



## بررسی ترکیب سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید و هگزاگرید در ارتفاع ساختمان‌های بلندمرتبه

حدیث سعیدی نژاد، فریدون امیدی نسب\*، مجتبی حسینی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

### کلمات کلیدی:

ساختمان بلند مرتبه  
سیستم سازه‌ای  
سیستم دیاگرید  
سیستم هگزاگرید

**خلاصه:** امروزه تقابل بسیار نزدیک سازه و معماری، منجر به ابداع سیستم‌های سازه‌ای نوینی از جمله سیستم سازه‌ای دیاگرید و هگزاگرید شده است. این سیستم‌ها به علت کارایی سازه‌ای و پتانسیل زیباشناختی ارائه شده توسط پیکربندی هندسی منحصر به فرد آن‌ها مورد توجه بسیاری از معماران و مهندسان سازه قرار گرفته است. سیستم سازه‌ای هگزاگرید از شکل‌پذیری بالا و سیستم سازه‌ای دیاگرید از سختی بسیار بالایی برخوردار است. استفاده از یک سیستم مناسب سازه‌ای که بتواند علاوه بر ارضا سه نیاز سختی، مقاومت و شکل‌پذیری در طراحی سازه، معماری قابل توجهی داشته باشد از مهم‌ترین اصول در زمینه سازه‌های بلندمرتبه است؛ لذا در این پژوهش ترکیب دو سیستم دیاگرید و هگزاگرید در ارتفاع سازه به منظور بهره بردن از مزایای آن‌ها در کنار هم پیشنهاد داده شده است. بدین منظور ۴ سازه دیاگرید، هگزاگرید، سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید و سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید با استفاده از نرم‌افزار ETABS به روش دینامیکی خطی تحلیل و طراحی شده است. سپس عملکرد لرزه‌ای آن‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و با نرم‌افزار PERFORM 3D از نظر پارامترهای تغییر مکان جانبی، سختی، شکل‌پذیری، مقاومت جانبی و ضریب رفتار بررسی شد. مقایسه نتایج تحلیل سازه‌ها نشان می‌دهد که سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید عملکرد مطلوب‌تری در برابر نیروهای جانبی نسبت به دو سیستم دیاگرید و هگزاگرید دارد.

### ۱- مقدمه

در سازه‌های بلند اهمیت اثر نیروی جانبی با افزایش ارتفاع ساختمان به سرعت افزایش می‌یابد. و تغییر مکان جانبی ساختمان به حدی زیاد می‌شود که ملاحظات سختی کنترل کننده طرح می‌گردند. از سوی دیگر سختی، مقاومت و شکل‌پذیری هر سه در ارضای نیازهای طراحی ضروری می‌باشند و سازه‌های بلند می‌بایست از این خواص به صورت ترکیب با هم بهره ببرند. اساساً میزان سختی و شکل‌پذیری به نوع سیستم سازه‌ای بستگی دارد. از سیستم‌های سازه‌ای خارجی که سختی بالایی دارند سیستم دیاگرید است که مشابه یک خرپای فضایی عمل می‌کند. سیستم دیاگرید نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای دارای سختی بیشتری می‌باشد. این سیستم به دلیل استفاده از اعضای قطری، مقاومت برشی قابل ملاحظه‌ای را نسبت به سیستم با اعضای متعامد ایجاد می‌کند. یکی دیگر از سیستم‌های سازه‌ای خارجی سیستم هگزاگرید می‌باشد. این سیستم سازه‌ای رفتاری مشابه با سیستم دیاگرید دارد با این تفاوت که از شبکه‌های شش ضلعی برای تحمل هر دو

بارهای ثقلی و جانبی در نمای سازه استفاده می‌کند. از مهم‌ترین مزایای سیستم هگزاگرید امکان استفاده از آن در سازه‌هایی با تعداد طبقات بیشتر و کمتر بودن وزن و تراکم فولاد در نمای ساختمان در مقایسه با سیستم دیاگرید می‌باشد. در سازه هگزاگرید صلبیت برشی و خمشی توسط عملکرد محوری المان‌های شش ضلعی تأمین می‌شود، لذا این قابلیت سازه‌ای باعث کاهش تعداد ستون‌های داخلی می‌شود.

اگر فرایند پیشرفت سازه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه را بررسی کنیم ملاحظه می‌گردد سیر تکامل آن به سمت افزایش مقاومت جانبی می‌باشد. در حقیقت در ساختمان‌های بلند مرتبه، این بارهای جانبی (زلزله و به ویژه باد) هستند که در تعیین ویژگی‌های سازه‌ای نقش اصلی را دارا می‌باشند. در همین راستا به منظور شناخت سیستم‌های سازه‌ای خارجی محققین مطالعات بسیاری انجام دادند.

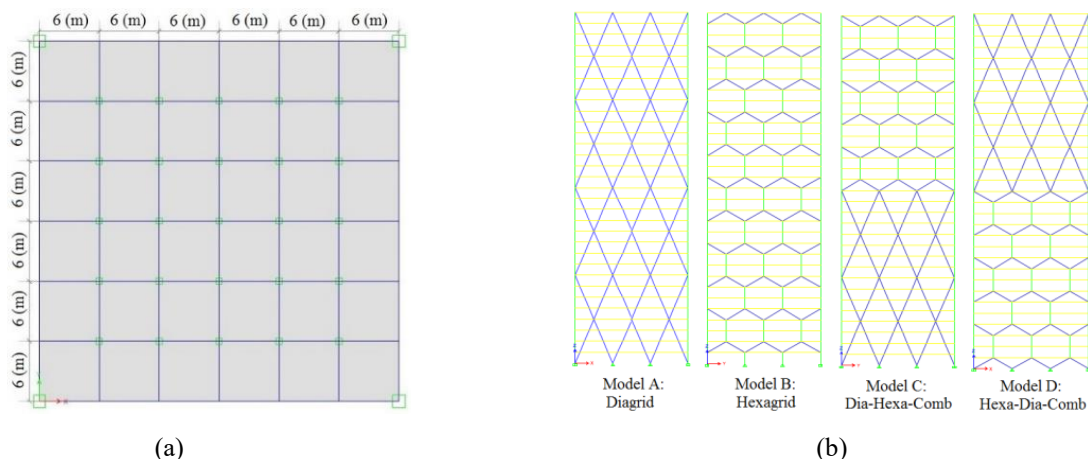
اصول طراحی مبتنی بر سختی توسط مون در سال ۲۰۰۹ [۱] به سازه‌های دیاگرید فولادی با ارتفاع و هندسه شبکه مختلف برای تعیین پیکربندی بهینه سازه دیاگرید در محدوده ارتفاع معین اعمال شد. او همچنین

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: omidinasab.f@lu.ac.ir



استراتژی‌های مختلف به منظور بهبود قابلیت ساخت دیاگریدها از طریق گره‌های پیش‌ساخته را نیز ارائه کرد. چائو هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۲] دو نوع اتصال برای سازه‌های دیاگرید مطرح نمودند. هر اتصال متشکل از چهار ستون متقاطع مورب لوله‌ای فولادی پر شده از بتن CFST و دو تیر می‌باشد. آن‌ها همچنین یک رابطه برای محاسبه ظرفیت باربری اتصالات بر اساس آیین‌نامه طراحی چینی برای ستون‌های CFST ارائه نمودند. کیم، جان و لی در سال ۲۰۱۰ [۳] نیز به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید با زاویه‌های مختلف مهاربندها با استفاده از آنالیز استاتیکی و دینامیکی غیرخطی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش زاویه مهاربندها اثر تأخیر برشی افزایش و مقاومت جانبی کاهش می‌یابد. پیشنهاد یک روش برای تعیین ضرایب عملکرد لرزه‌ای سیستم دیاگرید فولادی توسط بیکر و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۴] داده شد که ترکیبی از دو روش FEMA-450 و ATC-63 می‌باشد. جو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۵] عملکرد چرخه‌ای گره‌ها در سازه‌های دیاگرید تحت بارهای جانبی از جمله بارهای باد و زلزله را مورد بررسی قرار دادند. و در نهایت، بر اساس نتایج به دست آمده برخی توصیه‌های طراحی گره‌ها برای استفاده در ساختمان‌های واقعی را پیشنهاد دادند. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلند متقارن توسط آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی غیرخطی توسط کیم و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۶] انجام شد. بر اساس نتایج آنالیز، اثر تغییر در شکل کلی ساختمان‌های بلند متقارن بر عملکرد لرزه‌ای ارزیابی شد. جانی و پاتل در سال ۲۰۱۳ [۷] به ارزیابی نحوه توزیع بار در سیستم دیاگرید توسط دو آنالیز استاتیکی و دینامیکی خطی پرداختند. همچنین پارامترهایی از جمله پرورد زمانی، برش طبقه، تغییر مکان و دررفت درون طبقه‌ای را بررسی نمودند. مون در سال ۲۰۱۳ [۸] به منظور بررسی و تعیین پیکربندی بهینه سیستم‌های دیاگرید، لوله مهاربندی شده و سیستم خرابایی در ساختمان‌های بلند مطالعاتی را انجام داد و به نتایج قابل توجهی دست یافت که مهم‌ترین آن‌ها تأثیر تفاوت توزیع سختی بر فولاد سازه‌ای مصرفی با افزایش ارتفاع ساختمان است. مقدسی و ژانگ در سال ۲۰۱۳ [۹] به منظور افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت میرایی سیستم دیاگرید یک پیکربندی جدید با دستگاه‌های فیوز لینک برشی قابل تعویض پیشنهاد دادند. بر اساس نتایج آنالیز ارائه داده شده، به این نتیجه رسیدند که این سیستم قاب‌بندی دیاگرید دارای عملکرد لرزه‌ای رضایت‌بخشی تحت زلزله‌های قوی می‌باشد. وارکی و جورج در سال ۲۰۱۳ [۱۰] به مقایسه عملکرد سازه‌ای سازه دیاگرید با پلان مربعی و مثلثی پرداختند. با تحلیل استاتیکی خطی و تاریخچه زمانی غیرخطی این دو سازه تحت بار یکسان

