مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)/ دورهٔ ۹، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۱/ ص ۸۷-۶۹
DOI: 10.22059/jhsci.2022.341229.722

تأثیر هندسهٔ پلان و فرم معماری پیچشی بر آسیب اجزای غیرسازه‌ای ساختمان‌های بلند در برابر زلزله

غزل جاویدان‌نیا
پژوهشگر دورهٔ دکتری معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمدرضا بمانیان*
استاد گروه معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمدجواد مهدوی نژاد
استاد گروه معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱/۱۹ – تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۴/۱۹)

چکیده

براساس نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زلزلهٔ جهانی، کشور ایران روی گسترهٔ لرزه‌ای با خطر بسیار زیاد قرار گرفته است. از این‌رو موضوع پیش‌بینی خطر زلزله و در نظر گرفتن راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر آن، از اولویت‌های طراحان سازندگان و آیین‌نامه‌های موجود در این حوزه است. ساختمان‌های بلند از یک‌سو از نیازهای اساسی در پاسخ به توسعهٔ شهرهای بزرگ ایران و رشد جمعیت آنها و از سوی دیگر دارای حجم زیادی از اجزای غیرسازه‌ای شامل تجهیزات، تأسیسات و اجزای معماری هستند. هر گونه آسیب به این اجزا در زمان وقوع زلزله، اعم از ناپایداری، فروریزش یا حتی خارج شدن از خدمات‌رسانی ممکن است نیاز به مدیریت بحران و خدمت‌رسانی فوق‌العاده را به شهر تحمیل کند. از سوی دیگر ساختمان‌های بلند به‌دلیل ارتفاع و مقیاس از بناهای شاخص و اثرگذار بر سیما و منظر شهرند و به همین دلیل طراحان تمایل دارند در طراحی این ساختمان‌ها از فرم‌های پیچیده و زیبا از دیدگاه هندسی و هنری استفاده کنند. این مقاله به بررسی اثر فرم پیچشی به‌منزلهٔ یکی از فرم‌های پیچیدهٔ رایج در ساخت ساختمان‌های بلند بر دریفت و جابه‌جایی جانبی به‌عنوان شاخص‌های سنجش آسیب‌پذیری اجزای غیرسازه‌ای و وزن واحد مساحت سازه به‌عنوان شاخص طراحی بهینهٔ سازه‌ای ساختمان‌های بلند می‌پردازد. برای این منظور فرم‌های پیچشی با پلان‌های هندسی منتظم شامل مثلث، مربع، شش‌ضلعی و دایره هر یک با درجات پیچش نسبی طبقات از صفر تا ۳ درجه و با ارتفاع‌های ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ متر بررسی شده‌اند. این پژوهش از نوع کمّی است و با کمک شبیه‌سازی و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار معماری راینو و افزونهٔ شبیه‌ساز تحلیل المان محدود کارامبا انجام گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پیچش طبقات در فرم‌ها با پلان مثلث و مربع هم موجب افزایش مقادیر شاخص‌های دریفت و جابه‌جایی جانبی و هم افزایش وزن واحد مساحت سازه می‌شود و شدت این افزایش با ازدیاد ارتفاع ساختمان فزونی می‌یابد. در مقابل پیچش طبقات ساختمان بر فرم‌های با پلان‌های دایره‌ای و شش‌ضلعی، اثر بسیار کم و حتی ناچیزی دارد و هیچ یک از شاخص‌های بررسی‌شده دچار افزایش چندانی نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسیب اجزای غیرسازه‌ای، ساختمان‌های بلند، فرم معماری پیچشی، کاهش مخاطرات زلزله.

* نویسندهٔ مسئول
Email: bemanian@modares.ac.ir

مقدمه

زلزله‌های گذشته در شهرهایی با تراکم کم مانند زلزله‌های رودبار و منجیل در سال ۱۳۶۹ و بم در سال ۱۳۸۲ و موارد اخیر در آذربایجان شرقی در سال ۱۳۹۱ و کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ نشان می‌دهد که بی‌توجهی به این مخاطره در طراحی ساختمان‌ها، موجب صدمات جانی و خسارت‌های فراوان مالی خواهد شد [۳]. مدیریت آسیب‌های ساختمان‌ها در برابر زلزله شامل آگاهی، پیشگیری و کاهش احتمال بروز آنها پیش از وقوع زلزله و در فرایند طراحی و ساخت ساختمان‌ها می‌شود [۴]. یکی از موضوعات مهم در کنترل آسیب‌های ساختمان در برابر زلزله، پیشگیری از آسیب به اجزای غیرسازه‌ای آن است. اجزای غیرسازه‌ای ساختمان شامل اجزای معماری و پوستهٔ نما، مکانیکی و الکتریکی عناصری هستند که در مسیر اولیهٔ انتقال بار نیستند و جزئی از سیستم مقاوم لرزه‌ای به شمار نمی‌روند [۲۵]. براساس بررسی‌ها در پژوهش‌های پیشین، بخش بزرگی از آسیب‌های جانی و مالی در زلزله‌های گذشته ناشی از آسیب به اجزای غیرسازه‌ای در ساختمان‌هاست [۲۶]. آسیب به این اجزا در هنگام وقوع زلزله ممکن است موجب صدمات جانی و مالی شود و بازسازی ساختمان پس از وقوع زلزله را بسیار پرهزینه کند. افزون‌بر این آسیب به اجزای غیرسازه‌ای مکانیکی و الکتریکی در هنگام وقوع زلزله، از یک‌سو ممکن است موجب بروز آتش‌سوزی یا انفجار و از سوی دیگر سبب از کار افتادن آنها شود، چنانکه حتی ساختمان‌هایی که آسیب اساسی در برابر زلزله ندیده‌اند، پس از زلزله اسکان‌ناپذیر و بدون استفاده شوند. در این میان ساختمان‌های بلند با توجه به وسعت زیربنا، اسکان جمعیت زیاد، تأثیر بر محیط پیرامون و ویژگی‌های خاص سازه‌ای از اهمیت بیشتری در کاهش آسیب‌پذیری برخوردارند. ساختمان‌های بلند از یک‌سو از راهکارهای اساسی در پاسخ به توسعهٔ شهرهای بزرگ ایران و رشد جمعیت آنها هستند و از سوی دیگر حجم زیادی از اجزای غیرسازه‌ای شامل تجهیزات، تأسیسات و اجزای معماری را در بر می‌گیرند. هر گونه تخریب این ساختمان‌ها در اثر زلزله به‌دلیل زیاد بودن تعداد حاضران یا ساکنان، در مقیاس کوچک ممکن است آسیب‌های جانی زیادی در پی داشته باشد و در مقیاس بزرگ‌تر- به‌دلیل ارتفاع و حجم زیاد مصالح در آنها- می‌تواند موجب آسیب به ساختمان‌های همجوار شود و همچنین ریزش آوار آنها با بستن شریان‌های شهری در کمک‌رسانی پس از زلزله اخلال ایجاد خواهد کرد. از سوی دیگر، هزینهٔ ساخت، سازه و هزینه و تعداد اجزای غیرسازه‌ای در این دسته از ساختمان‌ها در مقایسه با ساختمان‌های مشابه با ارتفاع و مساحت کمتر بسیار زیاد است [۱۴]. بر این اساس، حتی اگر این ساختمان‌ها پس از زلزله دچار تخریب یا آسیب جدی از نظر

