مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)/ دورهٔ ۸، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۰/ ص ۴۷-۳۱
DOI: 10.22059/jhsci.2021.316822.620

بررسی تأثیر هندسهٔ پلان و انحنای بدنهٔ ساختمان بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند دارای سازهٔ هگزاگرید

سیده آیسن مختاری موسوی (aisan.moosavi@gmail.com)
پژوهشگر دورهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ معماری، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
احمد اخلاصی*
دانشیار دانشکدهٔ معماری، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
محمود حسینی (hosseini@iiees.ac.ir)
دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
علیرضا تقدیری (ataghdiri@riau.ac.ir)
استادیار دانشکدهٔ معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸- تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۳۰)

چکیده

شکل هندسی ساختمان، چه در پلان و چه در ارتفاع بر رفتار لرزه‌ای آن تأثیرگذار است. از سوی دیگر فرم بنا از منظر مسائل زیبایی‌شناختی و عملکرد ساختمان در معماری دارای اهمیت بسیار است. اگر بتوان فرم بنا را به‌گونه‌ای طراحی کرد که هم پاسخگوی ویژگی‌های معماری بنا باشد و هم از منظر رفتار لرزه‌ای عملکرد مطلوب‌تری را ارائه دهد، هر دو هدف یادشده همزمان تحقق خواهند یافت. تا کنون کمتر به تأثیر شکل هندسی ساختمان در پلان و بدنه بر رفتار لرزه‌ای آن پرداخته شده است. بنابراین در این مقاله سعی شد علاوه‌بر در نظر گرفتن محدودیت‌های معماری همچون مساحت هستهٔ مرکزی و طبقات، ارتفاع بنا، پلان آزاد و عمق نور مناسب در طبقات، با در نظر گرفتن فرم‌های خاص در ارتفاع و پلان ساختمان، به بررسی رفتار لرزه‌ای آن پرداخته شود تا به فرم‌های مناسبی دست یافت که علاوه‌بر تأمین نیازهای معماری و سازه‌ای بنا، موجب اقتصادی شدن طراحی شوند. برای این منظور ساختمان‌های ۷۰ طبقه با سازهٔ هگزاگرید با سه شکل دایره، پنج‌ضلعی و مثلث برای پلان و سه فرم استوانه‌ای، محدب و مقعر در ارتفاع، با سطح زیربنای کل یکسان بررسی شدند. پژوهش از نوع کمّی است و مدل‌سازی فرم‌ها با استفاده از نرم‌افزار راینو و تحلیل مدل‌های سازه‌ای در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ صورت گرفته است. براساس نتایج می‌توان گفت با کاهش تعداد اضلاع پلان در بدنه‌های محدب، وزن کل حدود ۱۱ درصد و برش پایه حدود ۱۰ درصد کاهش یافت، درحالی که با افزایش تعداد اضلاع پلان در بدنه‌های مقعر، از وزن کل حدود ۵ درصد کاسته شد و مقدار برش پایه با افزایش یا کاهش تعداد اضلاع پلان، دچار تفاوت محسوسی نشد.

واژه‌های کلیدی: آسمان‌خراش، فرم‌یابی، هگزاگرید، تحلیل سازه، مخاطرات طبیعی.

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۱۰۵۰۵۲۸
Email: ekhlasi@ iust.ac.ir

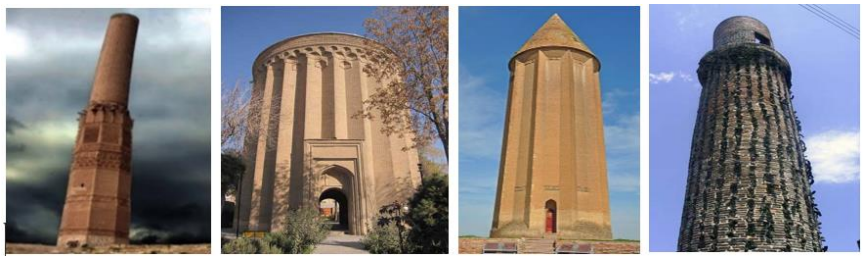
مقدمه

ایران از جمله کشورهای بسیار زلزله‌خیز جهان است که سالانه بیشترین قربانیان حادثهٔ زلزله را به خود اختصاص می‌دهد. به همین دلیل، موضوع پیش‌بینی خطر زلزله و اتخاذ تمهیداتی برای کاهش آسیب‌پذیری بناها از اولویت‌های معماران و مهندسان است [۸]. در این میان بناهای بلند با توجه به وسعت زیربنا، اسکان جمعیت زیاد، تأثیر بر محیط پیرامون و ویژگی‌های خاص سازه‌ای از اهمیت بیشتری در کاهش آسیب‌پذیری برخوردارند. [۱] با وجود راهکارهای گوناگون به‌منظور کاهش خسارات، مانند استفاده از میراگرهای لرزه‌ای در ساختمان، افزایش مصالح در بعضی از عناصر سازه‌ای، انتخاب سایت مناسب و غیره به نظر می‌رسد استفاده از ظرفیت‌های فرم معماری در زمینهٔ افزایش کارایی سازه‌ای و پایداری ساختمان‌های بلند پاسخی مناسب به این موضوع است [۷]. بر این اساس بهره‌گیری از امکانات فرمی، چه در طراحی مقطع و چه در طراحی پلان، می‌تواند در کاهش هزینه‌های سازه‌ای و بهینه‌سازی ساختمان تأثیرگذار باشد.

این پژوهش با در نظر گرفتن جنبه‌های زیبایی‌شناختی معمارانه و استحکام سازه‌ای مناسب، به بررسی قابلیت‌های فرم معماری به‌منظور کاهش خسارات ناشی از زلزله بر ساختمان‌های بلند فولادی دارای سیستم هگزاگرید می‌پردازد. در ابتدا از محاسبات ریاضی برای به‌دست آوردن انحنای مناسب استفاده شد. سپس مدل‌سازی فرم‌ها در نرم‌افزار راینو[1] و پلاگین گرس‌هاپر[2] صورت گرفت و مدل‌های آماده‌شده برای اجرای فرایند تحلیل سازه‌ای وارد نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰[3] شدند [۲۴]. سپس برمبنای نتایج نرم‌افزار SAP، رفتار مدل‌ها مقایسه و نتیجهٔ نهایی بیان شد. با توجه به قرارگیری سایت در منطقهٔ زلزله‌خیز ایران، شهر تهران و شرایط بستر طراحی، تنها یکی از نیروهای باد یا زلزله مبنای محاسبات نیروی جانبی قرار می‌گیرد [۳]. با تحلیل‌های صورت‌گرفته ضروری دانسته شد که بار غالب در روند طراحی بار زلزله در نظر گرفته شود [۸]. گرچه تأثیر نیروی باد بر سازه کنترل شده است.

