Journal of "Science and Technology Construction"
Vol. 4, No. 1, Spring 2023 (Serial No. 11)

The optimal design process of steel structures with the help of artificial intelligence algorithms: a case study of Al-Zahra Educational-Therapeutic Hospital in Tabriz

A. Rahgozar*, M. Kiani

Abstract

C Current research is to use artificial intelligence computation to provide algorithms that meet all Mabhas-6, Mabhas-10, and Standard-2800 regulations of national building codes while minimizing the weight of structures. In previous studies, the control of boundary conditions and optimal design of steel moment frames was done in 2D and only with older algorithms. One of the most important tasks of this research is to perfect new constraint rules to control all constraints and to optimally design the common short and medium length steel structures. All the necessary regulations and controls for the three main types of steel structures widely used in the country: 1) braced frames and 2) frames with shear walls, and 3) a dual system of moment frames and shear walls are implemented. Finally, the results of this algorithm were validated in the Tabriz hospital project. One of the valuable results of this work is that it facilitates a safe design and control process for steel buildings by providing a graphical panel of model inputs and displaying all the key results of the structure in the form of text and diagrams. The work process is intelligently programmed to automatically run by simply inputting a standard ETABS file into the optimal seismic design process algorithm. In the ETABS file, each group sections are defined as a list to allowing artificial intelligence algorithms to choose the best placement. The hospital project demonstrated design safety as well as the ability to significantly reduce the total weight of the steel.

Keywords: Artificial Intelligence, Genetic Algorithm, Optimal Seismic Design, Steel Structures, Actual Hospital Project

*Corresponding author E-mail: a.rahgozar@ut.ac.ir

«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۱۳ الی ۲۱

علمی – تخصصی

فرآیند طراحی بهینه سازه‌های فولادی به کمک الگوریتم‌های هوش مصنوعی: نمونه موردی بیمارستان آموزشی–درمانی الزهرا تبریز

آرش رهگذر[1*]، مجید کیانی[2]

[1] پژوهشگر دکتری پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)

[2] استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر ارائه الگوریتمی با استفاده از محاسبات هوش مصنوعی برای اقناع کلیه الزامات آیین‌نامه های استاندارد ۲۸۰۰، مبحث ۱۰ و مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان با تأمین حداقل وزن سازه می‌باشد. در ادبیات فنی کنترل قیود و طراحی بهینه قاب‌های خمشی فولادی به‌صورت دو بعدی و فقط با الگوریتم‌های کلاسیک انجام شده بود. یکی از مهمترین دستاوردهای این تحقیق تکمیل قیود جدید آیین‌نامه‌ای برای اقناع تمام قیود و طراحی بهینه انواع پرکاربرد سازه‌های فولادی کوتاه و میان‌مرتبه است. ضوابط و قیود آیین‌نامه‌ای لازم برای سه نوع سازه فولادی پراستفاده کشور شامل: ۱) قاب‌های دارای دیوار برشی و ۲) قاب‌های مهاربندی و ۳) قاب‌های خمشی دوگانه با دیوار برشی پیاده‌سازی شد. نتایج این الگوریتم با پروژه بیمارستان الزهرا تبریز صحت‌سنجی شد. از نتایج ارزشمند کار، تسهیل فرایند کنترل و طراحی ایمن ساخت اسکلت فلزی با ارائه یک پنل گرافیکی برای ورودی مدل و نمایش تمامی نتایج مهم سازه در قالب متن و گراف می‌باشد. فرآیند کار به‌صورت هوشمند برنامه‌ریزی شده تا تنها با ورودی یک فایل استاندارد ETABS در الگوریتم روند طراحی لرزه‌ای بهینه به‌صورت اتوماتیک انجام شود. در فایل ETABS، برای هر گروه طراحی مقاطع به شکل لیست تعریف شده است تا الگوریتم هوش مصنوعی بهترین آرایش مقطع را انتخاب کند. برای سه نمونه سازه‌ای و پروژه بیمارستان الزهرا تبریز نشان داده شد که در کنار ایمن سازی طراحی می‌توان صرفه‌جویی زیادی روی وزن فولاد داشت.

کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، طراحی لرزه‌ای بهینه، سازه‌های فولادی، پروژه بیمارستانی اجرا شده

۱. مقدمه

در طراحی مهندسی ساختمان‌های فولادی، طرحی کامل است که کلیه الزامات آیین‌نامه‌ای به صورت کامل کنترل گردد بطوری که ملاحظات اجرایی نهایی در نظر گرفته شود و از کمترین وزن مصالح فولاد استفاده شده باشد. انجام این طراحی کامل برای یک طراح مجهز به کامپیوتر کاری بسیار زمان‌بر و غیرممکن خواهد بود از این جهت که: ۱) فقط با توان و زمان محدودی می‌تواند کار کند، ۲) خطای خستگی انسان و کنار گذاشتن الزامات تعدادی از قیود آیین‌نامه ایران و ۳) پیچیدگی سازه‌ای مربوط به تأثیر پذیری کل سازه با تغییر عضو آن، مانع رسیدن به چنین طرح کاملی می شود. از طرفی کنار گذاشتن کنترل برخی از قیود آیین‌نامه می‌تواند منجر به ناایمن شدن طرح شود؛ بنابراین بعد از آمدن فناوری طراحی ساختمان در کامپیوترها با نرم‌افزارهایی نظیر ETABS، SAP2000 و SAFE که موجب افزایش سرعت تحلیل ها شده است. در حال حاضر فناوری هوش مصنوعی در رشته های مهندسی پرکاربرد تا نقیصه های این نرم‌افزارها را به‌صورت هوشمند پوشش بدهد و امکان رسیدن به طراحی کامل را با سرعت خیلی بیشتری انجام بدهد. هدف این پژوهش، به کارگیری هوش مصنوعی در فرآیند یادگیری هوشمند، پیاده‌سازی کلیه الزامات و قیود لرزه‌ای آیین‌نامه متناسب با انواع سازه‌های فولادی رایج در کشور و بهینه‌سازی آن به کمک روش‌های محاسبات نرم است.