پایداری سازه‌ای نشوند، هر گونه آسیب به اجـزای غیرسـازه‌ای ماننـد نمـا، پلـه‌هـا، تأسیسـات، دکوراسیون داخلی و ... افزون‌بر احتمال ایجاد جراحت‌های فیزیکی و تلفات جـانی، هزینـه‌هـای سنگین بازسازی مجدد را به‌جا می‌گذارد [۱۵، ۱]. از این‌رو در نظر گـرفتن راهکارهـای کـاهش آسیب‌پذیری اجزای غیرسازه‌ای در ساختمان‌های بلند در برابر زلزلـه از ضـروریات فعلـی بـرای کلانشهرهای لرزه‌خیـز کشـور اسـت کـه بـه کـاهش مخـاطرات ناشـی از زمـین‌لـرزه، کـاهش آسیب‌پذیری شهری و کاهش صدمات انسانی، خسارات مالی و عوارض اجتماعی ناشـی از وقـوع زلزله‌های محتمل کمک می‌کند.

این پژوهش با در نظر گـرفتن جنبـه‌هـای زیبـایی‌شـناختی معمارانـه و اسـتحکام سـازه‌ای مناسب، به بررسی قابلیت‌های فرم معماری به‌منظور کاهش آسیب‌هـای اجـزای غیرسـازه‌ای در ساختمان‌های بلند فولادی دارای سیستم سازه‌ای دیاگرید می‌پردازد. بـرای ایـن منظـور، مـدل سازی فرم‌های پیچشی با درجهٔ پیچش نسبی هر طبقه بین ۱ تا ۳ درجه با پلان‌هـای مختلـف در نرم‌افزار راینو و پلاگین گراس‌هاپر انجام گرفت. سپس طراحـی سـازه و بارگـذاری و تحلیـل لرزه‌ای توسط پلاگین کارامبا در همان نرم‌افزار راینو انجام پذیرفت. برمبنای نتایج، رفتار مدل‌ها مقایسه و نتیجهٔ نهایی بیان شده است.

پیشینهٔ پژوهش

ساختمان‌های بلند، پاسخ اساسی به نیاز توسعهٔ جمعیت شهری و نیاز به سکونت در شهرهای بزرگ هستند. براساس مصوبهٔ شورای عالی معماری و شهرسازی ایـران، سـاختمان بلنـد بـه ساختمانی گفته می‌شود که دارای ارتفاع ۲۷ متـر و بیشـتر باشـد یـا سـاختمانی کـه تعـداد طبقات آن با احتساب همکف، ۸ طبقه و بیشتر باشـد یـا ارتفـاع بـالاترین کـف طبقـهٔ قابـل بهره‌برداری آن بیش از ۲۳ متر از تراز متوسـط زمـین باشـد [۶]. در طراحـی سـاختمان‌هـا، هندسهٔ پلان و سطح مقطع ساختمان دو شاخص مهمی‌اند که معماران بیشتر برای بـرآوردن نیازهای مدنظر خود از آنها استفاده مـی‌کننـد [۱۳]. در دوران معاصـر، از یـک‌سـو بـه‌دلیـل پیشرفت روش‌های طراحی و تحلیل سازه‌ای و از سوی دیگر به‌دلیـل پیشـرفت فنـاوری‌هـای ساخت و تولید مصالح پیشرفته، ساخت ساختمان‌های بلند با فرم‌هـای پیچیـده امکـان‌پـذیر شده است [۳۳]. امروزه رقابت در حوزهٔ ساختمان‌های بلند، بـیش از آنکـه در زمینـهٔ ارتفـاع باشد، در زمینهٔ طراحی و ساخت فرم‌های پیچیده به‌منظور هویت بخشی به منطقه یـا حتـی کشور محل طراحی است [۱۹]. یکـی از پراسـتفاده‌تـرین راهکارهـای معمـاران بـرای ایجـاد فرم‌های شاخص برای ساختمان‌های بلند، افزودن پیچش به فرم معماری در ارتفاع و طراحی

فرم‌های پیچشی است [۱۹] (شکل ۱). با پیچیده‌تر شدن فرم ساختمان‌های بلند، طراحی سیستم‌های سازه‌ای خاص که افزون‌بر بارهای ثقلی، بارهای جانبی را در این ساختمان‌ها کنترل کنند و توانایی تحمل اثر پیچیدگی‌های فرمی را نیز داشته باشند آغاز شد. سیستم سازه‌ای دیاگرید[1] یکی از سیستم‌های سازه‌ای است که به‌دلیل ظاهر زیبا و نیز ایجاد سختی جانبی زیاد سازه‌ای بسیار مورد توجه معماران و مهندسان قرار گرفته است [۳۰] (شکل ۲). این سیستم سازه‌ای از یک‌سو می‌تواند با فرم خود سختی قابل قبولی برای نیروهای جانبی فراهم کند و از سوی دیگر ظاهر نمایان الماس‌گونه و انعطاف‌پذیری در تأمین دهانه‌های وسیع سازه‌ای آن موجب توجه معماران به آن در مقایسه با دیگر سیستم‌های سازه‌ای شده است. در پژوهش مون از سیستم سازه‌ای دیاگرید برای طراحی فرم‌های پیچیده شامل فرم‌های پیچشی، فرم‌های کج‌شده و فرم‌های غیرخطی با پلان مربع استفاده شده و اثر این فرم‌ها بر تغییر سختی جانبی ساختمان در برابر نیروی باد سنجیده شده است [۲۸]. براساس نتایج این پژوهش، سیستم سازه‌ای دیاگرید پتانسیل زیادی برای توسعه به‌منزلهٔ یکی از مناسب‌ترین راه حل‌های سازه‌ای برای ساختمان‌های بلند با فرم پیچیده دارد. در این پژوهش از سیستم سازه‌ای دیاگرید برای تولید و مقایسهٔ فرم‌های پیچشی استفاده می‌کند.

شکل ۱. کاربرد پیچش در فرم معماری به‌منظور ساخت بناهای خاص و اثرگذاری بر هویت و منظر منطقه: الف) برج ابسولوت در کانادا؛ ب) برج مرکز تجارت در کویت؛ ج) برج ریوولوشن در پاناما؛ د) برج چرخان در سوئد [۸].

1. Diagrid

شکل ۲. استفاده از سازهٔ دیاگرید در ساختمان‌های بلند با فرم پیچیده: الف) برج هرست در نیویورک؛ ب) برج سوییس ری در لندن؛ ج) برج کاپیتال گیت در دبی [۲]

پژوهش‌های پیشین

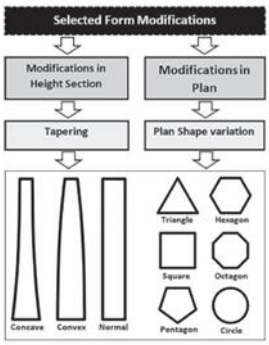
همان‌طور که گفته شد تغییرات فرم معماری در ساختمان‌های بلند اثر مهمی بر عملکرد لرزه‌ای این ساختمان دارد. این موضوع از یک‌سو بر انتخاب نوع سیستم سازه‌ای و چیدمان اجزای سازه‌ای آن اثر می‌گذارد و از سوی دیگر بر شاخص‌های رفتار لرزه‌ای از جمله بزرگی و توزیع نیروی برشی زلزله در ارتفاع ساختمان و همچنین جابه‌جایی نسبی[1] طبقات اثرگذار است [۵]. از این‌رو یکی از راهکارهای مهم در کنترل آسیب‌های لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، آگاهی از اثر فرم معماری بر عملکرد لرزه‌ای این ساختمان‌هاست.

