The Effect of the Geometry of Diagrid High-Rise Buildings on their Performance against Lateral Forces of Earthquakes

S. Pooyan Kazemi.S.

Msc. Architecture Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

Roham Afghani Khoraskani, PhD

Assistant professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

Mohammad Tahsildoost, PhD (corresponding author)

Associate professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

It has always been crucial for architects to obtain an intuitive understanding of the structural performance of architectural forms. During the modern period, there has always been a close collaboration between architects and engineers in designing high-rise buildings. With the recent dwindling of this closeness, the structural efficiency of high-rise forms has been in decline. Bearing in mind structure represents one-third of the entire construction costs, structural considerations at the early stages of a project will result in significant savings.
The present research is after finding the effects of form on structural performance in order to assist design teams at the conception stage. A variety of forms were initially generated in a parametric environment with floor plans, roofs, and vertical configuration as parameters. An external metal diagrid structure was then applied on the outer surface of models, and their performance against lateral forces of earthquakes was assessed using static methods. The results show that the least movement at the highest level occurs in hexagonal floor plans with triangular roofs (7% lower than average), with generative geometry playing a more significant role in movement compared with total weight. Among architectural forms with similar floor and roof plans, octagonal floor plans have the least movement (6% lower than the average), with octagonal and dodecagonal forms having the least total weight and movement. The latter can be considered as the best while triangular forms can be considered as the worst-performing structures.

Keywords: Tall building, parametric modelling, architectural form, diagrid structure, lateral load.

بررسی تأثیر هندسهٔ پلان ساختمان‌های بلند با سازهٔ دایاگرید بر رفتار سازه‌ای آن‌ها در برابر بار جانبی زلزله[1]

محمد تحصیلدوست[4]
دانشیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

سید پویان کاظمی سنگدهی[2]

رهام افغانی خراسکانی[3]
استادیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

دریافت: ۹ آذر ۱۳۹۷
پذیرش: ۴ آبان ۱۳۹۸
(صفحهٔ ۵۸-۴۳)

کلیدواژگان: ساختمان بلند، مدل‌سازی پارامتریک، فرم معماری، سازهٔ دایاگرید، بار جانبی.

چکیده

به دست آوردن درک شهودی رفتار سازه‌ای فرم‌های معماری همواره برای معماران مسئله‌ای بااهمیت بوده است. در دورهٔ مدرن رابطهٔ نزدیکی میان معمار و مهندس سازه در طراحی ساختمان بلند وجود داشته که، در پی کمرنگ شدن آن در دورهٔ حاضر، کارایی سازه‌ای فرم‌های ساختمان بلند کاهش یافته است. ازآنجاکه هزینه‌های بخش سازه در حدود یک‌سوم هزینه‌های ساخت است، دقت در ملاحظات سازه‌ای در طرح اولیه و توجه به عملکرد سازه‌ای در فرایند تولید فرم موجب صرفه‌جویی چشمگیری در هزینه‌های پروژه خواهد شد.

در این پژوهش هدف یافتن تأثیرات فرم معماری بر رفتار سازه‌ای است تا به تیم طراحی ساختمان بلند در مرحلهٔ کانسپت در استفاده از گزینه‌های با عملکرد سازه‌ای مناسب یاری کند. ابتدا در محیط پارامتریک فرم‌های متنوعی با متغیرهای پلان کف، بام، و نحوهٔ شکل‌گیری عمودی تولید می‌شوند. سپس سازهٔ خارجی دایاگرید فلزی بر روی پوستهٔ هر فرم اعمال می‌شود و بار جانبی زلزله به روش استاتیکی به این سازه‌ها اعمال و رفتار سازه‌ای فرم‌های تولیدشده ارزیابی می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کمترین میزان جابه‌جایی بالاترین تراز در میان همهٔ فرم‌ها در فرم با پلان کف ۶ضلعی و بام ۳ضلعی (۷٪ کمتر از میانگین) است و بیش از آنکه جابه‌جایی بالاترین تراز به وزن کل بستگی داشته باشد، به هندسهٔ پلان سازنده فرم‌ها بستگی دارد. در بین فرم‌هایی که از یک نوع پلان بام و کف تشکیل شده بودند، کمترین میزان جابه‌جایی در بالاترین تراز، در فرم ۸ضلعی (۶٪ کمتر از میانگین) است. فرم‌های با پلان کف و بام ۸ و ۱۲ضلعی وزن کل و جابه‌جایی بالاترین تراز کمتری نسبت به سایر فرم‌ها دارند که می‌توان گفت بهترین و فرم با پلان سقف و کف ۳ضلعی بدترین رفتار سازه‌ای را از خود نشان می‌دهند.

مقدمه

درک رفتار سازه‌ای فرم‌های معماری، بدون ورود به روابط پیچیده و شبیه‌سازی، همواره ارزشمند است. به‌ویژه در ساختمان‌های بلندمرتبه تأثیر ملاحظات سازه‌ای در طرح معماری چشمگیر است و طراحی این بناها نیازمند تعامل ویژهٔ معمار و مهندس سازه است. طبق مطالعات

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد فناوری معماری نگارندهٔ اول است با عنوان *فرم‌یابی معماری در ساختمان‌های بلند با سازهٔ فلزی خارجی با رویکرد رفتار بهینهٔ سازه* که به راهنمایی نگارندهٔ سوم و دکتر محسن سرتیپی‌پور سرتیپی‌پور و مشاورهٔ نگارندهٔ دوم ۲۹ اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۷ در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی دفاع شده است.

۲. کارشناسی ارشد فناوری معماری دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
P.Kazemi.s@gmail.com
3. Roham.afghani@polimi.it
۴. نویسنده مسئول
M_Tahsildoost@sbu.ac.ir

پرسش‌های پژوهش

پرسش اصلی: پارامترهای تولید فرم مانند هندسهٔ پلان کف و بام چه اثراتی بر عملکرد سازه‌ای ساختمان بلند دارند؟

پرسش‌های فرعی:

۱. روش دستیابی به حد مطلوبی از یکپارچگی بین دو بخش فرم و سازهٔ ساختمان بلند از طریق یک فرایند الگوریتمیک چیست؟

۲. فزایش تعداد اضلاع پلان این ساختمان‌ها چه تأثیری بر رفتار سازه‌ای دارد؟

حدود یک‌سوم هزینه‌های ساخت یک ساختمان به بخش سازه اختصاص دارد[۵] و توجه به ملاحظات سازه‌ای در فرایند طراحی اولیه و درنتیجه برخورداری طرح نهایی از عملکرد سازه‌ای قابل‌قبول موجب کاهش جدی هزینه‌ها خواهد شد.

طراحی ساختمان و به‌ویژه بناهای بلند حاصل تعامل متخصصان حوزه‌های مختلف در هر مرحلهٔ طراحی است. گرچه بخش کوچکی از هزینه‌های پروژه به طراحی اولیه اختصاص دارد، اما، به دلیل اثرگذاری آن بر سایر تصمیمات و مراحل طرح، مهم‌ترین بخش طراحی است. کلیات طرح سازه‌ای نیز در این مرحله مشخص می‌گردد.[۶] در مطالعاتْ طراحی ساختمان بلند در دورهٔ مدرن را محصول همکاری نزدیک معمار و مهندس سازه دانسته‌اند و ساختمان‌های بلند این دوره از عملکرد سازه‌ای مناسبی برخوردار بوده‌اند، نظیر ساختمان جان هنکاک در شیکاگو (ت ۱). اما در دورهٔ پست‌مدرن، با پیشرفت روزافزون فناوری و امکان ساخت فرم‌های پیچیده، از این تعامل نزدیک کاسته شده و کارایی سازه‌ای[۷] ساختمان‌های بلند نیز کاهش یافته است که به معنای مصرف بیشتر منابع، استفادهٔ کمتر از ظرفیت مصالح، کاهش بازده اقتصادی، کاهش کارایی ساختمان، و دوری از مقاصد توسعهٔ پایدار است[۸]. در این پژوهش به منظور افزایش این تعامل، راهکارهای تولید و ارزیابی فرم‌های اولیه در ساختمان‌های بلند تعقیب می‌شود. این در حالی است که معمولاً ارزیابی سازه‌ای تا دستیابی به فرم معماری مطلوب، نادیده گرفته می‌شود و فرم معماری باید در مرحلهٔ دیگری، از منظر سازه‌ای، بازنگری و ویرایش شود که این روش طراحی سازه را (نسبت به طراحی یکپارچهٔ معماری و سازه در مرحلهٔ ایده‌پردازی) محدود و هزینه‌بر می‌کند[۹].

سازوکار پارامتریک این پژوهش در مرحلهٔ طراحی اولیهٔ ساختمان‌های بلندمرتبه با سازهٔ دایاگرید فلزی منجر به تولید و ارزیابی سازه‌ای سریع تعداد زیادی گزینهٔ طراحی فرم معماری و طرح سازه به طور یکپارچه، هم‌زمان و با لحاظ الزامات آن‌ها در فرایندی الگوریتمیک، می‌شود. در فرایند مدل‌سازی پارامتریک، فرم اولیهٔ ساختمان بلند با کمک پارامترهایی چون هندسهٔ پلان بام و کف و شیوهٔ شکل‌گیری عمودی فرم به‌راحتی قابل‌تولید است.[۱۰] بنابراین مسئلهٔ این پژوهش، یافتن تأثیرات فرم معماری بر رفتار سازه‌ای با تأکید بر بررسی اثر عوامل تولید فرم چون «هندسهٔ پلان بام و کف» است و ارزیابی

5. M. Elnimeiri & A. Almusharaf, "Structure and Architectural Form of Tall Buildings", p. 54.
6. S.M. Park, "Innovative Tall Building Form Development", p. 2.
7. Structural Efficiency
8. M. Elnimeiri & M. Nicknam, "A Design Optimization Workflow for Tall Buildings Using Parametric Algorithm", pp. 562-564.
۹. نک:
H. Kloft, "Non-Standard Structural Design for Non-standard Architecture".
10. Park, *Tall Buildingform Gneration by Parametric Design Process*, pp. 80-86.

فرم‌های معماری تولیدشده بر اساس عوامل بیان‌کنندهٔ رفتار سازه‌ای (وزن کمتر و تغییر مکان کمتر) در برابر بار جانبی است.[۱۱]

۱. پیشینهٔ پژوهش

۱. ۱. طراحی پارامتریک ساختمان‌های بلند

مؤسسهٔ CTBUH[۱۲] ساختمان بالای ۱۴طبقه و یا ۵۰ متر را ساختمان بلند[۱۳]، بیش از ۳۰۰ متر را فوق بلند[۱۴]، و بالای ۶۰۰ متر را ابر بلند[۱۵] می‌داند. بر اساس مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، بالاترین تا پایین‌ترین تراز قابل‌دسترس خودرو آتش‌نشانی در بناهای بلند بیش از ۲۳طبقه است[۱۶].

در صورت مغفول ماندن توجه به سازه تا قبل از تکمیل مرحلهٔ اولیهٔ ایجاد فرم معماری ساختمان‌های بلند، لازم است روند گستردهٔ منطقی‌سازی[۱۷] در مراحل بعدی در زمینهٔ سازه، مصالح، و ساخت‌پذیری انجام شود که طبعاً رویکرد سودمندی نیست.[۱۸] ازاین‌رو، به‌ویژه با توجه به وابستگی هندسهٔ اجزای سازه‌های دایاگرید به هندسهٔ کلی بنا، تحلیل سازهٔ اولیه در محیط پارامتریک هم‌زمان با شکل‌گیری طرح شماتیک اولیه و متمرکز بر تأثیر تغییرات فرم در رفتار سازه‌ای ساختمان لازم است.

