نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، (پیاپی ۳۸): صص ۵۹-۴۳

معرفی سیستم سازه‌ای دیاگرید

حدیث سعیدی‌نژاد[۱]، فریدون امیدی‌نسب[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

چکیده

امروزه تقابل بسیار نزدیک سازه و معماری، منجر به ابداع سیستم‌های سازه‌ای نوینی شده است به‌گونه‌ای که به نیازهای سازه‌ای و معماری به خوبی پاسخگو می‌باشد. در سال‌های اخیر سیستم سازه‌ای دیاگرید به‌علت کارایی سازه‌ای و پتانسیل زیباشناختی ارائه شده توسط پیکربندی هندسی منحصر به فرد آن مورد توجه بسیاری از معماران و مهندسان قرار گرفته است. در این مطالعه ویژگی‌های سازه‌ای و معماری سیستم دیاگرید مورد بحث قرار گرفته است. همچنین با شرح مطالعات انجام‌شده در زمینه سیستم دیاگرید، چالش‌های ساخت و طراحی بهینه پیکربندی هندسی این سیستم سازه‌ای به‌طور کامل بررسی شده است. این سیستم دارای سختی و مقاومت بیشتر و تغییرمکان جانبی کمتری در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای متداول می‌باشد. از مزایای دیگر آن می‌توان به نمای زیبا، انعطاف‌پذیری در طرح‌های معماری، امکان ایجاد فرم‌های آزاد و پیچیده و نامنظم در ساختمان‌ها و کاهش مصالح مصرفی اشاره نمود. با توجه به نتایج حاصل از این بررسی می‌توان اذعان داشت که سیستم سازه‌ای دیاگرید یکی از کارآمدترین سیستم‌ها در ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ساختمان‌های بلند مرتبه، سیستم‌های سازه‌ای، سیستم دیاگرید، نیروی جانبی

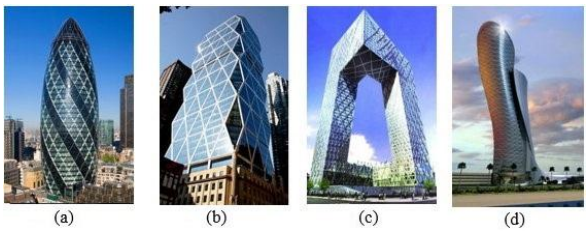
۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه اصفهان
۲- استادیار، دانشگاه لرستان، (omidinasab.f@lu.ac.ir) - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

امروزه احداث ساختمان‌های بلند به‌دلیل افزایش روزافزون جمعیت و استفاده بهینه از فضاهای شهری امری ضروری می‌باشد. از دیدگاه پدافند غیرعامل ساختمان‌های بلندمرتبه به‌عنوان مراکز جاذب جمعیت از یک سو و از طرفی ایجاد فشار روانی و روحی بر شهرها با توجه به نماد بودن این ساختمان‌ها مورد حمله گروه‌های تروریستی و همچنین کشورهای متخاصم در جنگ‌ها قرار می‌گیرند [۱]. امنیت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای انسان، اهمیت دفاع را نشان می‌دهد و طراحی و معماری یکی از ابزارهای دفاعی انسان است [۱]. طراحی درست ساختمان و نحوه ارتباط فضاهای مختلف آن، امکان نجات جان افراد را فراهم می‌کند و میزان تلفات و خسارات را کاهش می‌دهد. در صورتی‌که در طراحی سازه، انتخاب طرح هندسی بهینه، موقعیت بازشوها، دسترسی‌ها و پیش‌بینی فضاهای امن در ساختمان اصول پدافند غیرعامل رعایت گردد، بهره‌وری در برابر خطرات افزایش می‌یابد [۲]. رعایت تمام موارد ذکرشده مستلزم انتخاب سیستم سازه‌ای می‌باشد که بتواند نیازهای معماری و سازه‌ای را مطابق اصول پدافند غیرعامل پاسخگو باشد.

همزمان با دسترسی مهندسین سازه و زلزله به فناوری‌های نوین ساخت و ساز شهری در کنار توسعه نرم‌افزارهای تخصصی در زمینه تحلیل و طراحی ساختمان‌ها، سیستم‌های سازه‌ای متعددی برای سازه‌های بلند ابداع شده است. سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی که به‌طور گسترده در سازه‌ها استفاده می‌شوند عبارتند از: سیستم قاب خمشی، دیوار برشی، قاب مهاربندی‌شده، سیستم لوله قابی، لوله مهاربندی‌شده، لوله در لوله و لوله دسته‌بندی‌شده.

در سال‌های اخیر سیستم سازه‌ای دیاگرید به‌دلیل کارایی سازه‌ای و معماری ارائه‌شده توسط پیکربندی هندسی منحصربه فرد آن به‌طور گسترده‌ای در ساختمان‌های بلند استفاده شده است. نمونه‌های مشهوری از سازه‌های دیاگرید در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): a) برج Swiss Re در لندن، b) برج Hearst در نیویورک، c) دفتر مرکزی CCTV در پکن، d) برج Capital Gate در ابوظبی.

سازه دیاگرید یک سیستم متشکل از اعضای قطری و تیرهای افقی می‌باشد که یکدیگر را در گره‌ها قطع می‌کنند و سطح را با مثلث‌هایی پیکربندی می‌کنند. در واقع سیستم دیاگرید یک پوسته مشبک در پیرامون سازه می‌باشد. سیستم دیاگرید مشابه سیستم لوله مهاربندی‌شده می‌باشد با این تفاوت که در این سیستم ستون‌های عمودی در پیرامون سازه حذف شده است، بنابراین، عضوهای مورب علاوه بر بارهای جانبی، بار ثقلی را نیز به‌علت پیکربندی مثلثی خود حمل می‌کنند.

در سازه دیاگرید صلبیت برشی و خمشی توسط عملکرد محوری المان‌های مورب تأمین می‌شود، لذا این قابلیت سازه‌ای باعث کاهش تعداد ستون‌های داخلی می‌شود. علاوه براین سازه دیاگرید به هسته با سختی برشی بالا نیاز ندارد، زیرا برش جانبی توسط اعضای قطری قرار داده شده در پیرامون سازه حمل می‌شود.

