.000	0.000	0.679
37.634	-118.8702	6.1	2.2	0.08	37.63576	-118.868	6.666	37.63544	-118.868	6.712	0.000	0.000	0.046
37.6348	-118.9455	6.73	3.6	0.09	37.63723	-118.941	6.727	37.63766	-118.941	6.734	0.000	0.000	0.007
37.5937	-118.9033	6.08	1.5	0.07	37.60033	-118.907	6.326	37.60188	-118.907	6.667	0.002	0.000	0.341
37.6553	-118.8835	5.75	2.2	0.1	37.65164	-118.878	5.627	37.66187	-118.878	5.644	0.010	0.000	0.017
37.6398	-118.948	7.16	2.2	0.1	37.64108	-118.944	7.146	37.64334	-118.944	7.764	0.002	0.000	0.618
37.6368	-118.9337	5.64	3	0.09	37.63559	-118.932	5.712	37.64013	-118.932	5.655	0.005	0.000	0.057
37.648	-118.8468	7.26	2.5	0.06	37.64998	-118.846	7.374	37.64951	-118.846	7.475	0.000	0.000	0.101
37.631	-118.9257	5.28	1.2	0.08	37.63231	-118.924	4.941	37.63881	-118.924	4.97	0.006	0.000	0.029
37.6463	-118.8817	7.55	1.6	0.06	37.64644	-118.881	9.752	37.64605	-118.881	8.226	0.000	0.000	1.526
37.6378	-118.9602	7.55	1.7	0.05	37.63976	-118.958	7.187	37.63963	-118.958	7.31	0.000	0.000	0.123



شکل ۷- عرض و طول جغرافیایی و ژرفا (به ترتیب a، b و c) برای ۴۹۰ رویداد مورد استفاده به منظور آزمون شبکه. چنانچه مشاهده می‌شود، تعمیم شبکه در دو بعد رومرکزی (عرض و طول) بسیار دقیق‌تر از بعد عمق رویدادهاست. میزان خطای پیش‌بینی توسط خطای جذر میانگین مربعات در هر قسمت نمایش داده شده است.

۷- نتیجه‌گیری

مجدد شده می‌تواند به عنوان یک جایگزین قابل قبول مد نظر شبکه‌های لرزه‌نگاری قرار گیرد. جایگزینی یاد شده اگرچه باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان خطای تعیین مکان مجدد زمین‌لرزه‌ها نشده است، به صورت معنی‌دار، منجر به کاهش زمان اجرای الگوریتم شده و همچنین نیازمندی ارائه خروجی بر مبنای تحلیل همزمان آن با رویدادهای پیشین را مرتفع ساخته است.

اگر چه به کارگیری روش اختلاف زمانی دوگانه به عنوان یک روش کارا در تعیین مکان مجدد زلزله مستلزم تحلیل همزمان تمامی رویدادهای انتخاب شده در یک محدوده مکان-زمانی جهت ارائه خروجی برای هر رویداد جدید است، با توجه به روش ارائه شده و تحلیل آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش، می‌توان به این نتیجه رسید که آموزش شبکه یادگیرنده بر مبنای داده‌های پیشین تعیین مکان

