Civil and Project Journal
http://www.cpjournals.com/

Research Article

Investigating the Application of Artificial Intelligence in Civil Engineering and Progressive Collapse

Javid Rezania[1]*, Massoud Hamian[2], Alireza Rasekhi[3]

1- Master of Structural Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

2- CEO, Faraz Tarh-e-Hegmatane Consulting Engineers Co., Hamedan, Iran

3- Technical Deputy, Three Municipality Region, Hamadan, Iran

Received: 21 November 2023; Revised: 28 November 2023; Accepted: 02 December 2023; Published: 02 December 2023

Abstract

In today's modern world, traces of artificial intelligence can be found in almost any field. In recent years, with the introduction of algorithms and machines, the fields of building engineering and construction project management have also experienced new challenges, from optimizing processes and improving product design to automating tasks and parametric design. Artificial intelligence in structural engineering involves the use of advanced algorithms and machine learning techniques to simplify and improve various aspects of the design and analysis process. Also, artificial intelligence software related to construction is a group of technological tools and solutions that use artificial intelligence to optimize various functions of this industry. On the other hand, one of the relatively new topics that artificial intelligence can enter into is the investigation of various types of damage, including progressive damage in the design and construction of structures. In this article, an attempt has been made to define artificial intelligence and machine learning, to explain the various functions of this technology, and practical algorithms, plus introduce useful and pioneering software in civil engineering, where artificial intelligence is the main origin. Also, the basic influencing parameters in the study of progressive collapse, such as critical path identification and extreme load patterns, have been investigated. According to the functions stated in this research, the importance of using artificial intelligence in theoretical studies and future applied projects is clearly known. Especially vital projects such as Spatial Structures or buildings with a special seismic bearing system such as Staggered Truss Systems and structures with high ductility requirements that need special analysis, design, and monitoring.

Keywords: *Artificial Intelligence, Machine Learning, Algorithm, Progressive Collapse, Analysis.*

Cite this article as: Rezania, J., Hamian, M., & Rasekhi, A. (2023). Investigating the Application of Artificial Intelligence in Civil Engineering and Progressive Collapse. Civil and Project, 5(9), 11-22. https://doi.org/10.22034/cpj.2023.426006.1233

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2023 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

نشریه عمران و پروژه، ۱۴۰۲، ۵(۹)، ۲۲-۱۱
https://doi.org/10.22034/cpj.2023.426006.1233

نشریه عمران و پروژه
http://www.cpjournals.com/

بررسی کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی عمران و خرابی پیشرونده

جاوید رضانیا[1*]، مسعود حامیان[2]، علیرضا راسخی [3]

[*]۱-کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
۲-مدیرعامل، مهندسین مشاور فراز طرح هگمتانه، همدان، ایران
۳-معاون فنی ، منطقه سه شهرداری، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۳۰ آبان ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۰۷ آذر۱۴۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۱ آذر ۱۴۰۲؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۱ آذر ۱۴۰۲

چکیده:

در دنیای مدرن امروزی ردپای هوش مصنوعی را می‌توان تقریبا در هر زمینه‌ای جست و جو کرد. عرصه‌های مهندسی ساختمان و مدیریت پروژه‌های ساخت و ساز نیز در سال‌های اخیر چالش‌های جدیدی را با ورود الگوریتم‌ها و ماشین‌ها تجربه می‌کنند که این روند از بهینه‌سازی فرآیندها و بهبود طراحی محصول گرفته تا خودکارسازی وظایف و طراحی پارامتریک را شامل می‌شود. هوش مصنوعی در مهندسی سازه شامل استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای ساده‌سازی و بهبود جنبه‌های مختلف فرآیند طراحی و تحلیل است. همچنین، نرم افزارهای هوش مصنوعی مربوط به ساخت و ساز دسته‌ای از ابزارها و راه حل‌های تکنولوژیکی هستند که از هوش مصنوعی برای بهینه کردن عملکردهای مختلف این صنعت استفاده می‌کنند. از طرف دیگر، یکی از موضوعات نسبتا جدیدی که هوش مصنوعی می‌تواند به آن ورود کند، بررسی انواع خرابی‌ها از جمله خرابی پیشرونده در طراحی و نگه‌داری سازه ها است. در این مقاله تلاش شده است تا با تعریف هوش مصنوعی و نیز یادگیری ماشین، به تبیین کارکردهای مختلف این تکنولوژی، الگوریتم‌های کاربردی و معرفی نرم‌افزارهای مفید و راه‌گشا در مهندسی عمران که هوش مصنوعی صحنه‌گردان اصلی آن‌ها است، پرداخته شود. همچنین پارامترهای اساسی تاثیرگذار در مطالعه خرابی پیشرونده، مانند شناسایی مسیر بحرانی و الگوهای بار فوق‌العاده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. باتوجه به کارکردهای بیان‌شده در این پژوهش، اهمیت به‌کارگیری هوش مصنوعی در مطالعات تئوری و پروژه‌های کاربردی آینده به وضوح مشخص است. به‌خصوص پروژه‌های بزرگ مانند سازه‌های فضایی و یا ساختمان‌های با سیستم باربر لرزه‌ای خاص مانند خرپاهای متناوب و سازه‌های با نیاز شکل‌پذیری بالا که نیازمند تحلیل، طراحی و پایش ویژه هستند.

کلمات کلیدی:

هوش مصنوعی،یادگیری ماشین،الگوریتم،خرابی پیشرونده،تجزیه و تحلیل.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: *javidrezania@gmail.com*

۱- مقدمه

صنعت ساختمان همواره یکی از استراتژیک‌ترین بخش‌های اقتصاد در سطح جهانی بوده است که به دلیل بزرگ-مقیاس بودن و تعداد نیروی کار درگیر، مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از چالش‌ها را ایجاد کرده است. از این رو، شرکت‌های عمرانی برای بهبود شرایط طراحی و اجرای پروژه‌های مهندسی خود به یادگیری ماشین[۱] و بهره‌مندی از علم داده[۲] روی آورده‌اند. چرا که، مقبولیت و پذیرش فناوری‌های مختلف و بدیع در اجرای سازه‌ها، متخصصین را قادر می‌سازد تا همزمان با صرفه‌جویی در زمان و هزینه، کیفیت اجرا، عملکرد و حاشیه سود پروژه را افزایش دهند و با تمرکز بر پارامترهای ایمنی آسودگی خاطر بیشتری را برای افراد فراهم نمایند (Rezania, 2022). از طرفی دیگر، سیستم‌هایی مانند منطق فازی[۳] به ماشین‌ها کمک می-کنند تا ورودی و خروجی پروژه های ساختمانی را کنترل کنند. این الگوریتم به مهندسین اجازه می‌دهد تا هزینه، زمان و ریسک ساخت و ساز را مدل کنند. در واقع، سیستم فازی روشی برای استدلال است که طرز تفکر انسان را تقلید می‌کند.