برای این منظور از «الگوریتم» استفاده می شود. الگوریتم فرآیندی برای حل یک مسئله پیچیده، تقسیم آن مسئله به مراحل ساده‌تر و یافتن پاسخ مناسب است. علاوه بر این «هوش مصنوعی» علمی است که از فناوری‌های مختلفی مانند منطق

*نویسنده مسئول: a.rahgozar@ut.ac.ir

مجموعه فازی، شبکه‌های عصبی و سیستم های تکاملی تشکیل شده است [۱]. الگوریتم‌های هوش مصنوعی با استفاده از کامپیوتر و الگوگیری از طبیعت و هوش انسانی به شناخت رفتار سیستم های پیچیده و ارزیابی مسائل مهندسی می‌پردازد [۲]. سیستم‌های پیچیده، سیستم‌هایی هستند که در محاسبات عددی راه‌حل تحلیلی برای آن‌ها غیرممکن است و برای حل آن‌ها به جای محاسبات سخت از الگوریتم های محاسبات نرم استفاده می‌شود. محاسبات نرم راه‌حل‌های کاملاً منعطفی ارائه می‌دهد تا مسائل را با تعامل بین عدم دقت و عدم قطعیت مبتنی بر محاسبات فازی حل کنند. نمونه‌ای از محاسبات عددی نرم پیش‌بینی تغییر شکل دیوار تحت بار نامعین انفجار با روندی سعی و خطایی می‌باشد در حالی که در طرف مقابل محاسبات عددی سخت از روابط تحلیلی معین برای مثلاً محاسبه خیز تیرها است، استفاده می‌کنند [۳]. به کمک این الگوریتم‌ها می‌توان طیف گسترده‌ای از مسائل پیچیده نامعین را در حوزه‌های مهندسی سازه، بهینه‌سازی و طراحی قابلیت اطمینان و ایمن ساختمان ها پیاده سازی کرد. در ادامه، ادبیات فنی کاربرد الگوریتم های تکاملی تشریح می‌گردد که زیرمجموعه‌ای از محاسبات نرم می‌باشد.

در ادبیات فنی، بیشتر کارهای تحقیقاتی محدود به نمونه‌های دو بعدی ساده و یا تعدادی محدود نمونه سه بعدی بدون بستر هوش مصنوعی جامعی برای هوشمندسازی طراحی هر نوع سازه فولادی بوده است. اولین الگوریتم بهینه‌سازی در سال ۲۰۰۲ به کمک روش شبیه‌سازی تبرید (SA) در طراحی یک قاب فولادی دوبعدی به کمک مجموعه‌ای از کامپیوتر ها به دلیل ضعف پردازشگرهای آن زمان انجام شده بود [۴]. در سال ۲۰۰۹ محققین تعدادی الگوریتم برای حل سریع‌تری و کاهش حجم محاسبات بهینه‌سازی سازه‌های فولادی دو بعدی با تنها دو قید آیین‌نامه‌ای دریفت و نسبت تنش بررسی گردید که نهایتاً الگوریتم ازدحام ذرات (PSO[1]) با عملکرد بهتری پیشنهاد شد. همچنین در سال ۲۰۰۹ قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN[2]) برای پیش‌بینی برش پایه قاب‌های خمشی و مهاربندی دوبعدی استفاده شد. در سال ۲۰۱۱ محققین با ترکیب الگوریتم انتقال موجک (WT[3]) و ANN به بهینه‌سازی دو قاب فولادی سه بعدی ساده با دیافراگم صلب تنها تحت کنترل دینامیکی قید دریفت طبقات پرداخته است [۵]. در سال ۲۰۱۲ سه الگوریتم جستجو ذرات باردار (CSS[4])، کلونی مورچه‌ها (ACO[5])، جستجو هارمونی (HS) در طراحی بهینه یک سازه ۱۰ طبقه خمشی تحت فقط دو قید نسبت تنش و دریفت انجام شده است و الگوریتم CSS با عملکرد بالاتری داشته است [۶]. در سال ۲۰۱۵ دو قاب خمشی و مهاربندی سه‌بعدی که نامنظمی ارتفاع را تحت قیود سه قید آیین‌نامه‌ای با شش الگوریتم فراابتکار بهینه سازی کردند. مشاهده کردند، الگوریتم HS[6] بهترین عملکرد را در قاب خمشی و الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS[7]) بهترین عملکرد را در قاب مهاربندی داشته است [۷]. در سال ۲۰۱۷ از نُه الگوریتم فراابتکار برای بهینه‌سازی اقتصادی وزن سه نوع قاب سه‌بعدی خمشی معمولی (OMF[8])، متوسط (IMF[9]) و ویژه (SMF[10]) تحت شرایط سه قید آیین‌نامه‌ای نسبت تنش، دریفت و ظرفیت اتصال ویژه به کمک تحلیل دینامیک طیفی (RSA[11]) استفاده شد و مشاهده کردند که به ترتیب الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)، ازدحام ذرات (PSO) و برخورد اجسام (CBO[12]) بهترین عملکرد را از خود نشان دادند [۸]. در سال ۲۰۱۹ محققین از سه الگوریتم فراابتکار برای بهینه‌سازی سه قاب فولادی معمولی (OMF) سه بعدی با تیرهای و ستون‌های منشوری و غیر منشوری که در فرآیند از دو قید آیین‌نامه‌ای نسبت تنش و دریفت استفاده کردند و الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) بهترین عملکرد را از خود نشان داد [۹]. در سال ۲۰۲۰ از الگوریتم گرادیانی (fmincon[13]) برای بهینه‌سازی سه قاب خمشی فولادی بلندمرتبه به کمک تحلیل دینامیک طیفی (RSA) با الزامات سه قید آیین‌نامه‌ای نسبت تنش، دریفت، هم‌پایه سازی دینامیکی و ظرفیت اتصال ویژه استفاده کردند [۱۰]. در سال ۲۰۲۱ نیز به کمک الگوریتم خسارت یکنواخت چند هدفه (MUDO[14]) برای بهینه سازی اقتصادی وزن مقاطع قاب‌های خمشی ویژه فولادی در طول عمر آن تحت الزامات چهار قید آیین‌نامه‌ای اجراپذیری هندسه ستون، نسبت تنش، دریفت و ظرفیت اتصال ویژه استفاده شد [11]. همچنین در سال ۲۰۲۱ از سه الگوریتم فراابتکار برای بهینه سازی اقتصادی وزن مقاطع فولادی پیوسته و گسسته تحت الزامات سه قید آیین‌نامه‌ای نسبت تنش، دریفت و ظرفیت اتصال ویژه استفاده گردید و به ترتیب الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA[15]) و الگوریتم گرادیانی (fmincon) بهترین عملکرد را داشتن [۱۲]. با نگاهی به مرور ادبیات انجام شده فقط