References

- Aki, K., and Richards, P.G., 1980. Quantitative Seismology: Theory and methods Freeman: California; University Science Books.
- Douglas, A., 1967. Joint epicenter determination. *Nature*, 215: 47-48. doi.org/10.1038/215047a0.
- Florez, M. A., and Prieto, G. A., 2017. Precise relative earthquake depth determination using array processing techniques. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 4559–4571, doi.org/10.1002/2017JB014132.
- Frechet, J., 1985. Seismogenes et Doublet of Sismiques, ph.D, Thesis, University of Grenoble.
- Geiger, L., 1910. Herdbestimmung bei erdbeben aus den ankunftszeiten, K. Ges. wiss Go, European Digital Mathematics Library, 4: 331-349.
- Geiger, L., 1912. Probability Method for Determination of Earthquake Epicenters from the Arrival Time only: Louis University, 8: 56-71.
- Ghayoumian, J., and Fatahi, M.A., 2003. Evaluation of Landslide Hazard Zonation Models in Latin Dam Watershed. *Journal of Engineering Geology*, 1: 24-41.
- Got, J.L., 1994. Deep Fault Plane Geometry Inferred from Multiple Relative Relocation Beneath the South flank of Kilauea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99: 15375-15386. doi.org/10.1029/94JB00577.
- Grecksch, G., Kumpel, H.J., 1997. Statistical analysis of strong-motion accelerograms and its application to earthquake early-warning systems. *Geophysical Journal International*, 129: 113-123. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb00940.x.
- Hajian, A., Kimiaefar, R. and Siahkoochi, HR., 2016. Random Noise Attenuation in Reflection Seismic Data Using Adaptive Neuro-fuzzy Interference System (ANFIS). 78th EAGE Conference and Exhibition 2016, 2016: 1-5. doi.org/10.3997/2214-4609.201601589.
- Husen, S., and Hardebeck, J.L., 2010. Earthquake location accuracy, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, doi.org/10.5078/corssa-55815573.
- Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 23: 665-685. doi.org/10.1109/21.256541.
- Kamranzad, F., Memarian, F. and Zare, M., 2020. Earthquake risk Assessment for Tehran, Iran. *International Journal of Geo-Information*, 9: 1-12. doi.org/10.3390/ijgi9070430.
- Kayal, J.R., 2008. Micro earthquake seismology and seismotectonic of South Asia. Springer book, 105-108.
- Kimiaefar, R., Siahkoochi, HR., Hajian, A. and Kalhor, A., 2018. Random noise attenuation by Wiener-ANFIS filtering. *Journal of Applied Geophysics*, 159: 453-459. doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.05.017.
- Mottaghi, A., Rezapour, M. and Yaminifard, F., 2010. Double Difference Relocation of Earthquake Hypocenters along the Southern flank of the Central Alborz Iran. *Bulletin of the Seismological society of America*, 100: 2014-2023. doi.org/10.1785/0120090147.
- Pavlis, G., 1983. Progressive multiple event location. *Bulletin of the Seismological society of America*, 73: 1753-1757. doi.org/10.1785/BSSA07306A1753.
- Prejean, S., Ellsworth, W. L., Zoback, M., and Waldhauser, F., 2002. Fault Structure and Kinematics of the Long Valley Caldera Region California. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107: 1-9. doi.org/10.1029/2001JB001168.
- Radan, M.Y., Hamzehloo, H., Peresan, A., Zare, M., and Zafarani, H., 2013. Assessing performances of pattern informatics method: a retrospective analysis for Iran and Italy. *Natural Hazards*, 68: 855–881. doi.org/10.1007/s11069-013-0660-8.
- Romanowicz, B., 2008. Using seismic waves to image Earth internal structure. *Nature*, 451: 266-268. doi.org/10.1038/nature06583.
- Takagi, T., and Sugeno, M., 1985. Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 15: 116-132. doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399.
- Waldhauser, F., 2000. A Double-Difference earthquake location Algorithm Method and Application to the Northern Hayward Fault. *Bulletin of the Seismological society of America*, 90: 1353-1368. doi.org/10.1785/0120000006.

- Waldhauser, F., 2009. Near-Real-Time Double Difference Event Location Using Long-Term Seismic Archives with Application Northern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99: 2736-2748. doi.org/10.1785/0120080294.
- Wolf, C.J., 2002. On the Mathematics of using Difference Operators to Relocate Earthquake. *Bulletin of the Seismological society of America*, 92: 2879-2892. doi.org/10.1785/0120010189.

Original Research Paper

Fast earthquake relocation using ANFIS Neuro-Fuzzy network trained based on the double difference method

Hamidreza Samadi¹, Roohollah Kimiaefar^{2*}, and Alireza Hajian²

¹Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Department of Physics, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2021 July 25

Accepted: 2022 February 14

Available online: 2022 September 23

Keywords:

Earthquake relocation

ANFIS network

Double difference method

Near real time procedure

ABSTRACT

One of the most important issues in seismology is to accurately determine the epicenter of earthquake, mainly because the accuracy of dependent studies such as seismic risk analysis, fault mechanism, depends on the accuracy of mentioned parameter. Double difference method is one of the conventional relative earthquake relocation methods which is used vastly by seismological centers and it is used as the basis of an algorithm that relocates earthquake events about 0.004 second. In the proposed method, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is trained based on the former relocated events and generalized for new earthquakes. In the training procedure, the hypocentral information, for the main event and the nearest one (determined by K nearest neighbor search), and the velocity model of the region are considered as inputs and hypocentral information are set as target for the network. Here, with reference to the information of about 8000 earthquakes, as the training events, 490 earthquakes were relocated in about 0.1 (s) where RMS for predicating latitude and longitude of the events were 0.002 and for the depth parameter, RMS was 0.45. It is concluded that the proposed method could be considered as a powerful algorithm for near real time relocation of earthquakes.

* Corresponding author: Roohollah Kimiaefar; E-mail: r-kimiaefar@iaun.ac.ir

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/GSJ.2022.296260.1922

 dor: 20.1001.1.10237429.1401.32.3.9.3