کاربردهای گسترده و متنوع هوش مصنوعی[۴] در مهندسی عمران، از بهینه‌سازی فرآیندها و بهبود طراحی محصول گرفته تا خودکارسازی وظایف و کاهش ضایعات را شامل می‌شود. طراحی پارامتریک یکی از زمینه‌هایی بوده است که بیشترین بهره را از فرآیند حاصل برده است. همچنین هوش مصنوعی سیستم اصلی ساخت سه بعدی به نام BIM [۵] را تقویت کرده و این امکان را فراهم ساخته تا مدل‌های سنگین داده‌ای را بر اساس لایه‌های جامع اطلاعاتی ایجاد کنند. هوش ماشینی می‌تواند به شکل واقعیت مجازی و واقعیت افزوده باشد. به این ترتیب، بهره‌بران دید بهتری از پروژه آینده داشته و می‌توانند بدون صرف هزینه اضافی، بازخورد عملی در بهبود طرح ارائه دهند. با توجه به مشکلات فراوان مدیریت کارگاه و ساخت و ساز در سایت یک پروژه، مهندسین به منظور دست‌یابی به راه‌حل‌هایی منطقی، در ارزیابی آسیب‌های سازه‌ای پس از زلزله در برخی ساختگاه‌های مطرح در سطح جهانی از هوش ماشینی بهره جستند و براساس تجربیات مثبت آن، از الگوریتم‌هایی در سایر جنبه‌های ساخت‌وساز نیز استفاده کردند (Isakova, 2022). در رابطه با نظارت بر اجرای سازه‌ها، مفهوم نوین و جالب توجه نظارت مستقل به وسیله‌ی ربات‌ها و پهپادها امری است که نظارت از راه دور بر سایت‌های ساخت و ساز را در لحظه ممکن کرده است. علاوه بر نظارت لحظه‌ای، این مفهوم قابلیت‌های مختصات‌گذاری جغرافیایی[۶] بر روی نقشه‌های پهبادی، امکان دستیابی به اندازه‌گیری‌های منطقه‌ی مربوطه و تبدیل آن‌ها به حجم تقریبی انباشته‌شده را فراهم آورده است. یکی از هیجان-انگیزترین و جسورانه‌ترین کاربردهای مهندسی هوش مصنوعی شهرهای هوشمند[۷] هستند. شهر هوشمند یک سیستم به هم پیوسته انسان‌ساز از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات است که به کمک اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، مدیریت فرآیندهای داخلی شهر را تسهیل می‌نماید.

در تاریخچه‌ی مطالعات، یکی از موضوعات نسبتا جدیدی که هوش مصنوعی توانسته به آن ورود کند بررسی انواع خرابی‌ها از جمله خرابی پیشرونده در طراحی و تگه‌داری سازه‌ها است. براین اساس، در رابطه با خرابی پیشرونده تا به حال مطالعات متعددی صورت گرفته است که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است. Pang et al., (2022) تاثیر المان‌های دیوارهای میانقابی را در قاب‌های بتن مسلح بررسی کردند و نحوه آرایش آرماتورهای پیوستگی[۸] را در کنترل ترک و افزایش مقاومت در برابر خرابی موثر دانستند و به کمک تکنیک برنامه‌ای بیان ژن[۹] ، یک مدل نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری

---

۱ Machine Learning (ML)
۲ Data Science
۳ Fuzzy Logic
٤ Artificial Intelligent
٥ Building Information Modelling
٦ Geotagging
۷ Smart Cities
۸ Integrity Reinforcements
۹ Gene Expression Programming

میانقاب‌ها، پس از زوال ستون، پیشنهاد کردند. Feng et al., (2022) به منظور کمی‌سازی اثر اعضای متصل به قاب‌های سه-بعدی در ارزیابی خرابی پیشرونده تحت اثر حوادث فوق‌العاده‌ی[۱۰] مختلف، یک روش موثر مدل‌سازی عددی را در فضای اجزامحدودی OpenSees ارائه کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که اجزای ثانویه[۱۱] و غیرسازه‌ای مانند کف‌سازی‌ها و دیوارهای پرکننده، بهبود قابل‌توجهی در ظرفیت سازه برای مقاومت در برابر فروپاشی پیشرونده ایجاد می‌کنند که در این بین، اثر جفت‌شوندگی[۱۲] این اجزا در قاب فضایی نقش مهمی ایفا می‌کند. برخی محققین با انجام تحلیل‌های مختلف حساسیت، تحت سناریوهای متفاوت حذف ستون، مودهای شکست و قابلیت اطمینان سازه‌های قاب‌بندی‌شده را بررسی کرده و تأثیر پارامترهای نامشخص بر مقاومت در برابر فروپاشی پیشرونده قاب‌های RC را مورد بحث قرار دادند و بیان داشتند که قابلیت اطمینان سازه‌های قاب‌بندی‌شده تحت سناریوی حذف ستون کناری کمتر از سایر شرایط است (Zhang et al., 2022). Rodrigues da Silva et al., (2023) با تقسیم طرح‌های مبتنی بر ریسک در بهینه‌سازی توپولوژی خرپایی[۱۳] به سه گروه مختلف، خرابی پیشرونده‌ی سازه را براساس عدم قطعیت‌های سیستماتیک[۱۴]و تصادفی[۱۵]بررسی کردند. گروهی از دانشمندان با ارائه فلوچارتی برای محاسبه‌ی مقاومت و تغییرشکل یک نوع از اتصال خمشی به نام BTC [۱۶]، پایه‌ای برای تحقیق در مورد رفتار ضدخرابی پیشرونده‌ی اتصالات بهبودیافته بنا نهادند (Meng et al., 2023).

