مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)/ دورهٔ ۴، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶/ ص ۴۲-۲۷

بررسی تأثیر فرم ساختمان‌های بلند بر پایداری سازه‌ای آنها با هدف کاهش مخاطرات زلزله (نمونهٔ موردی: تأثیر پارامتر شکل پلان)

امیررضا اردکانی*
پژوهشگر دورهٔ دکتری، دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
محمود گلابچی (golabchi@ut.ac.ir)
استاد دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
سید محمود حسینی (hosseini@iiees.ac.ir)
استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
متین علاقمندان (m.alaghmandan@gmail.com)
استادیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۴/۷ – تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۵/۷)

چکیده

پیشگیری از مخاطرات همواره جایگزین بهتری از مدیریت و درمان آن است. کشور ما جزو ده کشوری است که با توجه به شرایط طبیعی و جغرافیایی در معرض بیشترین مخاطرات طبیعی قرار دارند. با توجه به وجود گسل‌های فعال فراوان، زلزله به‌عنوان مهم‌ترین مخاطره، تاکنون خسارات فراوانی را در ایران سبب شده است. به همین دلیل موضوع پیش‌بینی خطر زلزله و اتخاذ تمهیداتی برای کاهش آسیب‌پذیری بناها، از اولویت‌های طراحان و سازندگان کشور و آیین‌نامه‌های موجود است. از سوی دیگر، بناهای بلندمرتبه با توجه به وسعت زیربنا، اسکان جمعیت زیاد، تأثیر بر محیط پیرامون و ویژگی‌های خاص سازه‌ای، از اهمیت بیشتری در کاهش آسیب‌پذیری برخوردارند. در این مقاله، به شاخص‌های گوناگون معماری و سازه‌ای مؤثر بر بهینه‌سازی و پایداری بیشتر این بناها در برابر نیروهای واردشده اشاره شده و سپس به بررسی تأثیر شکل پلان معماری آنها بر افزایش کارایی سازه‌ای و پایداری بیشتر این بناها در برابر نیروی زلزله پرداخته شده است. پژوهش از نوع کمّی است و با کمک فنون مدلسازی و شبیه‌سازی صورت گرفته است. برای سنجش و ارزیابی دقیق تأثیر شاخص‌ها، از نرم‌افزارهای معتبر معماری (Rhinoceros) و سازه‌ای (SAP2000) بهره برده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، گرچه تأثیر تعداد اضلاع پلان در برخی شاخص‌های پایداری چون جابه‌جایی نسبی میان طبقات و حداکثر جابه‌جایی طبقات سازه‌ای کمتر مشهود است، در زمان تناوب اصلی سازه و نیز وزن سازه‌ای واحد مساحت، تفاوت روشن‌تری را بیان می‌کند و رابطهٔ عیان‌تری را میان تعداد اضلاع و وزن مصالح نشان می‌دهد. براساس نمودارها، به‌طور کلی اشکال پلان با اضلاع بیشتر، رفتاری با سختی کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتر را نشان می‌دهند، اما در عین‌حال وزن سازه‌ای کمتری دارند و بر این اساس فرم‌های بهینه را تشکیل می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، زلزله، ساختمان بلند، شکل پلان، فرم معماری، مخاطرات طبیعی.

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۲۴۹۴۸۸۳ Email: amirreza.ardekani@gmail.com

مقدمه

مخاطرات طبیعی در طول تاریخ بشر موجب خسارات فراوان انسانی شده‌اند. انسان در طول زمان و با درک تجارب دردناکی دریافته که توانایی زیادی در تغییر منشأ وقوع این مخاطرات ندارد، اما می‌تواند با برخورد علمی و آموختن از تجربیات گذشته، تمهیداتی را پیش‌بینی کند تا از خسارات آنها بکاهد [۳] و این علت‌شناسی، پیش‌بینی و پیشگیری ماهیت علم مخاطره‌شناسی است [۱۱]. کشور ما نیز با توجه به موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های طبیعی ویژه، در تاریخ خود براساس منابع و مستندات [۲، ۶] همواره در معرض این مخاطرات بوده است. وجود گسل‌های متعدد و لرزه‌خیزی ایران، منشأ زمین‌لرزه‌هایی بوده که حوادث تلخ تاریخی آن از گذشتهٔ دور تا کنون در ذهن‌ها باقی مانده است. براساس آمار، به‌طور متوسط هرسال یک زلزله با بزرگی ۶ ریشتر و هر دو سال یک زلزله با بزرگی ۶/۵ ریشتر [۱۰] در کشورمان اتفاق افتاده است که این امر اهمیت مسئلهٔ زلزله‌خیزی ایران را نشان می‌دهد. در هشتاد سال گذشته تلفات زلزله در جهان ۱/۵ میلیون نفر و در ایران ۱۰۰ هزار نفر بوده است [۱۰].

اما نکتهٔ شایان توجه در این میان، امکان کاهش این مخاطرات با نگاه علمی و سعی در ایجاد تمهیدات و راهکارهایی است که به کمک دانش مخاطرات [۱۱]، خسارات ناشی از آنها را تا حد زیادی کاهش دهد. از میان روش‌های گوناگون کاهش آسیب‌پذیری زلزله مانند اطلاع‌رسانی مناسب، انتخاب بستر مناسب طراحی و غیره، شاید تأثیرگذارترین آنها ایجاد پایداری بیشتر و آسیب‌پذیری کمتر ساختمان‌ها باشد. این مهم با کمک تمهیداتی در فرم معماری و ویژگی‌های سازه‌ای بناها انجام‌پذیر است. تاکنون کمتر به ظرفیت‌های فرم بنا به‌منظور پایداری آن در برابر زلزله در مقایسه با ظرفیت‌های سازه‌ای توجه شده است. این مقاله به‌عنوان پژوهشی کاربردی در زمینهٔ مخاطرات، به بررسی ظرفیت‌های فرم معماری به‌منظور کاهش مخاطرات طبیعی زلزله در ساختمان‌های بلند می‌پردازد.

