



Research Paper

Predicting the Magnitude of Possible Earthquakes in the Shahrood District of Khalkhal County, Ardabil, Iran, Using Artificial Neural Networks



*Fariba Esfandiari Darabad¹ Mehrdad Vahabzadeh Zargari¹ Behrouz Nezafat Takle¹ Sayeh Abidi Hamlabad¹

1. Department of Geography (Geomorphology), Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.



Citation Esfandiari Darabad., F., Vahabzadeh Zargari., M., Nezafat Takle., B., & Abidi Hamlabad., S. (2024). [Predicting the Magnitude of Possible Earthquakes in the Shahrood District of Khalkhal County, Ardabil, Iran, Using Artificial Neural Networks (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(2):158-177. <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.794.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.794.1>

ABSTRACT

Background and objective Earthquakes are natural disasters that can cause high damage. Prediction of earthquakes is necessary to reduce damages, develop resistant infrastructure, and prevent the loss of life in human societies. This research aims to predict the magnitude of possible earthquakes in the Shahrood district of Khalkhal County using artificial neural networks (ANN).

Method A multi-layer perceptron neural network was used to predict earthquake magnitude.

Results The results showed that in the fault areas, especially the Kalur fault, earthquakes with a magnitude of 1-3 on the Richter scale are more likely to occur (70%). The likelihood of earthquakes with a magnitude of 4-6 on the Richter scale is moderate (26%) and the earthquakes with a magnitude of 7-10 on the Richter scale have a very low probability (4%).

Conclusion In future studies, it is recommended to use machine learning models to better and more accurately predict earthquakes in the studied area.

Keywords Prediction, Magnitude of earthquake, Shahrood, Khalkhal, Neural network

Article Info:

Received: 14 Mar 2024

Accepted: 18 May 2024

Available Online: 01 Jul 2024

* Corresponding Author:

Fariba Esfandiari Darabad,

Address: Department of Geography (Geomorphology), Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Tel: +98 (912) 0503281

E-mail: esfandyari@uma.ac.ir



Copyright © 2024 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Extended Abstract

Introduction

From ancient times, following natural disasters, mankind has sought solutions to prevent or control these disasters. Earthquakes are one of these natural disasters that have always caused financial and human losses. The time, place, and magnitude of the earthquakes are the three main parameters of the earthquake assessment. To control and minimize its adverse effects, a good estimate of their values should be available (Arjamand et al., 2015). Earthquake is a natural hazard with sudden shaking of the ground, which is of particular importance for human societies in terms of magnitude and area of destruction, unpredictability, and occurrence in a very short time (Gholami and Shokuhi Bidandi, 2023). For earthquake prediction, it is necessary to consider the time, place, magnitude, probability, and reason for its occurrence. The purpose of earthquake prediction is to help disaster management organizations prepare for earthquakes. When a strong earthquake is predicted, disaster management organizations should be alerted to take preventive measures. In disaster preparedness, decisions and activities focus on damage prevention. Various earthquake prediction techniques have been applied to mitigate damages (Bhatia et al., 2023).

Shahrood, a district of Khalkhal county, Ardabil, Iran, is an area vulnerable to earthquakes due to the existence of geological formations with heterogeneous resistance, being located on an alluvial plain with less resistance than the thick bedrock, and being surrounded by numerous faults. Also, due to being located in the folded zone of Western Alborz and Azerbaijan, different faults in the region have been formed, the most important of which are Talash fault, Neor fault, and Shahooud Kalur fault. This research aims to predict the magnitude of possible earthquakes in the Shahrood district of Khalkhal County using artificial neural networks.

Methods

This research used various data and information, including the geological map of Rezvanshahr, Khalkhal, and Masuleh counties with a scale of 1:100,000, from which the map of faults and geological formations was extracted. ALOS-PALSAR digital elevation model with a spatial resolution of 12.5 m and Sentinel-2 satellite images were used to identify geological features. For finding different characteristics of earthquakes, the 30-year seismic data from the Institute of Geophysics of the University of

Tehran and the global seismic data from the US Geological Survey were used, which included date of occurrence, magnitude, focal depth, and geographic coordinates. The selection of a 30-year period was due to the existence of complete data. For the period of more than 30 years, the data were mostly incomplete. All the data used for the preparation in the first stage were entered into the ArcGIS software and preliminary processing was done on all neural layers. After the preprocessing, the modeling is done using SPSS Modeler software.

Results

For modeling the input data for the network, the data was split into two sets; 70% for training and 30% for testing. Five criteria were determined for predicting earthquake magnitude: Earthquake focal depth, magnitude of previous earthquakes, distance of the faults from the occurrence points, location of previous earthquakes, and fault length. After designing the model and configuring the network, the data was processed, and a multilayer perceptron (MLP) artificial neural network was created with 5 input neurons, 3 hidden neurons, and 1 output neuron. This model achieved an accuracy of 98.2%, indicating its high precision in processing data for predicting earthquake magnitude. The results indicated that, in the MLP model, the highest effect (0.83) was related to the magnitude of previous earthquakes, followed by the distance of the faults (0.58) and the focal depth of earthquakes (0.42). The lowest effects were related to the location of previous earthquakes (0.25) and fault length (0.18). The MLP model was finally found to have high validity and reliability in both training and testing phases.

Conclusion

The prediction results showed that earthquakes with a magnitude of 1-3 on the Richter scale are very likely to occur and the possibility of their occurrence on faults, especially the Kalur fault, is very high (70%). Although earthquakes with this magnitude have low risk, their occurrence in shallow depths and close to residential areas can cause mortality and financial loss. Also, earthquakes with a magnitude of 4-6 on the Richter scale have a moderate probability of occurrence (26%). These earthquakes can cause a lot of damage in the region. Moreover, the likelihood of earthquakes with a magnitude of 7-10 on the Richter scale in the area is 4%, indicating a low probability. In future studies, it is recommended to use machine learning models to better and more accurately predict earthquakes in the studied area.



Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were observed in this study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

The authors contributed equally to preparing this paper.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Center for Seismology of Iran and the [Institute of Geophysics of the University of Tehran](#), for providing important data and information to carry out this research.



مقاله پژوهشی

پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه احتمالی در بخش شاهرود شهرستان خلخال با استفاده از شبکه عصبی

* فریا اسفندیاری درآباد^۱، مهرداد وهاب‌زاده زرگری^۱، بهروز نذافت تکه^۱، سایه عبیدی حمل‌آباد^۱

۱. گروه جغرافیا طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

Use your device to scan
and read the article online



Citation Esfandiari Darabad., F., Vahabzadeh Zargari., M., Nezafat Takle., B., & Abidi Hamlabad., S. (2024). [Predicting the Magnitude of Possible Earthquakes in the Shahrood District of Khalkhal County, Ardabil, Iran, Using Artificial Neural Networks (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(2):158-177. <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.794.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.2.794.1>

چکیده

زمینه و هدف: زمین‌لرزه یکی از پدیده‌های طبیعی و مخاطره‌آمیز بر روی کره زمین است که به‌علت میزان صدمات و شدت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین شناخت پارامترها و پیش‌بینی زمین‌لرزه یکی از اقدامات ضروری برای کاهش خسارات، توسعه زیرساخت‌های مقاوم و جلوگیری از دست رفتن زندگی جوامع انسانی است. هدف از پژوهش حاضر پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه احتمالی در بخش شاهرود شهرستان خلخال با استفاده از شبکه عصبی است.

روش: در این پژوهش از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از پژوهش نشان داد در مناطق گسله به‌ویژه گسل کلور رخداد زمین‌لرزه با بزرگای ۱ تا ۳ ریشتر در منطقه با مجموع ۷۰ درصد دارای احتمال بیشتری است، اما به‌خاطر مجهول بودن بخشی از داده‌های زمین‌لرزه با بزرگای بالای ۶ ریشتر، از عوامل تأثیرگذار دیگر استفاده شده که این امکان را برای شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در بخش پیش‌بینی فراهم می‌سازد تا با تشکیل ماتریس و مقایسه آن نتایج نهایی ایجاد شود. همچنین پیش‌بینی وقوع زمین‌لرزه با بزرگای ۴ تا ۶ در آینده، با ۲۶ درصد احتمال متوسطی دارد، اما پیش‌بینی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۷ تا ۱۰ ریشتر توسط مدل پرسپترون چندلایه با مجموع ۴ درصد دارای احتمال خیلی پایینی است.

نتیجه‌گیری: در نهایت پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، برای پیش‌بینی هرچه بهتر و دقیق‌تر زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه، از مدل‌های مبتنی بر روش‌های یادگیری ماشینی استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی، بزرگای زمین‌لرزه، شاهرود، خلخال، شبکه عصبی

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۴ اسفند ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۱۱ تیر ۱۴۰۳

* نویسنده مسئول:

فریا اسفندیاری درآباد

نشانی: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیا طبیعی (ژئومورفولوژی).

تلفن: ۰۵۰۳۲۸۱ (۹۱۲) +۹۸

پست الکترونیکی: esfandiyari@uma.ac.ir



Copyright © 2024 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

از زمان‌های قدیم و در پی حوادث و وقایع طبیعی، بشر همواره به دنبال راهکارهایی برای جلوگیری یا کنترل این وقایع بوده است. زمین‌لرزه یکی از این حوادث طبیعی است که وقوع آن همواره تلفات جانی و مالی سنگینی به همراه داشته است. زمان، مکان و بزرگای زمین‌لرزه سه پارامتر اصلی زمین‌لرزه هستند که برای کنترل و کمینه کردن تلفات آن باید برآورد خوبی از مقادیر آن‌ها در دست باشد (ارجمند و همکاران، ۱۳۹۵). زمین‌لرزه مخاطره طبیعی، ناگهانی، با منشأ زمینی است و به لحاظ قدرت و حوزه تخریب وسیع بوده و نیز غیرقابل پیش‌بینی بودن و زمان بسیار کوتاه وقوع آن از اهمیت ویژه‌ای برای جوامع بشری برخوردار است (غلامی و شکوهی بیدهندی، ۱۴۰۱). زمین‌لرزه حالت خاصی از تغییر شکل توده‌های سنگی است که در آن پدیده‌های گسیختگی در مقیاس متفاوت رخ می‌دهد، یا هر نوع لرزش زمین در اثر عبور امواج لرزه‌ای را زلزله گویند (گالکینا و گرافیوا، ۲۰۱۹). عوامل متعدد طبیعی و انسانی باعث بروز زمین‌لرزه در سطح زمین می‌شوند که از آن جمله می‌توان به لرزش‌های ایجادشده ناشی از فعالیت آتشفشانی و فعالیت گسل و لرزش‌های مصنوعی در اثر انفجارهای اتمی که جزء عامل انسانی است، اشاره کرد (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۲). وجود یا عدم وجود گسل‌ها و شکستگی‌های زمین و فعالیت‌های اخیر آن‌ها و جوان بودنشان از جمله شاخص‌هایی هستند که می‌توانند در فعالیت‌های آتی آن اثرگذار باشند. درواقع، رابطه گسل و زمین‌لرزه دوطرفه است، یعنی گسل‌های فراوان در یک منطقه سبب بروز زمین‌لرزه می‌شوند (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۶). پس می‌توان گفت مهم‌ترین عامل زمین‌ساختی ایجادکننده زمین‌لرزه‌ها، گسل‌ها هستند و براساس اینکه کدامیک از دیواره‌های گسل بر دیواره دیگر بلغزد، سازوکارهای گسلش متفاوت خواهد بود (خدادادی جید و پورزیلی، ۱۴۰۱). زمین‌لرزه یک مخاطره طبیعی است که در اثر حرکت صفحات تکتونیکی زمین به دلیل آزاد شدن انرژی داخلی قابل توجه آن ایجاد می‌شود. یک زمین‌لرزه متوسط با بزرگای بیش از ۶ ریشتر می‌تواند تلفات گسترده و خسارات زیرساختی هنگفتی را که میلیاردها دلار هزینه دارد، وارد کند. اما اگر بتوان وقوع زمین‌لرزه را پیش‌بینی کرد، می‌توان شدت تخریب را به حداقل رساند. یک روش کامل پیش‌بینی زمین‌لرزه باید دارای سه نوع اطلاعات باشد: بزرگای، مکان و زمان وقوع (البنا و همکاران، ۲۰۲۰). پیش‌بینی زمین‌لرزه را می‌توان به فرایند کوتاه‌مدت و بلندمدت طبقه‌بندی کرد. پیش‌بینی کوتاه‌مدت بسیار پیچیده است، زیرا زمین‌لرزه‌ها را ظرف چند روز یا چند هفته پیش از وقوع آن‌ها پیش‌بینی می‌کند. بنابراین باید دقیق باشد. معمولاً برای تخلیه یک منطقه قبل از وقوع زمین‌لرزه از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت استفاده می‌شود. از سوی دیگر، زمین‌لرزه‌های بلندمدت براساس ورود دوره‌ای زمین‌لرزه‌ها پیش‌بینی می‌شوند که حاوی اطلاعات کمی است. با این حال، آن‌ها می‌توانند به تنظیم استانداردهایی برای کدهای ساختمانی و طراحی