از طرف دیگر، با مرور مطالعات گذشته در رابطه با کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی عمران، می‌توان به وضوح جای خالی این تکنولوژی پیشرفته را در پروژه‌های حال حاضر مشاهده کرد. بررسی‌های پیشرفته Xie et al., (2023) نشان می‌دهند که تا چه حد ML در چهار حوزه موضوعی مهندسی سازه و زلزله، یعنی تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای، شناسایی و تشخیص آسیب، ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای و کنترل سازه برای کاهش زلزله استفاده شده است. Sun et al., (2021) چالش‌های ورود یادگیری ماشین به مهندسی سازه را شناسایی کردند و بخش‌هایی مانند پیش‌بینی پاسخ و عملکرد سازه، تفسیر داده‌های تجربی و فرمول‌بندی مدل‌ها برای پیش‌بینی ویژگی‌های سازه‌ای در سطح جز، بازیابی اطلاعات، و شناخت الگوها در داده‌های پایش سلامت سازه را شاخه‌های اصلی کاربردهای یادگیری ماشین در طراحی سازه‌ای و ارزیابی عملکرد ساختمان دانستند. در بحث مصالح ساختمانی، Behnood and Golafshani (2020) یک مجموعه داده جامع حاوی اطلاعات مربوط به طرح اختلاط و خواص مکانیکی بتن در سنین مختلف را به دو زیر مجموعه داده‌های آموزشی و داده‌های آزمایشی تقسیم کردند و با استفاده از چندین معیار مختلف برای ارزیابی عملکرد مدل‌های توسعه‌یافته، به کمک هوش مصنوعی، نشان دادند که مدل‌های پیشنهادی می‌توانند پیش‌بینی‌های قابل‌اعتمادی از خواص مکانیکی هدف ارائه دهند و با استفاده از ضایعات و مواد فرعی در مخلوط بتن، صرفه‌جویی مناسبی در زمان و انرژی به دست خواهد آمد. همچنین، Zhu et al., (2022) براساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) صورت گرفته بر روی قاب‌های خمشی فلزی، چهار مدل هوش مصنوعی KNN، XGBoost، BPNN، و 1DCNN-را، یک پیاده‌سازی بسیار کارآمد برای ارزیابی ضریب افزایش دینامیکی (DIF) در مطالعه خرابی پیشرونده دانستند. از طرف دیگر، Esfandiari and Urgessa (2020) الگوریتمی بدیع به نام DMPSO برای بهینه‌سازی قاب‌های بتن‌مسلح که در معرض ریزش تدریجی هستند، ارائه کردند. هدف اصلی آن‌ها به حداقل رساندن هزینه مصالح و اجرای پروژه در عین رعایت کردن محدودیت‌ها و خواسته‌های آیین نامه‌های ACI 318 و UFC بوده است.

این مقاله مروری بر رویکردهای کاربرد هوش مصنوعی در حوزه مهندسی سازه و ساخت با تاکید بر ایمن‌سازی طرح برای دست‌یابی به ساختمان‌هایی امن در برابر خرابی پیشرونده ارائه کرده است.

---

۱۰ Extreme Events
۱۱ Secondary Components
۱۲ Coupling Effect
۱۳ Truss Topology Optimization
۱۴ Epistemic (Aka Systematic) Uncertainty
۱۵ Aleatoric (Aka Statistical) Uncertainty
۱۶ Bending T-stub Connection

۲- هوش مصنوعی در مهندسی عمران

در یک بیان کلی، هوش مصنوعی را می‌توان قابلیت خلق ماشین‌های هوشمند، به ویژه نرم‌افزارها و برنامه‌های کامپیوتری هوشمند عنوان کرد که رفتاری هدفمند و معقولانه را در فرآیندهای دیجیتال پیاده‌سازی کند. این سیستم قابلیت یادگیری، ارتباط‌گرفتن و انطباق‌پذیری با محیط اطراف را دارد. در عمل به کمک هوش مصنوعی، دستگاه‌ها می‌توانند از تجربه-های قبلی بیاموزند. هوش مصنوعی در مهندسی سازه شامل استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای ساده‌سازی و بهبود جنبه‌های مختلف فرآیند طراحی و تحلیل است. این پلتفرم مهندسین را با ابزارهایی توانمند ساخته که توانسته‌اند به سرعت و با دقت سیستم‌های ساختاری پیچیده را تجزیه و تحلیل، طرح‌ها را بهینه، و یکپارچگی سازه‌ای زیرساخت‌ها را ارزیابی کنند.

کاربردهای یادگیری ماشین در مهندسی سازه و ارزیابی عملکرد ساختمان شامل موضوعاتی چون: محاسبه‌ی پاسخ سازه‌ها، تعیین ظرفیت نهایی اعضا، ارزیابی و پایش سلامت سازه‌ها، پیش بینی رفتار مصالح، تشخیص خرابی و نقص در ساختمان‌ها، بهینه‌سازی طرح، تخمین هزینه، تعیین زمان‌بندی برای پیشبرد پروژه، پیش‌بینی عمر سازه‌ها، مدیریت ریسک، و بهبود ایمنی، بهره‌وری، و کیفیت سازه‌ها است. از لحاظ تاریخی، برخی از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی محبوب‌تر از سایر الگوریتم‌های این حوزه هستند، مانند الگوریتم‌های ژنتیک[۱۷] ، سیستم‌های ایمنی مصنوعی[۱۸] و برنامه‌ریزی ژنتیک[۱۹] .

نرم‌افزارهای هوش مصنوعی مربوط به ساخت و ساز دسته‌ای از ابزارها و راه‌حل‌های تکنولوژیکی هستند که از هوش مصنوعی برای بهینه‌کردن عملکردهای مختلف این صنعت استفاده نموده‌اند. این نرم‌افزارهای کاربردی از یادگیری ماشین، تجزیه و تحلیل داده‌ها و اتوماسیون برای افزایش کارایی، دقت، ایمنی و تصمیم‌گیری در طول چرخه عمر پروژه در حال اجرا استفاده می‌کنند. با تجزیه و تحلیل حجم وسیعی از داده‌ها و الگوهای پروژه، نرم‌افزار ساخت و ساز هوش مصنوعی بینش‌ها، پیش‌بینی‌ها و توصیه‌های ارزشمندی را به ذی‌نفعان ارائه داده و به آن‌ها در انتخاب آگاهانه و ساده کردن عملیات کمک کرده است. به عنوان مثال، این ابزارها با پیش‌بینی تاخیرهای احتمالی، بهینه سازی، تخصیص منابع، تشخیص عیوب و حتی بهبود طرح ارائه‌شده، در بخش عمده‌ای از مسئولیت اجرای پروژه مهندسین را یاری نموده‌اند . نرم‌افزار ساخت و ساز متکی بر هوش مصنوعی برای غلبه بر چالش‌ها، کاهش هزینه‌های گزاف، افزایش بهره‌وری و نیز ایجاد فرآیندهای ساخت و ساز ایمن‌تر و کارآمدتر، تحولی شگرف در صنعت ساختمان و به تبع آن شاخص‌های اقتصادی بزرگ دنیا به وجود آورده است. در ادامه برخی ابزارهای کاربردی هوش مصنوعی در مهندسی عمران ذکر شده‌اند.