در ایران ساخت مناره به‌عنوان برج در کنارهٔ راه، برای روشن کردن چراغ و راهنمایی کاربرد داشته است. نمونه‌هایی از آن در شکل ۱ دیده می‌شود.

1. Rhinoceros
2. Grasshopper
3. SAP 2000

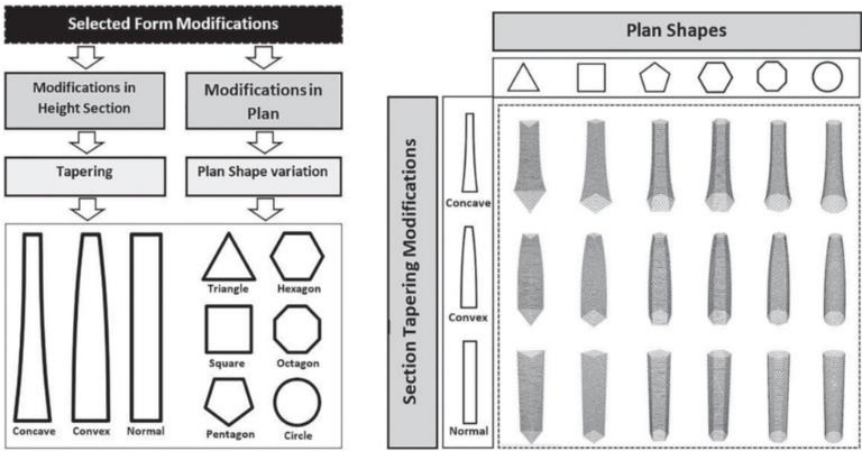


الف ب ج د

شکل ۱. الف) منارهٔ شمس، ب) گنبد قابوس، ج) برج طغرل، د) برج کرات [۷].

طراحی و ساخت ساختمان‌های بلند در دوران معاصر از یک‌سو به‌دلیل گسترش جمعیت در شهرهای بزرگ، و از سوی دیگر به‌دلیل کمبود و گرانی زمین به‌ویژه در برخی از مناطق مرکزی و مهم شهرها آغاز شد [۷]. با گذشت زمان و پیشرفت فناوری، معماری ساختمان‌های بلند تکامل یافت و به مفاهیم جدیدی مانند پایداری، کاهش هزینهٔ ساخت، چگونگی عملکرد آنها در برابر مخاطرات طبیعی و غیره معطوف شد [۶]. هندسهٔ پلان و سطح مقطع ساختمان دو پارامتر مهم‌اند که معماران، بیشتر برای برآوردن نیازهای مورد نظر خود از آنها استفاده می‌کنند [۸]. شولر در کتاب *سازهٔ ساختمان‌های بلند* به بررسی تأثیر فرم بر کارایی سازه‌ای ساختمان‌های بلند می‌پردازد. او انتخاب فرمی را که از لحاظ سازه‌ای پربازده باشد، یکی از روش‌های مهم کنترل تغییر مکان جانبی ساختمان می‌داند، چراکه فرم‌های ساختمانی دیگری (غیر از مستطیلی) وجود دارند که در مقابل نیروهای جانبی واکنش کمتری نشان می‌دهند. این‌گونه فرم‌ها در اثر شکل هندسی خاص خود مقاومت بیشتری دارند و بازده سازه‌ای زیادتری ایجاد می‌کنند [۷].

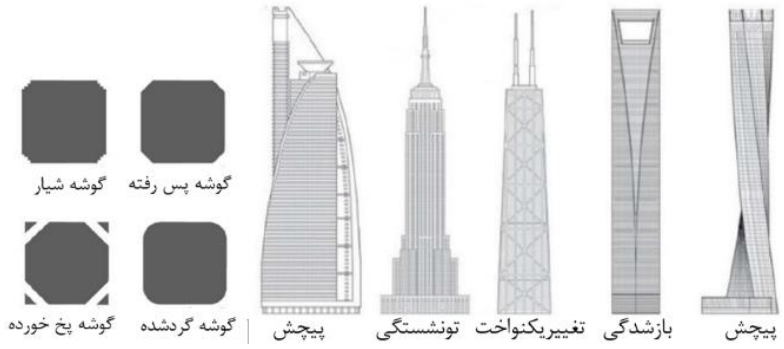
به‌تازگی اردکانی و همکاران تحقیقی دربارهٔ تأثیر فرم ساختمان‌های بلند بر عملکرد سازه‌ای آنها براساس فرایند پارامتریک داشتند. در آن پژوهش بار زلزله به‌عنوان بار جانبی غالب ساختمانی ۴۰ طبقه به ابعاد ۳۰×۳۰ متر با سازهٔ دایاگرید در نظر گرفته شد. مقطع کلی مدل‌های به‌کاررفته در آن پژوهش مخروطی بود که به‌صورت مدل‌های بدون انحنا، محدب و مقعر در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ تحلیل شد. (شکل ۲).



ب الف

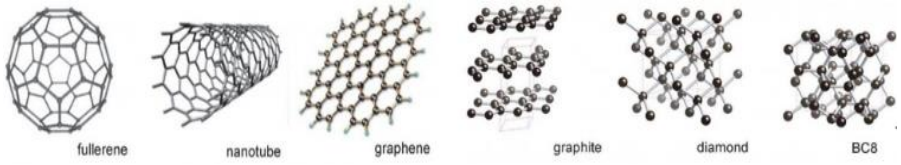
شکل ۲. الف) مدل‌های نهایی تحلیل‌شده در نرم‌افزار، ب) تغییر مدل‌های انتخاب‌شده [۱۱].