ساختمان‌های بلند نسبت به بارهای جانبی (باد و زلزله) آسیب‌پذیرترند و بنابراین استفاده از مصالح مقاوم در برابر این بارها و تأمین نیازهای پایداری[۱۹] ساختمان امری ضروری است. هزینهٔ مربوط به تأمین سختی جانبیْ بخش قابل‌توجهی از هزینهٔ سازه است و تناسب مستقیم با ارتفاع ساختمان دارد. اهمیت سازه و پیچیدگی ذاتی طراحی ساختمان بلند نیازمند توجه به ملاحظات سازه‌ای در گام‌های ابتدایی طراحی است.[۲۰]

در طراحی پارامتریکْ ارتباطات بین مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی از طریق یک و یا چند رابطهٔ ریاضی (پارامتر) تعیین می‌شود و فضای پارامتریک حاصل شامل فرم‌های مرتبط متعدد برآمده از ترکیبات مختلف این پارامترها خواهد بود. بنابراین با تغییر روابط کلی یا جزئی، گزینه‌های متعدد پیشنهادی اولیه را به‌سرعت و با توجه به ملاحظات طراحی فرم، کارآمدی سازه، و انرژی تولید می‌کند که گام مهمی در طراحی فرم اولیهٔ ساختمان بلند و بهره‌گیری از گزینه‌های کارآمدتر است.[۲۱] در تحلیل و طراحی سنتی و رایج، اغلب هندسه به طور دستی به ابزار تحلیل وارد می‌شود و مهندس، به کمک رابط کاربری نرم‌افزار، پیش‌پردازش انجام می‌دهد که برای آزمون گزینه‌های متعدد بسیار زمان می‌برد و بنابراین پس از تحلیل مقدماتی و تعامل با معمار به تهیهٔ طرح جدید یا ایجاد تغییراتی می‌انجامد که کلیات آن در مراحل بعد تغییر فاحش خواهد کرد.[۲۲] به‌ویژه

ت ۱. ساختمان جان هنکاک، مأخذ:
Elnimeiri & Nicknam, "A Design Optimization Workflow for Tall Buildings Using Parametric Algorithm", p. 564.

11. O. Oliyan Torghabehi & P. Von Buelow, "Performance Oriented Generative Design of Structural Double Skin Facades Inspired by Cell Morphologies", pp. 7-10; A. Khodadadi & P.V.O.N. Buelow, "Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower", pp. 6-9; M. Alaghmandan, et al, "Modifying Tall Building Form to Reduce the Along-wind Effect", pp. 36-38; K.S. Moon, "Sustainable Structural Design of Contemporary Tall Buildings of Various Forms", pp. 272-274.

۱۲. این مؤسسه یکی از معتبرترین‌ها در زمینهٔ مطالعات تخصصی ساختمان‌های بلند در دانشگاه ایلینویز آمریکا است.

13. tall building

14. super tall building

15. mega tall building

۱۶. «حفاظت ساختمان‌ها در مقابل حریق»، ص ۷۸.

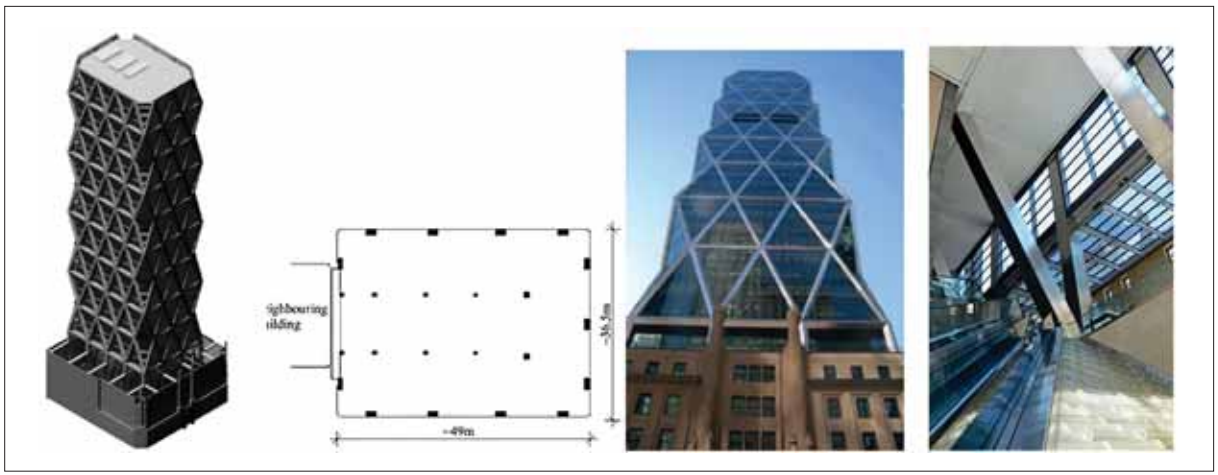
17. rationalization

در فرم‌های پیچیده‌تر و یا مواردی با وابستگی فرمی بیشتر به سازه، این موضوع اهمیت بیشتری دارد.

«سازهٔ دایاگرید» از انواع سازه‌های لوله‌ای است که اعضای مورب جانشین اعضای متعامد می‌شود و متشکل از ستون‌های مایل و تیرهای کمربندی افقی در تراز طبقات است. این سازه نسبت به قاب لوله‌ای[۲۳] سختی بیشتری در برابر بار جانبی و به‌علاوه انطباق‌پذیری بالایی با انواع فرم‌های معماری دارد. سازهٔ دایاگرید به منزلهٔ یک سیستم مستقل و بدون کمک هسته قادر است در برابر بارهای ثقلی و جانبی مقاومت کند و این ویژگی آن را از سایر سازه‌های وابسته به هسته مجزا می‌کند[۲۴]. فاصلهٔ کم سازه از جدارهٔ خارجی نیز در این سازه‌ها موجب کارایی بیشتر می‌شود.[۲۵] این سازه به طور مؤثری نیروی‌های جانبی را از طریق نیروی محوری در اعضای مورب تحمل می‌کند و با سازهٔ فلزی تا ۱۰۰طبقه قابل‌استفاده است، اگرچه از معایب این سیستم نیاز به اتصالات پیچیده است.[۲۶] در «ت ۲» نمونه‌ای از سازهٔ دایاگرید در برج هرست به نمایش در آمده است.

۱. ۲. پژوهش‌های پیشین

تأثیرات فرم معماری بر رفتار سازه پیش از این بررسی شده است. در پژوهش فعلی از مطالعات النیمیری و دیگران در زمینهٔ تولید فرم‌های اولیه ساختمان‌های بلند با استفاده از طراحی پارامتریک اقتباس شده است.[۲۷] در مطالعات النیمیری و المشرف فرم و سازهٔ ساختمان‌های بلند به طور یکپارچه در بستر پارامتریک تولید و فرم معماری با توجه به بازخوردهای سازه‌ای اصلاح می‌گردد.[۲۸] در مطالعات اولیان و بوئلوف، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار پیشرفتهٔ دانشگاه میشیگان[۲۹]، تعداد زیادی ساختمان بلند با سازهٔ دو پوستهٔ سلولی تولید و رفتار سازه‌ای آن‌ها در برابر بار جانبی زلزله به روش استاتیکی از منظر وزن کل و دورهٔ تناوب اول سازه بررسی شده است.[۳۰] در پژوهش اردکانی و دیگران ۶ فرم ساختمان بلند با سازهٔ دایاگرید با پلان کف و بام ۳، ۴، ۵، ۶، ۸ضلعی و دایره در برابر بار جانبی زلزله تحلیل شده است که بر این اساس، فرم با پلان بام و کف ۶ضلعی کمترین وزن کل و فرم با پلان بام و کف ۳ضلعی کمترین جابه‌جایی در بالاترین تراز را دارند.[۳۱] در مقالهٔ افغانی و همکاران به مقایسهٔ میان کارآمدی سازه در ساختمان‌های بلند هذلولی‌وار و استوانه‌ای پرداخته و ثابت شده است که میزان جابه‌جایی بالاترین تراز ساختمان بلند با سازهٔ دایاگرید در فرم هذلولی‌وار در حدود نصف فرم استوانه‌ای با مشخصات معماری مشابه است و ۶۰٪ سختی سازه‌ای بیشتری دارد[۳۲]. علاوه بر این



ت ۲. تصاویری از نمونه‌ای از سازهٔ دایاگرید در ساختمان هرست، مأخذ: گونل و ایلگین، *سیستم‌های سازه‌ای و فرم آیرودینامیک ساختمان‌های بلند*، ص ۸۱.

18. Elnimeiri & Almusharaf, ibid, p. 56.
19. stability
20. Ibid, p. 54
21. Elnimeiri & Nicknam, ibid, p. 564; M. Turrin, et.al, "Design Explorations of Performance Driven Geometry in Architectural Design Using Parametric Modeling and Genetic Algorithms", p. 6.
22. Elnimeiri & Nicknam, ibid, p. 565.
23. bundle tube
۲۴. محمد هالیس گونل و حسین امره ایلگین، *سیستم‌های سازه‌ای و فرم آیرودینامیک ساختمان‌های بلند*، ج ۱، ص ۷۷.
25. Moon, ibid, p. 272.
26. M.M. Ali & K.S. Moon, "Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects", p. 214.
۲۷. نک:
Elnimeiri, et al, "Tall Building Form Generation by Parametric Design Process".
28. Elnimeiri & Almusharaf, ibid, pp. 58-60.
29. PARAGEN
30. Oliyan & Buelow, ibid.

در پژوهش میرنیازمندان و همکاران فرم‌های اولیهٔ ساختمان بلند با توجه به پلان بام و کف با سازهٔ دایاگرید تولید شده و با بهینه‌یابی از طریق تغییر زاویهٔ دایاگرید و شکل پلان بام و کف نشان داده شده است که افزایش تعداد اضلاع پلان بام و کف سبب کاهش وزن کل سازه می‌شود؛ اما رابطهٔ مشخصی با میزان جابه‌جایی بالاترین تراز ندارد.[۳۳] علاوه بر این، در پژوهش کاظمی و دیگران پارامتر جدیدتری برای ارزیابی رفتار سازه‌ای فرم‌ها تحت عنوان وزن مورد انتظار طراحی (بدون نیاز به ورود به طراحی سازه) عرضه شده است.[۳۴] فهرستی از پژوهش‌ها، اهداف، اقدامات، و نرم‌افزارهای مورد استفاده در «جدول ۱» دسته‌بندی و ارائه شده است.

۲. روش و ابزار انجام پژوهش

۲. ۱. ابزار انجام پژوهش

نرم‌افزار GC[۳۵] در سیستم‌های Bently قابل‌استفاده است و دارای قابلیت مدل‌سازی پارامتریک و تغییر در پارامترها به صورت گرافیکی است. افزونهٔ Grasshopper بر بستر نرم‌افزار Rhinoceros ابزارهایی آماده به زبان‌های VB و C# را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. AutoLISP نیز زبان برنامه‌نویسی برخی محصولات شرکت Autodesk در محیط پارامتریک غیرگرافیکی نرم‌افزار AutoCAD است. Grasshopper اگرچه نظیر GC رایگان است، اما در مقایسه با آن جامعیت بیشتری

۳۱. امیررضا اردکانی و دیگران، «بررسی تأثیر فرم ساختمان‌های بلند بر پایداری سازه‌ای آن‌ها با هدف کاهش مخاطرات زلزله»، ص ۴۰.

