تشخیص هوشمند رویداد و مکان زلزله‌های ایران در شبکه لرزه‌نگاری کشوری

صادق کریم‌پولی[۱]، عبدالرضا قدس[۲]

[۱] دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، s.karimpouli@znu.ac.ir

[۲] استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، aghods@iasbs.ac.ir

چکیده

پایش برخط زلزله در شبکه لرزه‌نگاری شامل مراحلی از جمله تشخیص و خوانش فازها، ارتباط بین ایستگاه‌ها و مکان‌یابی است. در سال‌های اخیر، دقت هر یک از این مراحل با استفاده از یادگیری ماشین افزایش یافته است. تمامی این مراحل با استفاده از شبکه‌های عصبی به صورت یک‌پارچه قابل تلفیق هستند، به طوری که با ورود داده‌ها رویداد زلزله و مکان آن به طور همزمان و بدون انجام مراحل میانی تشخیص داده شود. در این مطالعه ۲۷ ایستگاه در شبکه لرزه‌نگاری ایران در سال ۲۰۱۸ به کار گرفته شده و با استفاده از کاتالوگ‌های مربوطه داده‌های آموزشی استخراج شدند. جهت کاهش ابعاد داده‌های آموزشی و استخراج بهتر ویژگی‌های نهفته در شکل موج از دو فیلتر رایج در روش‌های تشخیص گفتار استفاده شد. شبکه اول به گونه‌ای آموزش داده شد که قادر است از روی الگوی داده‌های ورودی رویداد زلزله را با دقتی بیش از ۹۸٪ تشخیص دهد. شبکه دوم از شکل موج رویدادها به عنوان ورودی استفاده کرده و قادر است مکان وقوع زلزله را با دقتی بیش از ۹۹٪ و با میانگین خطای ۲۵ کیلومتر در هر جهت تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: رویدادهای زلزله، خوانش فاز لرزه‌ای، شبکه عصبی کانولوشنی، یادگیری عمیق

Intelligent detection of earthquakes events and locations in Iranian seismological network

Sadegh Karimpouli [1], Abdolreza Ghods [2]

[1] Mining Engineering Group, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
[2] Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran.

Abstract

Online monitoring of earthquake in a seismological network involves detection and picking phases, association and location tasks. In recent years, accuracy of each individual step increased by the use of machine learning. However, an end-to-end procedure of all of these steps are also possible using neural networks. In such procedure, seismic waveforms are imported to a neural network and both event and location are detected without implementing the intermediate picking and location steps. In this study, the data of one year (2018) record of 27 stations in the Iranian seismological network are used. Earthquakes events and locations are extracted using available catalogues as training dataset. To reduce the dimension of the training data and extracting more effective features from waveforms, popular filters in speech detection are used. First network is so trained that could detect earthquake events from the patterns of input data by an accuracy of more than 98%. Second network uses this event as the input data and could estimate earthquake location with an accuracy more than 99% and a mean absolute error of 25 km in each direction.

Keywords: Earthquake detection, Phase picking, Convolutional neural network, Deep learning

