


GES	Journal of Geography and Environmental Studies, 11 (42), Summer 2022 https://ges.iaun.ac.ir ISSN: 2008-7845  20.1001.1.20087845.1401.11.42.6.5
-----	---

Research Article

Prediction of the Peak Ground Acceleration for Zagros Earthquakes Using ANFIS and Data Partitioning Approach

Tabatabaei, Mohammadreza

Department of Physics, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Kimiaefar, Roohollah (Corresponding Author)

Department of Physics, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

r-kimiaefar@iaun.ac.ir

Hajian, Alireza

Department of Physics, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Akbari, Alireza

Department of Physics, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the prediction of Peak Ground Acceleration (PGA) is investigated through training the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) network using data partitioned into inlier and outlier groups. The partitioning procedure is based on an automated method which uses K Nearest Neighbor (KNN) search and Local Linear Model Tree (LOLIMOT) methods. The mentioned proved to enhance the prediction procedure at least 36 percent with respect to normal training mode with no data partitioning. Hereafter, a PGA catalogue reported by the Iranian ground acceleration network with 1571 records was used and the trained network was used for predicting the PGA map around the Mormali, 2014 earthquake epicenter. We used spatial information of the epicenter and the site, earthquake magnitude, V_{s30} , depth of the hypocenters and the epicentral distance for the sites. The resulted map adapts well to the official report of the mentioned earthquake for the PGA analysis published by the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES). Finally, it is concluded that using machine learning algorithms could be beneficial in the cases where adequate data-sets are not provided by the seismological networks specifically in the concept of the strong ground motion analysis.

Keywords: peak ground acceleration, ANFIS, outlier, Zagros Earthquakes.

Citation: Tabatabaei, M, Kimiaefar, R., Hajian, A., Akbari, A., (2022) Prediction of the Peak Ground Acceleration for Zagros Earthquakes Using ANFIS and Data Partitioning Approach, Journal of Geography and Environmental Studies, 11 (42), 92-104. Dor: 20.1001.1.20087845.1401.11.42.6.5

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



مقاله پژوهشی

پیش بینی بیشینه شتاب زمین برای زلزله‌های زاگرس با استفاده از شبکه انفیس و رویکرد تجزیه داده‌ها

سید محمد رضا طباطبایی

گروه فیزیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

روح اله کیمیایی فر*

گروه فیزیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

علیرضا حاجیان

گروه فیزیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

علیرضا اکبری

گروه فیزیک، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

اندازه گیری و یا محاسبه بیشینه شتاب ناشی از زمین لرزه (Peak Ground acceleration, PGA) به عنوان یکی از پارامترهای اساسی جنبش نیرومند زمین، از دغدغه‌های مهم محققین علوم زمین است. کمیت مذکور از روشهای مبتنی بر داده‌های میرایی و زلزله‌های رخ داده در محل تهیه شده و در محاسبات تحلیل خطر زمین لرزه مورد استفاده واقع می‌شود. در پهنه‌های وسیع جغرافیایی و یا در شرایطی که تاسیس ایستگاههای دائمی یا موقت شبکه میسر نباشد، رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین به عنوان یک راه حل جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرند. در راستای افزایش دقت شبکه عصبی در مسئله پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین، با استفاده از تحلیل شناسایی داده‌های پرت یا نامتجانس، داده‌های ورودی شبکه یادگیرنده تفکیک شده و سپس فرآیند آموزش و تعمیم شبکه انجام شده است. این رویکرد باعث کاهش خطای شبکه انفیس شده، چنانچه خطای جذر میانگین مربعات ۳۶ درصد بهبود داشته است. با استناد به نتیجه مذکور، داده‌های طول و عرض جغرافیایی رومرکز، عمق و بزرگای مربوط به ۱۵۷۱ رکورد ثبت شده در شبکه شتاب نگاری کشوری به همراه داده‌های مربوط به میانگین سرعت موج مورد استفاده قرار گرفت تا شبکه انفیس آموزش داده شود. سپس، شبکه آموزش دیده، جهت ارزیابی کارایی روش، بر روی داده‌های زلزله مورموی، ۱۳۹۳، در استان ایلام تعمیم داده شد تا نقشه پهنه‌بندی مقادیر بیشینه شتاب، در پیرامون رومرکز زلزله محاسبه گردد. بررسی خروجی‌ها نشان می‌دهد که نقشه بدست آمده با گزارش رسمی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تطابق داشته و از روش ارائه شده می‌توان به عنوان یک روش جایگزین در پیش‌بینی بیشینه شتاب ناشی از زلزله اقدام نمود.

کلمات کلیدی: بیشینه شتاب زمین، شبکه انفیس، داده‌های پرت، زلزله‌های زاگرس.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴

مقدمه

به عنوان یک پارامتر اساسی، بیشینه شتاب زمین باید در طراحی و ساخت سازه‌های حساس در نظر گرفته شود تا از این طریق، تخمینی از میزان خرابی ناشی از زمین لرزه در دسترس باشد. اگر چه مقادیر ضبط شده در ایستگاههای نزدیک ساختگاه می‌تواند در یک تحلیل مقدماتی مورد استفاده قرار گیرد اما با توجه به میزان تغییرات محلی بالای این پارامتر، با استناد به روابط میرایی منطقه مورد مطالعه، تحلیل مورد نیاز استخراج می‌گردد (AllamehZadeh et al. 2017; Akhani et al. 2019). مانند بسیاری از حوزه‌های دیگر مطالعات مهندسی و علوم پایه، روشهای مبتنی بر یادگیری ماشین در زمینه پیش‌بینی پارامترهای جنبش نیرومند زمین نیز مورد استفاده واقع شده‌اند. توجه اصلی ضرورت استفاده از این گونه مطالعات، محدودیت مالی و فنی در راه اندازی ایستگاههای متعدد شبکه‌های شتابنگاری می‌باشد و این در حالی است که روشهای هوشمند می‌توانند با استفاده از توانایی بالای خود در تعمیم مسئله، مشکل مذکور را تا حدی مرتفع کنند (Estrada et al. 2014; Rajos et al. 2019). در این تحقیق، مسئله پیش‌بینی بیشینه شتاب ناشی از زلزله با استفاده از روشهای هوشمند، با تمرکز بر تفکیک داده‌های ورود شبکه یادگیرنده مورد بررسی واقع می‌شود. خصوصاً چنانچه Khamis و همکاران (2005) در تحقیق خود به آن اشاره نموده‌اند، تاثیر داده‌های پرت یا نامتجانس در فرآیند آموزش شبکه عصبی بررسی خواهد شد. جهت ورود به مسئله، در ابتدا پیشینه تحقیقات صورت گرفته در این خصوص ارائه شده است.