[1] Particle swarm optimization
[2] Artificial neural network
[3] Wavelet transform
[4] Charged system search
[5] Ant colony optimization
[6] Harmony search
[7] Tabu search
[8] Ordinary moment frames
[9] Intermediate moment frames
[10] Special moment frames
[11] Response spectrum analysis
[12] Colliding bodies optimization
[13] MATLAB nonlinear optimization function
[14] Multi-objective uniform damage optimization
[15] Genetic algorithm

به مقایسه انواع الگوریتم‌های تکاملی تحت تعدادی قیود محدود پرداخته شد و از پلتفرم هوش مصنوعی برای درک و بهینه‌سازی انواع سیستم‌های لرزه‌ای فولادی با قیود متفاوت استفاده نشده است. این پژوهش به رفع این شکاف تحقیقاتی برای سازه های سه‌بعدی فولادی می‌پردازد که قیود آن در بخش ۶ آمده است.

در ادامه، ابتدا بیان مسئله ارائه گردید و سپس، روش تحقیق، سؤال و فرضیه های تحقیق آمده و بعد از آن به معرفی پلتفرم هوش مصنوعی پرداخته شد. نهایتاً سه نمونه سازه‌ای با این پلتفرم بطور ایمن بهینه گردیده و در پایان با پروژه بیمارستان الزهرا تبریز صحت‌سنجی شد.

۲. روش پژوهش

ابتدا کارکرد پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی بررسی شده معرفی می‌گردد که به چه روشی فایل ETABS یک سازه فولادی را دریافت، ارزیابی و سپس آن را بهینه سازی می‌کند. بعد از آن به اختصار فرآیند جامع کنترل تمام قیود آیین‌نامه‌ای برای انواع سیستم‌های لرزه‌ای تشریح می‌شود. سپس بهینه‌سازی سه نمونه سازه‌ای سه‌بعدی نامنظم در پلان و ارتفاع که به ترتیب از نوع سیستم لرزه‌ای: ۱) قاب مهاربندی، ۲) قاب ساده با دیوار برشی و ۳) سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی ارزیابی می‌گردد. در این ارزیابی از سه الگوریتم تکاملی شامل: جستجوی هارمونی (HS)، ازدحام ذرات (PSO)، ژنتیک (GA) و یک الگوریتم گرادیانی (fmincon) استفاده شد. نهایتاً الگوریتم هوش مصنوعی با پروژه بیمارستان الزهرای تبریز صحت‌سنجی شده است.

۳. سؤالات و فرضیه‌های پژوهش

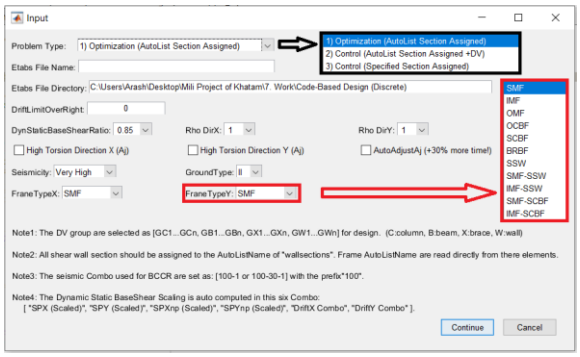
چه ویژگی‌هایی باید فایل ETABS ورودی به این پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی داشته باشد؟ آیا تمام الزامات به درستی اقناع می شوند؟ کدام الگوریتم تکاملی عملکرد بالاتری در رسیدن به جواب بهینه را داشته است؟ چه میزان صرفه جویی اقتصادی برای هر نوع سیستم لرزه‌ای ایجاد شده است؟ در پژوهش پاسخ به این سؤالات با نمونه‌هایی کاربردی پاسخ داده می‌شوند.

۴. معرفی پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی

پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی به زبان برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شده است و با استفاده از رابط API با نرم‌افزار تحلیل و طراحی ETABS رابطه برقرار می‌کند. در تحلیل سازه ها از تحلیل دینامیک طیفی (RSA) برای پوشش طیف وسیعی از سازه های سه‌بعدی فولادی استفاده گردید. بخش اول الگوریتم به یادگیری دانش اولیه مسئله شامل: ورودی پنل گرافیکی، مشخصات هندسی و مصالح سازه، لیست گروه‌بندی‌های (برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها و دیوارهای برشی) و لیست مقاطع موجود می‌پردازد. در بخش دوم الگوریتم به برنامه‌ریزی و شبکه سازی دانش اولیه و نیز اختصاص الزامات و قیود مربوط با هر سیستم لرزه‌ای می‌پردازد. در بخش سوم الگوریتم با استفاده از الگوریتم های تکاملی به جستجوی دانش جدید برای یافتن کامل ترین طراحی بهینه می‌پردازد. در ادامه به تشریح این سه بخش می‌پردازیم.

۴-۱. پنل گرافیکی ورودی دانش و اطلاعات اولیه

بخشی از دانش اولیه هر مسئله برای الگوریتم هوش مصنوعی از طریق پنل گرافیکی شکل (۱ تعریف می شود. این بخش از دانش اولیه شامل انتخاب نوع کار (کنترل مقطع مشخص، کنترل لیست، بهینه‌سازی)، آدرس و اسم فایل ETABS، ضریب نامعینی، محدودیت دلخواه دریفت، ضریب هم‌پایه‌سازی دینامیکی، سطح لرزه خیزی، اعمال خودکار نامنظمی و نوع سیستم لرزه‌ای در دو جهت X و Y است.



