

Optimal Form Analysis of High-Rise Buildings to Enhance Urban Livability and Energy Efficiency Using Karamba Plugin

1. Vali Zivari Afzal^{id}*: M.A., Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Mehrdad Karimimoshaver^{id}: Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

*Corresponding Author's Email Address: v.zivari2022@gmail.com

How to Cite: Zivari Afzal, V., & Karimimoshaver, M. (2024). Optimal Form Analysis of High-Rise Buildings to Enhance Urban Livability and Energy Efficiency Using Karamba Plugin. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 2(4), 120-140.

Abstract:

In recent decades, the increasing development of high-rise buildings in metropolitan areas has become one of the primary indicators of vertical urban expansion. These structures are not only significant due to their specific design and construction requirements, but they also serve as prominent elements in the urban skyline, playing a key role in shaping spatial identity. One of the major challenges in high-rise design is selecting architectural forms that simultaneously satisfy aesthetic criteria, structural efficiency, and resilience to lateral loads such as earthquakes. The present study aims to examine the impact of floor plan geometry and vertical scaling on the structural performance of high-rise buildings using a genetic algorithm optimization approach within the Grasshopper environment, enhanced by the Karamba plugin. In this context, lateral displacement was analyzed as the seismic vulnerability index, and structural weight per unit area was assessed as the structural efficiency index, both serving as objective functions. Through multi-objective analysis and the definition of geometric variables within a parametric model, a set of optimal forms was generated. These optimized forms can serve as a basis for design decision-making depending on the priorities set by the designer. The findings indicate that forms with simple roof plans (triangular) and compact vertical scaling demonstrate superior performance in terms of seismic behavior and structural weight. Furthermore, the results show that the final design response is not a single definitive solution, but rather a set of "Pareto-optimal solutions," from which the designer can select the final form based on visual aesthetics, compatibility with climate, and project context. The final analysis of the models was conducted within the parametric Grasshopper environment, and the results can be generalized and applied to similar projects under diverse climatic and structural conditions.

Keywords: Parametric design, structural analysis, genetic algorithm, architectural form of high-rise buildings, energy efficiency

Received: 14 December 2025

Revised: 22 January 2026

Accepted: 03 February 2026

Published: 15 February 2026



تحلیل بهینه فرم ساختمان‌های بلند در راستای ارتقاء زیست‌پذیری و بهره‌وری انرژی شهری با استفاده از پلاگین کارامبا

۱. ولی زیوری افضل[✉]: کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. (نویسنده مسئول)

۲. مهرداد کریمی مشاور[✉]: استاد، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.zivari2022@gmail.com

نحوه استناددهی: زیوری افضل، ولی، و کریمی مشاور، مهرداد. (۱۴۰۳). تحلیل بهینه فرم ساختمان‌های بلند در راستای ارتقاء زیست‌پذیری و بهره‌وری انرژی شهری با استفاده از پلاگین کارامبا. *تجلی هنر در معماری و شهرسازی*، ۲(۴)، ۱۴۰-۱۲۰.

چکیده

در دهه‌های اخیر، توسعه روزافزون ساختمان‌های بلندمرتبه در کلان‌شهرها به یکی از شاخص‌های اصلی گسترش عمودی شهرها بدل شده است. این سازه‌ها نه تنها به دلیل الزامات خاص در طراحی و اجرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، بلکه به عنوان عناصر شاخص در سیمای شهری، نقشی کلیدی در هویت بخشی فضایی ایفا می‌کنند. از مهم‌ترین چالش‌های طراحی ساختمان‌های بلند، انتخاب فرم‌های معماری است که هم‌زمان بتوانند الزامات زیبایی‌شناسی، بهره‌وری سازه‌ای و پایداری در برابر بارهای جانبی نظیر زلزله را تأمین کنند. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر هندسه پلان طبقات و مقیاس ارتفاعی آن‌ها بر عملکرد سازه‌ای ساختمان‌های بلند، با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در محیط گرسهپار و افزونه کارامبا انجام شده است. در این راستا، جابجایی جانبی به عنوان شاخص آسیب‌پذیری لرزه‌ای و وزن واحد سطح سازه به عنوان شاخص کارایی سازه‌ای، به عنوان توابع هدف مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با اجرای تحلیل چندهدفه و تعریف متغیرهای هندسی در قالب یک مدل پارامتریک، مجموعه‌ای از فرم‌های بهینه تولید شد که بسته به اولویت‌های طراحی، می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری طراح قرار گیرند. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که فرم‌های دارای پلان ساده (سه ضلعی) و مقیاس فشرده در ارتفاع، عملکرد بهتری از منظر لرزه‌ای و وزن دارند. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که پاسخ نهایی طراحی صرفاً یک جواب قطعی ندارد، بلکه در قالب «مجموعه جواب‌های پارتو» طراح می‌تواند بر اساس معیارهایی چون زیبایی بصری، هماهنگی با اقلیم و بستر پروژه، فرم نهایی را انتخاب نماید. تحلیل نهایی مدل‌ها در محیط پارامتریک گرسهپار انجام شده و نتایج آن در قالبی قابل تعمیم برای پروژه‌های مشابه با شرایط متنوع اقلیمی و سازه‌ای قابل بهره‌برداری است.

کلیدواژه‌ها: طراحی پارامتریک، تحلیل سازه‌ای، الگوریتم ژنتیک، فرم معماری ساختمان‌های بلند، بهره‌وری انرژی

تاریخ دریافت: ۲۴ آذر ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۳ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۵ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۲۷ بهمن ۱۴۰۳



مقدمه

رشد فزاینده جمعیت، تقاضای روزافزون برای فضاهای شهری، و ضرورت استفاده بهینه از زمین در شهرهای بزرگ، موجب شده ساخت و ساز عمودی به ویژه احداث ساختمان‌های بلندمرتبه، به راهکاری رایج و راهبردی در توسعه شهری تبدیل شود (1، 2). این سازه‌ها نه تنها در پاسخ به نیازهای اسکان، کار و خدمات شهری نقش دارند، بلکه بر کالبد، سیما و هویت شهری نیز اثرگذارند (3). در این میان، چالش اصلی طراحی این بناها، انتخاب فرم‌هایی است که ضمن برخورداری از هویت زیباشناختی، عملکرد مطلوبی در برابر نیروهای جانبی نظیر باد و زلزله داشته باشند.

در ایران که جزو مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا محسوب می‌شود، فرم معماری ساختمان‌های بلند باید هم‌زمان با معیارهای زیبایی‌شناسی، ملاحظات پایداری و مقاوم‌سازی سازه‌ای را نیز پاسخ دهد. فرم معماری به ویژه در مراحل آغازین طراحی شکل می‌گیرد و تأثیر مستقیم بر توزیع نیرو، جابجایی جانبی، و وزن کلی سازه دارد. از این رو، بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل پارامتریک و روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، به ویژه الگوریتم‌های هوشمندی چون الگوریتم ژنتیک (4)، فرصت‌های نوینی برای طراحی سازه‌های پیچیده و بهینه فراهم کرده است (5).

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی فرم معماری ساختمان‌های بلند با استفاده از پلاگین «کارامبا» در محیط گرس‌هاپر، به بررسی اثر تغییرات هندسی در پلان و مقیاس طبقات بر عملکرد سازه‌ای می‌پردازد. با تعریف توابع برازش برای جابجایی جانبی (به عنوان شاخص آسیب‌پذیری) و وزن واحد سطح (به عنوان شاخص بهره‌وری سازه‌ای)، مجموعه‌ای از فرم‌های بهینه‌سازی شده تولید شده که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری معماران در انتخاب فرم نهایی قرار گیرد. در همین راستا، این پژوهش در پی پاسخ‌گویی به پرسش‌های اساسی زیر است.

- چه پارامترهایی در طراحی فرم ساختمان بلند بیشترین تأثیر را بر عملکرد سازه‌ای دارند؟
- کدام یک از نیروهای جانبی (باد یا زلزله) نقش غالب‌تری در تحلیل عملکردی فرم‌ها دارند؟
- چگونه می‌توان با استفاده از ابزارهای پارامتریک، به بهینه‌سازی چندهدفه فرم در راستای کاهش وزن و جابجایی جانبی دست یافت؟

مبانی نظری

با گسترش شهرنشینی و افزایش نیاز به اسکان و فعالیت‌های اقتصادی در کلان‌شهرها، ساخت و توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه به یکی از راهکارهای اصلی در بهره‌برداری بهینه از اراضی شهری تبدیل شده است. این سازه‌ها نه تنها از منظر عملکردی و تراکم‌پذیری، بلکه به لحاظ نقش بصری و نمادین در سیمای شهری نیز اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند (1، 6). با این حال، طراحی ساختمان‌های بلند همواره با چالش‌های متعددی همراه است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها، عملکرد لرزه‌ای و پایداری در برابر نیروهای جانبی چون باد و زلزله است (7).

در این میان، فرم معماری به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مرحله ابتدایی طراحی، نقشی تعیین‌کننده در تعیین رفتار سازه‌ای بنا دارد. فرم‌های پیچیده اگرچه از منظر زیبایی‌شناسی و نوآوری معماری واجد ارزش‌اند، اما باید از منظر سازه‌ای نیز بهینه باشند تا بتوانند در برابر نیروهای جانبی به ویژه در پهنه‌های لرزه‌خیز مانند ایران عملکرد مناسبی از خود نشان دهند (8). انتخاب فرم‌هایی با مقاطع مناسب و توزیع جرم متوازن می‌تواند موجب کاهش جابجایی نسبی طبقات و به

تبع آن افزایش ایمنی سازه شود. برای نمونه، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فرم‌هایی با پلان‌های هشت ضلعی یا دایره‌ای نسبت به فرم‌های مثلثی یا باریک‌شونده، عملکرد بهتری در برابر زلزله دارند (9).

