تشخیص خودکار رویدادهای زلزله و خوانش فازهای لرزه‌ای با استفاده از شبکه‌های کانولوشنی عمیق

صادق کریم‌پولی [1]، عبدالرضا قدس [2]

[1] استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، s.karimpouli@znu.ac.ir
[2] استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، aghods@iasbs.ac.ir

چکیده

تشخیص خودکار رویدادهای زلزله و خوانش فازهای لرزه‌ای از روی شکل موج‌های پیوسته‌ی ثبت شده در زلزله‌نگارها از اهمیت بسزایی در لرزه‌شناسی برخوردار است. روش‌های متداول در این زمینه شامل نسبت میانگین کوتاه مدت به طولانی مدت و تطبیق الگو هستند. با این وجود، ظهور شبکه‌های عصبی کانولوشنی در سال‌های اخیر و استفاده موفق آنها در زمینه لرزه‌شناسی، تشخیص خودکار زلزله و فازهای لرزه‌ای را متحول کرده است. هدف از این مطالعه ارزیابی این روش‌ها در یک مورد مطالعاتی واقعی است. از این رو، با پیاده‌سازی دو شبکه کانولوشنی بر روی داده‌های 11 روزه پیوسته سه ایستگاه لرزه‌نگاری زلزله 11 آگوست سال 2012 ورزقان-اهر، رویدادهای زلزله تعیین و فازهای لرزه‌ای خوانش شدند. نتایج نشان داد که با استفاده از این شبکه‌ها تعداد رویدادهای زلزله تشخیص داده شده با دقتی بیش از 88٪، نسبت به روش‌های متداول یک افزایش 260٪ نشان می‌دهد. همچنین فازهای لرزه‌ای Pg و Sg به ترتیب با دقتی بیش از 96 و 90% قابل خوانش هستند و می‌توان برای آنها دقت خوانش هم تعیین کرد.

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

Automatic earthquake detection and phase picking using deep convolutional networks

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

Automatic earthquake detection and phase picking from continuous waveform recorded by seismograms are highly important in seismology. Conventional methods contain short-term/long-term average (STA/LTA) and pattern recognition methods. However, recently, convolutional neural networks emerged as a game changer in machine learning as well as seismology, earthquake detection and phase picking. This study aims to evaluate these methods in a real case study. To this end, we implement two convolutional networks on 11 days continuous seismic waveforms of three seismometers recorded the Varzaghan-Ahar earthquake (11-August-2012), and detect seismic events and pick their corresponding seismic phases. Results show that relative to conventional methods (STA/LTA), the number of detected earthquakes are increased by 260% with a detection accuracy of more than 88%. Also, Pg and Sg phases are picked with an accuracy of more than 96 and 90%, respectively.

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

1 مقدمه

با افزایش روزافزون حجم داده‌های ثبت شده توسط زلزله‌نگارها، تشخیص خودکار زلزله از روی شکل موج‌های پیوسته اهمیت بیشتری پیدا کرده است. روش‌های متداول تعیین خودکار زلزله و فاز لرزه‌ای، سیگنال لرزه‌ای در حوزه فاز را به تابع ویژه‌ای به مانند نسبت میانگین کوتاه مدت به طولانی مدت (STA/LTA)[1] (آلن 1982) تبدیل نموده و سپس

[1] . Short-term/long-term average (STA/LTA)