پیشینهٔ پژوهش

ساختمان‌های بلند و پایداری در برابر زلزله

شکل‌گیری بناهای بلند حاصل بلوغ و برهم‌کنش فناوری پیشرفته و نیازهای معماری بشر بوده است. در طول زمان، این بناها با توجه به ظرفیت و وسعت تأثیرگذار خود، از دیدگاه‌های گوناگون معماری، سازه، تأسیسات، محیط زیست، مسائل شهری، اجتماعی و مخاطرات محیطی موضوع بحث بوده‌اند [۴]. در کنار مزایای این بناها همچون امکان اسکان بیشتر شهری و افزایش بهره‌وری زمین، چالش‌هایی چون پایداری سازه‌ای، مصرف نامتوازن انرژی و مصالح،

تراکم نامتناسب جمعیتی و غیره همواره در معرض نقد بوده است [۹، ۸] در این زمینه، عملکرد آنها در برابر مخاطرات طبیعی موضوعی مهم به‌شمار می‌رود. با توجه به وسعت ابعاد، تراکم جمعیتی و تأثیرات شهری چشمگیر، پایداری و مقاومت این بناها در برابر نیروهای جانبی اهمیت دوچندان می‌یابد [۹].

پایداری یک ساختمان بلند از طریق تمهیدات فرمی و سازه‌ای تأمین می‌شود. در میان عوامل تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری این بناها [۱۰] آگاه شدن از تأثیرات فرم ساختمان‌های بلند بر عملکرد سازه‌ای آنها، می‌تواند اثر بسیاری در بهره‌گیری از ظرفیت‌های پنهان فرم در پایداری و بهینه‌سازی این بناها داشته باشد. تأثیر فرم بر بازده سازه‌ای و پایداری ساختمان‌های بلند موضوعی اثبات‌شده است. شولر انتخاب فرم‌های پربازده سازه‌ای را در کنار برخی راهکارهای دیگر یکی از روش‌های بهینه‌سازی بناهای بلند می‌داند [۷]. برای مثال، او معتقد است ویژگی‌های هندسی برخی فرم‌ها، سبب مقاومت بیشتر و بازده سازه‌ای زیادتر آنها می‌شود [۷]. فرم مناسب برای ایجاد ساختمان‌های بلند مقاوم در برابر زلزله در مناطق زلزله‌خیز از اساسی‌ترین مسائل طراحی این ساختمان‌ها محسوب می‌شود [۱۰].

بناهای بلند یکی از حوزه‌های میان‌رشته‌ای است که تعامل تنگاتنگ و مطلوب دست‌اندرکاران حوزه‌های گوناگون معماری و ساختمان، طراحی و اجرای آنها را امکان‌پذیر می‌کند. رسیدن به طرح مطلوب یک ساختمان بلند، به همکاری گروه‌های مختلف طرح، سازندهٔ مصالح و اجرای ساختمان نیاز دارد [۷]؛ در این میان تعامل دو حوزهٔ معماری و سازه اهمیت بسیاری دارد. همراهی و درک مشترک معمار، مهندس سازه و مهندس تأسیسات در این‌گونه بناهای پیچیده، برای رسیدن به طرحی مطلوب و پاسخگو، بیش از پیش ضروری می‌نماید [۵] و بسیاری از ویرانی‌های برجای‌مانده از زمین‌لرزه‌ها حاصل ناهماهنگی معماری و مهندسی سازه است [۵].

سازهٔ ساختمان‌های بلند

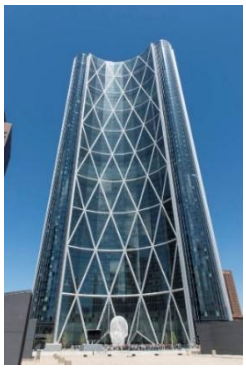
ساختمان‌های بلند به دلیل دارا بودن محدودیت‌ها و نیازهای ویژه‌ی معماری و سازه‌ای، از ویژگی‌های خاصی پیروی می‌کنند. از جمله، تأثیر بارهای جانبی بر ثقلی در این‌گونه بناها پیشی گرفته و کنترل طراحی را به‌دست می‌گیرد [۱۸]. بر همین اساس، ایجاد تمهیداتی برای پایداری جانبی بیشتر لازم است. از سوی دیگر، با توجه به ارتفاع بلند، تغییر شکل و جابه‌جایی زیاد طبقات در این بناها، تأمین سختی لازم بر مقاومت چیره می‌شود و طراحی در بسیاری از اعضا براساس سختی صورت می‌گیرد [۲۰]. این عوامل در کنار وزن زیاد ساختمان، استفاده از

سیستم‌های سازه‌ای پربازده و بهینه را ضرورت می‌بخشد. همان‌گونه که بیان شد، در کنار عوامل سازه‌ای، فرم بنا نیز می‌تواند در رفتار و عملکرد مطلوب سازه‌ای آن مؤثر باشد تا با بهره‌گیری از ظرفیت فرم‌های با بازده بیشتر و هزینهٔ کمتر، نیازهای مورد نظر تأمین شود.

سیستم سازه‌ای *دایگرید*[1] یکی از پربازده‌ترین سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند است. این سیستم با توجه به ویژگی‌های انحصاری در ترکیب زیبایی‌شناسی فرمی همچنین ایجاد سختی بالای سازه‌ای [۱۸]، امروزه رو به رشد قرار گرفته است. اصطلاح «دایگرید» ترکیبی از واژه‌های "*دایگنال*" به معنای مورب و "*گرید*" به معنای شبکه است و به سیستم سازه‌ای اشاره می‌کند که یکپارچگی سازه‌ای خود را از طریق استفاده از مثلث‌بندی به‌دست می‌آورد. حذف ستون‌های عمودی از محیط تفاوت اصلی میان این سازه و قاب‌های مهاربندی‌شدهٔ خارجی را تشکیل می‌دهد. با داشتن ترکیب مثلث‌بندی شده، سازهٔ مورب توانایی تحمل بار ثقلی و بارهای جانبی را داراست [۱۷]. این سازه‌ها می‌توانند با فرم خود سختی قابل قبولی را برای نیروهای جانبی فراهم کنند تا جایی که از جنبهٔ نظری، نیازی به هستهٔ ساختمانی برای ایجاد سختی ندارند [۱۵]. از ویژگی‌های مطلوب معماری آن می‌توان به سازهٔ نمایان الماس‌گونه و انعطاف‌پذیری در تأمین دهانه‌های وسیع در پلان اشاره کرد. نمونه‌هایی از این سازه‌ها در شکل‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است. با توجه به ویژگی‌های مطرح‌شده، در این مقاله از این سیستم سازه‌ای برای پژوهش بهره برده شده است.