۲-۱ نرم افزار Click Up

Click Up به عنوان یک نرم افزار نوآور، معیار جدیدی را در مدیریت پروژه و بهره‌وری برای متخصصان مدیریت ساخت و ساز ایجاد کرده و با استفاده از هوش مصنوعی، نحوه برنامه ریزی، اجرا، و نظارت بر پروژه‌های ساخت و ساز را متحول نموده است. یکی از ویژگی‌های برجسته آن، دستیار برنامه‌ریزی مبتنی بر هوش مصنوعی است. این ویژگی تلاش‌های زمان‌بندی را با در نظر گرفتن وابستگی‌های کار، در دسترس بودن تیم و اولویت‌های پروژه ساده کرده و مهندسین را با چالش ماندن در مسیر و تکمیل به‌موقع پروژه‌های ساختمانی روبه‌رو ساخته است. به علاوه، تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده Click Up مدیران ساخت و ساز را قادر ساخته تا به طور فعال گلوگاه‌ها را شناسایی، و تاخیرهای احتمالی را پیش بینی کنند. همچنین آن‌ها توانسته‌اند تخصیص منابع را به صورت استراتژیک انجام دهند تا اطمینان حاصل کنند که پروژه به خوبی اجرا شده است. در نهایت، Click Up به طور یکپارچه با ابزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) ادغام شده و یک الگوی مدیریت ساخت و ساز آماده برای شروع را ارائه نموده است.

---

[۱۷] Genetic Algorithms
[۱۸] Artificial Immune Systems
[۱۹] Genetic Programming

۲-۲ نرم افزار OpenSpace.ai

OpenSpace.ai یک نرم افزار ساخت و ساز هوش مصنوعی پیشگام است که تجزیه و تحلیل داده‌ها را در مرحله پیش‌از ساخت با طیف استثنایی از ویژگی‌های خود بازتعریف می‌کند. پارامتری که OpenSpace.ai را از سایر نرم‌افزارها متمایز ساخته، پلتفرم مستندات بصری مبتنی بر هوش مصنوعی است که به‌طور یکپارچه تصاویر سایت کارگاهی را در مراحل جامع ۳۶۰ درجه ثبت و ادغام می‌کند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی پیشرفته این پلتفرم، به‌طور خودکار تصاویر را به طرح‌های پروژه نگاشت کرده، نیاز به ورود دستی داده‌ها را از بین برده و فرآیند تحلیل را تسریع نموده‌اند.

۲-۳ نرم افزار Procore

Procore به عنوان یک فناوری مدیریت برای شرکت های ساختمانی طیف گسترده‌ای از عملکردها را ارائه کرده است. این نرم‌افزار بیش از میلیون‌ها کاربر در بسیاری از کشورها دارد که این امر تاکیدی است بر شهرت جهانی آن. آنچه Procore را نسبت به سایر هم‌قطاران نرمافزاری خود متمایز ساخته، مجموعه جامع راه حل‌های هوش مصنوعی آن است که هر جنبه‌ای از مدیریت پروژه از جمله کنترل خودکار اسناد، همکاری بلادرنگ، تجزیه و تحلیل و گزارش پیشرفته را ساده کرده است. از قابلیت‌های منحصربه‌فرد Procore قدرت‌بخشی به تیم‌ها برای هماهنگی مؤثر وظایف، تخصیص منابع و ردیابی پیشرفت کار است.

۲-۴ نرم افزار Fusion 360

این برنامه چشم‌انداز طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) را با مجموعه‌ای از ویژگی‌های استثنایی خود بازتعریف کرده است. پارامتری که Fusion 360 را متمایز کرده، ادغام ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی در فرآیند CAD است که کارایی و دقت طراحی را افزایش داده و از طریق قابلیت‌های منحصر به فرد طراحی مولد خود، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تولید و ارزیابی مجدد گزینه‌های طرح، و بهینه‌سازی سازه و مصالح و اجزای آن استفاده کرده است. ادغام یکپارچه با اصول BIM، همکاری در طراحی جامع را تضمین و کل چرخه عمر ساخت و ساز را ساده‌سازی نموده است. با همکاری هم‌زمان مبتنی بر فضای ابری، ذی‌نفعان توانسته‌اند به طور یکپارچه در همه‌ی شاخه‌ها با یکدیگر کار کنند. ابزارهای شبیه‌سازی و تحلیل مبتنی بر هوش مصنوعی Fusion 360 مهندسین و معماران را قادر ساخته تا عملکرد را پیش‌بینی کرده، مسائل بالقوه را شناسایی نمایند و انتخاب‌هایی آگاهانه داشته باشند.

۲-۵ نرم افزار AVEVA Insight

AVEVA Insight از هوش مصنوعی برای بهینه سازی عملکرد عملیات صنعتی استفاده کرده است. AVEVA Insight با استفاده از تحلیل‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌کننده، تصمیم‌گیری در زمان واقعی و مبتنی بر داده را تقویت و در عین حال موارد خرابی را به حداقل رسانده است. همچنین این نرم‌افزار طوری برنامه‌ریزی شده که دارایی‌های صنعتی با حداکثر کارایی خود عمل کنند. موضوعی که AVEVA Insight را واقعا متمایز ساخته، ظرفیت قابل توجه آن برای ادغام یکپارچه داده‌ها از منابع مختلف مانند سنسورها، تجهیزات و سیستم‌های عملیاتی است. این ادغام یک دید جامع و کل‌نگر از سلامت و عملکرد فرآیندهای صنعتی ارائه کرده است.

از دیگر برنامه‌های شناخته‌شده در حوزه مهندسی ساخت می‌توان از Project.supplies (یک ابزار آنلاین تهیه لیستی از تجهیزات و مصالح مورد نیاز برای انجام پروژه‌های ساختمانی به صورت خودکار)، FormulaChatGPT (برای تبدیل دستورالعمل‌های متنی به فرمول‌های Excel و Google Sheets)، Finch3D (برای بهینه‌سازی طراحی ساختمان، ارائه بازخورد فوری در مورد عملکرد، تشخیص خطاها و یافتن راه حل های بهینه در مراحل اولیه طراحی)، Sheetplus.ai (با هدف تولید فرمول‌های پیچیده در کمترین زمان ممکن) و در نهایت SWAPP نام برد.

