



Seismic Resilience Evaluation of Urban Water Distribution Network using Machine Learning

Mahnaz Haghighi¹, Ali Delnavaz^{2*}, Majid Safehian³ and Mohammad Delnavaz⁴

- 1) Ph.D. Candidate in Construction Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2) Assistant professor 'Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
3) Assistant professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4) Associate professor "Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran, Iran.
*Corresponding author email: a.delnavaz@qiau.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Seismic resilience focuses on the performance, recovery, and functionality of urban infrastructures after earthquakes, with water supply networks being critical for providing drinking water and firefighting support. Assessing and enhancing the seismic resilience of these networks is a key challenge for researchers. This study evaluates the seismic resilience of urban water distribution, specifically focusing on Tehran's water network in Districts 1-4.

Method: This research introduces a machine learning-based model to predict seismic vulnerability and evaluate the resilience of urban water supply networks. Machine learning models are based on primary data sets, so to provide the primary database initially, finite element modeling (720 scenarios) using Abaqus software was conducted to extract the seismic behavior of buried pipes. Various machine learning algorithms were then applied to develop a predictive model, which was optimized and paired with a numerical algorithm to assess damage under uncertainty using the Monte Carlo method. The model was tested on five seismic scenarios in Tehran's Districts 1-4, extracting results on pipe damage, and seismic resilience was evaluated based on damage, water supply needs, and recovery time.

Results: The results obtained from the performance of the machine learning model using various algorithms demonstrated that Gaussian algorithms performed better compared to other computational machine learning algorithms. Specifically, the Rational Quadratic Gaussian algorithm exhibited minimal error, with a mean squared error (MSE) of 3.0564 and a correlation coefficient (R) of 0.94. For the purpose of assessing seismic resilience of the water transmission and distribution network in Tehran's areas 1 to 4, the extent of damage to the water supply network (number and location of pipe breaks/leaks in the network) under 5 seismic loading scenarios was calculated and extracted using the vulnerability prediction model. Additionally, an assessment of the relative damage index (Bridge index) in the pipeline network under study was conducted. In evaluating the minimum required water supply considering the population of each area and the required water quantity, calculations were made and assessments were carried out. The recovery time/recovery rate index of the water distribution network following an earthquake event, based on the level of pipe damage in each area and repair and restoration strategies, was studied. Based on the results obtained, it is evident that the longest recovery time of the system was for area 4 of Tehran under S1 loading (earthquake magnitude of 7.4 Richter), amounting to 493.5 hours, while the shortest recovery time was for area 3 of Tehran under S2 loading (earthquake magnitude of 6.2 Richter), amounting to 316.5 hours. The results indicate that the water supply network under scenarios with larger earthquake magnitudes experienced longer recovery times compared to scenarios with smaller earthquake magnitudes.

Conclusion: The results demonstrated that the machine learning model for predicting seismic damage in the water transmission network had acceptable accuracy in assessing damage under incident conditions. The main points and solutions proposed in this study towards enhancing seismic resilience of the water supply network include: accurate prediction of seismic damage levels in the water transmission network using the proposed model (for precision and improvement of vulnerability indices), making precise management decisions to secure alternative water resources in high earthquake risk areas (to enhance augmentation indices), and implementing repair and restoration strategies for damaged pipelines by equipping areas with skilled support teams (to improve recovery time indices). Based on the obtained results, the model presented in this study can be utilized as a comprehensive model for various regions and under different seismic loading conditions. In addition to estimating seismic vulnerability of the water supply network, it can provide a detailed assessment of seismic resilience and enhance the flexibility of this critical infrastructure.

Keywords: Seismic vulnerability, Seismic resilience, Machine learning, Water distribution network



ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهری با بهره‌گیری از مدل

یادگیری ماشین (ML)

مهناز حقیقی^۱، علی دلنواز^{۲*}، مجید صافحیان^۳ و محمد دلنواز^۴

(۱) دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) استادیار گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

(۳) استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۴) دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: a.delnavaz@qiau.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: تاب‌آوری لرزه‌ای به‌عنوان یکی از مفاهیم نوین در عرصه مدیریت ریسک و بحران می‌باشد که به بررسی عملکرد لرزه‌ای، بازیابی و خدمت‌رسانی مجدد (پس از زمین‌لرزه) سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری اطلاق می‌گردد. در این راستا شبکه انتقال و توزیع آب به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی جهت تأمین آب آشامیدنی شهروندان بعد از زمین‌لرزه و همچنین تأمین آب برای مقاصد اطفاء حریق، به شدت مورد توجه بوده است. بر این اساس ارزیابی و ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آبرسانی شهری و ارائه مدل‌های محاسباتی دقیق در راستای پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای این زیرساخت از اصلی‌ترین چالش‌های پیش‌روی محققین بوده است. این تحقیق بر ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهری متمرکز بوده که در قالب مطالعه موردی بر شبکه آبرسانی شهر تهران (مناطق ۱ تا ۴) انجام شده است.

روش پژوهش: در این پژوهش به هدف پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه آبرسانی شهری و ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای این زیرساخت مدلی نوین براساس یادگیری‌ماشین ارائه شده است. مدل‌های یادگیری‌ماشین مبتنی بر مجموعه داده‌های اولیه بوده، بنابراین ابتدا جهت تأمین پایگاه داده اولیه، مدل‌سازی اجزای محدود گسترده‌ای (۷۲۰ سناریوی مدل‌سازی) در بستر نرم‌افزار آباکوس جهت استخراج رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک تعریف و پیاده‌سازی شده است. با تأمین داده‌های اولیه، مدل پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای لوله مدفون براساس الگوریتم‌های مختلف یادگیری‌ماشین (۵ الگوریتم اصلی یادگیری‌ماشین به همراه زیرشاخه‌های محاسباتی) توسعه یافته و عملکرد مدل مورد سنجش قرار گرفته است. در نهایت با استخراج شرایط بهینه عملکرد مدل پیش‌بینی توسعه داده شده، الگوریتم عددی برای ارزیابی میزان آسیب لرزه‌ای در خط لوله شبکه توزیع و انتقال آب با بهره‌گیری از شرایط عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای ورودی مدل و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسعه داده شده است. در این پژوهش مدل ارائه شده تحت ۵ سناریو لرزه‌ای (۵ زمین‌لرزه بزرگ) و براساس داده‌های اولیه مناطق (۱ تا ۴) شهر تهران اجرا و نتایج (آسیب لرزه‌ای شبکه آبرسانی/شکست/نشست) استخراج شده است. در نهایت براساس ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه انتقال آب شهر تهران، تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم آبرسانی براساس شاخص‌های میزان آسیب، تأمین حداقل آب مورد نیاز و زمان بازیابی شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج حاصل از عملکرد مدل یادگیری‌ماشین براساس الگوریتم‌های مختلف نشان داد که الگوریتم‌های گاوسی دارای عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌های محاسباتی یادگیری‌ماشین بوده است. بر این اساس الگوریتم گاوسی درجه دوم منطقی دارای میزان خطای کمینه بوده، به‌گونه‌ای که دارای خطای کمترین مربعات (MSE) معادل با ۳۰۰۵۶۴ و میزان همبستگی (R) معادل با ۰.۹۴ بوده است. به‌جهت ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه انتقال و توزیع آب برای مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران، میزان آسیب شبکه آبرسانی (تعداد و موقعیت شکست/نشست لوله در شبکه) تحت ۵ سناریو بارگذاری لرزه‌ای با بهره‌گیری از مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری محاسبه و استخراج شده است. همچنین با بررسی شاخص Bridge میزان نسبی آسیب در شبکه خط لوله مورد بررسی قرار گرفت. در راستای ارزیابی شاخص افزونگی (میزان حداقل آب مورد نیاز) با توجه به جمعیت هر منطقه و میزان آب مورد نیاز محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. شاخص زمان بازیابی/سرعت بازیابی شبکه توزیع و انتقال آب بعد از وقوع زمین‌لرزه براساس میزان آسیب خط‌لوله در هر منطقه و استراتژی‌های ترمیم و تعمیر شبکه مورد مطالعه قرار گرفت. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که بیشترین زمان بازیابی سیستم برای منطقه ۴ شهر تهران تحت بارگذاری S1 (زمین‌لرزه با بزرگای ۷.۴ ریشتر) و معادل با ۴۹۳.۵ ساعت و کمترین زمان بازیابی سیستم برای منطقه ۳ شهر تهران تحت بارگذاری S2 (زمین‌لرزه با بزرگای ۶.۲ ریشتر) و معادل با ۳۱۶.۵ ساعت بوده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که شبکه آبرسانی تحت سناریوهایی با بزرگای زمین‌لرزه بیشتر دارای زمان بازیابی بیشتری نسبت به سناریوهای لرزه‌ای با بزرگای کوچکتر بوده است.

نتایج: نتایج نشان داد که مدل یادگیری‌ماشین پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای شبکه انتقال آب دارای دقت قابل‌قبول در ارزیابی خسارت در شرایط وقوع حادثه بوده است. اصلی‌ترین نکات و راه‌کارهای ارائه شده در این پژوهش در راستای ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آبرسانی عبارت‌است از: پیش‌بینی دقیق میزان آسیب لرزه‌ای شبکه انتقال آب با بهره‌گیری از مدل ارائه شده (در راستای دقت و بهبود شاخص آسیب‌پذیری)، اتخاذ تصمیمات مدیریتی دقیق در راستای تأمین منابع جایگزین آب مورد نیاز در مناطق با ریسک لرزه‌ای بالا (در راستای بهبود شاخص افزونگی) و اتخاذ استراتژی‌های ترمیم و تعمیر خط‌لوله آسیب‌داده با تجهیز مناطق به تیم‌های پشتیبانی ماهر (در راستای بهبود شاخص زمان بازیابی). براساس نتایج حاصل می‌توان مدل ارائه شده در این پژوهش را به عنوان یک مدل جامع برای مناطق مختلف و تحت شرایط مختلف بارگذاری لرزه‌ای به کارگرفت و علاوه بر تخمین آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه آبرسانی، ارزیابی دقیقی بر تاب‌آوری لرزه‌ای و ارتقای انعطاف‌پذیری لرزه‌ای این زیرساخت حیاتی انجام داد.

کلید واژه‌ها: آسیب‌پذیری لرزه‌ای، تاب‌آوری لرزه‌ای، یادگیری‌ماشین، شبکه آبرسانی

مقدمه

با گسترش جوامع شهری، طراحی و پیاده‌سازی اقدامات پیش‌گیرانه در راستای مقابله با کاهش خسارات ناشی از حوادث طبیعی همواره مورد توجه محققین بوده است. در این راستا ارزیابی ظرفیت پاسخ‌دهی زیرساخت‌های شهری و به طور مشخص مدیریت و کاهش ریسک در برابر وقوع سوانح و حوادث طبیعی به عنوان اصلی‌ترین راه‌کار مدنظر می‌باشد. زمین‌لرزه به عنوان یکی از حوادث طبیعی همواره باعث مرگ‌ومیر و خسارات مادی فراوانی در شهرها بوده است، به گونه‌ای که در قرن گذشته هزاران زمین‌لرزه در مناطق مختلف دنیا رخ داده، میلیون‌ها نفر را کشته و خسارات مالی فراوانی را برجای گذاشته است (Ilanlu et al. 2013). در سالیان اخیر شهرهای تاب‌آور با رویکرد پایداری و بازیابی در برابر حوادث طبیعی مدنظر محققین و فعالان مدیریت شهری قرار گرفته‌است. هدف اصلی از ایجاد شهرهای تاب‌آور ایستادگی و یا انعطاف‌پذیری در برابر حوادث طبیعی همچون زمین‌لرزه و همچنین بازیابی سریع (بازگشت به شرایط خدمات رسانی) به حالت قبل از حادثه بوده است. این راستا روش‌های مختلف ارزیابی تاب‌آوری (معیارها، رویکردها و شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری) مورد توجه محققین قرار گرفته است (Qian et al. 2017; Qian et al. 2023). تاب‌آوری لرزه‌ای به عنوان یکی از مفاهیم نوین در عرصه مدیریت ریسک و بحران می‌باشد که به بررسی عملکرد لرزه‌ای، بازیابی و خدمت‌رسانی مجدد (پس از زمین‌لرزه) سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری اطلاق می‌گردد. یکی از الزامات اولیه برای ایجاد شهرهای تاب‌آور در برابر زمین‌لرزه، ایجاد زیرساخت‌های تاب‌آور بوده است. در این راستا شبکه انتقال و توزیع آب به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی جهت تأمین آب آشامیدنی شهروندان بعد از زمین‌لرزه و همچنین تأمین آب برای مقاصد اطفاء حریق (احتمالی)، به شدت مورد توجه می‌باشد. بر این اساس ایجاد شبکه آب‌رسانی تاب‌آور در برابر زمین‌لرزه دارای اهمیت و ضرورت بسیار بالایی در مناطق شهری بوده است (Nariman et al. 2010; Renschler et al. 2023). با توجه به نوپابودن بحث تاب‌آوری لرزه‌ای و بلاخص تاب‌آوری شبکه توزیع و انتقال آب شهری، تا به امروز مطالعات محدودی در این حوزه صورت گرفته‌است. در این راستا مطالعات انجام شده توسط محققین پیشین در دو بخش ارزیابی رفتار لرزه‌ای خط‌لوله مدفون شبکه آب‌رسانی و ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب، طبقه‌بندی می‌شود. بخش اول تحقیقات انجام شده به ارزیابی رفتار لرزه‌ای خط‌لوله مدفون با بهره‌گیری از روش‌های مختلف مانند روش‌های احتمالاتی (شبیه‌سازی مونت‌کارلو)، آنالیز هیدرولیکی جریان آب در خط‌لوله، آنالیز پاسخ دینامیکی لوله مدفون در خاک و غیره معطوف بوده است (Shinozuka et al.,