نتیجه گرفتند که سازه دیاگرید با پلان مربعی عملکرد بهتری نسبت به پلان مثلثی دارد و مقدار جابه‌جایی جانبی و دررفت طبقه در آن کمتر است. برای کاهش تمرکز تنش در اتصالات سیستم سازه‌ای دیاگرید، سونگ مو چوی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۱] دو روش افزایش ضخامت سرستون و طول آن و توسعه ورق سخت کننده را پیشنهاد دادند. بین دو روش پیشنهاد شده افزایش ضخامت سرستون از نظر مقدار فولاد و ظرفیت سازه‌ای اتصالات مؤثرتر می‌باشد. کماث ساچین و نورونیا در سال ۲۰۱۶ [۱۲] عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دیاگرید با زوایای مختلف و با نسبت ابعاد (نسبت ارتفاع به عرض ساختمان) متغیر را توسط تحلیل پوش‌آور استاتیکی غیرخطی بررسی نمودند. در تمام مدل‌های سازه دیاگرید در نظر گرفته شده در مطالعه، تغییر مکان بام در نقطه عملکرد با کاهش نسبت ابعاد کاهش می‌یابد. به طور کلی عملکرد سازه تحت تأثیر زاویه مهاربند و نسبت ابعاد می‌باشد. تریپتی و سینگلا در سال ۲۰۱۶ [۱۳] یک روش طراحی بر اساس سختی برای تعیین اندازه‌های اولیه اعضای سازه دیاگرید برای ساختمان‌های بلند ارائه نمودند. از مقایسه آنالیز نتایج دریافتند که با افزایش زاویه دیاگرید، پرورد زمانی سازه و حداکثر دررفت طبقه افزایش و ضریب شتاب طیفی و برش پایه کاهش می‌یابد. صادقی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۴] به محاسبه ضریب اصلاح پاسخ (R)، ضریب اضافه مقاومت ( $\Omega_0$ ) و ضریب اصلاح تغییر مکان ( $C_d$ ) بر اساس روش FEMA P695 پرداخت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که ضریب R برای سیستم‌های دیاگرید فولادی به زوایای اعضای مورب بستگی دارد. برای دیاگرید با زوایای ۴۵، ۶۳/۴ و ۷۱/۵ درجه مقادیر ضریب R به ترتیب ۱/۵، ۲ و ۳ تعیین شده است. مشهدی‌علی و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۵] به ارزیابی ضریب اصلاح پاسخ R برای سیستم سازه‌ای هگزآگرید بر اساس روش FEMA P695 پرداخته است. نتایج ارزیابی وی نشان داد که ضریب R، ۴، معیارهای پذیرش را برآورده می‌کند. محسنیان و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۶] به تحلیل قابلیت اطمینان لرزه‌ای و تخمین ضریب اصلاح پاسخ چندسطحی برای سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید فولادی پرداخته است. با بررسی مطالعات انجام شده مشخص شد که تحقیقات انجام شده در این زمینه بر روی سازه‌های دیاگرید و هگزآگرید به صورت مجزا متمرکز بوده و در آن‌ها تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی انجام شده و همچنین برخی مطالعات بر روی اتصالات انجام شده است و مطالعه‌ای در خصوص ترکیب این سیستم‌ها در ارتفاع انجام نشده است. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه سیستم‌های سازه‌ای خارجی می‌توان به این نکته اشاره کرد که سیستم سازه‌ای هگزآگرید از شکل‌پذیری بالا و سیستم



شکل ۱. (a) پلان و (b) ارتفاع سازه های مورد بررسی.

Fig. 1. (a) plan, (b) height of the studied structures

طرح شماتیک این چهار سازه در ارتفاع در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ مشخصات مصالح مصرفی برای طراحی سازه ها آورده شده است. در جدول ۲ مشخصات هندسی سازه ها ارائه شده است. در تمام مدل ها اتصالات تیرهای داخلی به صورت مفصلی و تیرهای پیرامونی دو سر گیردار می باشد. در مهاربندها اتصالات به صورت مفصلی است. همچنین پای ستون های داخلی مفصلی و پای ستون های گوشه به علت پایدار بودن سازه به صورت گیردار تعریف شده است. در طراحی سازه ها برای تیرهای داخلی و به منظور کاهش وزن سازه، از مقاطع I شکل ساخته شده از ورق استفاده شده است. مقاطع BOX، به دلیل ممان اینرسی برابر در جهت X و Y و در نتیجه عملکرد یکسان در برابر زلزله دو جهت، برای استفاده در ستون ها، تیرهای محیطی و اعضای قطری در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱- آیین نامه های مورد استفاده جهت طراحی سازه ها

- ۱- از آیین نامه های زیر جهت بارگذاری و طراحی سازه ها استفاده شده است:
  - ۱- بارگذاری ثقلی ساختمان، بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) [۱۷].
  - ۲- بارگذاری جانبی (لرزه ای) ساختمان، بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۱۳۹۳) [۱۸].
  - ۳- بارگذاری جانبی (باد) ساختمان در ETABS بر اساس آیین نامه ملی ساختمان کانادا در سال ۲۰۱۰ (NBCC) [۱۹].
- می باشد که مطابقت لازم را با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) دارد.

سازه ای دیاگرید از سختی بسیار بالایی برخوردار است. لذا در این پژوهش برای ارتقا سختی، مقاومت و شکل پذیری سازه های بلندمرتبه ترکیبی از سیستم سازه ای هگزاگرید و دیاگرید در نظر گرفته شد. نتایج طراحی و تحلیل این سیستم سازه ای ترکیبی با سیستم های دیاگرید و هگزاگرید به صورت مجزا، مقایسه شد و مناسب ترین سیستم سازه ای از نظر پارامترهای لرزه ای پیشنهاد شد. در ابتدا بار باد و بار زلزله وارد بر هر سازه را محاسبه کرده و سپس اثر هر یک که بر سازه بیشتر بوده (بار بحرانی) را در طراحی لحاظ شده است.

#### ۲- مدل سازی، تحلیل و طراحی سازه ها

به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای سیستم های مورد مطالعه، می بایست در مرحله اول طراحی گردند و سپس مورد ارزیابی قرار گیرند. سازه های انتخاب شده، چهار ساختمان فولادی ۳۲ طبقه با پلان، ارتفاع و بارگذاری مشابه می باشند. مدل اول یک سازه با سیستم دیاگرید و مدل دوم یک سازه با سیستم هگزاگرید می باشد. مدل سوم یک سازه با ترکیب سیستم های سازه ای دیاگرید و هگزاگرید در ارتفاع سازه می باشد، ۱۶ طبقه پایین سازه دارای سیستم دیاگرید و ۱۶ طبقه بالای سازه دارای سیستم هگزاگرید می باشد. مدل چهارم مشابه با مدل سوم است با این تفاوت که در ۱۶ طبقه پایین سیستم هگزاگرید و در ۱۶ طبقه بالا سیستم دیاگرید به کار برده شده است. سیستم های دیاگرید دارای مازول های هشت طبقه و زاویه قطری ۶۶/۵۹ درجه و سیستم های هگزاگرید دارای مازول های چهار طبقه و زاویه قطری ۳۰ درجه می باشد.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی از نوع ST۳۷.

Table 1. Specifications of ST37 steel materials

واحد	مقدار	پارامتر
kgf/m <sup>3</sup>	۷۸۵۰	وزن واحد حجم ( $W_s$ )
kgf/cm <sup>2</sup>	$۲ \times ۱۰^۶$	مدول الاستیسیته ( $E_s$ )
-	۰/۳	نسبت پواسون ( $\nu_s$ )
1/°C	۰/۰۰۰۰۱۲	ضریب انبساط دما ( $\alpha_s$ )
kgf/cm <sup>2</sup>	۲۴۰۰	مقاومت تسلیم فولاد ( $F_y$ )
kgf/cm <sup>2</sup>	۳۷۰۰	مقاومت نهایی فولاد ( $F_u$ )

جدول ۲. مشخصات هندسی سازه‌ها.

Table 2. Geometric Specifications of structures

مقدار	پارامترهای پلان و ارتفاع ساختمان
۳۶	عرض پلان (m)
۳۶	طول پلان
۳/۴۶۴	ارتفاع طبقات (m)
۳۲	تعداد طبقات
۱۱۰/۸۵	ارتفاع کل ساختمان (m)
۶	طول دهانه ثقلی (m)
۲۰	ضخامت سقف (m)

هگزاگرید برابر ۵ و سرعت باد ۱۰۰ متر بر ساعت در نظر گرفته شده است. مقدار بار مرده و زنده برای هر چهار سازه به ترتیب ۷۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شد.

به منظور اطمینان از روند درست طراحی کنترل اولیه زمان تناوب، کنترل نظم پیچشی سازه‌ها، کنترل تغییر مکان‌های جانبی نسبی سازه، کنترل واژگونی سازه و بررسی شاخص پایداری طبقات سازه بر روی چهار نمونه مورد مطالعه در این پژوهش انجام شد.