طرح‌های واکنش در بلایا کمک کنند (البنا و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین پیش‌بینی زمین‌لرزه باید شامل زمان، مکان، بزرگای، احتمال و دلیل وقوع آن نیز باشد. هدف از پیش‌بینی زمین‌لرزه، کمک به سازمان‌های کنترل بلایا در آمادگی برای زمین‌لرزه است. هنگامی که یک زمین‌لرزه قوی پیش‌بینی می‌شود، مدیران کنترل بلایا باید برای انجام اقدامات پیشگیرانه هشدار داده شوند. در آمادگی در برابر فاجعه، تصمیمات و فعالیت‌ها بر پیشگیری از خسارات متمرکز است. به‌طور آشکار، انواع تکنیک‌های پیش‌بینی زمین‌لرزه برای کاهش خسارات به کار گرفته شده است (بهاتیا و همکاران، ۲۰۲۳).

از آنجایی که ایران روی کمر بند لرزه‌خیز آلپ هیمالیا قرار دارد و به‌عنوان یکی از بخش‌های جوان و در حال کوه‌زایی به شمار می‌رود، جزو کشورهای لرزه‌خیز است، به‌طوری‌که زمین‌لرزه‌های فاجعه‌باری در سال‌های اخیر باعث تلفات جانی و مالی فراوان شده‌اند (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). مجاورت با صفحه عربستان و فشار این صفحه بر صفحه ایران باعث شکستگی گسل‌ها شده و همین امر به زمین‌لرزه‌های بسیار شدید در ایران منجر شده است (حیدری مظفر و تاج‌بخشیان، ۱۴۰۱). در بخش شاهرود شهرستان خلخال، وجود سازندهای زمین‌شناسی با مقاومت ناهمگن، استقرار شهر روی یک دشت آبرفتی با مقاومت کمتر نسبت به سنگ بستر ضخیم لایه و احاطه شدن توسط گسل‌های متعدد سبب شده‌اند تا این شهر نسبت به مخاطره زمین‌لرزه پتانسیل بالایی داشته باشد. همچنین قرارگیری بخش شاهرود در زون چین‌خورده البرز غربی و آذربایجان سبب شده که تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی گسل‌های مختلفی در منطقه ایجاد شود که از مهم‌ترین این گسل‌ها می‌توان به گسل تالش، گسل نئور و گسل شاهرود کلور اشاره کرد. مطالعه و ارزیابی بخش شاهرود به لحاظ لرزه‌خیزی و پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه یکی از ضرورت‌های برنامه‌ریزی است. پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این پیش‌بینی‌ها امکان حفظ امنیت عمومی، کاهش خسارات، توسعه زیرساخت‌های مقاوم و جلوگیری از دست رفتن زندگی‌ها و دارایی‌ها را فراهم می‌کنند. به‌علاوه، این امر پیشرفت علمی و توسعه فناوری را تشویق می‌کند. به‌طور خلاصه، پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه نه تنها برای ما اطلاعات لازم را فراهم می‌کند، بلکه به ما امکان می‌دهد از این اطلاعات برای مدیریت بهتر بحران‌های زمین‌لرزه و حفظ امنیت و سلامتی افراد استفاده کنیم.

نوآوری این پژوهش نسبت به سایر مطالعات انجام‌شده این است که از مدل نوین شبکه عصبی برای پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه استفاده شده است که در زمینه پیش‌بینی و حل مسائل پیچیده عملکرد خوبی دارد. هدف از پژوهش حاضر پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه احتمالی در بخش شاهرود شهرستان خلخال با استفاده از شبکه عصبی است.



پیشینه تحقیق

پیرامون موضوع پیش‌بینی زمین‌لرزه با استفاده از روش‌های مختلف مطالعات متعددی در داخل کشور و خارج از آن صورت گرفته است که به‌طور مختصر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

خیری و همکاران (۱۳۹۵)، به پیش‌بینی بزرگی زمین‌لرزه گسل تبریز با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای پرداختند. آن‌ها در این پژوهش رابطه‌ای برای این مدل ارائه دادند که در آن زمان وقوع زمین‌لرزه‌ها مهم‌ترین متغیر مستقل برآوردکننده بزرگی است و با وارد کردن داده‌های لرزه‌ای جدید می‌توان بزرگی زمین‌لرزه را با کمترین خطا پیش‌بینی کرد. **حیاتی و همکاران (۱۳۹۵)**، به پیش‌بینی محل وقوع زمین‌لرزه احتمالی در استان خراسان رضوی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که میانگین بزرگی و عمق زمین‌لرزه‌های اتفاق‌افتاده در این استان به ترتیب ۴/۶ و ۲۰/۹۶ کیلومتر بوده است و بیشترین احتمال وقوع زمین‌لرزه در منطقه مرکزی متمایل به غرب استان (شهرستان کاشمر و جنوب شرق شهرستان‌های سبزوار و بردسکن) و در منطقه جنوب شرق استان (شهرستان خواف) با احتمال ۳۰ درصد بالاتر نسبت به سایر مناطق پیش‌بینی شده است. **ارجمند و همکاران (۱۳۹۵)**، به پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۱ پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد شبکه عصبی پرسپترون چندلایه توانایی بالایی در پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه دارد و گزینه بسیار مناسبی برای این منظور است. **سلطان‌پور و همکاران (۱۳۹۷)**، به ارزیابی ریسک زمین‌لرزه در شمال غرب تهران با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (مطالعه موردی منطقه ۲۲) پرداختند. در نتایج مطالعه آن‌ها با در نظر گرفتن آسیب‌پذیری و خطر و جمعیت در منطقه مشخص شد ریسک زمین‌لرزه منطبق با نقاط جمعیتی در منطقه است و هرچه از پهنه‌های با جمعیت بالا دور می‌شویم ریسک کمتر می‌شود. بنابراین کنترل جمعیت‌پذیری و ساختمان‌سازی در منطقه از اعتبار بالایی در کاهش ریسک برخوردار است. **دانا و همکاران (۱۳۹۹)**، به ارزیابی آسیب‌پذیری نواحی منطقه ۸ شهرداری تهران در برابر زمین‌لرزه با استفاده از روش AHP پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد ناحیه ۳ آسیب‌پذیرترین ناحیه است و قسمت عمده بافت‌های فرسوده در این ناحیه وجود دارد. از نظر آسیب‌پذیری، ناحیه ۳ با ضریب اهمیت ۵۱/۳۹ در رتبه اول، ناحیه یک با ضریب اهمیت ۲۷/۱۹ در رتبه دوم و ناحیه ۲ با ضریب اهمیت ۲۱/۴۲ در رتبه سوم قرار دارد. **پیری‌زاده و پیری‌زاده (۱۴۰۰)**، به ارزیابی و تحلیل کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های لرزه‌شناسی (مطالعه موردی: داده‌های پیش‌نشانگرها) با استفاده از روش‌های یادگیری

ماشینی و یادگیری عمیق پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق با میانگین دقت متعادل ۸۱/۲ درصد و ۵۹/۳ درصد به ترتیب بر روی داده‌های آموزشی و آزمون، عملکرد کاملاً بهتری در مقایسه با شبکه‌های عصبی بازگشتی معمولی در طبقه‌بندی مقادیر اوج شتاب زمین^۳ از خود بر جای گذاشته است و می‌توان با اصلاح کردن تابع هزینه شبکه‌های بازگشتی عمیق به کمک رویکرد حساس به هزینه، چالش عدم تعادل کلاس داده‌های لرزه‌ای را نیز به‌خوبی کنترل کرد. **کاظمی و همکاران (۱۴۰۰)**، به ارزیابی و تخمین سریع بزرگا و فاصله رومرکزی زمین‌لرزه برای منطقه البرز با استفاده از روش B-Δ پرداختند. ایشان در این پژوهش روابطی را جهت تخمین بزرگا و فاصله مرکزی ارائه دادند که این روابط می‌توانند به‌عنوان روابطی قابل اطمینان و مناسب در سامانه هشدار سریع منطقه البرز به کار گرفته شوند. **احمدی‌نمین و کاظمیان (۱۴۰۲)**، به مطالعه رابطه بین زمین‌لرزه و آب‌وهوا در زمین‌لرزه‌های اخیر ایران با استفاده از روش توصیفی تحلیلی پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از آن است که در زمان وقوع زمین‌لرزه در اکثر عوامل آب‌وهوایی تغییر مشاهده شده و بین آن‌ها رابطه وجود دارد. **یازرلو و بای (۱۴۰۲)**، به پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از سدسازی به‌وسیله شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و روش‌هایی را برای پیش‌بینی زمین‌لرزه القایی ارائه دادند.