1981; Hwang et al., 1998; Selçuk & Yüçemen, 2000; Shi, 2006; Wang & O'Rourke, 2006). نتایج حاصل بیانگر آنالیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای و قابلیت اطمینان لرزه‌ای خط‌لوله انتقال آب شهری براساس هریک از روش‌های مطالعاتی بوده است، همچنین نتایج بیانگر کارایی قابل‌قبول روش‌های پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای لوله مدفون در خاک بود، اگرچه مواردی همچون تعدد داده‌های اولیه، هزینه محاسباتی بالا و عدم درنظر گرفتن شرایط عدم قطعیت به عنوان ضعف‌های این مطالعات مشاهده شد. در شرایط وقوع زمین‌لرزه، احتمال عدم پشتیبانی زیرساخت‌های مختلف شهری از جمله شبکه توزیع و انتقال برق بسیار بالا بوده است، بر این اساس دونا سکارو^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۷ و آداجی و الینگود^۲ در سال ۲۰۰۸ در مطالعاتی به ارزیابی میزان وابستگی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه انتقال آب شهری به زیرساخت‌های پشتیبان همچون شبکه توزیع و انتقال برق پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر ارتباط بین میزان آسیب‌پذیری شبکه انتقال آب و زیرساخت‌های پشتیبان همچون شبکه توزیع برق شهری بوده است. در ادامه محققین مختلف همچون: بوناو^۳ و اوروکه^۴ در سال ۲۰۰۹، فرگیاداکس^۵ و کریستودلو^۶ در سال ۲۰۱۴، هو^۷ و دو^۸ در سال ۲۰۱۴ و یو^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با بررسی عملکرد لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب، آسیب‌پذیری لرزه‌ای و قابلیت اطمینان این زیرساخت شهری را مورد ارزیابی قرار دادند و خدمت‌رسانی شبکه آب‌رسانی را در شرایط وقوع زمین‌لرزه بررسی نمودند. نتایج حاصل نشان داد که بررسی عملکرد لرزه‌ای خط‌لوله مدفون اصلیت‌ترین گام در ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی شهری بوده، همچنین براساس نتایج مشخص گردید که ارائه مدل‌های عددی کارآمد و دقیق در راستای پیش‌بینی آسیب‌لرزه‌ای خط‌لوله، از نیازهای پژوهشی در این حوزه قلمداد می‌گردد. در ادامه با پیشرفت روش‌های محاسباتی نرم، محققین با به‌کارگیری مدل‌های مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی (AI^{۱۰}) به ارزیابی و پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله مدفون در خاک پرداختند. در این راستا مطالعات لی^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۹، کرمی‌مقدم^{۱۲} و مهدوی^{۱۳} در سال ۲۰۲۰ و ماکراکیس^{۱۴} و همکاران در ۲۰۲۰، با بهره‌گیری از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN^{۱۵}) و ایتو^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۲۲ و حقیقی^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین (ML^{۱۸}) رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که بهره‌گیری از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و یادگیری ماشین دارای کارایی بالاتر، دقت محاسباتی بیشتر و همچنین هزینه مدل‌سازی کمتری نسبت به مدل‌های سنتی ارزیابی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک بوده است. اگرچه محدودیت در متغیرهای اولیه و حساسیت بالای

انتقال آب می‌شود. پایز^{۲۳} و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مطالعات خود به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای شبکه انتقال آب تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه پرداختند. در این پژوهش مدت زمان بازیابی سیستم به عنوان شاخص ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه انتقال آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر ارتباط مستقیم بین پارامترهای دینامیکی (ماهیت بارگذاری لرزه ای) و مدت زمان احیای شبکه آب‌رسانی بود. در سال ۲۰۲۱ هونگ^{۲۴} و دلیکینا^{۲۵} در مطالعاتی به ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی پرداخت، در این پژوهش با بهره‌گیری از روش شبکه عصبی مصنوعی الگوریتمی برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای در شبکه آب شهر لوس آنجلس در کشور امریکا ارائه شد. نتایج بیانگر کارایی و دقت قابل قبول مدل ارائه شده در راستای ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب‌رسانی بوده است. در سال ۲۰۲۲ باتا^{۲۶} و همکاران در مطالعات خود به ارزیابی انعطاف‌پذیری شبکه انتقال آب شهری تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه پرداخت، در این پژوهش از یک مدل تولید زلزله همراه با یک مدل هیدرولیک تقاضا مبتنی بر فشار احتمالی برای ارزیابی عملکرد شبکه انتقال آب استفاده شد و معیارهای تاب‌آوری هیدرولیکی مانند فشار، تقاضای آب، قابلیت سرویس‌دهی آب و جمعیت مورد بررسی قرار گرفت، نتایج بیانگر استراتژی‌های پیشگیرانه برای کاهش آسیب لرزه‌ای قبل از وقوع زلزله بوده است. نریمان^{۲۷} و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع آب را براساس دو شاخص انعطاف‌پذیری هیدرولیکی و دسترسی به آب بعد از وقوع زمین‌لرزه تحت سناریوهای لرزه‌ای مختلف مورد مطالعه قرار داد، نتایج نشان داد که زمان بازیابی سیستم در هر سناریو لرزه‌ای همبستگی معنی‌داری را با شاخص‌های هیدرولیک نشان می‌دهد. در سال ۲۰۲۳ ژایی^{۲۸} و همکاران تاب‌آوری لرزه‌ای زیرساخت‌های شهری را با ارائه مدلی مبتنی بر آسیب‌پذیری و زمان بازیابی پس از وقوع زمین‌لرزه مورد بررسی قرار داده است، نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر میزان تاثیرگذاری سیستم‌های مهندسی و غیرمهندسی بر عملکرد لرزه‌ای زیرساخت‌های شهری بوده است. تنگ^{۲۹} و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی به ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری با بهره‌گیری از روش بی‌زین پرداخت، در این پژوهش مدلی برپایه روش بی‌زین برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای زیرساخت‌های شهری ارائه شد، نتایج حاصل بیانگر عملکرد موثر مدل ارائه شده برای ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری بوده است. قیان^{۳۰} و همکاران در سال ۲۰۲۳ در مطالعاتی مروری به ارزیابی روش‌های مختلف تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب که توسط محققین مختلف به‌کارگیری شده، پرداخت، نتایج بیانگر نقاط ضعف و قوت روش‌های مختلف ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهری بوده است.

مدل‌های هوش مصنوعی به پارامترهای اولیه به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد آنها تأثیر می‌گذارد و کماکان نیاز به توسعه مدل‌های کارآمدتر با دقت مدل‌سازی بیشتر بوده است.

بخش دوم مطالعات صورت گرفته توسط محققین پیشین به ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی شهری معطوف بوده است. در سال ۲۰۱۶ میلادی بحث تاب‌آوری لرزه‌ای زیرساخت به عنوان یکی از مباحث نوین در راستای برپاسازی شهرهای تاب‌آور مورد توجه محققین قرار گرفت، در این راستا کیملا^{۱۹} و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مطالعاتی به ارزیابی شاخص تاب‌آوری بر شبکه آب‌رسانی شهری پرداخت. در این پژوهش، یک شاخص تاب‌آوری (R) برای شبکه توزیع آب شهری پیشنهاد شده است که حاصل ضرب سه شاخص تعداد کاربران موقت بدون آب، سطح آب در مخازن، و کیفیت آب بوده است. نتایج نشان‌دهنده اهمیت تفکیک شبکه در نواحی برای کاهش گسترش خدمات است. همچنین لزوم در نظر گرفتن شاخص‌ها به صورت جداگانه برای یافتن روندهایی که توسط شاخص اصلی قابل ثبت نیستند نشان داده شده است. فرهمندفر^{۲۰} و همکاران در سال ۲۰۱۷ در تحقیقات خود، شاخصی کارآمد برای کمی‌سازی تاب‌آوری و یک چارچوب بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای شبکه انتقال آب در معرض محدودیت‌های بودجه پیشنهاد نمودند. مدل پیشنهادی به شدت خطر، پاسخ خطلوله برآورد شده و توپولوژی شبکه وابسته بوده است. عملکرد مدل پیشنهادی و چارچوب بهینه‌سازی در یک منطقه ساحلی مستعد زلزله مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشانگر اثربخشی سیستم ارائه شده جهت بهبود تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه انتقال آب بوده است. یانگ^{۲۱} و همکاران در سال ۲۰۱۸ تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در مناطق پرتراکم را مورد مطالعه قرار دادند، در این پژوهش یک چارچوب یکپارچه برای مدیریت زیرساخت‌های شهری و افزایش تاب‌آوری آنها پیشنهاد شد. نتایج حاصل بیانگر کارایی مدل ارائه شده در راستای ارتقای تاب‌آوری زیرساخت بود. با توجه به مطالعات صورت گرفته ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطلوله مدفون به عنوان اصلی‌ترین معیار جهت ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه انتقال آب مورد توجه محققین بوده است، براین اساس، محققین مختلف با ارزیابی آسیب‌پذیری و آنالیز ریسک لرزه‌ای خطلوله به بررسی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه انتقال آب پرداختند (Makhoul et al., 2018; Salgado-Gálvez et al., 2020). در سال ۲۰۲۰ اسد^{۲۲} و همکاران در پژوهشی به ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع و انتقال آب شهری پرداختند. در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر تاب‌آوری چند منظوره ارائه گردید، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل ارائه شده باعث کاهش ۴ درصد در هزینه‌های نگهداری، ۴۸ درصد در مدت زمان بازیابی سیستم و ۴ درصد بهبود در تاب‌آوری شبکه توزیع و

توزیع و انتقال آب شهر تهران تحت سناریوهای مختلف بارگذاری لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