در سال‌های گذشته پژوهش‌هایی به بررسی تأثیر متقابل تصمیمات معمار در انتخاب و طراحی فرم و پلان از یک‌سو و عملکرد لرزه‌ای ساختمان از سوی دیگر پرداخته‌اند. اردکانی و همکاران به بررسی اثر پلان‌ها با شکل هندسی چندضلعی منتظم بر شاخص‌های جابه‌جایی ماکزیمم و نسبی طبقات، زمان تناوب طبیعی و وزن واحد سیستم سازه‌ای پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که هندسهٔ پلان بر شاخص‌های جابه‌جایی ماکزیمم ساختمان و جابه‌جایی نسبی طبقات اثر کمتر و بر زمان تناوب طبیعی سازه و وزن واحد سیستم سازه‌ای اثر بیشتری دارد [۲]. در پژوهشی دیگر، همین نویسندگان افزون‌بر بررسی پلان‌ها با شکل هندسی منتظم - از سه‌ضلعی تا دایره- به بررسی اثر تغییر فرم‌های هرمی بر کارایی سیستم سازه‌ای در برابر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند نیز پرداخته‌اند [۱۶] (شکل ۳). شاخص اصلی بررسی‌شده در این پژوهش وزن واحد مساحت سیستم سازه‌ای است و نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد اضلاع پلان و استفاده از انحنای محدب و مقعر در مقطع سبب افزایش کارایی سازه می‌شود. در پژوهش‌های کاظمی و همکاران به بررسی اثر

1. Drift

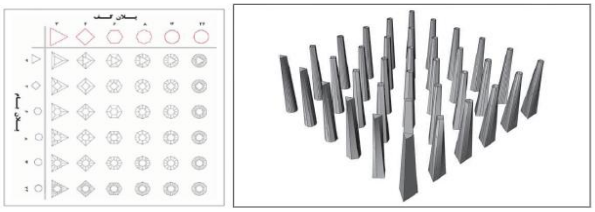
پلان‌های مختلف (از سه‌ضلعی تا بیست‌وچهارضلعی) و فرم هرمی با ارتفاع‌های ۳۰۰ متر و کمتر بر شاخص ماکزیمم جابه‌جایی جانبی[1] و وزن سیستم سازه‌ای ساختمان در برابر نیروی جانبی زلزله پرداخته شده است [۲۴، ۷] (شکل ۴). براساس نتایج این پژوهش شاخص‌های وزن کل سازه و جابه جایی بالاترین تراز در فرم‌ها با پلان کف و بام هشت و دوازده‌ضلعی دارای کمترین مقدار و در فرم با پلان کف و بام سه‌ضلعی دارای بیشترین مقدار است. در پژوهش دیگری توسط موسوی و همکاران اثر فرم‌های محدب و مقعر با میزان خمیدگی و شکل هندسی مختلف پلان بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند و سیستم سازه‌ای هگزاگرید[2] بررسی شده است [۱۱]. بنابر نتایج این پژوهش تغییر در تعداد اضلاع پلان موجب تغییر بزرگی در وزن سیستم سازه‌ای در هر دو فرم محدب و مقعر و تغییرات نیروی برش پایه تنها در فرم‌های محدب شده است. جاویدان‌نیا و همکاران نیز در چند پژوهش به بررسی چارچوبی برای بهینه‌سازی عملکرد لرزه‌ای فرم معماری ساختمان‌های بلند و بهینه‌سازی فرم هرمی و پیچشی پرداخته‌اند [۲۲، ۲۱]. برپایهٔ نتایج این پژوهش‌ها، جابه‌جایی نسبی و جابه‌جایی ماکزیمم و همچنین وزن سیستم سازه‌ای می‌توانند شاخص‌های مناسبی برای سنجش اثر فرم معماری بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند و همچنین بهینه‌سازی فرم معماری آنها در مراحل اولیهٔ طراحی باشند.

همهٔ پژوهش‌ها بر اثرگذار بودن تصمیم‌های معمار در حوزهٔ طراحی فرم بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند تأکید دارند؛ اما در هیچ‌یک از پژوهش‌های پیشین چگونگی اثر پیچش نسبی طبقات با پلان‌های مختلف بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند بررسی نشده است.



شکل ۳. تغییرات فرم و پلان‌های بررسی‌شده در پژوهش [۱۶]

1. Displacement
2. Hexagride



(ب) (الف)

شکل ۴. مدل‌های تحلیل‌شده: الف) فرم معماری Y؛ ب) پلان کف و بام [۷]

روش پژوهش

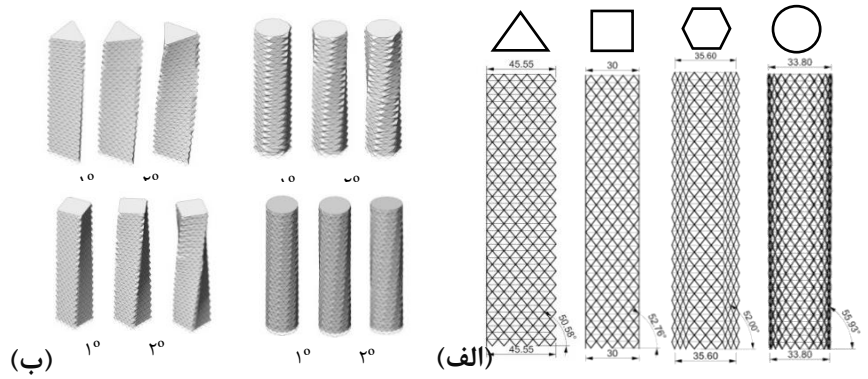
این پژوهش به بررسی قابلیت‌های فرم و پلان معماری در کاهش آسیب‌های لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای در ساختمان‌های بلند فولادی دارای سیستم سازه‌ای دیاگرید می‌پردازد. این پژوهش از نوع کمّی است که با روش مدل‌سازی و تحلیل شبیه‌سازی به‌وسیلهٔ رایانه انجام گرفت. برای این منظور ابتدا مدل‌های اولیه با پلان‌های مثلث، مربع، شش‌ضلعی و دایره با ارتفاع‌های ۱۶۰ متر، ۱۸۰ متر و ۲۰۰ متر در نرم‌افزار راینو[1] و پلاگین گراس‌هاپر[2] به شکل پارامتریک ساخته شد. سپس مدل‌های پیچشی با پیچش طبقات مدل‌های اولیه نسبت به یکدیگر به میزان ۱، ۲ و ۳ درجه ساخته شد. پس از آن، بارگذاری زلزله و طراحی سیستم سازه‌ای دیاگرید برای همهٔ مدل‌ها به‌طور مستقیم در محیط طراحی پارامتریک و با استفاده از پلاگین تحلیل المان محدود کارامبا[3] انجام گرفت. اعتبار پلاگین کارمبا برای تحلیل سازه‌ای در محیط پارامتریک در پژوهش‌های پیشین سنجیده و اثبات شده است [۷، ۲۷]. در پایان شاخص‌های سنجش عملکرد لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای ساختمان استخراج شده و با استفاده از نمودار و جدول تحلیل می‌شود. شایان ذکر است که برای طراحی ساختمان‌ها در برابر بار جانبی، قاعده بر این است که براساس بستر طراحی و شرایط بنا تنها یکی از نیروهای باد یا زلزله (هرکدام که غالب باشد) مبنای محاسبات نیروی جانبی قرار می‌گیرد. تمرکز این پژوهش بر بررسی اثر فرم‌های پیچشی بر آسیب‌های اجزای غیرسازه‌ای است. ازآنجا که ساختمان‌های بلند به‌دلیل تراکم زیاد جمعیت در همهٔ آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در دستهٔ ساختمان‌های بااهمیت بسیار زیاد قرار می‌گیرند، فارغ از آنکه کدام بار - باد یا زلزله- بار جانبی غالب طراحی باشد، همهٔ آنها در برابر زلزلهٔ سطح بهره‌برداری - زلزلهٔ خفیف با