۳- نتایج تحلیل دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ETABS

در این بخش نتایج تحلیل دینامیکی خطی به دست آمده از نرم‌افزار ETABS بیان و به مقایسه نتایج بین سازه‌ها پرداخته شده است.

۴- طراحی اعضای سازه‌ی فولادی در ETABS بر اساس آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا در سال ۲۰۱۰ (AISC ۳۶۰-۱۰) [۲۰] می‌باشد که مطابقت لازم را با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) [۲۱] دارد. ۵- از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) [۲۲] برای ضوابط مورد نیاز اجزای بتنی ساختمان استفاده شده است.

۲-۲- فرضیات طراحی

پلان ساختمان‌ها در هر دو جهت متقارن و سقف سازه‌ها به صورت دیافراگم صلب در نظر گرفته شد. خاک محل سازه‌ها از نوع III، لرزه‌خیزی با خطر نسبی خیلی زیاد، اهمیت سازه‌ها متوسط و درصد مشارکت بار زنده در زلزله ۲۰٪ مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران در نظر گرفته شد. مطابق مطالعات انجام شده ضریب رفتار هر دو سیستم دیاگرید و

جدول ۳. زمان تناوب اساسی مود اول سازه‌ها.

Table 3. Basic period of the first mode of structures

مدل	ETABS (sec)		Perform (sec)		خطا (%)	
	جهت X	جهت Y	جهت X	جهت Y	جهت X	جهت Y
A	۲/۳۱۲	۲/۳۱۲	۲/۴۱۹	۲/۴۱۹	۴/۶	۴/۶
B	۲/۹۱۴	۲/۹۱۴	۳/۳۵۸	۳/۳۵۸	۱۴/۲	۱۴/۲
C	۲/۶۷۷	۲/۶۷۷	۲/۹۵۴	۲/۹۵۴	۱۰/۳	۱۰/۳
D	۲/۷	۲/۷	۳/۰۶۶	۳/۰۶۶	۱۳/۶	۱۳/۶

۳-۱- زمان تناوب سازه

با انجام تحلیل ارتعاش آزاد پریود مد اول سازه‌های طراحی شده در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه پریود مود اول سازه‌های طراحی شده نشان می‌دهد که مقدار پریود مود اول سازه دیاگرید نسبت به سازه هگزاگرید کمتر و مقدار پریود مد اول مدل‌های C و D مابین مقدار پریود سازه‌های دیاگرید و هگزاگرید می‌باشد. همچنین اختلاف پریود به دست آمده از برنامه ETABS با پریودی که از برنامه PERFORM 3D خوانده شده است که کمتر از ۱۵ درصد است و تطابق مناسبی را بین پاسخ‌های نشان می‌دهد که یکی از نشانه‌های صحیح طراحی می‌باشد.

در مدل C که طبقات پایین دارای سیستم دیاگرید و طبقات بالا دارای

سیستم هگزاگرید است، مقدار تغییر مکان جانبی در طبقات پایین تقریباً برابر با تغییر مکان جانبی در سازه دیاگرید است اما در طبقات بالا به دلیل اینکه سیستم هگزاگرید دارای سختی کمتری نسبت به دیاگرید است، تغییر مکان جانبی بیشتری نسبت به سازه دیاگرید دارد.

در مدل D که طبقات پایین دارای سیستم هگزاگرید و طبقات بالا دارای سیستم دیاگرید است، مقدار تغییر مکان جانبی در طبقات پایین تقریباً برابر با تغییر مکان جانبی در سازه هگزاگرید است اما در طبقات بالا به دلیل اینکه سیستم دیاگرید دارای سختی بیشتری نسبت به هگزاگرید است، تغییر مکان جانبی کمتری نسبت به سازه دیاگرید دارد.

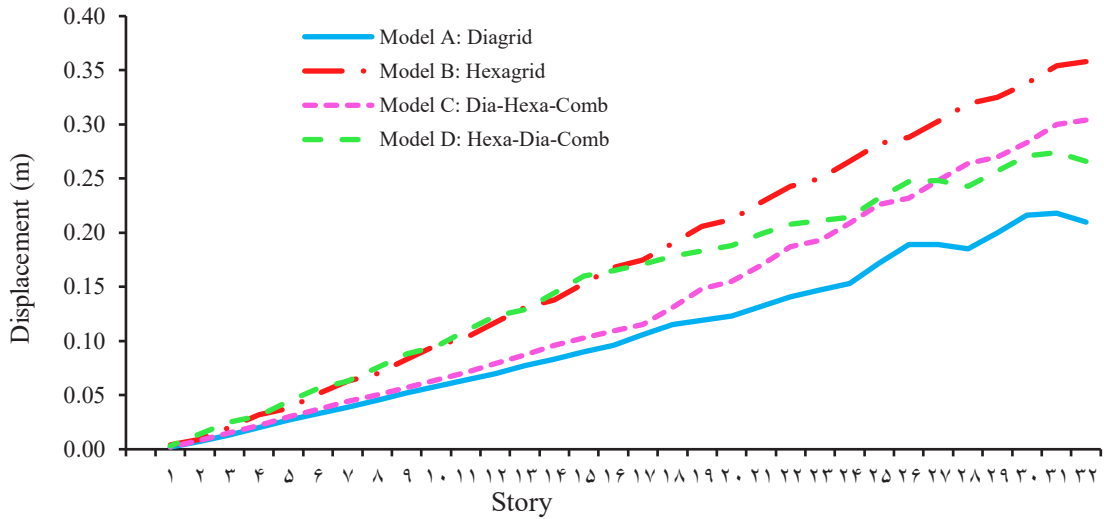
۳-۲- تغییر مکان جانبی سازه

مقادیر تغییر مکان مرکز جرم طبقات سازه‌ها در شکل ۲ سازه‌ها مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سازه دیاگرید تغییر مکان جانبی کمتری نسبت به سازه دیاگرید دارد، این موضوع به این معناست که سختی جانبی سازه دیاگرید بیشتر از سازه هگزاگرید است.

مقدار تغییر مکان جانبی مرکز جرم طبقات مدل‌های C و D بین مقادیر تغییر مکان جانبی مدل‌های دیاگرید و هگزاگرید می‌باشند. در مدل C، ۲۷ طبقه اول تغییر مکان جانبی کمتری نسبت به مدل D دارند، اما تغییر مکان جانبی در طبقات بالاتر نسبت به مدل D بیشتر است، این موضوع به این علت است که سختی جانبی سازه دیاگرید بیشتر از هگزاگرید می‌باشد. بیشترین اختلاف تغییر مکان جانبی دو مدل C و D در طبقه ۱۶ ام می‌باشد؛ در واقع در محلی که نوع سیستم در ارتفاع تغییر کرده است. به طور کلی سختی مدل C کمتر از مدل D است.

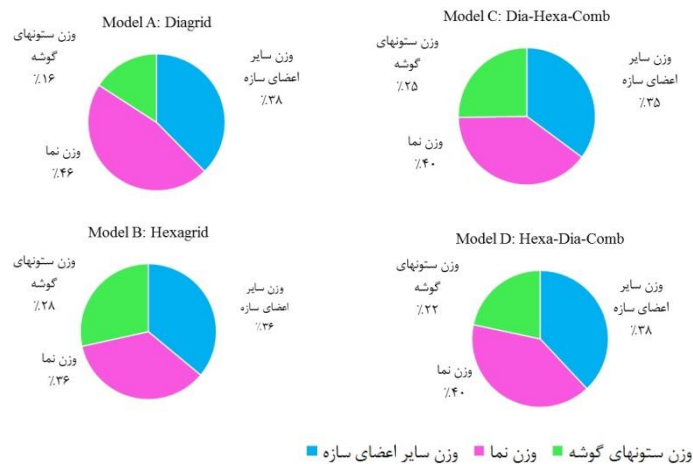
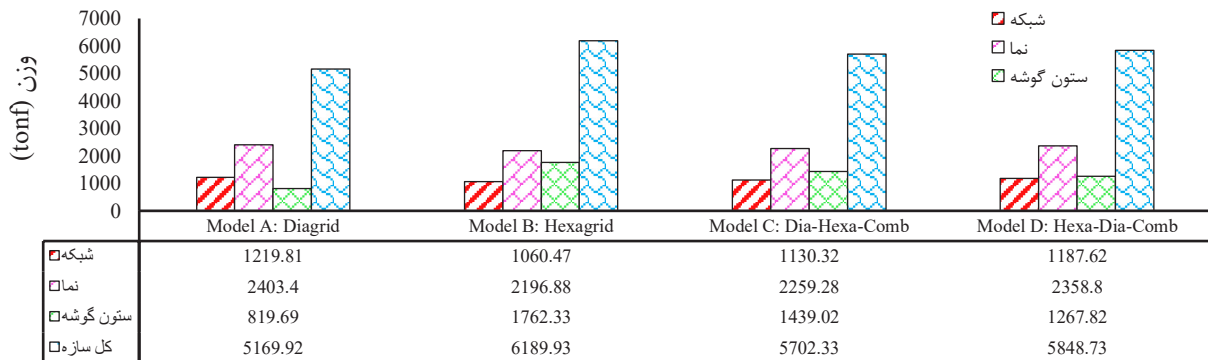
۳-۳- مقایسه میزان تراکم فولاد در بخش‌های مختلف سازه

برای درک بهتر از وزن اعضای سازه نسبت به وزن کل سازه، وزن سازه‌های مورد مطالعه در شکل ۳ مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است منظور از وزن نما، مجموع وزن‌های المان‌های تیر خارجی و شبکه سازه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود سازه دیاگرید کمترین و سازه هگزاگرید بیشترین وزن سازه‌ای را دارد. در صورتی که لازم باشد تا از بیشترین ظرفیت سازه استفاده شود و عملکرد معماری در درجه دوم اهمیت قرار داشته باشد، باید سازه‌هایی انتخاب شوند که تراکم فولاد در نمای آن‌ها بیشتر از بخش‌های دیگر ساختمان است. بنابراین به ترتیب اولین انتخاب سازه دیاگرید و گزینه بعدی سازه‌های ترکیبی خواهد بود. در صورتی که در طراحی صرفه اقتصادی مدنظر باشد، به ترتیب سازه دیاگرید و سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) به دلیل داشتن وزن کمتر ترجیح داده می‌شوند.