از سوی دیگر، تعامل میان فرم معماری و سیستم سازه‌ای در ساختمان‌های بلند، امری بنیادین است. در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های نوین سازه‌ای مانند دایاگرید^۱ مورد توجه طراحان قرار گرفته است؛ سیستمی که با بهره‌گیری از قاب‌های مورب، همزمان به کاهش وزن سازه و افزایش پایداری آن کمک می‌کند (10). بررسی‌های انجام‌شده بر روی ساختمان‌های دارای دایاگرید نشان داده‌اند که افزایش تعداد اضلاع پلان و استفاده از فرم‌های هرمی یا پیچشی می‌تواند موجب کاهش پیچش طبقات و افزایش کارایی لرزه‌ای گردد (11).

پیشرفت فناوری طراحی دیجیتال و ظهور ابزارهایی نظیر راینو و گرس‌هایپر، امکان مدلسازی فرم‌های پیچیده و تحلیل رفتار سازه‌ای آن‌ها را در مراحل اولیه طراحی فراهم کرده است. افزونه کارامبا^۲ به عنوان یک ابزار تحلیل سازه در محیط گرس‌هایپر، با ترکیب الگوریتم ژنتیک، طراح را قادر می‌سازد تا با تعریف اهداف چندگانه (مانند حداقل سازی وزن و جابجایی)، گزینه‌های بهینه را از میان هزاران فرم پیشنهادی استخراج کند (12). این روش به‌ویژه در بهینه‌سازی فرم‌های بلند با هندسه متغیر، ابزار کارآمدی به شمار می‌رود.

در مجموع، مبانی نظری این پژوهش بر این فرض استوار است که انتخاب فرم مناسب در ساختمان‌های بلند باید هم‌زمان پاسخگوی معیارهای زیبایی‌شناسی، الزامات سازه‌ای و شرایط اقلیمی باشد. ابزارهای طراحی پارامتریک و تحلیل بهینه، فرصتی را فراهم کرده‌اند تا طراح بتواند از مرحله‌ای زود هنگام در فرآیند طراحی، تصمیماتی آگاهانه و مبتنی بر داده درخصوص فرم نهایی اتخاذ کند. پژوهش حاضر بر پایه همین رویکرد، به بررسی هم‌زمان پارامترهای هندسه پلان و مقیاس در یک مدل پارامتریک چندهدفه با هدف افزایش پایداری و کاهش وزن سازه می‌پردازد.

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در دهه‌های اخیر به بررسی تأثیر فرم معماری بر عملکرد سازه‌ای ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند. بیشتر این پژوهش‌ها بر نقش فرم، شکل پلان، نسبت ارتفاع به عرض و سیستم سازه‌ای در کاهش آسیب‌پذیری در برابر نیروهای جانبی نظیر زلزله و باد تأکید دارند.

در میان مطالعات داخلی، پژوهش تحصیل‌دوست و همکاران به بررسی تأثیر هندسه پلان در ساختمان‌های بلند با سیستم دایاگرید پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که فرم‌های دارای پلان‌های ۸ و ۱۲ ضلعی نسبت به سایر فرم‌ها از جابجایی و وزن کمتری برخوردار بوده و بنابراین، عملکرد سازه‌ای بهتری از خود نشان می‌دهند. در مقابل، فرم‌های با پلان سه‌ضلعی دارای بیشترین میزان جابجایی و وزن بوده‌اند که آن‌ها را به گزینه‌هایی ضعیف‌تر در تحلیل‌های لرزه‌ای تبدیل می‌کند (9). در پژوهشی دیگر، رضازاده، شاه‌رودی و جهانی (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر شکل پلان و موقعیت مرکز جرم بر توزیع نیروهای جانبی در ساختمان‌های بلند پرداختند. آن‌ها دریافتند که هرچه مرکز جرم به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، نیروهای جانبی مؤثرتر در طبقات پایینی توزیع شده و در نتیجه، پایداری لرزه‌ای ساختمان بهبود می‌یابد. همچنین، فرم‌هایی با توزیع منظم جرم و سختی، مقاومت بالاتری در برابر زلزله از خود نشان می‌دهند (7). جاویدان‌نیا، بمانیان و مهدوی‌نژاد (۱۴۰۱) با تمرکز بر فرم‌های هرمی و پیچشی در ساختمان‌های بلند، اثربخشی فرم‌های پیچیده را بر جابجایی جانبی و وزن سازه مورد آزمون قرار دادند. یافته‌های

¹ Diagrid

² Karamba

این تحقیق تأیید کرد که استفاده از فرم‌های پیچشی به شرط طراحی دقیق می‌تواند منجر به کاهش وزن و دریافت سازه شود. آن‌ها همچنین بر کارایی بالای فرم‌های پلان چندضلعی در کاهش اثرات پیچش در ارتفاع تأکید کردند (10). از سوی دیگر، پژوهش اردکانی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که افزایش تعداد اضلاع پلان و به‌کارگیری انحنا یا محدب یا مقعر در مقطع می‌تواند منجر به بهبود عملکرد سازه‌ای شود. این مطالعه همچنین بر ضرورت بررسی فرم‌های هرمی و تغییرات ارتفاعی در راستای بهینه‌سازی وزن و سختی کلی سازه تأکید داشت (11).

همچنین، بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های شورای ساختمان‌های بلند و سکونت شهری^۱ نیز نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر استفاده از سیستم‌های دایاگرید و فرم‌های هندسی پیچیده، با هدف تلفیق عملکرد سازه‌ای و زیبایی‌شناسی، روندی صعودی داشته و در بسیاری از آسمان‌خراش‌های جدید جهان از این اصول بهره گرفته شده است. در مطالعه‌ای توسط محققان چینی، چارچوبی برای بهینه‌سازی چندهدفه طراحی ساختمان با استفاده از مدل‌های جانشین ارائه شده است که هدف آن دستیابی به تعادل میان دو هدف متعارض یعنی بهره‌وری انرژی و راحتی حرارتی بوده است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی انرژی، داده‌های لازم در خصوص مصرف انرژی و پارامترهای طراحی ساختمان تولید شد و سپس از الگوریتم جنگل تصادفی برای آموزش مدل جانشین استفاده گردید. در ادامه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه از جمله NSGA-II به‌کار گرفته شدند تا مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو برای طراحی بهینه ساختمان تولید گردد. نتایج مطالعه موردی انجام‌شده بر روی یک ساختمان مسکونی در شهر سوچو نشان داد که مدل جانشین با دقت بالایی (با MSE معادل ۰.۰۰۰۱۲ و ضریب تعیین R^2 برابر با ۰.۹۹) قادر به پیش‌بینی عملکرد انرژی است. همچنین در ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم NSGA-II در ابعاد مختلف از جمله اندازه مجموعه پارتو، تنوع راه‌حل‌ها، نزدیکی به جبهه پارتو و کیفیت راه‌حل نهایی، بهترین عملکرد را نشان داد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، انتخاب الگوریتم مناسب و تنظیم بهینه پارامترهای آن می‌تواند در ارتقاء بهره‌وری انرژی و راحتی محیطی ساختمان‌ها مؤثر بوده و به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری در پروژه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد (4).

در مجموع، مرور پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی به بررسی تأثیر فرم و پلان بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند، اما عمده آن‌ها به صورت جداگانه به هندسه پلان یا مقیاس پرداخته‌اند. پژوهش حاضر با تمرکز هم‌زمان بر دو پارامتر هندسه متغیر پلان در ارتفاع و اسکالینگ طبقات، در قالب مدلی پارامتریک و چندهدفه، نوآوری قابل توجهی در حوزه طراحی ساختمان‌های بلند ارائه می‌دهد.

روش‌شناسی پژوهش

۱. رویکرد پژوهش و چارچوب کلی

این پژوهش در زمره مطالعات کاربردی و توسعه‌ای قرار دارد که با هدف بهینه‌سازی فرم معماری ساختمان‌های بلند و بررسی هم‌زمان عملکرد سازه‌ای آن‌ها انجام شده است. روش تحقیق، ترکیبی از مدل‌سازی پارامتریک و تحلیل بهینه‌سازی چندهدفه است که به‌صورت شبیه‌سازی کامپیوتری در محیط نرم‌افزار راینو^۲

^۱ CTBUH

^۲ Rhinoceros

و گرسهپا^۱ اجرا گردیده و تحلیل سازه‌ای با افزونه کارامبا صورت پذیرفته است. از الگوریتم ژنتیک به عنوان رویکرد اصلی بهینه‌سازی استفاده شده است تا پاسخ‌های چندهدفه با معیارهای عملکردی مختلف شناسایی گردد.