سیستم دیاگرید بدون ستون‌های عمودی دارای مزایای از جمله ظرافت، انعطاف‌پذیری در معماری، کاهش مصالح مصرفی، امکان استفاده از نور طبیعی و بهره‌گیری بیشتر از مناظر بیرون می‌باشد. همچنین این سیستم سازه‌ای با توجه به پیکربندی مثلثی خود قادر به شکل‌دهی ساختمان‌ها با اشکال پیچیده، کج و فرم آزاد می‌باشد، که سبب برجسته‌شدن آن از بافت شهری متعامد می‌شود.

۱-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق

با توجه به شرایط موجود در کشورهای همسایه و تهدیدات از سوی کشورهای خارجی و همچنین، قرارگیری کشور ایران بر روی یک از دو کمربند زلزله‌خیز زمین، نیاز به طراحی مطابق با اصول پدافند غیرعامل جهت افزایش پایداری ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها در عرصه ساخت و ساز به‌شدت احساس می‌گردد [۳]. از طرفی یکی از گام‌های اولیه مهم در طراحی سازه‌ها انتخاب سیستم مقاوم جانبی مناسب برای سازه می‌باشد تا علاوه بر پاسخ در برابر بارهای ناشی از انفجار و زلزله شرایط اقتصادی طرح را نیز برآورده سازد [۴]. سیستم سازه‌ای دیاگرید از جمله سیستم‌های مقاوم جانبی نوین در ساختمان‌های بلند می‌باشد که در چند دهه اخیر ابداع شده است. با توجه به اینکه مقالاتی که تاکنون توسط محققین در این مورد انجام شده، هیچ کدام به بررسی این نوع سیستم از نظر مطابقت با اصول و اهداف پدافند غیرعامل نپرداخته‌اند، تصمیم گرفته شد با توجه به اهمیت بحث پدافند غیرعامل در ایمنی و امنیت و کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، به معرفی این سیستم و همچنین به بررسی ویژگی معماری و سازه‌ای آن و میزان تطابق آن با اصول پدافند غیرعامل پرداخته شود.

۱-۲- اهداف تحقیق

هدف از تحقیق حاضر، معرفی سیستم سازه‌ای دیاگرید در ساختمان‌های بلند با توجه به تحقیقات صورت گرفته در مورد این سیستم و بررسی آن مطابق اصول پدافند غیرعامل می‌باشد. در این مطالعه به معرفی مشخصات هندسی، بررسی اثر نیروهای جانبی بر این سیستم، مقایسه آن با سیستم‌های سازه‌ای متداول و بیان مزایا و معایب سیستم سازه‌ای دیاگرید به‌منظور بهتر شناخته شدن این سیستم مقاوم سازه‌ای پرداخته می‌شود.

۱-۳- پیشینه تحقیق

- لئونارد [۵] به بررسی اثر تأخیر برشی و عملکرد سازه‌ای سیستم دیاگرید و مقایسه آن با سیستم لوله قابی پرداخت. ساختمان دیاگرید ۳ برابر بهتر از ساختمان‌های لوله قابی در نسبت تأخیر برشی و انحراف جانبی عمل می‌کند. سیستم دیاگرید به‌دلیل سختی بالاتر اثر تأخیر برشی کمتری از سیستم لوله قابی دارد. به‌طورکلی سیستم دیاگرید دارای عملکرد بهتری نسبت به سیستم لوله قابی می‌باشد.
- چارنیش و مک دانل [۶] به بررسی و کاربرد سیستم سازه‌ای دیاگرید در ساختمان‌های بلند و مطالعه موردی برج باو[1] پرداخته است.
- بیکر و همکاران [۷] یک روش برای تعیین ضرایب عملکرد لرزه‌ای سیستم دیاگرید فولادی پیشنهاد دادند. این روش ترکیبی از دو روش FEMA-450 و ATC-63 می‌باشد.
- جو و همکاران [۸] عملکرد چرخه‌ای گره‌ها در سازه‌های دیاگرید تحت بارهای جانبی ازجمله بارهای باد و زلزله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دو نمونه گره که مقطع اعضای قطری آن‌ها به‌صورت باکس اجرا می‌شود، برای این سازه پیشنهاد دادند و تحت بار دوره‌ای آزمایش نمودند. در نهایت، بر اساس نتایج آزمایش برخی توصیه‌های طراحی گره‌ها برای استفاده در ساختمان واقعی پیشنهاد داده شده است.
- مقدسی و ژانگ [۹] به‌منظور افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت میرایی سیستم دیاگرید یک پیکربندی جدید با دستگاه‌های فیوز لینک برشی[2] قابل تعویض پیشنهاد دادند، که در عناصر فیوز اختصاص داده شده اتلاف انرژی صورت می‌گیرد.
- به‌طورکلی دو مسئله مهم در سیستم دیاگرید کنترل پایداری ستون‌های ثقلی و کاهش یا اجتناب از تغییرشکل‌های خمشی اعضای قطری در امتداد طول آن‌ها می‌باشد. از این رو، مانتیوری و همکاران [۱۰] یک چارچوب برای ارزیابی کامل رفتار موضعی اعضای قطری و ستون‌های ثقلی در ارتفاع هر مدول دیاگرید تعریف کردند و یک روش برای بررسی ضرورت سیستم مهاربندی ثانویه خاص[3] (SBS) ارائه دادند.
- جینکو کیم و کوانفو کوان [۱۱] به ارزیابی ظرفیت سازه‌های دیاگرید فولادی منظم و پیچ‌خورده در برابر خرابی پیش‌رونده بر اساس سناریو حذف ستون دلخواه توسط آنالیز استاتیکی و دینامیکی غیرخطی پرداختند، و همچنین ظرفیت مقاوم بار لرزه‌ای سازه‌ها را با استفاده از آنالیز شکنندگی و ضوابط ATC 63 بررسی نمودند. نتایج آنالیزهای سازه‌های دیاگرید ۳۶ طبقه نشان داد که با افزایش زاویه پیچش، پتانسیل خرابی پیش‌رونده کاهش می‌یابد و شکنندگی لرزه‌ای یا احتمال شکست کاهش یافته است.
- جو و همکاران [۱۲] نمونه‌هایی از گره دیاگرید با جان پیوسته تحت بارهای دوره‌ای مورد آزمایش قرار دادند. روش‌های جوشکاری و جزئیات طراحی به‌عنوان پارامترهای آزمایش انتخاب شدند. اثرات روش‌های جوشکاری و جزئیات طراحی بر روی سختی اولیه و تنش تسلیم قابل توجه نبوده است. هرچند آن‌ها اثر قابل توجهی بر روی حالت گسیختگی و اتلاف انرژی در گره‌ها داشته است.
- لی [۱۳] جزئیات سازه‌ای دیاگرید با لوله‌های فولادی X شکل با استفاده از فولاد HAS 800 با مقاومت کششی و شکل‌پذیری بالا به‌عنوان یک نمونه اصلاح‌شده از دیاگرید اصلی پیشنهاد داده است و برتری اقتصادی و سازه‌ای دیاگرید محدب با استفاده از بسته نرم‌افزار تجاری آباکوس برای آنالیزهای پوش‌آور استاتیکی غیرخطی تأیید شده است.
- باربوسا و رمضان [۱۴] دو راه‌حل طراحی جدید متشکل از یک یا دو واحد میراگر جرمی تنظیم‌شده[4] اصطکاکی برای کاهش تغییرمکان‌های بزرگ ممکن و تقاضای برش

