

Using Machine Learning Algorithms in the Early Stages of Design, in Initial Estimations for Structural Elements' Sizes in Conventional Residential Buildings in Tehran

Seyed Amir Mohammad Rabbani Jalali

MSc. Architecture Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Mohammad Rajaian Hoonejani

PhD Candidate, Michigan State University East Lansing, United States

Mohammad Tahsildoost, PhD.* 

Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Roham Afghani Khoraskani, PhD.

Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: February 05, 2023

Accepted: May 28, 2023

(Pages: 55-74)

Keywords:

The early stages of design, structural sizes estimation, Machine learning, Artificial neural network, support vector machine.

Seyed Amir Mohammad Rabbani Jalali, Mohammad Rajaian Hoonejani, Mohammad Tahsildoost, Roham Afghani Khoraskani, 2025. Using Machine Learning Algorithms in the Early Stages of Design, in Initial Estimations for Structural Elements' Sizes in Conventional Residential Buildings in Tehran. *Soffeh* 35 (3): 55-74

DOI: [10.48308/SOFFEH.2025.230563.1240](https://doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.230563.1240)

Abstract:

Background and objectives: Estimating and determining the sizes of structural components in the early stages of design is always one of the important



SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 35, Issue 3, No. 110, 2025

 ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author Email Address: m_tahsildoost@sbu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.230563.1240>

issues architectural designers are involved with. It is largely based on personal experience carried out by people without engineering background. This is highly erratic and inefficient, forcing designers to rely on assumptions. This, in turn, can result in reworkings and increased costs. On the other hand, whilst a large variety of analyses and design methods are used to determine sizes, there is no decision-making method for early design stages. It is not possible, therefore, to consider options that require precision at this stage. The main goal of this research is to obtain a method and a tool to estimate the approximate sizes of structural components without the need to use time-consuming and complex formulas or the use of simulation software: a tool that can reduce the decision-making gap between the designer and the structural engineer and prevent any possible subsequent lawsuits.

Materials and methods: In general, structural decision-making and design involve many variables such as choosing the type of structural system, choosing the type of materials, appropriate structural profile, applicable regulations, and occasionally other considerations. Attempts were made in this study to include some of these important considerations in a rather limited framework to achieve a decision-making tool that will bring the architect and the structural engineer closer to each other. To start, a set of simulated structures in different states was created, followed by creation of machine learning models with Artificial Neural Network and Support Vector Machine. Consequently, it became clear that the Artificial Neural Network is better than the Support Vector Machine when it comes to predictions for steel structures, with average R^2 score of 0.93 and average MAPE of 0.05. In concrete buildings, the Support Vector Machine algorithm performed better with R^2 score of 0.93 and average MAPE of 0.06.

Results and conclusion: For about 50 years, there have been various rough diagrams to guide the user, providing very simple and practical information on the initial estimation of sizes based on experience and some analysis. While it is important to know the theories behind these elements, it is also important to be able to quickly assess the consequences of choosing a particular span, column arrangement, or loading. With the aim of helping engineers, and especially architectural designers, this study introduced a tool, that can efficiently be used to take inputs such as land dimensions, span dimensions, number of stories, and type of materials used to produce an initial estimate that is close to what is achieved by structural analysis and design tools. The methodology used in this study can be expanded to include variables such as different materials used in the construction industry, examining complex architectural forms and structures with irregular arrangements of structural members, increasing the number of floors, and examining roofs with different structures.

بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مراحل اولیه طراحی؛ نمونه موردی: تخمین اولیه ابعاد عناصر سازه‌ای در ساختمان‌های متداول

مسکونی شهر تهران^۱

محمد تحصیلدوست^۴

سیدامیر محمد ربانی جلالی^۲

دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمد رجاییان هونجانی^۳

رهام افغانی خراسکانی^۵

استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

دریافت: ۱۶ بهمن ۱۴۰۱

پذیرش: ۷ خرداد ۱۴۰۲

(صفحه ۵۵-۷۴)

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول و دوم است با عنوان‌های تدوین روش تخمین ابعاد اجزای سازه‌ای؛ نمونه موردی: ساختمان‌های متداول مسکونی قاب خمشی فولادی شهر تهران، و تدوین روش تخمین ابعاد اجزای سازه‌ای؛ نمونه موردی: ساختمان‌های متداول مسکونی قاب خمشی بتنی شهر تهران که با راهنمایی نگارندگان سوم و چهارم در دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تیرماه سال ۱۴۰۰ دفاع شده‌اند.

۲. کارشناسی ارشد رشته فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
s.rabbanijalali@mail.sbu.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری معماری، دانشگاه ایالتی میشیگان، ایست لنسینگ، ایالات متحده
m.rajaianhoonejani@mail.sbu.ac.ir

۴. نویسنده مسئول
m_tahsildoost@sbu.ac.ir
5. r_afghani@sbu.ac.ir

سیدامیر محمد ربانی جلالی، محمد رجاییان هونجانی، محمد تحصیلدوست، رهام افغانی خراسکانی. ۱۴۰۴. بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مراحل اولیه طراحی؛ نمونه موردی: تخمین اولیه ابعاد عناصر سازه‌ای در ساختمان‌های متداول مسکونی شهر تهران. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی صفحه ۳۵ (۳): ۷۴-۵۵.

کلیدواژه‌گان: مراحل اولیه طراحی، تخمین ابعاد سازه، یادگیری ماشین، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان.

چکیده

سازه‌ای بین طراح و محاسب سازه را بکاهد و از بسیاری از دعاوی در زمان ساخت جلوگیری کند.

مواد و روش‌ها: به‌طور کلی، فرایند تصمیم‌گیری و طراحی سازه‌ای شامل متغیرهای متعدد و متنوعی نظیر انتخاب نوع سیستم سازه‌ای، انتخاب نوع مصالح، انتخاب مقاطع مناسب سازه‌ای، انتخاب آیین‌نامه‌های مناسب هر منطقه، و سایر عواملی است که این فرایند را پیچیده‌تر و انتخاب پاسخ بهینه و مناسب را دشوارتر می‌کند. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا برخی از این پارامترهای مهم در قالب چارچوبی نسبتاً محدود گنجانده شود تا ابزاری تصمیم‌یار عرضه گردد که بتواند فاصله میان معمار و مهندس سازه را از منظر دیدگاه مشترک بکاهد. در گام نخست، یک مجموعه داده از سازه‌های شبیه‌سازی شده در حالت‌های مختلف ایجاد گردید و در گام بعد، چندین مدل یادگیری ماشین با استفاده از دو الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان توسعه داده شد. نتایج حاکی از آن است که در ساختمان‌های فولادی، الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی نسبت به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری دارد و میانگین ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۳ و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) برابر با ۰/۰۵ حاصل شده است. درحالی‌که در ساختمان‌های بتنی، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان عملکرد مطلوب‌تری نشان

اهداف و پیشینه: تخمین و تعیین ابعاد اجزای سازه در مراحل اولیه طراحی همیشه از مسائل مهمی است که طراحان معمار با آن درگیر هستند. این موضوع تا حد زیادی بر اساس تجربه شخصی و در اکثر موارد از سوی افراد دارای اندک پشتوانه علمی صورت می‌پذیرد. این روش دارای خطای زیاد و بازدهی بسیار پایین است که طراحان را وامی‌دارد تا با زمان محاسبه ابعاد دقیق اجزای سازه، متکی بر مفروضات خود، طراحی و ساخت را پیش ببرند. تخمین اشتباه می‌تواند منجر به دوباره‌کاری و افزایش هزینه‌های پروژه شود. از طرف دیگر، اگرچه امروزه برای تعیین ابعاد سازه‌ها از ابزارهای تحلیل و طراحی سازه با تنوع و گستردگی بسیار بالا استفاده می‌شود، اما برای تصمیم‌گیری در مراحل اولیه طراحی، روش و ابزار خاصی وجود ندارد. در نتیجه امکان مقایسه گزینه‌های مختلف که لازمه طراحی دقیق و کارآمد است، در این مرحله ممکن نیست. هدف اصلی در اینجا دستیابی به روش و ابزاری برای تخمین ابعاد حدودی اجزای سازه‌ای (در این پژوهش سازه‌های قاب خمشی فولادی و بتنی)، بدون نیاز به استفاده از فرمول‌های زمان‌بر و پیچیده یا استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است؛ ابزاری که بتواند فاصله تصمیم‌گیری در مورد اجزای

فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی‌وپنجم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پیاپی: ۱۱۰

*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author Email Address: m_tahsildoost@sbu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.230563.1240>



پرسش‌های پژوهش

۱. چگونه می‌توان به الگوریتمی سریع، دقیق، و قابل اطمینان به منظور تخمین بهینه ابعاد اجزای سازه‌ای دست یافت؟
۲. کدام الگوریتم یادگیری ماشین برای فرایند تخمین ابعاد ساختمان‌های فولادی و بتنی متداول مسکونی خطای کمتری دارد؟

داده و ضریب تعیین 0.93 و میانگین درصد خطای مطلق 0.06 را کسب کرده است.

نتایج و جمع‌بندی: در حدود پنجاه سال گذشته، نمودارهای تقریبی مختلفی برای راهنمایی کاربران عرضه شده است که اطلاعات بسیار ساده و کاربردی را برای برآورد اولیه ابعاد بر اساس تجربه و برخی تحلیل‌ها در اختیار قرار می‌دهد. اگرچه آگاهی از مبانی نظری این اجزا اهمیت دارد، توانایی ارزیابی سریع پیامدهای انتخاب یک دهانه خاص، آرایش ستون‌ها، یا بارگذاری مشخص نیز بسیار حایز اهمیت است.

در این پژوهش با هدف کمک به جامعه مهندسی، به‌ویژه طراحان معماری، ابزاری معرفی شده است. ابزاری که با دریافت ورودی‌هایی نظیر ابعاد زمین، ابعاد دهانه‌ها، تعداد طبقات، و نوع مصالح مورد استفاده، می‌تواند برآورد اولیه‌ای عرضه کند که به نتایج حاصل از تحلیل و طراحی سازه‌ای بسیار نزدیک باشد، اما زمان و هزینه کمتری نیاز دارد. متدولوژی به‌کاررفته در این مطالعه قابلیت گسترش دارد و می‌توان با افزودن متغیرهایی نظیر انواع مختلف مصالح مورد استفاده در صنعت ساخت‌وساز، بررسی فرم‌ها و سازه‌های معماری پیچیده با آرایش‌های نامنظم اعضای سازه‌ای، افزایش تعداد طبقات مورد بررسی، و همچنین با بررسی سقف‌هایی با سیستم‌های متفاوت، دامنه کاربری آن را توسعه داد.