۲. ابزارهای نرم‌افزاری و محیط مدل‌سازی

برای تولید و تحلیل فرم‌ها، از مدل‌سازی پارامتریک در بستر گرسهپا^۱ استفاده شد. گرسهپا^۱ یک محیط کدنویسی گرافیکی مبتنی بر گره و جریان داده است که امکان طراحی و تغییر پارامترهای فرم به صورت لحظه‌ای^۲ را فراهم می‌کند. افزونه کارامبا به عنوان یک ابزار تحلیل اجزای محدود سبک‌وزن، امکان تحلیل سریع رفتار سازه‌ای فرم‌های تولیدشده را فراهم نمود (13). قابلیت پردازش آنی، بازخورد سریع و تعامل دوطرفه بین فرم و پاسخ سازه‌ای، باعث شد تا طراح بتواند هم‌زمان فرم را اصلاح کرده و تأثیرات آن بر وزن و جابجایی جانبی را ارزیابی نماید.

۳. ساختار طراحی پارامتریک

فرایند طراحی پارامتریک شامل تعریف متغیرهای اصلی هندسی (نظیر ابعاد پلان، نسبت طبقات، مقیاس ارتفاعی و زاویه چرخش سطوح) و تولید جمعیتی از فرم‌های مختلف بود. در هر مرحله، هندسه فرم به صورت پویا تولید شده و سپس از طریق اتصال به افزونه کارامبا، پاسخ سازه‌ای آن در برابر بارهای جانبی مورد تحلیل قرار گرفت. دو تابع هدف اصلی برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند.

۱. جابجایی جانبی نسبی طبقات (به عنوان شاخص آسیب‌پذیری سازه‌ای)

۲. وزن واحد سطح سازه (به عنوان شاخص بهره‌وری مصالح)

۴. روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

برای جستجوی فرم‌های بهینه، از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شد. الگوریتم ژنتیک یک روش تکاملی مبتنی بر مفاهیم وراثت، انتخاب طبیعی، جهش و ترکیب است که از ساختار زیستی الگوبرداری شده است (14, 15). جمعیت اولیه شامل فرم‌های تولیدشده از پارامترهای تصادفی بود. این فرم‌ها به عنوان «کروموزوم» تلقی شده و در هر نسل، با اعمال عملگرهای انتخاب^۳، ترکیب مجدد^۴ و جهش^۵ فرم‌های جدیدی تولید می‌شد. سپس بر اساس تابع شایستگی^۶ که شامل حداقل‌سازی وزن و جابجایی بود، بهترین گزینه‌ها برای نسل بعد انتخاب شدند. این فرایند تا رسیدن به همگرایی در جمعیت ادامه یافت. به عنوان مثال نحوه انجام عملیات بازترکیبی و انجام عملیات جهش در شکل شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است ÷

¹ Grasshopper

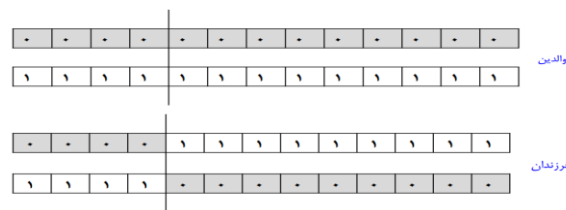
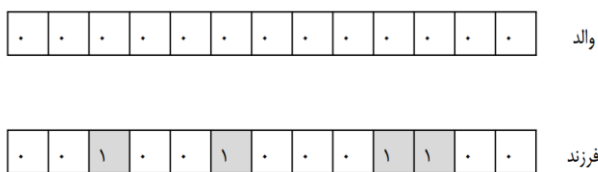
² Real-time

³ Selection

⁴ Crossover

⁵ Mutation

⁶ Fitness Function



شکل ۲. نحوه انجام عملیات جهش برای کروموزوم‌های فرم باینری

شکل ۱. نحوه انجام عملیات بازترکیبی

۵. شاخص‌ها و معیارهای ارزیابی

پاسخ‌های مدل بر اساس دو شاخص اصلی ارزیابی شدند.

۱. جابجایی جانبی نسبی^۱ که نشان‌دهنده عملکرد لرزه‌ای و پایداری ساختمان است $(\text{Max Drift}(x) = f_p(x))$.

۲. وزن سازه به ازای هر واحد سطح $(\text{Weight}/\text{m}^2)$ که بر بازدهی و اقتصادی بودن سیستم تأثیر دارد.

$$f = \text{سطح واحد وزن} = \frac{W(x)}{A}$$

۶. شرط خاتمه الگوریتم و بهینه‌سازی چندهدفه

الگوریتم تا زمانی ادامه یافت که یکی از شرایط زیر حاصل شد.

۱. رسیدن به تعداد نسل مشخص (مثلاً ۱۰۰ نسل)

۲. عدم بهبود شایستگی بهترین فرم در چند نسل متوالی

۳. کاهش واریانس شایستگی جمعیت به حد مشخص

با توجه به آنکه بیش از یک تابع هدف وجود داشت، فرآیند بهینه‌سازی به صورت چندهدفه^۲ اجرا شد و خروجی نهایی مجموعه‌ای از گزینه‌های بهینه^۳ بود

که طراح می‌توانست بر اساس اولویت‌های پروژه از میان آن‌ها انتخاب کند.

یافته‌ها

در این پژوهش جهت حصول فرم بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که در آن از تکنیک‌های

فرگشتی مانند وراثت، جهش زیست‌شناسی و اصول انتخابی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌شود. مراحل فلوچارت

الگوریتم عبارتند از:

- تشکیل جمعیت اولیه
- انتخاب بر اساس تابع برازش/ برازندگی
- ترکیب و جهش از آلترناتیوهای انتخاب شده

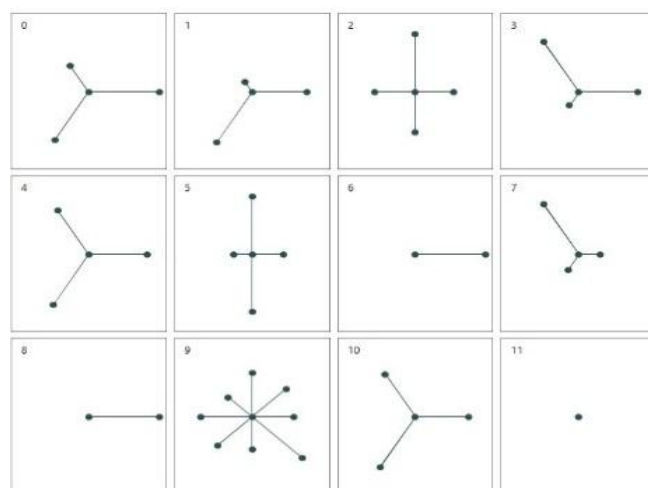
¹ Drift

² Multi-objective

³ Pareto Optimal Solutions

- تولید نسل جدید
- انتخاب از میان نسل جدید بر اساس تابع برازش
- تکرار تمام مراحل بالا

به هر بار انجام شدن این فرایند، یک نسل می‌گوییم. پیش از شروع آنالیز توسط پلاگین Wallacei که به نتایج نهایی پژوهش منجر خواهد شد، با تعریف متغیرهای اولیه، آنالیزی به منظور Parametric study انجام می‌شود که به نوعی جستجو یا مشاهده‌ی فضای طراحی قلمداد می‌گردد. نتایج هندسی حاصل از Biomorpher بر مبنای الگوریتم K-means Clustering شکل می‌گیرند. بدین صورت که پس از تعریف جمعیت اولیه به صورت رندم یا مقادیر موجود متغیرها، جمعیت اولیه انتخاب می‌شود و سپس این جمعیت به ۱۲ خوشه تقسیم می‌شود. بعد از آن با این پیش‌فرض که مرکز هر Cluster به هم‌گروه‌هایی که در آن cluster قرار گرفته‌اند شباهت جئومتریک دارد؛ مرکز هر cluster را نمایش می‌دهد.



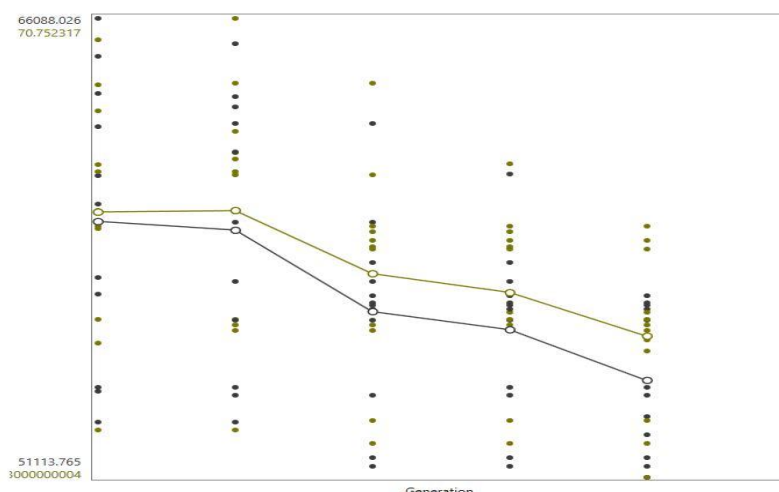
شکل ۳. نمایش دوبعدی Clustering جمعیت اولیه در biomorpher بر اساس الگوریتم K-means clustering

برای تولید نسل‌های بعدی، باید مشخص شود که قصد داریم توابعی که با عنوان perform در ورودی biomorpher تعریف شده است، ماکزیمم، مینیمم یا بی‌تأثیر باشند که در این مطالعه مینیمم مقدار برای هر دو تابع وزن سیستم و حداکثر جابجایی جانبی انتخاب شده است. نمایش فرم‌های هندسی چندین نسل در شکل (۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۴. فرم‌های هندسی تولید شده طی چند نسل در biomorpher بر اساس توابع برازش

و در نهایت می‌توان نمودار از خروجی توابع را به شکل نمودارهای گرافیکی در فضای biomorpher مشاهده نمود.