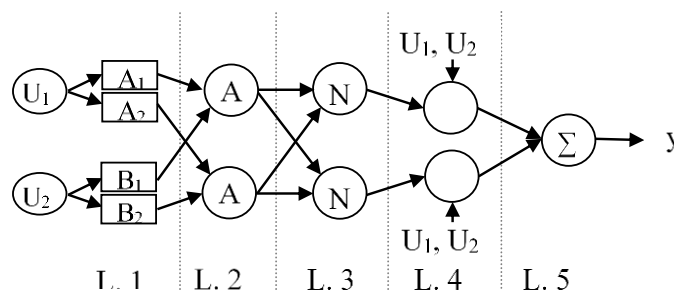
در دسته‌های روشهای با نظارت در حوزه روشهای هوشمند، ورودیهای شبکه می‌توانند شامل طول و عرض جغرافیایی، فاصله مرکزی و یا رو مرکزی، شعاع گسیختگی کانون زلزله (rupture distance)، آزیموت نقطه هدف، میانگین سرعت سیر موج برشی در ۳۰ متر اول سطح (V_{s30})، شدت ثبت شده، ارتفاع نقطه هدف، طول و عرض جغرافیایی زمین لرزه، مکانیسم گسل و نیز بزرگای آن می‌باشد (Rajabi et al. 2019; Derras et al. 2012). تنوع روشهای هوشمند مورد استفاده در حوزه پیش‌بینی پارامترهای مختلف جنبش نیرومند زمین قابل توجه می‌باشد. Derras و همکاران (۲۰۱۲)، ۳۸۹۱ رکورد مربوط به ۳۵۵ زمین لرزه که توسط ۳۹۸ ایستگاه شبکه Kik-Net رکورد شده بودند را مورد استفاده قرار دادند تا با استفاده از ورودیهای شامل بزرگا، عمق، فاصله رومرکزی، فرکانس تشدید سایت و سرعت موج برشی اقدام به پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین نمایند. در مطالعه مذکور ادعا شده است که خروجی بدست آمده، از تحقیق نتیجه حاصل از تحلیل مبتنی بر روابط کاهندگی دقیقتر بوده است. حساسیت خروجی به پارامترهای بزرگا و فاصله رومرکزی در تمام رنج بزرگاها مشاهده شده اما حساسیت به عمق رویداد بیشتر در رویدادهای متناظر با زلزله‌های متوسط رصد شده است و پارامترهای مذکور نسبت به خصوصیات ساختگاهی تاثیرگذاری بیشتری در تعیین خروجی داشته‌اند. Thomas و همکاران (2016) در تحقیق خود در خصوص پیش‌بینی PGA به خطای جذر میانگین مربعات در حد ۰/۰۵ درصد بر روی داده‌های تست دست یافتند. ایشان از نسخه تعمیم یافته از شبکه ANFIS استفاده کرده‌اند که در آن از بزرگا، مکانیسم کانونی، فاصله رومرکزی و میانگین سرعت موج برشی در ساختگاه به عنوان ورودی استفاده شده است. علامه زاده و همکاران (2017) نیز از شبکه عصبی پیش‌خور پس‌انتشار و شبکه استنتاج عصبی فازی تطبیق پذیر برای آموزش حدود ۶۰ رکورد استفاده کردند. به عنوان ورودی، از بزرگا، شعاع گسیختگی کانون زلزله و سرعت موج برشی استفاده شده و روش بر روی داده‌های محدود تست نیز اعمال شده است. در تحقیق انجام شده توسط Derrakhshani و دیگران (2019) یک مجموعه عظیم از ۱۲۵۵۶ رکورد ثبت شده استفاده شده است. بیست درصد از حجم داده‌های مذکور برای تست خروجی در نظر گرفته شده و تحقیق مذکور از لحاظ حجم داده‌های مورد استفاده معتبرتر از سایر تحقیقات بوده است. خطای جذر میانگین مربعات گزارش شده در این تحقیق ۰,۷۸۹ بوده که بین لگاریتم بیشینه شتاب هدف و خروجی محاسبه شده است.

مرور اطلاعات تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از جذر میانگین مربعات به عنوان کمیت نشان دهنده عملکرد روش مرسوم می‌باشد. همچنین با استناد به تحقیق منتشر شده توسط Derras و (2012) و نیز Shiuly و همکاران (2019) به این نتیجه می‌رسیم که استفاده از مختصات جغرافیایی رومرکز، ساختگاه، بزرگای رویداد، میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول به همراه فاصله ساختگاه (نقطه هدف تا مرکز یا رومرکز) برای پیش‌بینی مقدار بیشینه شتاب توجیه شده خواهد بود. اگر چه در تحقیق مذکور سایر پارامترهای درگیر نیز بررسی شده‌اند اما با توجه به محدودیت دستیابی به بعضی از داده‌های مذکور در کاتالوگهای منتشر شده در شبکه شتابنگاری کشور، در این تحقیق، به ویژگیهای مذکور بسنده شده است.

۱- مواد و روشها

۱-۲ شبکه استنتاج عصبی - فازی تطبیق پذیر، ANFIS

معماری انفیس یا شبکه استنتاج عصبی - فازی تطبیق پذیر (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) در سال ۱۹۹۳ توسط جانگ بیان شد (Jang et Al 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 (function membership) مناسب بر روی ورودیها صورت می‌پذیرد. 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 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.



شکل (۱): معماری انفیس با دو قاعده اگر و آنگاه فازی (Kimiaefar et al. 2018)

۲-۲ جستجوی داده‌های نامتجانس با ترکیب الگوریتم KNN با شبکه یادگیرنده

در الگوریتم ارائه شده توسط Tabatabaei و همکاران (2021)، روش K نزدیک‌ترین همسایه در کنار مدل درخت مدل محلی (Lolimot) به عنوان یک شبکه عصبی یادگیرنده با نظارت ترکیب شده و از این طریق، یک روش خودکار جهت شناسایی داده های نامتجانس یا پرت توسعه داده شده است. از آنجا که مشکل عمده روشهای مبتنی بر الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه در شناسایی داده‌های پرت، حساسیت خروجی آنها به پارامتر K و جمع فاصله بین K عنصر مد نظر می‌باشد، Tabatabaei و همکاران (2021)، به جای بکارگیری یک K مشخص، گستره‌ای از آنها در الگوریتم مورد استفاده واقع شده است. هسته اصلی روش بر این اساس استوار است که در یک دسته از مجموعه همسایگی‌ها با عدد متناظر K متفاوت، فاصله اعضای مجموعه با عنصر اصلی محاسبه شده، داده‌ها بر اساس فاصله بازچینی شده و سپس اعضای اول و آخر هر مجموعه، متناظر با داده‌های پرت و

غیر و پرت در نظر گرفته می‌شوند. برچسب گذاری متجانس بودن یا نبودن هر عنصر در مجموعه داده‌ها از طریق پنج قدم اساسی زیر صورت می‌پذیرد:

قدم اول: برای هر عنصر یا بردار موجود در داده‌ها، مجموعه K نزدیکترین همسایه با K های متفاوتی که بر اساس نسبت حجم کل داده‌ها تعیین می‌شوند، تشکیل می‌شوند. بر اساس آزمایشاتی که در خلال تحقیق صورت پذیرفته است، دامنه ۱ تا ۲۰ درصدی، در تمامی آزمایشات صورت پذیرفته، خروجی پایداری ارائه می‌کند و بنابراین به عنوان یک مقدار ثابت در روش تنظیم گردید.