مقدمه

در طراحی سازه‌ای، روش‌شناختی برای رسیدن به پایداری، مقاومت، و استحکام سازه بررسی می‌شود. هدف اصلی در تحلیل و طراحی سازه‌ای رسیدن به سازه‌ای است که در طول عمرش در برابر همه نیروهای وارده، بدون خرابی، مقاوم باشد. سازه باید بتواند بارها را یا منتقل و یا تحمل کند و یا به‌طور هم‌زمان هردو کار را انجام دهد. اگر سازه به‌طرز نادرست طراحی شده باشد، یا اگر بارهای واردشونده بر سازه فراتر از مشخصات طراحی باشند، عملکرد سازه مورد انتظار نخواهد بود و عواقب جدی در پی دارد. سازه‌ای که درست طراحی شود، احتمال خرابی‌های پرهزینه را کاهش می‌دهد.^۶

روند طراحی در قدم اول با طراحی اولیه، شامل انتخاب مصالح مناسب سازه‌ای و سیستم‌های مناسب برای مقابله با بارهای ثقلی و جانبی و همچنین ایجاد شکل و فرم اولیه برای سیستم سازه‌ای می‌گردد. تعیین اندازه اولیه اعضای مثل تیرها و ستون‌ها نیز در این مرحله صورت می‌گیرد. در این مرحله، ابتدا چند گزینه سازه‌ای انتخاب و عملکرد و هزینه همه آنها با هم مقایسه می‌شود. این مرحله می‌تواند مهم‌ترین قدم مؤثر بر کارایی و نتیجه نهایی باشد. بعد از انتخاب سیستم سازه‌ای مناسب و ابعاد تخمینی و مصالح مورد

6. N. Anwar and F.A. Najam, "Structures and Structural Design", in *Structural Cross Sections*, 2017.

7. Ibid.

8. D. Haber and S. Karshenas, "An Expert System for Conceptual Design of Buildings", *Proceedings of the 4th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, November 2017.

9. S. Barg, et al., "An Analytical Method to Estimate the Total Installed Cost of Structural Steel Building Frames during Early Design", *Journal of Building Engineering*, 15 (2018): 41-50.

10. H. Mote and S. R. Satish Kumar, "Use of Artificial Neural Network for Initial Design of Steel Structures", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660 (1) (2019).

11. Y. Jung and M. Joo, "Building Information Modelling (BIM) Framework for Practical Implementation". *Automation in Construction*, 20(2) (2011): 126-133.

12. Barg, et al., "An Analytical Method to Estimate the Total Installed Cost of Structural Steel Building Frames during Early Design", 41-50.

13. C. Málaga-Chuquitaype, "Machine Learning in Structural Design: An Opinionated Review", *Frontiers in Built Environment*, 8 (February 2022): 1-12.

14. F. Tong and Xila Liu, "Samples Selection for Artificial Neural Network Training in Preliminary Structural Design", *Tsinghua Science and Technology*, 10(2) (2005): 233-239.

15. Barg, et al., "An Analytical Method to Estimate the Total Installed Cost of Structural Steel Building Frames during Early Design", 41-50.

شخصی افراد در این مرحله برای رسیدن به پاسخ نهایی، یک روش معمول است. رسیدن به راه حل مناسب در زمانی کمتر و یک تخمین اولیه خوب به طرز مؤثری می تواند یاری کننده باشد.^{۱۰}

در ابتدای فرایند طراحی سازه، مهندسان معمولاً هندسه کلی را از طریق مدل سازی اطلاعات ساختمان^{۱۱} فراهم می کنند و وظیفه آنها عرضه مشخصات آرایش و توزیع عناصر سازه ای، از جمله اجزاء، مصالح، و مقاطع آنهاست. طبعاً هرچه ایده اولیه در این مرحله به طرح بهینه نزدیک تر باشد، تغییرات بعدی کمتر و بهینه سازی طرح با سرعت و کارایی بالاتری انجام خواهد شد. فرایند طراحی سازه های ساختمانی در چارچوب بهینه سازی سازه، معمولاً به سه گام / بخش تقسیم می شود: (۱) توپولوژی که تصمیم گیری در مورد تعداد و نحوه اتصال اعضاست؛ (۲) شکل، که شامل موقعیت و چینش / آرایش اعضا می شود؛ (۳) ابعاد، که تعریف مقاطع مناسب برای اعضای متناسب با بارگذاری را شامل است.^{۱۲} معمولاً به دلیل ملاحظات معماری، هم از ابعاد کمتر و هم از تعداد کمتر اجزای سازه ای بیشتر استقبال می شود، و به همین دلیل حالات مختلف چیدمان، به خاطر ملاحظات اولیه طراحی، نادیده گرفته می شوند.^{۱۳}

اگر در مرحله ای از فرایند طراحی تصمیم اشتباهی گرفته شود، اصلاح آن تصمیم در مرحله بعد علاوه بر افزایش هزینه منجر به افزایش زمان فرایند طراحی نیز می گردد.^{۱۴} در فرایند طراحی سنتی عموماً عدم امکان تخمین بهینه و همچنین عدم قطعیت در اطلاعات وجود دارد و برای رسیدن به یک جواب مناسب باید زحمت فراوانی کشیده شود. استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، و یادگیری عمیق می تواند در این قسمت کاربرد و تأثیر قابل توجهی داشته باشد.^{۱۵} همان طور که اشاره شد، طراحی سازه، چه فولادی و چه بتنی، در مراحل اولیه طراحی بیشتر مبتنی بر تجربه شخصی

نظر در مرحله پیشین، مرحله بعد تعیین پاسخ مورد انتظار سازه در برابر بارهای احتمالی است. استفاده از ابعاد تخمینی (که در مرحله اولیه طراحی به دست می آید) و یک مدل سازی بی نقص در نرم افزارهای طراحی، لازمه شروع فرایند طراحی است. مرحله آخر شامل جزئیات و طراحی اتصال با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل است. اطلاعات طراحی به شکلی مناسب برای ساخت واقعی آماده می شوند. نقشه ها و برنامه کامل برای ارسال به مهندسان سایت برای اجرای مناسب در محل آماده می شود. بدیهی است که مصالح، ابعاد، و خصوصیات سطح مقطع اعضا، جوهره کل فرایند طراحی است.^۷

عمده فعالیت های طراحی سازه صرف جزئیاتی مانند تعیین ابعاد تیرها و ستون ها می شود. در بسیاری از مواقع بخش بسیار کمتری از طراحی در مرحله اول، یعنی مرحله طراحی اولیه، اجرا می شود، در حالی که عملکرد سازه، هم از منظر عملکردی و هم اقتصادی، عمدتاً در مرحله طراحی اولیه تعیین می شود، و تصمیم گیری در مراحل بعد طراحی بیشتر مربوط به پرداختن به جزئیات است. مرحله طراحی اولیه را به طور کلی می توان این گونه توصیف کرد: «در مرحله ای که همه داده های مربوطه جمع آوری و ارزیابی می شوند، هدف پروژه مشخص و پیگیری سیستم های اصلی پروژه تعیین می شود». هدف نهایی طراحی اولیه، بهینه سازی اهداف تعیین شده برای عملکرد بهینه است؛^۸ به طور مثال فرایند طراحی در قاب های فلزی را می توان طراحی اولیه، توسعه طراحی، و جزئیات اتصال معرفی کرد.^۹ فرایند طراحی سازه به طور معمول کاری پیچیده و زمان بر و دارای مشخصه های ثابت و متغیری است. شروع این فرایند عموماً با حدس و گمان و عرضه راه حل های عموماً متکی بر تجربه همراه است. رسیدن به پاسخ نهایی با مدون کردن راه های اولیه و فیلتر کردن این راه ها به صورت مکرر تا رسیدن به بهینه ترین پاسخ ممکن ادامه می یابد. استفاده از علم و تجربه

تغییرات طراحی دیرتر در فرایند معرفی شوند، هزینه‌شان افزایش می‌یابد.^{۲۱}

با توجه به مطالب پیش‌گفته، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از قواعد سرانگشتی یک منبع مهم و حیاتی برای طراح در مراحل اولیه طراحی به‌شمار می‌رود؛ چراکه طراح لازم است ابزاری هوشمند برای تصمیم‌گیری در مراحل اولیه داشته باشد و از او این انتظار می‌رود که، با آگاهی از این موضوع که تصمیمات گرفته‌شده در مراحل مختلف ممکن است در اتخاذ تصمیمات آتی و یا حتی تصمیمات قبلی مؤثر باشد، بتواند بدون حتی حداقل بهره‌گیری از نرم‌افزارهای رایانه‌ای، به راه حلی مناسب در مراحل اولیه دست یابد.^{۲۲}

امروزه ابزارهای متعدد این امکان را به طراحان معمار و سازه داده است که حتی در مسائل چندهدفه^{۲۳} با استفاده از تنظیمات از قبل تعیین‌شده و چند کلیک به یک راه حل برسند. بر اساس مطالعات دانشگاه کمپیناس^{۲۴}، مقایسهٔ زبان‌های برنامه‌نویسی متنی^{۲۵} و بصری نشان داد که زبان برنامه‌نویسی بصری می‌تواند نتایج بهتری را برای معماری به‌همراه داشته باشد.^{۲۶} در نتیجه انتظار می‌رود ابزارهایی که برای طراحی در

افراد و روش آزمون و خطاست.^{۱۶} با توجه به اینکه در طول سالیان گذشته در مورد طراحی سازه‌های فولادی و بتنی مطالعهٔ بسیاری شده است، اگر اندازهٔ مقاطع در مراحل اول با تخمین مناسبی انتخاب نگردد، فرایند طراحی زمان بیشتری را خواهد گرفت. در «ت ۱» تأثیرات تغییرات و تصمیمات مهندسی در مراحل مختلف فرایند توسعه و ساخت مشاهده می‌شود.^{۱۷}

تصمیمات گرفته‌شده در مراحل اولیهٔ طراحی، در مقایسه با تصمیمات بعدی، اثر قابل‌توجهی در هزینهٔ طراحی پروژه دارد. همان‌طور که در «ت ۲» مشاهده می‌شود، در طول طراحی مراحل اولیهٔ سازهٔ فلزی، ۳۷٪ از کل هزینهٔ پروژه برآورد می‌شود و هزینه‌های باقی‌مانده برای مراحل بعدی در نظر گرفته می‌شود.^{۱۸}

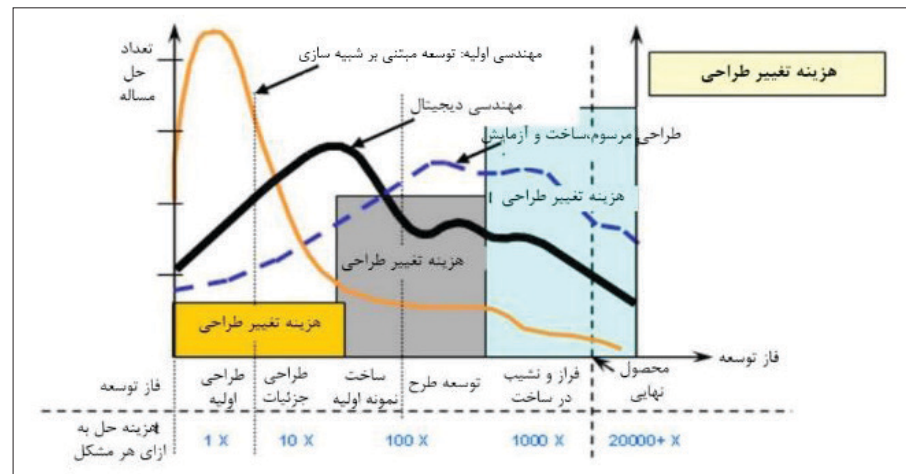
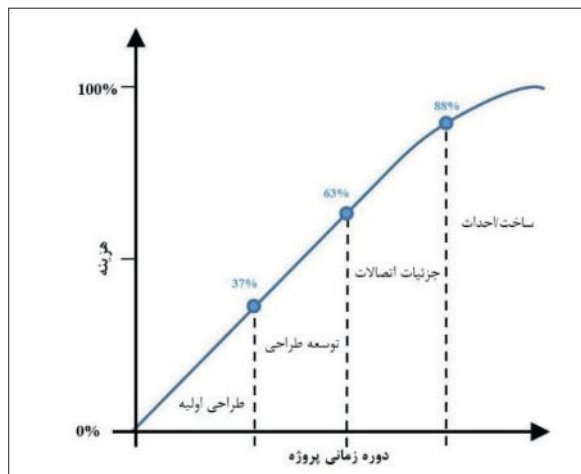
بر اساس یک تحقیق در سال ۲۰۰۹، نقاط اصلی اختلافات بین مهندس سازه و معمار، درک محدود سازه از سوی معماران و دخالت دیر هنگام مهندسان سازه در پروژه‌هاست.^{۱۹} از سوی دیگر، تغییر طراحی باعث افزایش هزینه و زمان طراحی و ساخت و گاهی اوقات تا بخش قابل‌توجهی از مبلغ و مدت قرارداد می‌شود.^{۲۰} در منابعی دیگر ثابت شده است که هر قدر

ت ۱ (راست). تأثیرات تغییرات و تصمیمات مهندسی در مراحل مختلف فرایند توسعه و ساخت، مأخذ:

Haapio, Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures Based on the Process Approach.