۳- خرابی پیشرونده

تا به حال تعاریف مختلفی برای خرابی پیشرونده ارائه شده است که عمده‌ی آن‌ها اندکی در جزئیات متفاوت بوده‌اند. به تعبیری، خرابی یک حالت حدی نهایی در زمان اعمال بارهای غیرعادی در سازه‌ها است و در حالت کلی، خرابی پیشرونده را می‌توان انتشار گسترده و زنجیروار یک خرابی یا نقص که ناشی از آسیب به بخش نسبتاً کوچکی از سازه می‌باشد، تلقی کرد (Rezania & Torkzadeh, 2015). اگرچه در دهه‌های گذشته تحقیقات متعددی در حوزه ساخت و ساز به کمک مدل‌های یادگیری ماشین انجام گرفته، به ندرت از ظرفیت‌های ML برای طراحی در برابر فروپاشی پیشرونده استفاده شده است. با این حال، در سال‌های اخیر برخی محققین با به‌کارگیری الگوریتم‌های مختلف سعی دربرآورده کردن هر دو نیازهای طراحی و مقاومت در برابر خرابی پیشرونده داشته اند. یک روش نوین در این زمینه، استفاده از یک مدل یادگیری ماشین از ناحیه فروپاشی داخلی، یک الگوریتم انتشار فروپاشی برای پیش‌بینی منطقه تخریب، و یک روش شبیه‌سازی بصری است که با استفاده از سوابق رویدادهای خرابی، مدل‌های المان محدود تأیید شده، تأثیر اندازه مش و خرابی‌های اولیه مختلف را بر روی یک سناریوی ریزش مورد بحث قرار داده است (Wang et al., 2023). با توجه به این که اولین قدم در یادگیری ماشین، تعریف الگوهای شکست است و چندین حالت شکست اصلی اعضای سازه مانند کمانش و فروجهش دینامیکی در برابر حوادث ویژه‌ی منجربه خرابی، مانند آتش‌سوزی، انفجار، ضربه ناگهانی و یا بارگذاری بیش از انتظار سازه وجود دارد، نکته‌ی قابل توجه در دخالت دادن هوش مصنوعی در عرصه‌ی خرابی این است که پیچیدگی مدل‌سازی دیجیتالی و فرایند کمی‌سازی، درک روند خرابی را برای ماشین دشوار کرده است. با این حال، هنگام ارزیابی فروپاشی، صرف نظر از نحوه تخریب، ماشین قضاوت می‌کند که آیا یک عضو سازه‌ای از کار افتاده است یا خیر؛ تا بتواند ادامه‌ی روند را باتوجه به الگوهای تعریف‌شده و پیش‌بینی‌شده ادامه دهد.

در تجزیه و تحلیل خرابی سازه، یکی از وظایف مهم هوش مصنوعی بررسی پتانسیل ریزش کل سازه‌ی تحت عامل محرک است. این موضوع با استفاده از پتانسیل یادگیری ماشین امکان‌پذیر شده است. اگر پیش‌بینی حالت شکست یا پاسخ هر یک از اعضای سازه‌ای موفقیت‌آمیز بوده باشد، آن‌گاه پیش‌بینی فروریختن یک ساختمان براساس روشی که توسط کدهای اختصاصی GSA و DOD تعیین شده است، قابل ارزیابی می‌باشد. قبل از اینکه ماشین بتواند حالت خرابی را برای هر یک از اعضای سازه‌ای پیش‌بینی کند، دریافت آموزش و انجام آزمایش ضروری است. این آموزش و آزمایش براساس کدهای توسعه یافته‌ی دانشمندان انجام شده است (Feng, 2020).

در بررسی خرابی پیش‌رونده‌ی یک سازه، براساس روش انتخابی برای تجزیه و تحلیل حالات شکست و عوامل منجربه آن، الگوریتم‌های کاربردی و مفاهیم متعددی به ماشین آموزش داده شده‌اند. از جمله‌ی آن مفاهیم می‌توان به بحث درجات نامعینی و افزونگی سازه اشاره کرد. آستانه افزونگی نقطه‌ای است که سازه باید زائد شود تا قابلیت اطمینان آن بیشتر از قابلیت اطمینان پنهان ساده‌ترین سیستم ایزواستاتیک شود (Rezania & Torkzadeh, 2019). از این رو، ضریب افزونگی، معیار مناسبی برای بررسی مقاومت سازه‌ها به‌خصوص ساختارهای چندلایه با تعداد اعضای متعدد مانند سازه‌های فضایی اعم از گنبدها، چلیک‌ها وشبکه‌های فضایی است. با ورود این عامل در محاسبات اولیه‌ی سازه‌ای، که در آن‌ها اطمینان از عدم پیشرفت ظاهری فروریزش وجود دارد، الگوریتم آنالیز، طراحی و کنترل جامع‌تر شده است.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین دارای مزایای منحصربه‌فردی در پیش‌بینی مقاومت در برابر شکست هستند. عوامل کلیدی موثر بر این مقاومت در مقاطع مدور، که کاربرد زیادی در صنعت ساخت و ساز دارند، پارامترهایی نظیر قطر خارجی، ضخامت جداره، استحکام تسلیم، زبری سطح جداره و تنش پسماند هستند. برای بهرمندی از مزایای هوش مصنوعی در پیش-بینی مقاومت شکست، الگوریتم‌هایی مانند شبکه عصبی، جنگل تصادفی[۲۰] و ماشین بردار پشتیبان[۲۱] دارای پتانسیل آموزش

[۲۰] Random Forest
[۲۱] Support Vector Machine

بالایی هستند که در این میان، مدل پیش‌بینی شبکه عصبی بهترین اثر پیش‌بینی را داشته و ویژگی‌های آن شامل دقت و راندمان بالا، و هزینه کم، الزامات پیش‌بینی واقعی را برآورده ساخته است (Peng et al., 2023).

در بررسی پتانسیل خرابی پیشرونده در یک سازه، انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی با درنظرگرفتن ضریب افزایش دینامیکی مناسب (DIF)، به عنوان یک تحلیل جایگزین برای پیش‌بینی حداکثر پاسخ دینامیکی سازه‌ها مورد استفاده قرار رگفته است. مقدار DIF برای سازه‌هایی با بارهای ثقلی مختلف و نسبت‌های سختی پساالاستیک[۲۲] غیریکسان، متفاوت است. بنابراین، لازم است این مقدار به گونه‌ای تنظیم شود که شامل پارامترهای سازه‌ای موثرتر باشد تا بتوان تحلیل استاتیکی غیرخطی را با تحلیل دینامیکی غیرخطی به نحو قابل قبولی تطبیق داد. لازم به ذکر است که، اگرچه اثر بار ثقلی و نسبت سختی پساالاستیک در محاسبه DIF در دستورالعمل‌های آیین‌نامه UFC درنظرگرفته نشده است، این عامل دارای تأثیری بسیار مهم و عمده بر پاسخ سازه می‌باشد (Mashhadi & Saffari, 2017). در این راستا، هوش مصنوعی به کمک الگوریتم‌های توسعه‌پذیر خود، آموزش به ماشین جهت بهینه کردن ضرایب افزایشی، و دخالت دادن اثرات دیده‌نشده در آیین‌نامه‌ها، خروجی مهندسی‌تری را به دست می‌دهد.