قدم دوم: جمع فاصله اعضای هر مجموعه با عنصر اصلی ذکر شده در قدم اول، محاسبه شده می‌شوند.

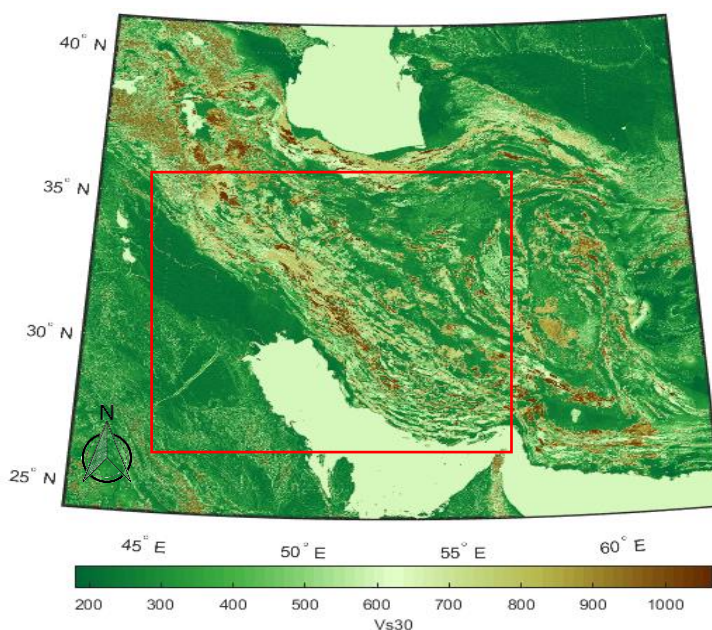
قدم سوم: تمامی اعضای داده بر اساس جمع مذکور بازچینی (از کوچک به بزرگ) می‌شوند.

قدم چهارم: داده‌های بازچینی شده‌ای که جمع فاصله محاسبه شده برای آنها در اولین (آخرین) دهک (decile) داده‌ها قرار گیرند به عنوان داده‌های متجانس (نامتجانس) در نظر گرفته خواهند شد. حال داده‌های جمع فاصله و K متناظر با آنها، به عنوان ورودی برچسب متجانس یا نامتجانس بودن داده به عنوان خروجی شبکه یادگیرنده منظور می‌شوند.

قدم پنجم: شبکه با تنظیمات مد نظر و داده‌های تشکیل شده در قدم چهارم آموزش یافته و سپس با تشکیل مجموعه داده مذکور برای تمامی عناصر مجموعه داده، شبکه بر روی آنها تعمیم داده می‌شود. خروجی تعمیم شبکه، برچسب‌های متجانس یا نامتجانس بودن داده‌ها خواهد بود.

۲-۳ داده‌های مورد استفاده

۲۱۳۲ رکورد از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه شتابنگاری ایران در ۱۵۲ ایستگاه دائمی واقع در استانهای همدان، کرمانشاه، ایلام، لرستان و خوزستان، فارس و کردستان مربوط به زمین لرزه‌های رخ داده از ۱۹۹۴/۰۳/۱۷ تا ۲۰۲۱/۰۴/۱۸ جمع آوری شدند. مجموعه داده مذکور در واقع کاتالوگی است که توسط شبکه شتابنگاری جمع آوری و گزارش شده و مقادیر ذکر شده در آن به عنوان گزارش رسمی تلقی می‌گردند. در نهایت ۱۵۷۱ رکورد از میان رویدادهای مورد اشاره انتخاب شدند. داده‌های حذف شده شامل آن دسته از داده‌هایی هستند که دارای نقص در یک یا چند ویژگی اساسی مورد استفاده بوده‌اند. ویژگیهای مورد استفاده علاوه به طول و عرض جغرافیایی، عمق و بزرگای رویدادها، شامل فاصله رومرکزی، طول و عرض جغرافیایی ایستگاهها و V_{s30} به عنوان ورودی و بیشینه شتاب گزارش شده به عنوان خروجی میباشد. به عنوان یکی از ورودیهای شبکه انفیس که در این تحقیق از آن استفاده شده است، میانگین سرعت سیر موج برشی از سطح تا عمق ۳۰ متری، از داده‌های منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (Allen et Al 2007) استخراج شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه به صورت رسمی، نقشه پهنه بندی ویژگی مذکور در منابع داخلی وجود ندارد ضروری بوده است جهت دستیابی به تحلیل یکنواخت، داده‌ها از منبع ذکر شده تامین گردند. مستطیل مربوط به استخراج داده‌های مذکور در شکل ۱ نمایش داده شده است. اگرچه مستطیل مذکور پهنه وسیعی شامل سایر ایالات لرزه زمین‌ساختی مرکزی ایران را نیز شامل می‌شود اما انتخاب پهنه مذکور بنا بر این ملاحظه بود که تنها راه استخراج و تبدیل آسان داده‌های دریافت شده از طریق منبع مورد اشاره، انتخاب مستطیل بوده و در صورت انتخاب چند ضلعی برای تعیین محدوده داده‌ها، فرآیند دسته‌بندی داده‌های متناظر با طول و عرض جغرافیایی بسیار پیچیده می‌شد.



شکل (۱): مستطیل مورد استفاده جهت استخراج داده‌های مربوط به میانگین سرعت موج برشی در سی متر اول زیر سطح (V_{s30})

۲- بررسی تفکیک داده‌های متجانس و نامتجانس در عملکرد آموزش شبکه

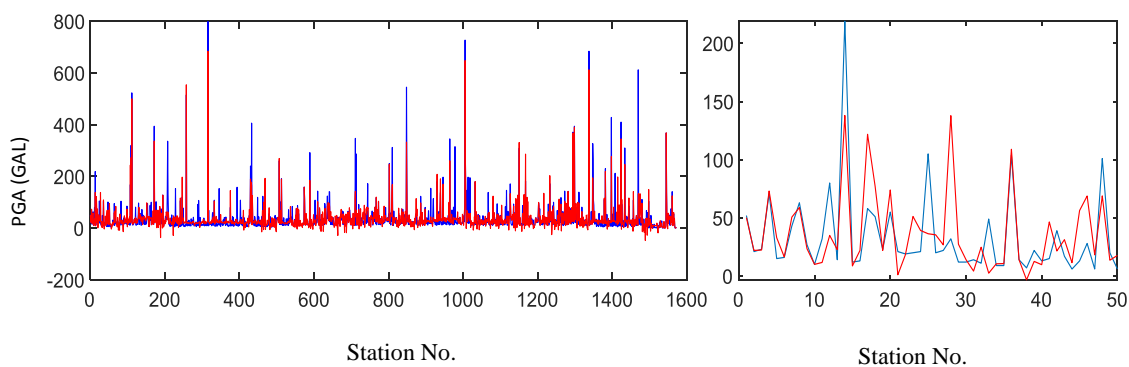
چنانچه در قسمتهای قبلی مقاله نیز عنوان شد، هدف این تحقیق بهبود عملکرد فرآیند پیش‌بینی بیشینه شتاب بر مبنای داده‌های تفکیک شده به دو دسته متجانس و نامتجانس می‌باشد. در ادامه، پس از توصیف داده‌های مورد استفاده، آزمایشات صورت گرفته بر روی داده‌های جمع آوری شده ارائه خواهد شد. از آنجا که مقیاسهای بزرگای گزارش شده برای زمین لرزه‌های مورد استفاده شده در تحقیق متفاوت بوده‌اند، تمام مقادیر بزرگا، با استفاده از روابط استخراج شده توسط Karimiparidari و همکاران (2013) به بزرگای گشتاوری تبدیل شده و مورد استفاده واقع شدند. روابط مذکور عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 M_W &= 1.137129(\pm 0.026) \times m_b - 0.500249(\pm 0.134) \\
 M_W &= 0.623642(\pm 0.015) \times M_S + 2.289902(\pm 0.076) & 3.0 \leq M_S < 6.1 \\
 M_W &= 0.988974(\pm 0.054) \times M_S + 0.040903(\pm 0.355) & 6.1 \leq M_S \leq 7.4 & (1) \\
 M_W &= 0.738540(\pm 0.044) \times M_N + 1.409211(\pm 0.226) \\
 M_W &= 0.696736(\pm 0.047) M_L + 1.621469(\pm 0.230)
 \end{aligned}$$