ت ۲ (چپ). هزینه‌های قاب فولادی در فازهای مختلف پروژه، مأخذ:

Barg, et al., "An Analytical Method to Estimate the Total Installed Cost of Structural Steel Building Frames during Early Design".



16. Of Inistry, Tudy of, Cheme In, Esign of, and Flood Protection. "S Ultanate of O Man M Inistry of R Egional P Art B: P Reliminary D Esign of Flood Protection Dams a Ppendix : P Reliminary D Esign D Rawings". July 2009, 184-192.
17. J. Haapio, *Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures Based on the Process Approach* (Tampere University of Technology, 2012).
18. R. F. M. H. G. A. Evers. 2000. "Cost Based Engineering and Production of Steel Constructions", in *Steel Design Codes-Fourth International Workshop on Connections in Steel Structure*, 2000.
19. A.W. Charleson and S. Pirie, "An Investigation of Structural Engineer-Architect Collaboration", *SESOC Journal*, 22 (1) (2009): 97-104.
20. K. Ehrlenspiel, et al., *Cost-Efficient Design*. Ed. Mahendra S. Hundal (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007).
21. A.S.T. Chang, et al., "Reasons and Costs for Design Change during Production", *Journal of Engineering Design*, 22(4) (2011): 275-289.

همچنین به روش‌های بهینه‌سازی و طراحی پارامتریک تلاش شد معیارهای نزدیک به آنچه معماران در مراحل اولیه طراحی طلب می‌کنند، عرضه شود.^{۲۵}

اخیراً حمیدای و همکاران^{۲۶} سیستمی را پیشنهاد کردند که در آن از انواع بهینه‌سازی سازه و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای بهبود همکاری معماران و مهندسان سازه استفاده می‌شود. اما در عمل، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی‌های عملکردی که در این سیستم بر آن تکیه می‌شود، اغلب زمان‌برتر از آن هستند که در مراحل اولیه طراحی به کار گرفته شوند. تزانیدیس و همکاران^{۲۷} از مدل‌های جانشین (ساروگیت)^{۲۸} برای بهبود سرعت مدل‌سازی استفاده کردند. آنها شش نوع مدل جانشین را بر اساس دقت و زمان توسعه و الگوریتم‌های تقریب برای طراحی مفهومی سازه و بهینه‌سازی مقایسه کردند.

در سال‌های اخیر، روش‌های یادگیری ماشین در مهندسی سازه بیشتر امتحان شده‌اند. محمد ای. حق^{۲۹} با ورودی‌هایی مانند میزان فولاد تقویتی، نوع ستون، میزان مقاومت ستون، مقدار بار محوری، و مقدار ممان یک مدل شبکه عصبی پس انتشار^{۳۰} پرسپترون چندلایه^{۳۱} را برای طراحی ستون و تیر بتنی مسلح‌شده معرفی کرد. او در پژوهش خود استفاده از یک مدل شبکه عصبی محاسبات گسترده در طول بهینه‌سازی فولاد، به‌ویژه برای ستون‌های با خمش دوماحوری^{۳۲}، را به حداقل رساند. مت و کومار^{۳۳} نیز دو مدل شبکه عصبی مصنوعی به‌صورت رگرسیونی و کلاسه‌بندی با هدف طراحی اولیه بهینه سازه فلزی را با استفاده از نبشی^{۳۴} متناسب با استانداردهای طراحی سازه در هند عرضه کردند که مدل رگرسیونی دارای تابع هزینه کمتر و خطای کمتر هم برای ضخامت و هم برای عرض بال بود.

کانیلماز و همکاران^{۳۵} یک ابزار طراحی اولیه چندمعیاره را با کمک الگوریتم ژنتیک با استفاده از الگوریتم «NSGAI»^{۳۶}

مراحل اولیه استفاده می‌شود، ابزارهای منعطف و ساده و بصری باشند تا کاربر بتواند به‌آسانی، متناسب با مرحله‌ای که طراحی در آن هست، نتیجه دلخواه را به‌دست آورد.^{۳۷} اگرچه ابزارهای شبیه‌سازی جوابی با جزئیات و دقیق به کاربر می‌دهد، اما این ابزارها ورودی‌های زیاد و دقیق نیز دریافت می‌کنند. دستیابی به ابزارهای منعطف هوش مصنوعی (AI)^{۳۸} که ترکیبی از الگوریتم، ریاضی، خلاقیت، و نتیجه تلفیق روش‌های مختلف است، نقش مهمی در چندین حوزه کاربردی دارد.^{۳۹} ظهور قابلیت‌های جمع‌آوری و پردازش کم‌هزینه داده‌ها انگیزه‌ای جدید و درجه‌ای از فراگیر شدن را به راه حل‌های مهندسی مبتنی بر هوش مصنوعی بخشیده است.^{۴۰} برخی ابزارها که بر پایه هوش مصنوعی ساخته شده‌اند، ورودی‌های کمتر دریافت می‌کنند و با محدود کردن برخی ویژگی‌ها، خروجی قابل توجهی را می‌دهند. برخی از این ابزارها پاسخ‌های دقیق به اندازه ابزارهای شبیه‌سازی می‌دهند.^{۴۱} همین مقدار دقت خروجی می‌تواند باعث درک بهتر سازه و مقادیر سازه‌ای از طرف مهندس معمار و کم کردن شکاف بین مهندس معمار و مهندس سازه شود، که قبلاً اشاره شد.

۱. مبانی نظری

پژوهشگران مختلفی با استفاده از هوش مصنوعی فرایند طراحی سازه را در تصمیم‌گیری‌های نهایی ارتقا داده‌اند.^{۴۲} اما در زمینه طراحی مفهومی در فازهای اولیه طراحی، همچنان وجود این‌گونه ابزارها بیش از پیش احساس می‌شود، با معرفی هوش مصنوعی در زمینه مهندسی،^{۴۳} تعدادی ابزار در میانه دهه ۱۹۸۰ بر پایه سیستم‌های خبره^{۴۴} توسعه یافت. اگرچه در آن زمان موفقیت و قابلیت‌های سیستم‌های خبره اثبات شد، اما وابستگی این سیستم‌ها به دانش تهیه‌شده انسان و همچنین مشکلات در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، نقش آنها را کمرنگ‌تر کرد.

22. J.L. Ruddy and S.A. Ioannides, "Rules of Thumb for Steel Design". *Proceedings of the 2004 Structures Congress - Building on the Past: Securing the Future*, February 2004, 1683-1689.
23. multi objective
24. University of Campinas
25. textile
26. G. Celani and Carlos Eduardo Verzola Vaz, "CAD Scripting and Visual Programming Languages for Implementing Computational Design Concepts: A Comparison from a Pedagogical Point of View". *International Journal of Architectural Computing*, 10(1) (2012): 121-137.
27. N.C. Brown and C.T. Mueller, "Automated Performance-Based Design Space Simplification for Parametric Structural Design", *Proceedings of the IASS Annual Symposium*, 2017.
28. Artificial Intelligence
29. M. Jalal, et al., "Application of Genetic Programming (GP) and ANFIS for Strength Enhancement Modeling of CFRP-Retrofitted Concrete Cylinders", *Neural Computing and Applications*, 23(2) (2013): 455-470.

برای بهینه‌سازی معیارهای طراحی مختلف با در نظر گرفتن الزامات مهندسی، معماری، و محیط به‌طور هم‌زمان، در یک فرایند یکپارچه ایجاد کرده‌اند. ورودی‌های ابزار ابعاد هندسه مانند ابعاد ساختمان در طول و عرض، مصالح، بارگذاری، و وضعیت زمین هستند. مصالح اصلی برای پیشنهادات انتهایی، سازه فلزی و بتنی مسلح شده است که همه این متغیرها بر اساس هزینه و میزان انتشار کربن دی‌اکسید بهینه‌یابی می‌شود. آنها در انتها یک نمودار از جواب‌های متناسب با ورودی‌ها را عرضه می‌کنند که کاربر بتواند با کلیک کردن بر روی هر کدام از پیشنهادات، سازه ترسیم شده توسط کتابخانه‌های مصورسازی پایتون را مشاهده کند.

از دیگر کارهایی که در این حوزه و برای طراحی در مراحل اولیه با استفاده از یادگیری عمیق انجام شده است، پژوهش آمپانوس و همکاران^{۴۷} است که در آن ابزار «The Approximate Framer»، با استفاده از شبکه عصبی پیچشی، محل قرارگیری و نوع ستون (ستون‌های تکی، ستون‌های گوشه، و ستون‌های درون دیوار) را بر روی اسکیس اولیه از کاربر نشان می‌دهد. یکی از ویژگی‌های این سیستم این است که هدف آن تخمین کامل سازه در همان شروع کار نیست، بلکه استفاده از یک رویکرد تکرارشونده است که در آن شبکه عصبی به‌تدریج راه حل را در صورت لزوم گسترش می‌دهد. به این ترتیب، شبکه عصبی تغییرات بهتری در شناسایی الگوها در یک منطقه کوچک ساختمان در هر مرحله دارد؛ با این حال، این رویکرد همچنین مستعد تجمع خطا برای سازه‌های بزرگ است، اگرچه این خطا به اندازه مجموعه داده یادگیری^{۴۸} بستگی دارد. سازه پیشنهادی در این ابزار قاب خمشی فولادی در زوایای راست گوشه است. محدودیت‌های اصلی این کار مربوط به عدم پیشنهاد ابعاد سازه و همچنین مغشوش بودن محل قرارگیری ستون در سازه‌های بزرگ است.

یکی دیگر از کارهای جذاب در این حیطه را چانگ و چنگ^{۴۹} انجام داده‌اند، آنها قاب ساختمان را یک گراف باز تعریف کرده‌اند و با استفاده از گراف شبکه عصبی که توسط نتایج شبیه‌سازی‌های قبلی شکل یافته است، ستون و تیر بهینه را پیشنهاد می‌دهند. این تحقیق یکی از اولین تحقیق‌ها در استفاده از شبکه عصبی گراف^{۵۰} در حوزه بهینه‌سازی ساختمان است. در این تحقیق نتایج با خروجی‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌شود و سرعت زیاد این مدل چشمگیر است. محدودیت‌های اصلی این کار مربوط به فقدان اثرات پیوستگی دال و برخورد با اسکلت ساختمان به‌منزله ورودی است.