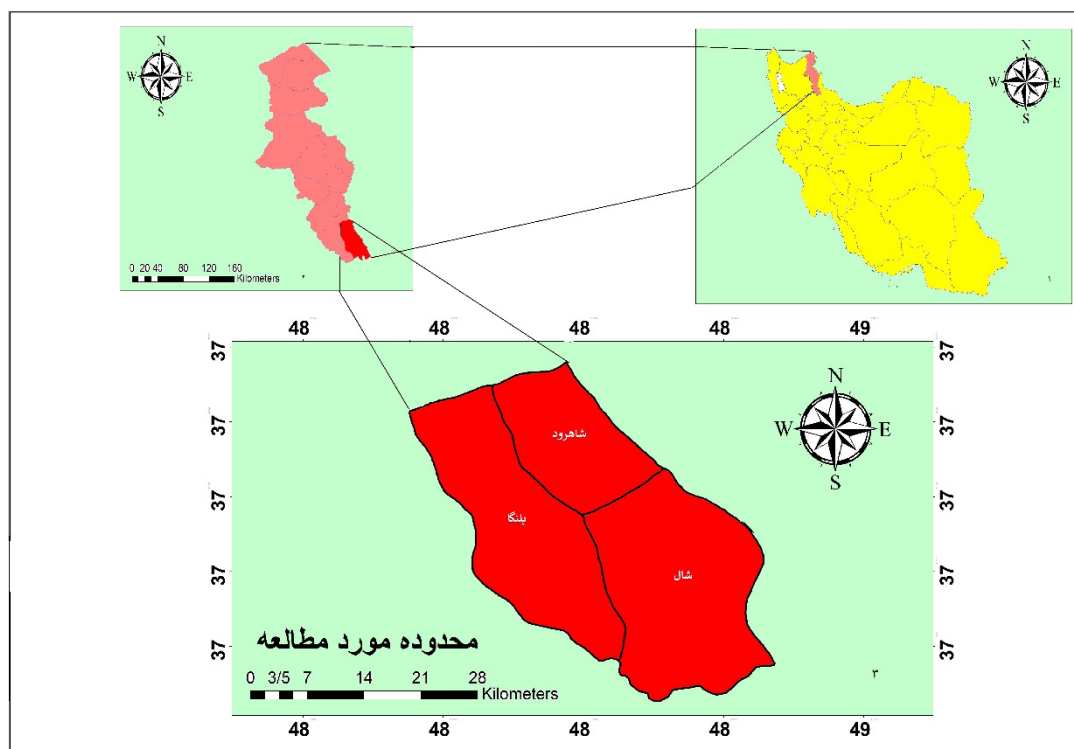
همچنین از مطالعات خارجی در این مورد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

گالکینا و گرافیاوا (۲۰۱۹)، به ارزیابی و تحلیل روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی زمین‌لرزه پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود روند داده‌ها، ویژگی‌ها، میزان کامل بودن و معیارهای اندازه‌گیری عملکرد را برای این مطالعات مشاهده کردند. آن‌ها متوجه شدند که این مطالعات در پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های نادر اما مهم‌تر با مشکلاتی روبه‌رو هستند. **فنگ و فاکس (۲۰۲۰)**، در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های شدید مکانی - زمانی در جنوب کالیفرنیا، یک روش مدل‌سازی عمیق مشترک برای پیش‌بینی زمین‌لرزه را پیشنهاد کردند که این روش در مقایسه با برخی از شبکه‌های عصبی مکرر از نظر پیش‌بینی شوک‌های بزرگ برای زمین‌لرزه‌های جنوب کالیفرنیا، امیدوارکننده بود. **البنّا و همکاران (۲۰۲۰)**، به بررسی کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی زمین‌لرزه پرداخته و با پوشش تمام تکنیک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی موجود در پیش‌بینی زمین‌لرزه، شرحی از روش‌های موجود و تحلیل مقایسه‌ای عملکرد آن‌ها ارائه داده‌اند. **اپرانی و همکاران (۲۰۲۱)**، به تخمین بزرگی زمین‌لرزه براساس یادگیری ماشین (کاربرد در سیستم هشدار اولیه زمین‌لرزه) پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها حاکی از آن بود که شکل

1. Multilayer perceptron (MLP)

2. Analytic hierarchy process (AHP)

3. Peak ground acceleration (PGA)



تصویر ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

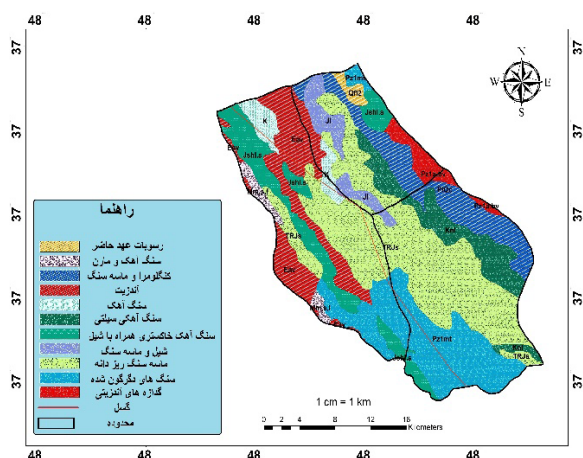
قسمت جنوب اردبیل قرار دارد. شهرستان خلخال از ناحیه شرق به استان گیلان، از قسمت غرب به آذربایجان شرقی، از جنوب به استان زنجان و از شمال به بخش کوثر منتهی می‌شود. فاصله بخش مرکز شهر خلخال تا استان اردبیل، ۱۱۶ کیلومتر است. از لحاظ تقسیمات سیاسی، شهرستان خلخال از سه بخش مرکزی، شاهرود و خورش‌رستم تشکیل شده است. ناحیه شاهرود، جزو مناطق تابعه شهرستان خلخال، با مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی است (تصویر شماره ۱). این منطقه در جنوب شرقی شهرستان خلخال و در نزدیکی رشته‌کوه تالش و کوه آق‌داغ واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۵۵۰ متر است (تصویر شماره ۲). بخش شاهرود به محوریت شهر کلور دارای سه دهستان بزرگ شامل دهستان شاهرود، پلنگا و شال است که در کل دارای ۴۷ آبادی است. از ویژگی‌های بخش شاهرود می‌توان به کوهستانی بودن آن اشاره کرد، بدین‌جهت که ارتفاعات تالش در قسمت شرقی و ارتفاعات پلنگا و آق‌داغ در قسمت جنوبی سبب چهره کوهستانی بخش شاهرود شده است (تصویر شماره ۳). همچنین به‌لحاظ تکتونیک، منطقه مورد مطالعه در دوران زمین‌شناسی تنش‌های زیادی را به خود دیده که آخرین و تأثیرگذارترین آن‌ها حرکت کوه‌زایی آلپی است که سبب شکل‌گیری ارتفاعات شامل چین‌خوردگی‌ها منطقه شده و تحت تأثیر این فعالیت‌های زمین‌ساختی گسل‌ها و شکستگی‌های مختلفی در منطقه ایجاد شده که تأثیر زیادی در فعالیت‌های لرزه‌خیزی دارند.

موج را می‌توان با مدل‌های شبکه عصبی عمیق^۴ مدل‌سازی کرد. همچنین آن‌ها در رابطه با تخمین بزرگی زمین‌لرزه پیشنهاد کردند مدل‌سازی خام لرزه‌ای با استفاده از طبقه‌بندی DNN با مجموعه داده بزرگ‌تر بهتر است و در رابطه با مجموعه داده نسبتاً کوچک، مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی^۵ می‌تواند گزینه دیگری باشد. بهاتیا و همکاران (۲۰۲۳)، به پیش‌بینی زمین‌لرزه در زمان واقعی مبتنی بر هوش مصنوعی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که براساس شبیه‌سازی تجربی، اثربخشی افزایش یافته برای چارچوب ارائه‌شده از نظر عملکرد طبقه‌بندی دقت (۹۲/۵۲ درصد)، حساسیت (۹۱/۷۲ درصد) و ویژگی (۹۱/۰۱ درصد) بوده است. سعد و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی زمین‌لرزه با استفاده از داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی، چارچوبی را برای پیش‌بینی زمین‌لرزه در زمان واقعی طراحی کرده و آن را در مناطق لرزه‌زا در جنوب غربی چین آزمایش کردند. موسوی و بروزا (۲۰۲۳)، به بررسی یادگیری ماشین در زلزله‌شناسی پرداختند و در پژوهش خود تکنیک‌هایی را برای زلزله‌شناسی ارائه دادند.

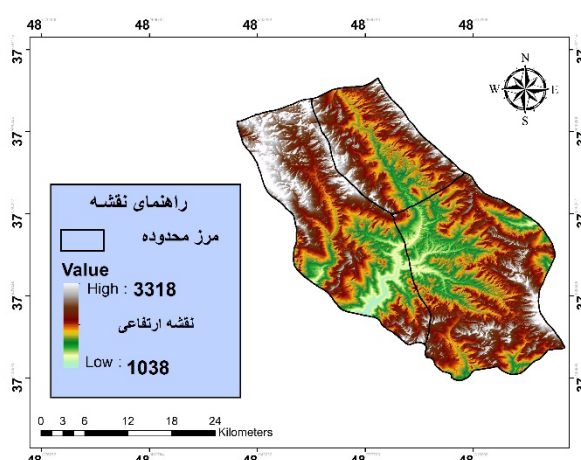
منطقه مورد مطالعه

در تقسیمات سیاسی استان اردبیل، شهرستان خلخال با محوریت شهر خلخال به‌عنوان یکی از ۱۲ شهرستان استان، در

4. Deep neural network (DNN)
5. Random forest (RF)



تصویر ۳. نقشه زمین‌شناسی



تصویر ۲. نقشه ارتفاعی

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

مک کالوک و همکاران در اوایل دهه ۱۹۴۰ روش شبکه عصبی را پایه‌گذاری کردند. به‌طور کلی، شبکه عصبی یک ابزار پیش‌بینی برای ساخت یک مدل ریاضی از یک سیستم ناشناخته است. هوش مصنوعی یکی از مشهورترین رشته‌های علم است که یکی از شناخته‌شده‌ترین آن، مدل شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه است (گندمی و همکاران، ۱۳۹۸). اجزای کلیدی در هوش مصنوعی شبکه‌های عصبی هستند که در پردازش تصویر و بینایی کامپیوتری ادغام شده‌اند. ادغام شبکه‌های عصبی و سایر ابزارهای محاسباتی ریاضی در علوم رایانه می‌تواند مفید باشد. شبکه عصبی مصنوعی یک سازوکار محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات و محاسبه کردن آن‌ها، یک سری اطلاعات جدید ارائه دهد. در شبکه عصبی مصنوعی سعی بر آن است که ساختاری مشابه ساختار بیولوژیکی مغز انسان و شبکه اعصاب بدن ساخته شود تا همانند مغز، قدرت یادگیری، تعمیم‌دهی و تصمیم‌گیری داشته باشد و یک پهنه‌بندی از یک فضای چندمتغیره با اطلاعات دریافتی را به وجود آورد (لی و همکاران، ۲۰۰۶). شبکه‌های عصبی اطلاعات را از لایه‌های ورودی دریافت می‌کنند و با وزن‌های مختلف به هم متصل می‌شوند. اطلاعات وارد شده از لایه ورودی به لایه میانی منتقل می‌شوند، جایی که گره‌ها عملیات پردازش را انجام می‌دهند. لایه میانی عملیات پیچیده‌تری را انجام می‌دهد. گره‌ها اطلاعات را از لایه‌های ورودی دریافت کرده و با استفاده از وزن‌های خود، پردازش‌های مختلفی را اجرا می‌کنند. نتیجه این پردازش به‌صورت لایه خروجی از شبکه حاصل می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه شامل یک یا چند لایه میانی هستند که نورون‌های این لایه به‌عنوان نورون‌های مخفی شناخته می‌شوند. افزودن چندین لایه میانی باعث افزایش توانایی شبکه در تحلیل‌های پیچیدگی بالاتر می‌شود (هاگان و همکاران، ۲۰۱۴). این الگوریتم‌ها به‌عنوان شبکه‌های نظارت‌شده شناخته می‌شوند؛ به این معنا که نتایج