جدول ۱. دسته‌بندی اهداف و ابزارهای مورد استفاده درپژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه، تدوین: نگارندگان.

	پژوهش و زمینه‌اش	هدف اصلی پژوهش	اقدامات انجام‌شده در پژوهش	نرم‌افزارها
تولید فرم	Park, *Tall Building Form Generation by Parametric Design Process*, pp. 86-87.	تولید فرم‌های خلاقانه در ساختمان بلند به کمک طراحی پارامتریک	تولید فرم‌های خلاقانه در روندی پارامتریک ــ فرایند طراحی فرم شماتیک ساختمان بلند به صورت پارامتریک در یک سازوکار عرضه شده است.	AutoLISP
	Elnimeiri, et al, "Tall Building Form Generation by Parametric Design Process", pp. 57-61.	استفاده از معماری پارامتریک در بهبود طراحی شماتیک فرم در راستای تولید فرم‌های گوناگون و خلاقانه	امکان تولید هرگونه فرم با تعیین مشخصات هندسهٔ پلان و شکل‌گیری عمودی فرم و تولید سازهٔ اولیه	AutoLISP
تولید فرم و سازه	Elnimeiri & Almusharaf, "Structure and Architectural Form of Tall Buildings", pp. 58-60.	بررسی تأثیر فرم بر سازه در فرم‌های غیرعمودی	تولید فرم در GC و تحلیل و طراحی در برابر بار باد در ETABS و بررسی اثر Twsiting در فرم برج ۲۹ دبی	GC ETABS
بهینه یابی فرم و سازه	Oliyan & Buelow, "Performance Oriented Generative Design of Structural Double Skin Facades Inspired by Cell Morphologies", pp. 7-10.	عرضهٔ فرم‌های مناسب نسبت به بارهای لرزه‌ای برای ساختمان بلند با سازهٔ دوپوستهٔ خارجی سلولی	تولید فرم‌های بسیار زیاد با الگوریتم ژنتیک و تولید سازهٔ دوپوستهٔ سلولی (ورونوئی) و بارگذاری لرزه‌ای استاتیکی و تحلیل و طراحی سازه و بهینه‌یابی به روش NDDP GA و بیان پاسخ‌های بهینه نسبت به وزن کل و فرکانس مدال	ParaGen STAAD Pro
	Khodadadi & Buelow, "Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower", pp. 6-9.	فرم‌یابی و بهینه‌یابی بر اساس الگوریتم ژنتیک در برج‌های با ساهٔ شبکه‌ای در مقایسه با برج شوخوف	تولید فرم برج‌های مشابه با برج شوخوف با چند گزینه سازهٔ شبکه‌بندی‌شدهٔ مورب و تحلیل و طراحی اعضای سازه‌ای نسبت به بار زلزله و در نرم‌افزار ParaGen، بهینه‌یابی بر اساس وزن کل و تعداد گره‌ها گزینه‌های بهینه (روی منحنی پارتو) عرضه شدند.	ParaGen STAAD Pro Formian
فرم و سازه (زلزله)	اردکانی و دیگران، «بررسی تأثیر فرم ساختمان‌های بلند بر پایداری سازه‌ای آن‌ها با هدف کاهش مخاطرات زلزله»، ص ۴۰.	تأثیر فرم بر رفتار سازه در اثر نیروی زلزله (تغییرات پلان)	فرم ساختمان بلند منشوری با پلان سه‌ضلعی، چهارضلعی تا هشت‌ضلعی و دایره با سازهٔ دایاگرید تولیدشده، سپس در نرم‌افزار SAP2000 بار زلزله به روش استاتیکی و روش شبه دینامیکی مدال لحاظ و درنهایت عملکرد سازه‌ای این فرم‌ها مقایسه شده است.	Grasshopper SAP 2000
بهینه‌یابی فرم و سازه	Mirniazmandan, et al, "Mutual Effect of Geometric Modifications and Diagrid Structure on Structural Optimization of Tall Buildings", pp. 6-13.	بهینه‌یابی فرم و سازهٔ ساختمان بلند	تولید فرم ساختمان بلند ۱۸۰ متری با ۵ تیپ سازهٔ دایاگرید که پس از بارگذاری استاتیکی باد با نرم‌افزار Karamba تحلیل سازه و درنهایت با استفاده از افزونه Octapus فرم و سازه وارد روند بهینه‌یابی شده است.	Grasshopper Karamba Octapus

دارد و افزونه‌های گسترده‌ای در اختیار کاربر می‌گذارد. نرم‌افزار Paragen نیز صرفاً مختص دانشگاه میشیگان است. پژوهشگران در تحلیل پیش رو در تحلیل سازه از دو گروه نرم‌افزار استفاده کرده‌اند. گروه اول شامل نرم‌افزارهای تخصصی تحلیل و طراحی سازه مانند SAP 2000، STAAD Pro، ETABS برای بیان تحلیل‌های بسیار دقیق و گروه دوم شامل نرم‌افزارهای تحلیل پارامتریک سازه با دقت کمتر در عین امکان مدیریتِ داده و مدل‌سازی سریع‌تر و ساده‌تر در محیط پارامتریک است. این گروه شامل افزونه‌های تحلیل سازه مانند Karamba و Milipede است. آخرین نسخهٔ افزونه Milipede (دانشگاه MIT در سال ۲۰۱۴) امکانات کمتری در مقایسه با Karamba در اختیار کاربر قرار می‌دهد. به این دلیل، از میان نرم‌افزارها و ابزارهای قابل‌استفاده در این پژوهش، راینو[۳۶] با افزونه‌های گرس‌هاپر و کارامبا برای تحلیل سازه مناسب‌ترین گزینه‌ها ارزیابی شدند.

۲. ۲. روش و فرایند انجام پژوهش

خلاصه فرایندهای این پژوهش (تولید فرم‌های معماری و سازه برای فرم‌ها، بارگذاری، و تحلیل سازه) در «ت ۳» ارائه شده است. در گام اول فرم‌ها مبتنی بر پیشینهٔ پژوهش و با پارامترهای هندسهٔ پلان بام و کف در افزونهٔ گرس‌هاپر در نرم‌افزار راینو تولید می‌شود. سپس پیکره‌بندی سازه بر آن شکل می‌گیرد و مدل سازه‌ای بر مبنای بار زلزله به روش معادل استاتیکی بارگذاری و تحلیل می‌شود. به این منظور تحلیل سازه به صورت مستقیم در محیط پارامتریک و با افزونهٔ کارامبا[۳۷] انجام می‌شود. درنهایت با ارزیابی پارامترهای پیش‌گفته تغییرات فرم بر رفتار سازه‌ای بررسی می‌شود.

۲. ۳. تولید فرم‌های معماری[۳۸]

مطابق مطالعات، همهٔ فرم‌ها از دو عنصر اصلی «پلان بام» و «پلان کف» و یک بخش فرعی «شیوهٔ شکل‌گیری عمودی» ساخته می‌شوند[۳۹] که هر یک از چندضلعی‌های منتظم (۳، ۴، ۶، ۸ و ۱۲ضلعی و ۲۴ضلعی به جای دایره) ساخته شده‌اند. با در نظر گرفتن هر یک از چندضلعی‌های مذکور برای پلان بام و کف و ترکیب همهٔ حالت‌ها، ۳۶ فرم اولیه برای حجم کلی ساختمان بلند مطابق «ت ۴» تولید می‌شود. در سطرهای افقی این شکل پلان کف و در ستون‌های عمودی آن پلان‌های بام یکسان است.

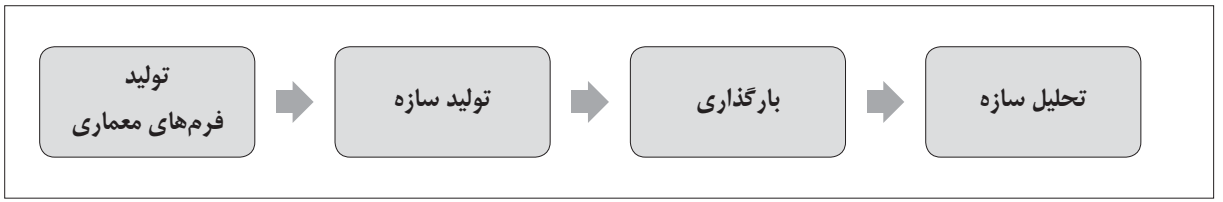
شکل‌گیری عمودی فرم‌ها (اتصال پلان بام و کف) از سه حالت تشکیل شده است (ت ۵)، لازم به ذکر است در این مقاله بر فرم‌های تولیدشده با شیوهٔ مستقیم تمرکز شده است:

شیوهٔ مستقیم: اتصال پلان بام و کف توسط خطوط مستقیم به یکدیگر

شیوهٔ خمیده: اتصال پلان بام و کف توسط خطوط منحنی به یکدیگر

شیوهٔ چرخیده: اتصال پلان بام و کف با خطوط مستقیم به یکدیگر و چرخش نقاط متناظر پلان بام و کف نسبت به یکدیگر حول محور عمودی که از مرکز پلان‌ها می‌گذرد.

در این پژوهش و برگرفته از مطالعات پایان‌نامهٔ دکتری سانگ مین پارک، از جهت مقایسه، ساختمان‌های بلند ۶۰طبقه با ارتفاع کف تا کف ۴ متر مطالعه شده و مساحت پلان کف و بام همهٔ فرم‌ها به ترتیب ۲۰۲۵ و ۵۰۰ مترمربع (باریک شونده[۴۰] با نسبت مساحت پلان بام به کف برابر با ۱ به ۴) در نظر گرفته



ت ۳. مراحل انجام پژوهش.

32. R. Afghani, et al, "Adaptation of Hyperboloid Structures for High-Rise Buildings with Esoskeleton", p. 135.

۳۳. نک:
Seyedehaida Mirniazmandan, et al, "Mutual Effect of Geometric Modifications and Diagrid Structure on Structural Optimization of Tall Buildings".