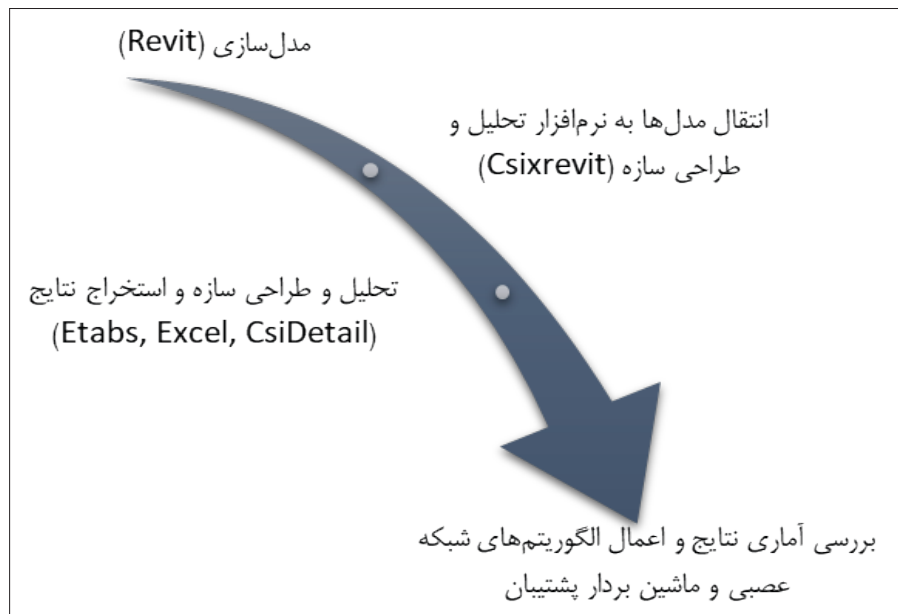
۲. موضوع و هدف تحقیق

همان‌طور که در ادبیات تحقیق مشاهده شد، با پررنگ‌تر شدن حضور الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، ابزارهای مختلفی در فازهای مختلف طراحی و تصمیم‌گیری در حوزه ساخت‌وساز معرفی شده‌اند. همان‌گونه که اشاره شد، حجم عمده‌ای از این ابزارها برای ارتقای تصمیم‌گیری و آشکارسازی جزئیات بیشتر در مراحل نهایی طراحی استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر سعی بر آن است که ابزاری جهت تصمیم‌گیری در مرحله اول طراحی معرفی شود که کاربران به جای شروع از مرحله صفر و «صفحه خالی»، به یک ارزیابی سریع در مورد تصمیم خود در مورد انتخاب سازه، هزینه، میزان مصالح مورد نیاز، و همچنین توصیه‌های مختلف طراحی بر اساس پارامترهای ورودی برسند و بنابراین امکان انتخاب بهینه‌ترین حالت از بین گزینه‌های مختلف ایجاد شود. این ابزار ابعاد اولیه مقاطع سازه‌ای در سازه‌های فولادی و بتنی با قاب خمشی و میزان مصالح مصرفی (مثل وزن و حجم بتن، وزن فولاد، وزن میلگرد) را فراهم می‌کند. همچنین نتایج این پژوهش خواهد توانست به کارهای بعدی پژوهشگران در حوزه معماری، سازه، و

30. Málaga-Chuquitaype, "Machine Learning in Structural Design: An Opinionated Review", 1-12.

31. N. Forouzandeh, et al., "A Review of Web-Based Building Energy Analysis Applications", *Journal of Cleaner Production*, 306 (2021):127251.

ت ۳. روش انجام پژوهش.



که منجر به کم شدن فاصله معمار و مهندس سازه از یکدیگر شود.

دامنه هدف در این پژوهش در بخش سیستم های ساختمانی بر روی سیستم قاب خمشی هم در سازه های فولادی و هم در سازه های بتنی است. دامنه تغییرات دهانه ها از ۳ متر تا ۷/۵ متر و دامنه تعداد طبقات از ۳ طبقه تا ۷ طبقه گزیده شده اند. تخمین در مورد اندازه اولیه عناصر سازه ای از بین مقاطع سازه ای همچون مقاطع مربعی برای ستون های سازه فلزی و مقاطع [شکل با ضخامت ورق های متنوع برای تیرها صورت گرفته است. در بخش سازه های بتنی همچنین سعی شده است که با بهره گیری از جای گذاری حداکثر میلگرد در مقاطع و همچنین انجام شبیه سازی ها با دو نوع بتن متفاوت، دامنه بررسی و همچنین انتخاب گزینه های متنوع افزایش یابد. فاصله بین دهانه ها از ۳ متر تا ۷/۵ متر با گام های ۰/۵ متری و مساحت زمین با توجه به تغییرات فاصله بین دهانه ها از ۱۳۲ تا

ساختمانی در جهت توسعه ابزارهای بهینه سازی تصمیم گیری پیشرفته تر در مراحل اولیه طراحی کمک کند. در این مقاله به جزئیات ابزار یادشده پرداخته می شود، که شامل معرفی لایه زیرین آن است، که همان الگوریتم های استفاده شده در آن، ورودی ها، و خروجی ها، و متغیرهای مستقل و وابسته هستند.

۳. روش پژوهش

ابزاری که در این پژوهش دنبال می شود، باید تسهیلگر عرضه اطلاعات کاربردی به جامعه هدف پژوهش در مرحله تصمیم گیری در قدم های اولیه فرایند طراحی و ساختمانی باشد. در «ت ۳» روند انجام این کار تشریح شده است. کاربران در ابتدا اطلاعات مربوط به ساختمان خود را وارد می کنند که این اطلاعات شامل طول و عرض زمین، نوع مصالح مد نظر، تعداد طبقات، ارتفاع کف تا کف طبقات، ضخامت ورق ستون و تیر در سازه های فولادی، و رده مقاومتی بتن در سازه بتنی است. خروجی ابزار شامل ابعاد اولیه تیر و ستون ها در هر طبقه، وزن سازه، حجم بتن، متراژ فولاد مصرفی، و در نهایت تخمین اولیه بهینه شده ای از هزینه سازه است که در انتخاب بهینه ترین حالت ممکن به کاربران کمک می رساند.

۳.۱. دامنه

به طور کلی تصمیم گیری و طراحی سازه شامل متغیرهای فراوانی همچون انتخاب نوع سیستم سازه ای، انتخاب نوع مصالح، انتخاب مقاطع سازه ای مناسب، انتخاب آیین نامه های مناسب هر منطقه، و دیگر احتمالاتی است که تصمیم گیری در این حوزه را پیچیده تر و انتخاب پاسخ بهینه و مناسب را سخت تر می کنند. در این تحقیق سعی شده است که پژوهشگر با دخیل کردن برخی از این پارامترهای مهم در یک چارچوب اندکی محدود شده، بتواند به یک ابزار تصمیم گیری دست یابد

۲.۳. مجموعه داده‌ها

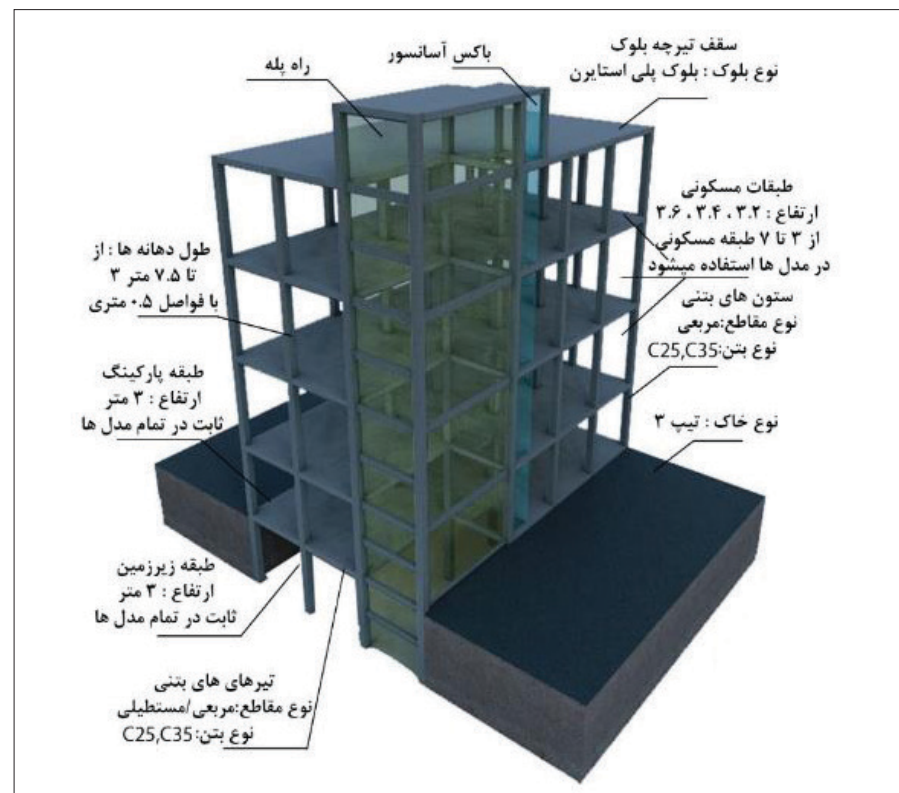
از آنجاکه هدف در پژوهش پیش رو بررسی ویژگی‌های سازه‌ای ساختمان‌های متداول مسکونی است، سعی شده است یک بانک داده‌ای مناسب، با توجه به متغیرهایی که در طراحی این نوع از ساختمان‌ها اثر می‌گذارند، ایجاد گردد. در بخش سازه‌های فلزی ۸۲۵ مدل و در بخش سازه‌های بتنی ۱۶۵۰ مدل ساخته شده است، مدل‌های سازه‌ای ابتدا در نرم‌افزار «Revit» ساخته شده و بعد از آن برای انجام شبیه‌سازی‌های سازه‌ای به نرم‌افزار «ETABS» انتقال داده شده‌اند. گریدبندی‌ها به صورت منظم و عمود بر هم فرض شده‌اند، همه سازه‌ها برای شرایط لرزه‌خیزی بسیار زیاد شبیه‌سازی شده‌اند و سازه بررسی شده در همه مدل‌ها قاب خمشی بوده است. به همه مدل‌های ساخته شده بار مرده، بار زنده، بارهای لرزه‌ای، که به نسبت ارتفاع و تعداد طبقات در هر مدل متفاوت هستند، و دیگر بارهایی که بر سازه‌ها وارد می‌شود، اعمال شده است. نوع سقف در سازه‌های فولادی سقف کامپوزیت و در سازه‌های بتنی سقف تیرچه بلوک بوده است (جدول ۱).

۳.۳. یادگیری

برای دستیابی به نتیجه دلخواه در ابعاد سازه، باید مدل یادگیری ماشین چندین بار اجرا شود. به این صورت که با توجه به حساسیت این مدل نسبت به یکی از متغیرها، در هر طبقه، آن متغیر تغییر می‌کند و مدل دوباره راه‌اندازی می‌شود؛ به طور مثال ارتفاع متغیری است که در هر طبقه تغییر می‌کند، پس با کم کردن میزان ارتفاع کف یا سقف یک طبقه، محاسبات برای طبقه بالایی انجام می‌شود. حال در این پژوهش، برای دستیابی به مدل با دقت بالا و دریافت چگونگی کارکرد مدل، از دو الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی که در پژوهش‌های پیشین بسیار از آن و همچنین ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است.