شکل ۱. برج سوئیس‌ری، لندن [۲۱]

شکل ۲. برج هرست، نیویورک[۲۱]



شکل ۳. برج باو، کلگری [۲۱]

1. Diagrid

روش پژوهش

این مقاله، به بررسی تأثیر فرم ساختمان‌های بلند بر عملکرد سازه‌ای آنها در برابر زلزله می‌پردازد. پژوهش از نوع کمّی بوده و با روش مدلسازی و شبیه‌سازی یارانه‌ای صورت گرفته است. با مدلسازی فرم‌ها براساس مدلی پارامتریک در نرم‌افزار معماری راینو[1] و افزونهٔ گرس‌هاپر[2] و محاسبهٔ جایگزین‌ها در نرم‌افزار سازه‌ای سَپ۲۰۰۰[3] شاخص‌های خروجی تحلیل می‌شوند. سپس برمبنای نمودارها و جدول‌های تحلیلی، رفتار مدل‌ها مقایسه و نتیجه‌گیری می‌شود. بر این اساس تأثیر شکل پلان بر کارایی سازه‌ای مشخص می‌شود و طراح درمی‌یابد که چگونه می‌تواند با انتخاب صحیح، در رسیدن به طرحی بهینه و کاهش مصرف مصالح و افزایش پایداری شریک باشد.

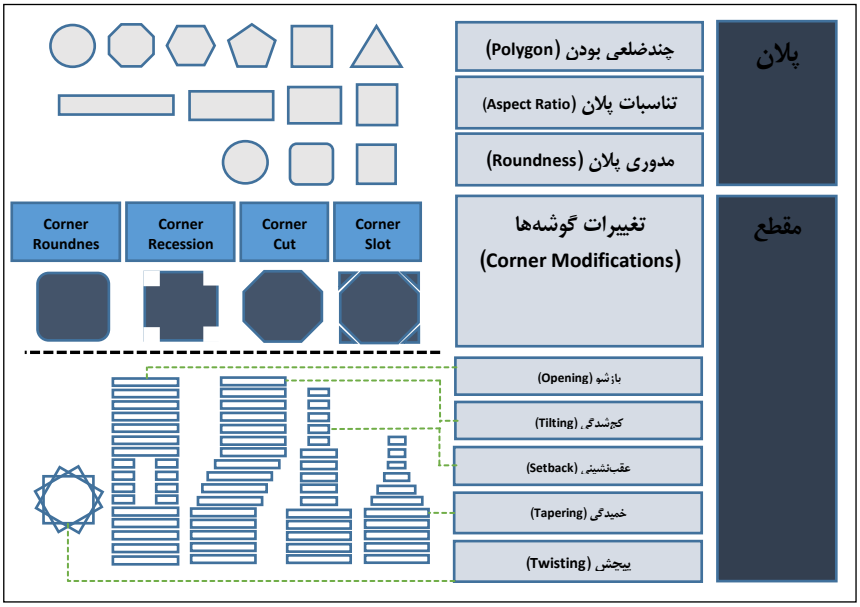
پیش از این، کارهای بسیاری در زمینهٔ تأثیر نیروی جانبی باد صورت گرفته است [۱۳، ۱۲]؛ از طرفی نیز کشور ایران و شهر تهران به‌عنوان بستر طرح فرض شده است؛ این قاعده نیز برقرار است که براساس شرایط بستر و ویژگی‌های بنا، تنها یکی از نیروهای باد یا زلزله (هرکدام که غالب باشد) مبنای محاسبات نیروی جانبی قرار می‌گیرد که با سنجش صورت‌گرفته و مقایسه، محاسبات براساس نیروی زلزله انجام گرفته است؛ گرچه تأثیر نیروی باد بر سازه کنترل شده است.

طراحی فرم پارامتریک

همان‌گونه که بیان شد، شاخص‌های گوناگونی در فرم معماری ساختمان‌های بلند وجود دارد که بر عملکرد سازه‌ای ساختمان بلند تأثیرگذار است. این شاخص‌ها شامل مواردی می‌شوند که می‌توانند ویژگی‌هایی را در برش افقی یا عمودی بنا ایجاد کنند (شکل ۴).

برای بررسی تأثیر شکل پلان، فرم عمومی ساختمان بلند به‌صورت پارامتریک در نرم‌افزار راینو ایجاد شد. با توجه به موضوع مقاله و تمرکز بر پارامتر شکل پلان، براساس فراوانی موجود در اشکال ساختمان‌های بلند، پلان‌های با کاربرد و همپوشانی بیشتر از ساختمان‌های بلند موجود استخراج شد. از سوی دیگر با وجود هستهٔ میانی برای فرم ساختمان بلند حاضر، شاخص‌های تشکیل‌دهندهٔ فرم هسته نیز در این برنامه قرار گرفته است. ارتفاع و ابعاد هسته، تعداد دهانه‌های محیط هسته، دهانه‌های دارای مهاربند و غیره از شاخص‌های تشکیل‌دهندهٔ هسته‌اند.