از دیگر عوامل موثر بر طراحی در برابر خرابی و کنترل نوع وقوع آن می‌توان به شکل‌پذیری اشاره نمود. از نسبت تغییرشکل باقیمانده، برای ارزیابی قابلیت بازسازی تغییرشکل سازه استفاده می‌شود. تغییرشکل باقیمانده و نسبت تغییرشکل باقیمانده نظیر، با افزایش جابجایی جانبی افزایش می‌یابند. بنابراین، با افزایش جابجایی جانبی به دلیل آسیب انباشته، قابلیت بازسازی تغییرشکل سازه کاهش می‌یابد. لذا، سازه‌ها باید برای حفظ عملکرد مهندسی خود توانایی تغییر شکل‌های حاصل از نیروهای جانبی را داشته باشند. به‌منظور دخالت دادن شکل‌پذیری در طراحی سازه‌ها و استفاده از تمامی ظرفیت آن‌ها، از ضریب رفتار برای کاهش مقادیر نیروهای واقعی زلزله استفاده شده است. برای بررسی شکل‌پذیری و تعیین ضریب رفتار نیاز به آنالیزهای غیرخطی می‌باشد، چراکه رفتار سازه‌ها به هنگام رخدادن زلزله‌های متوسط و بزرگ وارد محدوده غیرارتجاعی شده است (Rezania, 2021). یکی از مزایای هوش مصنوعی تجزیه و تحلیل داده‌ها در رابطه با رفتار مصالح مختلف تحت تنش است. با ورود داده‌هایی در مورد استحکام، تسلیم، نقاط حدی و سایر خواص مربوط به مواد تشکیل‌دهنده‌ی سازه، هوش مصنوعی توانسته نحوه رفتار آن‌ها را تحت بارهای مختلف شبیه‌سازی و مشخص کند کدام یک برای افزایش شکل‌پذیری مؤثرتر هستند. بعلاوه، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بررسی استراتژی‌های مختلف طراحی مانند استفاده از الگوهای تقویت تیر و ستون، دیوارهای برشی، مهاربندی‌ها و سایر عواملی که می‌توانند بر توانایی سازه برای مقاومت در برابر تنش و پذیرش تغییرشکل‌های ایده‌آل تأثیر بگذارند، از دیگر کارکردهای هوش مصنوعی است. این تکنولوژی همچنین توانسته برای بهینه‌سازی چیدمان اعضای سازه و مقاطع مناسب برای آن‌ها برای به حداکثر رساندن شکل‌پذیری استفاده شود تا مهندسین مؤثرترین مکان‌یابی و پیکربندی این عناصر را برای جلوگیری از فروپاشی پیشرونده تعیین کنند. دیگر نقش مهم هوش مصنوعی، به دست‌دادن ضریب شکل‌پذیری مناسب و ایده‌آل برای طراحی یک سازه بنا بر شرایط طرح و پروژه است.

برخی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در بحث خرابی و قابلیت‌های هوش مصنوعی در این راستا در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۱ الگوی بار خرابی

از مزیت‌های اصلی هوش مصنوعی در رابطه با خرابی پیشرونده، استفاده از تکنیک‌های مختلف از جمله مدل‌سازی مبتنی بر داده‌ها، بهره‌مندی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، پیش‌بینی براساس یادگیری ماشین و نیز شبیه‌سازی‌های اجزا محدودی FEA، است که سناریوهای بارگذاری متفاوت را در یک سازه پیش‌بینی و تصویرسازی می‌کند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به منظور توسعه مدل‌های پیش‌بینی، داده‌های تاریخی را در مورد الگوهای بار و پاسخ‌های سازه‌ای، تجزیه و تحلیل می‌کنند. با یادگیری از این داده‌ها، هوش مصنوعی توانسته است عملیاتی‌سازی سناریوهای بار مختلف را بر اساس الگوها و

[۲۲] Post-Elastic

همبستگی‌های شناسایی‌شده در داده‌ها به وجود بیاورد. هوش مصنوعی برای اتوماسیون و بهینه‌سازی فرآیند اجزا محدودی، امکان تولید کارآمد مدلسازی‌ها برای سناریوهای بار مختلف را فراهم آورده است. همچنین توانسته در تفسیر و تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی FEA مفید واقع شود.

علاوه بر این، برای یافتن بحرانی‌ترین سناریوهای بارگذاری برای یک سازه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی با در نظرگرفتن عواملی مانند خواص مصالح، محدودیت‌های هندسی و معیارهای طراحی، اقتصادی و ایمنی، پیکربندی‌های بار را، که منجربه بیشترین تنش یا تغییرشکل و یا سایر فاکتورهای بحرانی مانند تغییر انرژی می‌شود، تعیین و به شناسایی سناریوهای بحرانی کمک می‌کنند. هوش مصنوعی با آموزش و توسعه‌ی مدل‌های یادگیری ماشین، پیش‌بینی‌های نسبتا دقیقی در مورد نحوه واکنش سازه به بارهای مختلف دارد.

۳-۲مسیر بحرانی بار

با مقایسه‌ی تحقیقات گذشته و نیز بررسی آیین‌نامه‌های موجود در رابطه با خرابی، شاید متداول‌ترین روش در بررسی خرابی پیشرونده‌ی یک سازه را بتوان روش مسیر جایگزین بار قلمداد کرد (Rezania & Torkzadeh, 2015). در روش مسیر جایگزین، سناریوهای متعددی برای حذف عناصر حیاتی سازه باید در نظر گرفته شوند که این امر فرآیند طراحی را به شدت تکراری و پرهزینه می‌کند. بنابراین، توسعه تکنیک‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی، برای به وجود آوردن راه حل‌هایی کارآمد و اقتصادی، گره‌گشای بسیاری از چالش‌های موجود بوده و در شناسایی مسیرهای بحرانی که در آن‌ها سازه در معرض فروپاشی قرار می‌گیرد بسیار مفید واقع گردیده است.