1. Rhinoceros
2. Rhinoceros
3. Karamba3D

دورهٔ بازگشت کوتاه که به احتمال زیاد دست‌کم یک بار در طول عمر یک ساختمان (پنجاه سال) رخ می‌دهد- باید کمترین آسیب‌دیدگی اجزای غیرسازه‌ای را داشته باشند، به‌گونه‌ای که قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه داشته باشند [۱۲]. بر این اساس بارگذاری در این پژوهش براساس بار زلزله سطح بهره‌برداری انجام گرفت.

تولید فرم‌های معماری به روش پارامتریک

مدل‌های اولیهٔ فرم‌های معماری با پلان‌های مثلث، مربع، شش‌ضلعی و دایره با ارتفاع‌های ۱۶۰ متر، ۱۸۰متر و ۲۰۰ -متر تولید شده‌اند. ارتفاع طبقات چهار متر در نظر گرفته شد و به این ترتیب فرم‌ها چهل‌طبقه یا چهل‌وپنج‌طبقه یا پنجاه‌طبقه‌اند. سپس با ایجاد پیچش نسبی بین هر طبقه نسبت به طبقهٔ بالایی (یا پایینی) در هر فرم به میزان ۱، ۲ و ۳ درجه، فرم‌های پیچشی تولید شده‌اند و به این ترتیب برای هر ارتفاع، دوازده فرم و در مجموع چهل‌وهشت فرم مختلف تولید شده است (شکل ۵). به‌منظور امکان مقایسهٔ فرم‌های دارای ارتفاع و تعداد طبقات مشابه، دارای مساحت کل مشابه‌اند. برای این منظور مساحت کف همهٔ طبقات ۹۰۰ متر مربع در نظر گرفته شد و بدین ترتیب مساحت کل در فرم‌ها با تعداد طبقات ۴۰، ۴۵ و ۵۰ به‌ترتیب ۳۶۰۰۰، ۴۰۵۰۰ و ۴۵۰۰ متر مربع است. هستهٔ مرکزی فلزی با دهانه‌های مهاربندی‌شده با پلان دایره‌ای و به قطر ۱۰ متر در همهٔ نمونه‌ها ثابت بوده و در مرکز هندسی پلان‌ها قرار گرفته است.



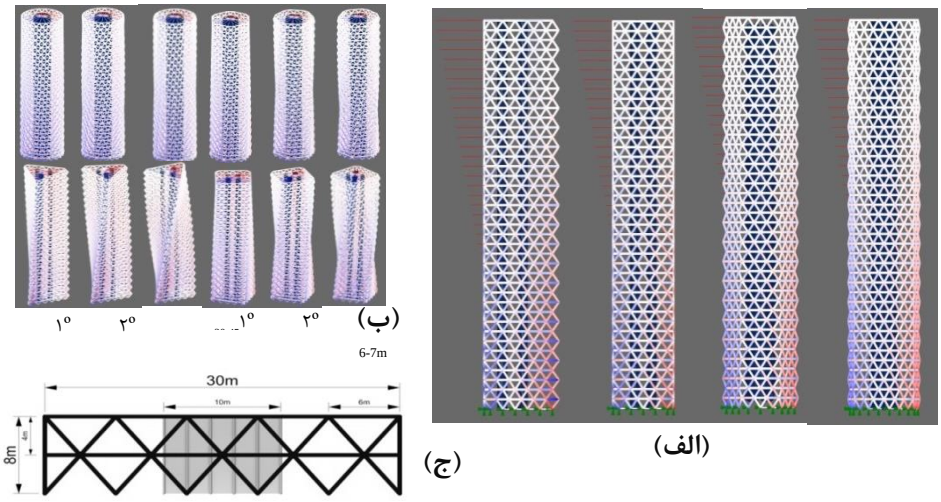
شکل ۵. نمونهٔ تولید فرم معماری با پلان‌های مختلف و درجهٔ پیچش نسبی طبقات: الف) ارتفاع ۱۶۰ متر با صفر درجه پیچش(فرم‌های اولیه)؛ ب) ۱ارتفاع ۱۶۰ متر با تا ۳ درجه (فرم‌های پیچشی)