34. Kazemi, et al, "Achieving Structural Efficiency of Tall Buildings by Means of Parametric Design", p. 282.

35. Generative Component

36. Rhinoceros

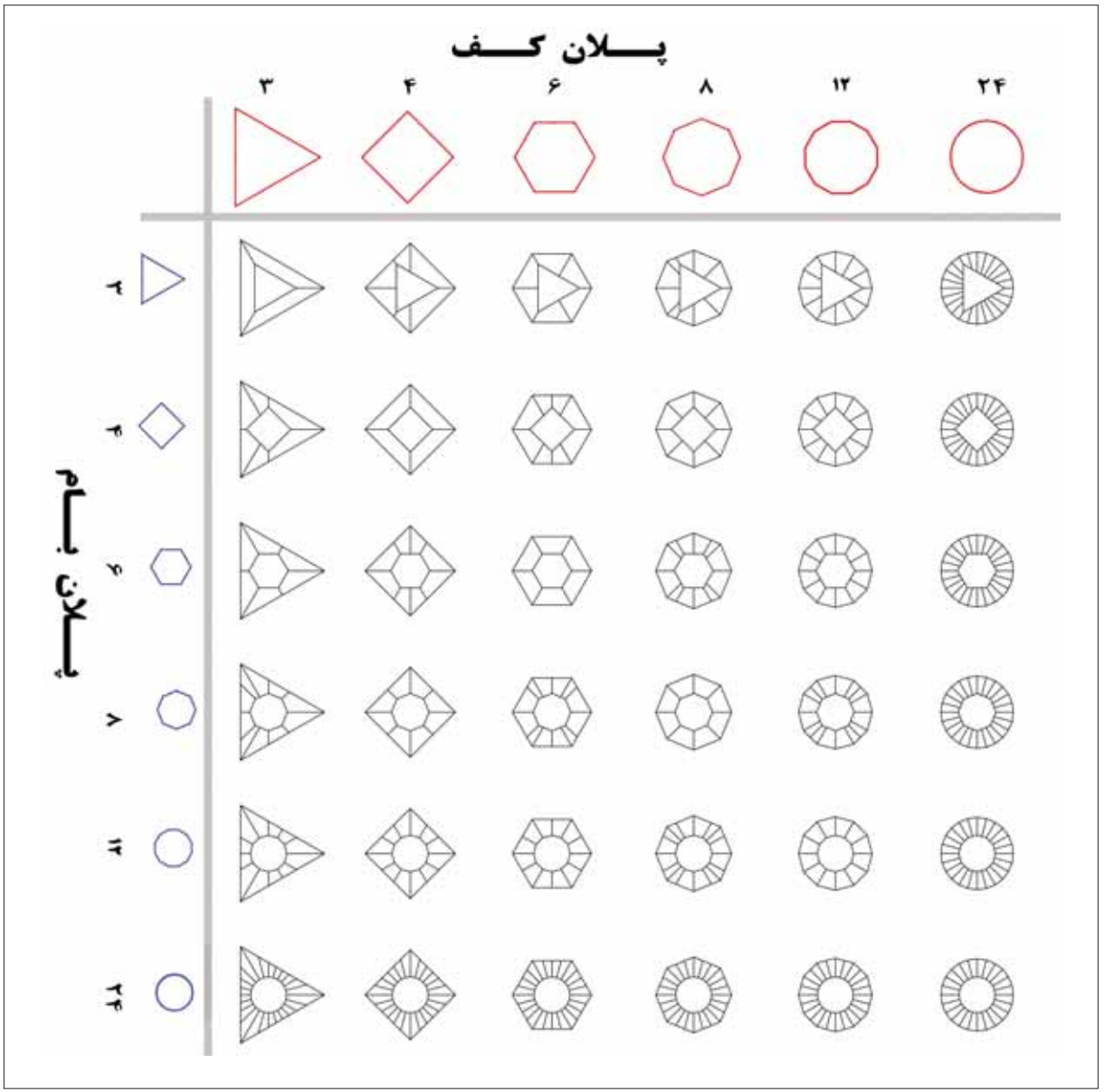
37. Karamba

38. Form Generation

۳۹. نک:
Elnimeiri, et al, ibid.

40. Tapered

شده است.[۴۱] مساحت کل زیربنا نیز در همهٔ مدل‌ها به منظور مشابهت مشخصات بهره‌برداری برای امکان مقایسه‌پذیری، یکسان در نظر گرفته شده است که با استفاده از الگوریتم مبتنی بر مطالعات قبلی[۴۲] در محدودهٔ ۲٪ اختلاف با مساحت کل (حدود ۷۰۰۰۰ متر مربع) برای همهٔ فرم‌ها قرار می‌گیرد. پس از انجام همهٔ مراحل تولید فرم، ۳۶ فرم مطابق «ت ۶» تولید می‌شود.



ت ۴. پلان بام و کف فرم‌ها، ساخته‌شده از چندضلعی‌های منتظم،
تنظیم و تدوین: نویسندگان.

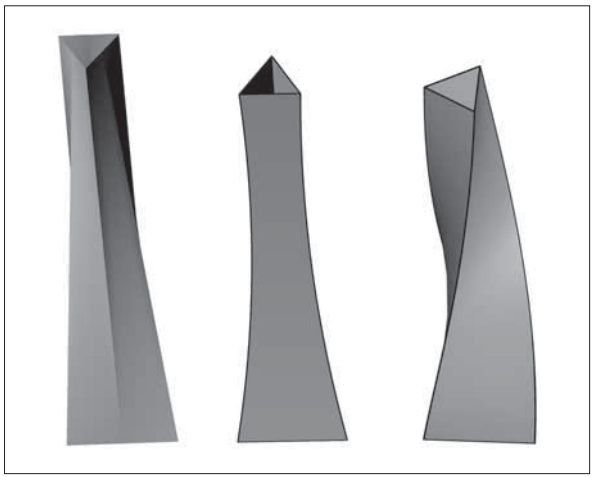
41. Park, ibid, pp. 86-87.
42. Kazemi, et al, "Investigating the Effect of Geometry Plan in Tall Buildings with DiaGrid Structure on Structural Efficiency on Lateral Seismic Loads", p. 130.

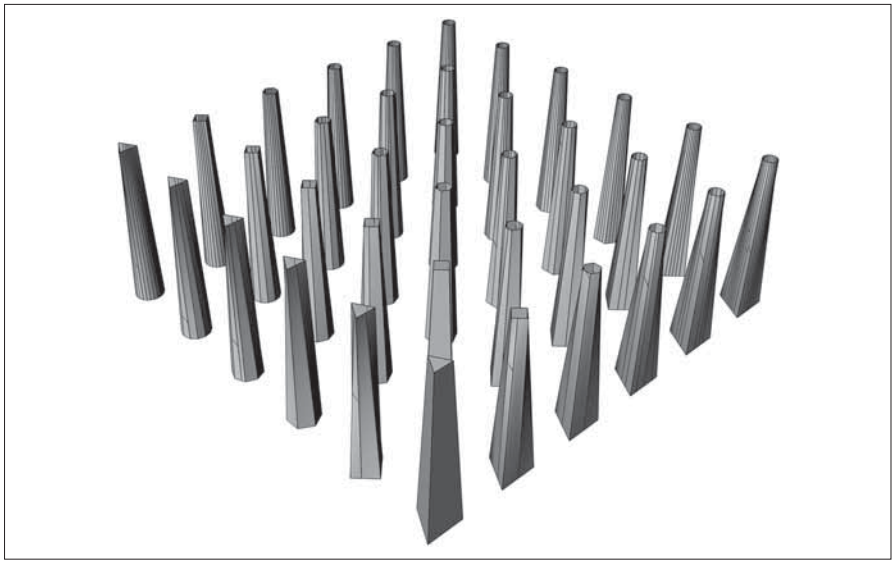
۲. ۴. تولید سازه

پس از تولید فرم‌های معماری، طرح سازهٔ دایاگرید بر روی سطوح پیرامونی فرم‌ها گسترانده[۴۳] می‌شود که به منظور مقایسه‌پذیری نتایج در مراحل بعدی از وجوه هندسه (دهانه و زاویهٔ مدول‌های دایاگرید) و معماری (محدودهٔ مساحت پلان‌های کف و بام و مساحت کل همهٔ گزینه‌ها) باید از جنبهٔ سازه‌ای نیز در محدودهٔ مشابه از منظر سختی سازه‌ای اعضا باشند و پیکره‌بندی سازه در مدل‌ها در یک محدوده باشد.[۴۴] بنابراین باید همهٔ فرم‌ها با تعداد گره یکسان و زوایای مشابه اعضای دیاگرید ساخته شود و نیز تعداد گره‌های برتعداد گوشه‌های تیز همهٔ فرم‌ها بخش‌پذیر باشد تا در محل‌های نامناسب قرار نگیرند. بدین منظور برای همهٔ فرم‌ها ۲۴ گره دایاگرید (با مقسوم علیه‌های ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲، و ۲۴) منظور شد. به‌علاوه زاویهٔ اعضای دایاگرید در پایین‌ترین تا بالاترین تراز این فرم‌ها از ۶۱ تا ۶۸ درجه تا ۴۱ تا ۵۰ درجه (با میانگین زاویهٔ دایاگرید در بالاترین و پایین‌ترین تراز فرم‌ها از ۵۲ تا ۵۸ درجه) است. ارتفاع مدول‌ها دو طبقهٔ پیاپی را در بر می گیرد. در گام بعد سازهٔ دایاگرید روی پوستهٔ خارجی فرم‌های تولیدشده پیکره‌بندی و گسترانده می‌شود.

سازه از دو بخش دال بتنی کف طبقات و اعضای مورب و افقی دایاگرید تشکیل شده است. به دلیل وجود دهانه‌های بزرگ، برای این فرم‌ها هستهٔ مرکزی صرفاً برای تحمل بار ثقلی در نظر گرفته شده است که اتصال مفصلی با دال‌ها دارد و در تحمل بار جانبی بدون نقش است. اتصال میان اعضای دایاگرید به صورت مفصلی لحاظ شده است. همهٔ گره‌های سازهٔ دایاگرید در تراز طبقات قرار دارند و منطبق با دال‌های بتنی هستند.

به منظور امکان مقایسهٔ دقیق بین مدل‌های مختلف سازه، همهٔ اعضا با یک مقطع ثابت پروفیل لولهٔ فولادی (مقطع لوله به قطر خارجی ۸۰ و ضخامت ۲ سانتی‌متر و اعضای افقی نیز از مقطع لوله به قطر خارجی ۶۰ و ضخامت ۱٫۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شده است. به این منظور ابتدا چند مقطع برای هر بخش سازه تخصیص داده شده و سپس با آزمون و خطا و بر اساس سقف ۱۵۰ درصدی ضریب به‌کارگرفتگی سازه‌ای (نسبت تنش موجود در عضو به حداکثر تنش قابل‌تحمل) انتخاب شده است. قابل‌ذکر است که هدف پژوهش حاضر مقایسه رفتار سازه‌ای فرم‌هاست، و نه دستیابی به ملاحظات طراحی سازه‌ای، و





ت ۵ (بالا). سه شیوهٔ شکل‌گیری عمودی فرم‌ها: مستقیم، خمیده، و چرخیده، تنظیم و تدوین: نویسندگان.
ت ۶ (پایین). فرم‌های ساختمان‌های بلند تولید شده، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

43. Structure Mapping
44. Ibid.

بنابراین جزئیات الزام‌آور طراحی سازه‌ای در اینجا مد نظر نیست؛ بلکه در نظر گرفتن ملاحظات سازه‌ای در فرم یک ساختمان بلند نیازمند طراحی و تحلیل مبتنی بر نرم‌افزارهای دقیق‌تر مهندسی چون ETABS، SAP 2000، STAAD Pro است. قابل‌ذکر است اعتبار افزونهٔ کارامبا برای انجام تحلیل سازه‌ای در محیط پارامتریک در مطالعات قبلی اثبات شده است[۴۵]؛ اما در اینجا با مقایسهٔ نتایج تحلیل این افزونه با نرم‌افزار تخصصی RFEM در یک مدل یکسان در هر دو نرم‌افزار مشخص شد که در ۹۵٪ موارد اختلاف ضریب به‌کارگرفتگی[۴۶] از ۰٫۰۲- تا ۰٫۰۶ است.