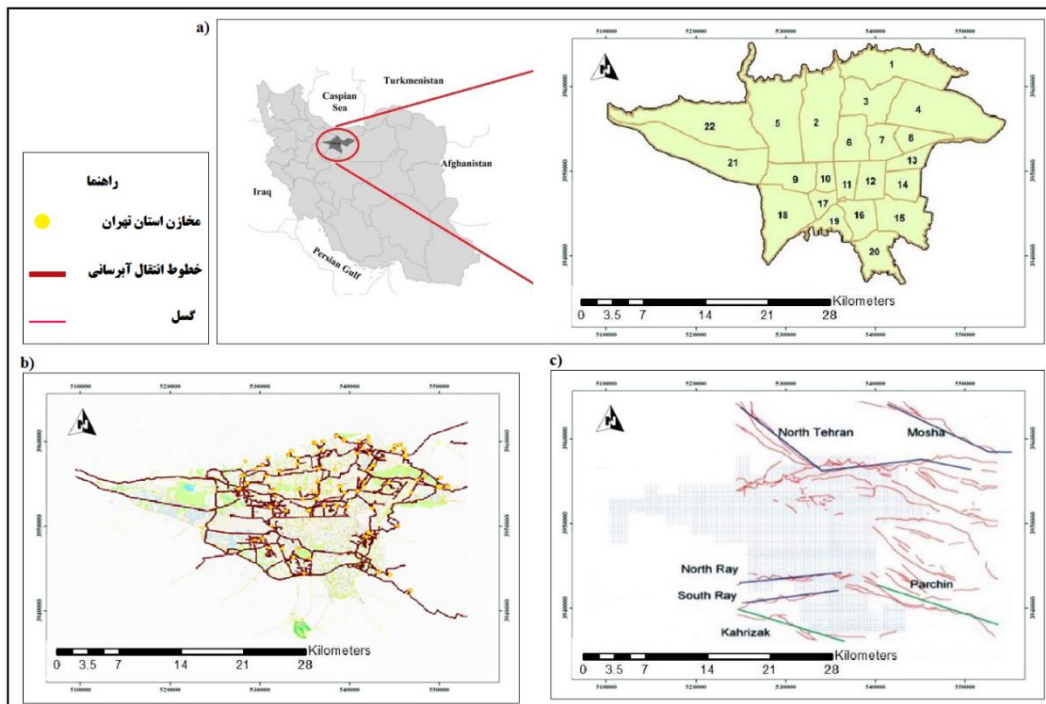
مواد و روش تحقیق منطقه مطالعاتی

با توجه به موقعیت استراتژیک شهر تهران از لحاظ سیاسی، اقتصادی و اجتماعی (پایتخت ایران) و با توجه به جمعیت بسیار بالا و لرزه‌خیز بودن این منطقه، اجرای زیرساخت‌های تاب‌آور در برابر حوادث طبیعی همچون زمین‌لرزه از اهمیت و ضرورت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات جغرافیایی و ژئولوژی شهر تهران ارائه شده است. شبکه توزیع و انتقال آب در شهر تهران به عنوان اصلی‌ترین زیرساخت شهری بوده که ارزیابی و ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای آن به عنوان یکی از اولویت‌های تحقیقاتی محسوب می‌گردد. با توجه به موارد مذکور در این پژوهش به جهت ارزیابی عملکرد مدل پژوهش (مدل ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آبرسانی شهری بر اساس

با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط محققین پیشین مشخص می‌گردد که ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب یکی از چالش‌های تحقیقاتی در این عرصه بوده که ارائه مدل‌های محاسباتی کارآمد و دقیق به عنوان خلا تحقیقاتی محسوب می‌گردد. براین اساس در این پژوهش به هدف توسعه مدلی جامع برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهری، ابتدا با بررسی نقاط ضعف و قوت مدل‌های پیشین و همچنین پارامترهای اصلی بر رفتار لرزه‌ای شبکه آبرسانی شهری، متغیرهای موثر استخراج و طبقه‌بندی شده است. در ادامه به جهت توسعه مدل مبتنی بر یادگیری ماشین (ML)، پایگاه داده اولیه با بهره‌گیری از مدل اجزای محدود لوله مدفون در خاک استخراج شده است. در نهایت جهت توسعه مدل ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آبرسانی، پنج دسته از الگوریتم‌های اصلی یادگیری ماشین مورد مطالعه قرار گرفته و دقیق‌ترین الگوریتم استخراج و به کارگیری شده است. هدف اصلی از این پژوهش ارائه مدلی دقیق، کارآمد و جامع برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهری بوده است. در این راستا به جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، شبکه

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و ژئولوژی شهر تهران

موقعیت جغرافیایی		جمعیت	مساحت	گسل‌های فعال
عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی			
۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی	۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی	بیش از ۹ میلیون نفر	۷۳۰ کیلومترمربع	گسل شمال تهران، گسل مشا، گسل شمالی ری، گسل جنوبی ری، گسل پارچین



شکل ۱. لایه اطلاعاتی نقشه شهر تهران، (a) موقعیت جغرافیایی-منطقه‌بندی شهر تهران، (b) شبکه توزیع و انتقال آب، (c) گسل‌های فعال منطقه

تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب ۵ سناریو بارگذاری لرزه‌ای مختلف مورد بررسی قرار گرفته که خصوصیات و پردازش اولیه داده‌های لرزه‌ای برای هر سناریو ارزیابی شد. به جهت در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌های عددی پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای بر خطلوله توسعه‌یافته و با استفاده از توابع توزیع احتمالی مقادیر پارامترهای ورودی مدل، شرایط عدم قطعیت در پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهر تهران براساس مدل توسعه داده شده، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج ارائه شد. در فلوجارت شکل ۲ متودولوژی انجام تحقیق ارائه شده است.

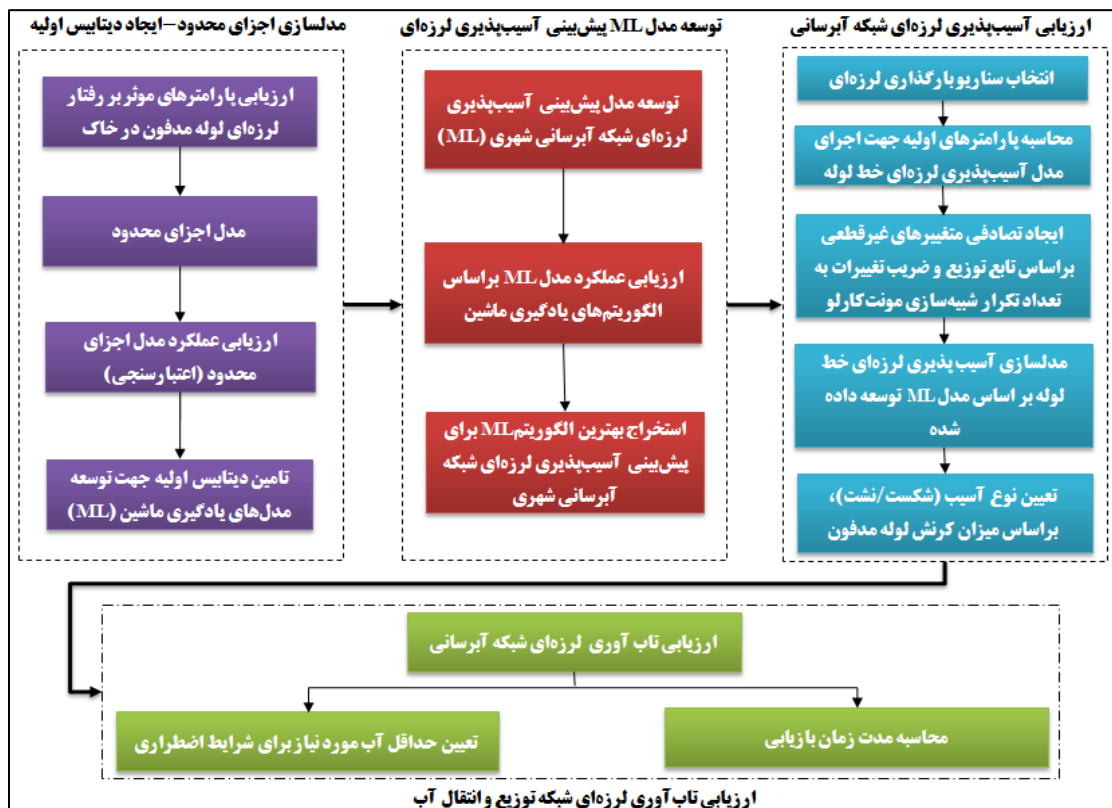
مدل‌سازی اجزای محدود- ایجاد پایگاه داده اولیه

در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطلوله مدفون مطالعات نسبتاً جامعی تا به امروز توسط محققین مختلف صورت گرفته است. قالب مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با بهره‌گیری از توابع شکنندگی خطلوله تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای احتمال آسیب لرزه‌ای بر لوله را براساس نرخ خسارت (تعداد تعمیرات لوله در واحد طول خطلوله) محاسبه می‌کنند. اصلی‌ترین پارامترها در ارزیابی آسیب لرزه‌ای لوله مدفون، در سه بخش اصلی: خصوصیات خطلوله، خصوصیات خاک پیرامون

یادگیری ماشین) مطالعات موردی شهر تهران و شبکه آب‌رسانی آن (شبکه توزیع و انتقال آب در مناطق ۱ تا ۴ تهران) انجام شد. در شکل (۱) نقشه جغرافیایی، شبکه توزیع آب و گسل‌های فعال شهر تهران نمایش داده شده است.

روش تحقیق

در این پژوهش مدلی جامع برای ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب شهری با بهره‌گیری از روش یادگیری ماشین توسعه داده شد. با توجه به ماهیت روش ML که مبتنی بر داده‌های اولیه می‌باشد، ابتدا با ارزیابی پارامترهای موثر بر رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک، داده‌های اولیه پژوهش با مدل‌سازی به روش اجزای محدود^{۳۱} در بستر نرم‌افزار آباکوس^{۳۲} ایجاد شد و عملکرد مدل اجزای محدود براساس نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. با اعتبارسنجی عملکرد مدل اجزای محدود، تست‌های متعددی براساس مقادیر مختلف پارامترهای اولیه (متغیرهای موثر بر رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک) انجام و میزان کرنش (تغییر شکل لوله) تحت شرایط مختلف مدل‌سازی و بارگذاری‌های لرزه‌ای استخراج شد. با تامین پایگاه داده اولیه، مدل‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطلوله مدفون توسعه داده شده و عملکرد آن براساس الگوریتم‌های مختلف روش یادگیری ماشین ارزیابی شد. در این پژوهش برای ارزیابی



ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب

شکل ۲. متودولوژی انجام تحقیق

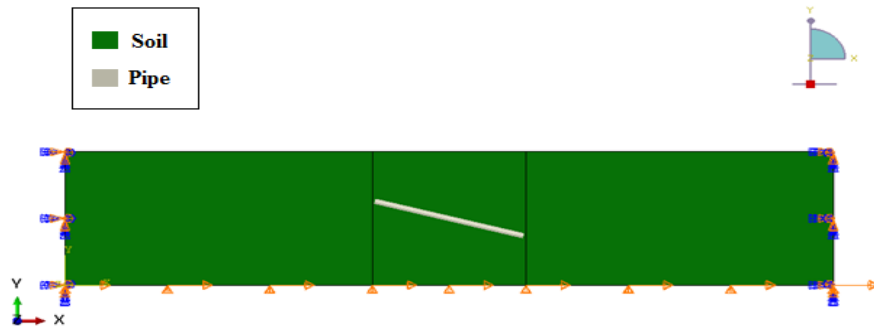
عدم حرکت در دو انتهای لوله (به‌جهت ارزیابی تنش و کرنش) بوده است. با فرض مقیدسازی دوانتها لوله، میزان تنش و تغییرشکل (کرنش) بر اثر بارگذاری لرزه‌ای در بدنه لوله استخراج می‌گردد. در شکل ۳ نمایی از مدل اجزای محدود ایجاد شده به همراه شرایط اولیه و مرزی حاکم بر مدل نمایش داده شده است.

با توجه به هدف اصلی از مدل‌سازی اجزای محدود که استخراج داده‌های اولیه جهت توسعه مدل‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط‌لوله مدفون بوده، مشخص می‌گردد که حجم مدل‌سازی عددی بسیار وسیع بوده است. براین اساس با بهره‌گیری از کدنویسی در بستر زبان برنامه‌نویسی پایتون^{۳۷} مقادیر اولیه متغیرهای مدل‌سازی تعیین و سپس اسکریپت کدنویسی شده جهت اجرا وارد نرم‌افزار آباکوس می‌گردد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس قادر به اجرای اسکریپت‌های کدنویسی شده تحت زبان برنامه‌نویسی Python بوده است. با این سازوکار حجم بالایی از مدل‌های عددی مختلف را میتوان با هزینه قابل قبول مدل‌سازی نمود (منظور از هزینه مدل‌سازی مدت زمان اجرای مدل‌های عددی بوده است).