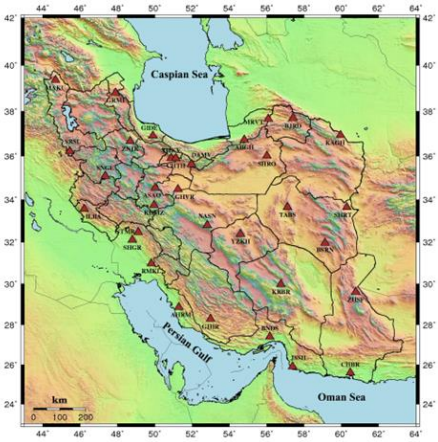
۱ مقدمه

زمین‌لرزه‌ها به طور معمول توسط شبکه پراکنده‌ای از ایستگاه‌های لرزه‌نگاری به صورت پیوسته ثبت و پایش می‌شوند. پایش زلزله شامل اعمال الگوریتم‌های پردازشی بر روی سیگنال‌های زلزله برای تشخیص یا خوانش فازها، ارتباط بین فازها در ایستگاه‌های مختلف و تعیین محل زلزله است. جهت افزایش دقت تشخیص زلزله به خصوص برای زلزله‌های کوچک، مطالعات مختلف بر روی افزایش دقت هر یک از این مراحل به طور جداگانه تمرکز نمودند. روش‌های مرسوم به ویژه برای خوانش فازهای زلزله، پایش پیوسته شکل موج با استفاده از یک سری فیلترها و توابعی مانند تغییر دامنه و/یا فرکانس است که توسط کاربر انتخاب می‌شود. در سال‌های اخیر یادگیری عمیق تاثیر شگرفی در زمینه تشخیص خودکار زلزله به خصوص در کلان داده‌های سال‌های گذشته داشته است (موسوی و همکاران ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱). با این وجود در بسیاری از مطالعاتی که بر پایه شبکه‌های عمیق انجام پذیرفته است، شبکه‌های تشخیص دهنده زلزله و خوانش فازها از اطلاعات یک ایستگاه استفاده کرده و اطلاعات همه ایستگاه‌ها به طور همزمان در روند یادگیری شبکه تاثیری ندارند. این موضوع در بخش تشخیص شکل‌موج‌های زلزله‌ها و هم‌دسته کردن آنها مشکل‌زا خواهد بود. در مقابل، استفاده همزمان از چندین ایستگاه می‌تواند روند تشخیص زلزله را به صورت خودکار تسهیل نماید (کریم‌پولی و قدس ۱۳۹۹، یانگ و همکاران ۲۰۲۰، ژو و همکاران ۲۰۲۱). موضوع دیگری که در این شبکه‌ها وجود دارد آن است که بسیاری از آنها از شکل موج به عنوان ورودی استفاده می‌نمایند. این امر برای حالت تک ایستگاهی مانعی ایجاد نمی‌کند، حال آن که اگر چند ایستگاه به طور همزمان به عنوان ورودی در نظر گرفته شوند، با توجه به حجم بالای داده‌های آموزشی، محدودیت‌های سخت‌افزاری، آموزش یک شبکه بهینه را با مشکل همراه می‌کنند.

هدف از این مطالعه، ارائه یک شبکه هوش مصنوعی عمیق برای تشخیص مستقیم و خودکار زمان و مکان زلزله در شبکه لرزه‌نگاری ایران با در نظر گرفتن مسائلی است که در بالا به آنها اشاره شد. بدان معنا که از ۲۷ ایستگاه لرزه‌نگاری به طور همزمان برای تشخیص زلزله استفاده می‌شود تا مشکل ارتباط تک ایستگاه‌ها با هم به طور کامل مرتفع گردد. همچنین برای اجتناب از تشکیل دسته داده آموزشی بسیار حجیم از فیلترهای فرکانسی در حوزه تشخیص گفتار استفاده می‌شود. در ادامه دو شبکه عمیق به گونه‌ای آموزش داده می‌شوند که شبکه اول وقوع رویدادهای زلزله را تشخیص داده و شبکه دوم کانون سطحی زلزله را تخمین می‌زند.

۲ روش تحقیق

داده‌های ورودی در این مطالعه سیگنال‌های پیوسته و سه مولفه‌ای ۲۷ ایستگاه لرزه‌نگاری ایران (شکل ۱) در سال ۲۰۱۸ است. کاتالوگ زلزله‌های رخ داده شده در این سال از اطلاعات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌نگاری ایران و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران اخذ شد.