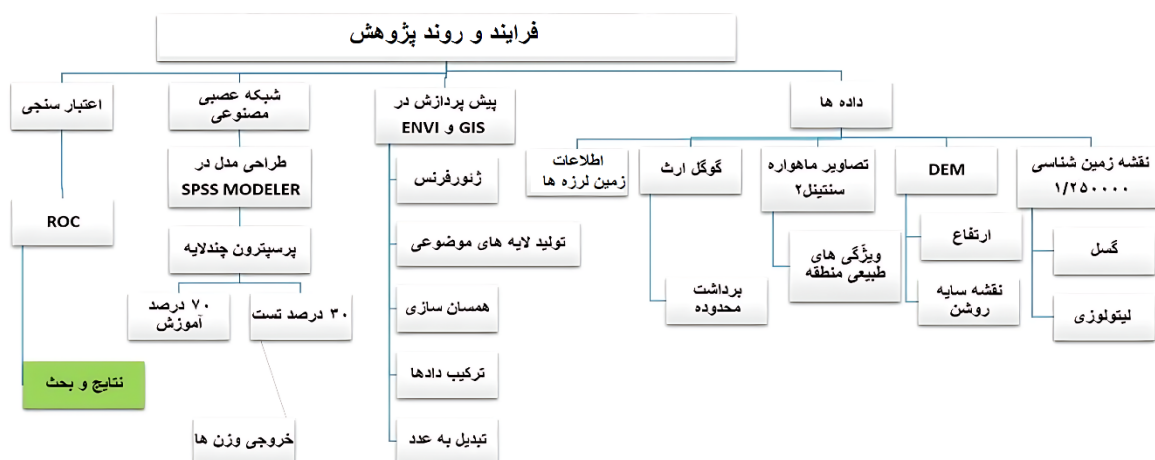
قرارگیری بخش شاهرود در ناحیه شرقی ارتفاعات تالش سبب شده به‌لحاظ زمین‌شناسی و ژئومورفیک، خصوصیات زون البرز غربی و آذربایجان را در خود داشته و از تنوع بالای فرایندهای زمین‌شناسی و ژئومورفیک برخوردار باشد. همچنین به‌لحاظ سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی نیز قدیمی‌ترین سنگ‌های استان اردبیل در قسمت جنوب خلخال دیده می‌شود که از پرکامبرین بالا تا دوران چهارم پراکنده است. این پراکندگی به‌نحوی است که در بخش شاهرود تا شهر خلخال هر سه نوع سنگ آذرین، رسوبی و دگرگون دیده می‌شود (تصویر شماره ۳).

روش

در پروسه انجام این پژوهش از داده‌ها و اطلاعات مختلفی استفاده شد که شامل نقشه زمین‌شناسی شهرستان‌های رضوانشهر، خلخال و ماسوله با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ بوده و نقشه مربوط به گسل‌ها و سازندهای زمین‌شناسی از این نقشه اخذ شده است. از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ مربوط به ماهواره آلوس - پالسار^۶ و همچنین از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای شناسایی ویژگی‌های زمین‌شناسی استفاده شد. برای ویژگی‌های مختلف زمین‌لرزه‌ها از داده‌های لرزه‌خیزی در بازه ۳۰ ساله مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و داده‌های جهانی سازمان زمین‌شناسی آمریکا استفاده شد که شامل تاریخ وقوع، بزرگی، عمق کانونی و مختصات جغرافیایی است. انتخاب بازه ۳۰ ساله به‌خاطر وجود داده‌های کامل بوده است و داده‌های بیشتر از بازه ۳۰ ساله اکثراً ناقص بودند، بنابراین از انتخاب آن‌ها صرف نظر شد. تمام داده‌های مورد استفاده برای آماده‌سازی در مرحله اول وارد نرم‌افزار جی‌آی‌اس^۷ نسخه ۱۰/۷/۱ شد و پردازش مقدماتی روی تمام لایه‌ها انجام گرفت. سپس بعد از اتمام پیش‌پردازش کار مدل‌سازی در نرم‌افزار SPSS Modeler نسخه ۱۸ انجام شد (تصویر شماره ۴).

6. ALOS-PALSAR satellite

7. ArcGIS



تصویر ۴. فرایند و روند پژوهش

در رابطه فوق X ورودی است که نورون منفرد z دریافت می کند، w_{ij} اوزان بین نورون i و نورون z را نشان می دهد و خروجی نورون i متعلق به لایه فرستنده، لایه ورودی یا مخفی است. خروجی حاصل از نورون z از فرمول شماره ۲ حاصل می شود (منهاج، ۱۳۸۸).

$$2. O_j = f(x_j)$$

تابع f معمولاً یک تابع سیگموئیدی غیرخطی است. در این پژوهش لایه های ورودی متناظر با لایه های اطلاعاتی سیستم اطلاعات جغرافیایی^۸ آماده شده و در لایه خروجی نیز معادل پیش بینی بزرگای زمین لرزه در محدوده مورد مطالعه است (تصویر شماره ۵).

یافته ها

باتوجه به نقشه زمین شناسی منطقه، گسل های شناخته شده را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

گسل های داخل محدوده

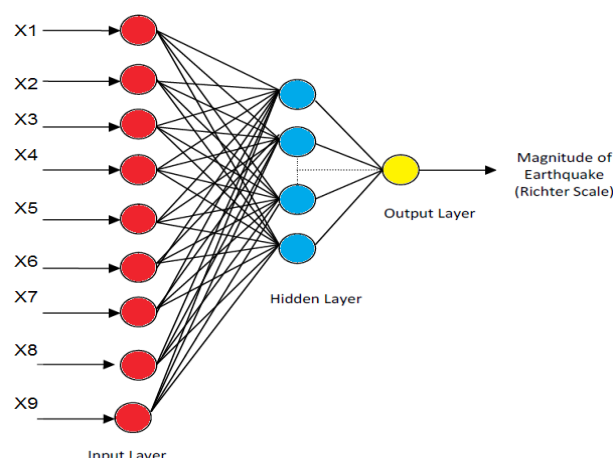
از اصلی ترین گسل های داخل منطقه می توان به گسل هروآباد یا شاهرود جای اشاره کرد (تصویر شماره ۶). گسل هروآباد با طولی بیش از ۱۸۸ کیلومتر و جهت امتدادی تقریباً شمال به جنوب، در نزدیک ترین نقطه به فاصله ۱۰ کیلومتری از منطقه عزیزآباد قرار دارد. نحوه تشکیل آن به گونه ای است که بلوک شرقی نسبت به بلوک غربی به بالا برآمده است. این سازوکار باعث جابه جایی مارن ها و تجمع رسوبات آواری در منطقه کربیتاسه روی آتشفشان های پالوژن شده است. انحنای این گسل از میان رودخانه عبور می کند، بنابراین می توان گفت سیستم رودخانه از سیستم گسل پیروی می کند. این گسل سبب بالآمدگی بلوک غرب شده و در پای این گسل فروافتادگی ایجاد کرده است که از

پیش بینی شده توسط مدل را می توان با مقادیر شناخته شده متغیرهای هدف مقایسه کرد. یکی از مزایای اصلی شبکه های عصبی در مقایسه با تکنیک های آماری کلاسیک، انعطاف پذیری و عدم وجود مفروضات توزیعی آن هاست (یان و همکاران، ۲۰۲۳). به عنوان مثال، شبکه های عصبی را می توان برای پیش بینی نتایج قطعی و پیوسته استفاده کرد. با این حال، مشکل این است که شبکه های عصبی اغلب می توانند به سختی تفسیر شوند، زیرا می توانند مدل های بسیار پیچیده با لایه های متعدد تولید کنند. یک شبکه عصبی یک پردازشگر موازی توزیع شده انبوه است که تمایل طبیعی برای ذخیره دانش تجربی و در دسترس قرار دادن آن برای استفاده دارد (المغربی و همکاران، ۲۰۲۳). تعلیم شبکه عصبی پیش خور شامل اختصاص وزن بین نورون ها بوده و در هر بار وزن دهی، مجموعه ای از ورودی ها و خروجی های مطلوب به عنوان نمونه به خدمت گرفته می شوند. الگوهای احتمالاتی با یکدیگر برابر در نظر گرفته می شوند؛ به این معنی که هیچ الگویی نسبت به سایر الگوها از اهمیت بیشتری برخوردار نیست (رامدانی و همکاران، ۲۰۲۲). در ابتدا، وزن بین نورون ها به صورت تصادفی تعیین می شود و سپس الگوی ارائه شده به شبکه با نتایج مطلوب مقایسه می شود. مسلماً خروجی های اولیه به نتایج مطلوب شبیه نبوده و دارای خطای نسبی نسبت به فاصله اقلیدسی بین خروجی محاسبه شده و نتایج مطلوب هستند. از بین کمترین میانگین خطا، وزن ها مطابق با میزان خطا اصلاح شده و میزان آن ها کاهش می یابد. با چندین مرحله تکرار، خروجی شبکه به سمت خروجی مطلوب متمایل خواهد شد.

طبقه بندی کننده MLP از الگوریتم فرمول شماره ۱ برای محاسبه ورودی هایی که یک گره منفرد دریافت می کنند، بهره می برد (منهاج، ۱۳۸۸).

$$1. x_j = \sum w_{ij} I_i$$

8. Geographic information system (GIS)



تصویر ۵. نمونه‌ای از مدل پرسپترون چندلایه (هاگان و همکاران، ۲۰۱۴)

میان آن شاهرود جای عبور می‌کند (سیارپور، ۱۳۷۸). همچنین گسل‌های فرعی دیگری در محدوده هستند که حاصل تکتونیک و نیروهای فشاری بوده و برخی از آن‌ها دارای ابعاد کوچک و جزو گسل‌های محلی هستند. از سایر گسل‌های منطقه می‌توان به گسل‌های اصلی و بزرگ که فعالیت آن‌ها دارای قدرت بیشتر است اشاره کرد که شامل گسل‌های زیر است:

گسل گیوی

این گسل دارای جهت شمال به جنوب بوده و طولی به اندازه تقریباً ۱۴۲ کیلومتر دارد. این گسل مرز بین رسوبات مزوزوئیک و سنگ‌های آتشفشانی در جهت شرق و رسوبات نفوذ در جهت غرب را به وجود آورده است. متأسفانه، جزئیات دقیق در مورد سن یا تاریخچه لرزه‌ای این گسل در دسترس نیست، اما مرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی در سال‌های ۱۸۶۳ و ۱۸۰۶ به‌طور دقیق در همین گسل قرار داشته است. این وضعیت می‌تواند احتمال جنبشی بودن این گسل را تقویت کند. به نظر می‌رسد زمین‌لرزه تاریخی خلخال، به‌علت عملکرد این گسل اتفاق افتاده و ویرانی‌ها ناشی از حرکات این گسل باشد.

گسل ماسوله

در بخش جنوبی گسل شرق اردبیل، گسل ماسوله شروع می‌شود و به سمت جنوب شرقی ادامه می‌یابد. مکانیسم ایجاد این گسل از طریق فرایند راندگی صورت می‌پذیرد که در آن بلوک خاوری نسبت به بلوک باختری بالا می‌رود.

گسل کلور

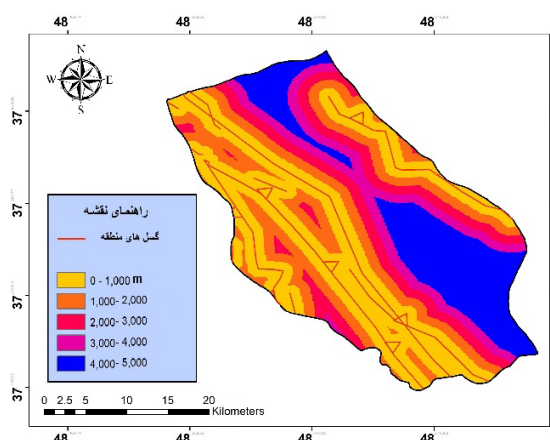
در ناحیه‌ای از رشته‌کوه‌های البرز غربی که جهت امتدادی آن از شمال به جنوب تغییر می‌کند، شکل گرفته است. طول این گسل برابر با حدود ۶۳ کیلومتر است. مکانیسم ایجاد این گسل به‌صورت معکوس اتفاق افتاده است (تصویر شماره ۷).