طراحی سیستم سازه‌ای

سیستم سازه‌ای بررسی‌شده در این پژوهش سیستم دیاگرید[1] فلزی با هستهٔ مرکزی فلزی و دال بتنی کف طبقات است. به‌دلیل وجود دهانه‌های بزرگ در این فرم‌ها هستهٔ مرکزی تنها برای حمل بار ثقلی طبقات در نظر گرفته شده و دارای اتصال مفصلی با دال‌های بتنی کف طبقات است. برای دستیابی به عملکرد یکپارچهٔ ساختمان در برابر بار جانبی، هستهٔ مرکزی و سیستم دیاگرید توسط تیرهای متصل‌کننده به‌صورت شعاعی به یکدیگر متصل شده‌اند. کف طبقات نیز به‌صورت دیافراگم صلب در نظر گرفته شده است. در سازهٔ دیاگرید، ارتفاع هر مهاربندی (لوزی‌های تشکیل‌دهندهٔ سازه) به‌اندازهٔ دو طبقه است و زاویهٔ میان مهاربندها در فرم‌های اولیه با پلان‌های مختلف در محدودهٔ ۵۰ تا ۵۵ درجه قرار گرفته است. برای تعریف بار زلزله، کشور ایران و شهر تهران به‌عنوان بستر طراحی و عملکرد ساختمان اداری در نظر گرفته شد و بر این اساس مقدمات و پیشفرض‌های طراحی تعیین شد. برای تعریف بار مرده و زنده و ترکیب بار از مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان استفاده شد [۱۱]. با توجه به عملکرد اداری در نظر گرفته‌شده برای ساختمان، بارهای مرده و زنده از جدول مقادیر در آیین‌نامهٔ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان بارهای ۵۵۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر متر مربع استخراج شده و ترکیب بارها منطبق بر فرضیات طراحی در نظر گرفته شده است. در موضوع مقادیر پیشفرض زلزله و تعریف نیروی جانبی زلزله و توزیع آن در ارتفاع ساختمان آیین‌نامهٔ لرزه‌ای ایران استاندارد ۲۸۰۰ مبنا قرار گرفته است [۱۲]. براساس آیین‌نامهٔ لرزه‌ای ایران، بارگذاری لرزه‌ای ساختمان‌های منظم با ارتفاع بیشتر از ۵۰ متر باید با روش بارگذاری دینامیکی انجام گیرد، اما هدف این پژوهش تخمین اولیهٔ اثر تصمیمات معمار در حوزهٔ فرم بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند در مراحل اولیهٔ طراحی معماری و تمرکز آن بر آسیب‌های اجزای غیرسازه‌ای معماری است. تحلیل دینامیکی برای مراحل اولیهٔ طراحی معماری و به‌منظور بررسی تعداد زیادی از جایگزین‌های فرمی از نظر زمانی و پیچیدگی‌های طراحی مناسب نیست. از این‌رو با پذیرش اینکه نتایج تحلیلی این پژوهش از ملاحظات سازه‌ای و دقت کمتری نسبت به تحلیلی دینامیکی برخوردار است و نمی‌تواند مبنای دقیقی برای طراحی اعضای سازه‌ای در ساختمان‌های بلند باشد، مشابه با دیگر پژوهش‌های انجام‌گرفته با این رویکرد [۲۳-۲۱، ۷]، بارگذاری به‌صورت استاتیکی و براساس زلزلهٔ سطح بهره‌برداری براساس آیین‌نامهٔ لرزه‌ای ایران انجام گرفت و واکنش ساختمان به بار لرزه‌ای در محدودهٔ خطی در نظر گرفته شد. برای اطمینان از روند یکسان طراحی در

1. Diagrid

همهٔ مدل‌ها و اعتبار مقایسه، نسبت تنش موجود به ظرفیت تنش حداکثری[1] در همهٔ مدل‌ها تا ۰/۷ محدود شده است. برای طراحی سیستم سازه‌ای براساس پیشفرض‌های گفته‌شده، ابتدا طیفی از مقاطع کلی تعیین شدند که برای ستون‌ها و تیرها در هستهٔ مرکزی پروفیل‌های با مقاطع بال پهن[2] و برای سیستم دیاگرید مقاطع لوله‌ای با قطر ۵۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲ تا ۸ سانتی‌متر تعریف شد. کف طبقات دال بتنی با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و به‌صورت دیافراگم صلب[3] در نظر گرفته شد. سپس با محدود کردن جابه‌جایی نسبی بین طبقات کمتر از مقدار مجاز در آیین‌نامه (کمتر از ۰/۰۲ ارتفاع طبقه)، توسط افزونهٔ طراحی المان محدود کارامبا به روش مقطع خودکار[4] به اجزا نسبت داده شد [۳۱]. زمین بستر با خاک نوع ۲، ضریب اهمیت ساختمان برابر با ۱ و نسبت شتاب مبنای طرح برابر با ۰/۳۵ شتاب گرانش (g) تعریف‌شده است. ضریب رفتار براساس پژوهش‌های قبلی برای سازهٔ دیاگرید۱[۲] برابر با ۵ در نظر گرفته شد (شکل ۶).



شکل ۶. نمونهٔ تحلیل فرم در کارمبا: الف) ارتفاع ۱۶۰ متر با صفر درجه پیچش؛ ب) ارتفاع ۱۶۰ متر با ۱ تا ۳ درجه پیچش؛ ج) تیپ قرارگیری هستهٔ مرکزی و دهانه‌های مدول دیاگرید.