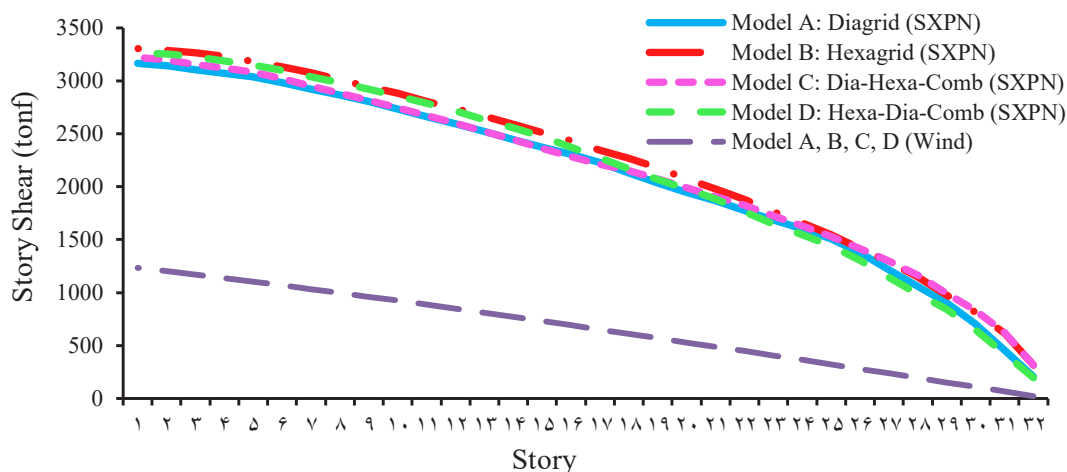
شکل ۲. مقایسه تغییر مکان جانبی طبقات سازه ها.

Fig. 2. Comparison of lateral displacement of structures' stories



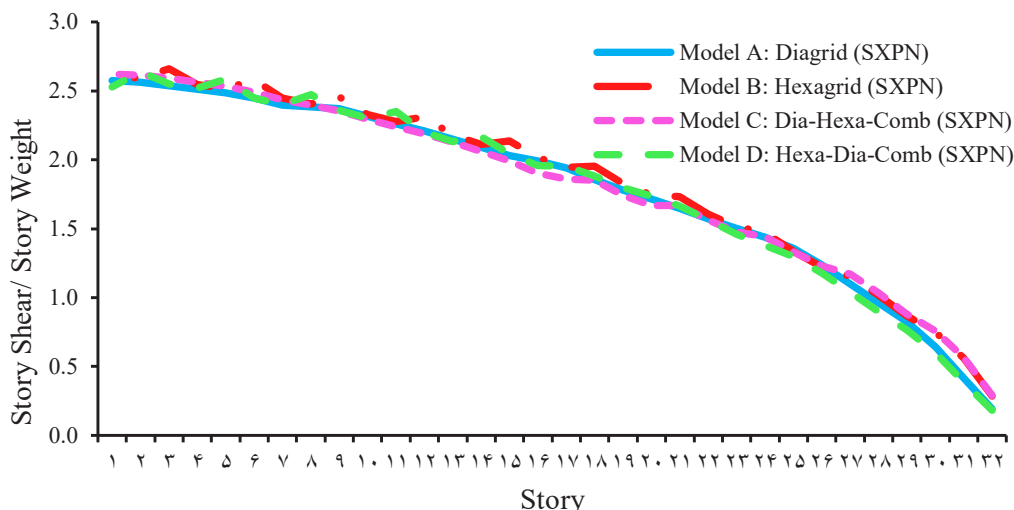
شکل ۳. مقایسه وزن اعضای سازه نسبت به وزن کل سازه.

Fig. 3. Comparison of the weight of structure's members to the total weight of the structure



شکل ۴. نیروی برشی طبقات سازه‌ها.

Fig. 4. Shear force of structures' stories



شکل ۵. نیروی برشی طبقات هم‌پایه شده با وزن هر طبقه.

Fig. 5. Shear force of overlapped stories with the weight of each story

نیروی برشی کمتری نسبت به مدل D به آن وارد می‌شود، و در طبقات بالا نیروی وارد بر سازه در آن به علت سختی کمتر سیستم هگزاگرید نسبت به مدل D بیشتر می‌باشد.

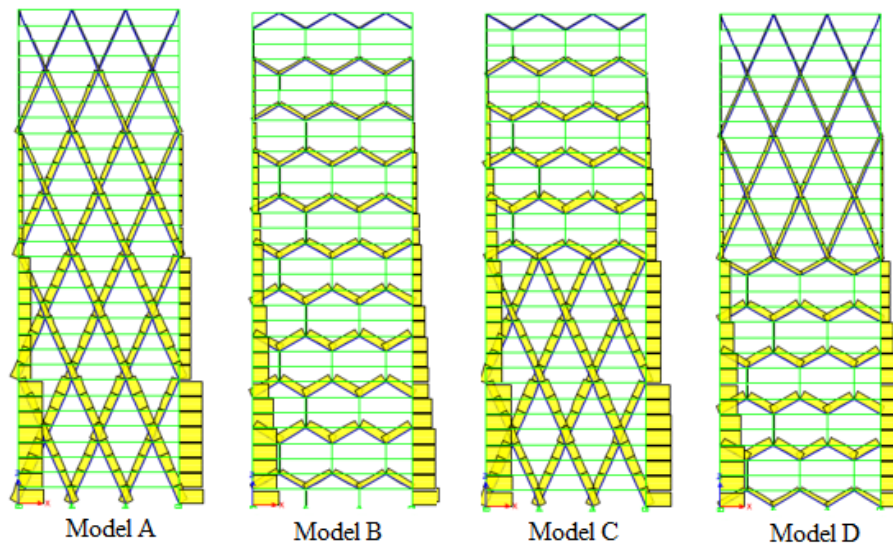
#### ۳-۴- نیروی برشی طبقات

برای آن که اثر طراحی کم شود، نیروی برشی طبقات با وزن هر طبقه هم‌پایه شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نحوه تغییرات نمودار در هر چهار سازه همانند شکل ۵ می‌باشد (با افزایش ارتفاع مقدار آن کاهش یافته است).

برش طبقات مدل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع سازه نیروی برشی وارد بر طبقات کاهش می‌یابد. طبق قانون دوم نیوتن هر چقدر مقدار وزن سازه افزایش یابد، نیرویی که در اثر زلزله به سازه وارد می‌شود نیز افزایش خواهد یافت، همانطور که در بخش قبلی گفته شد سازه هگزاگرید دارای بیشترین وزن سازه‌ای می‌باشد بنابراین نیروی بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها به آن وارد می‌شود و سازه دیاگرید نیروی برشی پایه کمتری دارد.

در مدل C به علت سختی بیشتر سیستم دیاگرید در طبقات پایین،





شکل ۶. توزیع نیروی محوری در اعضای سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 6. Axial force distribution in the members of the studied structures

در تحمل نیروی محوری دارند و بخش عمده آن توسط مهاربندها تحمل می‌شود. ستون‌های گوشه در سازه دیاگرید نسبت به سازه هگزاگرید نیروی محوری کمتری تحمل می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم دیاگرید نسبت به سیستم هگزاگرید عملکرد بهتری در مقابله با نیروهای جانبی دارد. در مدل D ستون‌های گوشه در طبقات پایین نسبت به مدل C نیروی محوری بیشتری تحمل می‌کنند اما در طبقات بالا سهم کمتری از نیروی محوری می‌برند.

#### ۴- تحلیل استاتیکی غیرخطی Pushover با استفاده از

##### نرم‌افزار ۳D Perform

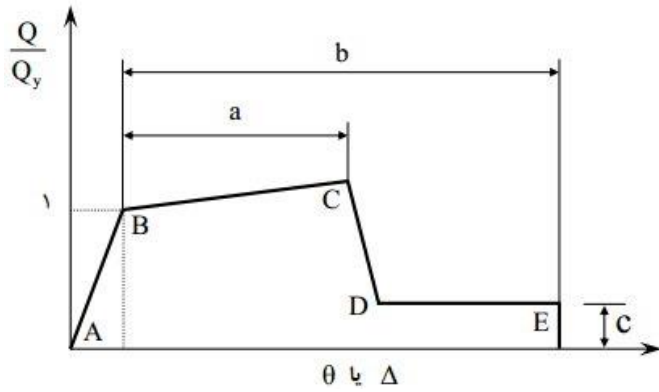
به منظور بررسی میزان کارایی سازه‌های طراحی شده در زلزله از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شد. این روش تحلیل به مهندسان اجازه می‌دهد رفتار غیرخطی سازه و پیشرفت خرابی آن با افزایش یافتن شدت حرکت زمین را، درک کنند. در این روش، بار جانبی ناشی از زلزله، به طور استاتیکی و به تدریج به صورت فزاینده به سازه اعمال می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در یک نقطه خاص (نقطه کنترل) تحت اثر بار جانبی به مقدار مشخص (تغییر مکان هدف) برسد یا پیش از آن سازه ناپایدار شود.