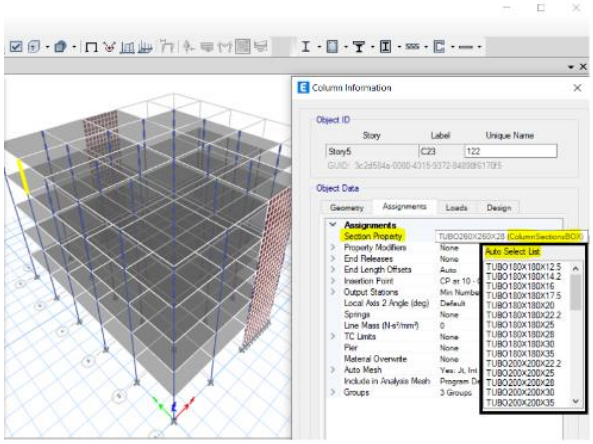
شکل (۱). پنل گرافیکی ورودی پلتفرم و انتخاب پارامترهای ورودی.

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مرجع قابل قبول طراحی ساختمان‌ها توسط نظام مهندسی کشور و اکثر طراحان از نرم‌افزار ETABS استفاده می‌کنند، از فایل مدل ETABS به عنوان ورودی الگوریتم گرفته می شود. سایر دانش اولیه مسئله به‌صورت مستقیم از نرم‌افزار ETABS اخذ می‌شود این اطلاعات شامل: تعداد طبقات، لیست مقاطع هر گروه، مصالح، تعداد خرپشته‌ها، سربارها، برچسب‌گذاری المان‌ها و گروه ستون‌ها (GC1)، تیرها (GB1)، مهاربندها (GX1) و دیوارهای برشی (GW1).

۴-۲. شبکه‌سازی و برنامه‌ریزی اطلاعات اولیه

با تکمیل دانش اولیه مسئله، این اطلاعات و برچسب‌گذاری به‌صورت هوشمند برنامه‌ریزی می‌شوند تا به‌صورت مؤثر به عنوان

دانش اولیه هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گیرد. بعنوان نمونه لیست مقاطع گروه ستون ششم (GC6) در شکل (۲)، مربوط به طبقه آخر ساختمان، مستقیم از نرم‌افزار گرفته می‌شود و در الگوریتم بر اساس سطح مقطع مرتب‌سازی می‌شود بطوری که برچسب شماره یک متناظر با قوی‌ترین مقطع قابل استفاده باشد. به همین ترتیب شبکه سازی اولیه برای کل المان‌های سازه آماده‌سازی می‌شود تا در گام بعد برای تولید دانش جدید به کمک الگوریتم‌های تکاملی قابل استفاده و درک باشد. این گام شامل برنامه ریزی الزامات و قیود آیین‌نامه نیز می‌باشد که در بخش ۶ بحث می‌گردد.



شکل (۲). نمایشی از پنل گرافیکی ورودی پلتفرم پژوهش.

۴-۳. الگوریتم های تکاملی مورد استفاده در پلتفرم برای تولید دانش جدید

انتخاب الگوریتم‌های تکاملی و به‌کارگیری آن‌ها وابستگی زیادی به شرایط مسئله مورد بررسی، گسترش و بزرگی مسئله، نوع متغیرها و شرایط به‌کارگیری آن‌ها دارد. در صورت اشتباه در به‌کارگیری این ابزارها، هزینه و زمان زیادی تلف خواهد شد؛ بنابراین باید در انتخاب این ابزار ها دقت زیادی نمود. به همین دلیل با توجه به ادبیات فنی ارائه شده در مقدمه از سه الگوریتم تکاملی جستجوی هارمونی (HS) [9]–[6]، ازدحام ذرات (PSO) [12]–[10]، ژنتیک (GA) [12]–[10] و یک الگوریتم گرادیانی (fmincon) [12]–[10] استفاده خواهد شد تا در نهایتاً بهترین آن‌ها برای مسئله طراحی کامل و بهینه‌سازی انواع سازه‌های فولادی رایج کشور استفاده گردد. این الگوریتم های در برنامه MATLAB بروزرسانی شدند تا بتوانند مسائل پیچیده را بهینه‌سازی کنند. عملکرد آن‌ها در نمونه‌های پیش رو بررسی خواهد شد.

۵. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی و کنترل الزامات و قیود

سازه‌های ورودی مسئله، تحت بارگذاری‌های مندرج در مبحث ۶ [۱۳] مقررات ملی ساختمان و الزامات و قیود استاندارد ۲۸۰۰ [۱۴] و مبحث ۱۰ سال ۱۴۰۱ [۱۵] تحلیل و طراحی خواهد شد. شایان به ذکر است، بهینه‌سازی روی مدل سه‌بعدی به کمک الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB و تحلیل دینامیک طیفی (RSA) در نرم‌افزار ETABS انجام می شود. هدف از طراحی بهینه، بهینه‌سازی وزن اصلی سازه ($Wight_0$) و اقناع شرایط هر کدام از الزامات آیین‌نامه‌ای ($g_j=Demand_j/Capacity_j$-1) می‌باشد. در صورت تجاوز حدود هر کدام از قیود مسئله، تابع جریمه (PF) آن به صورت تجمعی به کمک رابطه (۱) محاسبه شده است و این جریمه به کمک رابطه (۲) در وزن اصلی سازه ضرب می‌شود تا وزن جریمه‌دار سازه ($Wight_{PT}$) حاصل شود.

$$PF=\prod_{j=1}^{k}(\max\{g_j,0\}+1) \qquad (۱)$$

$$Weight_{PT}=\begin{cases} Weight_0 & ; \quad \text{if } PF=1 \\ Weight_0\times 2^{PF} & ; \quad \text{elseif } PF>1 \end{cases} \qquad (۲)$$

در ادامه به فرآیند جامع کنترل الزامات و قیود آیین‌نامه به طور مختصر پرداخته می‌شود:

گام ۱) کنترل شکل‌پذیری لرزه‌ای مقاطع بر اساس نوع سیستم لرزه‌ای و نوع المان (ستون، تیر و مهاربند) لازم است.