۴۹۲ متر مربع بوده است. ارتفاع طبقات پارکینگ و زیرزمین ۳ متر و ارتفاع طبقات مسکونی از ۳ متر تا ۳/۶ متر با گام‌های ۰/۲ متری در نظر گرفته شده است. ۲۹ مقطع I شکل برای تیرهای فولادی و نیز ۲۶ مقطع باکس برای ستون‌ها در نرم‌افزار سازه‌ای تعریف گشته‌اند، ضخامت ورق تیرها و ستون‌ها از ۰/۸ تا ۲/۵ سانتیمتر متغیر است. در سازه‌های بتنی ۱۳ مقطع مربعی به نحوی که حداکثر میزان میلگردهای طولی به میزان ۴٪ در آنها رعایت شده باشد، تولید شده است. و همچنین ۱۷ مقطع مستطیلی تعریف گشته است. نوع فولاد مصرفی در سازه‌های فولادی ST37 و در سازه‌های بتنی با استفاده از دو نوع بتن C25 و C35 شبیه‌سازی‌ها انجام شده است (ت ۴ و ۵).

ت ۴. ورودی‌ها و ویژگی‌های ثابت متغیری که در ساختمان‌های بتنی اعمال گشته‌اند. پدیدآورنده: سید امیرمحمد ربانی جلالی.



32. H. Salehi and R. Burgueño, "Emerging Artificial Intelligence Methods in Structural Engineering," *Engineering Structures*, 171 (May 2018): 170-89.

33. Y. Pan and L. Zhang, "Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends," *Automation in Construction*, 122 (December 2020): 103517.

34. Knowledge-Based Expert Systems

35. E. Bradner, et al., "Parameters Tell the Design Story: Ideation and Abstraction in Design Optimization," *Simulation Series*, 46(7) (2014): 172-197.

36. T. Hamidavi, et al., "Towards Intelligent Structural Design of Buildings: A BIM-Based Solution," *Journal of Building Engineering*, 32 (November 2020): 101685.

37. S. Tseranidis, et al.,

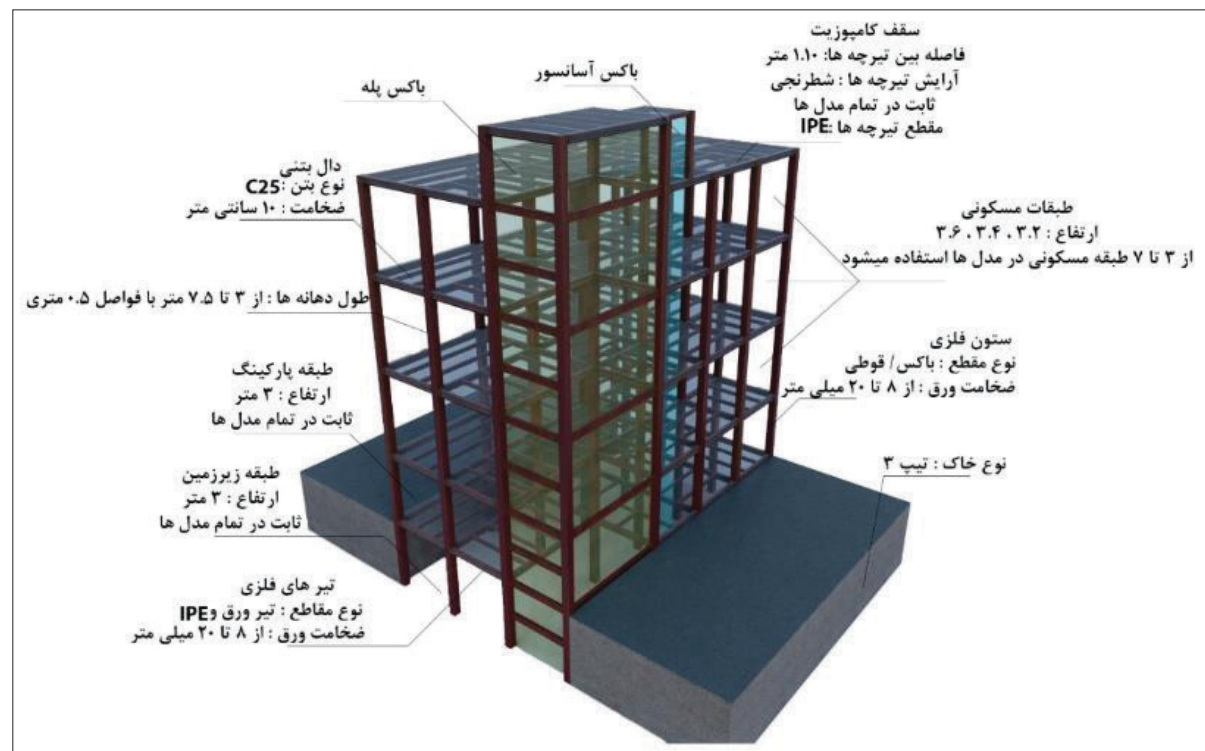
ت ۵. ورودی‌ها و ویژگی‌های ثابت متغیری که در ساختمان‌های فولادی اعمال گشته‌اند. پدیدآورنده: س.ا.م. ربانی جلالی.

انجام‌شده، برچسب‌های جدید را پیش‌بینی کنند. یک ANN بر مجموعه‌ای از واحدهای متصل یا گره، به نام نورون‌های مصنوعی، مبتنی است (مشابه نورون‌های زیستی در مغز حیوان). هر اتصال (سیناپس) میان نورون‌ها می‌تواند سیگنالی را از یک نورون به نورون دیگر انتقال دهد. نورون دریافت‌کننده (پست سیناپتیک) می‌تواند سیگنال (ها) و سپس نورون‌های سیگنالی متصل به آن را پردازش کند. در پیاده‌سازی‌های معمول ANN، سیگنال سیناپس یک عدد حقیقی است، و خروجی هر نورون توسط تابعی غیرخطی از ورودی‌های آن محاسبه می‌شود. نورون‌ها و سیناپس‌ها معمولاً دارای وزن هستند که توأم با پیشرفت یادگیری، تنظیم می‌شود. این وزن قدرت سیگنالی را که به سیناپس می‌فرستد افزایش یا کاهش می‌دهد. نورون‌ها

در ادامه به‌طور مختصر به شرح الگوریتم‌های استفاده‌شده و هاپیرپارامترهای هریک از مدل‌ها می‌پردازیم.

۱.۳.۳ شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و به عبارت دیگر سیستم‌های اتصال‌گر، سیستم‌های محاسبه‌کننده‌ای هستند که در ساخت آنها از شبکه‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده است. این سیستم‌ها، با بررسی مثال‌ها، فعالیت‌ها را یادگیری می‌کنند (به بیان دیگر عملکردشان در انجام فعالیت‌ها به‌مرور بهبود می‌یابند) و عموماً این اتفاق بدون هیچ برنامه‌نویسی مختص به فعالیت انجام می‌شود؛ به‌طور مثال، در شناسایی شکل، این شبکه‌ها می‌توانند، با استفاده از برچسب‌گذاری‌های



"Data-Driven Approximation Algorithms for Rapid Performance Evaluation and Optimization of Civil Structures", *Automation in Construction*, 72 (2016): 279-293.

38. surrogate model

جدول ۱. شرایط در نظر گرفته شده برای سازه‌های مختلف که در این پژوهش در ابزار شبیه‌ساز وارد گشته‌اند. تدوین و پژوهش: س.ا.م. ربانی جلالی.

می‌توانند آستانه‌ای داشته باشند که تنها اگر سیگنال مجموع از آن آستانه عبور کند، سیگنال فرستاده شود. معمولاً نورون‌ها در لایه‌ها سازماندهی می‌شوند. لایه‌های مختلف ممکن است تبدیلات مختلفی روی ورودی خود اعمال کنند. سیگنال‌ها از اولین لایه (ورودی) به آخرین لایه (خروجی) گذر می‌کنند، و در این بین ممکن است لایه‌هایی را چند بار طی کنند. یک شبکه عصبی (مصنوعی) شبکه‌ای است از عناصر ساده به نام نورون که ورودی را دریافت می‌کند، وضعیت درونی آن را مطابق با همان ورودی تغییر می‌دهد (فعال‌سازی)، و خروجی را، مطابق با ورودی و فعال‌سازی، تولید می‌کند. این شبکه از اتصال خروجی برخی نورون‌ها به ورودی برخی نورون‌های دیگر تشکیل می‌شود و گرافی جهت‌دار و وزن‌دار را شکل می‌دهد. وزن‌ها و نیز توابعی که فعال‌سازی را محاسبه می‌کنند، تحت فرایندی به نام یادگیری که با یک قاعده یادگیری مدیریت می‌شود، قابل اصلاح هستند.^{۵۱}

در پژوهش حاضر برای اجرای شبکه عصبی از کتابخانه

متن باز تنسورفلو^{۵۲}ی توسعه داده شده توسط تیم گوگل استفاده شده است. یکی از مقدمات وارد کردن ویژگی‌ها و برچسب‌ها در این مدل، پیش‌پردازش داده و استاندارد کردن داده است، برای این کار از روش مقیاس استاندارد^{۵۳} کتابخانه سایکیت لرن^{۵۴} استفاده شده است. در ادامه داده‌ها به دو دسته یادگیری و آزمایش تقسیم و مدل‌سازی آغاز می‌شود. در همه مدل‌ها سهم داده‌های یادگیری ۸۰ و سهم داده‌های آزمایش ۲۰٪ از کل داده‌هاست. شبکه تشکیل شده در این پژوهش دارای ۴ لایه پنهان است، تابع فعال‌ساز رلو^{۵۵} در سه لایه ابتدایی و تابع فعال‌ساز سافت مکس^{۵۶} در لایه انتهایی است. همچنین برای برگردان کردن مدل از بهینه‌ساز آدام^{۵۷} با نرخ یادگیری ۰/۰۰۱ و تابع زیان میانگین خطای مربع استفاده شده است. میانگین مربعات خطا با عنوان میانگین اختلاف مجذور بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی محاسبه می‌شود. نتیجه همیشه بدون توجه به علامت مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی مثبت است و بهترین مقدار برابر ۰/۰ است. مجذور کردن به این دلیل است که اشتباهات بزرگ‌تر منجر به خطای بیشتری نسبت به اشتباهات کوچک‌تر می‌شود؛ به این معنی که مدل برای اشتباهات بزرگ‌تر مجازات می‌شود.

۲.۳.۳. ماشین بردار پشتیبان

«ماشین بردار پشتیبان» (SVM)^{۵۸} یک الگوریتم نظارت‌شده یادگیری ماشین است که برای هم مسائل طبقه‌بندی و هم مسائل رگرسیون قابل استفاده است؛ با این حال از آن بیشتر در مسائل طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، برای هر نمونه داده یک نقطه در فضای n بعدی روی نمودار پراکندگی داده‌ها ترسیم می‌شود (n تعداد ویژگی‌هایی است که یک نمونه داده دارد) و مقدار هر ویژگی مربوط به داده‌ها، یکی از مؤلفه‌های مختصات نقطه روی نمودار را

آیین‌نامه	فولادی	بتنی
مقاطع تیرها و ستون‌ها	AISC 360-05	ACI 318-14
رده فولاد	St37	S400 / S340
نوع سقف	کامپوزیت	تیرچه بلوک پلی استایرن
رده مقاومت بتن	C25	C25 / C35
نوع خاک	۳	۳
نوع دیافراگم طبقات	صلب	صلب
ترکیب بارها	بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان	بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان
طیف پاسخ	بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و نوع خاک	بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و نوع خاک
ضریب C	بر اساس ارتفاع ساختمان در هر مدل تعیین می‌شود	بر اساس ارتفاع ساختمان در هر مدل تعیین می‌شود
ضریب K	بر اساس ارتفاع ساختمان در هر مدل تعیین می‌شود	بر اساس ارتفاع ساختمان در هر مدل تعیین می‌شود

39. M.E. Haque, "An Artificial Neural Network Model for Preliminary Design of Reinforced Concrete Beam-Column", In *ASCE Annual Conference Proceedings*, 2002, 1705-1712.