1. Rhinoceros
2. Grasshopper
3. SAP2000



شکل ۴. نمودار دسته‌بندی شاخص‌های تأثیرگذار بر فرم ساختمان بلند [۱]

مشخصات مدل‌ها

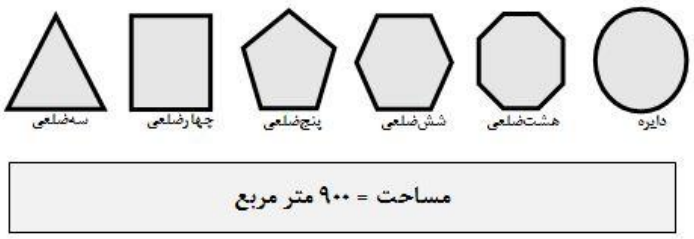
مدل‌های اصلی برای سنجش و مقایسه موضوع مورد بررسی، از مدل پارامتریک عمومی ایجادشده، انتخاب و استخراج شد. برای مقایسهٔ صحیح پارامتر تعیین‌شده یعنی شکل پلان، سایر شاخص‌ها تا حد ممکن برای دخالت کمتر در نتیجهٔ مقایسه، یکسان و نزدیک به هم در نظر گرفته شده‌اند. به همین منظور، مجموع مساحت طبقات پلان در همهٔ مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده تا با فرض برآوردن نیاز معماری، مدل‌ها در شرایط مشابه بررسی شوند. تغییرات در مقطع صورت نگرفته و پلان هر مدل در طبقات مشابه است.

پارامتر اصلی مورد بررسی از فرم، شکل پلان ساختمان بلند است که به‌منظور پوشش فراوانی در شکل پلان ساختمان‌های بلند موجود، شش پلان شامل اشکال منتظم سه‌ضلعی، چهارضلعی، پنج‌ضلعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و دایره انتخاب شد. ابعاد و اندازهٔ اضلاع هر پلان طوری در نظر گرفته شد که مساحت پلان‌ها با مساحت اولیه برابر باشد. نموداری از این اشکال در شکل ۵ دیده می‌شود.

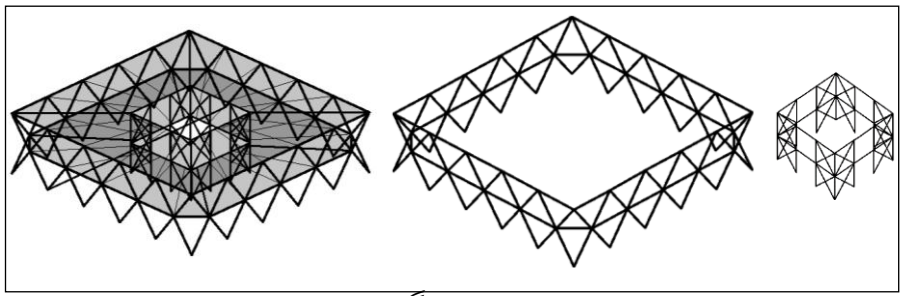
برخی داده‌های دیگر مدل‌ها، با توجه به فراوانی ساختمان‌های بلند معمول در دنیا و متناسب با مدل ایجادشده انتخاب شد. با توجه به قرارگیری ساختمان در دستهٔ بناهای بلند و

بررسی موضوع زلزله، تعداد طبقات ساختمان مورد نظر ۴۰ طبقه و با توجه به کاربری اداری بنا، ارتفاع هر طبقه ۴ متر احتساب شد و ارتفاع کل طبقات ۱۶۰ متر در نظر گرفته شد. مساحت هر طبقه ۹۰۰ متر مربع (۳۰ در ۳۰ در پلان مربع‌شکل) در نظر گرفته شد که این مساحت در پلان‌های با شکل متفاوت نیز همین مقدار است.

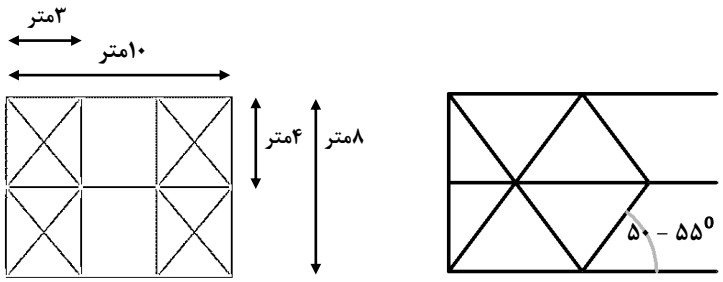
از یک‌سو با توجه به نیازهای سازه‌ای برای کمک به تأمین سختی لازم و تحمل نیروهای ثقلی و جانبی و از سوی دیگر، برای فراهم آوردن نیازهای عملکردی معماری در ایجاد بخش‌های خدماتی و ارتباطی، در مدل‌های مقاله این هدف با ایجاد یک هستهٔ فولادی با سه دهانه در هر وجه و ابعاد ۱۰ در ۱۰ متر تأمین شد. برای برقراری پایداری جانبی هسته، از سیستم مهاربند همگرا در دو دهانه از هر وجه استفاده شد و یک دهانه برای عملکرد خدماتی و عبور و مرور بدون مهاربند در نظر گرفته شد (شکل ۶). برای تحمل بارهای ثقلی کف طبقات و نیز اتصال هسته و سازهٔ پوسته برای ایجاد رفتار هماهنگ در برابر نیروها، تیرهای متصل‌کنندهٔ هسته و پوسته به‌طور شعاعی آنها را به یکدیگر متصل کرده‌اند.



شکل ۵. اشکال پلان‌های بررسی‌شده در مقاله [نگارنده]



شکل ۶. نمودار کلی از بخش‌های مدل سازه‌ای مورد بررسی [نگارنده]



شکل ۷. مشخصات ابعاد و زوایای سازهٔ دایگرید مدل‌ها و مهاربندهای هسته [نگارنده]

سازهٔ دایگرید با توجه به ویژگی‌های خاص آن که پیشتر به آن اشاره شد، سیستم سازه‌ای مورد بررسی برای نمونه‌ها قرار گرفت. شاخص‌های مرتبط با این سیستم سازه‌ای در مدل‌های مورد بررسی تا حد امکان یکسان در نظر گرفته شد تا به‌عنوان متغیر اضافی تأثیرگذار در نتیجه نباشد. در این مدل‌ها، لوزی‌های تشکیل‌شده به‌صورت دوطبقه بوده و زاویهٔ آنها براساس آنچه در برخی پژوهش‌ها [۱۸،۱۹] آورده شده به‌طور بهینه و یکسان در محدودهٔ ۵۰ تا ۵۵ درجه (شکل ۷) در نظر گرفته شده است.