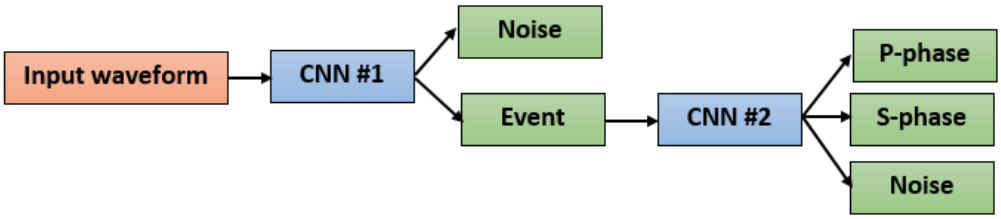
اندیس بیشینه مقدار محلی یا مقادیر افزایش لبه را به عنوان زمان رسید موج در نظر می‌گیرند. روش‌های دیگر مانند خودهمبستگی شکل موج که براساس مقایسه شباهت شکل موج عمل می‌کنند، برای تشخیص زلزله‌هایی که از یک ناحیه خاص با مکانیسم کانونی مشابه تولید می‌شوند به کار می‌روند. اگرچه این روش‌ها قابل اعتماد و مناسب هستند، اما حجم محاسبات آنها بسیار زیاد است. یک روش برای کاهش محاسبات، انتخاب مجموعه‌های از شکل موج‌ها به عنوان الگو و تعیین همبستگی فقط این الگوها با سری‌های زمانی طولانی است (سکومال و همکاران 2014). اخیراً یک روش نظارت نشده به نام FAST[2] جهت کاهش پیچیدگی‌های روش تطابق الگو ارائه شده است. این روش با تهیه بانکی از رویدادهای لرزه‌ای شکل موج، جستجو برای تطابق‌یابی را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد (یون و همکاران 2015). با این وجود، این روش‌ها قادر به شناسایی زلزله‌هایی که آلوده با نوفه‌های لرزه‌ای‌اند، نیستند (پرول و همکاران 2018).

با پیشرفت‌های اخیر در زمینه افزایش قدرت محاسبات موازی در پردازنده‌های گرافیکی، یادگیری عمیق در زمینه‌های پردازش صوت و تصویر کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. بسیاری از مطالعاتِ یادگیری عمیق از شبکه‌های پایه‌ای مشابهی مانند شبکه عصبی کانولوشنی استفاده می‌کنند (کریژفسکی و همکاران 2012). این شبکه‌ها برپایه کرنل‌های کانولوشنی کوچکی بنا شده‌اند که قادرند ویژگی‌های مرتبه بالای داده‌های ورودی را استخراج کنند. سپس یک شبکه تمام-مرتبط ارتباط میان این نقشه‌های ویژگی را با داده‌های خروجی برقرار می‌کند. از جمله کاربردهای یادگیری عمیق در زلزله‌شناسی به مواردی مانند تشخیص زلزله و تعیین فاز، پیش‌بینی زلزله، پیش‌بینی شدت نوسانات زلزله، توموگرافی لرزه‌ای و ژئودزی لرزه‌ای می‌توان اشاره نمود (کونگ و همکاران 2019).

هدف از این مطالعه بررسی قابلیت روش‌های یادگیری عمیق در تشخیص خودکار سیگنال و فاز زلزله و مقایسه آنها با روش‌های متداول است. در این مطالعه ما از داده‌های یک شبکه زلزله‌نگاری سه ایستگاهی که پس‌لرزه‌های زلزله‌ی دوقلوی ورزقان-اهر (11 آگوست 2012) (قدس و همکاران 2015) را به مدت 11 روز به طور پیوسته ثبت کرده است، استفاده می‌کنیم. قدس و همکاران (2015) با استفاده از روش STA/LTA توانستند 1114 رویداد لرزه‌ای را در طول مدت 11 روز (13 الی 24 ماه آگوست سال 2012) تشخیص بدهند.

2 روش تحقیق

داده‌های ورودی در این مطالعه شکل‌موج‌های پیوسته و اطلاعات فاز و بولتن 1218 رویداد تشخیص داده شده است. براساس شکل 1، در ابتدا از یک شبکه عصبی کانولوشنی (CNN #1) جهت تفکیک سیگنال‌های زلزله از نوفه‌ها استفاده می‌شود. چنانچه زلزله‌ای تشخیص داده شود، بخش کوچکی از شکل موج که حاوی سیکنال زلزله است (25 ثانیه) به عنوان ورودی برای شبکه عصبی کانولوشنی دیگری (CNN #2) جهت تعیین فاز Pg، Sg و نوفه استفاده می‌شود.