[1] Bow Tower
[2] Shear-Link Fuse devices
[3] Secondary bracing system
[4] Tuned Mass Damper

پایه‌ای که سازه‌های دیاگرید ممکن است تحت زمین لرزه‌های بزرگ متحمل شوند ارائه دادند. در راه‌حل اول، یک TMD در چهار طبقه بالای ساختمان (جایی که مود اول بیشترین تغییرمکان را دارد) قرار داده شده است. در راه‌حل دوم، یک سیستم TMD در اواسط ارتفاع ساختمان (جایی که مود دوم بیشترین جابه‌جایی را دارد) اضافه شده است.

- شاهانا و کومار در سال ۲۰۱۵ [۱۵] سازه‌های دیاگرید بتنی با و بدون ستون‌های گوشه توسط نرم‌افزار STAAD.Pro مدل‌سازی و آنالیز کردند و با مقایسه نتایج آنالیز نتیجه گرفتند که رفتار سازه بدون ستون گوشه مؤثرتر از دیاگرید با ستون‌های گوشه است.
- هارشا [۱۶] به بررسی و تعیین زاویه بهینه در سازه‌های سیستم دیاگرید پرداخت. به این منظور سازه‌های دیاگرید ۲۴ طبقه با زاویه‌های یکنواخت مختلف با استفاده از نرم‌افزار ایتبس مدل‌سازی و آنالیز غیرخطی شده است. با مقایسه نتایج آنالیز از نظر تغییرمکان طبقه بالا[1]، زمان تناوب، برش های طبقه و شکل‌های مود نشان داد که زاویه بهینه در محدوده ۶۰ تا ۸۰ درجه است.
- سونگ مو چوی و همکاران [۱۷] برای کاهش تمرکز تنش در اتصالات دیاگرید دو روش افزایش ضخامت سرستون[2] و طول آن و توسعه ورق سخت‌کننده را پیشنهاد دادند. بین دو روش پیشنهادشده افزایش ضخامت سرستون از نظر مقدار فولاد و ظرفیت سازه‌ای اتصالات مؤثرتر می‌باشد.
- سید سعید طباطبایی، محمد افشاری، بهادر ضیایی مهر و امید بهار [۱۸] یک سیستم ترکیبی از دو سیستم قاب خمشی و دیاگرید پیشنهاد دادند. آن‌ها مدل سیستم دیاگرید ترکیبی را توسط میزلرزان آزمایش نمودند و سپس با مقایسه رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی با دو سیستم دیگر بر اساس تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی دریافتند که سیستم دیاگرید ترکیبی علاوه بر رفتار محوری دیاگرید، از رفتار خمشی ستون‌های اضافه شده نیز سود می‌برد. در نتیجه عملکرد لرزه‌ای سیستم پیشنهادی مناسب‌تر از دو سیستم دیگر بوده و از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر است.
- کماث، ساچین و نورونیا [۱۹] عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دیاگرید با زوایای مختلف و با نسبت ابعاد متغیر را توسط تحلیل پوش‌آور استاتیکی غیرخطی بررسی نمودند. از منحنی پوش‌آور می‌توان فهمید که برش پایه و سختی جانبی سازه با افزایش نسبت ابعاد کاهش می‌یابد. به‌طورکلی عملکرد سازه تحت تأثیر زاویه مهاربند و نسبت ابعاد می‌باشد.
- آرپیتها، ساهانا و کارتیک [۲۰] به بررسی دو سیستم سازه‌ای لوله مهاربندی‌شده و سیستم دیاگرید با پلان‌های مربع و شش ضلعی پرداختند. با مقایسه نتایج آنالیز دریافتند که سازه با پلان شش ضلعی نسبت به سازه با پلان مربعی سخت‌تر است و سازه دیاگرید در مقایسه با سازه لوله مهاربندی‌شده دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

۲- نقش و اهمیت پدافند غیرعامل

پدافند غیرعامل به‌عنوان یکی از مؤثرترین و پایدارترین روش‌های دفاع در مقابل تهدیدات، همواره مدنظر اکثر کشورهای جهان قرار داشته است. یکی از مأموریت‌های اصلی پدافند غیرعامل کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ایمنی زیر ساخت‌های ملی و مراکز حیاتی، حساس و مهم کشور می‌باشد [۲۱]. اهداف غیرعامل در ۵ حوزه شامل کاهش آسیب‌پذیری، تسهیل در مدیریت بحران، ارتقا پایداری ملی، تداوم عملکرد و افزایش بازدارندگی است [۲۲].

۳- شاخص‌های سازگار با اصول و اهداف پدافند غیرعامل

مهندسان سازه و معمار توانایی پیشگیری از مخاطرات را ندارند اما نقش مهمی در کاهش آسیب‌های ناشی از این مخاطرات دارند. پارامترهای زیادی در مبحث آسیب‌پذیری ساختمان تأثیرگذار است، که در ادامه شاخص‌های آسیب‌پذیری در بخش سازه و معماری ذکر شده است. مهندسان با درنظرگرفتن این شاخص‌ها باید به‌گونه‌ای ساختمان طراحی کنند که در شرایط اضطراری موجب حفظ جان مردم و کاهش آسیب‌پذیری و مدیریت بهینه در شرایط بحرانی گردد. سیستم دیاگرید با پیکربندی مثلثی خود قابلیت پاسخگویی به نیازهای معماری و سازه‌ای با توجه به اصول پدافند غیرعامل دارد [۲۳].