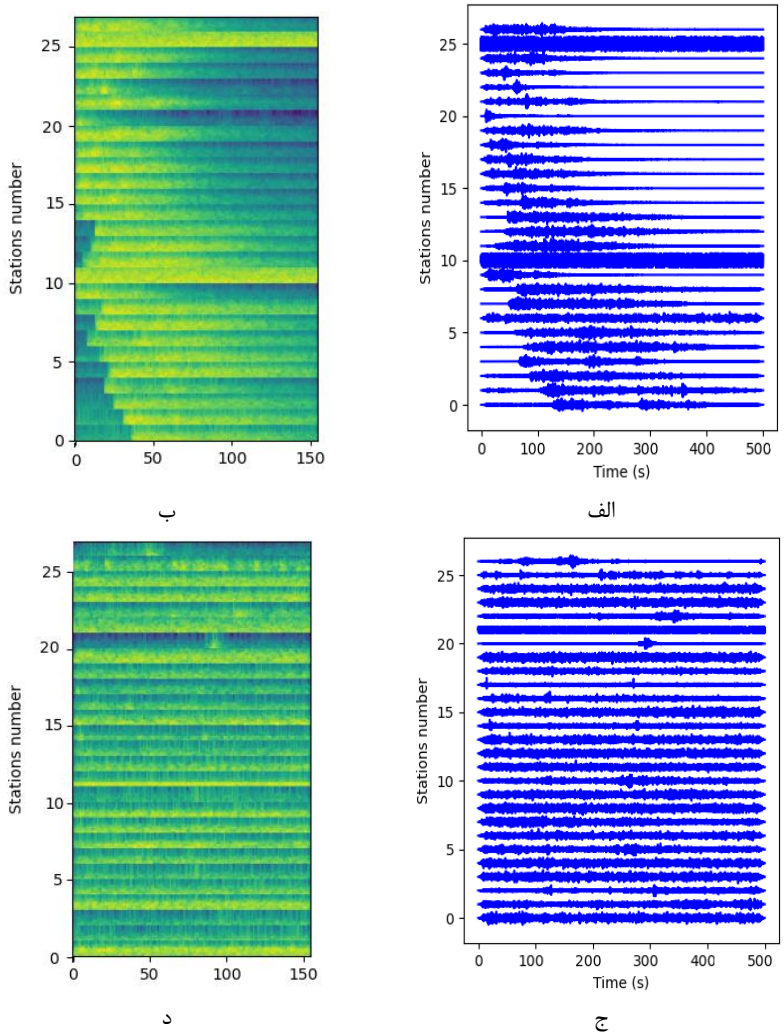


شکل ۱. ۲۷ ایستگاه لرزه¬نگاری ایران، مورد استفاده در این مطالعه.

در این مطالعه، زلزله‌های با بزرگای ۴ و بیشتر فیلتر گردید و در نهایت بیش از ۲۵۰۰ رویداد به عنوان داده‌های آموزشی زلزله در نظر گرفته شد. جهت تشکیل دسته داده آموزشی نویز (یا بدون زلزله) به طور تقریبی ۵ برابر تعداد زلزله‌ها در زمان‌هایی خارج از زلزله‌های کاتالوگ، داده‌های مربوطه استخراج گردید. طول شکل موج استخراج شده از تمامی ۲۷ ایستگاه ۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد که با توجه فرکانس ۵۰ هرتز گیرنده‌ها و ۳ مولفه n، e و z آرایه‌ای با اندازه ۳×۲۵۰۰۰×۲۷×۱۵۰۰۰ به عنوان داده آموزشی تشکیل شد. همچنین مرکز کانون‌های سطحی تمامی زلزله‌های مورد نظر نیز به عنوان داده‌های آموزشی جهت مکان‌یابی زلزله استخراج گردیدند.

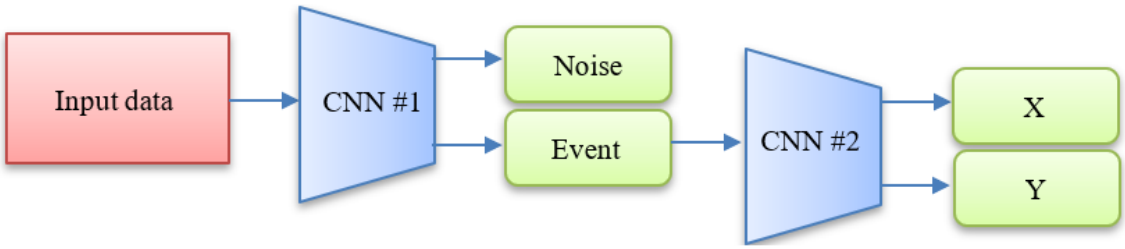
لازم به ذکر است، برای آن که شکل موج‌های استخراج شده با یکدیگر قابل مقایسه باشند، ابتدا روند موجود در هر داده از روی شکل موج برداشته شد، سپس با یک فیلتر میان‌گذر با فرکانس ۱ تا ۳ هرتز فرکانس داده‌ها در یک بازه قرار گرفت و در نهایت ویژگی‌های گیرنده‌ها از روی داده‌ها حذف گردید و تمامی شکل موج‌ها بین ۱- و ۱ نرمال گردیدند. جهت استخراج بهتر ویژگی‌های نهفته در شکل موج از دو فیلتر معروف در روش‌های تشخیص گفتار به نام‌های Filter Banks (FB) و Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) استفاده شد (موکرجی و همکاران ۲۰۲۱). منطق FB تبدیل سیگنال ورودی به مولفه‌های