مدل سازه‌ای

با به‌دست آوردن مدل معماری و جایگزین‌های مورد نیاز برای سنجش و مقایسه، مدل‌ها در نرم‌افزار تحلیل و طراحی سپ۲۰۰۰ ارزیابی شدند. برای این منظور مقدمات و پیش‌فرض‌های طراحی معین شد. برای تحلیل و طراحی از مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان، در موضوع مقادیر پیش‌فرض زلزلهٔ آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ زلزله، و نیز آیین‌نامهٔ آی.بی.سی[1] ۲۰۰۹ استفاده شد. همچنین برای کنترل موضوع نیروی باد آیین‌نامه‌ای.اس.سی.ای ۷ (۰۵)[2] مبنا قرار گرفت. با توجه به عملکرد اداری در نظر گرفته‌شده برای ساختمان، بارهای مرده و زنده از جدول مقادیر در آیین‌نامه، ۵۵۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع استخراج شد. با توجه هدف مقاله و ویژگی‌های بستر پیش‌فرض طراحی، نیروی زلزله به‌عنوان بار جانبی غالب در نظر گرفته شد؛ اگرچه این موضوع با تحلیل نرم‌افزار کنترل و بررسی شد. بیشترین مقدار بار باد در حالت استاتیک در مدل چهارضلعی حدود ۱۷ سانتی‌متر بود که از حداکثر جابه‌جایی ناشی از زلزله (برابر مقدار ۳۶ سانتی‌متر) در مدل مشابه کمتر بود.

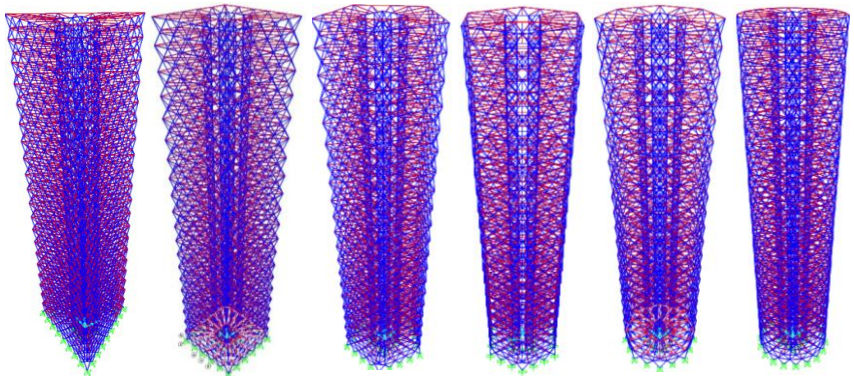
1. IBC 2009
2. ASCE 7 (05)

با توجه به ارتفاع ساختمان و ضرورت‌های آیین‌نامه‌ای، تحلیل استاتیک برای سازه کافی نبود و از تحلیل شبه‌دینامیکی طیفی[1] برای ارزیابی مدل‌ها بهره گرفته شد. در این روش تحلیل، مدهای نوسان ساختمان که تعداد آن براساس آیین‌نامه تعیین می‌شود، بر سازه اثر داده می‌شود و بیشترین تأثیر سازه و نیروهای ایجادشده در آن مبنای طراحی قرار می‌گیرد.

برای مقایسه درست و طراحی بهینه برای هر جایگزین، طیفی از مقاطع کلی تعیین شد و به‌وسیلهٔ روش مقطع خودکار[2] به اجزا نسبت داده شد. بر این اساس هر مدل بهینه‌سازی شده و با مقاطع آن مشخص شد. برای ستون‌ها از مقاطع جعبه‌ای و پروفیل آی.پی.بی[3]، برای تیرها از پروفیل‌های آی.پی.ای[4]، برای اعضای مورب از مقاطع لوله‌ای و برای مهاربندها از پروفیل ناودانی دوبل استفاده شد. کف به‌صورت دال بتنی با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و به‌صورت دیافراگم صلب[5] در نظر گرفته شد. اتصالات میان اعضای مورب محیطی و مهاربندها به‌صورت مفصلی تعیین شد.

ترکیب بارها براساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان و مقادیر فرض‌شده برای محاسبهٔ ضریب زلزله مطابق آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ در نظر گرفته شد. زمین بستر با خاک نوع ۲، ضریب اهمیت برابر ۱ و نسبت شتاب مبنای طرح برابر ۰/۳۵ شتاب گرانش (g) در نظر گرفته شد. با توجه به نبود مقدار مشخص ضریب رفتار سازه (R) برای سازه‌های با سیستم دایگرید در آیین‌نامه، این مقدار از مقالات و پژوهش‌های پیشین [۱۷،۱۶،۱۴] به میزان R=5 در نظر گرفته شد. همچنین برای اطمینان از روند یکسان طراحی در مدل‌ها و اعتبار مقایسه، نسبت تنش موجود به ظرفیت تنش حداکثری مقاطع (*استرس ریشیو*[6]) در همهٔ مدل‌ها بررسی شد که همگی در دامنهٔ ۰/۶۶ تا ۰/۷۸ قرار گرفت. حداکثر میزان جابه‌جایی و دریفت نسبی بین طبقات نیز در مدل‌ها کنترل شد و از مقادیر مجاز در آیین‌نامه (۰/۰۰۵ ارتفاع کل بنا برای حداکثر جابه‌جایی و ۰/۰۲ ارتفاع طبقات برای حداکثر دریفت نسبی بین طبقات) کمتر به‌دست آمد.