شکل ۵. نمودارهای مربوط به خروجی توابع در biomorpher

همانطور که انتظار می‌رفت کاهش مقدار توابع و بهینه‌سازی با طی نسل‌ها مشاهده می‌شود. گرچه نتایج Biomorpher به عنوان نتایج نهایی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند لیکن در مراحل اولیه‌ی طراحی پروژه، آزادی عملی که به کاربر برای انتخاب، فرایند optimization، جزئیات optimization و مشاهده‌ی فرم می‌دهد منحصر بفرد است. پس از مشاهده‌ی فضای طراحی در Biomorpher جهت آنالیز دقیق، Optimization و نتایج عددی دقیق به پلاگین Wallacei در گرسه‌پار مراجعه می‌شود. پس از تعریف دقیق پارامترهای الگوریتم شامل جمعیت اولیه، تعداد نسل‌ها و تعداد افراد هر نسل با مشخص کردن متغیرها و تعریف توابع برازش، فضای جستجو را برای الگوریتم ژنتیک در wallacei تعیین می‌شود.

Population

Generation Size	30
Generation Count	20
Population Size: 600	

Algorithm Parameters

Crossover Probability	0.9
Mutation Probability	☒ 1/n
Crossover Distribution Index	20
Mutation Distribution Index	20
Random Seed	1

شکل ۶. تعریف مقادیر و درصد احتمالات الگوریتم ژنتیک در wallacei

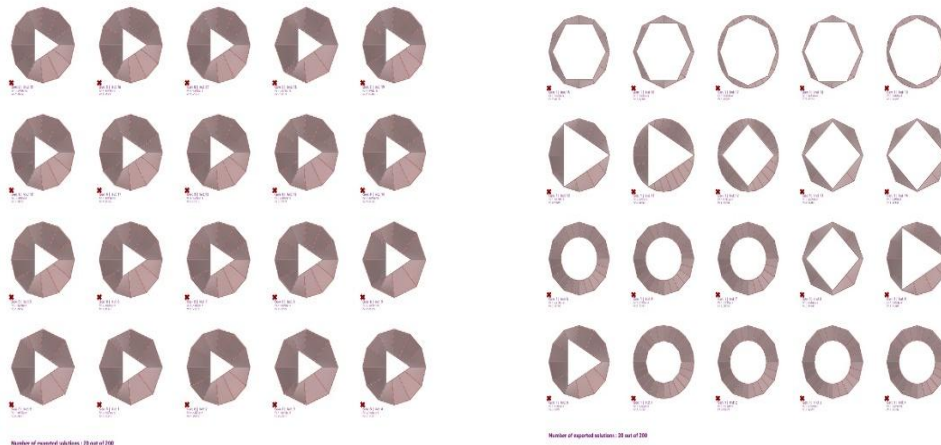
بهینه‌سازی در بین جمعیت هر نسل انجام شده و به نسل بعدی منتقل می‌شود تا در نهایت نمودارهای خروجی به سمت مقادیری که بهینه‌ترین مقادیر توابع برازش هستند، همگرا می‌شوند. می‌توان گفت چون هدف در اینجا بهینه‌سازی چندهدفه است جواب بهینه منحصر به فرد نبوده و مجموعه‌ای از جواب‌ها به عنوان نتایج بهینه‌سازی تحت عنوان Pareto Front Solutions ارائه شوند. در نهایت بر اساس ضریب اهمیت و اولویت توابع برازش یا دیگر ملاحظات طراحی همچون زیبایی بصری فرم، تصمیم‌گیری برای انتخاب پاسخ نهایی از بین پاسخ‌های موجود بر عهده‌ی طراح معمار خواهد بود. پارامترهای شبیه‌سازی شامل تعداد متغیرها، رنج عددی متغیرها، تعداد توابع برازش و فضای جستجو را در (شکل ۷) مشاهده می‌شود.

Simulation Parameters

No. of Genes (Sliders)	3
No. of Values (Slider Values)	110
No. of Fitness Objectives	2
Size of Search Space	1.8e3

شکل ۷. پارامترهای شبیه‌سازی در الگوریتم ژنتیک

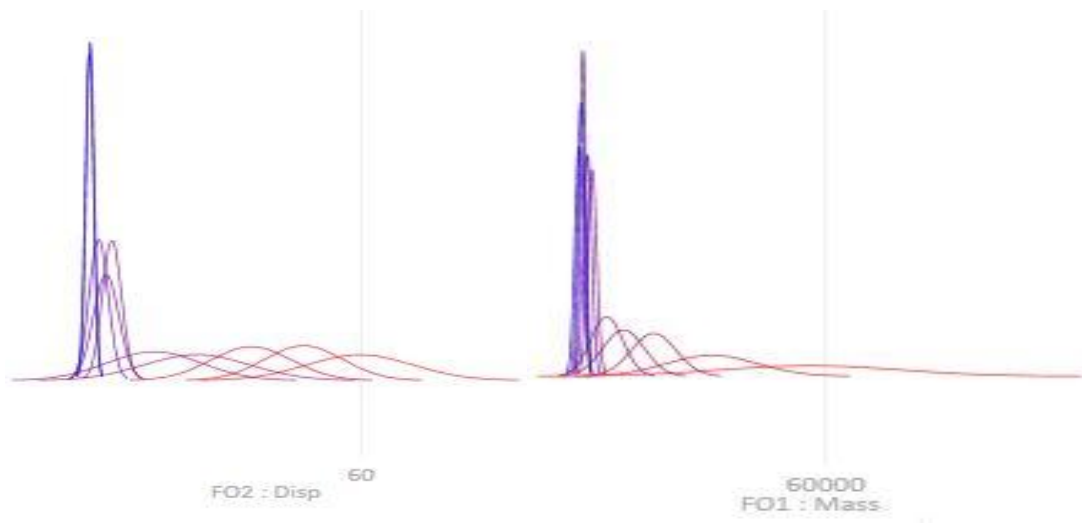
در نسل‌های اولیه، تنوع فرمی زیادی مشاهده می‌شود (شکل ۸). در حالت‌های مختلف مقادیر خروجی توابع اندازه‌گیری می‌شود و اطلاعات به نسل بعدی منتقل می‌شود. با تکرار هر نسل، الگوریتم قادر است به سمت حالت‌های بهینه پیش برود و رفته رفته از تنوع و گستردگی خروجی‌ها کم می‌شود (شکل ۹).



شکل ۸. فرم‌های خروجی نسل دوم

شکل ۹. فرم‌های خروجی نسل هشتم

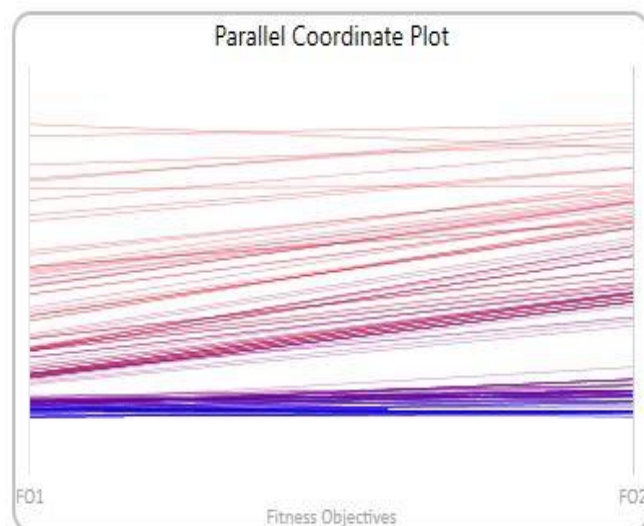
در قسمت Wallacei Analytic نمودارهای گرافیکی توابع تعریف شده مشاهده می‌شود. در (شکل ۱۰) نمودار Standard Deviation مربوط به تابع وزن و در (شکل ۱۱) نمودار مربوط به تابع حداکثر جابجایی جانبی ساختمان را مشاهده می‌کنید. این نمودار در واقع نوعی از توزیع دیتا را نمایش می‌دهد. خطوط تیره‌تر در نمودار نشانگر نسل‌های آخر الگوریتم هستند. همانطور که مشخص است در نسل‌های اولیه الگوریتم Diversity یا تنوع گسترده‌تری از دیتا را بررسی کرده تا بتواند به نقاط (Solution) های مشترکی بین توابع برسد و هر چه به نسل‌های آخر نزدیک شده نمودار همگرا تر شده است (به اصطلاح به سمت مقدار بهینه converge کرده است).