۲. ۵. بارگذاری

مدل‌های ساخته‌شده پس از طی مراحل تولید فرم و سازه، در رفتاری که مقابل بار جانبی از خود نشان می‌دهند، مقایسه خواهند شد، در این پژوهش بار زلزله[۴۷] به صورت استاتیکی[۴۸] مطابق با آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ ویرایش چهارم محاسبه و با عنوان بار جانبی در نظر گرفته شده است. در این روش، با به دست آوردن ضریب زلزله و وزن کل، نیروی معادل زلزله محاسبه می‌گردد. روابط استفاده‌شده در این بخش از آیین‌نامه استخراج شده است.

اگرچه استفاده از روش استاتیکی معادل در تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های منظم از منظر آیین‌نامه به ساختمان‌های با حداکثر ارتفاع ۵۰ متر از تراز پایه محدود شده است، ازآنجاکه هدف از انجام این تحلیل تهیهٔ مبنای مقایسه‌ای برای سنجش رفتار فرم‌های مختلف سازه‌ای در برابر نیروهای جانبی است و نه استفاده از نتایج تحلیل به مثابهٔ مبنای طراحی اعضای سازه‌ای، ضمن واقف بودن به دقت کمتر این روش نسبت به روش‌های تحلیل دینامیک، برای تعداد نسبتاً بالای فرم‌های مورد بررسی در این پژوهش مناسب است.

ضریب زلزله مطابق «رابطهٔ ۳-۲» از آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ به شرح «رابطهٔ ۱» محاسبه می‌شود[۴۹] که در شهر تهران و برای نوع سازه در نظر گرفته شده در این پژوهش برابر ۰٫۰۵۵ محاسبه می‌گردد. نیروی برشی معادل استاتیکی زلزله (برش پایه-V) نیز بر اساس وزن کل (*W*) و ضریب زلزله مبتنی بر «رابطهٔ ۳-۱» آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰[۵۰] به شرح «رابطهٔ ۲» محاسبه می‌شود. بخش عمدهٔ وزن کل ساختمان شامل وزن دال طبقات و بخش دیگر شامل سازهٔ دایاگرید است که با توجه به مساحت کل یکسان، مجموع وزن کف طبقات همهٔ مدل‌ها نیز یکسان است. بار ثقلی در هر متر مربع کفْ مجموع ۱۰۰٪ بار مرده و ۲۰٪ بار زنده لحاظ می‌شود[۵۱] و بنابراین وزن معادل کل کف طبقات ۳۵۰ کیلونیوتن خواهد بود. میانگین وزن سازهٔ خارجی فرم‌های مختلف ۸۶۷۵ تن و درنتیجه وزن کل معادل ۴۳۶۷۵ تن و میزان برش پایه (V) ۲۴۰۲۱ کیلونیوتن خواهد بود. توزیع نیروی برش پایه بر مرکز جرم هر طبقه، پخش بار زلزله در ارتفاع بر اساس «رابطهٔ ۳-۱۸» آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ مبتنی بر فرض تغییرشکل در مود اول نوسان انجام گرفت (اعمال سهمی از برش پایه بر هر طبقهٔ بنا به نسبت ارتفاع از سطح زمین و مساحت) (رابطهٔ ۳).[۵۲] در «ت ۷» مدل سازه‌ای یکی از فرم‌های تولید شده به همراه اعضای سازهٔ دایاگرید نمایش داده شده است. بار جانبی زلزله به روش فوق محاسبه و بر مرکز طبقات توزیع شده است.

$$C = \frac{A \times B \times I}{R_U} \quad (۱)$$

C: ضریب زلزله
A: نسبت شتاب مبنای طرح
B: ضریب بازتاب ساختمان
I: ضریب اهمیت ساختمان
R_u: ضریب رفتار ساختمان

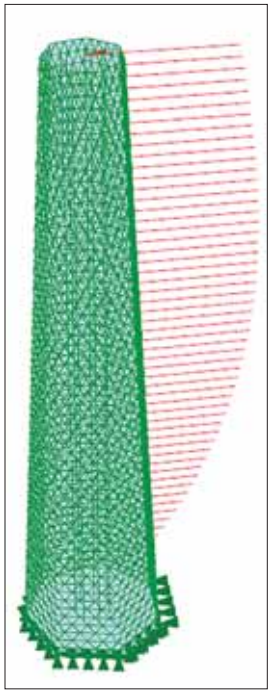
$$V = C \times W \quad (۲)$$

$$F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{i=1}^{n} W_i \times h_i^k} \times V \quad (۳)$$

W_i: وزن طبقه i
h_i: ارتفاع طبقه i از سطح زمین
V: برش پایه زلزله
F_i: مقدار نیروی وارده بر مرکز دال طبقه i

45. J. Maenpaa, *Algorithm-Aided Structural Engineering of Steel-framed Warehouse*, p. 52.
46. utilization rate
47. Seismic Load
48. Static Equivalent Seismic Load
۴۹. کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، *آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰*، ص ۲۸.

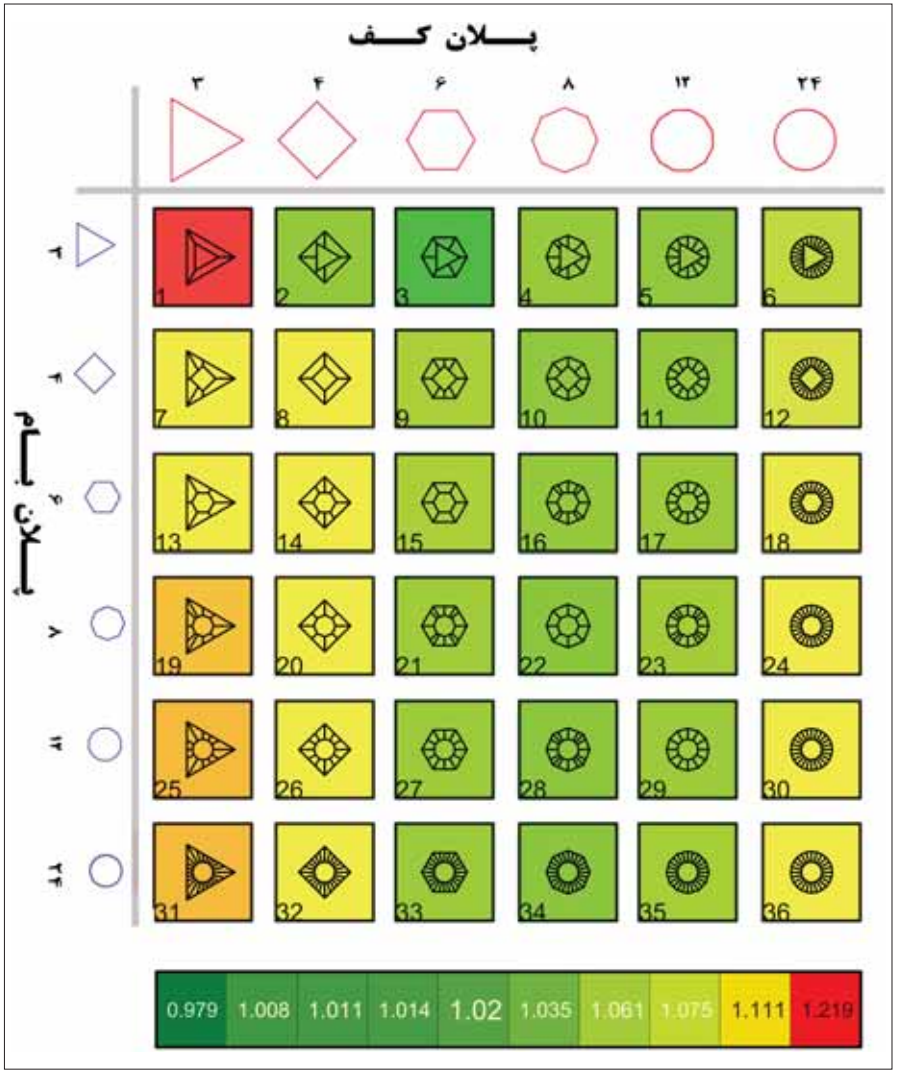
ت ۷. مدل سازه‌ای یکی از فرم‌های تولیدشده، تنظیم و تدوین: نویسندگان.



۳. یافته‌های پژوهش (نتایج تحلیل سازه)

در تحلیل و مقایسهٔ نتایج ۳۶ مدل حاصل از گام‌های فوق، مبتنی بر مطالعات، از پارامترهایی چون میزان جابه‌جایی بالاترین تراز[۵۳] (تغییر مکان جانبی بالاترین تراز ساختمان در اثر وارد شدن بارهای جانبی) و وزن کل[۵۴] سازه[۵۵] و بیشینهٔ ضریب به‌کارگرفتگی (نسبت میزان تنش موجود در یک عضو به تنش قابل‌تحمل برای آن عضو) در کل اعضای هر فرم برای مقایسهٔ رفتار سازه‌ای فرم‌ها بهره گرفته شده است.[۵۶] در منابعْ دو پارامتر ثابت تغییر مکان جانبی و ثابت تغییر مکان جانبی درون طبقه‌ای نیز به کار گرفته شده است: ثابت اول نسبت تغییر مکان جانبی بالاترین تراز به ارتفاع ساختمان و ثابت دوم نسبت تغییر مکان جانبی یک طبقه نسبت به طبقهٔ زیرین خود به ارتفاع کف تا کف آن طبقه[۵۷].

ت ۸. نمودار میزان جابه‌جایی بالاترین تراز در فرم‌ها به متر، مأخذ: تنظیم و تدوین: نویسندگان.



۳. ۱. میزان جابه‌جایی بالاترین تراز و وزن کل

در «ت ۸» میزان جابه‌جایی بالاترین تراز ساختمان در فرم‌های مورد بررسی نشان داده شده است. بیشترین میزان متعلق به فرم‌های با پلان کف سه‌ضلعی با حداکثر ۱٫۲۱ متر جابه‌جایی در فرم با پلان کف و بام سه‌ضلعی است. بیشترین میزان این جابه‌جایی در مرتبهٔ بعدی در ستون دوم در فرم‌های با پلان کف چهارضلعی و پس از آن ستون آخر در فرم‌های با پلان کف بیست و چهارضلعی رخ می‌دهد. کمترین میزان این شاخص در ستون‌های وسط در فرم‌های با پلان کف ۸، ۶ و ۱۲ضلعی) و حداقل آن در میان همهٔ فرم‌ها، مربوط به فرم شمارهٔ ۳ در پلان کف ۶ضلعی و پلان بام ۳ضلعی با جابه‌جایی ۰٫۹۸ متر (۱۹٪ کاهش نسبت به فرم ۱) است. به طور کلی کمتر بودن تعداد اضلاع پلان کف (سه‌ضلعی و چهارضلعی) سبب افزایش مقادیر تغییر مکان می‌شود، در فرم‌های با تعداد اضلاع پلان کف میانه (۶ضلعی و ۸ضلعی) مقادیر تغییر مکان کاهش و مجدداً با افزایش تعداد اضلاع پلان کف، این میزان کمی افزایش می یابد. از سوی دیگر، مطابق نمودار «ت ۹»، تغییرات وزن کل سازه در فرم‌های مختلف افزایش تعداد اضلاع پلان کف سبب کاهش وزن کل و افزایش تعداد اضلاع پلان بام نیز سبب کاهش این پارامتر می‌شود و این دو مورد به طور کلی در همهٔ فرم‌ها صادق است. بیشترین و کمترین وزن کل مربوط به فرم ۱ (۹۳۷۰ تن) و فرم ۳۶ (۸۴۸۰ تن) است.