پراکندگی نقاط لرزه‌خیز در بازه ۳۰ ساله در تصویر شماره ۸ نشان داده شده است.

عمق کانونی زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده در بازه ۳۰ ساله با استفاده از ابزار درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۷/۱ به دست آمده و درصد هر طبقه محاسبه شده است (تصویر شماره ۹). باتوجه به نقشه مذکور، ۶۰ درصد از زمین‌لرزه‌های رخ داده در داخل محدوده بخش شاهرود در عمق بین ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری اتفاق افتاده که دارای عمق پایینی هستند. همچنین ۱۵ درصد از زمین‌لرزه‌ها در داخل محدوده در عمق بین ۲۰ تا ۲۵ کیلومتری رخ داده‌اند. اما زمین‌لرزه‌های خارج از محدوده به‌صورت کلی با ۲۵ درصد در عمق بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر رخ داده است که نسبت به زمین‌لرزه‌های داخل محدوده دارای عمق کانونی بالایی است. همچنین نقشه بزرگ‌ای زمین‌لرزه‌های رخ داده در بازی ۳۰ ساله که با ابزار درون‌یابی ایجاد شده، نشان دهنده این بوده است که ۲۰ درصد زمین‌لرزه‌های رخ داده دارای بزرگ‌ای ۱ تا ۳ ریشتر و ۱۰ درصد زمین‌لرزه‌ها دارای بزرگ‌ای ۴ تا ۵ ریشتر هستند (تصاویر شماره ۱۰ و شماره ۱۱).

طراحی مدل برای پهنه‌بندی مخاطرات دامنه‌ای در نرم‌افزار SPSS MODELER

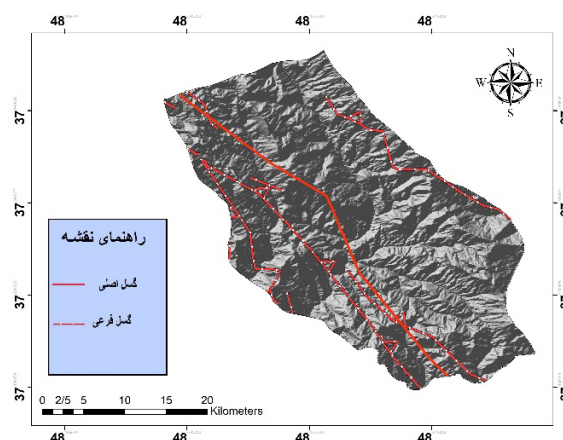
فرایند آماده‌سازی داده برای ورود به مدل شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون چندلایه، یک فرایند نسبتاً سنگین و پیچیده است. داده‌های موردنیاز پیش‌بینی بزرگ‌ای زمین‌لرزه در وهله اول گردآوری شد. سپس عملیات آنالیز آن برای استخراج بخش‌های مورد استفاده در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شد. اساس کار در پیش‌بینی با مدل یادشده، براساس مقادیر پیکسل‌ها در هر متغیر موجود برای پیش‌بینی زمین‌لرزه است؛ بنابراین روش آماده‌سازی داده‌ها به‌صورت پیکسل پایه بود. سپس تمام متغیرها با ترکیب نسبت به یکدیگر تبدیل به یک نقشه رستری واحد شدند که مقادیر پیکسلی آن دربرگیرنده تمام



تصویر ۷. نقشه فاصله از گسل‌های منطقه

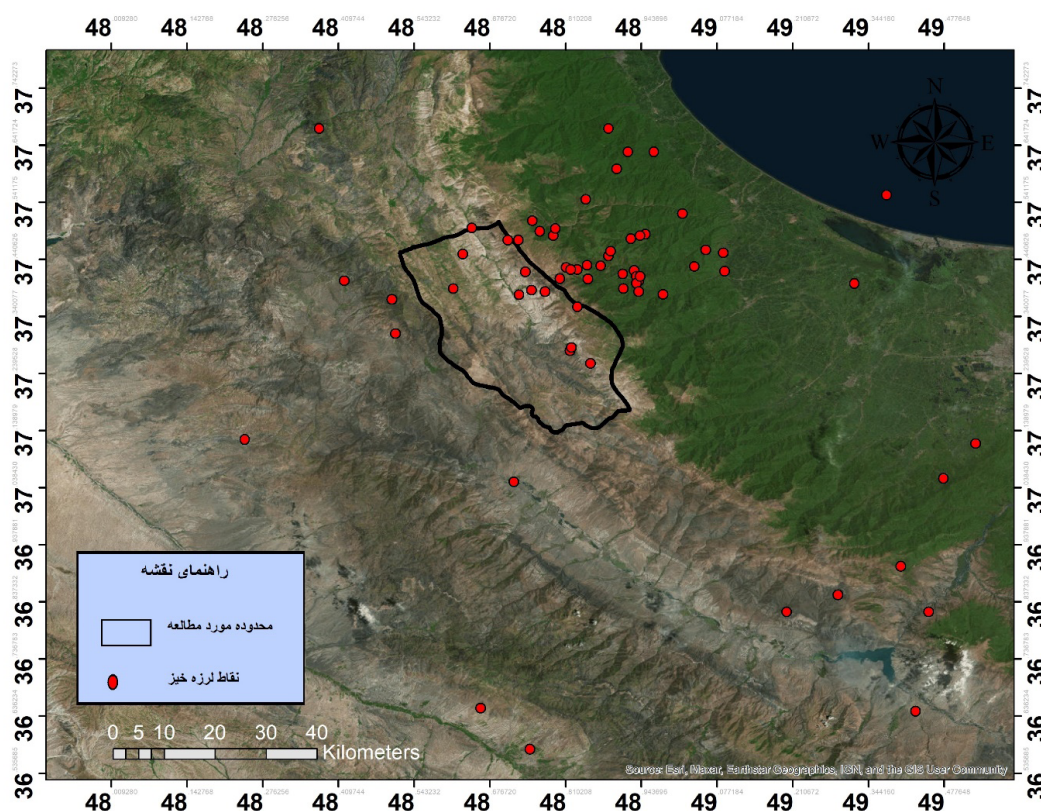
درصد داده‌ها برای آموزش شبکه و ۳۰ درصد برای تست در نظر گرفته شد. همچنین برای عامل پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه ۵ معیار انتخاب شد که عبارت‌اند از: ۱. عمق زمین‌لرزه، ۲. بزرگای زمین‌لرزه رخ داده، ۳. فاصله گسل از نقاط، ۴. موقعیت مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده، ۵. طول گسل (تصاویر شماره ۶ تا ۱۰).

در رابطه با داده‌های بزرگی و عمق آن از داده‌های مناطق نزدیک به محدوده مورد مطالعه استفاده شده است که این کار، هم بر کیفیت خروجی داده‌ها تأثیر دارد و هم به اینکه عامل

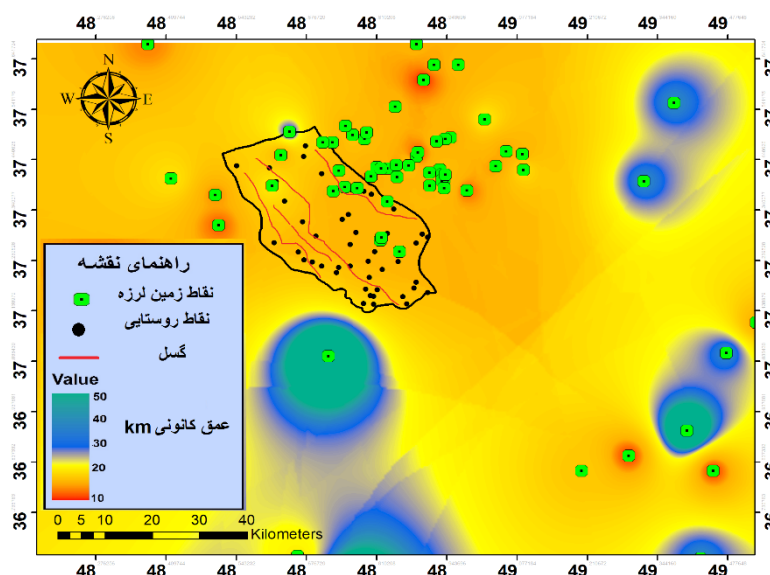


تصویر ۶. نقشه گسل‌های منطقه

متغیرهای مؤثر بر پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه است. هدف از این ترکیب تصاویر رستری، به دست آوردن مجموعه مقادیر تمام متغیرهای مورد استفاده است. علت این فرایند این است که تمام لایه‌ها و نقشه‌ها در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد شوند و به‌خاطر اینکه بتوان مقادیر آن‌ها را خارج کرد تا وارد مدل شوند باید فرایند گفته‌شده را لحاظ کرد. برای مدل سازی، داده‌ها بعد از ورود به مدل به ۷۰ درصد داده‌های آموزش و ۳۰ درصد داده‌های تست شبکه تقسیم شدند که براساس این معیار ۷۰



تصویر ۸. پراکندگی نقاط لرزه‌خیز در بازه ۳۰ ساله (منبع: ترسیم‌کنندگان، ۱۴۰۲)



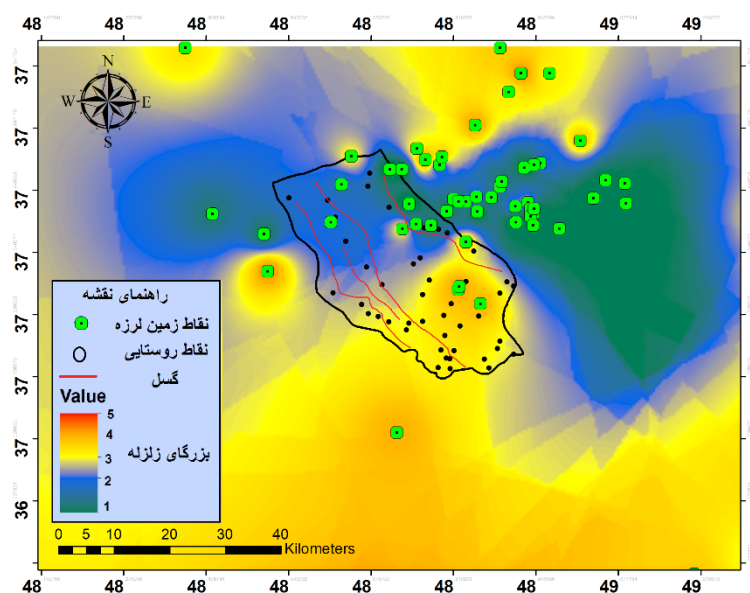
تصویر ۹. نقشه عمق کانونی زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده در بازه ۳۰ ساله

خطای آموزش استفاده شد. در این معیار هرگاه مدل به میزان خطای معرفی شده از سوی کاربر برسد، عملیات پردازش متوقف شده و نتایج نشان داده می‌شود. همچنین نرخ سرعت یادگیری مدل براساس داده‌های آموزشی مقدار $0/01$ در نظر گرفته شده تا خروجی مدل دارای بیشترین دقت باشد (جدول شماره ۱).