40. ANN back-propagation mode

۴۱. شبکه عصبی پرسپترون یک الگوریتم طبقه‌بندی باینری یادگیری تحت نظارت است. پرسپترون یکی از اولین و ابتدایی‌ترین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی است و یک نورون مصنوعی یا یک واحد شبکه عصبی است که محاسبات خاصی را برای تشخیص قابلیت‌های داده ورودی یا هوش تجاری انجام می‌دهد.

42. biaxial bending

43. H. Mote and S. R. Satish Kumar, "Use of Artificial Neural Network for Initial Design of Steel Structures".

ت ۶ (راست). ترسیم داده‌ها در فضای n بعدی در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، مأخذ:

Kubat, *An Introduction to Machine Learning*.

جدول ۲ (چپ). فرمول‌های محاسبه خطا و ضریب تعیین. تدوین و پژوهش: محمد رجاییان هونجانی.

۴.۳. ارزیابی

مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی با استفاده از میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)^{۶۴} و ضریب تعیین (R^2) ارزیابی می‌شوند. MAPE و R^2 طبق «جدول ۲» با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است هرچه درصد خطای مطلق کمتر و ضریب تعیین بیشتر باشد، صحت نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌ها نیز بالاتر می‌رود.

۴. یافته‌ها

نتایج هفت برجسب ستون، تیر، ممان ستون، ممان تیر، مقدار فولاد، وزن فولاد، و وزن کل ساختمان در سازه‌های فولادی و هشت برجسب ستون، تیر، وزن تیر و ستون، وزن بتن، میلگرد تیرها، حجم بتن تیر، میلگرد ستون‌ها، و حجم بتن ستون در سازه‌های بتنی با استفاده از ویژگی‌های دهانه در طول ساختمان، دهانه در عرض، ضخامت ورق و ارتفاع ساختمان با استفاده از شبیه‌سازی ۸۵۰ ساختمان و ۲۲۰۰ ردیف داده محاسبه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از خطای هریک از مدل‌ها در نمودارهای میله‌ای مقایسه عملکرد SVR و ANN مشاهده می‌شود (ت ۷ تا ۱۲). برای تحکیم این نتایج، فقط به خطای گرفته‌شده از مدل اکتفا نشده و پیش‌بینی هریک از مدل‌ها با مقادیر واقعی در دسته تست با استفاده از ضریب تعیین R^2 نیز اندازه‌گیری شده است.

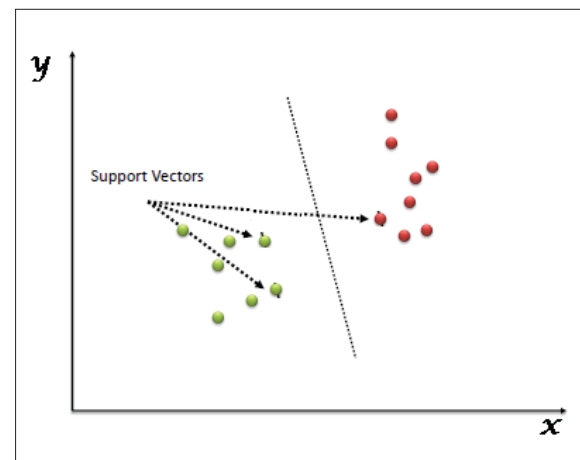
در مدل‌های ساخته‌شده برای ساختمان‌های فولادی اختلاف میان ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی اندک است

R^2	MAPE
$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$	$M = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left \frac{A_t - F_t}{A_t} \right $
RSS = مجموع مربعات باقی‌مانده TSS = مجموع مربعات	n = تعداد داده A_t = مقادیر واقعی F_t = مقادیر پیش‌بینی‌شده

مشخص می‌کند. سپس، با ترسیم یک خط راست، داده‌های مختلف و متمایز از یکدیگر دسته‌بندی می‌شوند.^{۵۹}

از مزایای ماشین بردار پشتیبان می‌توان به حاشیه جداسازی کاملاً واضح برای دسته‌های مختلف، کارایی بیشتر در فضاهای با ابعاد بالاتر، و کارایی در شرایطی که تعداد ابعاد بیش از تعداد نمونه‌ها باشد، اشاره کرد. همچنین یکی از معایب آن عملکرد بد آن در هنگامی است که مجموعه داده‌ها بسیار بزرگ باشد؛ زیرا نیازمند زمان آموزش بسیار زیاد است و هنگامی که مجموعه داده نوفه (نویز) زیادی داشته باشد، عملکرد خوبی ندارد و طبقه‌بندی‌های هدف دچار هم‌پوشانی می‌شوند.

برای اجرای ماشین بردار پشتیبان رگرسیونی از متد ماشین بردار رگرسیونی^{۶۰} از کتابخانه سایکیت لرن. اس‌وی‌ام^{۶۱} برای اعتبار سنجی از متد کراس ولیدیشن^{۶۲} از کتابخانه سایکیت لرن. مدل سلکشن^{۶۳} استفاده شده است. الگوریتم‌های SVR با دو کرنل خطی و تابع پایه شعاعی اجرا می‌شود که در الگوریتم خطی C (پارامتر منظم‌سازی) عدد ۱ و در الگوریتم با هسته RBF گاما (ضریب‌های معادله) بر روی عدد صفر برای هر دو کرنل تنظیم شده است.



44. Angle Section
45. A. Kanyilmaz, et al., "A Genetic Algorithm Tool for Conceptual Structural Design with Cost and Embodied Carbon Optimization", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 112 (September 2021): 104711.

ت ۷ (راست). مقایسه ضریب تعیین در سازه‌های فولادی با الگوریتم‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان.
ت ۸ (چپ). مقایسه خطای MAPE در سازه‌های فولادی با الگوریتم‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان. پدیدآورنده ت ۷ و ۸: محمد رجاییان هونجانی.

و خروجی‌های ضریب تعیین (R^2) بیانگر این مورد هستند که شبکه عصبی برای سازه‌های فولادی مورد بررسی در این پژوهش عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. در بخش خطای MAPE نیز شبکه عصبی با اختلاف اندکی به نسبت ماشین بردار پشتیبان امتیاز بهتری به دست می‌دهد.

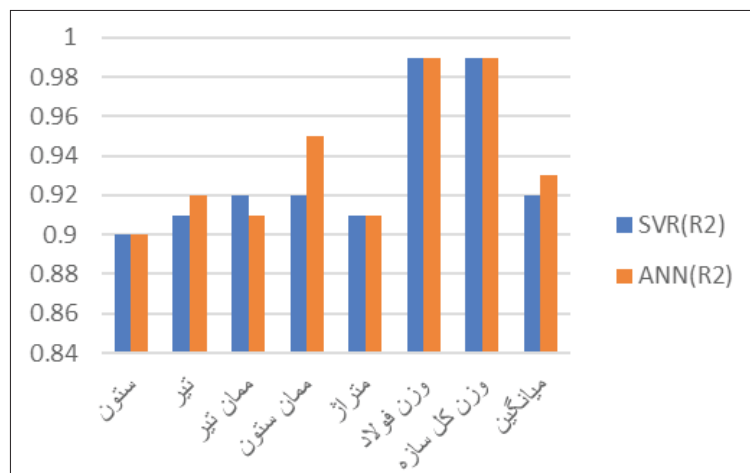
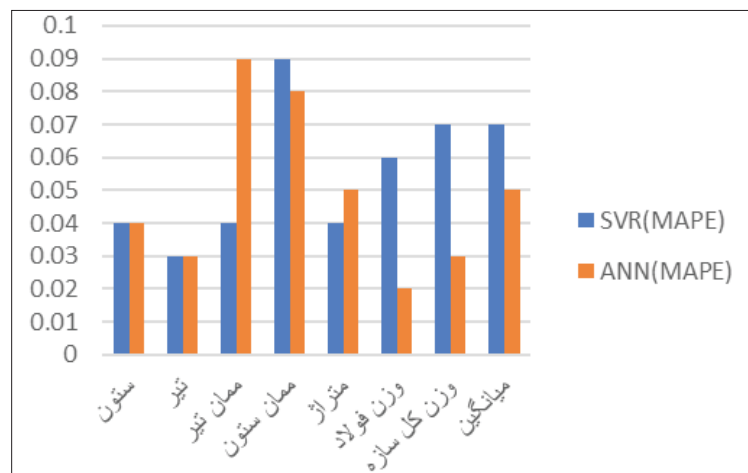
در مدل‌های ساخته شده برای ساختمان‌های بتنی با بتن با رده مقاومتی C25، ماشین بردار پشتیبان (رگرسیون با کرنل خطی) ضریب تعیین بالاتری به صورت میانگین به نسبت شبکه عصبی به دست داده است. در خطای MAPE، این موضوع مشاهده می‌شود که اختلاف بین ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی بیشتر شده است و ماشین بردار پشتیبان برای ساختمان‌های بتنی با بتن C35 در حوزه مطالعاتی این پژوهش عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

در مدل‌های ساخته شده برای ساختمان‌های بتنی با بتن با رده مقاومتی C35 نیز ماشین بردار پشتیبان (رگرسیون با کرنل خطی) ضریب تعیین بالاتری به صورت میانگین به نسبت شبکه عصبی به دست داده است. در خطای MAPE این موضوع مشاهده می‌شود که اختلاف بین ماشین بردار پشتیبان

و شبکه عصبی بیشتر شده است و ماشین بردار پشتیبان برای ساختمان‌های بتنی با بتن C35 در حوزه مطالعاتی این پژوهش عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.^{۶۵}

تحلیل و نتیجه گیری

در طول فرایند طراحی، و به خصوص در گام‌های ابتدایی آن، معماران و مهندسان اغلب می‌خواهند نتیجه کیفی و کمی تصمیماتشان در مورد ابعاد، جانمایی، هندسه، و ... سازه را بلافاصله و در حین تصمیم‌گیری بدانند و بی‌آنکه وارد جزئیات محاسبات شوند، دورنمایی از ایده کلی مشخصات اجزای سازه‌ای ساختمان و گزینه‌های مصالح برای موقعیت‌های مختلف را داشته باشند. اطلاع از عملکرد سیستم انتخابی و نیز حدود ابعادی اجزا در این مرحله برای آنها لازم و درعین حال بدون راه حل ساده و سریع و ارزان است.^{۶۶} برای حدود ۵۰ سال، کتابچه‌هایی با نمودارهای تقریبی مختلف برای راهنمایی کاربر وجود داشته است که حاوی اطلاعات بسیار ساده و کاربردی در مورد تخمین اولیه ابعاد بر اساس تجربه و برخی تحلیل‌ها بوده است؛ درحالی که دانستن تئوری پشت این عناصر



نزدیک به آنچه توسط ابزارهای تحلیل و طراحی سازه‌ها دست یافت، با زمان و هزینه‌ای کمتر. در «ت ۱۳» نحوه کار و «ت