چندتایی است به طوری که هر یک از آنها حاوی یک فرکانس خاص از طیف فرکانسی اصلی باشند. به طور معمول این کار توسط یک تبدیل فوریه سریع انجام می‌پذیرد اما نتایج حاصله دارای همبستگی بالایی در هر فرکانس می‌باشد. این امر آموزش شبکه‌های یادگیری عمیق را با مشکل همراه می‌کند. برای کاهش خودهمبستگی بین ضرایب FB از MFCC استفاده می‌شود که هسته مرکزی آن یک تبدیل کسینوس ناپیوسته است و باعث نمایش فشرده‌تر FBها می‌شود. با استفاده از فیلترهای فوق، هر سیگنال با ۲۵۰۰۰ سلول به یک آرایه با اندازه ۱۰×۱۵۵ تبدیل شد. با توجه به ۲۷ ایستگاه و ۳ مولفه در هر ایستگاه، ابعاد داده‌های ورودی به ۳×۱۵۵×۲۷۰×۱۵۰۰۰ کاهش یافت. این امر باعث می‌شود تا به طور همزمان از تمامی داده‌های آموزشی برای یادگیری شبکه با سرعت اجرای مناسب استفاده شود. شکل ۲ نمونه‌هایی از سیگنال‌های زلزله و نویز قبل و بعد از پردازش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مولفه Z سیگنال‌های زلزله الف- قبل از پردازش، ب- بعد از پردازش و مولفه Z سیگنال‌های نویز ج- قبل از پردازش، د- پس از پردازش.

در این مطالعه از دو شبکه عصبی عمیق استفاده شد (شکل ۳). شبکه اول برای تشخیص رویدادهای زلزله آموزش دیده و قادر است با توجه به الگوی بین ایستگاه‌ها در داده‌های ورودی پردازش شده تعیین کند که آیا زلزله رخ داده است یا خیر؟ چنانچه زلزله‌ای تشخیص داده شود، داده‌های مربوطه وارد شبکه دومی می‌شوند که برای تخمین مکان زلزله آموزش دیده است (شکل ۳). پس از پیش‌پردازش سیگنال‌های ورودی، این داده‌ها (و داده‌های مربوط به مکان زلزله) به نسبت ۷۵ به ۲۵٪ به عنوان داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی/تست تقسیم شده و شبکه‌ها آموزش دیدند.

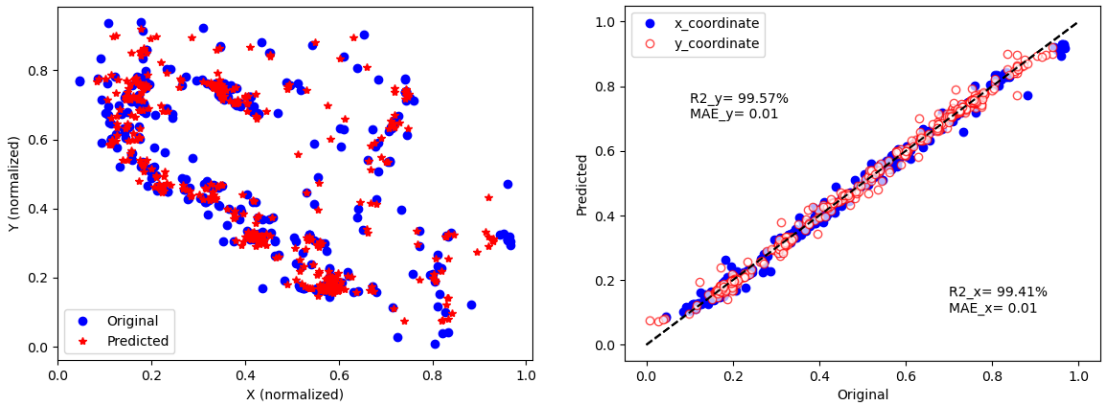


شکل ۳. نمایی از شبکه‌های مورد استفاده در این مطالعه جهت تشخیص سیگنال زلزله و فازهای مربوطه.