فرآیند پیش پردازش داده‌ها همچنین شامل نرمالایز کردن مقادیر هر ویژگی بین صفر تا یک بوده و در این تحقیق، ترجیح داده شده که مانند تحقیق Derakhshani و همکاران (2019) و نیز Alavi و همکاران (2019) از لگاریتم طبیعی مقادیر بیشینه شتاب به عنوان مقادیر هدف شبکه استفاده شود تا قدرت تعمیم‌دهی شبکه بیشتر شود.

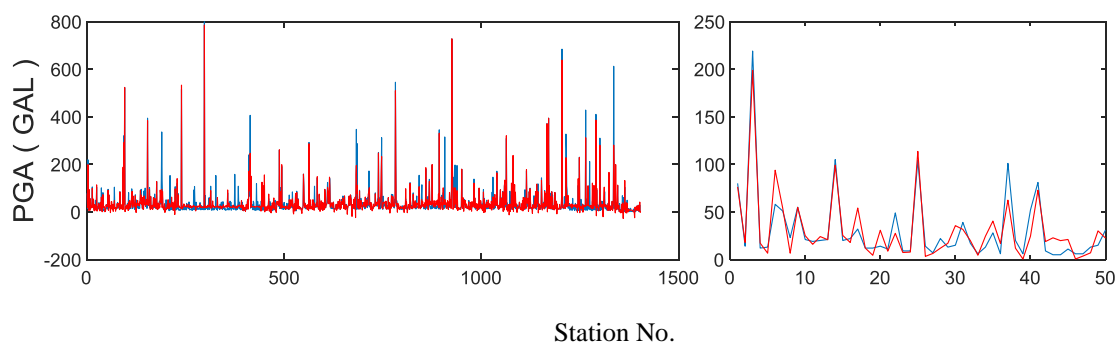
در اولین آزمون، از شبکه انفیس با ساختار فازی تک خروجی (از نوع سوگنو) تولید شده بر مبنای روش افراز جدولی (Grid Partitioning) استفاده شد. هدف آزمایش اول، بررسی منطق مد نظر تحقیق صرفاً بر اساس عملکرد آموزش شبکه می‌باشد. آموزش شبکه مذکور توسط الگوریتم ترکیبی حداقل مربعات و کاهش گرادیان در توزیع پس انتشار انجام شده است. تعداد epoch در نظر گرفته شده ۵۰۰ و ثابت برای هر سه تکرار این آزمایش بوده است. یکسان بودن تعداد epoch صرفاً برای انجام مقایسه خروجی‌های در شرایط مشابه بوده است. شبکه انفیس مذکور بر روی کل داده‌های مورد استفاده در تحقیق اعمال شد.

خطای جذر میانگین مربعات محاسبه شده بین مقادیر هدف و خروجی شبکه برای مجموعه داده مذکور برابر $1/774$ بوده است. در شکل ۲، مقادیر هدف و خروجی به همراه بزرگ‌نمایی آن برای ۵۰ داده اول به تصویر کشیده شده است. عملکرد شبکه میبایست با توجه به ابعاد داده‌ها میزان تغییرات و در واقع رفتار شبه تصادفی بالای داده‌ها و نیز تحقیقات مشابه مورد قضاوت قرار گیرد. اگر چه تعداد رویدادها در خطای محاسبه شده منظور میشود، بالا رفتن تعداد داده‌ها میتواند تعداد نقاط اکسترمم در بین داده‌ها را بالاتر برده در میزان خطا تاثیر گذار باشد. در دومین و سومین قسمت این آزمایش، پس از تفکیک داده‌های ورودی به دو دسته داده‌های متجانس و نامتجانس، فرآیند آموزش شبکه به صورت مجزا بر هر دو مجموعه فوق اعمال شد. فرآیند شناسایی داده‌های نامتجانس (یا داده پرت)، توسط الگوریتم ارائه شده توسط Tabatabaei و همکاران (2021) و با تنظیمات پیش فرض آن صورت گرفته است. لازم به ذکر است که به صورت پیش فرض، درصد داده‌هایی که در حالت ماکزیمم در فرآیند مشابهت یابی شرکت داده می‌شوند، ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

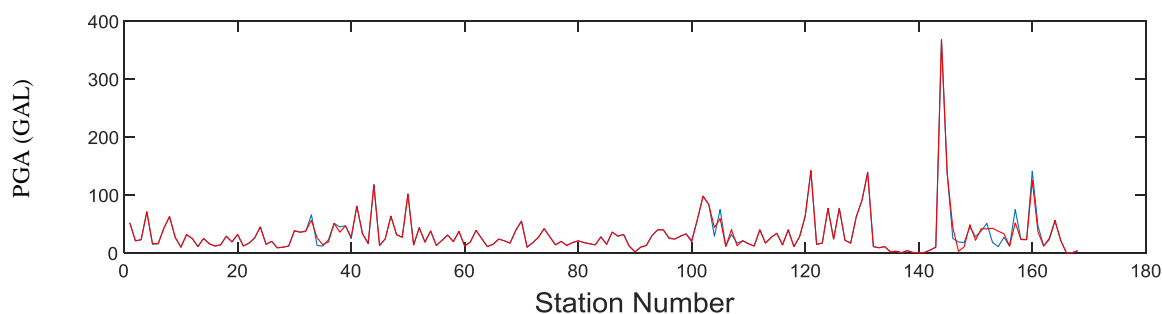


شکل (۲): مقادیر هدف (آبی) و خروجی (قرمز) شبکه برای کل داده‌های کاتالوگ (چپ) و بزرگنمایی ۵۰ رویداد اول (راست)

از مجموع ۱۵۷۱ رویداد مورد بررسی، ۱۶۷ رویداد، نامتجانس تشخیص شده است. چنانچه در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، تفکیک داده‌ها در دو دسته مذکور به صورت قابل توجهی در ارتقا عملکرد آموزش شبکه موثر بوده است و خطای جذر میانگین مربعات برای داده‌های متجانس ۱,۱۲ و برای داده‌های نامتجانس ۰,۰۸۹ بوده است که نشان می‌دهد که میزان خطای مذکور در مقایسه با آزمایش قبل، حداقل ۳۷ درصد کاهش داشته است.