1. Stress Ratio
2. IPE
3. Rigid Diaphragm
4. Auto-select

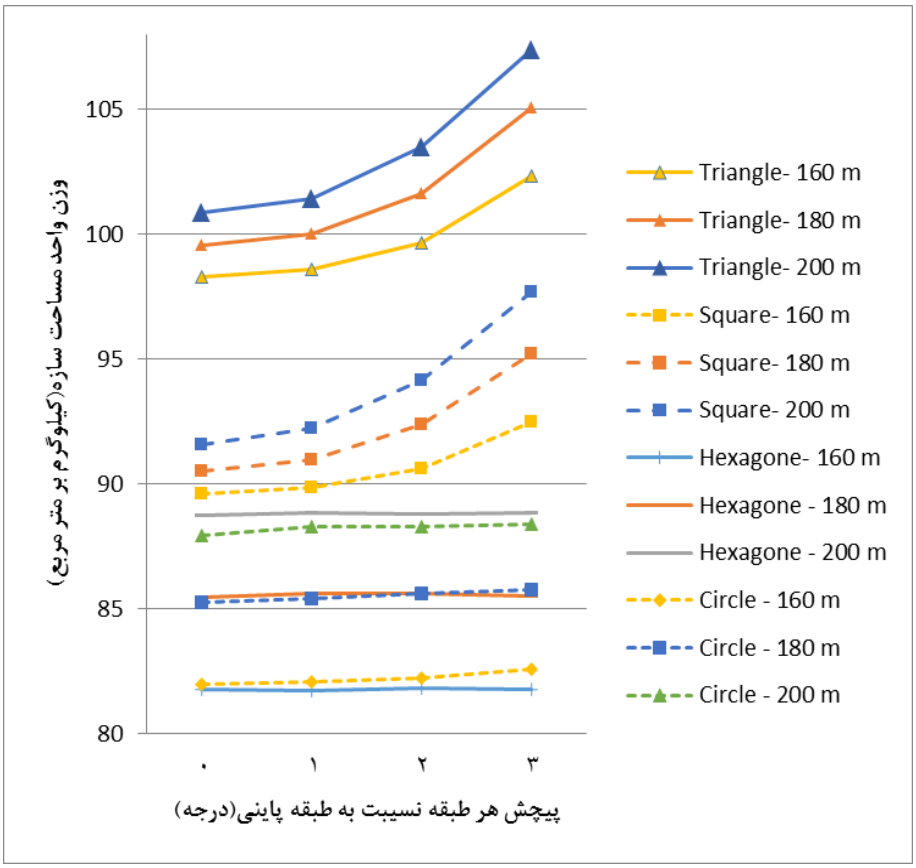
یافته‌ها و تحلیل نتایج

سیستم سازه‌ای دیاگرید برای همهٔ مدل‌ها با استفاده از پیشفرض‌های معماری و سازه‌ای بیان شده در بخش‌های پیشین، طراحی و نتایج آن به شکل جدول و نمودار استخراج شده است. براساس پژوهش‌های پیشین، شاخص‌های جابه‌جایی نسبی طبقات (دریفت) و حداکثر جابه‌جایی جانبی ساختمان از عوامل مهم و اثرگذار بر آسیب‌های اجزای غیرسازه‌ای در ساختمان‌ها به‌ویژه ساختمان‌های بلند هستند [۲۵، ۱]. به بیان دیگر، افزایش دریفت و جابه‌جایی جانبی ساختمان موجب افزایش احتمال آسیب به اجزای غیرسازه‌ای می‌شود. افزون بر این در بیشتر پژوهش‌های پیشین، شاخص وزن واحد مساحت سازه به‌منزلهٔ مهم‌ترین شاخص برای انتخاب مدل‌های بهینه و برای تحلیل چگونگی اثر فرم معماری ساختمان بر کارایی سیستم سازه‌ای استفاده شده است. در ادامه اثر پیچش در فرم معماری بر سه شاخص ذکرشده بررسی می‌شود. با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی اثر تغییرات فرم معماری پیچشی بر آسیب‌پذیری اجزای غیرسازه‌ای ساختمان است، مدل‌های دارای کمترین مقادیر در همهٔ شاخص‌های ذکرشده فرم‌های بهینه‌اند که احتمال آسیب به اجزای سازه‌ای آنها در هنگام وقوع زلزله سطح بهره‌برداری کمتر است.

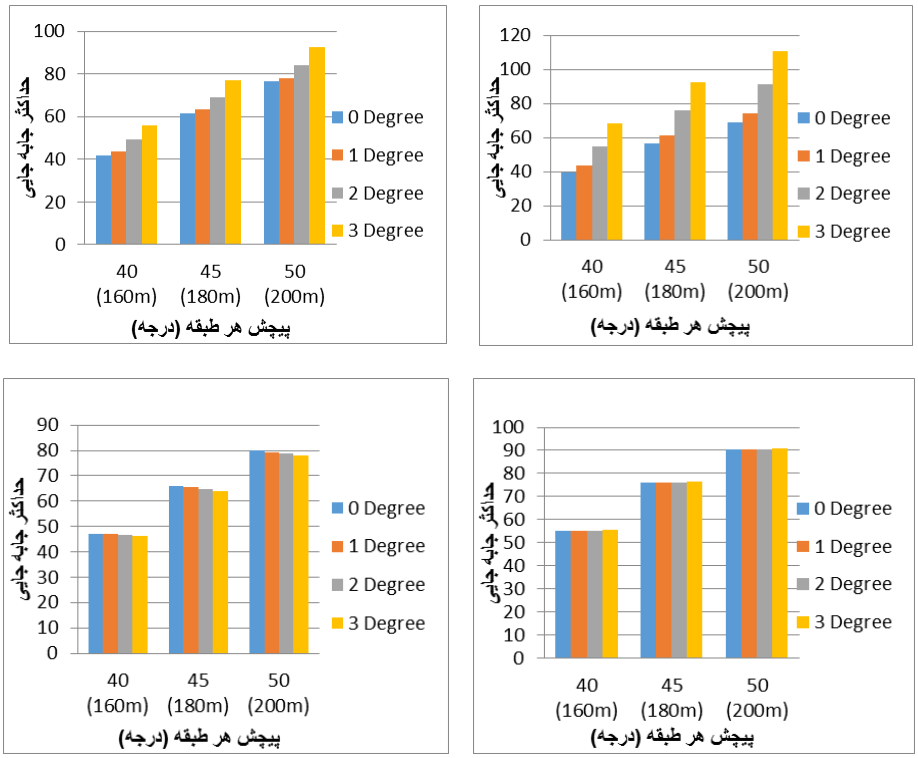
شکل ۷ نشان‌دهندهٔ تغییرات وزن واحد مساحت سازهٔ دیاگرید براساس درجهٔ پیچش نسبی طبقات در هر ۴۸ فرم تولیدشده است. براساس این نمودار، بیشترین وزن واحد مساحت سازه‌ای در همهٔ ارتفاع‌ها را فرم‌های با پلان مثلثی و کمترین وزن را فرم‌های با پلان شش‌ضلعی دارند. از سوی دیگر با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع ساختمان، وزن واحد مساحت سازه به‌منظور تأمین پایداری سازه‌ای افزایش می‌یابد، هرچند شدت این افزایش در فرم‌های با پلان‌های مختلف متفاوت است. افزون‌بر این، با افزایش درجهٔ پیچش نسبی طبقات، فرم‌های دارای پلان مثلثی و مربعی دستخوش افزایش شدید در بزرگی وزن واحد مساحت سازه شده است، درحالی که تغییرات این شاخص در فرم‌های دارای پلان دایره‌ای و شش‌ضلعی ناچیز است.

دیگر شاخص مهم حداکثر جابه‌جایی جانبی است که برای همهٔ فرم‌های تولیدشده در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر جابه‌جایی برای پیچش نسبی طبقات برحسب درجه (از صفر تا ۳ درجه) برای فرم‌های با پلان مثلثی و مربعی با افزایش سهمی‌وار همراه است که نشان‌دهندهٔ وابستگی شدید جابه‌جایی کل و پیچش نسبی طبقات است. همچنین جابه‌جایی کل متناظر برای هر درجه از پیچش نسبی با افزایش ارتفاع طبقات بیشتر می‌شود. در فرم‌های با پلان شش ضلعی، تغییری در مقادیر جابه‌جایی کل با تغییرات پیچش نسبی طبقه مشاهده نشده و مقادیر

تقریباً ثابت‌اند، هرچند همچنان با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع کل مقدار جابه‌جایی افزایش می‌یابد. در فرم‌های با پلان دایره‌ای رابطهٔ عکس برای جابه‌جایی کل با پیچش نسبی طبقات مشاهده می‌شود؛ یعنی با افزایش پیچش نسبی طبقات از صفر درجه تا ۳ درجه مقادیر جابه‌جایی کل کاهش می‌یابد. در این فرم‌ها نیز با افزایش ارتفاع کل، مقدار جابه‌جایی کل افزایش می‌یابد.



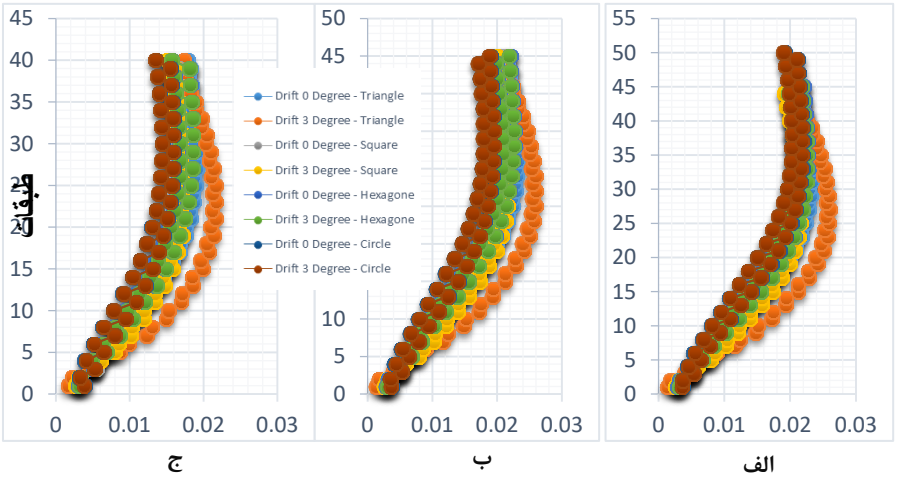
شکل ۷. تغییرات شاخص وزن واحد مساحت سیستم سازه‌ای دیاگرید در فرم‌های دارای پلان‌های مختلف براساس پیچش هر طبقه نسبت به طبقهٔ‌پایین



شکل ۸. حداکثر جابه‌جایی جانبی در فرم‌های پیچشی با پلان الف) مثلث؛ ب) مربع؛ ج) شش‌ضلعی؛ د) دایره.