الگوریتم‌های هوش مصنوعی مقادیر زیادی از داده‌های مربوط به خواص سازه‌ای، رفتار مصالح و نیروهای خارجی را تجزیه و تحلیل کرده و با شناسایی الگوها و همبستگی‌ها توانسته مسیرهای فروپاشی احتمالی را براساس داده‌های موجود قبلی پیش‌بینی کند. هوش مصنوعی مستعد به‌کارگیری برای توسعه شبیه‌سازی‌ها و مدل‌های پیچیده در سازه‌ای که تحت سناریوهای مختلف قرار دارد، می‌باشد. با اجرای این شبیه‌سازی‌ها، الگوریتم‌های هوش مصنوعی نقاط ضعف یا مناطق محتمل شکست و خرابی را شناسایی کرده و مسیرهای فروپاشی بالقوه را نمایان می‌سازند. از دیدگاهی دیگر، ماشین‌ها با یادگیری از شکست‌های سازه‌ای گذشته، عوامل موثر در آن‌ها، و جریان انرژی حاکم بر سازه تحت الگوهای خرابی مختلف، مسیرهای فروپاشی مرتبط با آن‌ها را آنالیز کرده و طبق الگوریتم‌های توسعه‌داده‌شده‌ی خود به پیش‌بینی نواحی بحرانی در سازه‌ی مشابه می‌پردازند. هوش مصنوعی با حسگرهای اینترنت اشیا و سیستم‌های نظارتی برای جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ درباره سلامت سازه، یکپارچه شده و با تجزیه و تحلیل مداوم این داده‌ها، ناهنجاری‌ها یا تغییراتی را که ممکن است نشان‌دهنده یک فروپاشی قریب‌الوقوع باشند را با الگوریتم‌های خود شناسایی نموده و به پیش‌بینی مسیر فروپاشی کمک کرده است.

۳-۳اعضا و المان‌های بحرانی

هنگامی که یک تغییر در هندسه‌ی سازه و یا یک عضو فشاری آن رخ می‌دهد نتیجه، از دست رفتن مقاومت در برابر بارگذاری است که این شرایط، ناپایداری نام می‌گیرد. از آنجا که ناپایداری می‌تواند موجب شکست فاجعه‌باری در سازه گردد، باید در هنگام طراحی به این پدیده توجه ویژه‌ای بشود. در کنار سایر موارد مؤثر در طراحی سازه، برای منظور کردن پدیده‌ی ناپایداری، آیین‌نامه‌های طراحی از مفهوم حالات حدی استفاده کرده‌اند. در طراحی حالات حدی، سازه یا اعضای سازه‌ای در برابر حالات حدی نسبی که ممکن است بر ایمنی یا عملکرد سازه تأثیر بگذارند، طراحی می‌شوند (Rezania, 2020).

هوش مصنوعی با پتانسیل بالای خود، اعضای بحرانی یک ساختار را با تجزیه و تحلیل عوامل مختلف و استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین پیش‌بینی می‌کند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی ویژگی‌های سازه‌ای مانند استحکام مصالح، توزیع بار و ماهیت اتصالات را برای شناسایی اعضای بحرانی بالقوه تجزیه و تحلیل کرده و با شبیه‌سازی سناریوهای بارگذاری مختلف و انجام تحلیل سازه‌ای، اعضایی که تنش یا شکست بالایی را تجربه می‌کنند، مشخص می‌کند. ماشین‌ها با یادگیری از داده‌های موجود، الگوها و شاخص‌هایی را شناسایی کرده که به بحرانی بودن اعضای خاص در سازه کمک می‌کنند. هوش مصنوعی

همچنین دانش تخصصی و اصول مهندسی را در تجزیه و تحلیل خود می‌گنجاند و با ترکیب دامنه‌های گوناگون با تکنیک‌های یادگیری ماشین، الگوریتم‌های هوش مصنوعی دقت پیش‌بینی اعضای حیاتی یک ساختار را بهبود می‌بخشند.

در پایان، توجه به این مهم ضروری است که پیش‌بینی‌های هوش مصنوعی باید به‌عنوان ابزاری برای کمک به متخصصین و نه جایگزینی برای قضاوت آن‌ها استفاده شود. تصمیم نهایی در مورد اعضای بحرانی و خاص همیشه باید توسط مهندسین باتجربه و براساس درک کلی رفتارها، شناخت جزئیات ساختار و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن گرفته شود.

۴- نتیجه‌گیری

کاربردهای یادگیری ماشین در مهندسی سازه و ارزیابی عملکرد ساختمان شامل موضوعاتی چون: محاسبه‌ی پاسخ سازه‌ها، تعیین ظرفیت نهایی اعضا، ارزیابی و پایش سلامت سازه‌ها، پیش بینی رفتار مصالح، تشخیص خرابی و نقص در ساختمان‌ها، بهینه‌سازی طرح، تخمین هزینه، تعیین زمان‌بندی برای پیشبرد پروژه، پیش‌بینی عمر سازه‌ها، مدیریت ریسک، و بهبود ایمنی، بهره‌وری، و کیفیت سازه‌ها است.

یک رویکرد، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تجزیه و تحلیل طرح‌های ساختمان و شبیه‌سازی سناریوهای شکست احتمالی است. روش دیگر استفاده از حسگرها و تجزیه و تحلیل داده‌های بلادرنگ برای نظارت بر سلامت سازه ساختمان‌ها است. با وارد کردن داده‌های مربوط به ابعاد ساختمان، مصالح و سایر عوامل مرتبط در الگوریتم ماشین، از توانایی‌های هوش مصنوعی برای بهینه سازی طرح‌های ساختمان به منظور حداکثر ایمنی، پایداری و کارایی استفاده می‌شود.

با ورود ضریب افزونگی در محاسبات اولیه‌ی آنالیز، طراحی و کنترل سازه‌ای که در آن اطمینان از عدم پیشرفت ظاهری فروریزش وجود دارد، هوش مصنوعی به کمک الگوریتم‌های توسعه‌پذیر خود، آموزش به ماشین جهت بهینه کردن ضرایب افزایشی، و دخالت دادن اثرات دیده‌نشده در آیین‌نامه‌ها، خروجی مهندسی و همه‌جانبه‌تری را به دست می‌دهد.

با یادگیری از تجربیات داده‌های گذشته، هوش مصنوعی توانسته است شبیه‌سازی سناریوهای بار مختلف را براساس الگوها و همبستگی‌های شناسایی‌شده در داده‌ها به وجود بیاورد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی با در نظرگرفتن عواملی مانند خواص مصالح، محدودیت‌های هندسی و معیارهای طراحی، اقتصادی و ایمنی، پیکربندی‌های بار را، که منجربه بیشترین تنش یا تغییرشکل و یا سایر فاکتورهای بحرانی مانند تغییر انرژی شده، تعیین و به شناسایی سناریوهای حیاتی همچون بحرانی‌ترین حالات بارگذاری برای یک سازه کمک می‌کنند.

نرم‌افزارهای ساخت و ساز متکی بر هوش مصنوعی برای غلبه بر چالش‌ها، کاهش هزینه‌های گزاف، افزایش بهره‌وری و نیز ایجاد فرآیندهای ساخت و ساز ایمن‌تر و کارآمدتر، تحولی شگرف در صنعت ساختمان و به تبع آن شاخص‌های اقتصادی بزرگ دنیا به وجود آورده است.