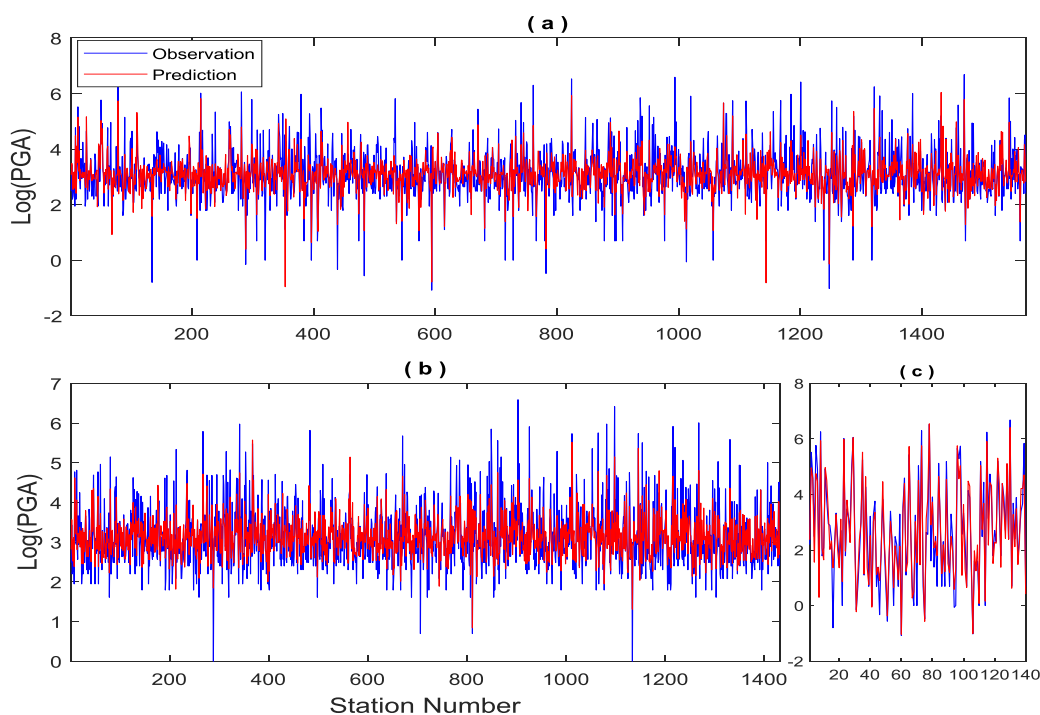


شکل (۳): مقایره اندازه‌گیری شده (هدف) و پیش‌بینی (خروجی) شبکه انفیس برای مجموعه داده متجانس.



شکل (۴): مقایر اندازه گیری شده (هدف) و پیش بینی (خروجی) شبکه انفیس برای مجموعه داده نامتجانس

پس از حصول اطمینان از صحت منطق روش و با توجه به اینکه هدف نهایی این تحقیق، استفاده از خروجی شبکه آموزش دیده جهت تعمیم بر روی داده‌های سایر نقاطی است که اطلاعات بیشینه شتاب برای آنها ثبت نشده است، ساختار فازی قبلی پس از ناکارآمد بودن در آزمایشات متعدد کنار گذاشته شده و یک ساختار فازی مبتنی به خوشه‌بندی فازی با تعداد خوشه متفاوت برای هر گروه از داده‌های تفکیکی شده انتخاب شد و اینبار، آزمایشات با تاکید بر خطای جذر میانگین مربعات محاسبه شده بر روی داده‌های آزمون ادامه داده شد. بعلاوه نتیجه گیری شده که تفکیک ویژگی‌ها علاوه خصوصیات آنها از دید تحلیل داده متجانس و نامتجانس، به دو دسته دیگر نیز می‌تواند در افزایش قدرت تعمیم‌دهی شبکه موثر باشد. از این رو، در دسته اول، طول و عرض جغرافیایی زمین لرزه، بزرگای آن و نیز فاصله رو مرکزی به عنوان ورودی و در دسته دوم، طول و عرض جغرافیایی زمین لرزه، طول و عرض ایستگاه، سرعت موج برشی در سی متر اول و عمق کانونی زمین لرزه به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. خروجی هر دو دسته لگاریتم طبیعی PGA منظور گردید. حال نتیجه تعمیم شبکه‌های آموزش دیده، متناظر با داده‌های مذکور، به عنوان ورودی شبکه نهایی در نظر گرفته شد. در قدم اول در این مرحله، داده‌ها به دو دسته متجانس و نامتجانس افراز شده و بر اساس تحلیل مذکور ۱۴۳۱ رویداد متجانس و ۱۴۰ رویداد نامتجانس برچسب گذاری شدند. توجه شود که ویژگی‌های تعریف شده برای این آزمایش با آزمایش اول متفاوت بوده و دلیل اختلاف تعداد داده‌های پرت در این دو آزمایش بر این اساس می‌باشد.

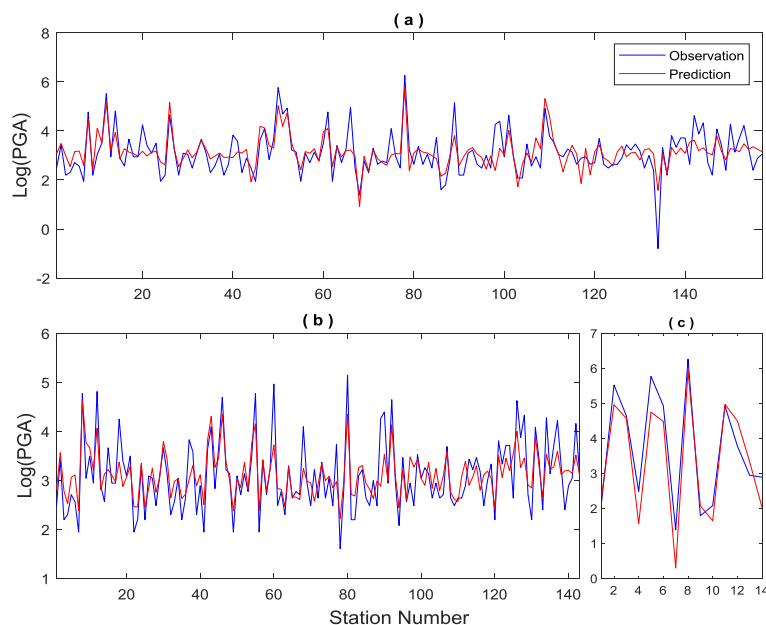


شکل (۵): مقادیر هدف و خروجی شبکه انفیس برای داده‌های مورد استفاده بدون تفکیک (a)، گروه داده‌های متجانس (b) و نامتجانس (c). نسبت به شکل ۳، در اینجا تاکید فرآیند آموزش با داشتن بالاترین عملکرد برای تعمیم داده‌ها بر روی داده‌های تست بوده است.