جابه‌جایی‌های نسبی طبقات در ارتفاع (دریفت) به‌عنوان دیگر شاخص مهم در آسیب‌پذیری اجزای غیرسازه‌ای، در فرم‌های تولیدشده بررسی شده است. دریفت فرم‌های با پلان مثلث، مربع، شش‌ضلعی و دایره برای مقادیر پیچش نسبی طبقات صفر درجه و ۳ درجه در نمودارهای تجمیع‌شده در شکل ۹ نشان داده شده است. همانند شاخص‌های بررسی‌شدهٔ قبلی، مشاهده می‌شود که مقادیر دریفت برای هر یک از شکل‌های پلان با افزایش ارتفاع و تعداد طبقات افزایش دارد. با تحلیل نمودارها مشاهده می‌شود که در فرم‌های با پلان مثلثی و مربعی با پیچش نسبی طبقات از صفر درجه به ۳ درجه، مقدار دریفت در طبقات افزایش می‌یابد. افزون بر این، اختلاف دریفت در فرم‌ها با پیچش نسبی ۳ درجه در مقایسه با فرم‌ها با پیچش نسبی صفر درجه، به‌صورت سهمی‌وار در ارتفاع ساختمان توزیع می‌یابد و در طبقات میانی به بیشترین حد خود می‌رسد. در فرم‌های با پلان شش‌ضلعی و دایره‌ای مشاهده می‌شود که

دریفت با پیچش نسبی طبقات از صفر تا ۳ درجه تغییر چندانی ندارد و نمودار دریفت در فرم‌های با پیچش صفر درجه و ۳ درجه بر یکدیگر منطبق شده‌اند.



شکل ۹. دریفت طبقات در همه پلان‌ها و فرم‌ها با پیچش صفر و ۳ درجه بر حسب متر با ارتفاع الف)۲۰۰ متر، ب)۱۸۰ متر، ج)۱۶۰ متر

نتیجه

یکی از موضوعات مهم در کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌های بلند در برابر زلزله، توجه به آسیب‌های اجزای غیرسازه‌ای هستند. این ساختمان‌ها دارای حجم زیادی از اجزای غیرسازه‌ای شامل تجهیزات، تأسیسات و اجزای معماری هستند که هرگونه آسیب به این اجزا، اعم از ناپایداری، فروریزش یا حتی خارج شدن از سرویس‌دهی می‌تواند نیاز به مدیریت بحران و خدمت‌رسانی فوق‌العاده را به شهر تحمیل کند. در پژوهش‌های پیشین اثر فرم‌های هرمی، محدب و مقعر با پلان‌ها با تعداد اضلاع مختلف بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند بررسی شده است. این پژوهش به بررسی اثر فرم‌های پیچشی با پلان‌های مختلف شکل هندسی چندضلعی منتظم بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند در برابر بار زلزله پرداخته است. ازآنجا که امروزه استفاده از فرم‌های پیچشی در ساخت ساختمان‌های بلند به‌منظور طراحی بناهایی خاص و هویت‌بخشی به شهر و منطقه رایج است، هدف این پژوهش بررسی اثر پیچش در فرم معماری بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند است. ازآنجا که تمرکز این پژوهش بر کاهش آسیب به اجزای غیرسازه‌ای در هنگام وقوع زلزله است، شاخص‌های سنجش عملکرد لرزه‌ای

دریفت، جابه‌جایی جانبی و وزن واحد مساحت سازه در نظر گرفته شده است. براساس مشاهدات حاصل از نمودارها می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

- با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع، بزرگی مقادیر هر سه شاخص دریفت، جابه‌جایی جانبی و وزن واحد مساحت سازه در همهٔ فرم‌ها افزایش می‌یابد، اما شدت و مقدار این افزایش در فرم‌های با پلان مثلث بیشترین و در فرم‌های با پلان دایره‌ای و شش‌ضلعی کمترین مقدار را داشته است؛
- با افزایش درجهٔ پیچش نسبی طبقات برحسب درجه (از صفر تا ۳ درجه)، فرم‌های با پلان مثلثی و مربعی دستخوش افزایش شدید در شاخص وزن واحد مساحت سازه شده‌اند درحالی که تغییرات این شاخص در فرم‌های با پلان دایره‌ای و شش‌ضلعی ناچیز است؛
- با افزایش پیچش نسبی طبقات برحسب درجه (از صفر تا ۳ درجه)، شاخص جابه‌جایی جانبی در فرم‌های با پلان مثلثی و مربعی با افزایش سهمی‌وار همراه است که نشان دهندهٔ وابستگی شدید جابه‌جایی کل و پیچش نسبی طبقات در این دسته از فرم‌هاست. در فرم‌های با پلان شش‌ضلعی، تغییری در مقادیر جابه‌جایی کل با تغییرات پیچش نسبی طبقه مشاهده نمی‌شود و مقادیر به‌طور تقریبی ثابت‌اند؛
- با افزایش پیچش نسبی طبقات برحسب درجه (از صفر تا ۳ درجه)، در فرم‌های با پلان مثلثی و مربعی مقدار دریفت در طبقات افزایش می‌یابد. افزون‌بر این، اختلاف دریفت در فرم‌ها با پیچش نسبی ۳ درجه در مقایسه با فرم‌های دارای پیچش نسبی صفر درجه، به‌صورت سهمی‌وار در ارتفاع ساختمان توزیع می‌یابد و در طبقات میانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در مقابل در فرم‌ها با پلان شش‌ضلعی و دایره‌ای مشاهده می‌شود که دریفت با پیچش نسبی طبقات از صفر تا ۳ درجه تغییر چندانی ندارد و نمودار دریفت در فرم‌های با پیچش صفر و ۳ درجه بر یکدیگر منطبق شده‌اند

نتایج نشان می‌دهد که در سازهٔ دیاگرید با مصالح فولادی در ارتفاع‌ها و پلان‌های بررسی شده در این پژوهش، پیچش طبقات در ارتفاع موجب افزایش دریفت، جابه‌جایی جانبی و وزن واحد مساحت سازه در فرم‌ها با پلان سه‌ضلعی و چهارضلعی شده است. در نتیجه انتخاب این دسته از پلان‌ها برای فرم‌های پیچشی می‌تواند موجب کاهش پایداری جانبی ساختمان‌های بلند و افزایش احتمال آسیب به اجزای غیرسازه‌ای در هنگام وقوع زلزله شود. هرچند با افزایش

تعداد اضلاع پلان (فرم‌های با پلان‌های دایره‌ای و شش‌ضلعی) می‌توان از ایجاد اثرهای نامطلوب پیچش جلوگیری کرد و ساختمان‌های بلند بهینه‌ای از دیدگاه لرزه‌ای طراحی کرد.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه تربیت مدرس تهیه شده است که بدین وسیله از حمایت آنها تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

[۱]. ابوالوردی (جاویدان‌نیا)، غزل. (۱۳۸۹). طراحی الگوی مسکن پایدار لرزه‌ای در بافت کهن تهران، پایان‌نامهٔ ارشد به راهنمایی دکتر محمدجواد مهدوی‌نژاد. تهران: دانشگاه تربیت مدرس.