در آن پژوهش که وزن سازه، پارامتر اصلی در نظر گرفته شد، مشخص شد که افزایش تعداد اضلاع در پلان و استفاده از انحنای مقعر و محدب در مقطع، سبب افزایش کارایی سازه می‌شود [۱۱]. در پژوهشی دیگر توسط علاقمندان و همکاران، عوامل تأثیرگذار در ساختمان‌های بلند به عوامل کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس تقسیم شد. شکل ۳ نشان می‌دهد که این عوامل چگونه می‌توانند فرم ساختمان‌های بلند را کارامدتر کنند و ظرفیت بیشتری را برای مقاومت در برابر بارهای جانبی فراهم آورند [۹،۱۰].



شکل ۳. انواع تغییرات کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس در ساختمان‌های بلند [۹]

یکی از انواع سیستم‌های کارامد در حوزهٔ ساختمان‌های بلندمرتبه، سیستم هگزاگرید[1] است که در سال‌های اخیر به آن پرداخته شده است. این سیستم با توجه به شکل هندسی خاص خود می‌تواند علاوه‌بر پایداری در برابر بارهای جانبی، مقدار فولاد مصرفی در سازه را تا حد زیادی کاهش دهد [۱۲]. توماس‌سی‌هالز ریاضی‌دان معتقد است که شبکهٔ شش‌ضلعی بهترین روش برای تقسیم یک سطح به مناطق مساوی با حداقل محیط است [۲۷]. این ساختار در چارچوب علم مهندسی مواد، میکرومکانیک‌ها در دهه‌های گذشته بررسی شده است. برای مثال ساختار نانوتیوب‌ها، فولرن‌ها، گرافن و غیره را می‌توان زیرمجموعهٔ این سیستم کارامد در طبیعت دانست که در شکل ۴، حالت سه‌بعدی این عناصر نشان داده شده است [۲۷،۱۵].



شکل ۴. ساختار سه‌بعدی گرافن، نانولوله، فولرن [۱۴]

سازه‌های هگزاگرید در ساختمان‌های بلند

سیستم سازه‌ای هگزاگرید از پربازده‌ترین سیستم‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلند است که در سال‌های اخیر مورد توجه معماران و مهندسان قرار گرفته است. از مزایای این سیستم می‌توان به ایجاد فضای داخلی عاری از ستون، استفاده از اتصالات مشابه، کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مصالح به نسبت سیستم‌های مشابه، ویژگی زیبایی‌شناختی معمارانه، توانایی توزیع مجدد بار نسبت به سیستم‌های متداول، استفاده از المان‌ها و قطعات پیش‌ساخته و مدولار در فرایند ساخت، و نیاز نداشتن به فونداسیون قطور اشاره کرد [۲۲]. از جمله بناهای دارای این سیستم، پروژهٔ باغ بهشت انگلیس، برج‌های دوقلوی البحار در ابوظبی و مکعب آبی در چین است که در شکل ۵ نشان داده شده است.

1. Hexagrid

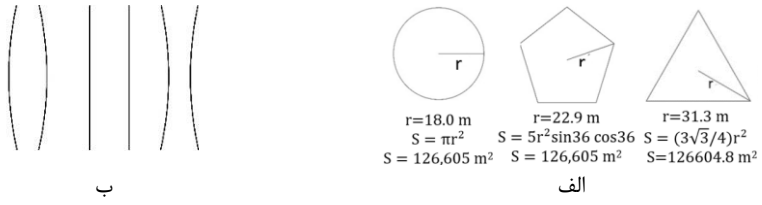
الف ب ج

شکل ۵. الف) برج‌های البحار ابوظبی، ب) ساختمان پست مرکزی تهران، ج) پروژهٔ باغ بهشت انگلیس [۱۷].

مواد و روش‌ها

استفاده از روش پیشفرض‌های معماری

با توجه به قرارگیری سایت پروژه در نزدیکی برج میلاد تهران، باید ارتفاعی برای ساختمان در نظر گرفته شود که علاوه‌بر تأمین نیازهای برنامهٔ فیزیکی مجموعه و قرارگیری در دستهٔ آسمانخراش‌ها (ارتفاع بیش از ۱۵۰ متر)، مانع دید برج میلاد که نشانه‌ای سرزمینی در شهر تهران است، نشود. همچنین دستیابی به مساحت مطلوب در هستهٔ مرکزی و طبقات مجموعه، طراحی انحناها باید چنان می‌بود که علاوه‌بر فراهم کردن پایداری برج به‌منظور انتقال بارهای ثقلی، کمترین مساحت قابل قبول در طراحی فضاهای مورد نظر را تأمین کند [۸]. از این‌رو با در نظر گرفتن کمترین مقدار مساحت قابل قبول در هستهٔ مرکزی و مساحت طبقات، انحناهای مورد نظر انتخاب شد. امکان بهره‌گیری از نور مطلوب و توجه به عمق ورود نور در پلان نیز از عوامل مهم در طراحی است که افزون‌بر تأمین روشنایی، آسایش ساکنان را فراهم می‌آورد. از این‌رو سعی شد کمترین عمق ورود نور (۷ متر) در پلان طبقات رعایت شود تا از نور طبیعی برای روشنایی فضا استفاده شود [۷]. فرم‌های درنظر گرفته‌شده در پلان شامل سه‌ضلعی، پنج‌ضلعی و دایره، و در ارتفاع شامل سه فرم محدب، مستقیم و مقعر است (شکل ۶).



ب الف

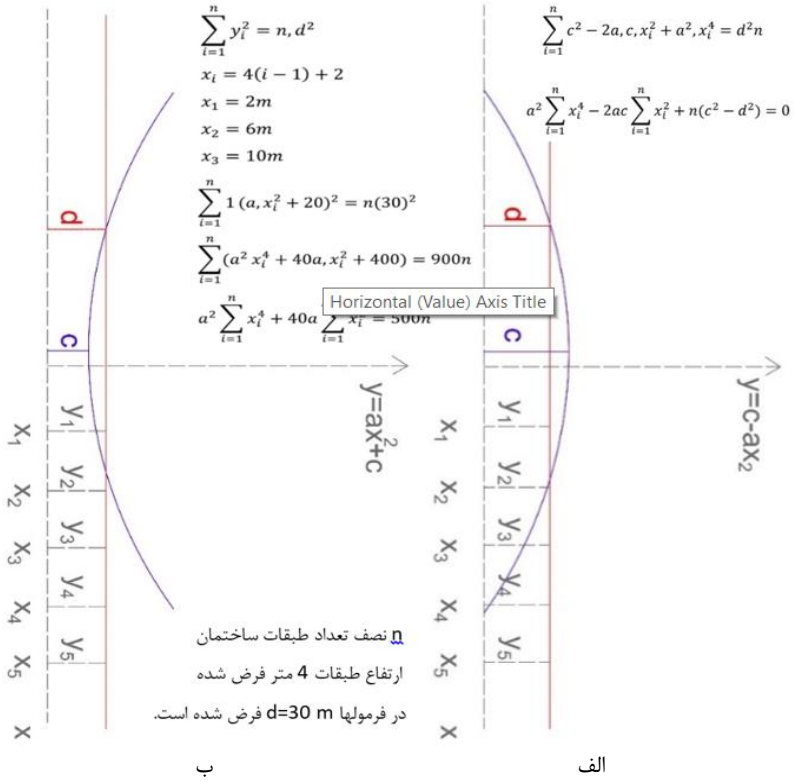
شکل ۶. الف) فرم‌های در نظر گرفته‌شده در ارتفاع بنا، ب) فرم‌های در نظر گرفته‌شده برای پلان بنا و نحوهٔ دستیابی به زیربنای برابر در هر سه پلان.