به بیان دیگر برای ارزیابی تاثیر پارامترهای اولیه مختلف در رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک، ابتدا مقادیر متغیرهای اولیه تعیین می‌گردد، در این مرحله اسکریپتی تحت فرمت قابل اجرا برای نرم‌افزار آباکوس که بیانگر شرایط اولیه، شرایط مرزی و جزییات مدل‌سازی به همراه مقادیر اولیه متغیرهای مدل‌سازی بوده ایجاد و سپس جهت حل مدل اجزای محدود و استخراج نتایج مدنظر (تنش، کرنش بیشینه در لوله) وارد محیط آباکوس شده و مدل اجرا می‌گردد. با توجه به ارزیابی صورت گرفته بر پارامترهای موثر بر آسیب لرزه‌ای لوله مدفون، متغیرهای اولیه در هر اجرای مدل دارای مقادیر مختلفی به‌جهت حساسیت‌سنجی بر مقادیر تنش و کرنش بیشینه لوله طبقه بندی شده اند. در فلوچارت شکل ۴ فرایند مدل‌سازی عددی و اخذنتایج ارائه شده است، براساس مدل ایجاد شده در هر بار اجرای مدل مقادیر متغیرهای اولیه در ماتریس [X] به عنوان ورودی‌های مدل‌های هوش مصنوعی و مقادیر کرنش بیشینه لوله در بردار [Y] به عنوان خروجی (بردار پاسخ سیستم) جهت به‌کارگیری در مدل‌های پیش‌بینی ذخیره می‌گردد.

عملکرد مدل اجزای محدود با بهره‌گیری از نتایج مطالعات آزمایشگاهی (Tsatsis et al., 2019) مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌است. در مطالعه مذکور پاسخ‌های لوله مدفون در خاک تحت جابه‌جایی محیط خاک پیرامون لوله با انجام تست‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در این پژوهش با

لوله و خصوصیات شرایط بارگذاری لرزه‌ای استخراج و طبقه‌بندی می‌شود. در این پژوهش براساس پارامترهای موثر بر رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک، مدل‌های اجزای محدود در بستر نرم‌افزار آباکوس اجرا و نتایج حاصل از مدل‌سازی که بیانگر مقادیر بیشینه تنش و کرنش در لوله تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای مختلف بوده، استخراج شد. مدل‌های اجزای محدود که در فضای دو بعدی تعریف شد شامل دو بخش اصلی محیط خاک و لوله می‌باشد. بخش اول مدل اجزای محدود محیط خاک بوده که براساس خصوصیات متریکال خاک (چگالی^{۳۳}، خصوصیات الاستیک^{۳۴}: شامل مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν ، خصوصیات پلاستیک: برای تعریف خصوصیات پلاستیسیته از مدل پلاستیک موه‌ر کولمب^{۳۵} استفاده شده که شامل: تعریف زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، زاویه اتساع و اعمال مقاومت توده خاک بوده است) تعریف شده است. با توجه به شرایط مدل‌سازی که در فضای ۲ بعدی انجام شد، بخش محیط خاک از نوع پوسته (Shell) بوده و ابعاد آن به طول ۱۰۰ متر و ارتفاع ۱۰ متر (100 * 10 m) تعریف شد. دومین بخش از مدل اجزای محدود، لوله مدفون در محیط خاک بوده که متریکال لوله براساس وزن مخصوص، خصوصیات الاستیک (شامل مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون) و همچنین خصوصیات پلاستیسیته تعریف شد. علاوه بر تعریف متریکال لوله با توجه به موقعیت قرارگیری لوله در محیط خاک زاویه انحراف کارگذاری لوله (Alpha) به عنوان یکی از متغیرهای اصلی مورد بررسی قرار گرفت. در فضای مدل‌سازی ۲ بعدی با تعریف بخش از نوع Wire برای لوله طول، موقعیت کارگذاری و متریکال لوله و با تعریف سطح مقطع از نوع Pipe، قطر لوله و ضخامت جداره لوله در مدل اجزای محدود تعریف شد. با توجه به هندسه مدل اجزای محدود ایجاد شده تماس بین لوله و محیط خاک از نوع تماس بین سطوح لوله و خاک با خصوصیت رفتار تانژانتی (Tangential Behavior) و با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک معادل با $\tan \phi$ که ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک) می‌باشد، تعریف شد در مدل اجزای محدود شرایط اولیه مدل‌سازی شامل: اعمال نیروی ثقل بر اساس شتاب g، بارگذاری لرزه‌ای براساس تاریخچه زمانی شتاب نگاشت زمین‌لرزه بر انتهای محیط خاک، تعریف نسبت تخلخل خاک e، تعریف تنش ژئواستاتیک^{۳۶} (در مدل‌سازی وزن خاک به صورت یکنواخت به محیط اطراف نمونه وارد نشده، بلکه به صورت تنش میدان ژئواستاتیک تعریف می‌گردد) بوده است. همچنین شرایط مرزی حاکم بر مدل‌سازی شامل: قید عدم حرکت در راستای قائم برای کف نمونه (انتهای پارت خاک)، مقیدسازی هر سه درجه آزادی اطراف محیط خاک، قید



شکل ۳. نمایی از مدل عددی ایجاد شده در آباکوس



شکل ۴. فرایند مدل‌سازی عددی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون براساس متغیرهای موثر در بستر (ABAQUS-PYTHON)

بهره‌گیری از یک جعبه نمونه که حاوی خاک و لوله مدفون در خاک بوده و دارای شرایط انتقال و جابه‌جایی در نیمه کف جعبه می‌باشد، رفتار لوله نسبت به اعمال بارگذاری لرزه‌ای بر کف نمونه مدل‌سازی شده است. در این راستا پارامتر تغییرشکل لوله (کرنش لوله) تحت جابه‌جایی اعمال شده، براساس نتایج تست آزمایشگاهی و مدل‌سازی اجزای محدود مورد مقایسه و صحت‌سنجی مدل اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است.

$$\epsilon_{crit} \quad (1)$$

$$= 0.5 \frac{t}{D} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{\sigma_h}{E} \right)^2$$

در رابطه (۱) پارامتر t بیانگر ضخامت لوله، D قطر لوله، E مدول الاستیسیته لوله و σ_h تنش هوب^{۳۹} بوده که براساس رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

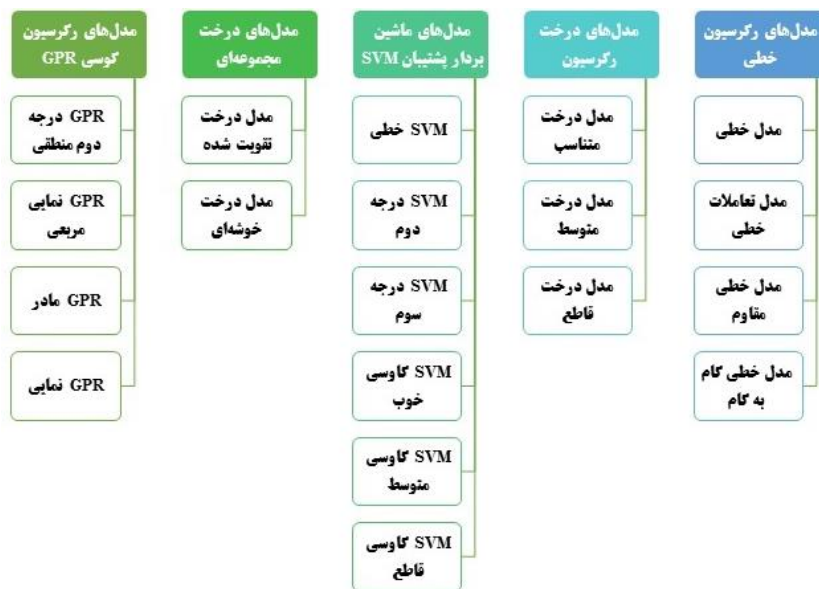
توسعه مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله مدفون (ML) هدف اصلی از توسعه مدل‌های پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، برقراری ارتباط منطقی بین پارامترهای اولیه $y = \vec{Y} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}]$ و بردار x که بیانگر کرنش ایجاد شده در لوله مدفون تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای بوده است. براین اساس مدل‌های پیش‌بینی

کمتر از ۳ درصد باشد، لوله مدفون بدون آسیب لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در شرایطی که مقادیر کرنش لوله بین ۳ تا ۵ درصد باشد، لوله آسیب‌پذیری و نوع آسیب نشت از لوله بوده است. در شرایطی که مقادیر کرنش لوله بیش از ۵ درصد باشد، لوله آسیب‌پذیر و نوع آسیب شکست لوله بوده است.

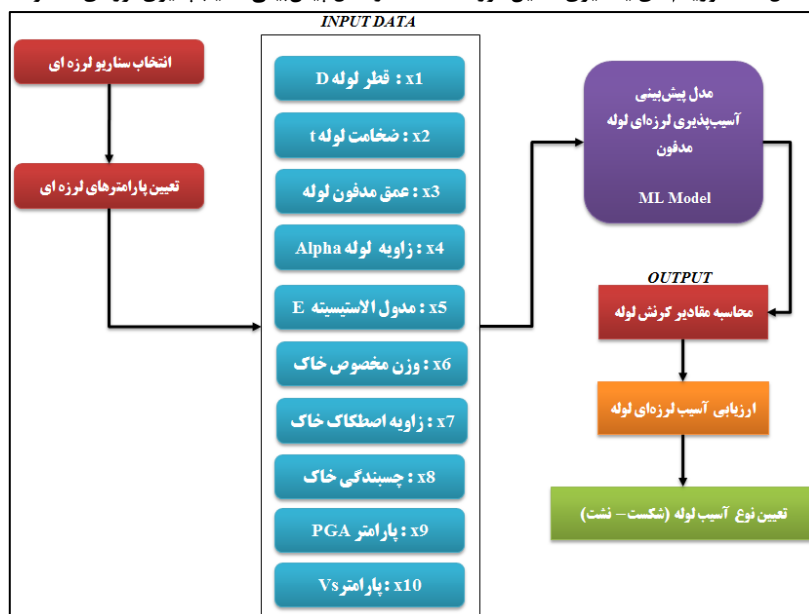
براساس توضیحات ارائه شده مدل‌های پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله مدفون اجرا میزان کرنش لوله پیش‌بینی می‌گردد، در نهایت با مقایسه مقادیر کرنش محاسبه‌شده با مقادیر مجاز کرنش لوله میزان و نوع خسارت وارد شده بر لوله مدفون تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای محاسبه و ارائه می‌گردد.

$$\sigma_h = \begin{cases} \frac{PD}{2t} & \frac{PD}{2t\sigma} \leq 0.4 \\ 0.4\sigma_y & \frac{PD}{2t\sigma} > 0.4 \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (۲) پارامتر P بیانگر فشار داخلی لوله، و σ_y معرف تنش تسلیم بوده که براساس متریکال لوله تعیین می‌گردد. براساس ضوابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های مختلف (EN1998-1 (CEN 2006), ALA-ASCE (ALA 2001), and CSA-Z662 (CSA 2007) مقادیر کرنش فشاری مجاز برای لوله معادل با ۳ تا ۵ درصد بوده است. براین اساس در مدل پژوهش مقادیر کرنش محاسبه‌شده و به تبع آن میزان آسیب لرزه‌ای تحت شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. اگر مقادیر کرنش لوله



شکل ۵. الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد استفاده در مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله



شکل ۶. الگوریتم مدل عددی (مدل یادگیری ماشین ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله)

جدول ۲. طبقه بندی مجموعه داده‌های اولیه برای مدل‌های یادگیری ماشین ML

مدل پیش‌بینی کرنش لرزه‌ای لوله		طبقه بندی داده‌های اولیه
تعداد	درصد	
576	80	داده‌های آموزش
72	10	داده‌های اعتبارسنجی
72	10	داده‌های آزمون
720	100	کل داده‌ها

گردیده و پس از پیش‌پردازش داده‌ها (هم‌پایه‌سازی و هم‌مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها) در مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای به‌کارگیری شده است. در جدول (۳) مشخصات هریک از ۵ زمین‌لرزه ارائه شده است. براساس مدل ارائه شده آنالیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر خطلوله شبکه توزیع‌وانتقال آب شهر تهران (مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران) انجام شده است. براساس داده‌های اولیه از مشخصات و خصوصیات خطلوله شبکه انتقال آب، کل شبکه انتقال به قطعات مجزا با داده‌های اولیه مشخص تفکیک شده است، که براساس الگوریتم ارائه شده هر قطعه مورد ارزیابی قرار گرفته و با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت (شبیه‌سازی مونت کارلو) احتمال آسیب‌پذیری هر قطعه پیش‌بینی شده است. در نهایت براساس میزان کرنش لوله، نوع آسیب (شکست یا نشت) در قطعات آسیب دیده ارائه شده است.