نیروی برشی وارد بر سازه در اثر زلزله و باد در دو جهت X و Y به علت متقارن بودن سازه یکسان است. و همین‌طور در هر چهار مدل به علت اینکه سطوح ساختمان با هم برابرند و بار باد به سطح سازه بستگی دارد، در تمام مدل‌ها نیروی وارد بر سازه در اثر وزش باد با هم برابر هستند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در هر چهار مدل نیروی زلزله وارد بر سازه بیشتر از نیروی باد است و از آنجایی که باید سازه برای بار بحرانی طراحی شود، طراحی تمام سازه‌ها بر اساس نیروی زلزله انجام شده است.

#### ۳-۵- مقایسه باربری اعضای پیرامونی

توزیع نیروی محوری در اعضای سازه‌های مورد مطالعه تحت ترکیب بار بحرانی هر سازه که شامل بارهای ثقیلی و بار جانبی زلزله می‌باشد، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی محوری با افزایش ارتفاع در ستون‌های بالایی کاهش پیدا می‌کند و همچنین در سازه دیاگرید نیروی محوری از اعضای مورب کناری به سمت داخل کاهش پیدا می‌کند، با توجه به این موضوع در طراحی سازه‌های دیاگرید، ستون‌های کناری (اعضای مورب) قاب خارجی باید قوی‌تر از ستون‌های میانی باشند علاوه بر این نیروی محوری در سازه دیاگرید در تمام اعضای مورب توزیع شده است اما در سازه هگزاگرید عمودی ستون‌های محیطی سهم بسیار کمی





شکل ۷. منحنی نیرو-تغییر شکل تعمیم یافته برای اعضا و اجزای فولادی [۲۳].

Fig. 7. Generalized force-deformation curve for steel members and components

در این پژوهش برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی از توزیع نوع اول برای بارگذاری جانبی استفاده شده است.

سطح عملکرد: برای بررسی عملکرد سازه‌ها حالت حدی LS (ایمنی جانبی) در نظر گرفته شده است، در واقع به محض رسیدن یکی از دررفت طبقات به مقدار مورد نظر آنالیز متوقف می‌شود.

#### ۴-۲- تعریف مفاصل پلاستیک

در این تحقیق برای تعریف معیارهای پذیرش و پارامترهای مدل‌سازی برای مفاصل پلاستیک اعضای سازه‌ای از نشریه شماره ۳۶۰ استفاده شده است. شمای کلی منحنی ظرفیت را در شکل ۷ نشان داده شده است.

پارامترهای  $Q$  و  $Q_y$  در شکل ۷ به ترتیب نیروی، تعمیم یافته و مقاومت نظیر اولین تسلیم عضو می‌باشند. همچنین پارامتر  $\Delta$  بیانگر تغییر مکان مفصل‌ها و پارامتر  $\theta$  نیز بیانگر دوران مفصل‌ها هستند. بر اساس منحنی نیرو-تغییر شکل در شکل ۷ و جداول ۳-۵ و ۴-۵ در نشریه ۳۶۰ محاسبات دستی مربوط به مفاصل پلاستیک انجام شده و سپس در نرم‌افزار Perform 3D، در ستون‌های نیرو کنترل مفصل برشی در فاصله ۰/۰۵ و ۰/۹۵ و در ستون‌های تغییر شکل کنترل مفصل خمشی در فاصله ۰/۱ و ۰/۹ در ابتدا و انتهای طول عضو تعریف شده است. در تیرهای دو سرگیردار (تغییر شکل کنترل) پیرامونی مفصل خمشی در فاصله‌ی نصف ارتفاع تیر در ابتدا و انتهای عضو و در تیرهای دو سر مفصل داخلی مفصل خمشی در وسط طول تیر تعریف شده است.

#### ۴-۱- فرضیات تحلیل استاتیکی غیرخطی

مدل‌سازی: سازه‌ها به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده‌اند.

ضریب آگاهی K: بر اساس جدول (۱-۲) نشریه ۳۶۰ ضریب آگاهی

سازه‌ها برابر ۱ فرض می‌شود [۲۳].

تعریف حالت حدی جابجایی نسبی: مقدار دررفت مجاز بر اساس جدول FEMA356 برای سطح عملکرد IO، LS و CP در سازه‌های مهاربندی فولادی به ترتیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲۰ می‌باشد [۲۴]. بر اساس بند ۳-۳-۱-۳-۱-۳ نشریه ۳۶۰ رابطه بین برش پایه و تغییر مکان کنترل باید برای هر گام افزایش نیروهای جانبی تا رسیدن به تغییر مکان حداقل ۱/۵ برابر تغییر مکان هدف ثبت شود، بنابراین مقدار دررفت مجاز برای سطح عملکرد IO، LS و CP در سازه‌های مورد نظر به ترتیب ۰/۰۷۵، ۰/۰۲۲۵ و ۰/۰۳۰ در نظر گرفته شده است.

تعریف حالت بارگذاری ثقلی: بر اساس بند (۳-۲-۳) نشریه ۳۶۰ در ترکیب بارگذاری ثقلی و جانبی، حد بالا و پایین اثرات بار ثقلی  $Q_G$  از روابط زیر محاسبه شده است:

$$Q_G = 1/1[Q_D + Q_L] \quad (1)$$

$$Q_G = 0/9Q_D \quad (2)$$

که در آن  $Q_D$  بار مرده و  $Q_L$  معادل ۲۵٪ بار زنده طراحی کاهش نیافته است.

تعریف حالت بارگذاری جانبی: بر اساس بند (۳-۱-۳-۴-۳) نشریه ۳۶۰ بار جانبی در مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که هنگام زلزله رخ خواهد داد، باشد و حالت‌های بحرانی تغییر شکل و نیروهای داخلی را در اعضا ایجاد نماید. توزیع بار جانبی باید متناسب با دو نوع توزیع زیر بر سازه اعمال شود:

۱- توزیع نوع اول: توزیع متناسب با شکل مد اول (اصلی) ارتعاش در جهت مورد نظر

۲- توزیع نوع دوم: توزیع یکنواخت که در آن بار جانبی متناسب با وزن هر طبقه محاسبه می‌شود.

جدول ۴. مقدار تغییر مکان هدف سازه‌های مورد بررسی به صورت مستقیم (با استفاده از نشریه ۳۶۰).

Table 4. The amount of target displacement of the studied structures directly (using 360 publication)

تغییر مکان هدف (m)	سازه
۰/۹۲	A
۱/۲۷	B
۱/۱۱	C
۱/۱۳	D

با توجه به اینکه در نرم‌افزار Perform 3D برای مهاربندها مفصل پلاستیک تعریف نمی‌شود، در شکل ۹ مقدار نیاز به ظرفیت هر یک از اعضای سازه با رنگ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود اعضای مهاربندی نقش مهمی در تحمل نیروی محوری ایفا می‌کنند. اعضای قطری در مدل C نسبت به مدل D نیروی بیشتری ایجاد شده، در واقع از ظرفیت آن برای مقاومت در برابر بار جانبی استفاده بیشتری شده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل C نسبت به مدل D عملکرد بهتری در مقابله با نیروهای جانبی دارد.

در هر چهار مدل مقدار جابجایی تقاضای به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی کمتر از مقدار جابجایی نسبی هدف (به دست آمده از نشریه ۳۶۰) بوده است، بنابراین سازه‌ها جوابگوی سطح عملکرد در نظر گرفته شده (LS) بوده است.

#### ۴-۵- منحنی ظرفیت

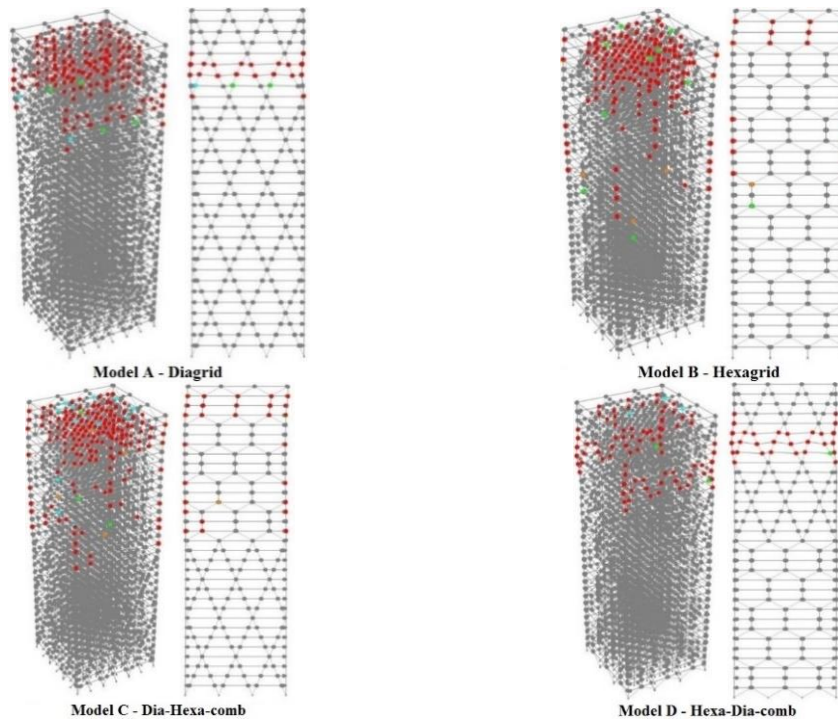
مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان سازه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سازه هگزاگرید (مدل B) و سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) رفتار غیرخطی داشته و منحنی پوش‌آور آن‌ها وارد ناحیه غیرارتجاعی شده است اما در سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید سازه رفتار کاملاً خطی داشته است. هر یک از نمودارهای نیرو-تغییر مکان را به روش پریستلی و پائولی دو خطی نموده و مقادیر سختی، مقاومت جانبی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار هر یک از مدل‌ها را محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است [۲۶-۲۴]، که در ادامه نتایج هر یک از آن‌ها شرح داده شده است.