زمین‌لرزه

براساس اطلاعات بالا بعد از طراحی مدل و تنظیمات شبکه اقدام به وارد کردن داده‌های موردنظر و پردازش آن شد و شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه با ۵ نورون ورودی، ۳ نورون

زمین‌لرزه به نحوی است که امواج پخش شده آن زیاد بوده و فواصل زیادی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. استفاده از داده‌های زمین‌لرزه نزدیک به منطقه سبب شناخت هرچه بهتر الگو و روابط بین زمین‌لرزه‌ها و پارامترهای دیگر می‌شود. برای مدل شبکه عصبی مصنوعی، ۵ نورون ورودی، ۳ نورون میانه و یک نورون خروجی طراحی شده است. همچنین مدل شبکه عصبی برای پایان پردازش و آنالیز خروجی نیازمند در نظر گرفتن معیار توقف است که این عیار خود در مدل شبکه عصبی به سه دسته تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه ورودی داده‌ها دارای ابعاد بزرگی است و جمعاً ۲۰۸۵ پیکسل را پوشش می‌دهد، برای توقف مدل از معیار



تصویر ۱۰. نقشه بزرگای زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده در بازه ۳۰ ساله



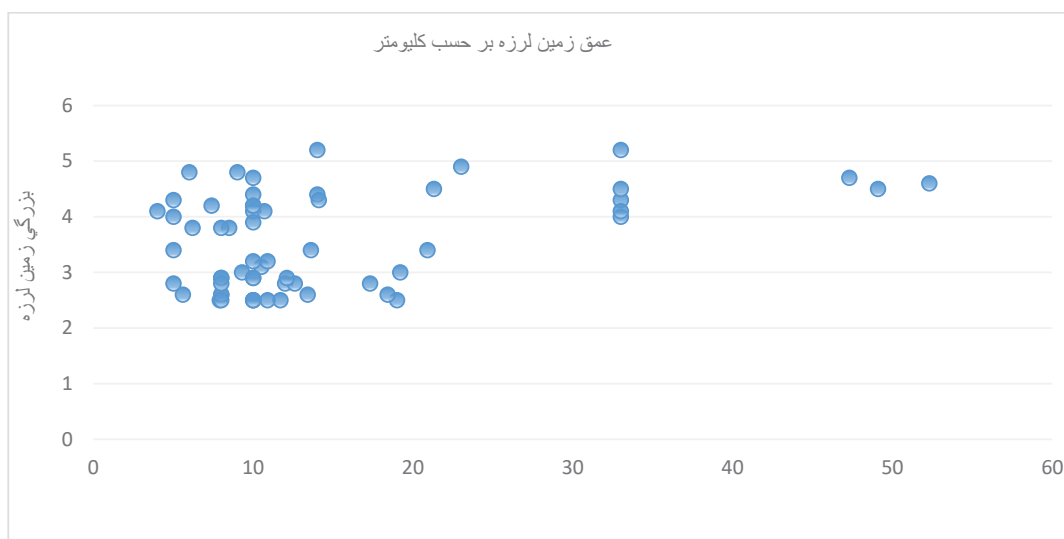
جدول ۱. اطلاعات مدل طراحی شده برای پیش‌بینی بزرگای

نوع مدل شبکه عصبی مصنوعی	نورون ورودی	نورون لایه پنهان	نورون خروجی	تعداد تکرار	نرخ خطای توقف	تایم یادگیری	نرخ یادگیری	نوع تابع فعال‌سازی	تعداد داده‌های ورودی	نرخ داده‌های یادگیری	نرخ داده‌های تست
پرسپترون چندلایه	۵	۳	۱	۵۰۰	۰/۰۰۱	۱۰ دقیقه	۰/۰۱	سیگموئید	۲۰۸۵	۱۳۰۰	۷۸۵

همچنین پیش‌بینی وقوع زمین‌لرزه با بزرگای ۴ تا ۶ ریشتر با ۲۶ درصد احتمال متوسطی دارد. اما پیش‌بینی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۷ تا ۱۰ ریشتر توسط مدل پرسپترون چندلایه با مجموع ۴ درصد دارای احتمال خیلی پایینی است. نتایج به‌دست‌آمده پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه در بازه ۳۰ ساله برای بخش شاهرود مدل‌سازی و اجرا شده است (تصویر شماره ۱۵). گرچه بازه ۳۰ ساله در پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه‌ها عدد کوچکی است، اما باتوجه‌به موجودیت داده‌ها و نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند یک دید کلی درمورد پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه در منطقه ارائه دهد. همچنین یکی از مزیت‌های شبکه عصبی پرسپترون چندلایه این است که برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی داده‌هایی که بخش از آن‌ها به هر علتی در دسترس نیست یا جمع‌آوری آن‌ها دشوار است، کاربرد دارد. به این علت شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و سایر مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی عوامل مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش نیز به‌خاطر رخ ندادن زمین‌لرزه‌ها با بزرگای بالای ۶ ریشتر در بازه ۳۰ ساله، قسمتی از داده‌های بخش بزرگای زمین‌لرزه مجهول بوده و وارد مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه شده است. نکته مهم در رابطه با پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه این است که اگر در رابطه با پیش‌بینی از یک گروه داده برای ورودی استفاده شود، نتایج آن قابل‌استناد نخواهد بود. اما در این پژوهش از داده‌های مختلفی برای پیش‌بینی استفاده

میان و یک نورون خروجی با دقت ۹۸/۲ درصد ایجاد شد که نمایانگر این است که مدل طراحی‌شده دارای دقت بالایی در پردازش داده‌ها برای پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه بوده است و نتایج باتوجه‌به دقت اولیه دارای اعتبار بالایی است (تصاویر شماره ۱۲ و شماره ۱۳).

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه جهت طراحی نیازمند سه دسته داده آموزشی، آزمایشی و صحت‌سنجی است. داده‌های آموزشی به‌منظور پیدا کردن رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های مشاهده‌شده توسط مدل استفاده می‌شوند. باتوجه‌به تصویر شماره ۱۴ و جدول شماره ۲، نتایج نشان‌دهنده این است که مدل پرسپترون چندلایه، بیشترین ارزش تأثیرگذاری را به‌ترتیب برای لایه‌های بزرگای زمین‌لرزه با مقدار ۰/۸۳، فاصله از گسل ۰/۵۸، عمق کانونی ۰/۴۲، همچنین کمترین ارزش تأثیرگذاری را نیز برای عامل نقاط لرزه‌خیز با مقدار ۰/۲۵ و عامل طول گسل ۰/۱۸ اختصاص داده است. تخصیص مقادیر نهایی توسط مدل صورت می‌گیرد و برای هر متغیر یک عدد اختصاص داده می‌شود و کاربر هیچ نوع دخالتی در تعیین مقادیر خروجی ندارد، اما هرچه ورودی دارای کیفیت و دقت و فراوانی بالایی باشد نتایج نهایی درمورد تخصیص وزن‌ها نیز دارای کیفیت و دقت بالاتری خواهد شد. همچنین نتایج اصلی پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه نشان‌دهنده این است که رخداد زمین‌لرزه با بزرگای ۱ تا ۳ ریشتر در منطقه با مجموع ۷۰ درصد دارای احتمال بیشتری است.



تصویر ۱۱. نمودار عمق زمین‌لرزه‌ها و بزرگای آن در بازه ۳۰ ساله

جدول ۲. درصد پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه توسط مدل پرسپترون چندلایه

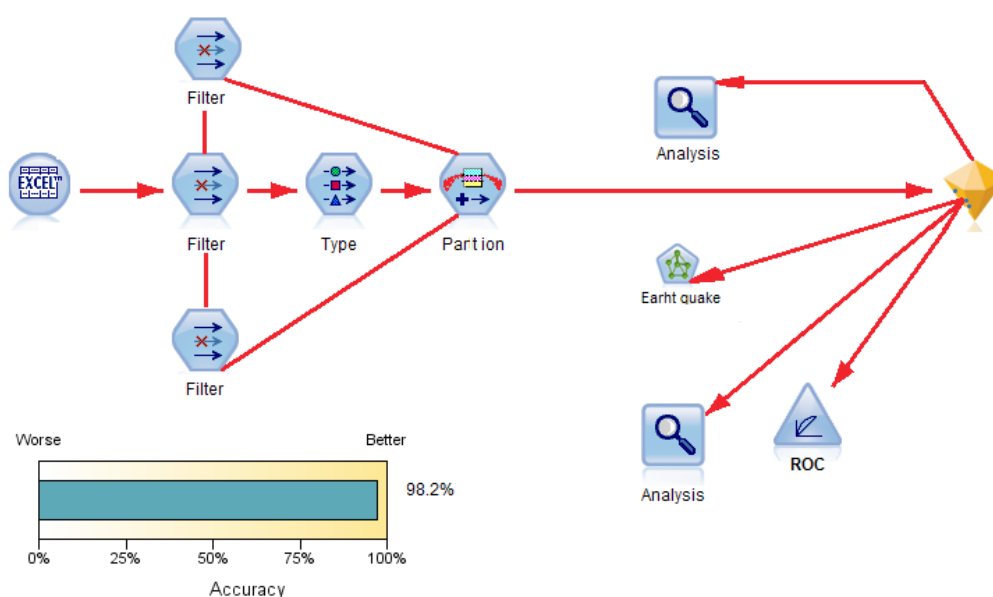
درصد وقوع	پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه
۸۵	۱
۷۶	۲
۷۳	۳
۶۳	۴
۲۱	۵
۷	۶
۴	۷
۰/۰۰۱	۸
۰/۰۰۰۱	۹
۰/۰۰۰۰۱	۱۰

اعتبارسنجی مدل پرسپترون چندلایه

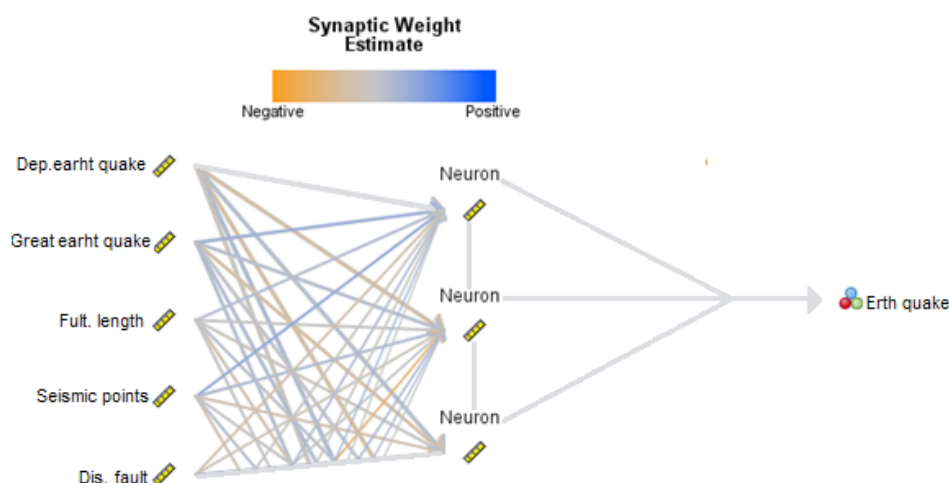
برای اعتبارسنجی داده‌ها و نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده^۹ در رابطه با خروجی داده‌ها استفاده شد. این منحنی یادشده، هم برای داده‌های آموزشی اجرا شده و هم برای داده‌های تست شبکه. برای اعتبارسنجی یک مدل در وهله اول باید مرحله آموزش و اعتبارسنجی انجام شود تا میزان ارزش بخش آموزشی معلوم شود. مدلی که در

شده است که با تشکیل ماتریس و مقایسه برای محاسبه وزن نهایی پارامترهای شبکه استفاده شده و نتایج نهایی ایجاد شده است. بنابراین نتایج نهایی وابسته به کل ورودی مدل است و هرچه دسته‌های ورودی بیشتر باشد و برای پیش‌بینی یک متغیر از عوامل مختلف استفاده شود، دقت خروجی مدل نیز افزایش خواهد یافت که در این پژوهش از ۵ عامل برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه استفاده شده است.