گام ۲) کنترل دریفت اولیه سازه با لحاظ نمودن ضریب نامعینی سازه (ρ)، سپس ارزیابی نوع پیچش با نامنظمی زیاد یا شدید جهت اعمال ضریب Aj آیین‌نامه ۲۸۰۰ به نیروی زلزله در صورت لزوم و کنترل دریفت نهایی سازه.

گام ۳) کنترل کردن نسبت تنش تمام ترکیب بار ها مبحث ۶ سال ۱۳۹۸ و هشدار محدودیت های لرزه‌ای نظیر طول مهار تکیه‌گاه‌های جانبی برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها بر اساس مبحث ۱۰ سال ۱۴۰۱.

گام ۴) کنترل کردن خیز بارهای سرویس تخت بار زنده با L/360 و تحت ترکیب بار زنده و مرده با L/240 و نیز کنترل ارتعاش 5Hz تیرها تحت بار مرده مطابق با مبحث ۱۰.

گام ۵) کنترل کردن اجرا پذیری طراحی برای هر کدام از اجزای ستون‌ها، مهاربندها و دیوارهای برشی با کنترل دقیق قرارگیری جزء تحتانی بزرگ‌تر یا مساوی در زیر جزء فوقانی آن صورت می‌پذیرد. این کنترل از دو منظور برای هوش مصنوعی بسیار مهم است تا اولاً، نرم‌افزار ETABS در تحلیل خطا یا اتلاف زمان صورت ندهد و دوما هوش مصنوعی به جواب اشتباه میل نکند. همچنین کنترل حداقل و حداکثر تراکم آرماتور مجاز دیوار

برشی مطابق مبحث ۹ سال ۱۳۹۹ [۱۶] در این بخش بررسی می‌شود.

گام ۶) کنترل کردن زلزله تشدید یافته مطابق با مبحث ۱۰ تحت ضریب اضافه مقاومت سیستم لرزه‌ای (Ω_0) برای ظرفیت محوری ستون‌ها صورت می‌پذیرد. این کار به‌صورت مستقیم و خودکار با ضرب ضریب Ω_0 در شدت زلزله و بینهایت کردن ظرفیت برشی و خمشی ستون‌ها انجام می‌شود.

گام ۷) کنترل کردن ظرفیت اتصال بر اساس مبحث ۱۰ با محاسبه نسبت مجمع ظرفیت خمشی ستون ها به مجمع ظرفیت خمشی تیرها برای سیستم‌های قاب خمشی ویژه و دوگانه ارزیابی می شود. برخلاف کنترل ETABS، در آیین‌نامه ایران برای کنترل ظرفیت خمشی ستون‌ها گفته شده حتماً باید از نیروی محوری تحت زلزله تشدید یافته در کاهش ظرفیت آن استفاده شود که در الگوریتم اعمال شد. همچنین نقیصه ETABS در عدم کنترل این معیار برای تمام مقاطع فولادی نظیر مقاطع قوطی و SD به‌صورت مستقیم و هوشمند در الگوریتم نوشته شده رفع شده است.

گام ۸) کنترل کردن دریفت در بارگذاری سرویس برای سازه‌هایی با اهمیت خیلی زیاد، در این بخش سختی اعضاء نباید کاهش داده شود و شدت زلزله باید با ضریب یک ششم اعمال شود که در آن تحلیل ضریب رفتار (R) باید یک فرض گردد.

گام ۹) کنترل کردن نسبت تنش در بارگذاری سرویس، این کنترل ها با همان فرضیات بند ۸ قبلی ولی با کاهش سختی اعضاء انجام می‌شوند. در این کنترل نسبت تنش برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها بر اساس مبحث ۱۰ کنترل می‌شوند.

گام ۱۰) کنترل سیستم دوگانه برای سهم قاب خمشی تنها با ۲۵٪ شدت زلزله مطابق استاندارد ۲۸۰۰ صورت می‌گردد.

گام ۱۱) کنترل سیستم دوگانه مطابق استاندارد ۲۸۰۰ برای سهم سیستم مهاربند یا دیوار برشی با ۵۰٪ شدت زلزله صورت می‌گردد.

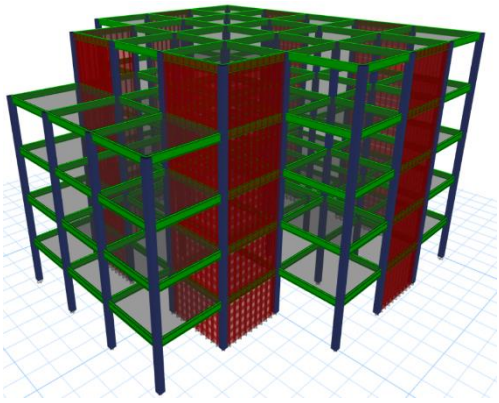
نهایتاً بر اساس ۱۱ دسته کلی ذکر شده در بالا الگوریتم به‌صورت هوشمند انتخاب می‌کند که در هر مسئله متفاوت کدام الزامات و قیود آیین‌نامه‌ای مطابق با سیستم لرزه‌ای انتخاب شده باید کنترل گردد. در ادامه سه نمونه با سه سیستم لرزه‌ای مختلف ارائه می‌شود.

۶. سه نمونه سازه‌ای کاربردی

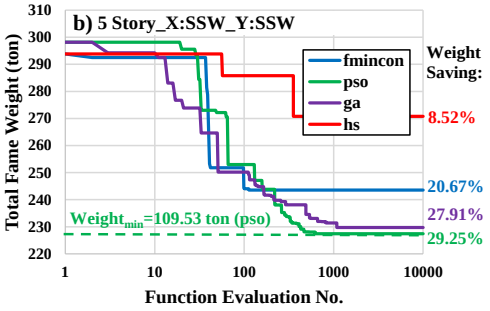
در ادامه به ارزیابی عملکرد پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی در میل به بهینه‌ترین طراحی کامل پرداخته می شود. این پلتفرم با چهار الگوریتم معروف بهینه سازی fmincon، GA، PSO و HS به جستجوی جواب خواهد پرداخت. برای این امر سه ساختمان پنج طبقه نامنظم در ارتفاع و پلان با سه نوع سیسم لرزه‌ای شرح داده شده بررسی می‌گردد. به دلیل استفاده از تحلیل دینامیک طیفی، در تمام گام های تحلیل ضریب همپایگی دینامیکی توسط الگوریتم کنترل و اعمال می‌گردد.