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

[۳]. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی. (۲۰۲۰/۵/۱۲)، لرزه‌خیزی ایران. بازیابی در ۱۴۰۰/۳/۹، از http://www.iiees.ac.ir/fa/2012-09-24-08-01-17/

[۴]. پیری‌زاده؛ محبوبه؛ و شکیب؛ حمزه (۱۳۹۴). «الزامات بلندمرتبه‌سازی و میان‌مرتبه سازی از منظر مدیریت کاهش خطرپذیری لرزه‌ای»، هفتمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ص ۱۰-۱.

[۵]. چارلسون، اندرو (۱۳۹۰). *طراحی لرزه‌ای برای معماران*، ترجمهٔ محمود گلابچی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[۶]. شورای عالی شهرسازی و معماری ایران. (۱۳۹۸). ضوابط عام بلندمرتبه‌سازی. بازیابی در ۱۴۰۱/۶/۱۳، از https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1251426

[۷]. کاظمی سنگدهی، سید پویان؛ افغانی خوراسکانی، رهام؛ و تحمیلدوست، محمد (۱۳۹۹). «بررسی تأثیر هندسهٔ پلان ساختمان‌های بلند با سازهٔ دایاگرید بر رفتار سازه‌ای آنها در برابر بار جانبی زلزله»، *صفه*، دورهٔ ۳۰، شمارهٔ ۱، ص ۵۸-۴۳.

[۸]. گلابچی، محمود (۱۳۹۱). *مبانی طراحی ساختمان‌های بلند*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[۹]. محمودی صالحی، موسی؛ و محمودی صالحی، فرید. (۱۳۹۲). *فلسفهٔ طراحی لرزه‌ای براساس عملکرد*، تهران: انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

[۱۰]. مختاری موسوی، سید آیسن؛ اخلاصی، احمد؛ حسینی، محمود؛ و تقدیری، علیرضا (۱۴۰۰). «بررسی تأثیر هندسهٔ پلان و انحنای بدنهٔ ساختمان بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند دارای سازهٔ هگزاگرید»، مدیریت مخاطرات محیطی، دورهٔ ۸، شمارهٔ ۱، ص ۴۷-۳۱.

[۱۱]. مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی (الف). (۱۳۹۴). مبحث ششم. تهران: مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی.

[۱۲]. مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی (ب). (۱۳۹۴). آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰. تهران: مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی.

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

[۱۴]. نوری‌فر، آزاده؛ و مهدی‌زاده سراج، فاطمه (۱۳۹۷). «نقش معماران بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های میان مرتبهٔ متعارف با بهره‌گیری از تجارب زلزله‌های گذشته»، *نقش‌جهان*، سال ۸، شمارهٔ ۱، ص ۴۴-۳۶.

[15]. Arnold, C. (2006). *Designing for Earthqake; A Mannual for Architects*, pp: 1-53. FEMA.

[16]. Ardekani, A.; Dabbagh, I.; Alaghmandan, M; & Golabchi, M. (2019). "Parametric design of diagrid tall buildings regarding structural efficiency", *Architectural Science Review*, 63(4), pp: 1-16

[17]. Elnimier, M.; & Almusharaf, A. (2012). "Structure and Architecture Form of Tall Buildings, International Conference on Sustainable Building Asia p. 5461. Seoul, Korea: ICSBA.

[18]. FEMA-454. (2006). *Designing for Earthquake; A Manual for Architects. California*, LA.: FEMA.

[19]. Golasz, H.; & Szolomicki, J. (2019). "Architectural and Structural Analysis of Selected Twisted Tall Buildings", *Materials Science and Engineering*, *IOP*.

[20]. Hameed Hussein, S.; & Safa Hussain, M. (2017). "The Strategies of Architectural Design Resisting Earthquake in Tall Buildings", *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, pp: 436-445.

[21]. Javidannia (Abolvardi), G.; Bemanian, M.; & Mahdavinejda, M. (2021). "Generative Design Workflow for Seismic-Efficient Architectural Design of Tall Buildings; A Multi-object Optimization approach", *SIMAud*, pp: 1-8(

[22]. Javidannia (Abolvardi), G.; Bemanian, M.; & Mohammadjavad, M. (2020). "Performance Oriented Design Framework for Early Tall building form Development", *eCAADe38*, pp: 144-154, Berline,Germany: eCAADe.

[23]. Khoraskani, R. A. (2018). "Adaptation of Hyperboloid Structure for High-Rise Buildings with Exoskeleton", *S.Arch*, pp: 1-10. Venic, Italy.

[24]. Kazemi, P.; Afghani Khoraskani, R.; & Tahsildoost, M. (2018). "Structural Efficiency of Tall Buildings: by Means of Parametric Design", CTBUH.

[25]. Mahdavinejad, M.; Bemanian, M.; & Abolvardi (Javidannia), G. (2012). "Analyzing the state of seismic consideration of architectural non-structural components (ANSCs) in design process (based on IBC)", *International Journal of Disaster Resilience in Built Environment*, pp: 133-147.

[26]. Mahdavinejad, M.; Bemanian, M.; & Abolvardi (Javidannia), G. (2011). "Explaining the State of Seismic Consideration of Architectural Non-structural Components in Design Process Case Study: Bam Earthquake", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, pp: 119-126.

[27]. Maenpaa, J. (2018). *Algorithm-Aided Structural Engineering of Steel-framed Warehouse*. Tampere University of Technoigy,.

[28]. Moon, k. S. (2011). Diagrid Structure for Complex-Shaped Tall Buildings. the twelfth east Asia-pacific conference on structural Engineering and Construction, pp: 1343-1350, Hong Kong: Elsivier.

[29]. Mirnizmandan, S.; Alghmandan, M.; & Barazandeh, F. (2018). "Mutual effect of geometric modifications and diagrid structure on structural optimization of tall buildings", *Architectural Science Review*, pp: 1-13.

[30]. Park, S.; Elnimeiri, M.; Sharpe, D. C.; & Krawczyk, R. J. (2004). Tall Building Form Generation by Parametric Design Process. CTBUH 4th World Conference pp: 1-7. Seoul: CTBUH.

[31]. Preisinger, C. (2015). *Karamba_User_Manual. Karamba*.

[32]. Shakib, H.; Dardaei, S.; & Pirzad, M. (2011). "A Proposed Seismic Risk Reduction Program for the Mega City of Tehran, Iran", *Journal of Natural Hazard Review*, pp: 140-146.

[33]. Vollers, K. (2008). "Morphological Scheme of second-generation non-orthogonal high-rises. CTBUH 8th World Congress", pp: 1-9. Dubai: CTBUH.