رابطهٔ میان وزن کل و جابه‌جایی بالاترین تراز در میان فرم‌ها مستقیم نیست و با کاهش وزن کل، میزان جابه‌جایی

بالاترین تراز کاهش نمی‌یابد، بلکه تقریباً سنگین‌ترین فرم‌ها بیشترین میزان جابه‌جایی بالاترین تراز را دارند. عکس آن صادق نیست، بلکه این شاخص در فرم‌های واقع در میانهٔ بازهٔ وزن کلْ کمتر است. بنا بر این بیش از آنکه این شاخص وابسته به وزن کل باشد، به هندسهٔ پلان‌ها، بخصوص پلان کف بستگی دارد (ازآنجاکه فرم‌ها باریک‌شونده‌اند، هندسهٔ پلان کف تعیین کننده‌تر است).

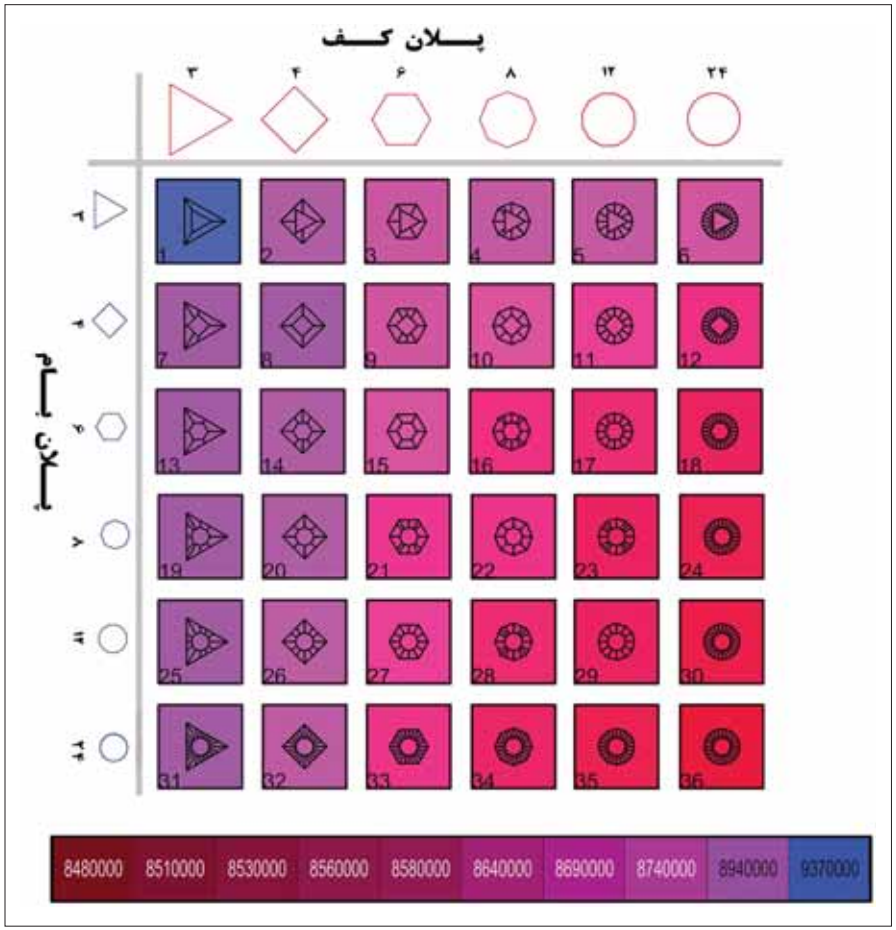
۳. ۲. تحلیل رفتار فرم‌ها در گروه‌بندی بر اساس پلان بام و کف

شبکهٔ ۶ در ۶ فرم‌های تولیدشده در این قسمت را می‌توان مطابق «ت ۱۰» در قالب سطرها (پلان بام یکسان) و ستون‌ها (پلان کف یکسان) دسته‌بندی کرد. نمودار جابه‌جایی بالاترین تراز این دو گروه بر اساس دسته‌بندی «ت ۱۰» به ترتیب در «ت ۱۱ و ۱۲» ارائه شده است. بیشترین میزان آن مربوط به گروه اول (فرم‌های با پلان کف سه‌ضلعی) است. این مقدار در گروه ۳، ۴، و ۵ (فرم‌های با پلان کف ۶، ۸، و ۱۲ضلعی) به یکدیگر نزدیک است و الگوی تغییرات نمودار آن تقریباً خطی است. در گروه اول نیز بیشترین میزان مربوط به اولین فرم (۱٫۲۱ متر)، در گروه دوم مربوط به دومین فرم (۱٫۱۰ متر)، و در گروه آخر نیز مربوط به اولین فرم (۱٫۰۳ متر) است. بنا بر این به طور کلی، با ثابت بودن تعداد اضلاع پلان کف، بیشترین میزان جابه‌جایی بالاترین تراز در فرمی رخ می‌دهد که کمترین تعداد اضلاع پلان بام را دارد.

مطابق نمودار «ت ۱۲» (فرم‌های با پلان بام یکسان)، بیشترین اختلاف میان جابه‌جایی بالاترین تراز مربوط به فرم‌های اول و دوم هر گروه است (میانگین ۷٪ در ۶ گروه) و همان‌طور که گفته شد، بیشترین میزان این پارامترْ در اولین فرم‌ها است، در فرم‌های میانی هر گروه میزان جابه‌جایی بالاترین تراز به یکدیگر نزدیک می‌شود (میانگین ۱٪) و در فرم‌های انتهایی گروه نیز اختلاف کمی می‌یابد (میانگین ۳٫۵٪).

۳. ۳. تحلیل فرم‌های با پلان کف و بام همسان

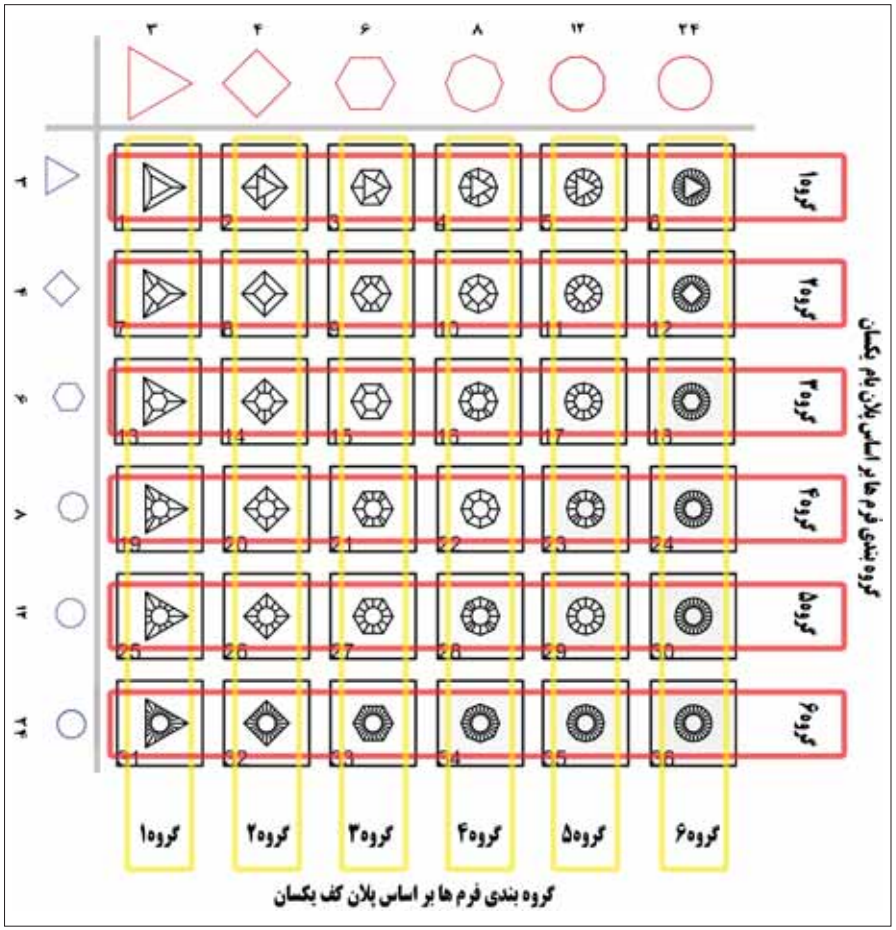
بر اساس نمودار «ت ۱۳» در میان فرم‌های با پلان بام و کف یکسان (فرم‌های شمارهٔ ۱، ۸، ۱۵، ۲۲، ۲۹ و ۳۶ در نمودار «ت ۱۰» و به‌ترتیب دارای پلان بام و کف ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲، و ۲۴ضلعی) بیشترین میزان جابه‌جایی بالاترین تراز مربوط به اولین فرم (بام و کف ۳ضلعی) است که ۱۷٫۵٪ بیشتر حداقل آن، یعنی فرم شمارهٔ ۲۲ (بام و کف ۸ضلعی) است. همچنین نسبت کمترین جابه‌جایی بالاترین تراز به حداکثر آن برابر ۸۲٫۵٪ است. با افزایش تعداد اضلاع پلان بام و کف، ابتدا این



ت ۹. نمودار وزن کل در فرم‌ها به کیلوگرم، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

۵۰. همان‌جا.
۵۱. همان، ص ۲۹.
۵۲. همان، ص ۵۵.

میزان کاهش می‌یابد؛ از فرم‌های با پلان بام و کف سه‌ضلعی (فرم ۱) به چهارضلعی (فرم ۸) ۱۰٪ کاهش اتفاق می‌افتد و این میزان به‌مرور کمتر شده تا در میانهٔ نمودار (فرم‌های ۱۵، ۲۲، و ۲۹) میزان جابه‌جایی فرم‌ها به یکدیگر نزدیک شده است؛ این میزان از فرم با پلان بام و کف ۶ضلعی (فرم ۱۵) به ۸ضلعی (فرم ۲۲) ۰٫۷٪ کاهش یافته است و در آخر نمودار نیز کمی افزایش می‌یابد؛ از فرم با پلان بام و کف ۱۲ضلعی (فرم ۲۹) به ۲۴ضلعی (فرم ۳۶) ۴٫۵٪ افزایش میزان جابه‌جایی بالاترین تراز رخ می‌دهد. مطابق این نمودار به طور متوسط جابه‌جایی بالاترین تراز با افزایش تعداد اضلاع پلان سقف و کف ۳٪ کاهش می‌یابد.