۶-۱. سیستم قاب ساده با دیوار برشی

یک سازه پنج طبقه با سیستم قاب ساده با دیوار برشی ویژه در دو جهت متعامد به نحوی در نظر گرفته شد تا مطابق شکل (**۳**) پیچش ناشی از نامنظمی آن به حداقل ممکن برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم اشاره شده مطابق شکل (**۴**) بهینه سازی گردید. در این بخش الگوریتم PSO توانسته وزن سازه بهینه را به 227.39ton یعنی حدود ۲۹,۲۵٪ معادل ۶۶,۵ تن سبک‌سازی بکند. سازه مبنا مقایسه با وزن 293.9ton مطابق توضیحات قبل سازه‌ای است که تمام الزامات و قیود آیین‌نامه ایران را اقناع می‌کند. در رتبه دوم الگوریتم GA نیز عملکرد خوبی داشته و موفق شده وزن سازه بهینه را به 229.77ton یعنی حدود ۲۷,۹۱٪ معادل ۶۴,۱ تن سبک‌سازی نماید. به همین ترتیب در رتبه سوم و چهارم الگوریتم fmincon و HS توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۲۰,۶۷٪ و حدود ۸,۵۲٪ سبک‌سازی گردند.



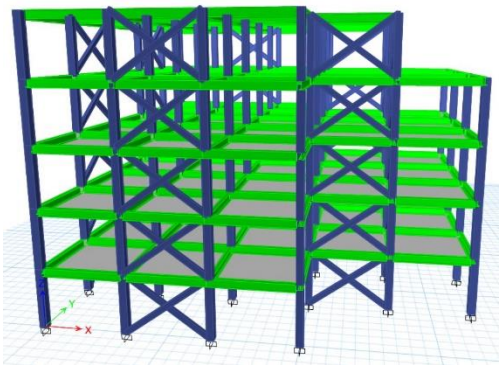
شکل (۳). شمایی از هندسه المان‌های سازه با سیستم قاب ساده با دیوار برشی نمونه سازه اول.



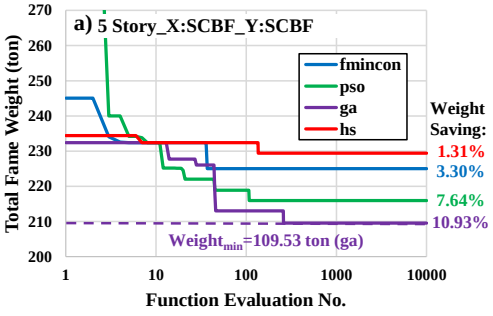
شکل (۴). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی.

۶-۲. سیستم قاب مهاربندی

یک سازه پنج طبقه با سیستم قاب مهاربندی ضربدری ویژه در دو جهت متعامد به نحوی در نظر گرفته شد تا مطابق شکل (**۵**) پیچش ناشی از نامنظمی آن به کمترین مقدار برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم ذکر شده مطابق شکل (**۶**) بهینه سازی می شود. در این بخش الگوریتم GA با عملکردی بهتر توانسته وزن سازه بهینه را به 209.52ton یعنی حدود ۱۰,۹٪ معادل ۲۲,۹ تن سبک‌سازی نماید. سازه مبنا مقایسه با وزن 232.43ton سازه‌ای است که تمام قیود آیین‌نامه ایران را اقناع کرده و در حد توان طراحی بعد از بهینه سازی خودکار ETABS با اقناع قیود و الزامات آیین‌نامه‌ای اقتصادی شده بود. نکته قابل توجه این است که جواب بهینه خودکار ETABS به دلیل اقناع نکردن قیود آیین‌نامه‌ای مانند عدم کنترل ضریب اضافه مقاومت در این پلتفرم با اعمال ضریب پنالتی به بینهایت (دو تا سه برابر وزن سازه) حرکت می‌کند. در رتبه دوم الگوریتم PSO نیز عملکرد خوبی داشته و توانست وزن سازه بهینه را به 215.94ton یعنی حدود ۷,۶۴٪ معادل ۱۶,۵ تن سبک‌سازی بکند. در رتبه سوم و چهارم الگوریتم fmincon و HS توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۳,۳٪ و حدود ۱,۳۱٪ سبک‌سازی بکنند.



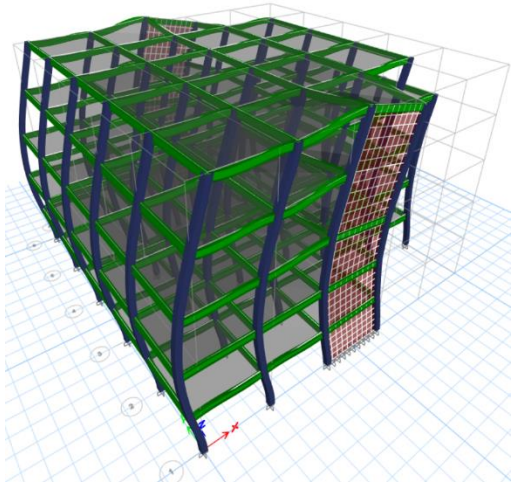
شکل (۵). شمایی از هندسه المان‌های سازه با سیستم قاب مهاربندی.



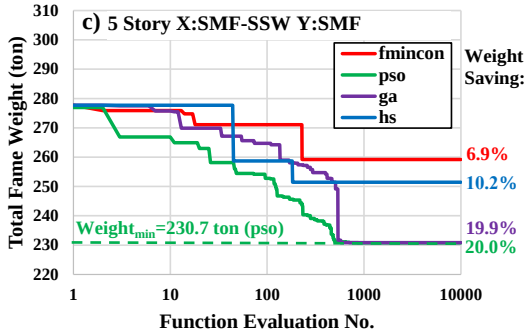
شکل (۶). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی سازه دوم.