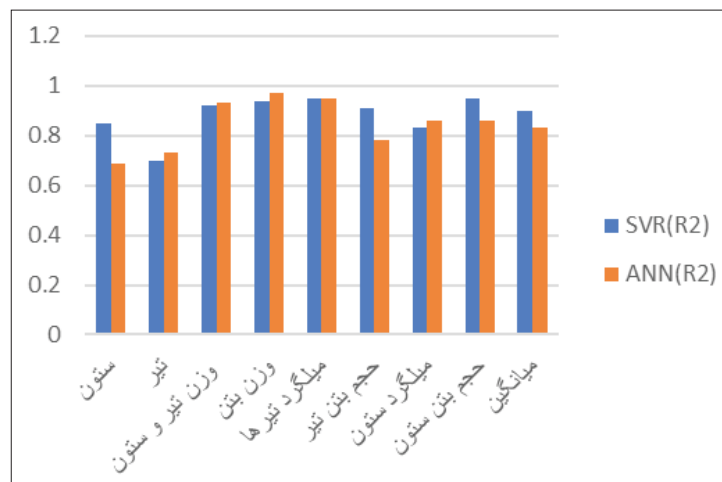
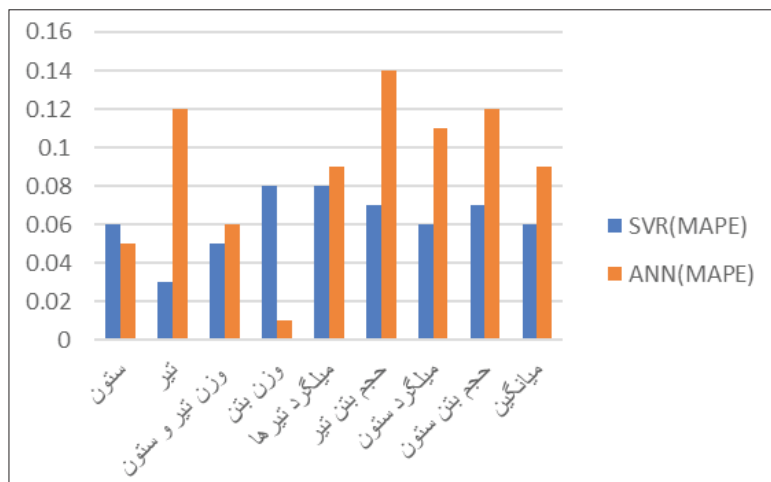
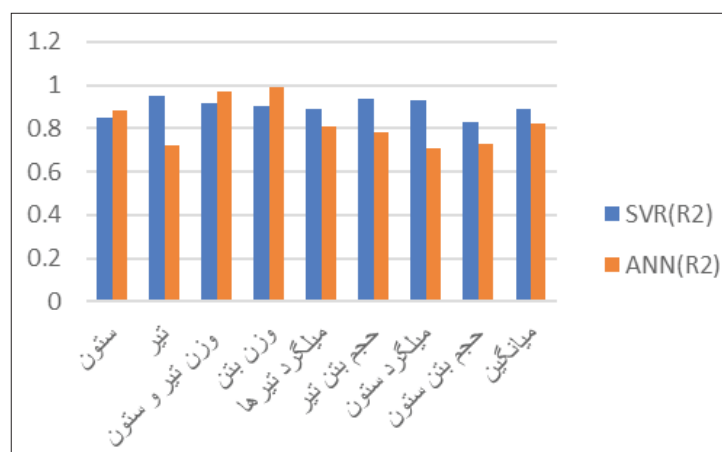
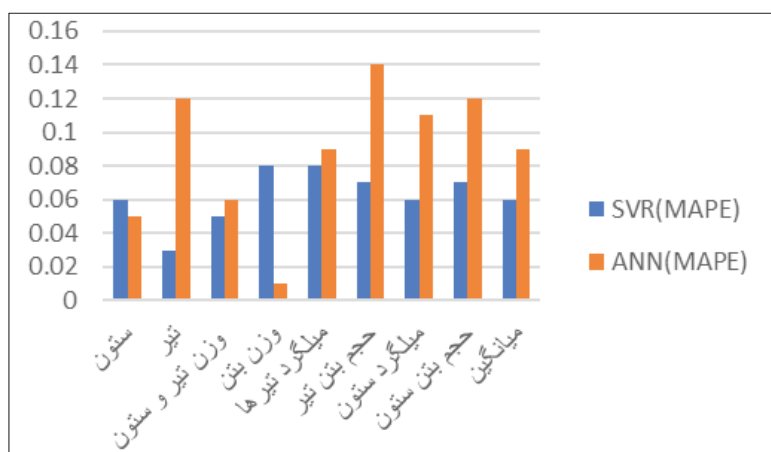
مهم است. همچنین مهم است که بتوانیم به سرعت ارزیابی کنیم که پیامدهای انتخاب یک دهانه، آرایش ستون‌گذاری، یا بارگذاری خاص ممکن است چه باشد. با هدف کمک کردن به جامعه مهندسی و بالاخص طراحان معماری در این پژوهش یک ابزار معرفی گردید. ابزاری که می‌توان به کمک آن و با وارد کردن ورودی‌هایی همچون ابعاد زمین، ابعاد دهانه‌ها، تعداد طبقات، و نوع مصالح مصرفی به یک تخمین اولیه و

ت ۱۱ (پایین، راست). مقایسه ضریب تعیین در سازه‌های بتنی با بتن با رده مقاومتی C35 با الگوریتم‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان.

ت ۱۲ (پایین، چپ). مقایسه خطای MAPE در سازه‌های بتنی با بتن با رده مقاومتی C35 با الگوریتم‌های شبکه عصبی و ماشین. پدیدآورنده ت ۹ تا ت ۱۱: م. رجاییان هونجانی.

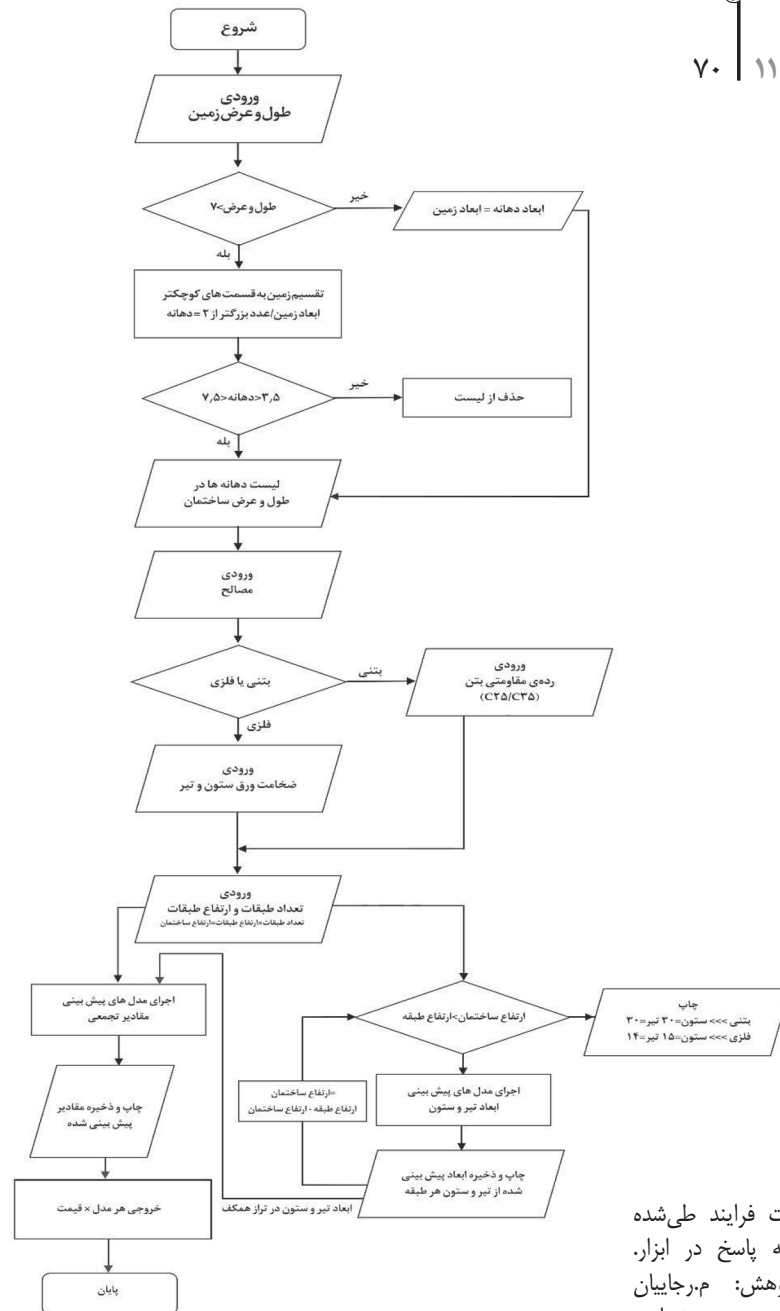
ت ۹ (بالا، راست). مقایسه ضریب تعیین در سازه‌های بتنی با بتن با رده مقاومتی C25 با الگوریتم‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان.

ت ۱۰ (بالا، چپ). مقایسه خطای MAPE در سازه‌های بتنی با بتن با رده مقاومتی C25 با الگوریتم‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان.



۱۴ و ۱۵» محیط کاربری اولیه ابزار شرح داده شده است. این فرایند در قدم اول با وارد کردن ابعاد زمین شروع می‌شود. در این مرحله زمین وارد شده به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، ورودی مدل‌های شبکه عصبی ابعاد دهانه در طول و عرض ساختمان است. بنابراین ابعاد زمین وارد شده باید به شکل ورودی مورد انتظار مدل درآید. برای این مهم، اگر ابعاد وارد شده بیشتر از ۷ متر باشد، طول و عرض ساختمان به اعداد بیشتر از ۲ تقسیم می‌شوند (یعنی حداقل ۲ دهانه در عرض و طول داریم). این تقسیم تا زمانی ادامه می‌یابد که خارج قسمت تقسیم از عدد $\frac{3}{5}$ بزرگ‌تر باشد (یعنی تقسیم زمین به دهانه‌های کوچک‌تر از $\frac{3}{5}$ متر مجاز نیست). اگر ابعاد وارد شده ۷ متر باشد، با یک دهانه ادامه می‌یابد.

در گام بعد نوبت به وارد کردن نوع مصالح سازه می‌رسد، در صورت انتخاب سازه بتنی، کاربر باید بین دو رده بتن پرمصرف ساختمانی C25 یا C35 یکی را انتخاب کند و فرایند به مرحله بعدی برود. همچنین در صورت انتخاب سازه فلزی، کاربر با وارد کردن ورق‌های فلزی ضخیم مورد استفاده در تیرها و ستون‌ها وارد مرحله بعد می‌شود. در قسمت بعد نوبت به وارد کردن تعداد طبقات ساختمان و همچنین ارتفاع طبقات می‌رسد. در این مرحله مدل‌های یادگیری ماشین اجرا می‌شوند. محاسبه ابعاد ستون و تیر در هر طبقه نیازمند اجرای یک لوپ با مقادیر مختلف ارتفاع است؛ زیرا تنها متغیر در هر طبقه میزان بار طبقات بالایی است. لوپ اجرا شده از نوع for loop با میزان تکرار به مقدار تعداد طبقات و یک شرط است. اگر ارتفاع باقی‌مانده از ارتفاع طبقه کمتر شود، لوپ break می‌شود و پایان می‌یابد. به‌طور پیش‌فرض، مقادیری برای خرپشته در نظر گرفته شده است که پس از break پرینت و در هر مرحله از لوپ، ارتفاع ساختمان به میزان ارتفاع طبقات کم می‌شود.