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی

عمدتاً برای ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری از دو مدل (Bruneau et al., 2003) و (Chang, 2014) استفاده می‌گردد. براساس منحنی عملکرد سیستم زیرساخت به زمان در مدل Chang مشخص می‌گردد که شاخص‌های اصلی ارزیابی کمی تاب‌آوری لرزه‌ای در این مدل به سه بخش اصلی: شاخص زمان بازیابی، شاخص استواری^{۴۳} و شاخص عملکرد سیستم تقسیم می‌گردد. همچنین در مدل (Bruneau M., 2003) چهار شاخص: شاخص استواری، شاخص افزونگی^{۴۴}، شاخص تدبیر^{۴۵} و شاخص سرعت^{۴۶} برای ارزیابی تاب‌آوری معرفی شده است. براین اساس به‌جهت بررسی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع‌وانتقال آب اولین گام ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری بوده است. براین اساس با توجه به مدل‌های پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای توسعه داده شده در این پژوهش (مدل پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای ML) ابتدا میزان خسارت شبکه انتقال آب (موقعیت و تعداد شکست/نشت شبکه انتقال آب) تحت سناریوهای مختلف لرزه‌ای و برای مناطق ۱ تا ۴ تهران محاسبه و نتایج استخراج شده است. همچنین به‌جهت ارزیابی میزان آسیب شبکه و روند تغییرات و بازگشت سیستم به شرایط قبل از وقوع حادثه،

روش یادگیری ماشین براساس مجموعه داده‌های اولیه فرایند استخراج ویژگی‌ها و برقراری ارتباط منطقی بین ماتریس متغیرها X و بردار نتایج Y را پیاده‌سازی می‌نماید. در این پژوهش از ۵ الگوریتم اصلی یادگیری ماشین که هرکدام دارای شاخه‌های محاسباتی مختلفی می‌باشد به شرح ذیل استفاده شده است. در فلوجارت شکل (۵) پنج دسته الگوریتم یادگیری ماشین به همراه روش‌های وابسته به هر الگوریتم به صورت طبقه‌بندی شده ارائه شده است. همچنین در شکل (۶) ساختار مدل‌های پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله مدفون در خاک برپایه روش ML ارائه شده است. به‌جهت توسعه مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه داده‌های اولیه به سه بخش اصلی: داده‌های آموزش^{۴۰}؛ از این داده‌های مشاهداتی (مجموعه داده اولیه) برای آموزش مدل ML استفاده می‌شود. براساس تعداد داده‌های اولیه، ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش مدل یادگیری ماشین به کارگیری شده است، داده‌های اعتبارسنجی^{۴۱}؛ از این داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل یادگیری ماشین توسعه داده شده برای برقراری ارتباط منطقی بین متغیرهای ورودی و بردار خروجی استفاده می‌شود. براساس تعداد داده‌های اولیه، ۱۰ درصد از داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل به کارگیری شده است و داده‌های آزمون^{۴۲}؛ داده‌های آزمون هیچ تأثیری بر آموزش مدل ML نداشته و به عنوان معیاری مستقل برای عملکرد مدل بعد از آموزش مدل ML استفاده می‌شود. در مدل‌های ML توسعه داده شده ۱۰ درصد از داده‌ها به عنوان داده‌های آزمون به‌کارگیری شد. به‌جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، نتایج حاصل از مدل براساس آزمون‌های آماری (MSE, RMSE, R, MAE) نسبت به مقادیر مشاهداتی (داده‌های آزمون) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۲) تفکیک و طبقه‌بندی داده‌های اولیه مدل‌های یادگیری ماشین ارائه شده است.

در این پژوهش به هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطلوله مدفون، ۵ سناریوی بارگذاری لرزه‌ای (۵ زمین‌لرزه بزرگ طبق جدول ۳) اجرا و نتایج که بیانگر میزان آسیب در شبکه انتقال آب بوده استخراج شده است. داده‌های شتاب نگاشت زمین‌لرزه‌های مذکور از سایت PEER که مرجع اصلی تامین داده‌های لرزه‌ای بوده اخذ

جدول ۳. مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد استفاده جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدل‌های عددی

Code	Record NO. in PEER Databas	Event	Year	Magnitude (MW)	PGA(g)	Vs(m/s)
S1	13	Kern County	1952	7.4	0.06	415
S2	30	Parkfield	1966	6.2	0.44	299
S3	40	Borrego Mountain	1968	6.6	0.05	443
S4	141	Tabas, Iran	1978	7.3	0.04	280
S5	171	Imperial Valley (El Centro)	1979	6.5	0.38	265

پایداری و تاب‌آوری لرزه‌ای در شرایط قطع و اختلال شبکه آب‌رسانی ارائه شده است.

به‌جهت محاسبه میزان آب مورد نیاز از زمان رخداد حادثه تا زمان بازیابی سیستم آب‌رسانی (زمان بازگشت عملکرد سیستم به شرایط قبل از رخداد حادثه) نیاز است تا براساس تعداد جمعیت منطقه حادثه دیده مقادیر حداقل آب مورد نیاز محاسبه گردد. با توجه به منطقه مطالعاتی این پژوهش که ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب در مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران بوده است، در جدول (۵) جمعیت مناطق ۱ تا ۴ براساس گزارش آمار و سرشماری سال ۱۳۹۹ و همچنین مساحت هر محدوده ارائه شده است.

در گام سوم از ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی شهری، پارامتر سرعت بازیابی سیستم یا به بیان بهتر مدت زمان مورد نیاز برای بازیابی عملکرد سیستم به شرایط قبل از وقوع بحران ارزیابی شده است. در این راستا با تعریف سناریوهای مختلف شرایط بازیابی سیستم براساس میزان خسارت (تعداد شکست/نشت) مورد بررسی قرار گرفته و منحنی سرعت بازیابی-عملکرد سیستم استخراج و ارائه شد.

شاخص Bridge توسط (Tanyimboh et al., 2011) ارائه شده است. این شاخص بیان‌کننده توانایی شبکه در حفظ عملکرد شبکه می‌باشد و براساس رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

$$B_r = \frac{m_d}{m} \quad (3)$$

در رابطه (۳) پارامتر m_d تعداد شکست‌های لوله تحت بارگذاری لرزه‌ای و پارامتر m تعداد کل قطعات لوله بوده است. در گام دوم شاخص یا بعد افزونگی سیستم آب‌رسانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این معیار نشان‌دهنده توانایی استفاده از منابع جایگزین تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه بوده است. به‌جهت ارزیابی شاخص افزونگی ابتدا میزان آب موردنیاز برای هر بخش براساس استانداردهای ارائه شده محاسبه می‌گردد، همچنین مدت زمان لازم برای امکان بهره‌برداری از هر منبع مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس استانداردهای ارائه شده میزان آب مورد نیاز برحسب لیتر به نفر در روز برای دوره‌های زمانی مختلف (در شرایط اختلال در عملکرد شبکه انتقال آب) تا بازگشت سیستم به شرایط قبل از وقوع حادثه محاسبه می‌گردد. در جدول (۴) میزان حداقل آب مورد نیاز برای

جدول ۴. حداقل آب موردنیاز برای پایداری و تاب‌آوری شبکه آب‌رسانی شهری

فاصله تا منبع تامین آب	مصرف	حداقل آب مورد نیاز (لیتر به نفر در روز LPCD)	زمان سپری شده بعد از وقوع زلزله
۱ تا ۲ کیلومتر	آب شرب برای ادامه حیات	۲ تا ۳ لیتر	۳ روز
۲۵۰ متر	آب شرب/ شستشو/ حداقل نیاز روزانه	۲۰	۴ تا ۱۴ روز
۱۰۰ متر	آب شرب/ شستشو/ استحمام/ مصارف غذایی	۱۰۰	۲ تا ۳ هفته
۱۰ متر	آب مورد نیاز شرایط نرمال زندگی	۲۰۰ تا ۲۵۰ لیتر	۴ هفته (یک ماه)

جدول ۵. مشخصات آمار و سرشماری به تفکیک جمعیت و مساحت مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران

منطقه	کل جمعیت	مرد	زن	خانوار	مساحت منطقه (هکتار)
منطقه ۱	543,311	266,002	277,309	195,420	4,661.20
منطقه ۲	743,408	362,952	380,456	265,231	4,700.50
منطقه ۳	352,155	168,663	183,492	130,101	2,921.70
منطقه ۴	962,073	478,691	483,382	332,789	6,155.50

نتایج و بحث

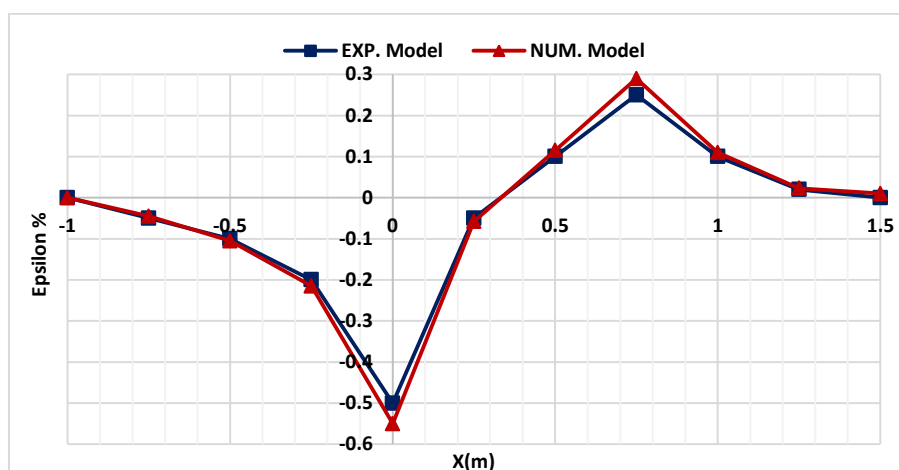
صحت‌سنجی مدل اجزای محدود رفتار لرزه‌ای لوله مدفون

عملکرد مدل اجزای محدود با بهره‌گیری از نتایج مطالعات آزمایشگاهی (Tsatsisa et al., 2019) مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌است. در این راستا مقادیر تغییر شکل لوله مدفون (کرنش) براساس نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود در بستر نرم‌افزار آباکوس مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته‌است. در شکل (۷) میزان کرنش لوله براساس تراز طولی (x) نمایش داده شده است. در این نمودار از مبدا محور افقی (x=0) تا (x=-1) موقعیت جابه‌جایی کف نمونه حاوی خاک و لوله مدفون و موقعیت‌های $X > 0$ کف ثابت نمونه بوده است. در این شکل گراف آبی رنگ نتایج تست آزمایشگاهی و گراف قرمز نمایانگر نتایج مدل اجزای محدود بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که مقادیر تغییر شکل لوله در مدل اجزای محدود تطابق قابل‌قبولی با نتایج تست آزمایشگاهی داشته‌است، به‌گونه‌ای که میانگین خطای مدل اجزای محدود کمتر از ۱۰٪ بوده است. با توجه به نتایج

حاصل مشخص می‌گردد که مدل اجزای محدود ایجاد شده در بستر نرم‌افزار آباکوس دارای دقت قابل‌قبول در شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک تحت بارگذاری لرزه‌ای بوده است.

ارزیابی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در مدل اجزای محدود

پس از ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی مدل اجزای محدود، فرایند شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک براساس (فلوچارت شکل ۴) و مقادیر مختلف متغیرهای اولیه اجرا شدند و در نهایت مقادیر تغییر شکل بیشینه (کرنش) لوله مدفون در خاک استخراج شد. در راستای تأمین پایگاه داده جامع جهت توسعه مدل‌های پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، ۷۲۰ سناریو مختلف برای مدل‌سازی اجزای محدود تعریف و اجرا شده است. پس از اجرای مدل‌های اجزای محدود نتایج حاصل که بیانگر تغییر شکل لوله (کرنش) تحت شرایط مختلف مدل‌سازی (مقادیر مختلف متغیرهای اولیه) بوده، استخراج و به شرح ارائه شده در جدول (۶) دسته‌بندی شده است.