برای دستیابی به بهترین عملکرد شبکه، با توجه به تصادفی بودن وزن‌دهی اولیه و در نتیجه خروجی آن، بهترین خروجی در بین صد تکرار متفاوت انتخاب شد. تعداد خوشه در نظر گرفته شده در ساختار فازی اولیه، برای داده‌های تفکیک نشده ۲۰ خوشه، داده‌های متجانس ۱۶ و داده‌های نامتجانس ۴ خوشه بوده است. مقادیر مذکور با توجه به خروجی بدست آمده در چند تکرار انتخاب گردیده و در ۱۰۰ تکرار نهایی ثابت در نظر گرفته شدند.

تعداد epoch برای داده‌های مذکور به ترتیب ۵۰، ۵۰ و ۲۰ بوده است. در شکل ۵ خروجی شبکه به همراه داده‌های هدف، برای سه داده مورد اشاره نمایش داده شده است و همچنین در شکل ۶، خروجی تعمیم شبکه بر روی داده‌های آزمون و برای سه دسته مذکور رسم شده است.

در ۱۰۰ تکرار مورد اشاره، کمترین خطای جذر میانگین مربعات برای داده‌های و برای داده‌های آزمون مجموعه داده تفکیک نشده ۰/۴۱۴۳۰، متجانس ۰/۳۹۷۳ و نامتجانس برابر ۰/۳۷۰۸ بوده است (مقادیر لگاریتم طبیعی PGA به عنوان هدف شبکه در نظر گرفته شده بودند). با توجه به کاهش خطای پیش‌بینی، و رصد تاثیر تفکیک داده‌ها، در ادامه، روش مذکور به منظور پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین در اطراف رومرکز یک زلزله در ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس مورد استفاده واقع شده است.

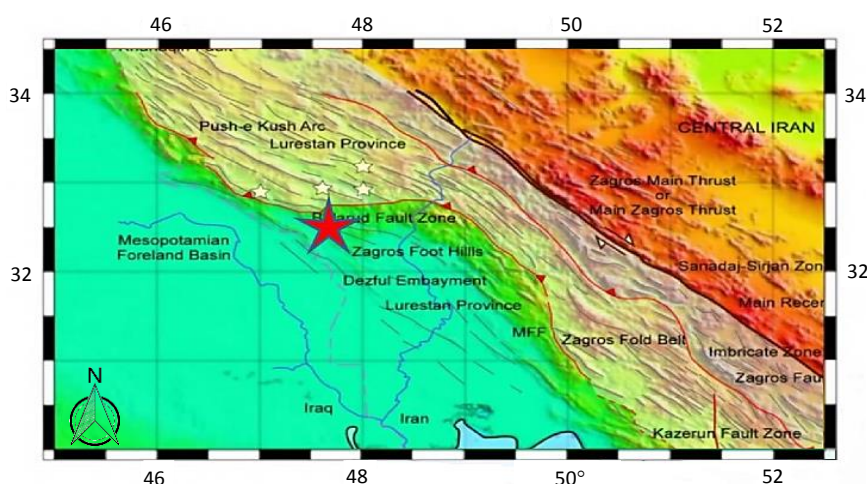


شکل (۶): مقادیر هدف و خروجی شبکه انفیس برای داده‌های مورد استفاده بدون تفکیک (a)، گروه داده‌های متجانس (b) و نامتجانس (c). نسبت به شکل ۳، در اینجا تاکید فرآیند آموزش با داشتن بالاترین عملکرد برای تعمیم داده‌ها بر روی داده‌های تست بوده است.

۳- تهیه بیشینه شتاب ناشی از زلزله‌های زاگرس، مطالعه موردی زلزله ۲۷ مرداد ۱۳۹۳ مورموری

به دلیل نیاز به مقایسه خروجی روش ارائه شده با یک تحلیل مرجع، خلاصه از گزارش رسمی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در خصوص زلزله مورموری، ۱۳۹۳، آورده شده است (Official report 2014). زمین‌لرزه مورموری (آبدانان) در استان ایلام در ساعت ۷:۰۲ بامداد روز ۲۷ مرداد ۹۳ به وقت محلی (۲:۳۲ بامداد ۱۸ آگوست ۲۰۱۴ به وقت بین‌المللی) در ۴۰ کیلومتری شرق دهلران و ۳۸ کیلومتری آبدانان در استان ایلام و در نزدیکی مرز استان‌های ایلام و خوزستان در منطقه کوهپایه زاگرس رخ داد. وقوع دو پیش‌لرزه یکی در ساعت ۱۵:۵۴ با بزرگای ۴٫۶ و دیگری در ساعت ۱۹:۱۷ با بزرگای ۴٫۸ در بعدازظهر روز ۲۶ مرداد ۹۳ زمین‌لرزه مورموری با سازوکار فشاری و با مولفه امتداد لغز در جنوب مرز خمیدگی جبهه کوهستان

زاگرس، در جنوب تاقدیس کبیرکوه و در مجاورت گسل بالا رود و شرق گسل دال پری رخ داده است (شکل ۷). براساس اطلاعات ساز و کار لرزه اصلی زلزله مورموری و برپایه داده های منتشر شده از حل ساز و کارهای ژرفی پس لرزه های زلزله یاد شده (که بزرگای بیش از ۵/۵ داشته اند)، سازوکار فشاری با مولفه فشاری در این زلزله بارز است. احتمالاً صفحه با راستای شمال غرب-جنوب شرق و با شیب به سوی شمال شرق را که با مولفه امتداد لغزی راستگرد همراه است، می توان به عنوان صفحه گسلش در این زلزله معرفی کرد. بر اساس مشاهدات میدانی، به نظر می رسد راستای بیشترین خرابی ها در این زلزله، در جهت شمال شرق-جنوب غرب تا شرقی-غربی بود. از این نظر می توان دریافت که این راستا به احتمال فراوان راستای عمود بر گسل را نشان می دهد. شیب گسل به سمت شمال شرق بوده است و بنابراین مشاهده خرابی بیشتر در روستاهای واقع در شرق مورموری (به ویژه آب انار و سیاهگل) به دلیل عملکرد مولفه عمود برگسل، در حوزه نزدیک قابل توجه به نظر می رسد. در شکل ۷، رومرکز و نیز توزیع گسلهای عمده آورده شده است. شانزده ایستگاه از ایستگاههای شبکه شتابنگاری کشور برای رویداد مذکور، ثبت داده داشته اند که از فاصله رومرکزی ۲۵ تا ۱۵۸ کیلومتری رومرکز توزیع شده اند. مقادیر بیشینه شتاب ثبت شده نیز از ۱۰ تا ۱۹۷ گال متغیر بوده که به ترتیب برای ایستگاه لالی در ۱۲۴ و مورموری در ۲۵ کیلومتری رومرکز ثبت شده اند. در شکل ۸، موقعیت ایستگاههای مورد اشاره و رومرکز زلزله به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که بیشینه گپ آزمونوتی بین ایستگاههای مذکور برابر ۱۲۳ درجه بوده است.