شکل ۱۰. نمودار تابع وزن

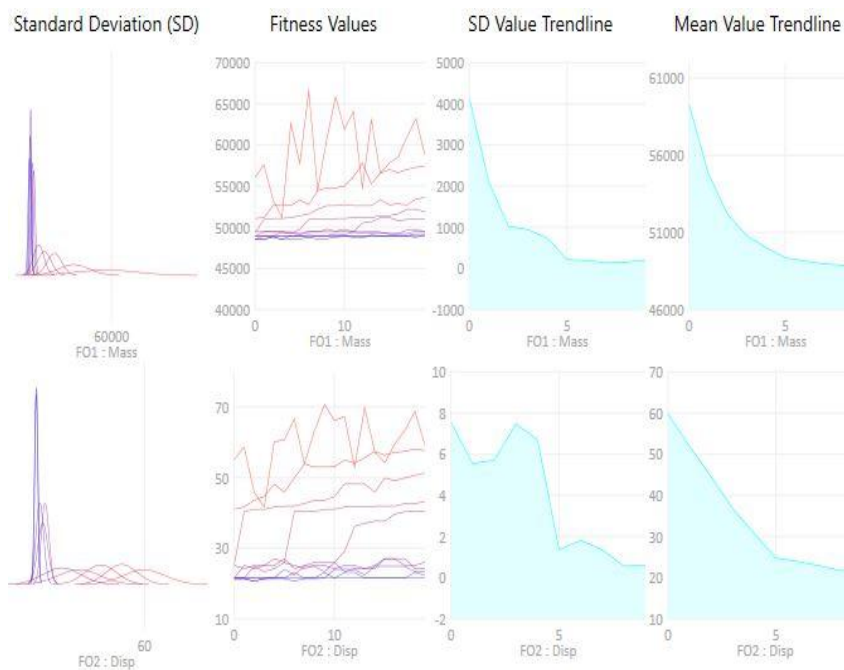
شکل ۱۱. نمودار تابع ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات

نمودار PCP (Parallel Coordinate Plot) در Wallacei (شکل ۱۲) رابطه بین دو تابع برازش را نشان می‌دهد. ابتدای نمودار مقادیر تابع اول و انتهای نمودار مقادیر تابع دوم را نشان می‌دهد. مشابه نمودار Standard Deviation خطوط تیره‌تر معرف نسل‌های آخر هستند و در طول نسل‌ها مقادیر هر دو تابع مینیمم شده است؛ به عبارتی خطوط از حالت صعودی به خطوط افقی نزدیکتر شده‌اند و بهینه‌سازی یا اصلاح نسل صورت گرفته است.



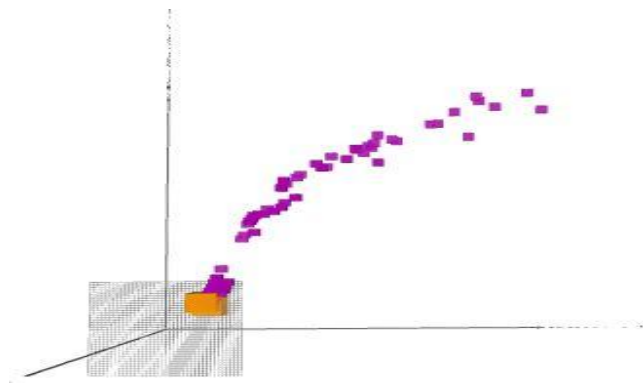
شکل ۱۲. نمودار PCP

Trend Line ها (نمودارهای گرافیکی در Wallacei) پروسه‌ی مینیمم‌سازی و در واقع نسبت بین متغیرها را به خوبی نشان می‌دهند (شکل ۱۳). تنوع بالا در انتخاب متغیرها، رنج وسیع مقادیر توابع، همگرایی به مقدار نسبتاً ثابت در نسل‌های آخر و در مجموع پروسه‌ی بهینه‌سازی به خوبی در این نمودار قابل مشاهده است.



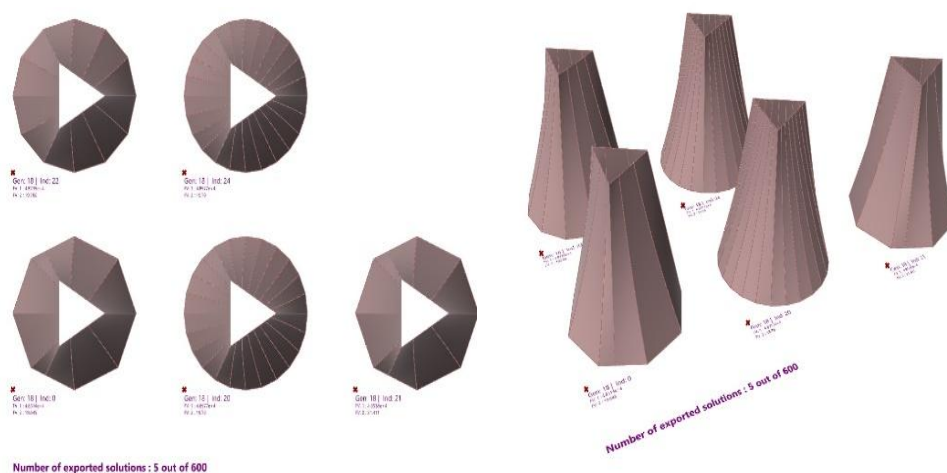
شکل ۱۳. نتایج آنالیز با نمودارهای Trendline

و در نهایت پراکندگی جمعیت فضای جستجو را مشاهده می‌کنیم (شکل ۱۴). اعضای نارنجی‌رنگ که به دلیل مقاربت زیاد به راحتی قابل تفکیک نیستند جواب‌های بهینه^۱ هستند که در آن‌ها هر دو تابع تعریف‌شده بر روی محورهای عمودی و افقی مقدار مینیمم دارند. در این مطالعه فاکتورهای مورد بررسی به گونه‌ای هستند که توابع هم‌راستا با یکدیگر تغییر می‌کنند و چون مقیاس طبقات نیز یکی از متغیرهاست بر روی توابع وزن و ماکزیمم جابجایی نسبی تاثیر نسبتاً مشابهی دارد.



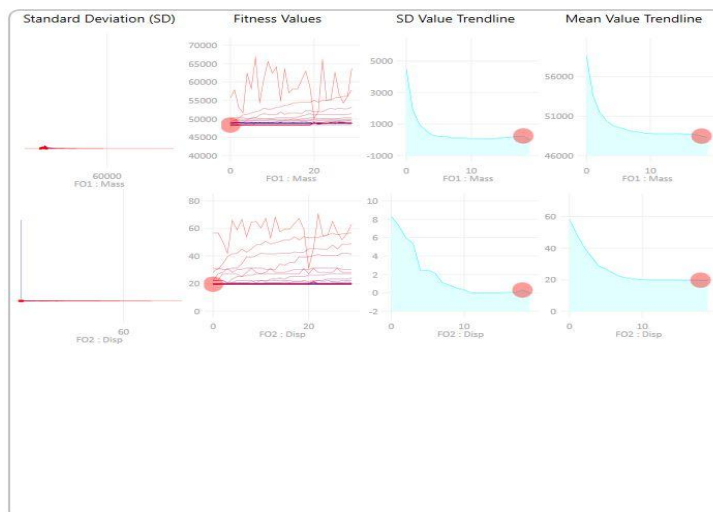
شکل ۱۴. جمعیت فضای جستجو

۵ جواب غیرتکراری در خروجی الگوریتم به عنوان بهترین جواب‌ها ارائه شدند که انتخاب از میان آن‌ها بر عهده‌ی طراح معمار خواهد بود. اولین جواب مربوط به پلان کف ۸ ضلعی، پلان بام ۳ ضلعی و مقیاس ۰.۵۰ است که در این حالت وزنی معادل ۴۸۳۰۰ تن و ماکزیمم جابجایی نسبی ۱۹.۶۴ سانتی‌متر خواهیم داشت. جواب بهینه‌ی بعدی مربوط به پلان کف ۲۴ ضلعی، پلان بام ۳ ضلعی و مقیاس ۰.۵ است که در این حالت وزن ۴۸۹۰۰ تن و ماکزیمم جابجایی نسبی ۱۹.۸۷ سانتی‌متر را خواهیم داشت.

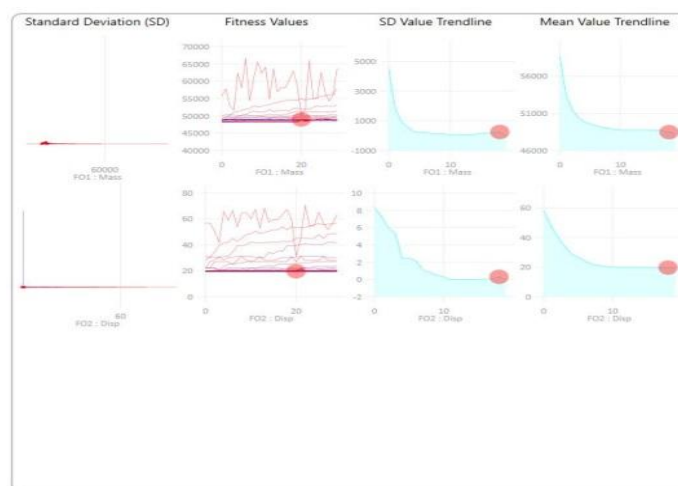


شکل ۱۵. پنج جواب بهینه wallacei

¹ Pareto Front Solutions



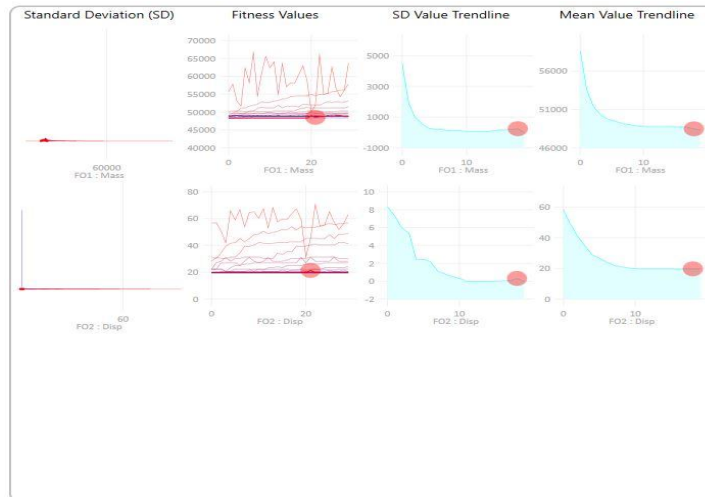
شکل ۱۶. اولین جواب بهینه، Gen ۱۸ l ind ۰