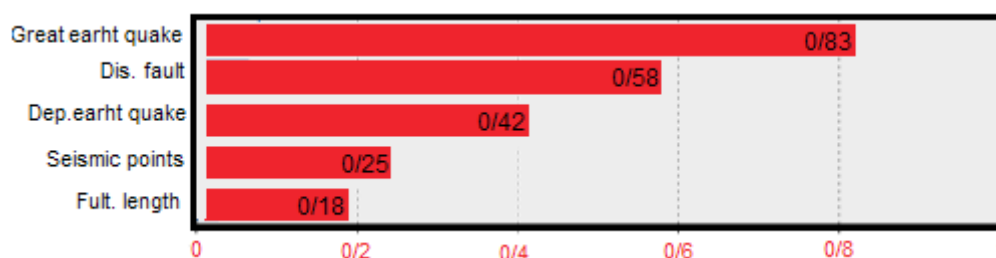
9. Receiver Operating Characteristic (ROC)



تصویر ۱۲. مدل طراحی‌شده پرسپترون چندلایه در SPSS MODELER



تصویر ۱۳. ساختار مدل طراحی شده برای پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه



تصویر ۱۴. نمودار تأثیرگذاری عوامل ورودی در پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه

در این نمودار، منحنی آبی به سمت چپ مایل شده و به سمت بالا روانه شده که این حالت هم نمایانگر اعتبار بالای مدل در بخش آموزش است. بنابراین آموزش صحیح مدل سبب شده نتایج خروجی در بخش تست نیز اعتبار بالا را نشان دهند. بخش آموزش دارای تفاوت اندکی است و ناحیه زیر منحنی ۱ عدد ۰/۹۱۱ در بخش آموزش و ۰/۹۳۴ در بخش تست شبکه را نشان می‌دهد (جدول شماره ۳) که گویای این است که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی بوده و در رتبه عالی قرار گرفته و نتایج خروجی آن قابل اعتماد است.

بحث

باتوجه به عملکرد مدل پرسپترون چندلایه در خصوص پیش‌بینی و تخمین بزرگای زمین‌لرزه در بخش شاهرود، نتایج نشان داد در مرحله اولیه، پیش‌بینی مدل بیشترین ارزش تأثیرگذاری را در خصوص بزرگای زمین‌لرزه به عوامل بزرگای زمین‌لرزه‌های رخ داده با مقدار ۰/۸۳ درصد و برای لایه فاصله از گسل و عمق کانونی زمین‌لرزه‌های رخ داده به ترتیب با مقدار ۰/۵۸ و ۰/۴۲ درصد کمترین ارزش تأثیرگذاری را به عامل نقاط لرزه‌خیز با مقدار ۰/۲۵ درصد و برای عامل طول گسل با مقدار ۰/۱۸ درصد اختصاص

بخش آموزش دارای اعتبار پایینی باشد عموماً در مرحله نهایی نیز دارای داده‌های با دقت کمتر خواهد بود (وهاب‌زاده، ۱۴۰۲). همچنین اعتبارسنجی بخش تست شبکه نیز به عنوان بخش نهایی در اعتبارسنجی شناخته می‌شود. برحسب نوع و میزان آموزش کیفیت داده‌های خروجی نیز متغیر است. همچنین در بخش تست شبکه نمی‌توان از مقادیر سلولی مناطق خطر ریزش استفاده کرد. بنابراین در بخش طراحی مدل، داده‌ها به ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد تست شبکه تقسیم شدند؛ به مثال ساده، نرم‌افزار در مرحله مدل‌سازی ۳۰ درصد مقادیر سلولی مناطق ریزشی را نگهداشته و آن را با داده‌های آموزشی ترکیب نمی‌کند و در آخر برای تست شبکه از همین داده‌های ۳۰ درصد استفاده می‌شود. نرم‌افزار به صورت خودکار با عمل مقایسه داده‌های خروجی و داده‌های ۳۰ درصد از طریق نمودار اعتبار نتیجه خروجی را نمایش می‌دهد (وهاب‌زاده، ۱۴۰۲).

باتوجه به منحنی تصویر شماره ۱۶ که در بخش اول مربوط به قسمت آموزش مدل MLP است، میزان اعتبار نشان‌دهنده این است که مدل به خوبی آموزش دیده و پیش‌بینی آن در خصوص بزرگای زمین‌لرزه در آینده قابل اعتماد است. معیار این منحنی به گونه‌ای است که خطوط رسم شده هرچه دارای فاصله بیشتری از منحنی قرمز اصلی باشد دارای اعتبار بالاتری است. همچنین

10. Area under the curve (AUC)

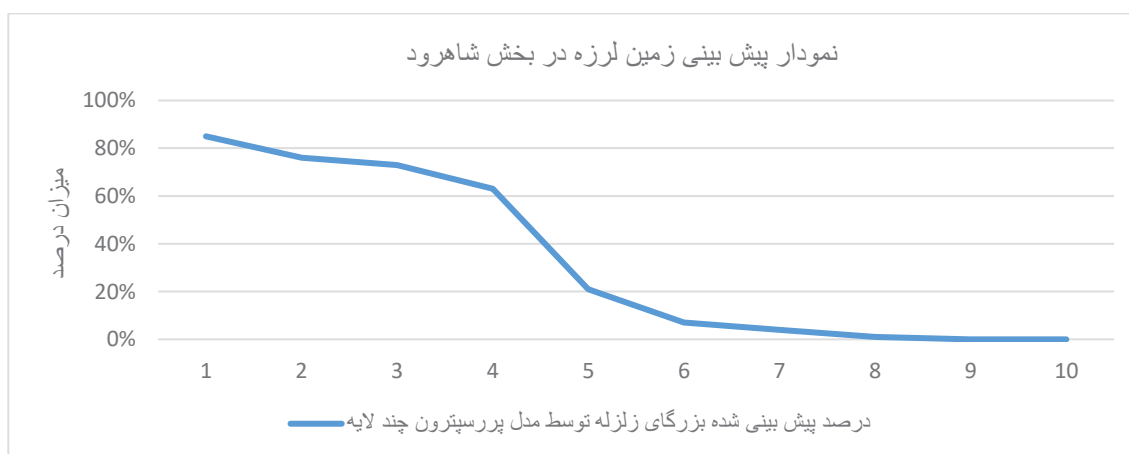


جدول ۳. مقادیر ناحیه زیر منحنی (AUC)

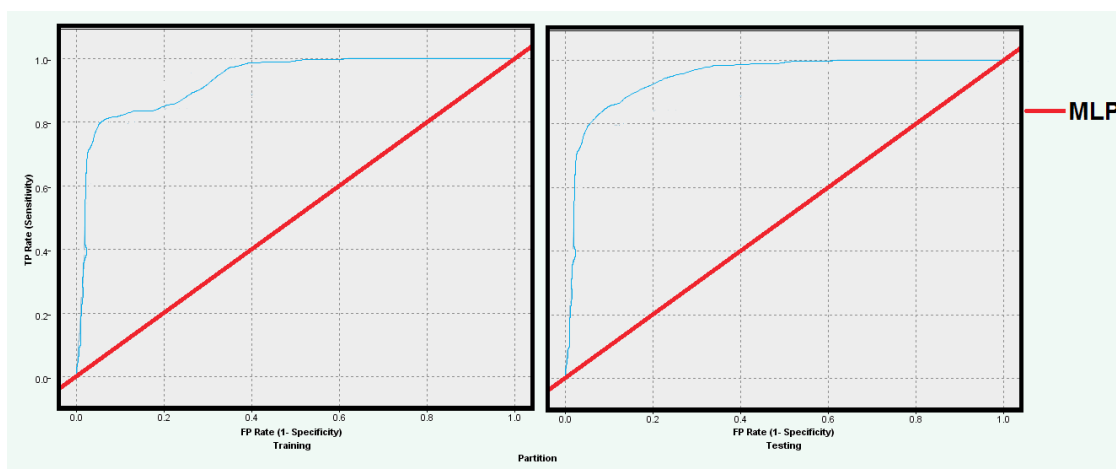
تقسیم‌بندی	تست	آموزش
مدل	aus	aus
زمین‌لرزه	۰/۹۳۴	۰/۹۱۱

نورون ورودی، ۳ نورون میانه و یک نورون خروجی طراحی شده است و نتایج نهایی مدل بعد از آموزش و سنجش میزان اعتبار آن نشان داده که زمین‌لرزه‌ها با شدت و بزرگای ۱ تا ۳ ریشتر احتمال وقوع خیلی زیادی دارند و امکان رخداد آن‌ها در مناطق گسله به‌ویژه گسل کلور خیلی بالاست. گرچه زمین‌لرزه‌هایی با این شدت و قدرت در رتبه کم‌خطر طبقه‌بندی می‌شوند اما رخداد آن‌ها در عمق‌های کم و نزدیک به مناطق مسکونی که به‌لحاظ ساخت کیفیت پایین دارند می‌تواند خسارات جانی و مالی زیادی ایجاد کند. همچنین زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۴ تا ۶ ریشتر با ۲۶ درصد، احتمال وقوع متوسطی دارند. رخداد این زمین‌لرزه‌ها با قدرت و

داده است. در پروسه پیش‌بینی و تخمین بزرگای زمین‌لرزه، داده‌های مهم لرزه‌نگاری بسیار مهم هستند؛ چراکه با بررسی و ارزیابی آن‌ها می‌توان روابط معنی‌داری را در خصوص عوامل مختلف کشف کرد. رخداد متوالی زمین‌لرزه‌ها در ناحیه شرقی بخش شاهرود که بیشتر از ۷۰ درصد آن‌ها در عمق ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری و با بزرگای ۱ تا ۳ ریشتر بوده، نشان‌دهنده فعال بودن گسل کلور است. همچنین با بررسی سایر نقاط لرزه‌خیز در داخل منطقه معلوم شده که ۷۰ درصد نقاط در نزدیک گسل‌ها اتفاق افتاده و با فعالیت جنبشی گسل‌ها ارتباط معنی‌داری دارند. مدل طراحی‌شده در رابطه با پیش‌بینی و تخمین بزرگای زمین‌لرزه با ۵



تصویر ۱۵. نمودار پیش‌بینی بزرگای زمین‌لرزه



تصویر ۱۶. نمودار مربوط به اعتبارسنجی ROC



معیار این منحنی به گونه است که خطوط رسم شده هرچه دارای فاصله بیشتری از منحنی قرمز اصلی باشد، دارای اعتبار بالایی است همچنین در نمودار بالا منحنی آبی به سمت چپ مایل شده و به سمت بالا روانه شده که این حالت هم نمایانگر اعتبار بالایی مدل در بخش آموزش است. بنابراین آموزش صحیح مدل سبب شده نتایج خروجی در بخش تست نیز اعتبار بالا را نشان دهند. بخش آموزش دارای تفاوت اندکی است و مقدار AUC عدد ۰/۹۱۱ در بخش آموزش و ۰/۹۳۴ در بخش تست شبکه را نمایش می دهد (جدول شماره ۳) که گویای این است که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی بوده و در رتبه عالی قرار گرفته و نتایج خروجی آن قابل اعتماد است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مقاله تمام اصول اخلاق پژوهش رعایت شده است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ گونه کمک مالی از سازمانی های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در آماده سازی این مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

از مراکزی چون مرکز لرزه نگاری کشوری و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران که در جهت انجام این پژوهش با ارائه داده ها و اطلاعات مهم ما را یاری کردند، تشکر و قدردانی می شود.