ت ۱۳. فلوچارت فرایند طی شده برای رسیدن به پاسخ در ابزار. ترسیم و پژوهش: م. رجاییان هونجانی.

تارگت ضرب می‌شود و کاربر می‌تواند بین دهانه با ابعاد مختلف مقایسه‌ای سرانگشتی داشته باشد.

همان‌گونه که در بخش یادگیری اشاره شد، در این پژوهش از دو الگوریتم شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان استفاده

به این ترتیب خروجی هر رفت و برگشت ابعاد ستون و تیر برای هریک از مقادیر مجموعه ابعاد است. خروجی اولین تیر و ستون (تراز همکف) به منزله دو ورودی دیگر به مدل‌های تجمعی اضافه می‌شود. خروجی مدل‌های تجمعی در قیمت واحد هر

	Beam Height dim.	Column dim.
Base	30cm	30cm
1st floor	30cm	25cm
2nd floor	25cm	20cm

54. Scikit-learn
55. ReLu
56. softmax
57. Adam
58. Support Vector Machines
59. M. Kubat, *An Introduction to Machine Learning* (Springer, 2017).
60. SVR: Support Vector Regression
61. sklearn.svm
62. cross_val_score
63. sklearn.model_selection
64. Mean Absolute Percentage Error
65. N.C. Brown, et al., "Implementing Data-Driven Parametric Building Design with a Flexible Toolbox", *Automation in Construction*, 118 (October 2020):103252.

ت ۱۴ (بالا). پلتفورم تخمین ابعاد اجزای سازه‌ای.
ت ۱۵ (پایین). پلتفورم تخمین ابعاد اجزای سازه‌ای.

های فولادی و هم در ساختمان های بتنی به صورت تصادفی انتخاب گشته و در نرم افزار تحلیل و طراحی سازه (ایتبس) به روش معمول بررسی می شود و سپس خروجی های به دست آمده را با خروجی های الگوریتم های هوش مصنوعی در شاخص های اصلی مؤثر در هزینه طراحی و اجرا مقایسه می گردد. نتایج تطبیق خروجی های مدل هوش مصنوعی با خروجی های نرم افزار به شرح زیر است:

- در سازه های فولادی و بتنی در ابعاد ستون ۹۰٪
- ابعاد تیر در سازه های فولادی ۹۲٪ و در سازه های بتنی ۹۵٪
- وزن سازه در سازه های فولادی و بتنی ۹۸٪
- در سازه های بتنی وزن بتن ۹۰٪
- در سازه های فولادی متراژ فولاد ۹۰٪
- در سازه های بتنی حجم بتن تیر ۹۴٪ و حجم بتن ستون ۹۰٪
- استفاده از مدل های هوش مصنوعی در بستر یک پل تفرم می تواند در زمانی بسیار کمتر (کمتر از ۵ دقیقه) به نسبت روش سنتی (حداقل ۶۰ دقیقه) و با صرف هزینه کمتر منجر به یک انتخاب بهینه در مرحله اولیه طراحی شود.
- روش شناسی استفاده شده در این تحقیق برای اضافه شدن متغیرهایی از جمله مصالح مختلفی که در صنعت ساختمان کاربرد دارند، بررسی فرم های پیچیده معماری و سازه هایی که در چپنش اعضای سازه ای شان بی نظمی دارند، افزایش طبقات مورد بررسی و همچنین بررسی سقف های با ساختارهای مختلف قابلیت بسط و گسترش دارند.

شده است که در نهایت الگوریتم شبکه عصبی در سازه های فولادی و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در سازه های بتنی عملکرد بهتری را از خود بروز می دهند. خلاصه ای از نتایج به دست آمده به شرح ذیل است (شاخص های سنجش دقت):

- برای ساختمان های فلزی میانگین ضریب تعیین بین داده های واقعی و پیش بینی شده در مدل شبکه عصبی ۰/۹۳ و برای ماشین بردار پشتیبان ۰/۹۲ است.
- برای ساختمان های بتنی میانگین ضریب تعیین بین داده های واقعی و پیش بینی شده در مدل شبکه عصبی ۰/۹۲ و برای ماشین بردار پشتیبان ۰/۹۳ است.
- میزان خطای MAPE در سازه های فولادی برای شبکه عصبی به میزان ۰/۰۲ از ماشین بردار پشتیبان کمتر است که بیانگر عملکرد بهتر این الگوریتم است.
- میزان خطای MAPE در سازه های بتنی با بتن های C25 و C35 برای شبکه عصبی به میزان ۰/۰۳ از ماشین بردار پشتیبان بیشتر است که بیانگر عملکرد ضعیف شبکه عصبی به نسبت ماشین بردار پشتیبان است.
- در همه مدل ها تأثیر ویژگی ها بر روی هدف مستقیم است، به جز ضخامت ورق فولادی که تأثیر معکوس بر خروجی دارد.
- علاوه بر شاخص های سنجش دقت، که در بخش قبل به آنها اشاره شد، در فرایندی که با هدف بررسی صحت عملکرد ابزار و مدل های به دست آمده از الگوریتم های هوش مصنوعی و همچنین به منظور درک بهتر مخاطب از درجه دقت خروجی پژوهش صورت گرفته است، تعدادی سازه هم در ساختمان

References

Ampanavos, Spyridon, Mehdi Nourbakhsh, and Chin-Yi Cheng. "Structural Design Recommendations in the Early Design Phase Using Machine Learning". *Communications in Computer and Information Science*, 2021, 1-14.

Anwar, Naveed and Fawad Ahmed Najam. "Structures and Structural Design". in *Structural Cross Sections*, 2017. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804443-8.00001-4>

Barg, Steve, Forest Flager, and Martin Fischer. "An Analytical



Method to Estimate the Total Installed Cost of Structural Steel Building Frames during Early Design". *Journal of Building Engineering*, 15 (2018): 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.10.010>.

Bradner, Erin, Francesco Iorio, and Mark Davis. "Parameters Tell the Design Story: Ideation and Abstraction in Design Optimization". *Simulation Series*, 46(7) (2014): 172-197.

Brown, Nathan C. and Caitlin T. Mueller. "Automated Performance-Based Design Space Simplification for Parametric Structural Design". *Proceedings of the IASS Annual Symposium*, 2017.

Brown, Nathan C., Violetta Jusiega, and Caitlin T. Mueller. "Implementing Data-Driven Parametric Building Design with a Flexible Toolbox". *Automation in Construction*, 118 (October 2020): 103252. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103252>.

Buscema, Paolo Massimo, Giulia Massini, Marco Breda, Weldon A. Lodwick, Francis Newman, and Masoud Asadi-Zeydabadi. "Artificial Neural Networks". In *Studies in Systems, Decision and Control*, 131 (2018): 11-35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75049-1_2

Celani, Gabriela, and Carlos Eduardo Verzola Vaz. "CAD Scripting and Visual Programming Languages for Implementing Computational Design Concepts: A Comparison from a Pedagogical Point of View". *International Journal of Architectural Computing*, 10(1) (2012): 121-137. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.10.1.121>

Chang, A.S.T., J. S. Shih, and Y.S. Choo. "Reasons and Costs for Design Change during Production". *Journal of Engineering Design*, 22(4) (2011): 275-289. <https://doi.org/10.1080/09544820903425218>.

Chang, Kai Hung, and Chin Yi Cheng. "Learning to Simulate and Design for Structural Engineering". in *37th International Conference on Machine Learning, ICML, 2020, Part F16814:1403-1413*.

Charleson, A.W. and S. Pirie. "An Investigation of Structural Engineer-Architect Collaboration". *SESOC Journal*, 22 (1) (2009): 97-104.

Ehrlenspiel, Klaus, Alfons Kiewert, Udo Lindemann. *Cost-Efficient Design*. Ed. Mahendra S. Hundal. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34648-7>

Evers, R.F.M.H.G.A. "Cost Based Engineering and Production of Steel Constructions". in *Steel Design Codes-Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures*, 2000.

Forouzandeh, Nima, Mohammad Tahsildoost, and ZahraSadat Zomorodian. "A Review of Web-Based Building Energy Analysis Applications". *Journal of Cleaner Production* 306 (2021): 127251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127251>

Haapio, J. *Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures Based on the Process Approach*. Tampere University of Technology, 2012.

Haber, David and Saeed Karshenas. "An Expert System for Conceptual Design of Buildings". *Proceedings of the 4th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, November 2017. <https://doi.org/10.22260/isarc1987/0051>

Hamidavi, Tofigh, Sepehr Abrishami, and M.Reza Hosseini. "Towards Intelligent Structural Design of Buildings: A BIM-Based Solution". *Journal of Building Engineering*, 32 (November 2020): 101685. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101685>

Haque, Mohammed E. "An Artificial Neural Network Model for Preliminary Design of Reinforced Concrete Beam-Column". In *ASEE Annual Conference Proceedings*, 2002, 1705-1712.

Jalal, Mostafa, Ali A. Ramezaniapour, Ali R. Pouladkhan, and Payman Tedro. "Application of Genetic Programming (GP) and ANFIS for Strength Enhancement Modeling of CFRP-Retrofitted Concrete Cylinders". *Neural Computing and Applications*, 23(2) (2013): 455-470. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-0941-2>

Jung, Youngsoo, and Mihee Joo. "Building Information Modelling (BIM) Framework for Practical Implementation". *Automation in Construction*, 20(2) (2011): 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.010>

Kanyilmaz, Alper, Patricia Raquel Navarro Tichell, and Daniele Loiacono. "A Genetic Algorithm Tool for Conceptual Structural Design with Cost and Embodied Carbon Optimization". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 112 (September 2022): 104711. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104711>

Kubat, Miroslav. *An Introduction to Machine Learning*. Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63913-0>

Málaga-Chuquitaype, Christian. "Machine Learning in Structural Design: An Opinionated Review". *Frontiers in Built Environment*, 8 (February 2022): 1-12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.815717>

Mote, H. and S.R. Satish Kumar. "Use of Artificial Neural Network for Initial Design of Steel Structures". in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660 (1) (2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012064>.

Of Inistry, Tudy of, Cheme In, Esign of, and Flood Protection. "S Ultanate of O Man M Inistry of R Egional P Art B: P Reliminary D Esign of Flood Protection Dams a Ppendix : P Reliminary D Esign D Rawings". July 2009, 184-192.

Pan, Yue and Limao Zhang. "Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends". *Automation in Construction*, 122 (December 2020): 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>

Ruddy, John L. and Socrates A. Ioannides. "Rules of Thumb for Steel Design". *Proceedings of the 2004 Structures Congress - Building on the Past: Securing the Future*, February 2004, 1683-1689.

Salehi, Hadi and Rigoberto Burgueño. "Emerging Artificial Intelligence Methods in Structural Engineering". *Engineering Structures*, 171 (May 2018): 170-189. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>.

Tong, Fei and Xila Liu. "Samples Selection for Artificial Neural Network Training in Preliminary Structural Design". *Tsinghua Science and Technology*, 10(2) (2005): 233-239. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(05\)70060-2](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(05)70060-2)

org/10.1016/S1007-0214(05)70060-2

Tseranidis, Stavros, Nathan C. Brown, and Caitlin T. Mueller. "Data-Driven Approximation Algorithms for Rapid Performance Evaluation and Optimization of Civil Structures". *Automation in Construction*, 72 (2016):279-293. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.002>