#### ۴-۳- محاسبه‌ی تغییر مکان هدف

تغییر مکان هدف هر یک از مدل‌ها به صورت مستقیم (بر اساس فرمول نشریه ۳۶۰) محاسبه شده است. تغییر مکان هدف هر یک سازه‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

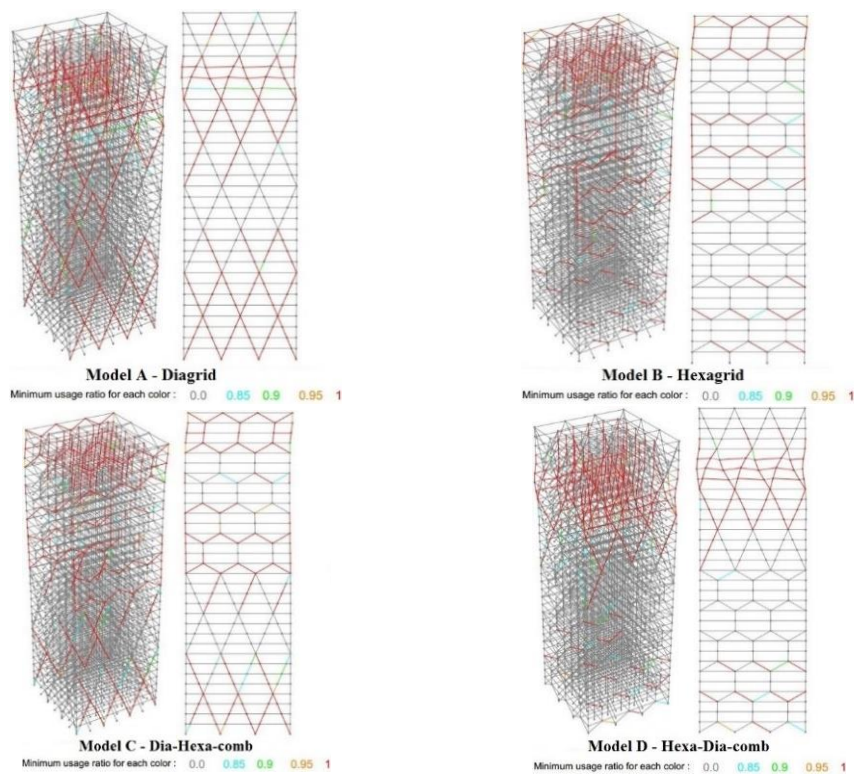
#### ۴-۴- حوه توزیع مفاصل پلاستیک

در شکل ۸ محل تشکیل مفاصل پلاستیک و توزیع آن‌ها در ارتفاع هر چهار سازه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل A (سیستم دیاگرید) مفاصل پلاستیک کمتری نسبت به مدل B (سیستم هگزاگرید) تشکیل شده است، سیستم دیاگرید رفتار سخت‌تر و جذب انرژی کمتری نسبت به سیستم هگزاگرید دارد، بنابراین انرژی بیشتری توسط سازه هگزاگرید نسبت به سازه دیاگرید در اثر بارهای وارده جذب شده و در نتیجه سازه هگزاگرید شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سازه دیاگرید دارد. همچنین نحوه توزیع و پراکندگی مفاصل در هر چهار سازه تقریباً به یک شکل بوده به طوری که تمرکز مفاصل در طبقات بالا ایجاد شده با این تفاوت که در سازه‌های مدل C و D توزیع و پراکندگی مفاصل بیشتر بوده و نشان دهنده این است که عملکرد بهتری در مقابل بارهای جانبی دارد. تعداد مفاصل ایجاد شده در سازه مدل C نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. همچنین در شکل ۸ به وضوح قابل مشاهده است که در مدل C مفاصل پلاستیک بیشتری نسبت به مدل D ایجاد شده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل C دارای سختی کمتر و شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتری نسبت به مدل D است. مقدار ضریب شکل‌پذیری، مقاومت و سختی در بخش‌های بعدی محاسبه خواهد شد.



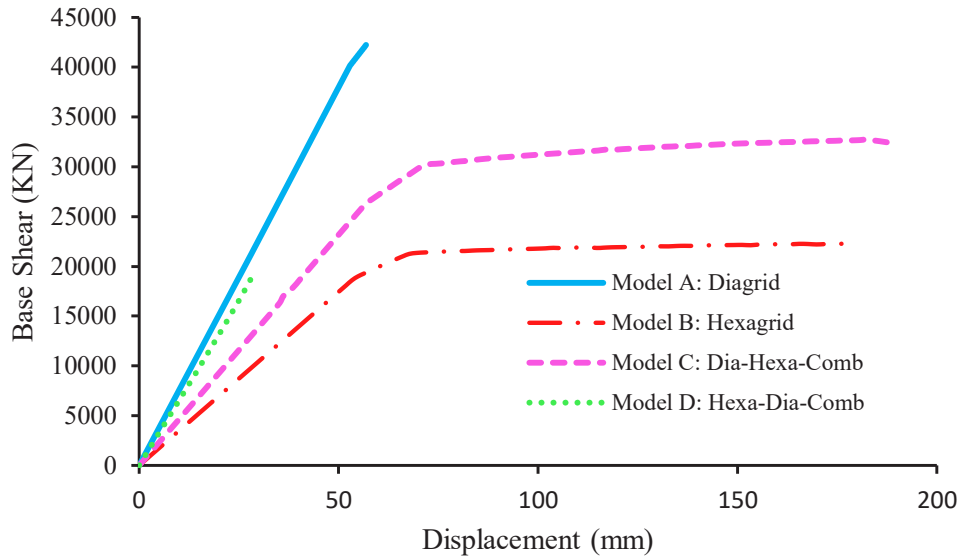
شکل ۸. نحوه توزیع مفاصل پلاستیک در سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 8. How to distribute plastic hinges in the studied structures



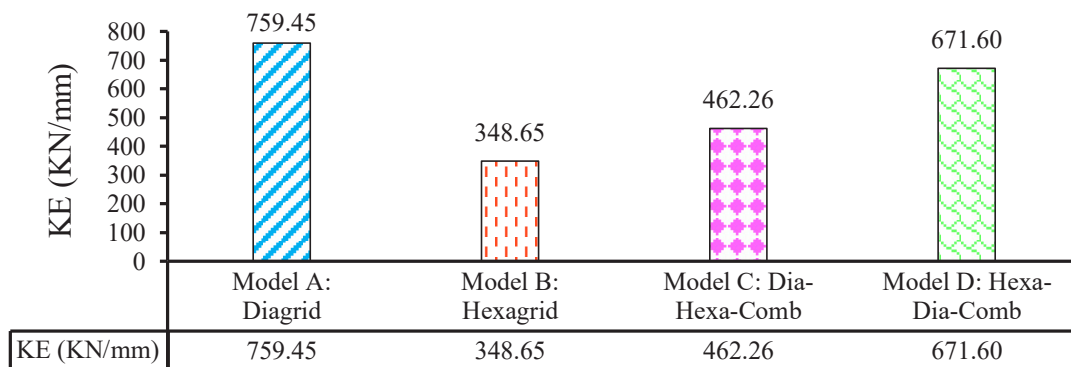
شکل ۹. نسبت استفاده از اعضای سازه.

Fig. 9. Ratio of use of structure's member



شکل ۱۰. مقایسه منحنی ظرفیت سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 10. Comparison of the capacity curve of the studied structures



شکل ۱۱. سختی اولیه سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 11. Initial stiffness of the studied structures

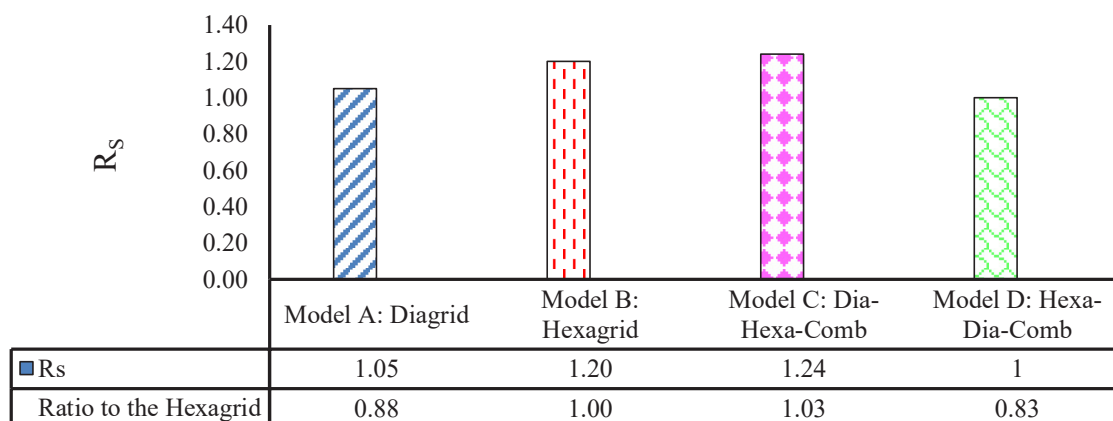
به سایر مدل‌ها بیشتر می‌باشد، همچنین سازه هگزاگرید با کمترین شیب منحنی ظرفیت دارای سختی کمتری نسبت به سایر سازه‌ها می‌باشد. سختی مدل‌های C و D بینابین سختی مدل‌های دیاگرید و هگزاگرید می‌باشد.