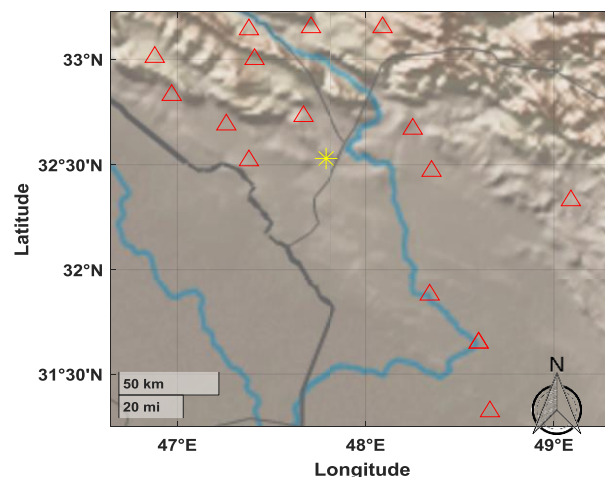
شکل (۷): گسلهای عمده منطقه جنوب شرقی زاگرس (Verges et al. 2011) و رومرکز زلزله مورموری ۱۳۹۳.

۴-۱ آموزش و تعمیم داده ها برای زلزله مورموری، ۱۳۹۳

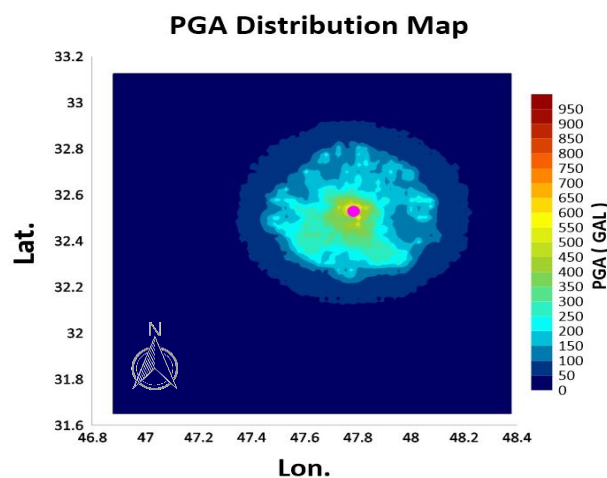
ویژگی های مورد استفاده در این قسمت از تحقیق برای هر رکورد در ایستگاههای شبکه شتابنگاری کشور عبارتند از: طول و عرض جغرافیایی رومرکز، عمق و بزرگای زلزله، طول و عرض جغرافیایی سایت (در اینجا ایستگاههای شبکه)، فاصله رومرکزی (رومرکز تا سایت)، V_{s30} و لگاریتم بیشینه شتاب گزارش شده. در ابتدا با توجه به محدودیت منابع محاسباتی و ابعاد داده ها، دو دسته مجموعه از ورودی-اهداف تعریف شدند که در دسته اول طول و عرض جغرافیایی بزرگا و فاصله رومرکزی و در دسته دوم، طول و عرض جغرافیایی زلزله و سایت، V_{s30} و عمق زلزله به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. شبکه انفیس برای هر دو دسته فوق با تاکید بر قدرت تعمیم دهی برای داده های آزمون (۲۰ درصد از داده ها) آموزش داده شد. سپس خروجی هر دو شبکه به عنوان ورودی و مقادیر PGA متناظر با آنها به عنوان هدف به عنوان داده جدید در نظر گرفته شدند. حال تحلیل تفکیک داده های نامتجانس برای مجموعه داده جدید انجام شد. در این مرحله فرآیند تعمیم داده ها به شرح زیر صورت گرفت.

داده‌های کل منطقه برای دو مجموعه ورودی، تهیه گردید. در اینجا برای محاسبه نقشه توزیع بیشینه شتاب مستطیلی با مشخصات زیر انتخاب شده است. کمینه عرض جغرافیایی: $31/6$ ، بیشینه عرض جغرافیایی: $33/2$ ، کمینه طول جغرافیایی: $46/8$ ، بیشینه طول جغرافیایی: $48/4$ و فاصله بین نقاط: $0,025$ درجه در هر راستا. حال خروجی تعمیم شبکه برای هر کدام از مجموعه‌های ورودی تعیین شده و برای هر نقطه، شبیه‌ترین نقطه در بین دو مجموعه داده‌های آموزشی معین گردید. تعیین شبیه‌ترین نقطه نشان دهنده زیر گروهی از داده‌ها است و معین می‌کند که داده مذکور در گروه داده‌های متجانس قرار می‌گیرد یا بالعکس. با این تفکیک، شبکه متناظر با نقطه مذکور معین شده و تعمیم شبکه متناظر با آن انجام شد. پس از تعمیم شبکه متناظر، مقدار PGA برای هر نقطه بدست آمده است.

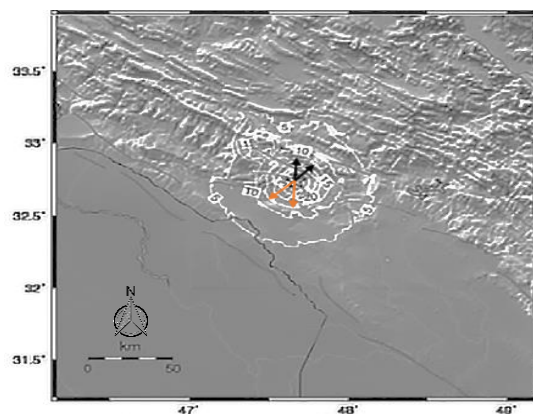
در شکل ۹، خروجی نهایی به تصویر کشیده شده است و چنانچه مشاهده می‌شود، مقادیر بیشینه شتاب از صفر تا 1000 گال در نقشه نهایی مشاهده شده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود یک عدم تقارن در راستای شمال شرقی - جنوب غربی در سرتاسر محدوده غیر صفر رصد می‌شود. این عدم تقارن در توزیع بیشینه شتاب، با خروجی گزارش رسمی مورد استناد در تحقیق نیز تا حد زیادی تطابق دارد (شکل ۱۰). همبندی‌های PGA در گزارش رسمی، در منطقه شمال - شمال شرقی، با توزیع نمایش داده شده در شکل ۱۰، تطبیق مناسبی داشته و در هر دو تصویر، عدم تقارن ذکر شده مشاهده می‌شود.



شکل (۸): موقعیت مکانی رومرکز زلزله (ستاره) و نیز ایستگاه‌های (مثلث) شبکه شتاب نگاری کشوری که در آنها بیشینه شتاب زمین مربوط به زلزله مورموری ۲۷ مرداد ۱۳۹۳ ثبت گردیده است.



شکل (۹): نقشه توزیع بیشینه شتاب زمین بر اساس خروجی شبکه آموزش یافته با داده‌های منطقه زاگرس برای زمین لرزه ۲۷ مردادماه ۱۳۹۳ مورموری. نقطه صورتی در تصویر، نمایانگر رومرکز رویداد مذکور می‌باشد.