آسمانخراشی اداری به ارتفاع ۲۷۰ متر با ارتفاع طبقات ۴ متر در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۶، مقادیر r به‌گونه‌ای انتخاب شد که سطح زیربنا برای همهٔ پلان‌ها مقدار ثابتی باشد. در ساختمان‌های مورد نظر مساحت کل (زیربنای طبقات) برابر با ۱۲۶۰۶۵ متر مربع است. ضریب رفتار سازه (R) برابر با ۵ در نظر گرفته شد [۱۹، ۲۰]. با توجه به ثابت در نظر گرفتن انحناهای مشابه در هر یک از پلان‌ها و مساحت زیربنای کل، وجود انحنا در سطح مقطع، ایجاد پلان‌هایی با مساحت متفاوت را ایجاب می‌کرد. از این‌رو بیشینهٔ مساحت در بیشترین مقدار انحنا در مقاطع محدب برابر با ۳۶۳۲ متر مربع و کمینهٔ آن در بیشترین مقدار انحنا در مقطع مقعر برابر با ۱۰۱۷ متر مربع است. به‌علاوه بیشینهٔ مساحت در کمترین مقدار انحنا برابر با ۳۰۱۱ متر مربع و کمینهٔ آن در کمترین مقدار انحنا برابر ۱۲۵۶ متر مربع بوده است (اعداد عنوان‌شده به‌صورت رُندشده بیان شده است).

روش دستیابی به انحنای مناسب

در ابتدا برای دستیابی به انحنای مناسب و ثابت نگه داشتن مساحت کل طبقات، تابعی درجه دو براساس دو پارامتر اصلی c که نشان‌دهندهٔ حداقل نصف عرض طبقات در وسط ساختمان و d که نصف عرض ساختمان در حالت استوانه‌ای است تعریف شد (شکل ۷).

برای انتخاب پارامتر c، مساحت هستهٔ مرکزی باید دست‌کم ۲۰۰ متر مربع و ۲۰ درصد کف کوچک‌ترین طبقه باشد. از سوی دیگر کمترین مقدار متغیر d در محاسبات ریاضی بیشتر از مقدار c و حداکثر آن براساس الزامات معماری تعیین می‌شود. با توجه به اینکه تابع مورد نظر از فرمول $y = ax^2 + \mathrm{bx} + \mathrm{c}$ پیروی می‌کند و ازآنجا که هر منحنی را نقاطی شامل (x_i, y_i) تشکیل می‌دهند، پیدا کردن آن نقاط برای دستیابی به زیربنای برابر در همهٔ مدل‌ها اجتناب‌ناپذیر بود. از این‌رو، برای دستیابی به این مهم، x_i از طریق معادلهٔ 4(i-1)+2 و y_i از طریق axi2+c به‌دست آمد و در نهایت نقاطی را تشکیل دادند که با اتصال این نقاط به یکدیگر انحنای مناسب حاصل شد.



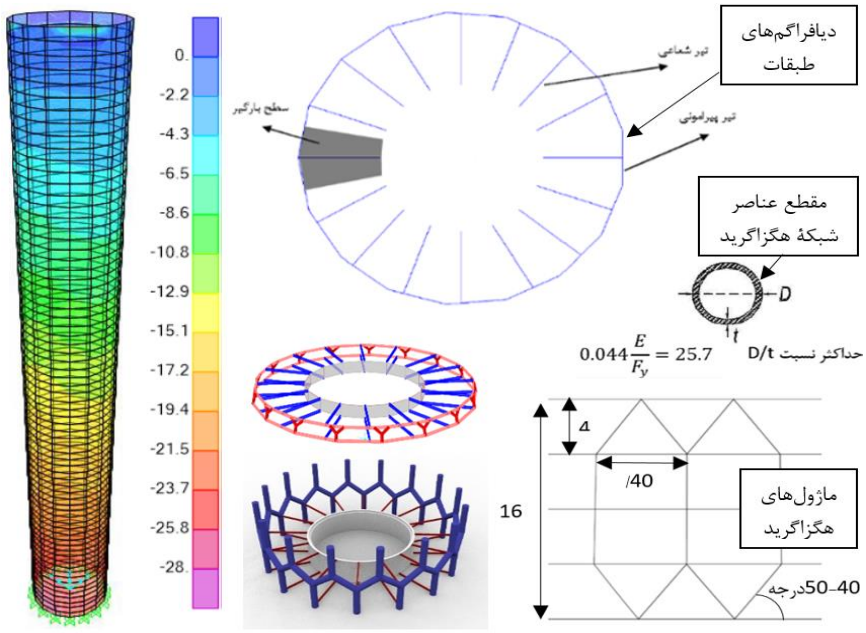
شکل ۷. مشخص کردن پارامترهای ثابت و متغیر در انحناهای الف) محدب، ب) مقعر.

مدل‌های هگزاگرید عمومی منتخب دارای کاربرد در طراحی

برای سیستم هگزاگرید به‌کاررفته در این تحقیق، همان‌طور که در شکل ۸ مشخص شده، مدول‌های یکسان هگزاگرید عمودی با زاویهٔ ۴۰ تا ۵۰ درجه (به‌عنوان زاویهٔ بهینه) انتخاب شد و سعی شد محدودهٔ میانگین زوایای کل مدل‌ها (محدب و مقعر) در این حدود قرار گیرد تا مقایسه صحیح باشد [۱۸].