#### ۴-۷- مقاومت جانبی

مقاومت جانبی به دست آمده برای هر یک از سازه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقاومت جانبی سازه برابر با نسبت برش پایه ماکزیمم به برش پایه هنگامی که اولین مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود، می‌باشد بنابراین هر

#### ۴-۶- سختی جانبی

مقادیر سختی اولیه مدل‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سازه دیاگرید (مدل A) دارای بیشترین سختی و سازه هگزاگرید (مدل B) دارای کمترین سختی جانبی می‌باشد، و سختی مدل D نسبت به سختی مدل C بیشتر است. در شکل ۱۰ شیب هر یک از منحنی ظرفیت سازه‌ها نشان دهنده سختی آن سازه می‌باشد، از مقایسه شیب هر یک از منحنی پوش‌آور سازه‌ها نیز می‌توان نتیجه گرفت که سازه دیاگرید که منحنی ظرفیت آن دارای بیشترین شیب است، سختی آن نسبت



شکل ۱۲. ضریب اضافه مقاومت سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 12. Over-strength factor of the studied structures

مقدار شکل‌پذیری هر یک سازه‌های مورد بررسی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. سیستم هگزاگرید نسبت به سایر مدل‌ها دارای شکل‌پذیری بیشتری می‌باشد، در واقع در این سازه با ایجاد مفاصل پلاستیک بیشتر، قابلیت آن برای تحمل تغییر شکل‌های زیاد در این سیستم بیشتر است. شکل‌پذیری مدل A و مدل D تقریباً برابر شده است. شکل‌پذیری این دو سیستم کم است، در واقع قابلیت جذب انرژی در این دو مدل کمتر می‌باشد. میزان شکل‌پذیری مدل C که در طبقات پایین آن دارای سیستم دیاگرید و در طبقات بالا دارای سیستم هگزاگرید می‌باشد، کمتر از مدل B (سازه هگزاگرید) و بیشتر از مدل A و D می‌باشد. شکل‌پذیری این مدل اختلاف اندکی با مدل هگزاگرید دارد، بنابراین این سیستم رفتار مناسبی در برابر نیروهای جانبی دارد.

#### ۴-۹- انرژی جذب شده

میزان انرژی جذب شده سازه که برابر است با مساحت سطح زیر نمودار برش پایه-تغییر مکان در جدول ۵ محاسبه شده و با میزان انرژی جذب شده توسط سازه هگزاگرید مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان انرژی جذب شده توسط مدل C ۱/۵ برابر میزان انرژی جذب شده توسط سازه هگزاگرید می‌باشد، بنابراین این مدل نسبت به سایر مدل‌ها از نظر شکل‌پذیری رفتار بهتری در برابر نیروهای جانبی دارد. سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید (مدل D) کمترین میزان جذب انرژی را نسبت به سایر مدل‌ها دارد، بنابراین این سازه رفتاری ترد در برابر نیروهای جانبی خواهد داشت.

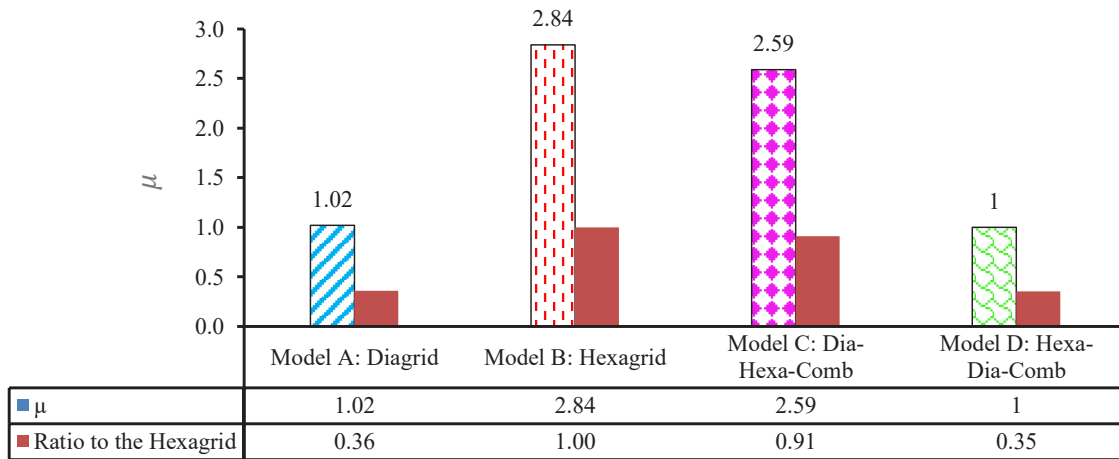
چه اختلاف دو مقدار برش پایه ماکزیمم و برش پایه تشکیل اولین مفصل پلاستیک بیشتر باشد سازه مقاومت جانبی بیشتری دارد. مقاومت جانبی سازه هگزاگرید بیشتر از مقاومت جانبی سازه دیاگرید می‌باشد، بنابراین ظرفیت باربری بیشتری برای تحمل نیروهای جانبی دارد. سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) دارای بیشترین مقاومت جانبی می‌باشد در واقع ناحیه غیرخطی در منحنی ظرفیت آن بیشتر است و در آن مفاصل پلاستیک بیشتری ایجاد می‌شود، بنابراین مدل C دارای بیشترین ظرفیت باربری نهایی برای تحمل نیروهای جانبی می‌باشد.

ضریب اضافه مقاومت سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید برابر با یک به دست آمده است، همانطور که در منحنی ظرفیت آن شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود این سازه رفتار خطی دارد و منحنی پش‌آور آن وارد ناحیه غیرخطی نشده، بنابراین برش پایه ماکزیمم آن برابر با برش پایه هنگامی که اولین مفصل پلاستیک در آن تشکیل شده، می‌باشد، این مدل در برابر نیروهای زلزله وارده شده رفتار مناسبی ندارد.

#### ۴-۸- شکل‌پذیری

قابلیت یک سازه در داشتن تغییر مکان بالاتر از حد خطی و جذب انرژی در تغییر شکل‌های بزرگ به وسیله رفتار غیرخطی را شکل‌پذیری می‌گویند. نسبت شکل‌پذیری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \text{ و } \mu_{max} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (۳)$$



شکل ۱۳. شکل‌پذیری سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 13. Ductility of the studied structures

جدول ۵. مقایسه میزان انرژی جذب شده سازه‌های مورد بررسی.

Table 5. Comparison of the amount of energy absorbed by the studied structures

مدل D	مدل C	مدل B	مدل A	انرژی جذب شده (kN)
$0.27 \times 10^6$	$4.93 \times 10^6$	$3.29 \times 10^6$	$1.22 \times 10^6$	
۰/۰۸	۱/۵۰	۱/۰۰	۰/۳۷	نسبت به هگزاگرید

جدول ۶. ضریب رفتار سازه‌های مورد بررسی.

Table 6. Behavior factor of studied structures

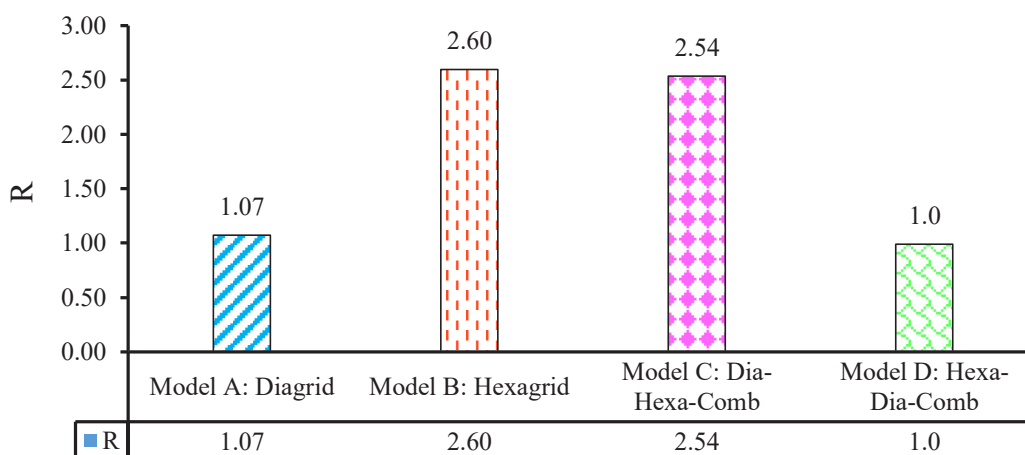
مدل D	مدل C	مدل B	مدل A	
۱/۰۰	۱/۲۴	۱/۲۰	۱/۰۵	$R_s$
۱/۰۰	۲/۰۴	۲/۱۶	۱/۰۲	$R_\mu$
۱/۰۰	۲/۵۴	۲/۶۰	۱/۰۷	$R = R_s \times R_\mu$

در واقع دو مدل B و C شکل‌پذیری و مقاومت بیشتری دارند و در برابر نیروهای جانبی رفتار لرزه‌ای بهتری خواهند داشت. ضریب رفتار سازه ضریبی است که عملکرد غیرارتجاعی سازه را در بر دارد و به ضریب اضافه مقاومت و ضریب شکل‌پذیری وابسته است. سیستم‌های دیاگرید و هگزاگرید به صورت خرابایی عمل کرده و شکل‌پذیری و اضافه مقاومت زیادی ندارند از این رو ضریب رفتار مقدار کمی به دست آمده است.