شکل (۱۰): نقشه توزیع بیشینه شتاب زمین گزارش شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای زلزله مورموری (۲۷ مرداد ۱۳۹۳). کنتورهای رسم شده بر اساس درصد شتاب ثقل می‌باشند. جهت نماهای سیاه و نارنجی هر کدام به ترتیب نمایش دهنده فاصله بین رومرکز تا خط کنتور هم شدت ۱۵ درصد شتاب ثقل می‌باشند که در جهات مختلف با رنگ متمایز رسم شده‌اند تا امکان مقایسه جهت‌گیری کلی توزیع PGA میسر گردد. توجه شود که جهت نماهای نارنجی طول بزرگتری دارند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در خصوص الگوریتم اصلی ارائه شده، در این تحقیق، مرور نتایج آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که تفکیک داده‌های متجانس (inlier) و نامتجانس (outlier) از یکدیگر به عنوان یک روش بدیع به نحو قابل توجهی باعث ارتقا عملکرد شبکه در آموزش و نیز تعمیم داده بوده است. مرور خروجی روش مذکور بر روی داده‌های مورد استفاده در این تحقیق موید این حقیقت است که این الگوریتم موفق به کاهش میزان خطای جذر میانگین مربعات به میزان حداقل ۳۷ درصدی شده است و بعد از محاسبه خروجی شبکه بر روی داده‌های آزمون، مقدار خطای جذر میانگین مربعات که برای داده‌های تفکیک نشده ۰,۴۱۳۴ بوده است پس از اجرای الگوریتم ارائه شده به ترتیب ۰,۳۷۰۸ و ۰,۳۹۷۳ برای داده‌های متجانس و نامتجانس بدست آمده است. لازم به ذکر است که خطاهای مذکور بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده بدست آمده و می‌تواند مبنایی برای ارزیابی عملکرد روش باشد. پس از پایش کمی روش ارائه شده، از الگوریتم مذکور در راستای تهیه نقشه بیشینه شتاب ناشی از زلزله مورموری ۱۳۹۳ استفاده شد که خروجی تحلیل مذکور، با گزارش رسمی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله و مهندسی زلزله تطابق دارد. به عنوان جمع بندی، می‌توان بیان نمود که تفکیک داده‌های ورودی شبکه انفیس به دو دسته داده‌های متجانس و نامتجانس باعث بهبود عملکرد شبکه در افزایش دقت پیش‌بینی شتاب بیشینه ناشی از می‌شود و می‌تواند به عنوان یک راه‌بهرینه در مسئله مذکور و نیز مسائل دیگری چون پیش‌بینی سایر پارامترهای جنبش نیرومند زمین در محل سایت گردد.

منابع

- Akhani M., Kashani A., Mousavi M., Gandomi A., "A hybrid computational intelligence approach to predict spectral acceleration", *Measurement*, (2019) 138: 578-589.
- Alavi A., Gandomi A., Modaresnezhad M., Mousavi M., "New Ground-Motion Prediction Equations Using Multi Expression Programming", *Journal of Earthquake Engineering*, (2011), 15:4, 511-536, DOI: 10.1080/13632469.2010.526752.
- AllamehZadeh M., Javan Doloiee G., Nasrollahnejad A., "Estimation of Maximum Peak Ground Acceleration via the ANFIS and FFBP Neural Networks", 6th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, (2017).
- Allen, T.I., and Wald, D.J., "Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (VS30) and amplification around the globe" U.S. Geological Survey Open-File Report (2007)-1357, p 69.

Derakhshani A., Foruzan A. H., "Predicting the principal strong ground motion parameters: A deep learning approach", *Applied Soft Computing*, (2019), 80, 192-201.

Derakhshani A., Foruzan A. H., "Predicting the principal strong ground motion parameters: A deep learning approach", *Applied Soft Computing*, 80, (2019), 192-201, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.03.029>.

Estrada A.P., Roberto Gómez R., Hong H.P., "Use of Neural network to predict the peak ground accelerations and pseudo spectral accelerations for Mexican Inslab and Interplate Earthquakes", *Geofísica Internacional*, (2014), 53(1), 39-57.

Derras B., Bard P. Y., Cotton F., Bekkouche A., "Adapting the Neural Network Approach to PGA Prediction: An Example Based on the KiK-net Data". *Bulletin of the Seismological Society of America* (2012) 102 (4): 1446–1461. doi: <https://doi.org/10.1785/0120110088>.

Jang J. SR., ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 23, (1993), 665-685.

Karimiparidari S., Zaré M., Memarian H., Kijko A., "Iranian earthquakes, a uniform catalog with moment magnitudes", *Journal of Seismology*, (2013), 17, 897–911. <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9360-9>.

Khamis A., Ismail Z., Haron K., Tarmizi A., "The Effects of Outliers Data on Neural Network Performance". *Journal of Applied Sciences*, (2005), 5: 1394-1398.

Kimiaefar, R., Siahkoobi, H.R., Hajian, A., Kalhor, A., Random noise attenuation by Wiener-ANFIS filtering", *Journal of Applied Geophysics*, 159, (2018), 453-459.

Official Report, Mormori Earthquake of 18 August 2014, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (iiees.ac.ir), (2014). <http://www.iiees.ac.ir/en/mormori-earthquake-of-18-august-2014-mw-6-2/>.

Rajabi E., Ghodrati Amiri G., Ghasemi V., "Peak Ground Acceleration Prediction for Critical Aftershocks", 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, (2019).

Rojas, O., B. Otero, L. Alvarado, Sergi Mus and R. Tous. "Artificial Neural Networks as Emerging Tools for Earthquake Detection." *Computación y Sistemas*, (2019), 23: 335-350.

Shiuly, A., Roy, N. & Sahu, R.B. "Prediction of peak ground acceleration for Himalayan region using artificial neural network and genetic algorithm". *Arabian Journal of Geoscience*, 13, 215 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5211-5>.

Tabatabaei, M., Kimiaefar, R., Hajian, A. et al. "Robust outlier detection in geo-spatial data based on LOLIMOT and KNN search". *Earth Science Informatics* 14, 1065–1072 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00610-9>.

Takagi, T., Sugeno, M., "Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control", *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 15, (1985), 116-132.

Thomas S., Pillai G.N., Pal K, Jagtap P., "Prediction of ground motion parameters using randomized ANFIS (RANFIS)", *Applied Soft Computing*, Volume 40, (2016), Pages 624-634.

Verges, J., Saura, E., Casciello, E., Fernández, M., Villaseñor, A., Jiménez-Munt, I., & García-Castellanos, D., Crustal-scale cross-sections across the NW Zagros belt: Implications for the Arabian margin reconstruction. *Geological Magazine*, (2011), 148(5-6), 739-761.

نحوه ارجاع به مقاله:

طباطبایی، سید محمدرضا؛ کیمیایی، فرح‌اله؛ حاجیان، علیرضا؛ اکبری، علیرضا؛ (۱۴۰۱) پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین برای زلزله‌های زاگرس با استفاده از شبکه انفیس و رویکرد تجزیه داده‌ها، جغرافیا و مطالعات محیطی ۱۱ (۴۲)، ۹۲-۱۰۴. Dor: 20.1001.1.20087845.1401.11.42.6.5

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