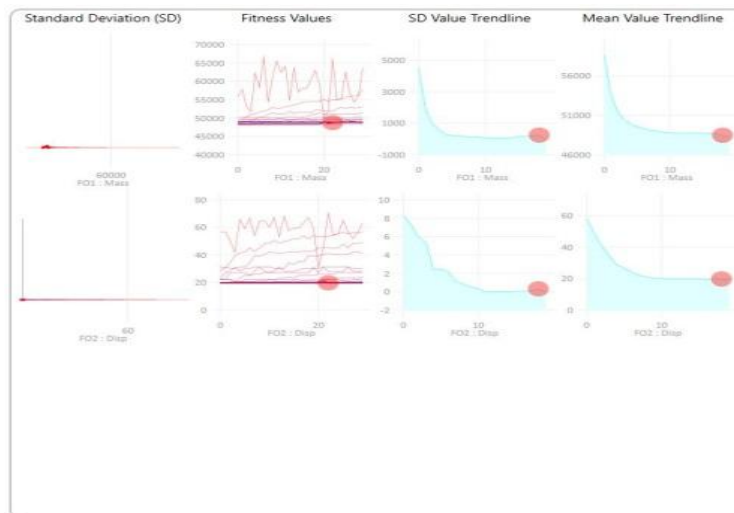
شکل ۱۷. دومین جواب بهینه، Gen ۱۸ l ind ۲۰

پلان کف ۸ ضلعی و پلان بام ۳ ضلعی با مقیاس ۰.۵۲. سومین جواب بهینه‌ای است که منجر به وزن ۴۸۵۰۰ تن و ماکزیمم جابجایی نسبی ۲۱.۴۱۱ سانتی‌متر می‌شود. چهارمین جواب بهینه مربوط به پلان کف ۱۲ ضلعی و پلان بام ۳ ضلعی با مقیاس ۰.۵ است که باعث می‌شود وزنی معادل ۴۸۷۰۰ تن و ماکزیمم جابجایی نسبی ۱۹.۸۷ سانتی‌متر داشته باشیم و در نهایت حالتی که به عنوان پنجمین پاسخ بهینه از بین پاسخ‌های موجود انتخاب شده است مربوط به پلان کف ۲۴ ضلعی و پلان بام ۳ ضلعی با مقیاس ۰.۵ است که منجر به وزنی معادل ۴۸۹۰۰ تن و ماکزیمم جابجایی نسبی ۱۹.۷۸ سانتی‌متر می‌شود.

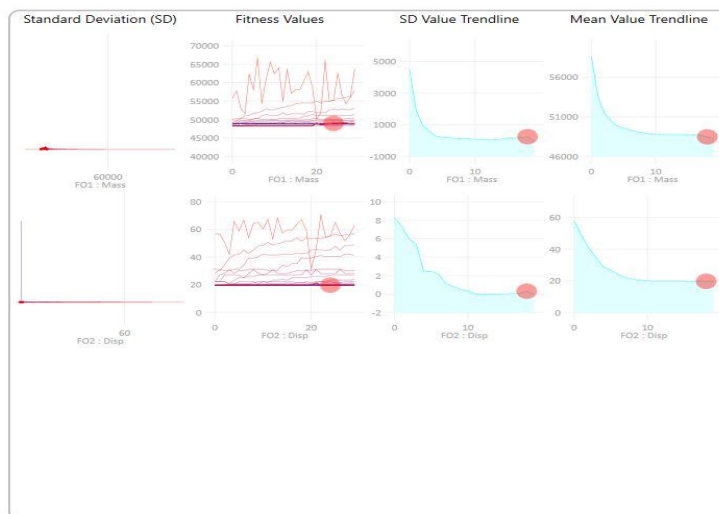
همانطور که مشاهده می‌شود چون با تحلیل چند متغیره و چندهدفه مواجهیم با محاسبات یا آنالیز دستی قادر به برآورد دقیق تاثیر هم‌زمان متغیرها بر روی توابع نخواهیم بود و استفاده از الگوریتم ژنتیک در چنین مواردی یکی از بهترین راه‌حل‌های ممکن در این زمینه است تا بتوانیم تاثیر فرم بر سازه را بررسی نماییم



شکل ۱۸. سومین جواب بهینه، Gen ۱۸ I ind ۲۱



شکل ۱۹. چهارمین جواب بهینه، Gen ۱۸ I ind ۲۲



شکل ۲۰. پنجمین جواب بهینه، Gen ۱۸ I ind ۲۴

نتایج به دست آمده نشان داد که میان عوامل هندسی (پلان، چرخش، باریکی) و عملکرد سازه‌ای رابطه‌ای مستقیم وجود دارد. طراحی فرم‌های پیچیده و بهینه‌سازی شده می‌تواند ضمن پاسخ‌گویی به معیارهای زیبایی‌شناسی، مصرف مصالح را کاهش داده و ایمنی ساختمان را در برابر زلزله و باد افزایش دهد. به کارگیری الگوریتم ژنتیک و تحلیل بلادرنگ با کارامبا امکان انتخاب آگاهانه‌ترین فرم را برای معمار فراهم می‌آورد و ارتباط میان سازه و فرم را به سطحی یکپارچه ارتقا می‌دهد.

برای مقایسه ساختاری و تسهیل تحلیل یافته‌ها، ویژگی‌های کلیدی پنج فرم بهینه استخراج شده از تحلیل ژنتیک در جدول زیر خلاصه شده‌اند. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، فرم‌هایی که از پلان بام سه ضلعی با مقیاس فشرده (نزدیک به ۰.۵۰) بهره برده‌اند، در همه موارد عملکرد مناسبی در دو شاخص وزن و جابجایی داشته‌اند. با وجود آنکه هندسه پلان کف در بعضی موارد ۲۴ ضلعی انتخاب شده، ولی اختلاف عملکرد آن‌ها با فرم‌هایی با پلان‌های ۸ یا ۱۲ ضلعی، نسبتاً ناچیز بوده است. این مسئله نشان می‌دهد که اولویت در انتخاب فرم نهایی ممکن است بیشتر به ملاحظات معمارانه نظیر زیبایی‌شناسی، تعامل با سایت و الزامات اقلیمی وابسته باشد تا صرفاً به حداقل سازی عددی پارامترهای فنی.

جدول ۱. خلاصه ویژگی‌های فرم‌های بهینه استخراج شده

شماره فرم	تعداد اضلاع پلان کف	تعداد اضلاع پلان بام	مقیاس ارتفاعی	وزن کل سازه (تن)	ماکزیمم جابجایی نسبی (سانتی متر)
فرم ۱	۸	۳	۰.۵۰	۴۸,۳۰۰	۱۹.۶۴
فرم ۲	۲۴	۳	۰.۵۰	۴۸,۹۰۰	۱۹.۸۷
فرم ۳	۸	۳	۰.۵۲	۴۸,۵۰۰	۲۱.۴۱
فرم ۴	۱۲	۳	۰.۵۰	۴۸,۷۰۰	۱۹.۸۷
فرم ۵	۲۴	۳	۰.۵۰	۴۸,۹۰۰	۱۹.۷۸

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی فرم معماری ساختمان‌های بلند با استفاده از طراحی پارامتریک، تحلیل سازه‌ای و الگوریتم ژنتیک انجام شد. با تعریف متغیرهایی نظیر تعداد اضلاع پلان، مقیاس ارتفاعی طبقات و زاویه چرخش سطوح، فرم‌هایی متنوع تولید و در محیط گرسه‌پایر و افزونه کارامبا تحلیل شدند. بر اساس آنچه در این مطالعه بدان پرداخته شد، با توجه به حجم نسبتاً زیاد محاسبات با توجه به پارامترهای تعریف شده و وجود هسته‌ی مرکزی و همچنین انتخاب سیستم دیوارهای باربر با دیوارهای برشی بتن مسلح ویژه با محدودیت ارتفاع ۵۰ متر به عنوان سیستم سازه‌ای بتنی، جهت اطمینان از دقت نتایج بهینه‌سازی ساختمان را به ۱۰ طبقه با ارتفاع کف تا کف ۴ متر محدود کرده است؛ مساحت دایره‌ی محیطی پلان کف را ۱۰۰۰ متر مربع و مساحت دایره‌ی محیطی پلان بام را ۵۰۰ متر مربع در نظر گرفته تا ضمن حفظ مقیاس در محدوده‌ی مجاز، کاهش یکنواخت مساحت پلان کف تا بام را داشته باشد. شایان ذکر است که با توجه به بستر طراحی و شرایط بنا یکی از نیروهای باد یا زلزله که غالب هستند به عنوان مبنای محاسبات نیروی جانبی در طراحی ساختمان‌ها در برابر بار جانبی در نظر گرفته می‌شود. حال با توجه به این موضوع که تراکم جمعیت در ساختمان‌های بلند زیاد است؛ از این رو در کلیه آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در دسته‌ی ساختمان‌های با اهمیت بسیار زیاد قرار گرفته است، بدون توجه به اینکه کدام بار (زلزله یا باد) به عنوان بار جانبی غالب محسوب شود، باید در برابر زلزله‌ی سطح بهره‌برداری -

زلزله‌ی خفیف با دوره‌ی بازگشت کوتاه که به احتمال زیاد دست کم یک بار در طول عمر یک ساختمان (پنجاه سال) اتفاق افتد، بدون کمترین آسیب دیدگی اجزای غیرسازه‌ای قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه داشته باشند. بر این اساس بارگذاری در این مطالعه بر اساس بار زلزله سطح بهره‌برداری انجام گرفته است.