۳-۱- شاخص‌های آسیب‌پذیری در بخش سازه

شاخص‌های آسیب‌پذیری در بخش سازه عبارتند از:

- سقف و کف
- آسیب‌پذیری پوشش
- فونداسیون
- سطح مقطع
- مصالح ساختمانی
- بارگذاری و طراحی

[1] Top story displacement
[2] Cap plate

- سیستم سازه‌ای
- اسکلت سازه

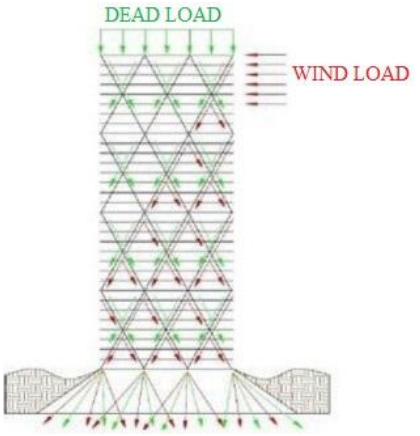
۳-۲- شاخص‌های معماری

شاخص‌های محور فرم معماری سازگاری با اصول پدافند غیرعامل عبارتند از:

- نوع فرم پایه
- ترکیب فرم‌های ساختمان
- شکل سطح پوسته خارجی
- نامنظمی در پلان ساختمان
- نامنظمی در نما
- پیوند یا پیوستگی عناصر معماری با یکدیگر
- نسبت سطح به ارتفاع ساختمان
- میزان تطبیق فرم معماری با فرم محیط
- تطبیق فرم معماری با فرم سازه‌ای
- نوع بام ساختمان
- نحوه مفصل‌بندی گوشه فرم‌ها

۴- سیستم دیاگرید

یکی از سیستم‌های سازه‌ای خارجی سیستم دیاگرید می‌باشد که مشابه یک خرپای فضایی است. این سیستم متشکل از اعضای قطری است که توسط تیرهای مستقیم یا انحنادار به یکدیگر متصل شده‌اند. این تیرها علاوه براینکه تکیه‌گاهی برای قرارگیری سقف می‌باشند از کمانش اعضای قطری نیز جلوگیری می‌کنند. سیستم دیاگرید تکامل‌یافته سیستم لوله مهاربندی‌شده می‌باشد که ستون‌های قائم از پیرامون سازه حذف شده است. بنابراین، اعضای قطری به‌صورت همزمان نیروهای ثقلی و جانبی را تحمل می‌کنند. این سیستم دارای مسیرهای انتقال بار زیاد، پیوسته و غیرمنقطع می‌باشد. توزیع بار در سازه دیاگرید در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): توزیع بار سازه دیاگرید [۱۵].

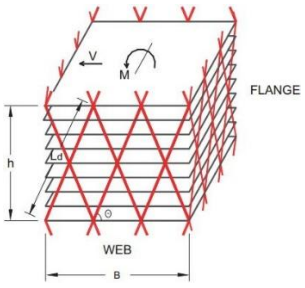
اصطلاح دیاگرید ترکیبی از کلمات diagonal و grid که یکپارچگی خود را از طریق استفاده از شبکه‌های مثلث به‌دست می‌آورد.

سیستم دیاگرید نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای دارای سختی بیشتری می‌باشد. این سیستم به‌دلیل استفاده از اعضای قطری، مقاومت برشی قابل ملاحظه‌ای را نسبت به سیستم با اعضای متعامد ایجاد می‌کند. همچنین قرارگیری این اعضا در پیرامون ساختمان، سبب افزایش کارایی سازه‌ای این سیستم شده است.

۵- مدول‌ها در سازه‌های دیاگرید

یک سازه دیاگرید به‌عنوان یک تیر طره‌ای عمود بر زمین مدل‌سازی شده که به مدول‌ها با توجه به الگوی دیاگرید تکراری تقسیم شده است. هر نمونه دیاگرید الماس‌شکل می‌باشد که شامل تعدادی طبقه می‌باشد. مدول‌ها به چهار گروه مختلف از جمله مدول‌های کوچک (۲-۴ طبقه)، مدول‌های متوسط (۶-۸ طبقه)، مدول‌های بزرگ (بیش از ۱۰ طبقه) و به مدول‌های نامنظم طبقه‌بندی می‌شود.

در شکل (۳) یک مدول دیاگرید ۸ طبقه نشان داده شده است. در سازه دیاگرید تمام سختی جانبی توسط قطرها در محیط ساختمان تأمین می‌شود. بسته به جهت بارگذاری، نماها به‌عنوان صفحات جان (یعنی صفحات موازی با جهت باد) یا صفحات بال (یعنی صفحات عمود بر باد) عمل می‌کنند. انتهای اعضای قطری مفصلی فرض شده، و در نتیجه برش و لنگر تنها از طریق عملکرد محوری قطرها تحمل می‌شود [۲۲-۱۹]. هندسه مدول‌ها یک نقش کلیدی در مفاهیم سازه‌ای، معماری و زیباشناختی این سازه‌ها ایفا می‌کنند [۲۶].



شکل (۳): نمونه دیاگرید ۸ طبقه [۲۴].

۶- طراحی سازه‌ای دیاگرید

به‌طور کلی سه فاکتور مقاومت، سختی و پایداری برای طراحی همه ساختمان‌ها باید مدنظر قرار گرفته بگیرد. در سازه‌های بلند به‌علت تغییرمکان جانبی زیاد ساختمان، ملاحظات سختی و

پایداری کنترل‌کننده طرح می‌گردند، اما در طراحی ساختمان‌های کوتاه مقاومت مصالح سازه‌ای حاکم می‌شود. بر این اساس سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید بر اساس معیار سختی طراحی می‌شوند.