1. Response Spectrum Analysis
2. autoselect
3. IPB
4. IPE
5. Rigid Diaphragm
6. Stress Ratio



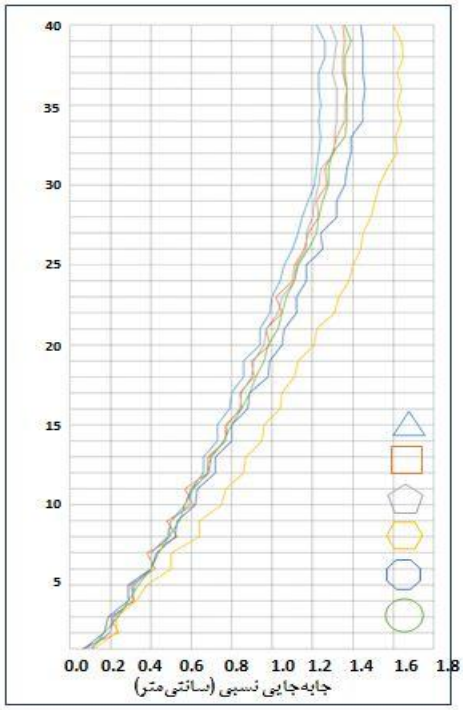
شکل ۸. مدل سازه‌ای ایجادشده از پلان‌های بررسی‌شده در برنامهٔ SAP2000 [نگارنده]

یافته‌ها و تحلیل نتایج

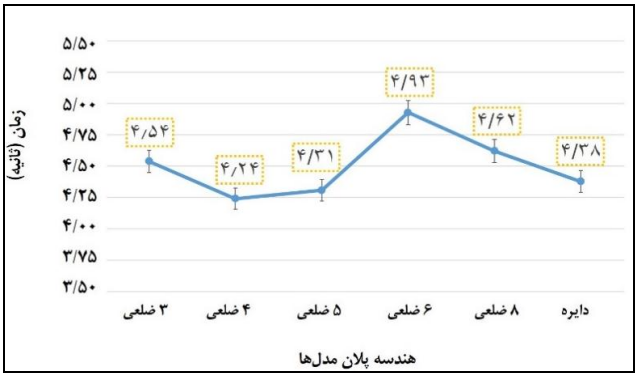
براساس قواعد و پیش‌فرض‌هایی مدلسازی، تحلیل و طراحی مدل‌ها در برنامهٔ مذکور صورت گرفت و خروجی آن به‌صورت داده‌هایی برای مقایسه استخراج شد. با وجود شاخص‌های گوناگون برای مقایسهٔ مدل‌ها و تحلیل نتایج، براساس نظر متخصصان و نیز آنچه در پژوهش‌های مرتبط دیده می‌شود [۱۹]، مهم‌ترین شاخص‌ها برای مقایسه و ارزیابی موضوع مورد نظر، مقدار جابه‌جایی نسبی میان طبقات تقسیم بر ارتفاع طبقه (*دریفت*[1])، حداکثر مقدار جابه‌جایی طبقات[2] و دورهٔ تناوب مدهای اصلی ساختمان در مدل‌های گوناگون است. از سوی دیگر برای به‌دست آوردن مدل بهینه از دیدگاه مصرف مصالح، عامل وزن مصالح به‌ازای مساحت واحد بنا می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین عامل در مقایسه و به‌دست آوردن مدل بهینه کمک کند. همان‌طور که در نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات ملاحظه می‌شود (شکل ۹)، تفاوت اساسی میان این مقادیر در پلان‌های گوناگون سازه‌ای دیده نمی‌شود که یکی از دلایل آن را می‌توان ابعاد نزدیک عمق پلان‌ها در نظر گرفت که در نتایج نیروی زلزله تأثیرگذار بوده‌اند. از سوی دیگر به‌طور کلی میان افزایش تعداد اضلاع پلان و میزان جابه‌جایی طبقات رابطه‌ای نسبی اما ضعیف قابل درک است که البته این رابطه به‌صورت کاملاً مستقیم و بدون استثنا نیست. چراکه برای مثال، تغییر مشخصی در مقادیر پلان شش‌ضلعی دیده می‌شود. این موضوع

1. Interstory Drift
2. Maximum Displacement

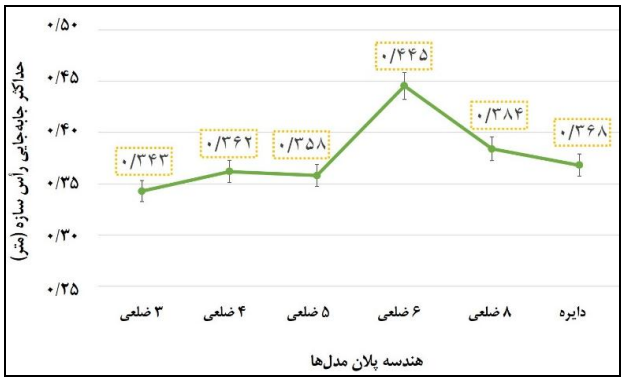
نشان‌دهندهٔ پایداری ذاتی و شکلی بعضی از این اشکال نسبت به دیگران است که تأثیر آن را بر موضوع تعداد اضلاع و میزان مدوری غالب کرده است.



شکل ۹. جابه‌جایی نسبی طبقات [نگارنده]

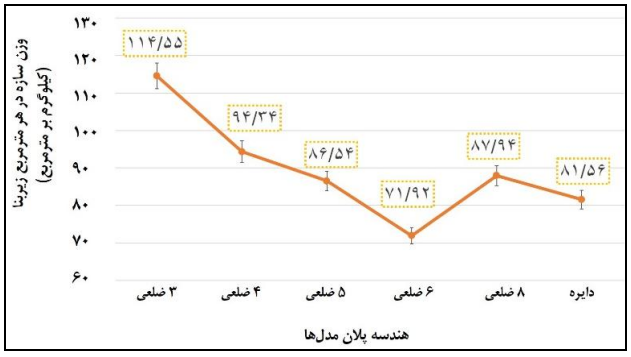


شکل ۱۰. زمان تناوب مد اول سازه [نگارنده]



شکل ۱۱. حداکثر جابه‌جایی رأس سازه [نگارنده]