تعریف دقیق پارامترهای مؤثر در برآورد نیروی زلزله و معادلات مربوط از آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ به دقت استخراج شده و مبنای عمل قرار گرفت. در انتخاب فرم معماری ساختمان‌های بلند شاخص‌های متفاوتی وجود دارند که بر روی عملکرد سازه‌ای ساختمان‌های بلند مؤثر هستند. از آنجا که هدف یافتن فرم بهینه بر عملکرد سازه‌ای است؛ مطالعاتی در راستای تعریف پارامترهای مؤثر بر عملکرد سازه‌ای صورت گرفته و وزن سازه به همراه ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات به عنوان مهم‌ترین این فاکتورها در نظر گرفته شدند. سپس جهت تعیین فاکتورهای متغیر فرم، در راستای مطالعات مقاله‌ی صغه (16) هندسه پلان کف طبقات به عنوان متغیر جهت حصول فرم بهینه در نظر گرفته شد. بدین صورت که چندضلعی‌های ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۲۴ ضلعی (قابل تقسیم به ۲۴ گره دایاگرید) به عنوان هندسه‌های پلان‌های کف تا بام قابل انتخاب توسط الگوریتم ژنتیک تعریف شدند. نظر به نتایج این مقاله، فرم‌هایی که پلان کف آن‌ها به دایره نزدیک‌تر است، به طور تقریبی میزان جابجایی کمتری دارند و با افزایش تعداد اضلاع پلان کف و بام، وزن کل سازه کاهش می‌یابد؛ لذا هندسه‌ی پلان کف را محدود به چندضلعی‌های ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۲۴ ضلعی کردیم تا با کاهش حجم محاسبات بتوانیم همزمان فاکتور جمع‌شوندگی فرم را در پروسه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک لحاظ نماییم (16). با توجه به اینکه اگر در یک ساختمان، جرم یک طبقه بیش از ۱.۵ برابر جرم طبقه‌ی فوقانی خود باشد، اصطلاحاً گفته می‌شود، ساختمان نامنظمی جرمی دارد؛ شعاع دایره محیطی پلان هر طبقه نسبت به طبقه‌ی زیرین باید بین ۰.۷۷ تا ۱ باشد اما از آنجا که باید کنترل دقیقی بر مساحت طبقات صورت می‌گرفت و با در نظر داشتن نقش سیستم سازه‌ای فاکتور مقیاس بین ۰.۵۰ تا ۱.۰۰ در نظر گرفته شده است.

جهت تعیین ابعاد هسته‌ی مرکزی در نظر داشتیم که برای ساختمان‌هایی با ارتفاع بیش از ۹۰ متر (حدوداً بیش از ۲۲ طبقه با ۴ متر ارتفاع) حداقل شعاع هسته‌ی مرکزی را باید حدود ۳ متر در نظر گرفت و با عنایت به ابعاد هسته‌ی مرکزی در که مساحتی برابر با یک نهم مساحت پلان ۱۰۰۰ مترمربعی را اشغال کرده، و همچنین با مد نظر داشتن فرم جمع شونده و مساحت کاهشی پلان‌ها از کف تا بام، هسته‌ی مرکزی با سطح مقطع ۲۴ ضلعی با شعاع ۳ متر در نظر گرفته شد (16).

برای سیستم دایاگرید، پروفیل‌های قوطی با شکل مقطع مربع توخالی استفاده شدند. ضخامت این پروفیل‌ها طبق جدول اشتال بین ۱ تا ۶ میلی‌متر و قطر بین ۳۰ تا ۱۳۵ میلی‌متر تعریف شد. برای تیرها و ستون‌ها در سیستم هسته‌ی مرکزی پروفیل‌های با مقاطع بال‌پهن (IPE) و کف طبقات دال بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر تعریف شد.

برای اطمینان از روند یکسان طراحی در کلیه مدل‌ها و اعتبار مقایسه، نسبت تنش موجود به ظرفیت تنش حداکثری (Stress Ratio) تا ۰.۷ محدود شد (10). سپس با محدود کردن جابجایی نسبی بین طبقات کمتر از مقدار مجاز در آیین‌نامه (کمتر از ۰.۰۲ ارتفاع طبقه)، توسط افزونه‌ی طراحی المان محدود کارامبا به روش مقطع خودکار به اجزا نسبت داده شد.

در مجموع، از بین حالت‌های مختلفی که در فضای جستجو مطرح بود، نرم‌افزار ۴ حالت بهینه را به عنوان بهینه‌ترین جواب‌ها ارائه داد که انتخاب جواب واحد از بین آن‌ها بر عهده‌ی معمار طراح خواهد بود. تعداد اضلاع پلان کف از بین اعداد ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۲۴ و تعداد اضلاع پلان بام از بین اعداد ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۲۴

انتخاب می‌شوند و مقیاس بین ۰.۵۰ تا ۱ متغیر است. در ۴ حالت بهینه تعداد اضلاع پلان کف ۸ یا ۱۲ و در هر ۴ حالت تعداد اضلاع پلان بام برابر با ۳ است. فاکتور مقیاس با اختلاف کمی نزدیک به ۰.۵ است و فرم‌ها تفاوت ظاهری زیادی با هم ندارند.

بر اساس نتایج، در تمام حالات پیشنهادی هندسه پلان بام سه ضلعی و دارای کمترین تعداد اضلاع ممکن است. آنچه تا حدی دور از انتظار بود این است که هندسه‌ی کف یکی از مقادیر ۸ یا ۱۲ است و ۲۴ ضلعی در بین جواب‌های بهینه جایگاهی ندارد. طبق نتایج در هر ۴ حالت بهینه‌ی پیشنهادی توسط کارامبا فاکتور مقیاس نزدیک به حد پایین در بازه‌ی تعریف شده است و چنین استنباط می‌شود که جمع‌شوندگی بیشتر فرم منجر به عملکرد سازه‌ای بهتر در مقابل زلزله می‌شود؛ با این وجود مجاز به کاهش بیشتر فاکتور مقیاس نبودیم. جالب است که این فاکتور صرفاً مینیمم مقدار خود را در جواب‌های بهینه ندارد و در برخی موارد اندکی بیشتر از مینیمم مقدار است. بنابراین، می‌توان چنین استنباط نمود که رفتاری که ما از هر یک از متغیرها انتظار داریم در بررسی تأثیر همزمان متغیرها متفاوت است و نرم‌افزار به خوبی در این زمینه ما را یاری می‌کند. طبق نتایج آنالیز نسبت کمترین وزن (اولین فرم در نسل ۸ام) به بیشترین وزن (فرم ۷ام نسل ۱) ۷۲٪ و نسبت کمترین جابجایی نسبی (فرم سوم نسل ۹ام) به بیشترین جابجایی نسبی (عضو دهم نسل ۱) ۲۹٪ است که نشانگر تفاوت بارز مقدار توابع برازش پس از بهینه‌سازی و عملکرد درست و مطلوب الگوریتم ژنتیک در بازیابی و تولید نسل است.

در مجموع، یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق بیانگر آن است که فرم بهینه ساختمان، یک فرم واحد و منحصر بفردی نیست و پارامترهای مختلفی را به عنوان متغیر در ورودی می‌توان در نظر گرفت و بسته به اینکه کدام تابع برازش اهمیت بیشتری در طراحی دارد هر یک از جواب‌های بهینه را از بین جواب‌های پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار برگزید. با اینکه مقدار بینابین بین مقادیر توابع برازش را ملاک عمل قرار داد. علاوه بر این، ممکن است برای طراح معمار ویژگی‌های دیگری همچون زیبایی بصری فرم، آسایش حرارتی و تأثیر عوامل آب و هوایی یا هماهنگی فرم با محیط پیرامون مطرح باشد و با در نظر داشتن تمام این موارد صرفاً به انتخاب بهترین جواب نرم‌افزاری اکتفا نکند. بلکه فرمی را برگزیند که علیرغم برآوردن دیگر خواسته‌ها از نظر نرم‌افزار نیز جواب بهینه‌ای قلمداد شود. پس آنچه در این مطالعه انجام شد صرفاً بررسی تأثیر دو فاکتور تأثیرگذار بر فرم، هندسه پلان طبقات و مقیاس، در عملکرد سازه‌ای ساختمان بلند اداری در مقابل نیروی زلزله در منطقه ۲۲ شهر تهران بود. پرواضح است که پژوهش در محیط پارامتریک گرسه‌پایر انجام شده و قابل بسط و تعمیم به احجام مختلف با شرایط گوناگون است؛ با این وجود در محاسبه دقیق ضریب زلزله جهت برآورد نیرو، مقادیر متغیرهای موجود در روابط با توجه به شرایط تعریف شده انتخاب شده اند. مثلاً در محاسبه ضریب رفتار ساختمان جهت تعیین T_s زمین بستر با خاک نوع ۲ که مربوط به منطقه ۲۲ تهران است لحاظ شد، ضریب اهمیت ساختمان را با توجه به نوع کاربری که اداری است انتخاب کرده و یا نسبت شتاب مبنای طرح را یا در نظر داشتن پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد از جدول مربوط در آیین‌نامه زلزله استخراج شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، مدل‌های بهینه‌سازی توسعه یافته و پارامترهای اقلیمی، اقتصادی و اجرایی نیز به توابع هدف اضافه شوند تا تصمیم‌گیری نهایی طراحی با رویکردی جامع‌تر و منطبق بر شرایط واقعی پروژه‌ها صورت گیرد. همچنین، تحلیل اقتصادی فرم‌های منتخب و بررسی امکان‌سنجی ساخت آن‌ها در شرایط صنعتی کشور می‌تواند به کاربردی‌تر شدن یافته‌های این پژوهش در پروژه‌های عمرانی کمک نماید. توسعه ابزارهای بومی در این زمینه و آموزش نسل جدید معماران در حوزه طراحی داده‌محور و پارامتریک نیز از دیگر پیشنهاد‌های کلیدی برای ارتقای سطح حرفه‌ای معماری در کشور خواهد بود.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Introduction