شکل 1. نمایی از شبکه‌های مورد استفاده در این مطالعه جهت تشخیص سیگنال زلزله و فازهای مربوطه.

شبکه‌های عصبی کانولوشنی استفاده شده در این مطالعه از 7 لایه کانولوشنی تشکیل شده که سه لایه اول شامل 32 کانال و چهار لایه بعدی هر کدام شامل 64 کانال است. همچنین کرنل کانولوشنی استفاده شده در لایه اول دارای 7 سلول، در لایه‌های دوم و سوم 5 سلول و در بقیه لایه‌ها هر کدام دارای 3 سلول می‌باشد. در هر لایه اندازه پنجره‌ی حداکثر تجمع[3] 2 سلول، با گام‌های[4] 2 سلولی به همراه حذف تصادفی[5] 20% از نرون‌ها در هر مرحله از آموزش در نظر

[2] . Fingerprint And Similarity Thresholding (FAST)
[3] . Max-pooling
[4] . Stride
[5] . Dropout

گرفته شد. بردار ویژگی بدست آمده در این شبکه توسط یک لایه 256 نرونی با حذف تصادفی 40٪ از نرون‌ها به خروجی متصل می‌شود. تابع فعال‌سازی در تمامی لایه‌ها ReLU بوده و نتایج تنها در لایه آخر با یک تابع Softmax به صورت مقادیر احتمالی بین صفر و یک محاسبه می‌شوند.