در مورد حداکثر جابه‌جایی طبقات که در رأس سازه اتفاق می‌افتد، همان‌گونه که از شکل ۱۱ برداشت می‌شود، حداکثر جابه‌جایی متعلق به مدل‌های شش‌ضلعی (۰/۴۴۵۴ متر) و هشت‌ضلعی (۰/۳۸۴۰ متر) است که به دلیل هندسهٔ خاص، رفتار منعطف‌تری را از خود نشان می‌دهند. این موضوع را می‌توان براساس مدت زمان تناوب اصلی مدل‌ها (شکل ۱۰) نیز مشاهده کرد. بر این اساس مدل شش‌ضلعی دارای بیشترین جابه‌جایی در رأس سازه و مدل سه‌ضلعی دارای کمترین جابه‌جایی (۰/۳۴۲۸ متر) در رأس سازه و هندسهٔ پایدارتر است. در تحلیل مودال صورت‌گرفته، دوره‌های تناوب هر یک از مدل‌ها بررسی شد و در مقایسهٔ دورهٔ تناوب بیشتر هر سازه، مقادیر بین ۴/۲۴ ثانیه برای مدل چهارضلعی و ۴/۹۲ ثانیه برای مدل شش‌ضلعی به‌دست آمد این موضوع با رفتار منعطف شش‌ضلعی ارتباط نزدیکی را نشان می‌دهد. دیگر مقادیر نیز در این دامنه قرار دارند.



شکل ۱۲. مقایسهٔ وزن سازه در واحد مساحت مدل‌ها [نگارنده]

شکل ۱۳. مقایسهٔ درصد وزن سازهٔ مدل‌ها نسبت به مدل چهارضلعی [نگارنده]

موضوع دیگر که می‌تواند از نظر اجرایی معیار مناسبی برای مقایسه قرار گیرد، معیار وزن به‌ازای واحد مساحت است که می‌تواند تشخیص بهتری از میزان مصالح به‌کاررفته به ازای هر مترمربع ساختمان و معیار بهتری برای مقایسه کارایی سازه‌ها ارائه کند. براساس شکل ۱۲، مدل شش‌ضلعی با کمترین مصرف فولاد یعنی ۷۱ کیلوگرم به‌ازای واحد مساحت، مقرون‌به‌صرفه‌ترین و مدل سه‌ضلعی با مصرف ۱۱۴ کیلوگرم فولاد در مترمربع، سنگین‌ترین سازه میان مدل‌های ایجادشده را دارا هستند. همچنین به‌طور کلی می‌توان ارتباطی به نسبت مستقیم میان افزایش اضلاع و کاهش وزن سازه درک کرد. برای درک بهتر این مقادیر درصد وزن هر مدل به مدل عمومی (چهارضلعی) در شکل ۱۳ ارائه شده است.

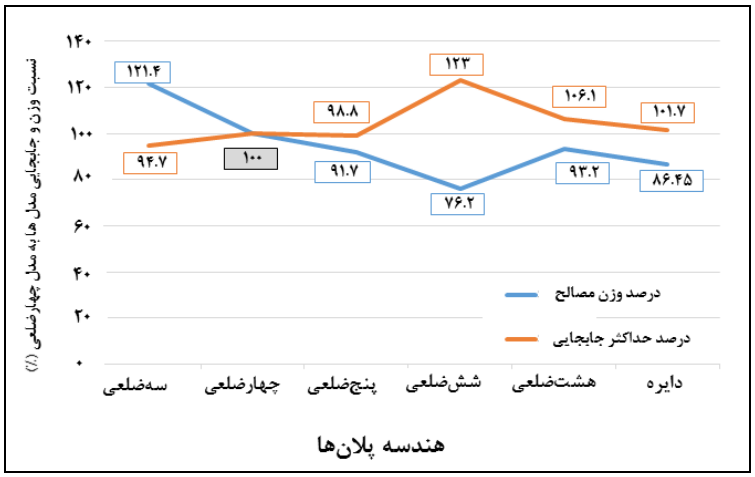
بحث و نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین ویژگی‌های دانش مخاطرات، پیشگیری پیش از درمان است. افزایش پایداری بناهای بلند در برابر زلزله، از جمله روش‌های پیشگیرانه برای کاهش مخاطرات آنهاست. یکی از راه‌های افزایش پایداری، ایجاد فرم‌های پربازده و سازه‌های کاراتر است که باید حاصل تعامل و درک مشترک معمار، مهندس سازه و سایر دست‌اندرکاران باشد. در این مقاله با برشمردن شاخص‌های مؤثر در فرم معماری این بناها، تأثیر پارامتر شکل پلان در کارایی و مقاومت بیشتر سازه‌ای در برابر زلزله بررسی شد.

براساس مشاهدهٔ نتایج و تحلیل نمودارهایی که از مقایسه مدل‌ها به‌دست آمد، تأثیر شکل پلان بر عملکرد سازه‌ای در شاخص‌هایی محسوس و در برخی کمتر قابل درک است. این تأثیر

در میزان حداکثر جابه‌جایی طبقات و دریفت نسبی میان طبقات کمتر است، اما در زمان تناوب اصلی سازه و نیز وزن سازه‌ای واحد مساحت، تفاوت روشن‌تری را بیان می‌کند. براساس این پژوهش می‌توان بیان کرد که پارامتر شکل پلان در عملکرد سازه تأثیرگذار است و به‌طور کلی اشکال دارای اضلاع بیشتر با وجود ایجاد جابه‌جایی بیشتر، وزن کمتر و سازهٔ مقرون‌به‌صرفه‌تری را تشکیل داده‌اند که این یکی از نتایج مهم پژوهش است.

همچنین براساس بررسی انجام‌گرفته، بیش از آنکه افزایش تعداد اضلاع پلان بر رفتار سازه تأثیرگذار باشد، شکل و هندسهٔ پلان تأثیرگذار بوده است. مشاهدهٔ مقادیر شاخص‌های سازه‌ای مدل شش‌ضلعی که تفاوت معناداری را میان دیگر موارد نشان می‌دهد، همچنین نبود رابطهٔ خطی واضح میان تغییرات اضلاع و مقادیر سازه‌ای، دلیلی بر اثبات این مدعاست که می‌تواند از دیگر نتایج مهم این پژوهش باشد.