هریک از ماژول‌های هگزاگرید شامل چهار طبقه است. با توجه به اینکه مقاطع هگزاگرید در باربری لرزه‌ای و ثقلی مشارکت دارند، باید از نوع فشردهٔ لرزه‌ای با شکل‌پذیری متوسط در نظر گرفته شوند. با توجه به ثابت در نظر گرفتن خصوصیات هستهٔ بتنی و نحوهٔ تأثیر آن در همهٔ مدل‌ها می‌توان ادعا کرد که این اثر در همهٔ موارد تحلیل‌شده یکسان بوده است. برای طراحی

مقاطع هر یک از اعضای سازهٔ فولادی از قابلیت طراحی خودکار[1] مقاطع توسط نرم‌افزار استفاده شده است. بر این اساس رأی تعیین پروفیل هر مقطع با بررسی فهرستی از پروفیل‌های تعیین‌شده در جدول ۱، سبک‌ترین پروفیلی را که پاسخگوی تنش مورد انتظار در آن عضو است به آن اختصاص می‌دهد. با توجه به فرض فولادی بودن سازهٔ هگزاگرید، از فولاد ST37 با مقاومت ۲۴۰۰ کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع استفاده شده است. در سیستم سازه‌ای هگزاگرید عمودی به‌دلیل اینکه اعضا تحت خمش قرار دارند استفاده از اتصال مفصلی امکان‌پذیر نیست، چراکه استفاده از آن موجب ناپایداری ماژول‌های هگزاگرید می‌شود. بنابراین استفاده از اتصال گیردار در ماژول‌های هگزاگرید ترجیح داده شد. این در حالی است که اتصالات تیرهای متصل‌کنندهٔ هسته به پوسته به‌صورت مفصلی طراحی شده است. اتصالات میان اعضا به تناسب، از نوع گیردار بین اعضای مورب در سیستم هگزاگرید و مفصلی میان تیرهای شعاعی (تیرهای متصل‌کنندهٔ هسته به پوسته) و تیرهای محیطی تعیین شد. اتصالات در پایهٔ بناها به‌صورت گیردار در نظر گرفته شد.



ج ب الف

شکل ۸. الف) مقاطع عناصر شبکهٔ هگزاگرید و ماژول‌های آن، ب) دیافراگم‌های طبقات و ارتباط آنها با پوستهٔ هگزاگرید ج) هستهٔ بتنی که در آن تنش‌های حاصل‌شده از بارگذاری ثقلی نیز نشان داده شده است.

1. Auto select

جدول ۱. خصوصیات عناصر تشکیل‌دهندهٔ شبکهٔ هگزاگرید

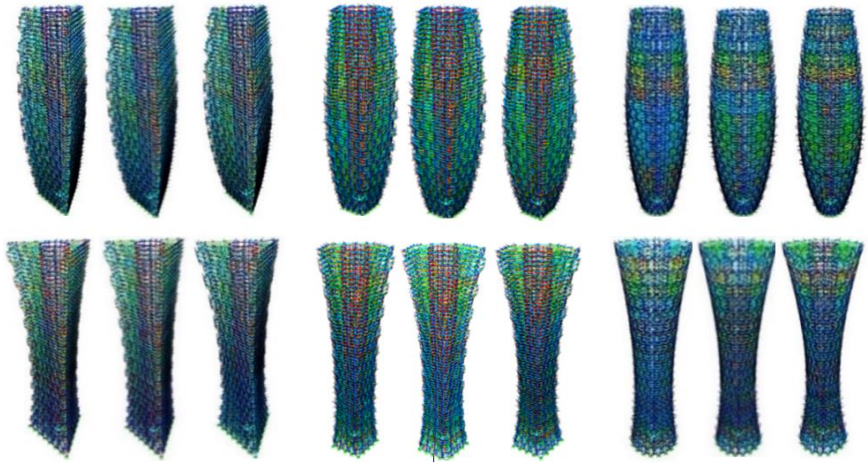
تیپ مقطع	قطر لوله (cm)	ضخامت (cm)	D/t
PIPE200x8	200	8	25
PIPE150x6	150	6	25
PIPE100x4	100	4	25
PIPE50x2	50	2	25

برای سنجش رفتار لرزه‌ای مدل‌ها شامل بررسی مقاومت و سختی آنها در مقایسه با یکدیگر، میزان جابه‌جایی رأس سازه و نیز کارایی آنها براساس وزن مصالح، در نظر گرفتن پیشفرض‌های سازه‌ای که متناسب با کاربری ساختمان باشند ضروری است [۲۱]. از این‌رو برای انجام فرایند تحلیل مدل‌ها در نرم‌افزار سپ، مقادیر ثابت و استانداردهای طراحی طبق آیین‌نامه در نظر گرفته شده است. با توجه به ارتفاع ساختمان و ضرورت‌های آیین‌نامه‌ای، از روش تحلیل طیفی که از روش‌های تحلیل دینامیکی خطی محسوب می‌شود برای ارزیابی مدل‌ها بهره گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، از دو ردیف تیر شعاعی و پیرامونی برای انتقال بار طبقات و بار جانبی که بین پوستهٔ باربر هگزاگرید و هستهٔ بتنی قرار می‌گیرد، استفاده شده است. از سوی دیگر، برای مقایسهٔ درست میان مدل‌ها لازم بود تا همگی در حد ممکن در یک نسبت تنش مجاز/ تسلیم قرار گیرند. چراکه اگر این مقادیر دارای تفاوت اصلی بوده باشند، نمی‌توان به بهینه بودن مقاطع و قابلیت مقایسهٔ آنها با یکدیگر تکیه کرد. در طراحی هستهٔ بتنی از دو ردیف تیر شعاعی و پیرامونی برای انتقال بار طبقات و بار جانبی بین پوستهٔ باربر هگزاگرید و هستهٔ بتنی استفاده شده است. سپس براساس دهانهٔ بارگیر تیرهای شعاعی بار کف به‌صورت خطی بر تیرهای شعاعی اعمال شده است.