شکل ۷. مقایسه نتایج حاصل از مدل اجزای محدود پژوهش با مدل آزمایشگاهی (Tsatsisa et al., 2019)

جدول ۶. مشخصه‌های آماری مجموعه داده‌های اولیه برای آموزش مدل‌های پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای لوله مدفون

متغیر/پاسخ	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	انحراف معیار
x1: قطر لوله [m]	1	0.2	0.7125	0.3112
x2: ضخامت لوله [m]	0.04	0.01	0.0205	0.0047
x3: عمق مدفون لوله [m]	4	0.5	2.5796	1.1187
x4: زاویه قرارگیری لوله [Rad]	$\pi/3$	0	$1.47 (\pi/6)$	0.2485
x5: مدول الاستیسیته لوله [Mpa]	3.86	3.56	3.5736	0.0625
x6: وزن مخصوص خاک [Kg/m ³]	2600	1750	1788.6364	177.0541
x7: زاویه اصطکاک داخلی خاک	45	30	37.62	6.8729
x8: چسبندگی خاک [Mpa]	10	1	6.1278	3.6574
x9: پارامتر PGA بارگذاری لرزه‌ای	0.5	0.01	0.2794	0.0158
x10: سرعت موج برشی زمین‌لرزه [cm/s]	500	200	354.87	84.6792
[γ]: کرنش لوله مدفون [%]	12	1	7.9821	2.4792
تعداد کل داده‌ها Dataset No.	720			

در پارامترهای اولیه جهت توسعه مدل و همچنین عدم در نظر گرفتن پارامترهای لرزه‌ای همچون (PGA, Vs) بوده است، که منجر به پیش‌بینی مقادیر آسیب بزرگتری برای لوله مدفون شده است. علاوه بر این مدل ارائه شده در این پژوهش نسبت به مدل (Haghighi et al., 2024) دارای کارایی بیشتر (به سبب در نظر گرفتن قالب پارامترهای موثر بر رفتار لرزه‌ای لوله) و همچنین دقت بیشتر (۵ درصد بهبود دقت پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای لوله مدفون در خاک) بوده است.

ارزیابی آسیب لرزه‌ای خط لوله توزیع و انتقال آب شهری

در این بخش نتایج حاصل از مدل ML پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای در خط لوله مدفون مورد ارزیابی قرار گرفته است. براساس داده‌های اولیه خط لوله شبکه انتقال آب، کل شبکه انتقال براساس مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران به قطعات مجزا با داده‌های اولیه مشخص تفکیک شده است که براساس الگوریتم ارائه شده هر قطعه مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت براساس میزان کرنش لوله، نوع آسیب (شکست یا نشست) در قطعات آسیب دیده استخراج شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل برای سناریوهای لرزه‌ای مختلف و براساس مدل‌های پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای به تفکیک مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران در جدول (۸) ارائه شده است. نتایج مندرج در جداول بیانگر آسیب لرزه‌ای لوله مدفون (تعداد شکست و نشست لوله) تحت هر یک از ۵ سناریو بارگذاری لرزه‌ای (S1 تا S5) و به تفکیک شبکه

ارزیابی عملکرد مدل ML پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون

به جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی و پیش‌بینی کرنش لوله مدفون تحت بارگذاری لرزه‌ای و بر اساس الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین ارائه شده است. در جدول (۷) نمونه‌های آماری (MSE, RMSE, R, MAE) براساس مدل‌های توسعه‌یافته با بهره‌گیری از الگوریتم‌های مختلف ML ارائه شده است. نتایج حاصل از عملکرد مدل یادگیری ماشین (جدول ۷) بیانگر میزان خطای پیش‌بینی کرنش لوله مدفون تحت بارگذاری لرزه‌ای نسبت به مقادیر دقیق کرنش براساس مجموعه داده اولیه بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که مدل‌های رگرسیون گوسی^{۴۷} GPR دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر محاسباتی یادگیری ماشین بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که از بین الگوریتم‌های روش GPR الگوریتم درجه دوم منطقی^{۴۸} دارای میزان خطای کمینه بوده، به گونه‌ای که مدل یادگیری ماشین توسعه داده شده براساس این الگوریتم دارای خطای MSE معادل با 3.0564 و میزان ضریب همبستگی R معادل با 0.94 بوده است.

در راستای ارزیابی عملکرد مدل توسعه داده شده در این پژوهش مقایسه‌ای بین نتایج حاصل با نتایج مطالعات (Haghighi et al., 2024) صورت گرفته است. در مطالعه مذکور مدلی براساس یادگیری ماشین برای پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای لوله مدفون ارائه گردید، ضعف اصلی این مدل محدودیت

جدول ۷. نتایج حاصل از ارزیابی مدل ML پیش‌بینی تنش در لوله بر اساس الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین

MAE	MSE	R	RMSE	الگوریتم‌های یادگیری ماشین
1.8881	5.8031	0.89	2.409	مدل خطی
1.6619	4.893	0.91	2.212	مدل تعاملات خطی
1.8902	6.049	0.88	2.4595	مدل خطی مقاوم
1.7421	5.289	0.90	2.2998	مدل خطی گام به گام
2.4543	10.685	0.79	3.2686	مدل درخت متناسب
2.4872	10.808	0.79	3.2875	مدل درخت متوسط
3.1338	16.335	0.69	4.0417	مدل درخت قاطع
1.8797	5.9403	0.89	2.4373	SVM خطی
1.5894	4.357	0.92	2.0874	SVM درجه دوم
1.5748	4.9988	0.9	2.2358	SVM درجه سوم
3.6126	27.693	0.47	5.2624	SVM گاوسی خوب
1.5173	5.1528	0.9	2.27	SVM گاوسی متوسط
1.7523	5.0707	0.9	2.2518	SVM گاوسی قاطع
21354	46.09	0.79	21.496	مدل درخت تقویت شده
2.03	7.0547	0.86	2.6561	مدل درخت خوشه‌ای
1.3661	3.6223	0.93	1.9032	GPR درجه دوم منطقی
1.227	3.0564	0.94	1.7483	GPR نمایشی مربعی
1.3117	3.2965	0.9358	1.8156	GPR مادر
1.3041	3.2164	0.94	1.7934	GPR نمایشی

جدول ۸. نتایج حاصل از آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه انتقال آب در مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران

تعداد کل قطعات لوله: ۴۸۷۵			شبکه انتقال و توزیع آب منطقه ۱ شهر تهران
تعداد نشت	تعداد شکست	بارگذاری لرزه‌ای	
188	51	S1(Mw=7.4)	
162	36	S2(Mw=6.2)	
181	41	S3(Mw=6.6)	
179	45	S4(Mw=7.3)	
164	41	S5(Mw=6.5)	
تعداد کل قطعات لوله: ۵۲۱۴			شبکه انتقال و توزیع آب منطقه ۲ شهر تهران
تعداد نشت	تعداد شکست	بارگذاری لرزه‌ای	
194	55	S1(Mw=7.4)	
163	42	S2(Mw=6.2)	
181	49	S3(Mw=6.6)	
190	51	S4(Mw=7.3)	
163	45	S5(Mw=6.5)	
تعداد کل قطعات لوله: ۴۱۷۸			شبکه انتقال و توزیع آب منطقه ۳ شهر تهران
تعداد نشت	تعداد شکست	بارگذاری لرزه‌ای	
176	42	S1(Mw=7.4)	
153	29	S2(Mw=6.2)	
164	36	S3(Mw=6.6)	
171	39	S4(Mw=7.3)	
158	33	S5(Mw=6.5)	
تعداد کل قطعات لوله: ۶۸۷۴			شبکه انتقال و توزیع آب منطقه ۴ شهر تهران
تعداد نشت	تعداد شکست	بارگذاری لرزه‌ای	
211	59	S1(Mw=7.4)	
174	42	S2(Mw=6.2)	
188	51	S3(Mw=6.6)	
201	57	S4(Mw=7.3)	
189	44	S5(Mw=6.5)	

انتقال آب براساس هریک از سناریوهای بارگذاری لرزه‌ای و به تفکیک مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران (جدول ۸) ارائه شده است. در این بخش شاخص Bridge براساس رابطه (۳) برای هریک از مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران و براساس ۵ بارگذاری لرزه‌ای محاسبه و در جدول (۹) ارائه شده است.

با توجه به حداقل آب مورد نیاز برای پایداری و تاب‌آوری لرزه‌ای مناطق شهری تحت شرایط اختلال در شبکه آب‌رسانی (جدول ۴) میزان آب مورد نیاز برای بازه‌های زمانی مختلف از زمان وقوع زمین‌لرزه محاسبه و نتایج در جدول (۱۰) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در شرایط وقوع زمین‌لرزه براساس مطالعات موردی مختلف مشخص می‌گردد که میزان تقاضا به آب از منابع ضروری ۴۰٪ کاهش خواهد یافت، براین اساس محاسبات میزان آب مورد نیاز در مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران در شرایط وقوع رخداد زمین‌لرزه و اختلال در شبکه آب‌رسانی شهری به شرح جدول (۱۰) محاسبه شده است.

توزیع و انتقال آب مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که مقادیر بیشینه تعداد نشت و شکست تحت بارگذاری S1 و مقادیر کمینه تعداد نشت/شکست تحت بارگذاری S2 پیش‌بینی شده است، که با توجه به ماهیت سناریو لرزه‌ای و بزرگای زمین‌لرزه که برای سناریو S1 معادل با ۷.۴ و برای سناریو بارگذاری S2 معادل با ۶.۲ بوده توجیح پذیر می‌باشد. لازم به ذکر است که این روند تغییر تعداد نشت/شکست براساس خصوصیات و مشخصات بارگذاری لرزه‌ای بر سه سناریو بارگذاری دیگر (S3, S4, S5) هم حاکم بوده است.

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب

براساس توضیحات ارائه شده مشخص گردید که اولین گام در ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع و انتقال آب بررسی میزان آسیب لرزه‌ای شبکه بوده است. براین اساس با بهره‌گیری از مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای میزان آسیب وارده بر شبکه

جدول ۹. ارزیابی تعداد شکست و شاخص Br شبکه توزیع و انتقال آب شهر تهران

شاخص Br	تعداد شکست	بارگذاری لرزه‌ای	شبکه توزیع آب شهر تهران
0.010462	51	S1(Mw=7.4)	منطقه ۱ شهر تهران تعداد کل قطعات لوله: ۴۸۷۵
0.007385	36	S2(Mw=6.2)	
0.00841	41	S3(Mw=6.6)	
0.009231	45	S4(Mw=7.3)	
0.00841	41	S5(Mw=6.5)	
0.010549	55	S1(Mw=7.4)	منطقه ۲ شهر تهران تعداد کل قطعات لوله: ۵۲۱۴
0.008055	42	S2(Mw=6.2)	
0.009398	49	S3(Mw=6.6)	
0.009781	51	S4(Mw=7.3)	
0.008631	45	S5(Mw=6.5)	
0.010053	42	S1(Mw=7.4)	منطقه ۳ شهر تهران تعداد کل قطعات لوله: ۴۱۷۸
0.006941	29	S2(Mw=6.2)	
0.008617	36	S3(Mw=6.6)	
0.009335	39	S4(Mw=7.3)	
0.007899	33	S5(Mw=6.5)	
0.008583	59	S1(Mw=7.4)	منطقه ۴ شهر تهران تعداد کل قطعات لوله: ۶۸۷۴
0.00611	42	S2(Mw=6.2)	
0.007419	51	S3(Mw=6.6)	
0.008292	57	S4(Mw=7.3)	
0.006401	44	S5(Mw=6.5)	

جدول ۱۰. محاسبه میزان آب مورد نیاز در شرایط وقوع زمین‌لرزه و اختلال در شبکه آبرسانی به تفکیک مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران