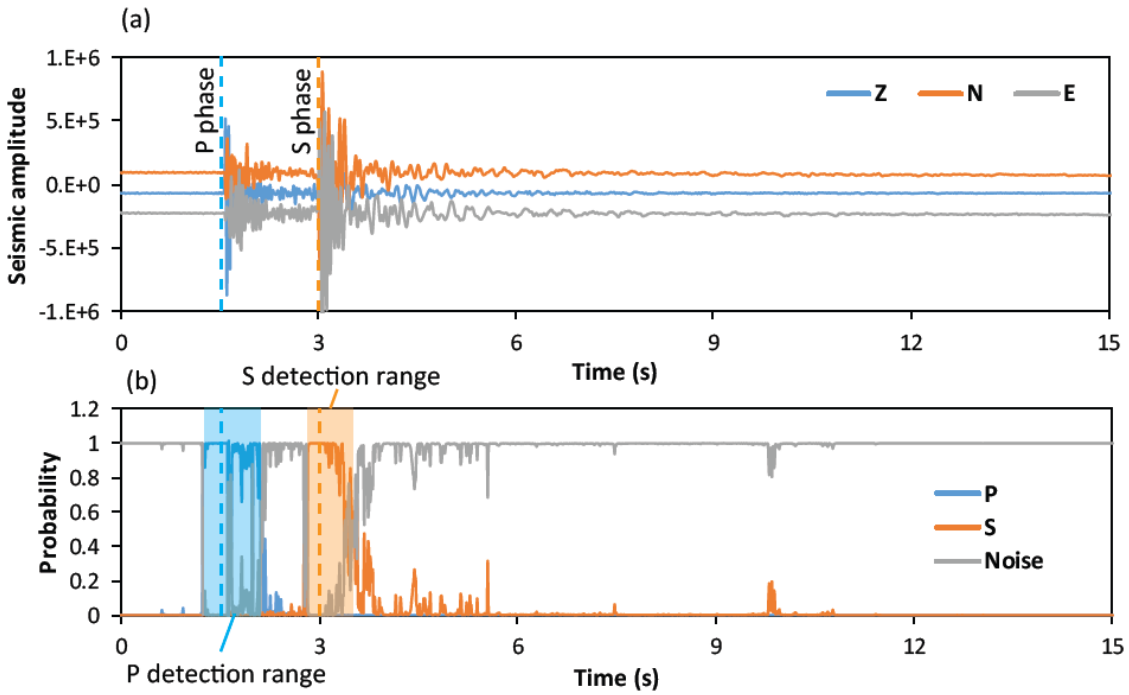
از بین کلیه رویدادها و شکل موج پیوسته ، 1114 رویداد زلزله و 76500 نوفه با طول 10 ثانیه به عنوان داده‌های آموزشی در نظر گرفته شدند. شکل موج‌های زلزله توسط کاربر با ثبت زمان رسید فازهای Pg و Sg در هر 3 ایستگاه تعیین شده است. همچنین نوفه‌ها از شکل‌موج‌های پیوسته ثبت شده در زلزله‌نگارها ضمن کنار گذاشتن سیگنال‌های زلزله و به طور تصادفی انتخاب شدند. روش متداول در شبکه‌های عصبی کانولوشنی مورد استفاده در تشخیص زلزله، استفاده از 3 مولفه (Z, N, E) ثبت شده در یک ایستگاه به عنوان ورودی است (کونگ و همکاران 2019). مشکل این نوع شبکه آن است که پس از تعیین زلزله‌ها در تک تک ایستگاه‌ها، یک مرحله پساپردازشی مورد نیاز است تا با کنترل کردن سری‌های زمانی تشخیص رویداد تمامی ایستگاه‌ها، مشخص کند که آیا واقعاً زلزله ثبت شده در هر ایستگاه زلزله بوده است یا خیر؟ جهت رفع این مشکل، در این مطالعه از مولفه‌های عمودی هر سه ایستگاه به عنوان سه سیگنال ورودی شبکه اول استفاده شده است. این کار باعث می‌شود که بدون نیاز به یک عملیات پساپردازشی، تشخیص زلزله واقعی به طور خودکار و درون شبکه انجام پذیرد. البته از ضعف‌های این شبکه مشکل عدم مقیاس‌پذیری آن در مناطقی است که شامل تعداد زلزله‌نگارهای کمتر یا بیشتر از سه ایستگاه می‌باشند. همچنین ورودی شبکه دوم، سه مولفه (Z, N, E) ثبت شده در یک ایستگاه در نظر گرفته شد تا برای تعیین فازهای مختلف (Pg, Sg) قابل آموزش باشد. داده‌های اولیه به صورت 70 و 30٪ برای آموزش و اعتبارسنجی/تست تقسیم‌بندی شدند. در هر دو شبکه، تابعِ بهینه‌ساز Adadelta و تابع زیان Categorical cross entropy بکار برده شد. جدول 1 پارامترهای آموزشی شبکه را نشان می‌دهد که حاکی از یادگیری قابل قبول هر دو شبکه است.

جدول 1. پارامترهای آموزشی شبکه‌های مورد استفاده در این مطالعه.

دقت شبکه کلاسه‌بندی کننده سیگنال زلزله (٪) CNN #1			دقت شبکه کلاسه‌بندی کننده فاز شکل موج (٪) CNN #2			
کل شبکه	تشخیص زلزله	تشخیص نوفه	کل شبکه	تشخیص فاز Pg	تشخیص فاز Sg	تشخیص نوفه
99/69	88/41	91/62	99/44	96/04	90/55	99/68

پس از آموزش شبکه‌ها، شکل موج‌های پیوسته مربوطه به 11 روز (از 13 تا 24 آگوست) به عنوان ورودی به شبکه‌ها داده شد. مشاهده چشمی 2917 رویداد کاندید شده توسط شبکه عصبی استفاده شده نشان داد که همه‌ی زلزله‌های کاندید شده، رویدادهای قابل مکان‌یابی هستند. این در حالی است که معمولا 20 الی 30٪ از رویدادهای کاندید شده توسط روش STA/LTA، رویدادهای قابل مکان‌یابی هستند. تعداد رویدادهای تشخیص داده شده در مقایسه با 1114 رویداد تشخیص داده شده توسط روش متداول STA/LTA، افزایش تقریبا 260 درصدی نشان می‌دهد. این نتیجه نشانگر قابلیت قابل توجه شبکه‌های عصبی عمیق در تشخیص رویدادهای لرزه‌ای است.