اندازه اولیه اعضا برای هر نمونه دیاگرید را می‌توان با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) ارائه‌شده توسط مون و همکاران در سال ۲۰۰۷ محاسبه نمود.

$$A_{d.w}=\frac{VL_d}{2N_{d.w}EH\gamma\cos^2\theta} \quad (۱)$$

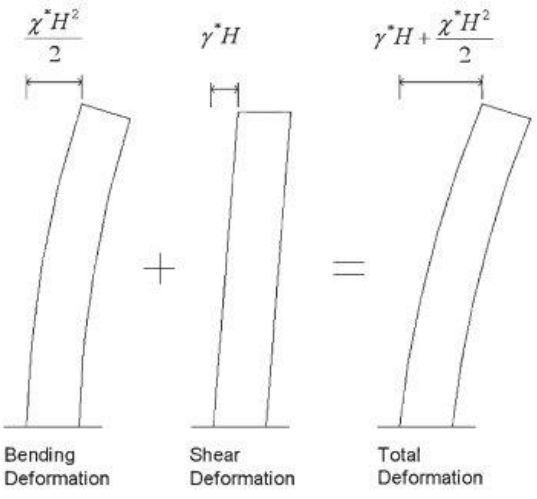
$$A_{d.f}=\frac{2ML_d}{(N_{d.f}+\delta_d)B^2EHx\sin^2\theta} \quad (۲)$$

B عرض ساختمان در جهت نیروی اعمال‌شده، M لنگر خمشی، V نیروی برشی، E مدول الاستیسیته فولاد، H ارتفاع ساختمان، L_d طول عضو مورب، $N_{d.w}$ تعداد قطرها بر روی هر قاب جان، $N_{d.f}$ تعداد قطرها بر روی هر قاب بال، $A_{d.f}$ سطح مقطع هر عضو مورب بر روی بال، $A_{d.w}$ سطح مقطع هر عضو مورب بر روی جان، δ_d سهم قطرهای جان در سختی خمشی، θ زاویه بین اعضای مورب، γ کرنش برشی عرضی و x انحنا می‌باشد.

طراحی مبتنی بر سختی بهینه، با برش یکنواخت و تغییرشکل خمشی تحت بارگذاری طراحی مرتبط می‌باشد. بنابراین، انحراف در بالای سازه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$u(H)=\gamma^*H+\frac{x^*H^2}{2} \quad (۳)$$

که در آن γ^* کرنش برشی عرضی یکنواخت مطلوب، x^* انحنای یکنواخت مطلوب، γ^*H سهم از تغییرشکل برشی و $\frac{x^*H^2}{2}$ سهم ازخمش می‌باشد (شکل ۴).



شکل (۴): تغییرشکل خمشی وبرشی یکنواخت ساختمان‌های بلند [۲۴].

از این رو طراحی از تعیین تغییرشکل برشی و خمشی مطلوب سازه آغاز می‌شود. مون و همکارانش به‌منظور تعیین سهم نسبی برش در مقابل تغییرشکل خمشی، یک فاکتور بدون بعد 's' معرفی نمودند. مقدار 's' برابر است با نسبت تغییرمکان در بالای سازه ناشی از خمش به تغییرمکان ناشی از برش.

$$s=\left(\frac{x^*H^2}{2}\right)/(\gamma^*H)=\frac{Hx^*}{2\gamma^*} \quad (۴)$$

ساختمان‌های بلند بیشتر شبیه تیرهای خمشی رفتار می‌کنند و ساختمان‌های کوتاه بیشتر شبیه تیرهای برشی رفتار می‌کند. در نتیجه ساختمان‌های بلند باید طوری طراحی شوند که تغییرشکل خمشی بیشتری نسبت به ساختمان‌های کوتاه داشته باشند و بالعکس. بیشینه جابجایی مجاز معمولاً به‌عنوان بخشی از کل ارتفاع ساختمان بیان می‌شود.

$$u(H)=\frac{H}{\propto} \quad (۵)$$

با توجه به معادله‌های (۳) و (۴)، معادله (۵) بسط داده می‌شود به:

$$u(H)=(1+s)\gamma^*H=\frac{H}{\propto} \quad (۶)$$

بنابراین،

$$\gamma^*=\frac{1}{(1+s)\propto} \quad (۷)$$

همچنین، x^* با استفاده از معادله (۴) تعیین شده است.

$$x^*=\frac{2\gamma^*s}{H}=\frac{2s}{H(1+s)\propto} \quad (۸)$$

مقادیر معمول برای $\propto$ در همسایگی ۵۰۰ است [۱۹] و [۲۳].

مون بر اساس مطالعاتی که انجام داده، یک معیار ساده برای تعیین نسبت بهینه بین مؤلفه‌های سختی خمشی و برشی به‌عنوان تابعی از لاغری ساختمان $\frac{H}{B}$ برای سازه‌های دیاگرید با نسبت ابعاد بزرگتر از ۶ و دارای زاویه دیاگرید بهینه، به‌صورت زیر پیشنهاد داده است:

$$s=\left(\frac{H}{B}-2\right) \quad \text{for} \quad \frac{H}{B}\geq 6 \quad \text{and} \quad 60^\circ\leq\theta\leq 70^\circ \quad (۹)$$

۷- زاویه بهینه شبکه مورب سیستم دیاگرید

طراحی سازه‌ای سازه‌های دیاگرید به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر زاویه قطرها است. از آنجا که زاویه بهینه ستون‌ها برای بیشینه سختی خمشی ۹۰ درجه است و زاویه بهینه قطرها برای بیشینه سختی برشی حدود ۳۵ درجه است، انتظار می‌رود که زاویه بهینه اعضای قطری سازه‌های دیاگرید بین این زاویه‌ها باشد [۲۴].

از نظر زاویه پیکربندی دیاگرید، سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید را می‌توان به سیستم‌های دیاگرید با زاویه یکنواخت مانند ساختمان Hearst و سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید با زوایای متغیر مانند برج Lotte Super تقسیم بندی نمود.