۶-۳. سیستم قاب خمشی ویژه دوگانه با دیوار برشی

یک سازه ساختمان پنج طبقه با سیستم قاب خمشی در یک جهت و سیستم قاب خمشی دوگانه با دیوار برشی ویژه در جهت متعامد به نحوی در نظر گرفته شد تا مطابق شکل (**۷**) پیچش ناشی از نامنظمی آن به حداقل ممکن برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم اشاره شده مطابق شکل (**۸**) بهینه سازی شده است. در این بخش الگوریتم PSO توانسته وزن سازه بهینه را به 230.7ton یعنی حدود ۲۰,۰٪ معادل ۴۶,۳ تن سبک‌سازی نماید. سازه مبنا مقایسه با وزن 277ton مطابق توضیحات قبل سازه‌ای است که کلیه الزامات و قیود آیین‌نامه ایران را اقناع کرده است. از جهتی الگوریتم GA نیز عملکرد خوبی داشته و موفق شده وزن سازه بهینه را به 230.9ton یعنی حدود ۱۹,۹٪ معادل ۴۶,۱ تن سبک‌سازی نماید. به همین ترتیب در رتبه سوم و چهارم الگوریتم HS و fmincon توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۱۰,۲٪ و حدود ۶,۹٪ سبک‌سازی کردند.



شکل (۷). شمایی از هندسه المان‌های سازه با سیستم قاب خمشی ویژه دوگانه با دیوار برشی.

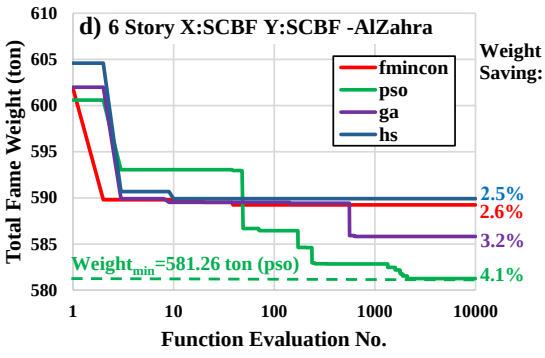


شکل (۸). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی سازه سوم.

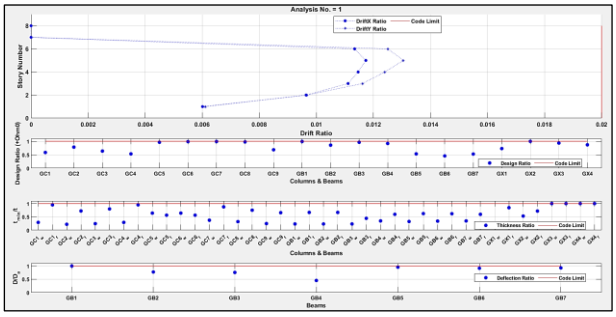
۷. ارزیابی پلتفرم با پروژه بیمارستان الزهرا

برای صحت‌سنجی کارکرد درست پلتفرم با ساختمان های پیچیده‌تر از پروژه بیمارستان الزهرا تبریز با دو خرپشته در دو ارتفاع مختلف دارد و با زیربنای ۹۲۰۰ مترمربع که در ۶ طبقه احداث شده، بررسی شد. این بیمارستان مطابق شکل (۹ از دو سیستم قاب مهاربندی در دو جهت متعامد استفاده شده است و به نحوی قرار گرفتند تا پیچش ناشی از نامنظمی آن به حداقل ممکن برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم اشاره شده مطابق شکل (۱۰ بهینه سازی گردید. در این بخش الگوریتم PSO با عملکرد بهتر توانسته وزن سازه بهینه را به 581.2ton یعنی حدود ۴,۱٪ معادل ۲۳,۴ تن سبک‌سازی نماید. سازه مبنا مقایسه با وزن 604.6ton سازه‌ای است که در زمان اجرا به صورت بهینه طراحی شده بود و با این وجود این الگوریتم توانست با موفقیت طراحی آن را بهبود بخشد. از جهتی الگوریتم GA نیز عملکرد خوبی دارد و موفق شده وزن سازه بهینه را به 585.8ton یعنی را حدود ۳,۲٪ معادل ۱۸,۸ تن سبک‌سازی نماید. همچنین در رتبه سوم و چهارم الگوریتم HS و fmincon توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۲,۶٪ و حدود ۲,۵٪ سبک‌سازی نماید. بعد از مقایسه انواع راه‌حل‌ها بهینه نهایتاً نتایج الگوریتم PSO به عنوان بهترین الگوریتم انتخاب شده است و به‌صورت گرافیکی در شکل (۱۱ با جزئیات بیشتر نمایش داده شده است.

شکل (۹). اجرای اسکلت و شمای هندسه المان‌های سازه بیمارستان الزهرا.



شکل (۱۰). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی.



شکل (۱۱). شمای گرافیکی از خروجی‌های بهینه‌ترین گزینه طراحی پروژه بیمارستان الزهرا.

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی معرفی شده است. این پلتفرم به زبان برنامه نویسی MATLAB نوشته

شد و به کمک ارتباط API با نرم‌افزار تحلیل و طراحی ETABS ارتباط برقرار شده است. با وارد کردن یک فایل ورودی ETABS با استانداردهای خواسته شده در پنل گرافیکی، این پلتفرم قابلیت طراحی هوشمندانه انواع سازه‌های فولادی متداول کشور را فراهم می‌کند. این موضوع تا به حال کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است چراکه علم لازم برای گسترش این فناوری هوشمند در طراحی خودکار فراهم نبود و از طرفی اقناع کلیه الزامات و قیود آیین‌نامه کار بسیار سنگین بوده که با ابتکارات فراوانی به این هدف بزرگ رسیدیم. در این پژوهش بیشتر به معرفی نتایج و کلیات کار پرداخته شده است. کلیه قیودات و الزامات آیین‌نامه‌ای استاندارد ۲۸۰۰، مبحث ۶، مبحث ۹ و مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان مربوط به انواع سازه‌های فولادی در این پلتفرم پیاده‌سازی گردید. استفاده از هوش مصنوعی در طراحی‌های مهندسی پدیده‌ای نوع ظهوری است که به سرعت در حال تکامل می‌باشد و کشور ایران نباید از آن عقب بماند.