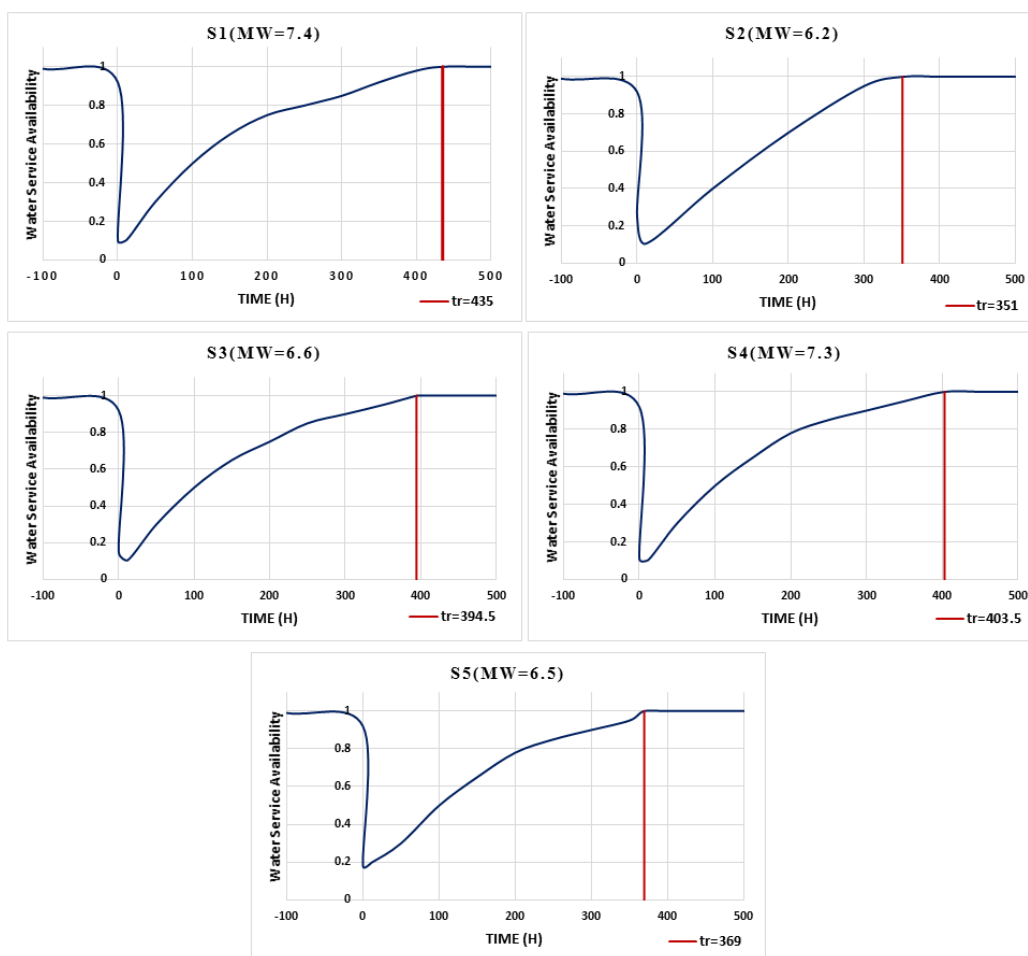
آب مورد نیاز (m ³) در بازه‌های زمانی مختلف پس از وقوع زمین‌لرزه				کل جمعیت	منطقه
۴ هفته (یک ماه)	۲ تا ۳ هفته	۴ تا ۱۴ روز	۳ روز		
814.9665	6519.732	32598.66	65197.32	543,311	منطقه ۱
1115.112	8920.896	44604.48	89208.96	743,408	منطقه ۲
528.2325	4225.86	21129.3	42258.6	352,155	منطقه ۳
1443.11	11544.88	57724.38	115448.8	962,073	منطقه ۴
3901.421	31211.36	156056.8	312113.6		مجموع

جدول ۱۱. نتایج حاصل از ارزیابی زمان بازیابی شبکه آبرسانی تحت سناریوهای لرزه‌ای مختلف

شبکه آبرسانی	بارگذاری لرزه‌ای	تعداد شکست	تعداد نشت	زمان لازم برای تعویض لوله شکسته شده (ساعت)	زمان لازم برای ترمیم لوله دارای نشت (ساعت)	کل زمان بازیابی شبکه آبرسانی (ساعت)
منطقه ۱	S1(Mw=7.4)	51	188	612	1128	435
	S2(Mw=6.2)	36	162	432	972	351
	S3(Mw=6.6)	41	181	492	1086	394.5
	S4(Mw=7.3)	45	179	540	1074	403.5
	S5(Mw=6.5)	41	164	492	984	369
منطقه ۲	S1(Mw=7.4)	55	194	660	1164	456
	S2(Mw=6.2)	42	163	504	978	370.5
	S3(Mw=6.6)	49	181	588	1086	418.5
	S4(Mw=7.3)	51	190	612	1140	438
	S5(Mw=6.5)	45	163	540	978	379.5
منطقه ۳	S1(Mw=7.4)	42	176	504	1056	390
	S2(Mw=6.2)	29	153	348	918	316.5
	S3(Mw=6.6)	36	164	432	984	354
	S4(Mw=7.3)	39	171	468	1026	373.5
	S5(Mw=6.5)	33	158	396	948	336
منطقه ۴	S1(Mw=7.4)	59	211	708	1266	493.5
	S2(Mw=6.2)	42	174	504	1044	387
	S3(Mw=6.6)	51	188	612	1128	435
	S4(Mw=7.3)	57	201	684	1206	472.5
	S5(Mw=6.5)	44	189	528	1134	415.5

محاسبه زمان بازیابی شبکه آبرسانی مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران فرض براین است که هر منطقه دارای ۴ واحد اضطراری مجهز و با تجربه جهت احیا و ترمیم شبکه آبرسانی بوده است. براساس توضیحات ارائه شده و با در نظر گرفتن شرایط ترمیم و احیای شبکه آبرسانی مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران سرعت بازیابی شبکه برای هر یک از مناطق و تحت هر یک از سناریوهای بارگذاری لرزه‌ای محاسبه و نتایج حاصل در جدول (۱۱) ارائه شده است. علاوه بر این برای هر یک از سناریوهای بارگذاری لرزه‌ای نمودار عملکرد سیستم بر حسب زمان برای منطقه ۱ شهر تهران در شکل (۸) به عنوان نمونه ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که بیشترین زمان بازیابی شبکه آبرسانی در هر ۴ منطقه تحت بارگذاری لرزه‌ای S1 با بزرگای ۷٫۴ ریشتر و کمترین زمان بازیابی تحت بارگذاری S2 با بزرگای ۶٫۲ ریشتر بوده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل (جدول ۱۱) بیشترین زمان بازیابی سیستم برای منطقه ۴ شهر تهران تحت بارگذاری S1 و معادل با ۴۹۳٫۵ ساعت و کمترین زمان بازیابی سیستم برای منطقه ۳ شهر تهران تحت بارگذاری S2 و معادل با ۳۱۶٫۵ ساعت بوده است.

سرعت بازیابی شبکه توزیع و انتقال آب بعد از وقوع زمین‌لرزه به عنوان اصلی‌ترین شاخص ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای برای زیرساخت شهری مطرح بوده است. عمدتاً به جهت بررسی سرعت و زمان بازیابی سیستم با تعریف سناریوهای بازسازی قطعات آسیب‌دیده شبکه آبرسانی، زمان بازیابی سیستم به شرایط قبل از وقوع حادثه محاسبه می‌گردد. در راستای تدوین سناریو، با توجه به گزارش‌های فنی در شرایط عملیاتی پس از وقوع زمین‌لرزه فرض براین است که گروه عملیاتی برای ترمیم، تعویض و احیای قطعات لوله آسیب‌دیده به ۱۲ ساعت زمان نیاز داشته، که در ۶ ساعت اول با بستن شیر نزدیکترین انشعاب، قطعه لوله معیوب را ایزوله کرده و در ۶ ساعت دوم آن را تعمیر و شیر را مجدد باز می‌کنند. همچنین فرض براین است که ترمیم لوله‌های آسیب‌دیده از نوع نشت زمان کمتری نسبت به لوله‌های شکسته شده داشته و مدت زمان لازم جهت ترمیم لوله‌های دارای آسیب نشت ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که اولویت‌بندی ترمیم و تعویض لوله‌ها براساس نوع آسیب/نشت و همچنین حجم آب خروجی از محل آسیب در لوله بوده است. علاوه بر این در راستای



شکل ۸. نمودار بازیابی شبکه آبرسانی بر حسب زمان برای منطقه ۱ شهر تهران تحت شرایط ۵ سناریو لرزه‌ای (S1 تا S5)

مختلف یادگیری‌ماشین (۵) الگوریتم اصلی یادگیری‌ماشین به همراه زیرشاخه‌های محاسباتی) مورد سنجش قرار گرفته‌است. نتایج نشان داد که مدل توسعه‌داده شده دارای خطای MSE معادل با 3.0564 و میزان همبستگی R معادل با 0.94 بوده است. در نهایت با استخراج شرایط بهینه عملکرد مدل پیش‌بینی توسعه داده‌شده، الگوریتم عددی برای ارزیابی میزان آسیب لرزه‌ای در خطلوله شبکه توزیع و انتقال آب با بهره‌گیری از شرایط عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای ورودی مدل و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسعه داده شده است. مدل ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطلوله توسعه داده شده در این پژوهش تحت ۵ سناریو لرزه‌ای (۵ زمین‌لرزه بزرگ) و براساس داده‌های اولیه مناطق ۱ تا ۴ شهر تهران اجرا و نتایج استخراج شده است. در نهایت براساس ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه انتقال آب شهر تهران تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم آب‌رسانی براساس شاخص‌های میزان آسیب، تامین حداقل آب مورد نیاز و زمان بازیابی شبکه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. براساس نتایج حاصل و ارزیابی عملکرد مدل توسعه داده شده در این پژوهش، مشخص می‌گردد که مدل پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای شبکه انتقال آب دارای دقت قابل‌قبول در ارزیابی خسارت در شرایط وقوع حادثه بوده است. همچنین سازوکار ارائه شده براساس شاخص‌های به‌کارگیری شده در راستای ارزیابی تاب‌آوری سامانه آب‌رسانی بیانگر نکات جامع جهت ارتقا و بهبود عملکرد این زیرساخت تحت شرایط بحرانی وقوع زمین‌لرزه بوده است. از اصلیت‌ترین نکات و راه‌کارهای ارائه شده در این پژوهش در راستای ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی می‌توان به مواردی همچون: پیش‌بینی دقیق میزان آسیب لرزه‌ای شبکه انتقال آب با بهره‌گیری از مدل ارائه شده (در راستای دقت و بهبود شاخص آسیب‌پذیری)، اتخاذ تصمیمات مدیریتی دقیق در راستای تامین منابع جایگزین آب مورد نیاز در مناطق با ریسک لرزه‌ای بالا (در راستای بهبود شاخص افزونگی) و اتخاذ استراتژی‌های ترمیم و تعمیر خطلوله آسیب‌داده با تجهیز مناطق به تیم‌های پشتیبانی ماهر (در راستای بهبود شاخص زمان بازیابی) اشاره کرد. براساس نتایج حاصل می‌توان مدل ارزیابی آسیب و آنالیز تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی ارائه شده در این پژوهش را به عنوان یک مدل جامع برای مناطق مختلف و تحت شرایط مختلف بارگذاری لرزه‌ای به کارگرفت و علاوه بر تخمین آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی، ارزیابی دقیقی بر تاب‌آوری لرزه‌ای و ارتقای انعطاف‌پذیری لرزه‌ای این زیرساخت حیاتی انجام داد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان تهران به‌جهت تامین داده‌های پژوهش قدردانی می‌نمایند.