شکل ۱۴. مقایسهٔ درصد وزن و حداکثر جابه‌جایی مدل‌ها به مدل چهارضلعی [نگارنده]

براساس شکل ۱۴ که خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده است و در آن نسبت وزن و حداکثر جابه‌جایی هر یک از مدل‌ها به مدل مبنا (چهارضلعی) به درصد بیان شده است، باید توجه کرد که اگرچه از یک‌سو پلان‌های با اضلاع کمتر، دارای سختی بیشتر و جابه‌جایی کمتری در برابر بارهای جانبی هستند، مصرف مصالح بیشتری دارند و طراحی بهینه‌ای را ایجاد نمی‌کنند. اینجاست که مهندس سازه و طراح معماری به کمک این نتایج و جدول‌ها می‌توانند به تصمیم‌گیری در زمینهٔ شکل و ابعاد پلان بپردازند و این، کاربرد مهم دیگری از نتایج این

پژوهش است. توجه به این نکته مهم است که این پژوهش تنها به پایه‌گذاری بستر و روند بررسی فرم و شاخص‌های آن می‌پردازد و برای به‌دست آوردن نتایج جامع، باید پژوهش‌های بیشتری در زمینهٔ موضوع برای شرایط گوناگون صورت گیرد.

منابع

[۱]. اردکانی، امیررضا؛ علاقمندان، متین (۱۳۹۴). «نقش تعامل معمار و مهندس سازه بر بهینه‌سازی ساختمان‌های بلند»، دومین کنفرانس بین‌المللی ساختمان‌های بلند، آذر- دی ۱۳۹۴، برج میلاد تهران.

[۲]. امبرسیز، نیکولاس نیکولاس؛ ملویل، چارلز پیتر (۱۳۷۰). *تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران*، ترجمهٔ ابوالحسن رده تهران: آگاه.

[۳]. امینی، الهام (۱۳۸۴). «تبیین مفهوم بافت شهری و نقش آن در کاهش خطرات ناشی از زلزله»، مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی مخاطرات زمین، بلایای طبیعی و راهکارهای مقابله با آنها. دانشگاه تبریز، ۵ تا ۷ مهر.

[۴]. بمانیان، محمدرضا (۱۳۷۹). «بررسی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری ساختمان‌های بلند در ایران». رسالهٔ دکتری معماری. پردیس هنرهای زیبا. دانشگاه تهران.

[۵]. چارلسون، اندرو (۱۳۸۹). *طراحی لرزه‌ای برای معماران، مقابله‌ای هوشمندانه با زلزله*، ترجمهٔ محمود گلابچی و احسان سروش‌نیا. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[۶]. حسینی، میرهادی (۱۳۹۵). «جغرافیای تاریخی زلزله در ایران؛ اسناد مهلرزه ای». *فصلنامهٔ علمی- پژوهشی و بین‌المللی جغرافیای ایران*، سال چهاردهم، ش ۴۹. ۴۵۳-۴۳۳.

[۷]. شولر، ولفگانگ (۱۹۷۷) *سازه‌های ساختمان بلند*. ترجمهٔ حجت‌الله عادلی. چ پنجم، تهران: انتشارات دهخدا.

[۸]. صادق زاده، اکبر (۱۳۷۶). «نقدی بر اندیشهٔ ساختمان های بلند در ایران». *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. بهار، تابستان، پاییز، زمستان ۱۳۷۶، ش ۵: ۱۱۷-۱۰۱.

[۹]. صفوی، سیدیحیی (۱۳۸۰). «ملاحظاتی بر بلندمرتبه‌سازی در تهران: ساختمان های بلندمرتبه در تهران». *رشد آموزش جغرافیا*، ش ۸۵: ۲۹-۱۸.

[۱۰]. گلابچی، محمود؛ گلابچی، محمدرضا (۱۳۹۲). *مبانی طراحی ساختمان‌های بلند*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۱]. مقیمی، ابراهیم (۱۳۹۳). *دانش مخاطرات (برای زندگی با کیفیت بهتر)*. چ دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[12]. Alaghmandan, M., Elnimeiri, M. (2013). "Reducing Impact of Wind on Tall Buildings through Design and Aerodynamic Modifications (Architectural and Structural Concepts to Mitigate Wind Effect on Tall Buildings)". Architectural Engineering Conference 2013 (AEI). Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania, USA. Published by ASCE.

[13]. Amin, J.A; Ahuja, A.K. (2010). "Aerodynamic Modifications to the Shape of the Buildings: A Review of the State-Of-The-Art". *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol. 11, 4:433-450

[14]. Baker, W., Besjak C., Sarkisian, M., Lee, P., Doo, C. (2010). "Proposed Methodology to Determine Seismic Performance Factors for Steel Diagrid Framed Systems", 13th U.S. Japan Workshop, 2010

[15]. Boake, T.M. (2014). "Diagrid Structures Systems Connections Details", 2014 Birkhäuser Verlag GmbH, Basel P.O. Box 44, 4009 Basel, SwitzerlandPart of De Gruyter.

[16]. Jani, K., Patel, P. (2013). "Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings", *Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference on Engineering* (NUiCONE-2012), Procedia Engineering 51 (2013) 92 – 100

[17]. Khan, R., Shinde, S.B. (2015). "Analysis of Diagrid Structure in Comparison with Exterior Braced Frame Structure", *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, Volume: 04 Issue: 12, Dec-2015

[18]. Moon, K. (2008). "Material Saving Design Strategies for Tall Buildings Structures", CTBUH 8th World Congress, 2008

[19]. Moon, K. (2012). "Sustainable Structural Design of Contemporary Tall Buildings of Various Forms", CTBUH 2012 9th World Congress, Shanghai

[20]. Taranath, B.S. (1988). *Structural Analysis & Design of Tall Buildings*, Published by McGraw Hill.

[21]. See information in: http://www.fosterandpartners.com/projects/, June, 2017