مطالعات مون در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ در مورد زاویه بهینه در سازه‌های دیاگرید با زاویه متغیر و یکنوخت نشان می‌دهد که برای ساختمان‌های دیاگرید ۴۰، ۵۰ و ۶۰ طبقه، با نسبت ابعاد ارتفاع به عرض کوچکتر از حدود ۷ زاویه دیاگرید یکنواخت بهینه نسبت به تغییر تدریجی زوایای دیاگرید از نظر مصرف مصالح طراحی مقرون به صرفه‌تری ایجاد می‌کند. و برای سازه‌های دیاگرید ۷۰ طبقه و بالاتر، با نسبت ابعادی ارتفاع به عرض بزرگتر از حدود ۷، پیکربندی دیاگرید زاویه متغیر که زوایا به تدریج به سمت پایه ساختمان بیشتر شده نسبت به طراحی دیاگرید با زاویه یکنواخت طراحی اقتصادی‌تری از نظر مصالح مصرفی ایجاد می‌کند. وی برای تحلیل و طراحی سازه‌ها از نرم‌افزار SAP 2000 استفاده کرده است [۲۴] و [۲۸].

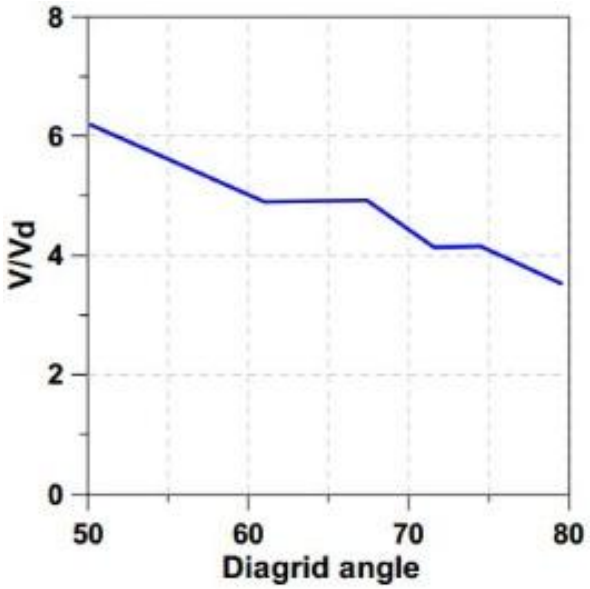
۷-۱- دیاگرید با زوایای یکنواخت

زاویه بهینه دیاگرید وابسته به نسبت ابعاد ارتفاع به عرض ساختمان است. هرچه ارتفاع ساختمان دیاگرید افزایش یابد، زاویه بهینه دیاگرید نیز بیشتر می‌شود و بالعکس، زیرا یک سازه بلند با نسبت ابعادی بالا تمایل به رفتاری مانند تیرهای خمشی دارد و ساختمان‌های کوتاه با نسبت ابعادی پایین رفتاری مانند تیرهای برشی دارند.

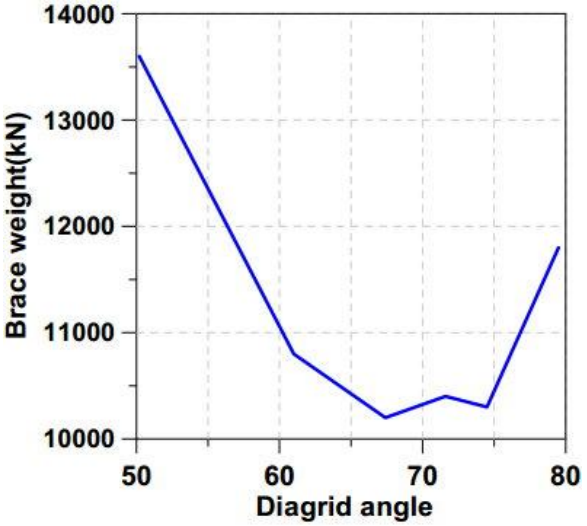
زاویه بهینه دیاگریدهای یکنواخت با نسبت ارتفاع به عرض حدود ۴ تا ۱۰ بین حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه می‌باشد [۲۹].

کیم، جان و لی نیز با آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه‌های دیاگرید ۳۶ طبقه با زوایای مختلف مهاربندهای خارجی [۳۰] با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 نشان دادند که با افزایش زاویه مهاربندها بیشینه برش پایه سازه دیاگرید کاهش می‌یابد (شکل ۵). این بدین معنی است که ظرفیت مقاوم بار جانبی با افزایش زاویه مهاربند کاهش می‌یابد.

چنان‌چه زاویه بین قطرها از مقدار بهینه منحرف شود، مقدار فولاد مورد نیاز برای برآوردن الزامات طراحی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. شکل (۶) وزن کل مهاربندها در سازه‌های دیاگرید با زوایای مختلف مهاربندی مورد نیاز برای مقاومت بارهای طراحی را نشان می‌دهد. می‌توان در آن مشاهده کرد که افزایش زاویه تا ۷۵ درجه در سازه‌های ۳۶ طبقه باعث کاهش وزن مصالح مصرفی می‌شود و بعد از آن وزن مصالح مصرفی افزایش می‌یابد. نیاز به مقدار زیاد فولاد مصرفی در سازه دیاگرید با زاویه کم مهاربند به‌دلیل ناکارآمدی مهاربندها در مقاومت بارثقلی می‌باشد. دلیل دیگر این است که با کاهش زاویه اعضای مورب طول مؤثر کمانش افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاطع بزرگتری برای آن‌ها مورد نیاز است. همچنین دلیل افزایش وزن فولاد مصرفی در سازه دیاگرید با زاویه مهاربند زیاد این است که اعضای قطری با زاویه زیاد مقاومت کمتری در برابر بار جانبی دارند.



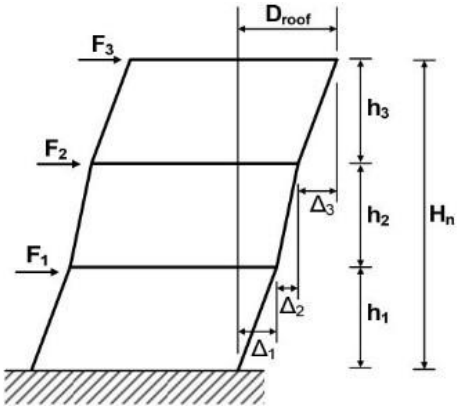
شکل (۵): بیشینه برش پایه سازه‌های دیاگرید با زوایای مهاربندی مختلف [۳۰].



شکل (۶): وزن مهاربندها در سازه‌های دیاگرید با زوایای مهاربند مختلف [۳۰].