هنگام ارزیابی فروپاشی، صرف نظر از نحوه تخریب، ماشین قضاوت می‌کند که آیا یک عضو سازه‌ای از کار افتاده است یا خیر؛ تا بتواند ادامه‌ی روند را باتوجه به الگوهای تعریف‌شده و پیش‌بینی‌شده ادامه دهد. اگر پیش‌بینی حالت شکست یا پاسخ هر یک از اعضای سازه‌ای موفقیت‌آمیز بوده باشد، آن‌گاه پیش‌بینی فروریختن یک ساختمان براساس روشی که توسط کدهای اختصاصی GSA و DOD تعیین شده است، قابل ارزیابی می‌باشد. ماشین‌ها با یادگیری از شکست‌های سازه‌ای گذشته، عوامل موثر در آن‌ها، و جریان انرژی حاکم بر سازه تحت الگوهای خرابی مختلف، مسیرهای فروپاشی مرتبط با آن‌ها را آنالیز کرده و طبق الگوریتم‌های توسعه‌داده‌شده‌ی خود به پیش‌بینی نواحی بحرانی در سازه‌ی مشابه می‌پردازند.

در پیش‌بینی مقاومت شکست، الگوریتم‌هایی مانند شبکه عصبی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان دارای پتانسیل آموزش بالایی هستند که در این میان، مدل پیش‌بینی شبکه عصبی بهترین اثر پیش‌بینی را داشته و ویژگی‌های آن شامل دقت و راندمان بالا، و هزینه کم، الزامات پیش‌بینی واقعی را برآورده ساخته است.

با ورود داده‌هایی در مورد استحکام، تسلیم، نقاط حدی و سایر خواص مربوط به مواد تشکیل‌دهنده‌ی سازه، هوش مصنوعی توانسته نحوه رفتار آن‌ها را تحت بارهای مختلف شبیه‌سازی و مشخص کند کدام یک برای افزایش شکل‌پذیری مؤثرتر هستند. این تکنولوژی همچنین توانسته برای بهینه‌سازی چیدمان اعضای سازه و مقاطع مناسب برای آن‌ها برای به حداکثر رساندن شکل‌پذیری استفاده شود.

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

Behnood, A., & Golafshani, EM. (2020). Machine learning study of the mechanical properties of concretes containing waste foundry sand. Construction and Building Materials. Vol. 243, 118152. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118152.

Esfandiari, M.J., & Urgessa, G.S. (2020). Progressive collapse design of reinforced concrete frames using structural optimization and machine learning. Structures. Vol. 28, 1252-1264. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.039.

Feng, D., Zhang, M., Brunesi, E., Parisi, F., Yu, J., & Zhou, Z. (2022). Investigation of 3D effects on dynamic progressive collapse resistance of RC structures considering slabs and infill walls. Journal of Building Engineering. Vol. 54, 104421. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104421.

Fue, F. (2020). Fire induced progressive collapse potential assessment of steel framed buildings using machine learning. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 166, 105918. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116129.

Isakova, Tatsiana. (2022, April 21). AI in civil engineering: current posture and popular uses. Indatalabs. https://indatalabs.com/blog/ai-in-civil-engineering.

Mashhadi, J. & Saffari, H. (2029). Modification of dynamic increase factor to assess progressive collapse potential of structures. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 138, 72-78. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.038.

Meng, B., Qiangqiang, D., Zhong, W., Tan, Z., & You, K. (2023). Tensile resistance and deformation of novel bending T-stub connections against progressive collapse. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 201, 107733. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107733.

Pang, B., Wang, F., Yang, J., Zhang, W., Huang, X., & Azim, I. (2022). Evaluation on the progressive collapse resistance of infilled reinforced concrete frames based on numerical and semi-analytical methods. Engineering Structures. Vol. 267, 114684. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114684.

Rezania, J. (2022). A study of Digitalization in Building Engineering. The First Conference of Architecture, Civil Engineering, Agriculture, Mining and Environment_ Leeds, England. Persian. DOI: https://civilica.com/doc/1625355/.

Rezania, J. (2021). Study of Engineering Behavior of Staggered Truss Systems. 4th.International Conference & 5th.national Conference on Civil Engineering, Architecture, Art and Urban Design, Tabriz – IRAN. Persian. Doi: https://civilica.com/doc/1427511/.

Rezania, J. (2020). Equilibrium and Collapse in Spatial Structure. Arkan Danesh. Persian.

Rezania, J. & Torkzadeh, P. (2019). Evaluation of progressive collapse performance in double layer diamatic domes. Civil Engineering Journal. Vol. 5, No. 10, 2167-2179. DOI: 10.28991/cej-2019-03091402.

Rezania, J. & Torkzadeh, P. (2015). Evaluation of Progressive collapse in double layer spatial domes. Shahid Bahonar university of Kerman. Persian.

Rezania, J. & Torkzadeh, P. (2015). Performance Assessment of Dome Space Structures through Progressive Collapse. 2nd International & 6nd national Conference on Structure and earthquake. Kerman, IRAN. Persian. DOI: https://civilica.com/doc/407149.

Rodrigues da Silva, L., Torii, A., & Beck, A. (2023). Hyperstatic and redundancy thresholds in truss topology optimization considering progressive collapse due to aleatory and epistemic

uncertainties. Probabilistic Engineering Mechanics. Vol. 71, 103384. https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2022.-
103384.

Sun, H., Burton, H., & Huang, H. (2021). Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review. Journal of Building Engineering. Vol. 33, 101816. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101816.

Wang, P., Zhong, C., Fan, S., Li, D., Zhang, S., Liu, P., Ji, Y., Fan, H. (2023). Prediction of Collapsing Strength of High-Strength Collapse-Resistant Casing Based on Machine Learning. Processes. 11(10):3007. https://doi.org/10.3390/pr11103007.

Wang, S., Cheng, X., Li, Y., Song, X., Guo, R., Liang, Z., & Zhang, H. (2023). Rapid visual simulation of the progressive collapse of regular reinforced concrete frame structures based on machine learning and physics engine. Engineering Structures. Vol. 286, 116129. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116129.

Xie, Y., Ebad Sichani, M., Padgett, JE., & DesRoches, R. (2020). The promise of implementing machine learning in earthquake engineering: A state-of-the-art review. Earthquake Spectra. 36(4):1769-1801. doi:10.1177/8755293020919419.

Zhang, Q., Zhao, Y., Kolozvari, K., & Xu, L. (2022). Reliability analysis of reinforced concrete structure against progressive collapse. Reliability Engineering & System Safety. Vol. 228, 108831. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108831.

Zhu, Y.F., Yao, Y., Huang, Y., Chen, Ch., Zhang, H.Y., & Huang, Z. (2022). Machine learning applications for assessment of dynamic progressive collapse of steel moment frames. Structures. Vol. 36, 927-934. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.067.