جدول ۱ دقت آموزش شبکه‌ها را برای داده‌های تست نشان می‌دهد که حاکی از یادگیری قابل قبول هر دو شبکه است. نتایج شبکه اول حاکی از دقت ۹۸/۳ درصدی است. پیاده‌سازی آن روی داده‌های واقعی منجر به افزایش دو برابری زلزله‌های شناسایی شده در کاتالوگ‌ها دارد. همچنین شبکه دوم با دقت بیش از ۹۹ درصد و خطای میانگین ۲۵ کیلومتر مختصات x و y مکان زلزله‌ها را تخمین می‌زند. شکل ۴ دقت تخمین‌های مکان‌یابی و پراکندگی آنها در ایران را برای داده‌های تست نشان می‌دهد. جالب آن است که این کار بدون خوانش فازها و اجرای الگوریتم‌های مکان‌یابی و به طور مستقیم از روی الگوی داده‌های پردازش شده صورت گرفته است. این نتایج به عنوان یک تخمین اولیه سرعت مکان‌یابی برخط زلزله را افزایش می‌دهد به طوری که کاربر یا الگوریتم‌های خودکار فازهای هر رویداد را فقط در ایستگاه‌های نزدیک مکان تخمینی خوانده و مکان دقیق زلزله را محاسبه می‌نماید.

جدول ۱. دقت شبکه‌های مورد استفاده در این مطالعه برای داده‌های تست.

دقت شبکه اول: کلاسه‌بندی کننده سیگنال زلزله (٪) CNN #1			دقت شبکه دوم: تخمین مکان زلزله CNN #2			
کل شبکه	تشخیص زلزله	تشخیص نوفه	مختصات x		مختصات y	
			R^2 (%)	MAE (km)	R^2 (%)	MAE (km)
۹۸/۳	۹۰/۱	۹۵/۵	۹۹/۴۱	۲۵	۹۹/۵۷	۲۵



الف ب

شکل ۴. الف- نتایج دقت تخمین مختصات x و y مکان زلزله‌ها برای داده‌های تست و ب- پراکندگی مکان‌های واقعی و تخمینی در ایران

۳ نتیجه‌گیری

در این مطالعه از شبکه‌های عصبی کانولوشنی جهت تشخیص خودکار رویدادها و تخمین مکان زلزله‌ها در داده‌های لرزه‌نگاری سال ۲۰۱۸ شبکه لرزه‌نگاری ایران استفاده شده است. نتایج شبکه اول حاکی از دقتی بیش از ۹۸ درصدی در تشخیص رویدادهای زلزله داشته که پیاده‌سازی آن روی داده‌های سال ۲۰۱۸ منجر به تشخیص تقریباً دو برابری زلزله‌ها شده است. در ضمن شبکه دوم به طور مستقیم و با دقتی بیش از ۹۹ درصد مکان زلزله‌ها را تخمین می‌زند.

۴ تشکر و قدردانی

نگارندگان از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF- کد طرح ۹۹۰۱۷۸۰۰) از این مطالعه تشکر می‌نمایند.

منابع

کریم پولی ص. و قدس ع. (۱۳۹۹). تشخیص خودکار رویدادهای زلزله و خوانش فازهای لرزه ای با استفاده از شبکه های کانولوشنی عمیق، نوزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، ص ۱-۴.

Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake transformer: an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature communications*, 11 (1), 1-12.

Mousavi, S. M., Zhu, W., Sheng, Y., & Beroza, G. C. (2019). Cred: A deep residual network of convolutional and recurrent units for earthquake signal detection. *Scientific reports*, 9 (1), 1-14.

Yang, S., Hu, J., Zhang, H., & Liu, G. (2021). Simultaneous earthquake detection on multiple stations via a convolutional neural network. *Seismological Research Letters*, 92(1), 246-260.

Zhu, W., Tai, K. S., Mousavi, S. M., Bailis, P., & Beroza, G. C. (2021). An End-to-End Earthquake Detection Method for Joint Phase Picking and Association using Deep Learning. *arXiv preprint* arXiv:2109.09911.