۴-۱۰- ضریب رفتار

ضریب رفتار هر سازه از ضرب مقدار ضریب اضافه مقاومت در ضریب شکل‌پذیری آن سازه محاسبه می‌شود، به طور کلی افزایش شکل‌پذیری و مقاومت دو عامل مهم در افزایش ضریب رفتار یک سازه هستند. مقادیر ضریب رفتار سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۶ و شکل ۱۴ آورده شده است. ضریب رفتار دو مدل A و D و همچنین دو مدل B و C اختلاف اندکی با یکدیگر دارند. دو مدل B و C ضریب رفتار بیشتری دارند.





شکل ۱۴. ضریب رفتار سازه‌های مورد بررسی.

Fig. 14. Behavior factor of studied structures

می‌باشد، بنابراین ظرفیت باربری آن نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. مدل D مقاومت جانبی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. مقاومت جانبی سازه هگزاگرید نسبت به سازه دیاگرید بیشتر است.

- شکل‌پذیری سازه هگزاگرید نسبت به سایر سازه‌ها بیشتر است. مدل D دارای کمترین میزان شکل‌پذیری می‌باشد، این مدل به دلیل رفتار ترد و شکل‌پذیری کم برای مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا توصیه نمی‌شود. سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) شکل‌پذیری بیشتری از سازه دیاگرید دارد.

- مدل‌های B و C ضریب رفتار بیشتری نسبت به مدل‌های A و D دارند.

- وزن کل ساختمان سازه‌های به ترتیب دیاگرید و سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) نسبت به سایر مدل‌ها کمتر است بنابراین این دو سازه از نظر صرفه اقتصادی مناسب‌ترند.

با توجه به اینکه سازه مدل C ترکیبی از سازه‌های دیاگرید و هگزاگرید می‌باشد لذا کلیه ویژگی‌های مناسب لرزه‌ای این دو نوع سیستم را در خود جمع کرده به دلیل داشتن مقاومت جانبی بیشتر، سختی و شکل‌پذیری متوسط نسبت به سازه‌های دیاگرید و هگزاگرید دارای عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تری است و همچنین از نظر صرفه اقتصادی و عملکرد معماری مطلوب استفاده از این سازه ترکیبی برای سازه‌های بلند مرتبه ترجیح داده می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد لرزه‌ای چهار مدل سیستم سازه‌ای دیاگرید (مدل A)، سیستم هگزاگرید (مدل B)، سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) و سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید (مدل D) مقایسه شده است. سازه‌ها مطابق با آیین‌نامه AISC360-10 [۱۷] و با استفاده از تحلیل دینامیکی خطی (طیفی) طراحی شده است و رفتار لرزه‌ای آن‌ها در برابر بارهای جانبی با کمک تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) از نظر تغییر مکان جانبی نسبی، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب رفتار با یکدیگر مقایسه شده است و همچنین کارایی سازه‌ها از نظر ظرفیت باربری و صرفه اقتصادی بررسی شده است. نتایج زیر از مطالعات عددی انجام گرفته در این پژوهش حاصل شده‌اند:

- میزان تغییر مکان جانبی سازه دیاگرید کمتر از سازه هگزاگرید است و تغییر مکان جانبی دو سازه ترکیبی بینابین دو سازه دیاگرید و هگزاگرید می‌باشد. مدل D تغییر مکان جانبی کمتری نسبت به مدل C دارد.

- سازه دیاگرید و هگزاگرید به ترتیب دارای بیشترین و کمترین سختی نسبت به سایر سازه‌ها می‌باشند. سختی سازه ترکیبی هگزاگرید-دیاگرید (مدل D) نسبت به سازه ترکیبی دیاگرید-هگزاگرید (مدل C) بیشتر است.

- مدل C دارای مقاومت جانبی بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها

- Structures. 15(3) (2015) 703-717.
- [12] K. Kamath, S. Hirannaiah, J.C.K.B. Noronha., An analytical study on performance of a diagrid structure using nonlinear static pushover analysis, *Perspectives in Science*. 8 (2016) 90-92.
- [13] H. Tripathi, S. Singla., Diagrid structural system for RC framed multistory buildings, *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 7(6) (2016) 356-362.
- [14] S. Sadeghi, F.R. Rofooei., Quantification of the seismic performance factors for steel diagrid structures, *Journal of Constructional Steel Research*. 146 (2018) 155-168.
- [15] N. Mashhadiali, A. Kheyroddin., Quantification of the seismic performance factors of steel hexagrid structures, *Journal of Constructional Steel Research*. 157 (2019) 82-92.
- [16] V. Mohsenian, S. Padashpour, I. Hajirasouliha., Seismic reliability analysis and estimation of multilevel response modification factor for steel diagrid structural systems, *Journal of Building Engineering*. 29 (2020) 101168.
- [17] Ministry of Roads and Urban Development, Deputy of Housing and Construction, National Building Regulations, Topic 6, Loads on buildings, third edition (2013). (In Persian)
- [18] Road, Housing and Urban Development Research Center, Earthquake Design Regulations, Standard 2800, Fourth Edition, (2014). (In Persian)
- [19] National Research Council of Canada, National Building Code of Canada - Part 4, Ottawa, (2015).
- [20] ANSI/AISC-360-10, Specification for Structural Steel Buildings, Illinois 60601-1802, American Institute of Steel Construction, Chicago, (2010).
- [21] Ministry of Roads and Urban Development, Deputy of Housing and Construction, National Building Regulations, Topic 10, Design and Execution of Steel Buildings, Fourth Edition, (2013). (In Persian)
- [22] Ministry of Roads and Urban Development, Deputy of Housing and Construction, National Building Regulations, Topic 9, Design and Execution of Reinforced Concrete Buildings, Fourth Edition, (2013). (In Persian)
- [1] K. Moon., Design and construction of steel diagrid structures, NSCC, School of Architecture, Yale University, New Haven, USA, (2009).
- [2] C. Huang, X.L. Han, J. Ji, J.M. Tang., Behavior of concrete-filled steel tubular planar intersecting connections under axial compression, Part 1: Experimental study, *Engineering Structures*. 32(1) (2010) 60-68.
- [3] J. Kim, Y.H. Lee., Seismic performance evaluation of diagrid system buildings, 2nd Specialty Conference on Disaster Mitigation, (2010).
- [4] W. Baker, C. Besjak, M. Sarkisian, P. Lee, C.S. Doo., Proposed methodology to determine seismic performance factors for steel diagrid framed systems, Council on Tall Buildings and Urban Habitat Technical Paper, (2010).
- [5] Y.J. Kim, M.H. Kim, I.Y. Jung, Y.K. Ju, S.D. Kim., Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures, *Engineering Structures*. 33(7) (2011) 2134-2144.
- [6] J. Lee, J. Kong., Seismic Performance Evaluation of Tall Buildings with Axi-symmetric Plans, 15 WCEE LISBOA, (2012).
- [7] K. Jani, P.V. Patel., Analysis and design of diagrid structural system for highrise steel buildings, *Procedia Engineering*. 51 (2013) 92-100.
- [8] K. Moon., Optimal structural configurations for tall buildings, In Proceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13) (pp. G-4), (2013).
- [9] Y. Zhang., Seismic analysis of diagrid structural frames with shear-link fuses devices, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 12(3) (2013) 463-472.
- [10] D. Varkey, M. George., Dynamic Analysis of Diagrid System With Complex Shape, *JISET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 3(8) (2015) 2348 – 7968.
- [11] S.H. Lee, S.J. Lee, J.H. Kim, S.M. Choi., Mitigation of stress concentration in a diagrid structural system using circular steel tubes, *International Journal of Steel*

- degree freedom bilinear systems); Report No., EERC 2003-09, AT Earthquake Engineering Research; University of Berkeley, (2003).
- [27] S.M. Hosseini Bai, M. Gholamzadeh., Double linearization of the covering curve and determination of behavior coefficient by Chopra method, Third Annual Conference on Architectural, Urban Planning and Urban Management Research, Shiraz, (2017). (In Persian).
- [23] President Deputy Strategic Planning and Control (Publication No. 360), instructions seismic retrofitting existing buildings, (2013). (In Persian)
- [24] FEMA356, Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, (2000).
- [25] ATC 19, Structural response modification factor, Applied Technology Council NO. 19, (1995).
- [26] A.K. Chopra, C. Chintanapakdee., Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures (single

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*H. Saeidi Nezhada, F. Omidinasabb, M. Hosseinic, Study on the combination of Diagrid and Hexagrid structural systems for tall buildings, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3617-3634.*

**DOI:** 10.22060/ceej.2022.4803.7183