در مقایسه الگوریتم های این پروژه، الگوریتم PSO با بالاترین عملکرد برای انواع سازه های شناسایی شده است و به عنوان الگوریتم تکاملی برگزیده برای این پلتفرم انتخاب گردید. دلیل علمی برتری الگوریتم PSO در این مسئله پیچیده، تعریف مقاطع پروفیل‌ها به‌صورت مرتب و نزولی بر اساس کاهش سطح مقطع فولاد آن می‌باشد. این پلتفرم برای سه سیستم سازه‌ای رایج در کشور مورد مطالعه: ۱) قاب مهاربندی، ۲) قاب ساده با دیوار برشی و ۳) قاب خمشی دوگانه با دیوار برشی توانسته است به ترتیب به میزان ۱۱٪ (23ton)، ۲۹٪ (66.5ton) و ۲۰٪ (46.3ton) صرفه‌جویی فولاد داشته باشند. در هر سه نمونه سازه‌ای دیده شده که هوش مصنوعی با کاهش وزن سازه و افزایش زمان تناوب اصلی آن موفق شده است بار لرزه‌ای وارد به سازه را کاهش دهد و در نتیجه منجر به طرح اقتصادی تری شده است. همچنین پروژه بیمارستان الزهرا تبریز برای بررسی کارکرد مناسب پلتفرم در سازه های پیچیده‌تر ارزیابی شد. در این پروژه با وجود بهینه بودن طرح اجرا شده، این پلتفرم موفق شده طرح بهینه‌تری به میزان ۴٫۱٪ (23.4ton) صرفه‌جویی فولاد پیدا کند که این میزان مقداری زیاد و قابل توجهی می‌باشد. با توجه به قیمت نهایی واحد هر کیلو فولاد برابر با ۶۰ هزار تومان با احتساب هزینه رنگ، اتصالات و نصب هرکیلو فولاد، این پلتفرم ۱٫۴ میلیارد تومان صرفه‌جویی مالی و اقتصادی در پروژه الزهرا و نیز صرفه‌جویی در منابع با ارزش فولاد کشور انجام شده است. این در حالی است بطور هوشمند که با حذف خطای انسانی به یک طراحی کامل و ایمن دست یافتیم.

۹. مراجع

[1] "Abbasi M, Eshagh M. 'Use of artificial neural network in estimating seismic bearing capacity of strip surface foundations located on top of unlined cavity in homogeneous cohesive soils', Construction science and technology. , vol. 1, no. 4, pp. 65-75, 2021."

[2] S. Rajasekaran and G. A. V. Pai, *Neural networks, fuzzy logic and genetic algorithm: synthesis and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd. , 2003.

[3] B. Choudhury and R. M. Jha, "Soft Computing Techniques," in *Soft Computing in Electromagnetics*, Cambridge University Press, 2016, pp. 9–44.

[4] H. S. Park and C. W. Sung, "Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computers," *Comput. Struct.* , vol. 80, no. 14–15, pp. 1305–1316, 2002.

[5] S. Gholizadeh and O. A. Samavati, "Structural optimization by wavelet transforms and neural networks," *Appl. Math. Model.* , vol. 35, no. 2, pp. 915–929, 2011.

[6] A. Kaveh and S. Talatahari, "Charged system search for optimal design of frame structures," *Appl. Soft Comput.* , vol. 12, no. 1, pp. 382–393, 2012.

[7] R. Alberdi and K. Khandelwal, "Comparison of robustness of metaheuristic algorithms for steel frame optimization," *Eng. Struct.* , vol. 102, pp. 40–60, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j. engstruct. 2015.08.012.

[8] A. Kaveh, M. H. Ghafari, and Y. Gholipour, "Optimal seismic design of 3D steel moment frames: different ductility types," *Struct. Multidiscip. Optim.* , vol. 56, no. 6, pp. 1353–1368, 2017.

[9] A. Kaveh, M. Z. Kabir, and M. Bohlool, "Optimum design of three-dimensional steel frames with prismatic and non-prismatic elements," *Eng. Comput.* , pp. 1–17, 2019.

[10] M. Sarcheshmehpour, H. E. Estekanchi, and H. Moosavian, "Optimum seismic design of steel framed-tube and tube-in-tube tall buildings," *Struct. Des. Tall Spec. Build.* , vol. 29, no. 14, 2020, doi: 10.1002/tal. 1782.

[11] A. Ghasemof, M. Mirtaheri, R. Karami Mohammadi, and M. R. Mashayekhi, "Multi-objective optimal design of steel MRF buildings based on life-cycle cost using a swift algorithm," *Structures*, vol. 34, 2021, doi: 10.1016/j. istruc. 2021.09.088.

[12] S. A. Mirfarhadi, H. E. Estekanchi, and M. Sarcheshmehpour, "On optimal proportions of structural member cross-sections to achieve best seismic performance using value based seismic design approach," *Eng. Struct.* , vol. 231, 2021, doi: 10.1016/j. engstruct. 2020.111751.

[13] "Office of National Building Regulations, 'Mabhas 6: Loads on Buildings', Iran Development Publishing House, Housing and Construction

Deputy, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2018.(In Persian). ”

[14] “Bureau of National Building Regulations, ‘Standard 2800: Design Code of Buildings Against Earthquake’, 4th Edition, Iran Development Publishing House, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2014.(in Persian). ”

[15] “Office of National Building Regulations, ‘Mabhas 10: Design and Implementation of Steel Buildings’, Iran Development Publishing House, Housing and Construction Deputy, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2022.(in Persian). ”

[16] “Office of National Construction Regulations, ‘Mabhas 9: Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings’, Iran Development Publishing House, Housing and Construction, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2020.(In Persian). ”