The accelerated pace of urbanization and the increasing demand for functional space in metropolitan centers have rendered vertical development a strategic necessity for modern urbanism (1, 2). High-rise buildings, while offering a solution to spatial constraints, also serve as dominant visual elements that shape the identity and aesthetic perception of cities (3). However, the architectural design of such structures faces a multifaceted challenge—balancing visual elegance with structural efficiency and seismic resilience. Particularly in seismic-prone regions like Iran, architectural form must not only fulfill aesthetic ambitions but also adhere to structural safety and sustainability requirements (7). The development of digital design tools and performance-based modeling has opened new avenues for addressing these complexities. Parametric modeling environments such as Grasshopper, combined with structural analysis plugins like Karamba, provide architects with real-time feedback on how geometric alterations impact structural behavior (13). Within this framework, evolutionary algorithms, particularly genetic algorithms, have emerged as effective methods for exploring multi-objective optimizations in form finding (12). Studies indicate that geometries such as octagonal or circular base plans yield favorable seismic performance compared to triangular or tapering forms (9). Similarly, the use of advanced structural systems like diagrids facilitates weight reduction and stiffness

enhancement (10). Building upon these findings, the current study aims to explore the combined effects of plan geometry and vertical scaling on the structural performance of high-rise buildings through a genetic algorithm-based optimization approach.

Methods and Materials

This study adopts an applied-developmental research approach integrating parametric modeling with multi-objective optimization. The modeling process was executed using Rhino and Grasshopper, while structural analyses were performed using the Karamba plugin. A genetic algorithm (GA) served as the primary optimization method. Design variables included the number of polygon sides in the base and roof plans, the vertical scaling ratio, and the surface rotation angles. Each design iteration generated through parametric modeling was assessed on two performance criteria: maximum lateral drift (indicating seismic vulnerability) and structural weight per square meter (indicating material efficiency). The optimization process was carried out in two main stages. First, an exploratory parametric study was conducted using Biomorpher and K-means clustering to identify promising geometries. Then, precise multi-generational optimization was conducted in Wallacei to extract Pareto-optimal solutions. The GA parameters, such as population size, mutation rate, and selection method, were carefully configured to ensure diversity and convergence across generations. The final models were limited to 10 floors with 4-meter floor heights, consistent with practical structural limitations. All models adhered to Iran's seismic code (2800), with reinforced concrete shear wall systems and consistent material properties. Boundary conditions included constraints on inter-story drift (less than 0.02 of story height) and a stress ratio ceiling of 0.7 to maintain uniform performance benchmarks.

Findings

The optimization process successfully identified a set of high-performing geometric configurations, with the most efficient forms exhibiting triangular roof plans and compact vertical scaling ratios (~ 0.50). Biomorpher's initial clustering phase divided randomly generated form populations into 12 clusters, revealing trends in design geometry. Successive generations of GA optimization in Wallacei demonstrated clear convergence patterns. Standard deviation and trend line analyses showed that both target functions—structural weight and maximum lateral displacement—steadily decreased across generations. Parallel Coordinate Plots illustrated how the two objectives evolved in tandem, confirming the efficacy of multi-objective optimization. Five non-redundant optimal forms were extracted. For instance, the first optimal form, with an octagonal base and triangular roof scaled at 0.50, achieved a structural weight of 48,300 tons and a maximum drift of 19.64 cm. Other Pareto-optimal solutions included variations with 12- or 24-sided bases but shared the common trait of triangular roofs and compact scaling. This indicates that while base geometry moderately affects performance, vertical compaction and roof simplification are more decisive. The search space analysis confirmed that optimal solutions densely populated the lower-left quadrant of the objective function diagram, indicating minimal drift and weight. These findings confirm the relevance of plan compactness and minimal tapering in enhancing seismic and structural performance.

Discussion and Conclusion

The findings from this study underscore the transformative potential of parametric design and genetic algorithm-based optimization in high-rise architecture. By simulating thousands of design alternatives and assessing them in real-time using structural performance criteria, architects can move beyond intuition-based decisions to data-driven form generation. The study reveals that architectural forms characterized by triangular roof geometries and compact vertical scaling consistently outperform other variants in terms of seismic drift and structural weight. Interestingly, although higher polygon counts (e.g., 24 sides) in base plans slightly enhance performance, their impact is marginal compared to the decisive influence of vertical compactness. Furthermore, the diversity of Pareto-optimal solutions illustrates that the "best" form is not singular. Instead, designers can select from a range of optimal options based on additional considerations such as visual aesthetics, site

integration, or climate adaptability. The use of GA enabled the simultaneous evaluation of complex interacting variables, a task infeasible through manual calculation alone. While this study focused on seismic forces in a Tehran-based context, the methodology is extendable to varying structural systems and climate zones. Future research may incorporate economic, environmental, and construction feasibility parameters into the optimization framework, creating a more holistic basis for design decisions. Ultimately, this research contributes to a growing body of work advocating for a data-informed, performance-driven approach in architectural design, particularly in the era of smart cities and sustainable development.

References

1. Azimi Aqdash M. High-Rise Building Regulations (Architectural Design): Novin Publications; 2016.
2. Khalvati S, Dehbashi Sharif M, Pourzargar MR. Examining the Role of Regulations in the Spatial Structure of High-Rise Residential Buildings in Tehran (Case Study: High-Rise Buildings from 1991 to 2020). 2021.
3. Samsami Hosseini A, editor The Necessity, Criteria, and Impacts of Tall Buildings. Proceedings of the Second International Conference on Tall Buildings; 2001; Tehran: Iran University of Science and Technology.
4. Jun H, Fei H. Research on multi-objective optimization of building energy efficiency based on energy consumption and thermal comfort. Building Services Engineering Research & Technology. 2024;45(4):391-411.
5. Bakhshi S, Chenaghlou MR, Rahimian FP, Edwards DJ, Dawood N. Integrated BIM and DfMA parametric and algorithmic design based collaboration for supporting client engagement within offsite construction. Automation in Construction. 2022;133:104015.
6. Tehran Urban Studies Planning Center. Development of Regulations for High-Rise Construction: Analytical Studies and Presentation of Proposed Regulations: PArt Consulting Engineers; 2013. 12-5 p.
7. Rezazadeh H, Shahrودي A, Jahani E, editors. The Impact of Various Shapes and Forms of Tall Buildings on Earthquake Force Distribution. Third Conference on Tall Buildings; 2016; Qarchak.
8. Sarban M, Valizadeh H, editors. Examining the Impact of Structural System Arrangement in Tall Buildings. National Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, and Horizons of Islamic Art in the Second Step Statement of the Revolution; 2021; Tabriz.
9. Khodabandehloo A, Aghajani R. Optimal Design of Steel Diagrid Structures in Tall Buildings. Structural Analysis - Earthquake. 2018;15(2):39-46.
10. Javidan Nia G, Bamaniyan MR, Mahdavi Nejad MJ. The Impact of Plan Geometry and Twisting Architectural Form on the Damage to Non-Structural Components of Tall Buildings Against Earthquakes. Environmental Hazard Management. 2022.
11. Ardakani AR, Golabchi M, Hosseini SM, Alaqemandan M. Examining the Impact of the Form of Tall Buildings on Their Structural Stability with the Aim of Reducing Earthquake Hazards: Case Study on the Effect of Plan Shape Parameters. Environmental Hazard Management. 2017.
12. Khairnar P. Lightweight floor systems for tall buildings: A comparative analysis of structural material efficiencies. International Journal of High-Rise Buildings. 2023;12(2):145-52.
13. Preisinger C. Linking structure and parametric geometry. Archit Des. 2013;83(2):110-3DO - 10.1002/ad.564.
14. Asadbak M, Asadzadeh E, Asadzadeh M. Genetic Algorithm Book: Avalinha Publications; 2019.
15. Salata F, Ciancio V, Dell'Olmo J, Golasi I, Palusci O, Coppi M. Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms. Applied Energy. 2020;260:114289.
16. Kazemi Sangdehi SP, Afghani Khoraskani R, Tahsildoust M. Examining the Impact of Plan Geometry of Tall Buildings with Diagrid Structures on Their Structural Behavior Against Lateral Earthquake Loads. Soffeh. 2020;30(1):43-58.