با توجه به اینکه هستهٔ بتنی مساحت زیادی در پلان سازه داشته و در باربری ثقلی و جانبی سازه مشارکت دارد، به‌منظور دستیابی به نتیجهٔ مطلوب از عملکرد رفتار سازه، هستهٔ مشترکی برای همهٔ مدل‌ها در نظر گرفته شده است. جنس هسته از بتن مسلح است و همچنین سطح بارگیر داخل هسته نیز محاسبه شده و به دیواره‌ها به‌صورت نیرو بر واحد سطح اعمال شده است. به‌علاوه برای مقادیر پیشفرض زلزله، از آیین‌نامهٔ I.B.C ۲۰۰۹[1] استفاده شده است. برای کنترل موضوع نیروی باد آیین‌نامهٔ ASCE 7 مبنا قرار گرفته است. ضریب شتاب مبنای طرح با توجه به لرزه‌خیزی شهر تهران ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. بار زلزله مطابق با طیف آیین‌نامهٔ ASCE 7-16 برای سطح خطر طراحی (معادل ۱۰ درصد در ۵۰ سال) در نظر گرفته شده است. از

1. I.B.C 2009

این‌رو با در نظر گرفتن عوامل ذکرشده و پس از محاسبات ریاضی برای به‌دست آوردن میزان انحناها (محدب و مقعر) در سه پلان دایره، پنج‌ضلعی و مثلث، ابتدا مدل‌ها در نرم‌افزار راینو ساخته و سپس هر یک توسط نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ تحلیل شد. شکل ۹ نسبت تنش‌ها در اعضای هجده انحنای مدل‌شده در مقاطع و پلان‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نحوهٔ توزیع تنش در اعضای سازه در هجده فرم محدب و مقعر مدل‌شده در نرم‌افزار سپ

بحث

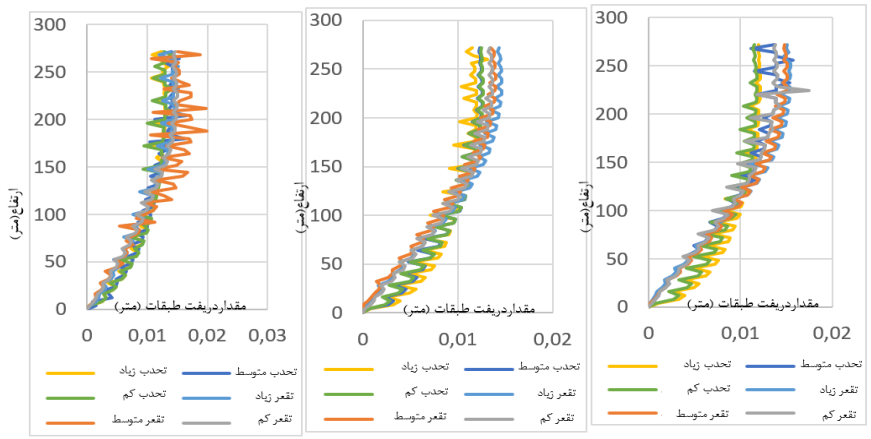
با استفاده از استانداردها و پیشفرض‌های معماری و سازه‌ای که بیان شد، تحلیل مدل‌ها در نرم‌افزار سپ۲۰۰۰ صورت گرفت و خروجی آن به شکل جدول و نمودار استخراج شد. از بین معیارهای گوناگون برای مقایسهٔ مدل‌ها، براساس نظر متخصصان امر و پژوهش‌های پیشین [۲۳] مهم‌ترین معیارها برای مقایسه و ارزیابی مدل‌ها، مقدار جابه‌جایی رأس سازه و برش پایه و برای دستیابی به مدل بهینه از منظر مصرف مصالح، عامل وزن مصالح به‌کاررفته به‌ازای مساحت واحد بنا، به‌عنوان مهم‌ترین شاخص در انتخاب مدل بهینه مدنظر قرار گرفته است. در ادامه به تفصیل موارد بیان‌شده شرح داده خواهد شد. جدول ۲ نشان‌دهندهٔ زمان تناوب مد اول سازه در سه پلان دایره، پنج‌ضلعی و مثلث در مقاطع مختلف است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که فرم محدب یا مقعر تأثیر چندانی در دورهٔ مدل‌های تحلیل‌شده نداشته است.

دیگر پارامتر مهم برای بررسی سختی جانبی، جابه‌جایی نسبی طبقات است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، جابه‌جایی نسبی طبقات که باید کمتر از ۰/۰۲ ارتفاع طبقات باشد،

در همهٔ مدل‌ها رعایت شده، به‌طوری که حداکثر جابه‌جایی رأس سازه در بین همهٔ مدل‌ها ۵۸ سانتی‌متر است و بر این اساس می‌توان گفت سازه‌ها به‌لحاظ سختی وضعیت مناسبی دارند و مقاومت اعضا بر طراحی حاکم شده است.

جدول ۲. زمان تناوب مد اول ساختمان‌ها (برحسب ثانیه) در پلان‌ها و انحناهای مختلف

وضعیت انحنا	دایره	پنج‌ضلعی	مثلث
تحدب زیاد	۳/۰۹۹	۳/۰۵	۳/۵۰
تحدب متوسط	۳/۰۸۹	۳/۰۸	۳/۶۲
تحدب کم	۲/۹۷۶	۳/۱۱	۳/۵۲
تقعر زیاد	۳/۲۰۵	۳/۱۶	۳/۴۱
تقعر متوسط	۳/۲۰۰	۳/۰۸	۳/۵۰
تقعر کم	۳/۲۹۳	۳/۰۵	۳/۴۶



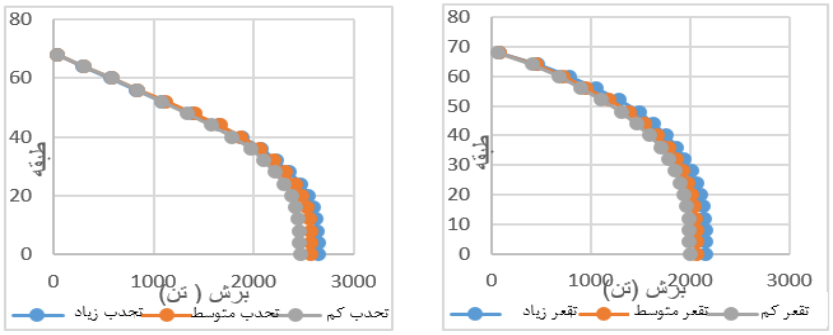
ج ب الف

شکل ۱۰. دریفت طبقات (برحسب متر) در پلان‌های الف) دایره، ب) پنج‌ضلعی، ج) مثلث در مقاطع مختلف.