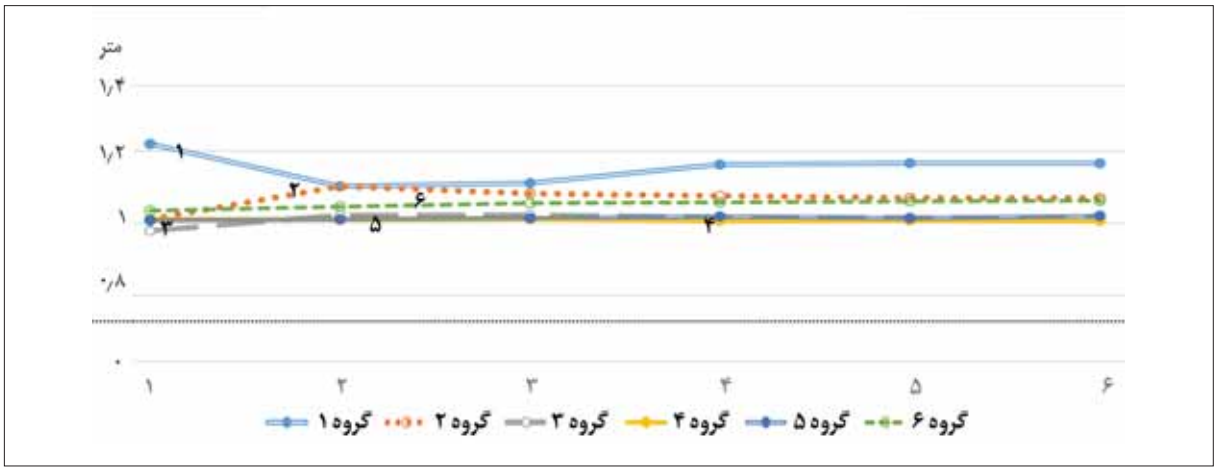
ت ۱۰. گروه‌بندی فرم‌ها به صورت سطری (پلان بام همسان) و گروه‌بندی فرم‌ها به صورت ستونی (پلان کف همسان)، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

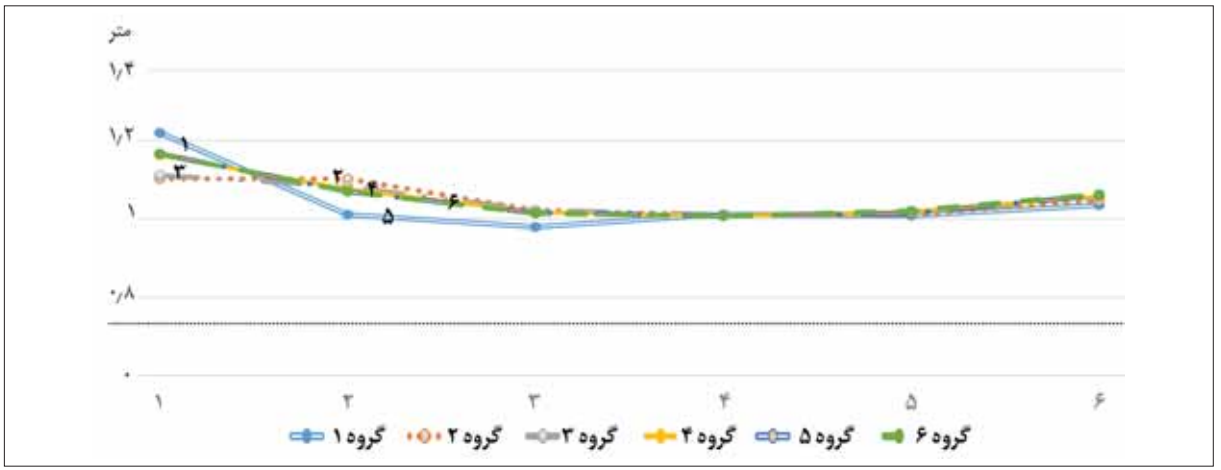
مطابق نمودار «ت ۱۴» در نمودار وزن کل، شیب نمودار نسبت به نمودار قبلی بیشتر است و در همهٔ موارد، با افزایش تعداد اضلاع پلان بام و کف، این میزان کاهش می‌یابد. از فرم با پلان بام و کف ۳ به ۴ضلعی، میزان وزن کلْ ۵٫۵٪ کاهش یافته است (بیشترین میزان تغییرات) و این میزان رفته‌رفته کمتر می‌شود تا از فرم با پلان بام و کف ۱۲ضلعی به ۲۴ضلعی ۰٫۳۵٪ کاهش اتفاق می‌افتد. به طور متوسط وزن کل با افزایش تعداد اضلاع پلان سقف و کف ۲٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر این نسبت کمترین وزن(فرم ۳۶) به بیشترین وزن (فرم ۱) ۹۰٪ است. لازم به ذکر است که در نتایج بخشی از پژوهشِ میرنیازمندان و همکاران نیز افزایش تعداد اضلاع پلان سبب افزایش وزن سازه می‌گردد[۵۸].

تبعاً بهترین فرم آن است که کمترین میزان جابه‌جایی بالاترین تراز و کمترین وزن کل را داشته باشد. در «جدول ۲» جابه‌جایی بالاترین تراز و وزن کل فرم‌های با پلان بام و کف همسان نمایش داده شده است. علاوه بر این، مقادیر نسبی این دو پارامتر (نسبت به فرم با پلان بام و کف سه ضلعی) محاسبه شده است. بر اساس این مقادیر نسبی نمودار «ت ۱۵» ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که فرم‌های با پلان کف و بام ۸ضلعی و ۱۲ضلعی وزن کل و جابه‌جایی بالاترین تراز کمتری نسبت به سایر فرم‌ها دارند که می‌توان گفت که بهترین رفتار سازه‌ای را از خود نشان می‌دهد و بدترین فرم (بیشترین میزان وزن کل و جابه‌جایی) فرم با پلان سقف و کف سه‌ضلعی است. بر اساس این نمودار، افزایش تعداد اضلاع پلان کف و بام از ۳ به ۸ سبب بهبود رفتار سازه‌ای می‌شود و افزایش آن از ۱۲ به ۲۴ سبب اندکی انحراف از رفتار بهینهٔ سازه است.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

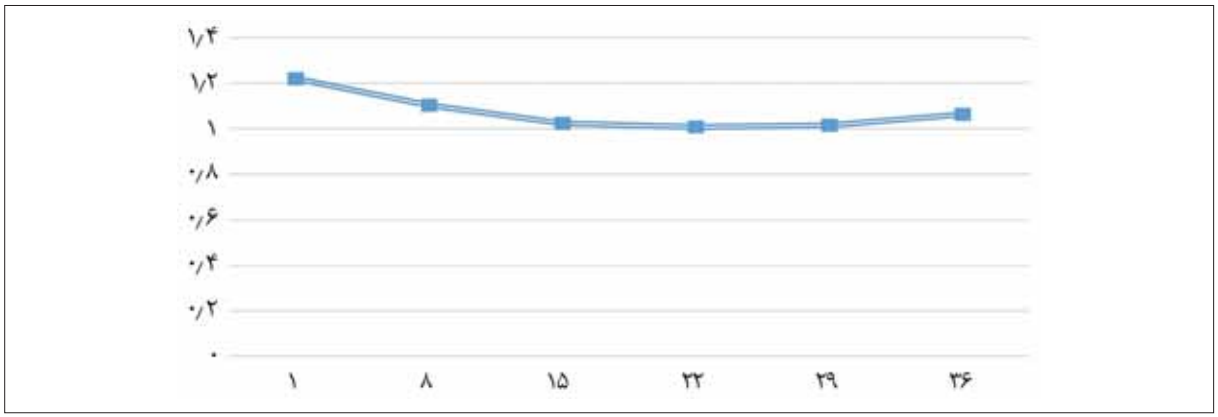
در این پژوهش پس از بررسی ادبیات پژوهش در زمینهٔ تعاریف ساختمان بلند، به اهمیت سازه در ساختمان‌های بلند به‌اختصار اشاره و خلاصه‌ای از طراحی پارامتریک و سازهٔ دایاگرید بیان شد. سپس مبتنی بر تحقیقات پیشین، الگوریتمی پارامتریک برای تولید فرم‌های شماتیک (کانسپت) ساختمان بلند تهیه شد که در آن پلان‌های بام و کف و شیوهٔ شکل‌گیری عمودی بنا پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند. در پایان، مساحت کل همهٔ فرم‌ها یکسان شد. در بخش بعدی برای فرم‌های معماری، سازه‌های دایاگرید با شرایط عملکردی مشابه جهت مقایسه تولید شد. این سازه‌ها تحت بار جانبی زلزله به روش استاتیکی مندرج در آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ قرار گرفتند. ۳۶ فرم با سازهٔ دایاگرید تحلیل و مشخص شد که فرم‌های با پلان کف ۶ضلعی، ۸ضلعی، و ۱۲ضلعی کمترین میزان جابه‌جایی در بالاترین تراز ساختمان را دارند و بهترین فرم‌ها از این منظر فرم‌های با پلان کف ۶ضلعی است؛ به‌علاوه کمترین میزان آن در میان همهٔ فرم‌ها متعلق به فرم ساخته‌شده از

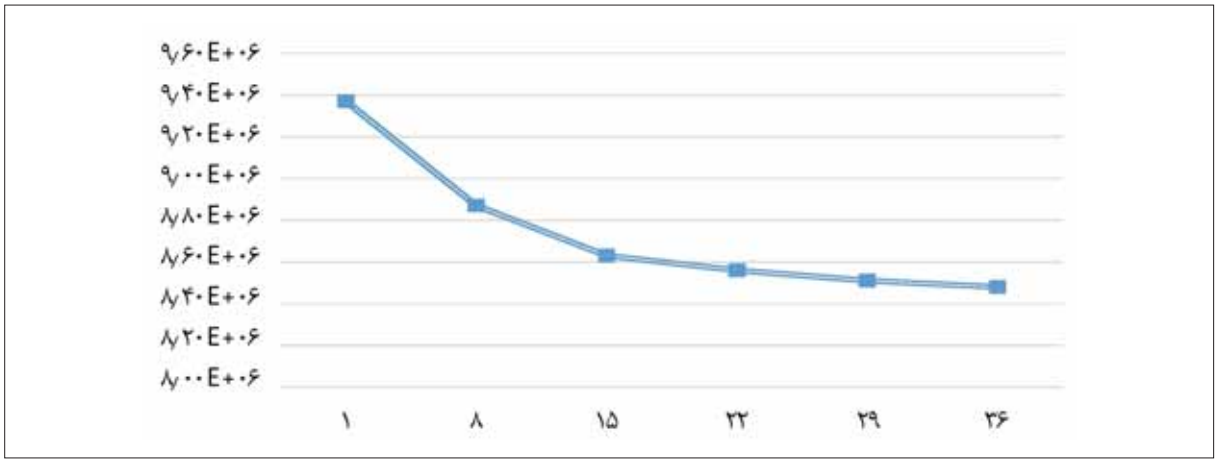




ت ۱۱ (بالا). نمودار میزان جابه‌جایی بالاترین تراز در گروه‌بندی فرم‌ها بر اساس پلان کف همسان، تنظیم و تدوین: نویسندگان.
ت ۱۲ (پایین). نمودار میزان جابه‌جایی بالاترین تراز در گروه‌بندی فرم‌ها بر اساس پلان سقف همسان، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

53. drift
54. total weight
55. Oliyan & Buelow, ibid, pp. 7-10; Khodadadi & Buelow, ibid, pp. 6-9; Alaghmandan, et al, ibid.
56. Kazemi, et al, ibid.
۵۷. گونل و ایلگین، همان، ص ۱۳.
58. Mirniazmandan, ibid, p. 12.