کیمورا[1] و همکاران (۲۰۰۲) ضریب تمرکز دریفت[2] (DCF) پیشنهاد داده‌اند (با توجه به شکل ۷) به شرح زیر:

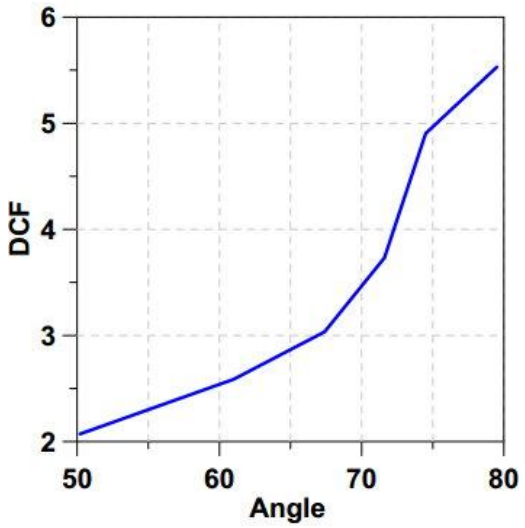
$$DCF=\frac{\max\left(\frac{\Delta_i}{h_i}\right)}{\frac{D_{roof}}{H_n}} \qquad (۱۰)$$



شکل (۷): دریفت جانبی یک سازه تحت اثر نیروی جانبی [۳۰].

Δ_i دریفت درون طبقه‌ای طبقه iام، h_i ارتفاع طبقه iام، H_n ارتفاع سازه و D_{roof} بیشینه تغییرمکان بام می‌باشد.

در شکل (۸) مقدار DCF سازه‌های دیاگرید با زوایای مختلف با توجه به نتایج آنالیز دینامیکی غیرخطی نشان داده شده است که در آن می‌توان مشاهده کرد که با افزایش زاویه مهاربندها مقدار DCF نیز افزایش می‌یابد. کیم، جان و لی بر این اساس نتیجه گرفته‌اند که سازه‌های دیاگرید با زاویه مهاربندی بین ۶۰ تا ۷۰ درجه بیشترین کارایی در مقاومت بار جانبی همچون بارهای ثقلی دارد.

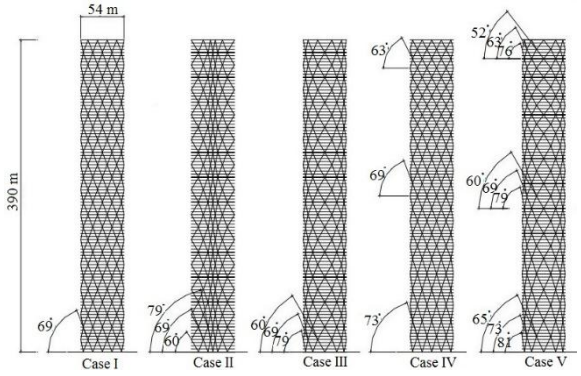


شکل (۸): مقدار DCF در سازه‌های مدل دیاگرید با زوایای مهاربندی مختلف [۳۰].

[1] Kimura
[2] Drift Concentration Factor

۷-۲- دیاگرید با زوایای متغیر

مون در ادامه مطالعاتی که در مورد زاویه بهینه سیستم دیاگرید انجام داده است، در سال ۲۰۱۳ [۲۹] به بررسی پیکربندی بهینه سازه‌های دیاگرید (شکل ۹) که در آن زوایا به‌طور افقی، عمودی یا در هر دوجهت تغییر می‌کند، پرداخته است. مورد I یک سازه دیاگرید با زاویه یکنواخت است. موارد II و III سازه‌های دیاگرید با تغییرات افقی زاویه می‌باشد. مورد IV یک سازه دیاگرید با تغییرات عمودی زاویه با زوایای بیشتر به سمت پایه می‌باشد. مورد V ترکیبی از تغییرات افقی و عمودی زاویه به‌ترتیب موارد III و IV می‌باشد.



شکل (۹): دیاگرید با پیکربندی زاویه مختلف [۲۹].

تحقیق او نشان می‌دهد در ساختمان‌های بلند با تغییر زوایای دیاگرید، بازده سیستم می‌تواند افزایش یابد. چنان‌چه زاویه قطر به سمت گوشه ساختمان کمتر شود سهم قطرهای جان در سختی خمشی افزایش می‌یابد و بالعکس. بنابراین، سختی جانبی مورد III بزرگتر از مورد I می‌باشد، درحالی‌که مورد II کوچکتر از مورد I است.

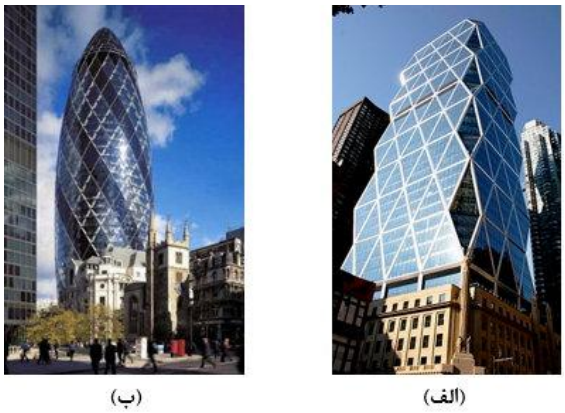
نرخ افزایش نیروهای برشی و لنگرهای خمشی به سمت پایه ساختمان متفاوت است. درحالی‌که نیروهای برشی تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، لنگرهای خمشی به سمت پایه ساختمان به‌شدت افزایش می‌یابد. بنابراین، در طراحی سازه دیاگرید برش بر بخش بالای ساختمان و خمش بر بخش پایین ساختمان حاکم است (مون ۲۰۰۸). در نتیجه سازه دیاگرید با افزایش زاویه قطر به سمت پایه ساختمان مانند مورد IV، می‌تواند نسبت به دیاگرید با زاویه یکنواخت مؤثرتر باشد.

به‌طورکلی با ترکیب سازه‌های دیاگرید با زاویه مهاربندی کمتر به سمت گوشه ساختمان و دیاگرید با زاویه قطر بیشتر به سمت پایه ساختمان، سختی جانبی دیاگریدها می‌تواند به بیشینه برسد. در مورد V کمترین تغییرمکان جانبی به‌عبارتی بزرگترین سختی جانبی ایجاد شده است.