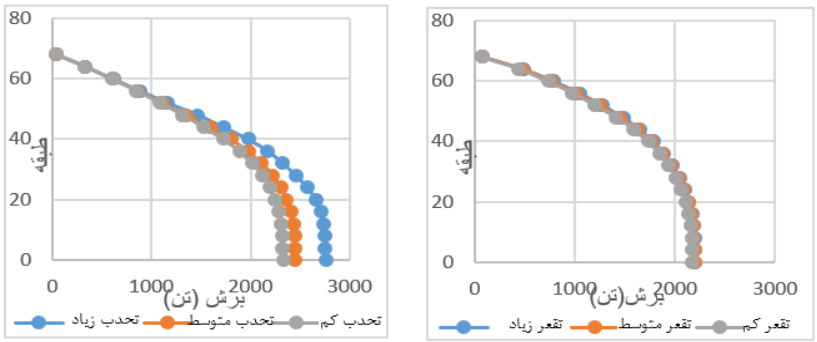
از سوی دیگر، مقدار نسبت تنش مجاز (stress ratio) در همهٔ مدل‌ها بررسی شد که این مقدار در همهٔ مدل‌ها کمتر از ۱ بوده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که در همهٔ مدل‌های ایجادشده مقدار جابه‌جایی و دریفت نسبی بین طبقات کمتر از حد مجاز بوده است و این مقادیر در پلان و انحناهای گوناگون تفاوت محسوسی را نشان نمی‌دهد.

دیگر شاخص مورد بررسی مقدار برش طبقات در ۱۸ مدل تحلیل‌شده است. با توجه به

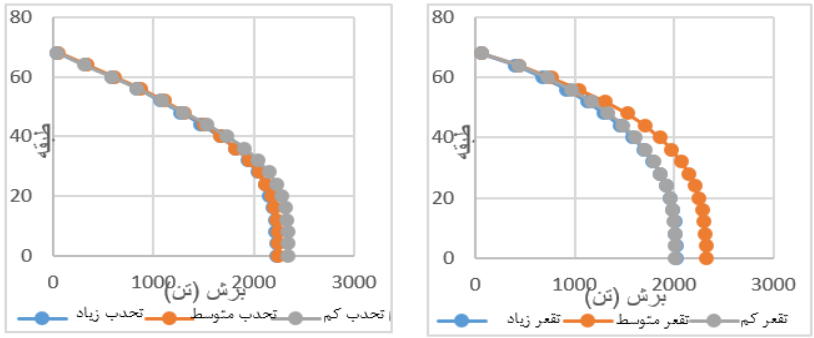
شکل ۱۱ مقدار برش طبقات در مقاطع مقعر با افزایش تعداد اضلاع پلان (دایره) کاهش می‌یابد، درحالی که در مقاطع محدب با کاهش تعداد اضلاع پلان (مثلث) کاهش پیدا می‌کند.



الف



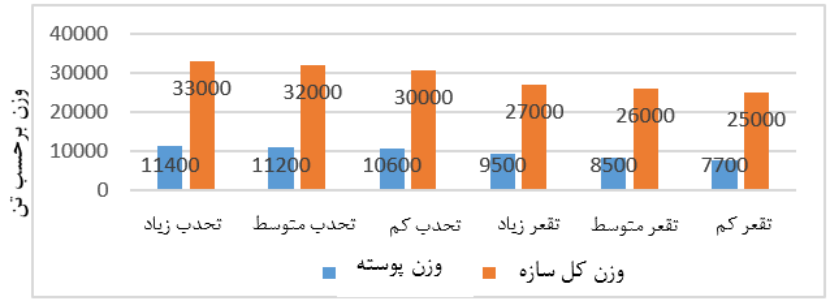
ب



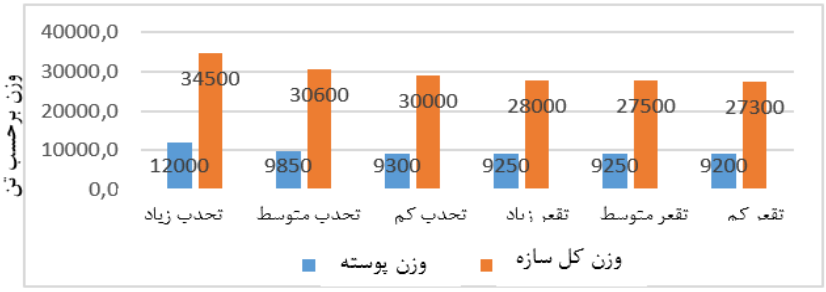
ج

شکل ۱۱. مقدار برش طبقات در مقاطع محدب و مقعر در پلان‌های الف) دایره، ب) پنج‌ضلعی، ج) مثلث

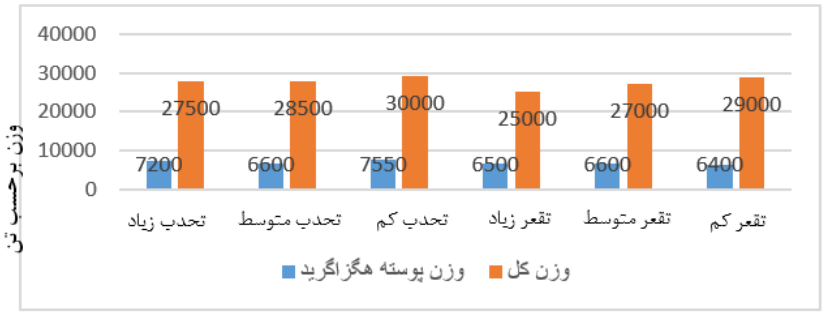
علاوه‌بر معیارهای توضیح داده‌شده یکی از عوامل اصلی در مقایسهٔ مدل‌های یادشده بررسی و مقایسهٔ وزن کل سازه به‌ازای هر متر مربع ساختمان است. براساس شکل ۱۲ که نشان‌دهندهٔ وزن مصالح به‌کاررفته در هریک از مدل‌هاست، می‌توان دریافت مدلی که دارای کمترین تقعر در پلان دایره است، با کمترین مقدار مصرف فولاد یعنی ۲۵۰۰۰ تن، مقرون‌به‌صرفه‌ترین مدل خواهد بود.