در شکل (۸) نمودار زمان بازیابی شبکه آب‌رسانی منطقه ۱ شهر تهران براساس ۵ سناریو بارگذاری لرزه‌ای (S1 تا S5) ارائه شده است. در این نمودارها گراف آبی رنگ بیانگر تغییرات دسترسی به شبکه آب‌رسانی و پارامتر tr زمان بازیابی و بازگشت سیستم برحسب ساعت به شرایط خدمت‌رسانی قبل از وقوع حادثه (زمین‌لرزه) می‌باشد. با توجه به نمودارها مشخص می‌گردد که شرایط دسترسی به شبکه آب‌رسانی تا زمان وقوع حادثه ($t=0$) نرمال و شبکه آب‌رسانی دارای عملکرد 100 درصد و بدون اختلال بوده است، پس از وقوع زمین‌لرزه ($t>0$) سیستم با اختلال مواجه شده و میزان دسترسی به شبکه آب‌رسانی کاهش چشم‌گیری یافته‌است. در ادامه با شروع اقدامات تعمیر و تعویض خطلوله آسیب‌دیده، میزان دسترسی و بهره‌برداری از شبکه آب‌رسانی افزایش یافته تا پس از سپری شدن زمان بازیابی ($t=tr$) شبکه به شرایط نرمال بازگشته‌است. در این نمودارها زمان دستیابی (tr) دارای اهمیت به سزایی در ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع و انتقال آب در منطقه ۱ شهر تهران بوده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که شبکه آب‌رسانی تحت سناریوهایی با بزرگای زمین‌لرزه بیشتر دارای زمان بازیابی بیشتری نسبت به سناریوهای لرزه‌ای با مقیاس کوچکتر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل زمان بازیابی براساس سناریوهای مختلف لرزه‌ای به شرح ذیل طبقه بندی شده است: $tr_{(S1)} > tr_{(S4)} > tr_{(S3)} > tr_{(S5)} > tr_{(S2)}$ در راستای ارزیابی نتایج حاصل از این پژوهش مقایسه‌ای با مطالعات (Alavi et al., 2020) انجام شده است. در مطالعه مذکور تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی شهر تهران در منطقه ۲ براساس شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری مورد بررسی قرار گرفته‌است. با مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش (ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه آب‌رسانی در منطقه ۲ تهران) با مطالعه (Alavi et al., 2020) مشخص می‌گردد که مدل ML پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه آب (ارائه شده در این پژوهش)، عملکرد قابل‌قبولی نسبت به نتایج مدل سنتی به‌کارگیری شده در مطالعه مذکور داشته است، همچنین با بررسی شاخص زمان بازیابی بین دو تحقیق، مشخص می‌گردد که براساس مدل و استراتژی ترمیم ارائه شده در این پژوهش شاخص افزونگی بیش از 10% ارتقا یافته‌است. به بیان دیگر زمان بازیابی سیستم بیش از 10% کاهش یافته‌است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به هدف ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب، تحقیق جامعی براساس روش مطالعات عددی و در قالب مطالعه موردی بر سیستم توزیع و انتقال آب شهر تهران (مناطق ۱ تا ۴) انجام شده است. در این راستا یک مدل یادگیری‌ماشین ML برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه توزیع و انتقال آب توسعه داده شد. مدل ML براساس الگوریتم‌های

Reference:

- Adachi, T., & Ellingwood, B. R. (2008). Serviceability of earthquake-damaged water systems: Effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability. *Reliability engineering & system safety*, 93(1), 78-88.
- ALA (American Lifelines Alliance). (2001). Guidelines for the design of buried steel pipe. Reston, VA: ASCE.
- Alavi, S., Masoud, M., & Karimi, A. (2020). Urban Resilience: Restoration Analysis of Urban Water Infrastructures in A Potential Earthquake (Case study: Region 2 of Tehran Municipality). *Human Geography Research*, 52(2), 533-550.
- Assad, A., Moselhi, O., & Zayed, T. (2020). Resilience-driven multiobjective restoration planning for water distribution networks. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(4), 04020072.
- Bata, M. T. H., Carriveau, R., & Ting, D. S. K. (2022). Urban water supply systems' resilience under earthquake scenario. *Scientific Reports*, 12(1), 20555.
- Bonneau, A. L., & O'Rourke, T. D. (2009). Water supply performance during earthquakes and extreme events (Vol. 234). Mceer.
- Bruneau, M., Eeri, M., & Chang, S. E. (2003). Ronald T, George C Lee, Thomas DO Rourke, Andrei M Reinhorn, Masanobu Shinozuka, William A Wallace, and Detlof Von Winterfeldt. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Engineering*, 19(4), 733-752.
- CEN (EuropeanCommitteeforStandardization). (2006) .Eurocode8, part4: Silos, tanks and pipelines. CEN EN1998-4. Brussels, Belgium: CEN.
- Chang, S. E., McDaniels, T., Fox, J., Dhariwal, R., & Longstaff, H. (2014). Toward disaster-resilient cities: Characterizing resilience of infrastructure systems with expert judgments. *Risk analysis*, 34(3), 416-434.
- Cheng, X., Ma, C., Huang, R., Huang, S., & Yang, W. (2019). Failure mode analysis of X80 buried steel pipeline under oblique-reverse fault. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105723.
- Cimellaro, G. P., Tinebra, A., Renschler, C., & Fragiadakis, M. (2016). New resilience index for urban water distribution networks. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), C4015014.
- CSA (Standard Association Canadian). (2007). Oil and gas pipeline system. CSA-Z662. Mississauga, ON: CSA.
- Dueñas-Osorio, L., Craig, J. I., & Goodno, B. J. (2007). Seismic response of critical interdependent networks. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(2), 285-306.
- Farahmandfar, Z., Piratla, K. R., & Andrus, R. D. (2017). Resilience evaluation of water supply networks against seismic hazards. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 8(1), 04016014.
- Frangiadakis, M., & Christodoulou, S. E. (2014). Seismic reliability assessment of urban water networks. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(3), 357-374.
- Haghighi, M., Delnavaz, A., Rashvand, P., & Delnavaz, M. (2024). Assessment through Machine Learning of Groundwater Vulnerability after Seismic Damage to Fuel Pipeline. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15(3), 04024025.
- Hou, B. W., & Du, X. L. (2014). Comparative study on hydraulic simulation of earthquake-damaged water distribution system. In *International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering* (pp. 113-120).
- Huang, T., & Dilkina, B. (2020, June). Enhancing Seismic Resilience of Water Pipe Networks. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies* (pp. 44-52).
- Hwang, H. H., Lin, H., & Shinozuka, M. (1998). Seismic performance assessment of water delivery systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 4(3), 118-125.
- Ilanlu, M., Ardakani, A., Paknezhad, H., Ebrahimi Gelsefid, M., & Soltani, Y. A. (2013). Identifying the Urban Vulnerable Areas Against the Earthquake with Giscase Study-Radio Darya St. Chalous. *International Journal of Advanced Studies in Humanities and Social Science*, 2(4), 230-237.
- Ito, A., M. Okutsu, A. Furukawa, G. Shoji, and T. Suzuki. 2022. "Earthquake damage prediction of underground steel pipe with screw joint using machine learning." In *Lifelines 2022*, 613–620. <https://doi.org/10.1061/9780784484449.055>
- Karamy Moghadam, A., and M. Mahdavi Adeli. 2020. "Application of artificial neural networks for seismic analysis and design of buried pipelines in heterogeneous soils." *J. Hydraul. Struct.* 6 (4): 60–74. <https://doi.org/10.22055/JHS.2021.35453.1153>.
- Li, F., W. Wang, J. Xu, J. Yi, and Q. Wang. 2019. "Comparative study on vulnerability assessment for urban buried gas pipeline network based on SVM and ANN methods." *Process Saf. Environ. Prot.* 122 (Feb): 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.014>.
- Makhoul, N., Navarro, C., & Lee, J. (2018). Earthquake damage estimations of Byblos potable water network. *Natural Hazards*, 93, 627-659.
- Makrakis, N., P. N. Psarropoulos, and Y. Tsompanakis. 2022. "ANN-based assessment of soft surface soil layers' impact on fault rupture propagation and kinematic distress of gas pipelines." *Infrastructures* 8 (1): 6. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8010006>.

- Nariman, A., Fattahi, M. H., Talebbeydokhti, N., & Sadeghian, M. S. (2023). Assessment of Seismic Resilience in Urban Water Distribution Network Considering Hydraulic Indices. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(2), 1165-1179.
- Paez, D., Filion, Y., Castro-Gama, M., Quintiliani, C., Santopietro, S., Sweetapple, C., ... & Walski, T. (2020). Battle of postdisaster response and restoration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(8), 04020067.
- Qian, L., Endong, G., Tianyang, Y., & Mingzhen, W. (2017). Evaluation of post-quake resilience of water supply pipelines [J]. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 32(10), 283-295.
- Qian, L., Wei, S., Tianlai, Y., Tiancheng, W., & Mohamed, H. (2023). Mathematical methodology in the seismic resilience evaluation of the water supply system. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*.
- Renschler, C. S., Frazier, A. E., Arendt, L. A., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). A framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework (pp. 10-0006). Buffalo: MCEER.
- Salgado-Gálvez, M. A., Zuloaga, D., Henao, S., Bernal, G. A., & Cardona, O. D. (2018). Probabilistic assessment of annual repair rates in pipelines and of direct economic losses in water and sewage networks: application to Manizales, Colombia. *Natural Hazards*, 93, 5-24.
- SelÇuk, A. S., & Yüçemen, M. S. (2000). Reliability of lifeline networks with multiple sources under seismic hazard. *Natural Hazards*, 21, 1-18.
- Shi, P. (2006). Seismic response modeling of water supply systems. Cornell University.
- Shinozuka, M., Tan, R. Y., & Toike, T. (1981, August). Serviceability of water transmission systems under seismic risk. In *Lifeline Earthquake Engineering: The Current State of Knowledge, 1981* (pp. 97-110). ASCE.
- Tang, H., Zhong, Q., Chen, C., & Martek, I. (2023). The Adaptive Seismic Resilience of Infrastructure Systems: A Bayesian Networks Analysis. *Systems*, 11(2), 84.
- Tanyimboh, T. T., Tietavainen, M. T., & Saleh, S. (2011). Reliability assessment of water distribution systems with statistical entropy and other surrogate measures. *Water Science and Technology: Water Supply*, 11(4), 437-443.
- Tsatsis, A., Loli, M., & Gazetas, G. (2019). Pipeline in dense sand subjected to tectonic deformation from normal or reverse faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, 105780.
- Wang, Y. (2006). Seismic performance evaluation of water supply systems. Cornell University.
- Yang, Y., Ng, S. T., Xu, F. J., & Skitmore, M. (2018). Towards sustainable and resilient high density cities through better integration of infrastructure networks. *Sustainable Cities and Society*, 42, 407-422.
- Yoo, D. G., Jung, D., Kang, D., & Kim, J. H. (2016). Seismic-reliability-based optimal layout of a water distribution network. *Water*, 8(2), 50.
- Zhai, C., Zhao, Y., Wen, W., Qin, H., & Xie, L. (2023). A novel urban seismic resilience assessment method considering the weighting of post-earthquake loss and recovery time. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 84, 103453.

یادداشت‌ها

- ¹ Dueñas-Osorio
- ² Adachi & Ellingwood
- ³ Bonneau
- ⁴ O'Rourke
- ⁵ Fragiadakis
- ⁶ Christodoulou
- ⁷ Hou
- ⁸ Du
- ⁹ Yoo
- ¹⁰ Artificial Intelligence
- ¹¹ Li
- ¹² KaramyMoghadam
- ¹³ Mahdavi
- ¹⁴ Makrakis
- ¹⁵ Artificial Neural Network
- ¹⁶ Ito
- ¹⁷ Haghghi
- ¹⁸ Machine Learning
- ¹⁹ Cimellaro
- ²⁰ Farahmandfar
- ²¹ Yang
- ²² Assad
- ²³ Paez
- ²⁴ Huang
- ²⁵ Dilkina

- 26 *Bata*
- 27 *Nariman*
- 28 *Zhai*
- 29 *Tang*
- 30 *Qian*
- 31 *Finite Element Method*
- 32 *Abaqus*
- 33 *Density*
- 34 *Elastic*
- 35 *Mohr Coulomb Plasticity*
- 36 *Geostatic Stress*
- 37 *Python*
- 38 *Script*
- 39 *hoop stress*
- 40 *Training*
- 41 *Validation*
- 42 *Testing*
- 43 *Robustnes*
- 44 *Redundancy*
- 45 *Resourcefulness*
- 46 *Rapidity*
- 47 *Gaussian Process Regression Models*
- 48 *Rational Quadratic GPR*