شدت تعریف شده می تواند خسارات زیادی را در منطقه ایجاد کند. همچنین زمین لرزه هایی با قدرت و شدت بالا در حد ۷ تا ۱۰ ریشتر قدرت تخریبی خیلی بالایی دارند و احتمال وقوع آن ها در منطقه به ندرت و ۴ درصد است که نشان دهنده این است که احتمال وقوع آن ها پایین است. براساس آمارها و سوابق زمین لرزه ها در منطقه نیز وقوع این مدل زمین لرزه ها در فواصل زمانی بلندی اتفاق افتاده، اما درصد وقوع زمین لرزه هایی با شدت و قدرت خیلی بالا با بزرگای ۸ تا ۱۰ ریشتر در منطقه به شدت پایین است و درصد پیش بینی مدل نیز نزدیک به صفر است که بر درصد احتمال خیلی پایین این مدل زمین لرزه دلالت دارد. مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی که توانایی یادگیری توابع و پارامترهای مختلف را دارند، ابزار مهمی در رابطه با حل مسائل پیچیده شناخته می شوند. مدل پرسپترون چندلایه که به علت الگوبرداری از سیستم محاسباتی مغز انسان عملکرد خوبی در این رابطه دارد، عموماً در سطح جهان برای پیش بینی خصوصیات زمین لرزه استفاده می شود. بنابراین استفاده از مدل های هوش مصنوعی به ویژه مدل پرسپترون چندلایه در خصوص پیش بینی بزرگای زمین لرزه می تواند کمک زیادی در رابطه با شناخت الگو و روابط پیچیده مختلف کند.

نتیجه گیری

برای اعتبارسنجی داده ها و نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش از منحنی ROC در رابطه با خروجی داده ها استفاده شده است. این منحنی یاد شده هم برای داده های آموزشی و هم برای داده های تست شبکه اجر شده است. برای اعتبارسنجی یک مدل در وهله اول باید مرحله آموزش و اعتبارسنجی شود تا میزان ارزش بخش آموزشی معلوم شود. مدلی که در بخش آموزش دارای اعتبار پایینی باشد عموماً در مرحله نهایی نیز داده ها دارای دقت کمتری خواهد بود (وهاب زاده، ۱۴۰۲). همچنین اعتبارسنجی بخش تست شبکه نیز به عنوان بخش نهایی در اعتبارسنجی شناخته می شود. برحسب نوع و میزان آموزش کیفیت داده های خروجی نیز متغیر است. همچنین در بخش تست شبکه نمی توان از مقادیر سلولی مناطق خطر ریزش استفاده کرد. بنابراین در بخش طراحی مدل داده ها به ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد تست شبکه تقسیم شده است. به مثال ساده نرم افزار در مرحله مدل سازی ۳۰ درصد مقادیر سلولی مناطق ریزشی را نگهداشت و آن را با داده های آموزشی ترکیب نمی کند و در آخر برای تست شبکه از همین داده های ۳۰ درصد استفاده می شود. نرم افزار به صورت خودکار با عمل مقایسه داده های خروجی و داده های ۳۰ درصد از طریق نمودار اعتبار نتیجه خروجی را نمایش می دهد (وهاب زاده، ۱۴۰۲). با توجه به منحنی (تصویر شماره ۸)، در بخش اول مربوط به قسمت آموزش مدل MLP است، میزان اعتبار نشان دهنده این است که مدل به خوبی آموزش دیده و پیش بینی آن در خصوص بزرگای زمین لرزه در آینده قابل اعتماد است.

References

- Arjomand, M. A., Mahmoudi, J., Rezaei, M., & Mohammadi, M. H. (2016). [The earthquake magnitude prediction using multilayer perceptron neural network (Persian)]. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(4), 1-8. [\[Link\]](#)
- Ahmadi Namin, M., & Kazemian, A. (2023). [Study of the relationship between earthquakes and weather in recent earthquakes in Iran (Persian)]. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 10(2), 129-141. [\[DOI: 10.48303/bese.2022.553375.1075\]](#)
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265. [\[Link\]](#)
- Dana, T., Lelahizade, B., Hemmasi, A., & Aghamohammadi, H. (2020). [Vulnerability assessment of Tehran Municipality District 8 against earthquake (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 10(2), 177-186. [\[Link\]](#)
- Esfandiyari, F., Gafari, A., & Lotfi, K. (2014). [Vulnerability assessment cities near by faults using TOPSIS Method & GIS: A Case Study of Ardabil (Persian)]. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 17-33. [\[DOI:10.22111/jneh.2014.2466\]](#)
- Esfandiari, F., Ghafari Gilande, A., & Lotfi, Kh. (2018). [Investigating the seismic power of faults and estimating human casualties caused by earthquakes in urban areas, a case study: (Ardebil city)(Persian)]. *Quantitative Geomorphological Research*, 2(4), 17-36. [\[Link\]](#)
- Gandomi, M., Dolatshahi, Pirooz, M., Varjavand, I., & Nikoo, M. R. (2019). [Application of multilayer perceptron neural network and support vector machine for modeling the hydrodynamic behavior of permeable breakwaters with Porous Core (Persian)]. *Marine Engineering*, 15(29), 167-179. [\[Link\]](#)
- Gholami, H., & Shokohi Bidhandi, M., S. (2023). [Relative evaluation of the vulnerability of urban areas of Khorramabad in terms of earthquakes using hierarchical analysis method (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 12(4), 481-499. [\[Link\]](#)
- Hayati, S., Gholami, Y., Esmaeili, A., & Razavinejad, M. (2017). [Predicting the location of a possible earthquake in Khorasan Razavi Province by Using Artificial Neural Network (Persian)]. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5(4), 1-19. [\[DOI:10.22067/geo.v5i4.47594\]](#)
- Heidarimozaffar, M., & TajBakhshian, M. (2022). [Zoning the vulnerability of Nahavand Settlements to Earthquakes (Persian)]. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 57-78. [\[Link\]](#)
- Khairi, A., Balafar, M., & Zamani, B. (2017). [Prediction of Tabriz fault earthquake using polynomial regression (Persian)]. *Scientific Research Quarterly of Crisis Management*, 10, 77-81. [\[Link\]](#)
- Kazemi, M., Mahood, M., & Zafarani, H. (2021). [Magnitude and epicentral distance estimation from a single seismic record in the Alborz Region (Persian)]. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(2), 1-7. [\[DOI:10.48303/bese.2021.244102\]](#)
- Khodadadijidd, Sh., & Porzinli, S. (2022). [Seismic zoning of Ardabil city using deterministic risk analysis and fuzzy system(Persian)]. *Modares Civil Engineering Journal*, 22(2), 57-74. [\[Link\]](#)
- Pirizadeh, M., & Pirizadeh, M (2021). [Artificial intelligence applications in analyzing seismological data (Case study: Precursors data) (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 11(3), 299-309. [\[Link\]](#)
- Soltanpour, H., Zaré, M., Moghimi, E., & Jafarbiglo, M. (2019). [Earthquake risk assessment in northwestern Tehran using Analytical Hierarchy process (AHP), case study: 22nd District (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 8(4), 373-386. [\[Link\]](#)
- Al Banna, H., Abu Taher, K., Shamim Kaiser, M., Mufti, M., Saz-zadur, R., & Sanwar, H., et al. (2020). Application of artificial intelligence in predicting earthquakes: State-of-the-art and future challenges. *IEEE Access*, 8, 192880 - 192923. [\[DOI:10.1109/ACCESS.2020.3029859\]](#)
- Almaghrabi, M., & Chetty, G. (2020). Improving sentiment analysis in Arabic and English languages by using Multi-Layer Perceptron Model (MLP). Paper presented at: 2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Sydney, NSW, Australia, 06-09 October 2020. [\[DOI:10.1109/DSAA49011.2020.00095\]](#)
- Apriani, M., Wijaya, S. K., & Daryono. (2021). *Earthquake magnitude estimation based on machine learning: Application to earthquake early warning system*. Paper presented at: Journal of Physics: Conference Series, Volume 1951, International Symposium on Physics and Applications (ISPA 2020), Surabaya, Indonesia, 17-18 December 2020. [\[DOI:10.1088/1742-6596/1951/1/012057\]](#)
- Bhatia, M., Ahangar, T. A., & Manocha, A. (2023). Artificial intelligence based real-time earthquake prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120, 105856. [\[DOI:10.1016/j.engappai.2023.105856\]](#)
- Feng, B., & Fox, G. C (2020). Spatiotemporal pattern mining for nowcasting extreme earthquakes in Southern California. *arXiv*, 2012.14336. [\[DOI:10.48550/arXiv.2012.14336\]](#)
- Galkina, A., & Grafeeva, N. (2019). *Machine learning methods for earthquake prediction: A survey*. Paper presented at: The Fourth Conference on Software Engineering and Information Management, Saint Petersburg, Russia, April 2019. [\[Link\]](#)
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., & Jesús, O. D (2014). *Neural Network Design*. Retrieved from: [\[Link\]](#)
- Lee, S., Ryu, J. H., Lee, M. J., & Won, J. S. (2006). The application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea. *Mathematical Geology*, 38(2), 199-220. [\[DOI:10.1007/s11004-005-9012-x\]](#)
- Menhaj, M. (2009). *[Fundamentals of neural networks (Persian)]*. Tehran: Amirkabir University of Technology.
- Mousavi, M., & Broza, G. (2023). Machine learning in earthquake seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 51(1), 105-129. [\[Link\]](#)
- Ramdhani, Y., Mustofa, H., Topiq, S., Alamsyah, D. P., Setiawan, S., & Susanti, L. (2022). *Sentiment analysis Twitter based lexicon and multilayer perceptron Algorithm*. Paper presented at: 10th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM), Yogyakarta, Indonesia, 20-21 September 2022. [\[DOI:10.1109/CITSM56380.2022.9936029\]](#)
- Saad, O., Chen, Y., Savvaidis, A., Fomel, S., Jiang, X., & Huang, D., et al. (2023). Earthquake forecasting using big data and artificial intelligence: A 30-week real-time case study in China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(6), 2461-2478. [\[DOI:10.1785/0120230031\]](#)
- Sayarpour, M. (1999). [Landslide risk potential zoning in the south of Khalkhal, Ardabil province (Persian)] [MA thesis]. Tehran: University of Tehran. [\[Link\]](#)



- Vahabzde, M. (2023). [Risk zoning of skirts on Khalkhal road to Shahroud using artificial neural network system (Persian)] [MA thesis]. Ardabil: University of Mohaghegh Ardabili.
- Yan, J., Zeng, S., Tian, B., Cao, Y., Yang, W., & Zhu, F. (2023). Relationship between highway geometric characteristics and accident risk: A Multilayer Perceptron Model (MLP) Approach. *Sustainability*, 15(3), 1893. [\[DOI:10.3390/su15031893\]](https://doi.org/10.3390/su15031893)
- Yazarloo, R., & Bæy, A. (2023). [*Prediction of induced earthquakes caused by dam construction by artificial neural network* (Persian)]. Paper presented at: The First National Conference on New Technologies in Energy Consumption and sustainable Urban Planning in Civil Engineering and Architecture, Golestan, Iran, 10 May 2023. [\[Link\]](#)

This Page Intentionally Left Blank