شکل 2 نمونه‌ای از نتایج دو شبکه را نشان می‌دهد. شکل 2-الف، سیگنال زلزله‌ای است که در شبکه اول تشخیص داده شده و شکل 2-ب نتایج احتمالی تعیین فاز Pg، Sg و نوفه همان زلزله در شبکه دوم است. همان طور که دیده می‌شود فازهای مختلف در یک پنجره زمانی با احتمال بیش از 50٪ قابل تشخیص هستند. با این وجود محل دقیق آنها در مرکز زمان‌های با حداکثر احتمال در نظر گرفته شد. روش ارایه شده برای تشخیص فازها با استفاده از تابع احتمال می‌تواند دقت خوانش هر فاز را هم مشخص کند. دقت خوانش فازهای اتوماتیک با مقایسه با خوانش‌های دستی مورد صحت‌سنجی قرار خواهد گرفت. در ادامه ما با استفاده از فازهای اتوماتیک خوانش شده، همه زلزله‌ها را مکان‌یابی کرده و الگوی زلزله‌خیزی را در 11 روز مدت مطالعه مورد بررسی دقیق قرار خواهیم داد.



شکل 2. نتایج الف- شبکه اول و ب- شبکه دوم برای یک زلزله و ایستگاه تصادفی.

3 نتیجه‌گیری

در این مطالعه از شبکه‌های عصبی کانولوشنی جهت تشخیص خودکار رویدادهای زلزله و خوانش فازهای لرزه‌ای بر روی داده‌های شبکه زلزله‌نگاری سه ایستگاهیِ پس‌لرزه‌های زلزله‌ی دوقلوی ورزقان-اهر (11 آگوست 2012) به مدت 11 روز پیاده‌سازی شده است. نتایج حاکی از آن است که روش یادگیری عمیق ارایه شده در این تحقیق 260٪ رویداد لرزه‌ای بیشتر نسبت به روش STA/LTA تشخیص داده است که نشانگر قابلیت قابل توجه این شبکه‌ها در تشخیص رویدادهای لرزه‌ای است. همچنین فازهای لرزه‌ای Pg و Sg به ترتیب با دقتی بیش از 96 و 90٪ خوانش شدند.

منابع

Allen, R. (1982). Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *72*(6B), S225–S242.

Ghods, A., Shabanian, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezanejad, G., & Aziz-Zanjani, A. (2015). The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran. *Geophysical Journal International*, *203*(1), 522–540. doi:10.1093/gji/ggv306

Kong, Q., Trugman, D. T., Ross, Z. E., Bianco, M. J., Meade, B. J., & Gerstoft, P. (2019). Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismological Research Letters*, *90*(1), 3–14. doi:10.1785/0220180259

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, *60*(6), 84–90. doi:10.1145/3065386

Perol, T., Gharbi, M., & Denolle, M. (2018). Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances*, *4*(2). doi:10.1126/sciadv.1700578

Skoumal, R. J., Brudzinski, M. R., Currie, B. S., & Levy, J. (2014). Optimizing multi-station earthquake template matching through re-examination of the Youngstown, Ohio, sequence. *Earth and Planetary Science Letters*, *405*, 274–280. doi:https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.033

Yoon, C. E., O'Reilly, O., Bergen, K. J., & Beroza, G. C. (2015). Earthquake detection through computationally efficient similarity search. *Science Advances*, *1*(11). doi:10.1126/sciadv.1501057