الف



ب



ج

شکل ۱۲. وزن پوسته و کل سازه در انحناهای مختلف در پلان‌های الف) دایره، ب) پنج‌ضلعی، ج) مثلث.

با توجه به نمودارهای ارائه‌شده و مقایسهٔ عملکرد انحناهای مختلف مقعر و محدب در پلان‌های دایره، پنج‌ضلعی و مثلث، به‌نظر می‌رسد با افزایش تعداد اضلاع پلان (دایره) با کاهش تقعر و تحدب، می‌توان وزن سازه را کاهش داد، درحالی که با کاهش تعداد اضلاع پلان (سه‌ضلعی)، با افزایش تقعر و تحدب می‌توان از وزن سازه کاست.

نتیجه‌گیری

رشد جمعیت در شهرهای بزرگ از یک‌سو و قرارگیری ایران در منطقه‌ای زلزله‌خیز از سوی دیگر، سبب شده بهره‌گیری از ساختمان‌های بلندمرتبه در کنار رفع نیازهای کاربران، صدمات ناشی از مخاطرات را تا حد ممکن کاهش دهد. یکی از راهکارهای پیشگیری از خسارات جبران‌ناپذیر این پدیده‌ها، ایجاد فرم‌های پربازده و سازه‌های کاراتر است. به‌عبارتی می‌توان از تأثیر هندسهٔ پلان و انحنای بدنهٔ ساختمان بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، در این زمینه بهره گرفت. بهره‌گیری از این توانایی در ایجاد پایداری لرزه‌ای با استفاده از سیستم هگزاگرید کمتر مورد توجه معماران و مهندسان بوده است؛ از این‌رو در این پژوهش از این سیستم برای تحلیل رفتار لرزه‌ای فرم‌ها در پلان و مقاطع بهره گرفته شد و چگونگی تأثیر آن در مقدار وزن ساختمان با استفاده از مقادیر کمی بیان شد.

براساس مشاهدات حاصل از نمودارها می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

- با ثابت نگه داشتن زیربنای کل و تحت انحناهای برابر در پلان‌های تحلیل‌شده می‌توان گفت با افزایش تعداد اضلاع پلان در مقاطع مقعر، وزن کل ۵/۳ درصد نسبت به کمترین تعداد اضلاع در این مقطع کاهش یافت، درحالی که در مقاطع محدب با کاهش تعداد اضلاع پلان وزن کل ۱۱/۴ درصد نسبت به بیشترین تعداد اضلاع پلان در این مقطع کاسته شد؛
- با کاهش تعداد اضلاع پلان در مقاطع محدب از مقدار برش پایه ۱۰ درصد کاسته شد، درحالی که این مقدار در مقاطع مقعر با افزایش یا کاهش تعداد اضلاع پلان تفاوت محسوسی نداشت و در همهٔ مدل‌ها روند ثابتی را نشان داد.

در نهایت می‌توان گفت به‌منظور دستیابی به نتایج جامع، پژوهش‌های دیگری برای شناخت دیگر عوامل تأثیرگذار در نحوهٔ عملکرد ساختمان‌های بلند باید صورت گیرد، مانند استفاده از مقاطع و پلان‌های مختلف در روند طراحی، تغییر در نحوهٔ اتصال اعضا به یکدیگر، تغییر در نحوهٔ چینش ماژول‌های هگزاگرید و غیره. به این ترتیب می‌توان رفتار سازه در مقابل نیروهای ترکیبی را بررسی کرد و در کنار تحلیل‌های طیفی از تحلیل‌های تاریخچهٔ زمانی هم بهره گرفت.

منابع

[۱]. اردکانی، امیررضا؛ گلابچی، محمود؛ حسینی، محمود؛ و علاقمندان، متین (۱۳۹۶). بررسی تأثیر فرم 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.

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

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

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

[۶]. صفوی، سیدیحیی (۱۳۸۰). «ملاحظاتی بر بلندمرتبه‌سازی در تهران: ساختمان‌های بلندمرتبه در تهران»، رشد آموزش جغرافیا، شمارهٔ ۸۵، ص ۲۹-۱۸

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

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

[9]. 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.

[10]. 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.

[11]. Ardekani, A.; Dabbaghchian, I.; Alaghmandan, M.; Golabchi, M.; Hosseini S. M. & Mirghaderi S. R. (2020) "Parametric design of diagrid tall buildings regarding structural efficiency", *Architectural Science Review*, 63:1, 87-102, DOI: 10.1080/00038628.2019.1704395

[12]. Dickson, T. R. (1995). *Introduction to chemistry* (7 ed.). New York: John Wiley &Sons, Inc.
[13]. De Meijer, J. (2012). "Hexagonal structure used as structural stability system", Study of Literature. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
[14]. Geim, A. K.; & Novoselov, K. S. (2007). "The rise of graphene", *Nature materials*, Vol. 6, 183-191.
[15]. Harris, P. J. (1999). *Carbon Nanotubes and Related Structures*, Cambridge: Cambridge University Press.
[16]. HTA, A. (2010). *Honeycomb Tube Architecture Technology* (Volume III), Tokyo: Shinenchiku-sha.
[17]. https://www.archdaily.com/901136/grimshaws-next-eden-project-could-be-in-the-north-of-england?ad_source=search&ad_medium=search_result_all
[18]. Ju, J.; & Summers, J. D. (2011). "Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain", *Materials and design*, 32, 512-524.
[19]. 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
[20]. 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.
[21]. Moon, K. (2008). "Material Saving Design Strategies for Tall Buildings Structures", CTBUH 8th World Congress, 2008.
[22]. Montouri, M.; Fadda, M.; & Mele, E. (2015). "Hexagrid_hexagonal tube structures for tall buildings: patterns, modeling and design". *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. New York: John Wiley & Sons.
[23]. Moon, K. (2012). "Sustainable Structural Design of Contemporary Tall Buildings of Various Forms", CTBUH 2012 9th World Congress, Shanghai
[24]. SAP2000. *Structural Analysis Program*, Computer and Structures: Berkeley, CA.
[25]. Taranath, B.S. (1988). *Structural Analysis & Design of Tall Buildings*, Published by McGraw Hill.
[26]. Wang, A. J.; & McDowell, D. L. (2004). "In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 126, 137-156.
[27]. Wang, A. J.; & McDowell, D. L. (2004). "In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 126, 137-156.