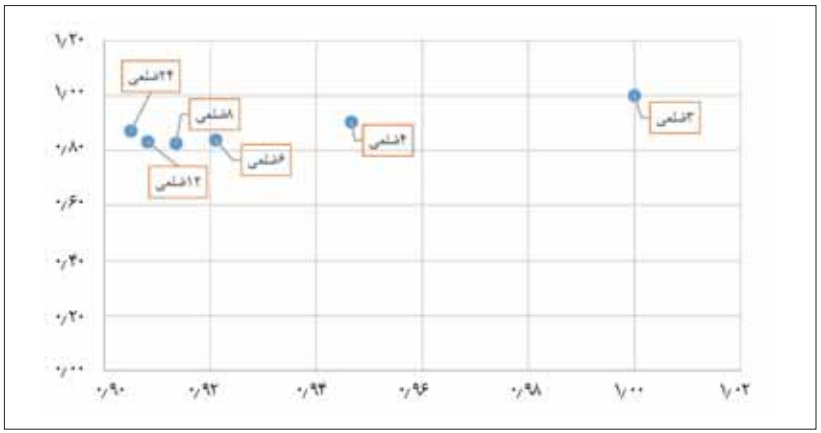
ت ۱۳ (بالا). نمودار میزان جابه‌جایی بالاترین تراز در فرم‌های با پلان سقف و کف همسان، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

ت ۱۴ (میان). نمودار وزن کل در فرم‌های با پلان سقف و کف همسان، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

ت ۱۵ (پایین، راست). نمودار میزان جابه‌جایی بالاترین تراز نسبی و وزن کل نسبی در فرم‌های با پلان کف و بام همسان، تنظیم و تدوین: نویسندگان.

جدول ۲ (پایین، چپ). میزان جابه‌جایی بالاترین تراز و وزن کل در فرم‌های با پلان کف و بام همسان، تدوین: نگارندگان.

تعداد اضلاع پلان بام و کف سازندهٔ فرم‌ها	جابه‌جایی‌بالاترین تراز (m)	جابه‌جایی بالاترین تراز نسبی	وزن کل (Kg)	وزن کل نسبی
۳	۱٫۲۱۹۲۹۱	۱٫۰۰	۹۳۷۰۰۰۰	۱٫۰۰
۴	۱٫۱۰۲۱۲۴	۰٫۹۰	۸۸۷۰۰۰۰	۰٫۹۵
۶	۱٫۰۲۲۱۷۵	۰٫۸۴	۸۶۳۰۰۰۰	۰٫۹۲
۸	۱٫۰۰۶۵۰۱	۰٫۸۳	۸۵۶۰۰۰۰	۰٫۹۱
۱۲	۱٫۰۱۳۸۵۳	۰٫۸۳	۸۵۱۰۰۰۰	۰٫۹۱
۲۴	۱٫۰۶۲۳۱۱	۰٫۸۷	۸۴۸۰۰۰۰	۰٫۹۱



پلان کف ۶ضلعی و پلان بام ۳ضلعی(فرم شمارهٔ ۳) است (۱۹٪ کمتر به نسبت بدترین فرم و ۷٪ کمتر از میانگین همهٔ فرم‌ها). به‌علاوه، بیش از آنکه جابه‌جایی بالاترین تراز به وزن کل بستگی داشته باشد، به هندسهٔ پلان سازندهٔ فرم‌ها، بخصوص هندسهٔ پلان کف، بستگی دارد (از آنجایی که فرم‌ها از نوع باریک‌شونده هستند، هندسهٔ پلان کف نقش تعیین‌کننده‌تری دارد). سپس رفتار سازه‌ای فرم‌ها در گروه‌های متشکل از پلان بام یکسان (بر اساس سطرهای ماتریس ۶ در ۶ فرم‌ها) و گروه‌های متشکل از پلان کف یکسان (بر اساس ستون‌های ماتریس ۶ در ۶ فرم‌ها) تحلیل شد و مشخص گردید که اثر هندسهٔ پلان کف بیشتر از پلان بام است (به دلیل اینکه فرم‌ها باریک‌شونده هستند). فرم‌هایی که پلان کف آن‌ها به دایره نزدیک‌تر است، به طور تقریبی میزان جابه‌جایی کمتری دارند. در انتهای این پژوهش نیز، فرم‌هایی که از یک نوع پلان بام و کف تشکیل شده بودند، بررسی شد و مشخص گردید در بین این فرم‌ها بهترین فرم از منظر جابه‌جایی در بالاترین تراز فرم ۸ضلعی است (۶٪ کمتر از میانگین و ۱۷/۵٪ کمتر از بدترین گزینه). این میزان در بین فرم‌های ۶ ، ۸، و ۱۲ضلعی بسیار به یکدیگر نزدیک و نامناسب‌ترین فرم از این منظر فرم با پلان ۳ضلعی است. علاوه بر این، در همهٔ این فرم‌ها، با افزایش تعداد اضلاع پلان بام و کف، وزن کل سازه کاهش می‌یابد. به طور متوسط وزن کل با افزایش تعداد اضلاع پلان سقف و کف حداکثر ۲٪ کاهش می‌یابد و نسبت کمترین وزن (فرم ۳۶) به بیشترین وزن (فرم ۱) ۹۰٪ است. درنهایت مطابق نمودار تحلیلی «ت ۱۵»، فرم‌های با پلان کف و بام ۸ و ۱۲ضلعی وزن کل و جابه‌جایی بالاترین تراز کمتری نسبت به سایر فرم‌ها دارند که می‌توان گفت بهترین رفتار سازه‌ای را از خود نشان می‌دهد و بدترین فرم (بیشترین میزان وزن کل و جابه‌جایی) فرم با پلان سقف و کف سه‌ضلعی است.

منابع و مآخذ

اردکانی، امیررضا و محمود گلابچی و سیدمحمود حسینی و متین علاقمندان. «بررسی تأثیر فرم ساختمان‌های بلند بر پایداری سازه‌ای آن‌ها با هدف کاهش مخاطرات زلزله؛ نمونهٔ موردی: تأثیر شکل پلان». در *مدیریت مخاطرات محیطی*، دورهٔ ۴، ش ۱ (بهار ۱۳۹۶)، ص ۲۷-۴۲.

کاظمی سنگدهی، سید پویان، *فرم‌یابی معماری در ساختمان‌های بلند با سازهٔ فلزی خارجی با رویکرد رفتار بهینهٔ سازه*، استادان راهنما: محمد تحصیلدوست و محسن سرتیپی‌پور، ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۷، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی.

کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. *آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله_ استاندارد ۲۸۰۰*، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۲.

گونل، محمد هالیس و حسین امره ایلگین. *سیستم‌های سازه‌ای و فرم آیرودینامیک ساختمان‌های بلند*، ترجمهٔ محمد تحصیلدوست، تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۶.

میرنیازمندان، سیده‌آیدا. *بهینه‌یابی فرم و سازهٔ ساختمان بلند با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی پارامتریک ساختمان بلند چندعملکردی در تهران*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشدتکنولوژی معماری، تهران: دانشگاه تهران، ۱۳۹۶.

وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان. «حفاظت ساختمان‌ها در مقابل حریق»، در *مقررات ملی ساختمان، مبحث سوم*، ۱۳۹۲.

Afghani, R. & P. Kazemi & M. Tahsildoost. "ADAPTATION OF HYPERBOLOID STRUCTURE FOR HIGH-RISE BUILDINGS WITH EXOSKELETON", in the 5th International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDs, S.ARCH 2018 Conference Proceedings, Erlangen: Verlag e.K, pp. 126-135.

Alaghmandan, M. & M. Elnimeiri & R.J. Krawczyk & P.Von Buelow. "Modifying Tall Building Form to Reduce the Along-wind Effect", in *CTBUH Journal*, (2) (2016), pp. 34-39.

Ali, M.M. & K.S. Moon."Structural Developments in Tall

Buildings: Current Trends and Future Prospects", in *Architectural Science Review*, No. 50, Issue 3 (2007), pp. 205-223.

Boake, T.M. *Diagrid Structures Systems/ Connections/ Details* (2nd ed.), Basel: Birkhäuser Verlag GmbH. 2014.

Council on Tall Buildings and Urban Habitat: http://www.ctbuh.org/

Elnimeiri, M. & A. Almusharaf. "Structure and Architectural Form of Tall Buildings", in *International Conference on Sustainable Building Asia*, 2010, pp. 54-61.

Elnimeiri, M. & M. Nicknam. "A Design Optimization Workflow for Tall Buildings Using Parametric Algorithm", in *CTBUH 2011 Seoul Conference*, 2011, pp. 561-569.

Elnimeiri, M. & S.M. Park & D. Sharpe & R. Krawczyk. "Tall Building Form Generation by Parametric Design Process", in *CTBUH 2004 Seoul Conference*, pp. 1-7, Retrieved from http://mypages.iit.edu/~krawczyk/spctbuh04.pdf

Kazemi, P. & R. Afghani & M. Tahsildoost. "Achieving Structural Efficiency of Tall Buildings by Means of Parametric Design", in *Proceedings of the CTBUH 2018 international conference; Dubai and Abu Dhabi*, Chigaco: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2018, p. 282.

Kazemi, P. & R. Afghani & M. Tahsildoost. "INVESTIGATING THE EFFECT OF ARCHITECTURAL FORM ON THE STRUCTURAL RESPONSE OF LATERAL LOADS ON DIAGRID STRUCTURES IN TALL BUILDINGS", in *The 5th International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDs, S.ARCH 2018 Conference Proceedings*, Erlangen: Verlag e.K, 2018, pp. 340-350.

Khodadadi, A. & P.V.O.N. Buelow. "Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower", in IASS-SLTE 2014 Symposium Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints, 2014.

Kloft, H. "Non-Standard Structural Design for Non-standard Architecture", in Kolarevic, B., *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, London: Spon Press, 2005.

Maenpaa, Jukka. *Algorithm-Aided Structural Engineering of Steel-framed Warehouse*. Master dissertation, Tamper University of Technology, Finland: Civil engineering faculty, 2018.

Mirniazmandan, Seyedehaida & Matin Alaghmandan & Farzad Barazande & Ehsan Rahimianzarif. "Mutual Effect of Geometric Modifications and Diagrid Structure on Structural Optimization of Tall Buildings", in *Architectural Science Review*, DOI: 10.1080/00038628.2018.1477043

Moon, K.S. "Sustainable Structural Design of Contemporary Tall Buildings of Various Forms", in *CTBUH 2012 9th World Congress*, Shanghai, 2012, pp. 271-279.

Oliyan Torghabehi, O. & P. Von Buelow. "Performance Oriented Generative Design of Structural Double Skin Facades Inspired by Cell Morphologies", in *IASS-SLTE 2014 Symposium Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints*. https://doi.org/10.13140/2.1.2743.9363

Park, S.M. *TALL BUILDING FORM GENERATION BY PARAMETRIC DESIGN PROCESS*, Unpublished Doctoral dissertation, Illinois Institute of Technology. Retrieved from Dissertations & Theses @ Illinois Institute of Technology, 2005 (database on-line); available from http://www.proquest.com.

_____ . "Innovative Tall Building Form Development", in *CTBUH 2005 7th World Congress*, New York, 2005.

Preisinger, C. "Linking Structure and Parametric Geometry", in *Archit Design*, 83(2013), pp. 110-113, Doi: 10.1002/ad.1564.

Robert McNeel & Associates, Grasshopper 3D

Robert McNeel & Associates, Rhinoceros 3D.

Turrin, M. & P. Von Buelow & R. Stouffs. "Design Explorations of Performance Driven Geometry in Architectural Design Using Parametric Modeling and Genetic Algorithms", in *Advanced Engineering Informatics*, 25(4) (2011), pp. 656-675, in https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.009