۸- مصالح سازه‌های دیاگرید

سازه‌های دیاگرید از فولاد، بتن و یا ترکیبی از آن‌ها (برای مثال فولاد پرشده از بتن) ساخته می‌شوند.

با توجه به اینکه سیستم دیاگرید بارهای ثقلی و جانبی را به‌طور همزمان انتقال می‌دهند، به‌نظر می‌رسد که به مصالحی نیاز دارد که مقاومت کششی و فشاری را همزمان تأمین کند. فولاد از جمله مصالحی است که از مقاومت کششی و فشاری بالایی برخوردار است. لذا امروزه بیشتر سازه‌های دیاگرید از فولاد ساخته می‌شوند، در سازه‌های دیاگرید فولادی، قطرهای منظم آن‌ها بر روی نما به وضوح مشخص می‌باشد. شبکه‌های فولادی به‌علت ساخت و ساز ساده‌تر و سریع‌تر، قالب ارزان‌تر و سازگاری با مفاهیم پایداری که عوامل حیاتی در طراحی ساختمان‌های بلند هستند محبوب‌تر می‌باشند، اما یکی از معایب آن اتصالات پیچیده آن می‌باشد [۲۶]. ساختمان هرست[1] در نیویورک و سوئیس ری[2] در لندن از جمله سازه‌های دیاگرید فولادی می‌باشند (شکل ۱۰).



(ب) (الف)

شکل (۱۰): الف) برج Hearst، ب) برج Swiss Re.

اگرچه بیشتر نمونه‌های سازه‌های دیاگرید فولادی هستند، رویکرد استفاده از بتن مسلح می‌باشد، که زیبایی‌های معمارانه جدیدی را متفاوت از سازه فولادی به‌وجود می‌آورد. برج‌های O-14 در دبی و COR در میامی از دیاگرید بتن مسلح به‌عنوان سیستم اصلی و مقاوم جانبی استفاده می‌کنند (شکل ۱۱). خواص بتن، الگوهای دیاگرید سازه‌ای در نمای این ساختمان‌ها روان‌تر[3] و نامنظم و متفاوت از ویژگی‌های صریح و بکر دیاگریدهای فولادی می‌باشد. از معایب سازه‌های دیاگرید بتن مسلح قالب‌بندی گران و ساخت و ساز آهسته می‌باشد [۳۱].

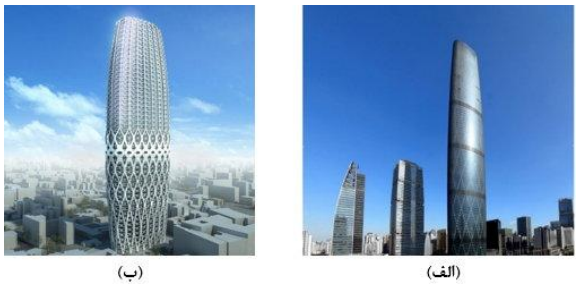
[1] Hears tower
[2] Swiss Re tower
[3] More Fluid

(ب) (الف)

شکل (۱۱): الف) برج O-14، ب) برج COR.

در برج Guangzhou West در گوانگژو و برج Dorobanti در رومانی از مصالح کامپوزیت استفاده شده است (شکل ۱۲).

لوله‌های فولادی پر شده از بتن[4] CFST می‌توانند خواص سازه‌ای بسیار عالی برای مقاومت لرزه‌ای فراهم کند، از جمله مقاومت بالا، شکل پذیری بالا و ظرفیت جذب انرژی زیادی [۳۲]. علاوه براین سختی مطلوب و محافظت در برابر آتش از مزایای دیگر این نوع سازه‌ها می‌باشد.



(ب) (الف)

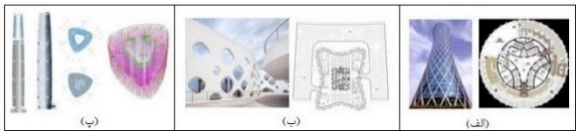
شکل (۱۲): الف) برج Guangzhou West، ب) برج Dorobanti.

۹- شکل پلان سازه‌های دیاگرید

در حالت‌هایی که پلان دارای فرورفتگی باشد شکل پلان از حالت آیرودینامیکی خارج شده و جذب انرژی ناشی از انفجار به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد و همچنین با توجه به زاویه انعکاس امواج انفجار امکان بازگشت دوباره آن‌ها به ساختمان وجود دارد. بنابراین، پلان متقارن بدون فرورفتگی و پیش آمدگی دارای رفتار یکنواخت و بسیار سازگار با اهداف پدافند غیرعامل می‌باشند. پلان سازه دیاگرید اغلب به‌صورت متقارن و با اشکال دایره، مربع، مستطیل یا بیضی می‌باشد، ولی سازه دیاگرید با پلان مثلثی با گوشه‌های گرد و یا با اشکال و منحنی‌های نامتقارن نیز می‌توان ساخته شود، بنابراین، سازه دیاگرید با توجه به این‌که قابلیت ساخته‌شدن با پلان‌های مختلف را دارد میتوان به راحتی آسیب‌های ناشی از موج انفجار را با شکل پلان آن کاهش داد. در

[4] Concrete-Filled Steel Tubular

شکل (۱۳) سازه‌های دیاگرید با پلان‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل (۱۳): الف) برج Tornado با پلان دایره‌ای، ب) برج O-14 با پلان منحنی شکل، پ) برج Guangzhou West با پلان مثلثی [۲۶].

۱۰- فرم هندسی سازه‌های دیاگرید

یکی از عوامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری یک ساختمان در مقابل نیروهای خارجی، فرم هندسی آن می‌باشد. در ساختمان‌های بلند فرم ساختمان باید به‌صورتی باشد که در صورت تخریب باعث مسدود شدن دسترسی به ساختمان و معبر اصلی نگردد. شکل پلکانی ساختمان‌ها تأثیر بسیار زیادی در کاهش میزان آوار ریخته‌شده در معابر دارد. وجود زاویه‌های بادگیر می‌تواند موج شوک انفجار را به دام انداخته و باعث تشدید انفجار گردد و شکل ساختمان با گوشه‌های گرد در کاهش تأثیر موج انفجار و مستهلک کردن آن‌ها مؤثر است [۲].

نتایج مطالعه محققان بر روی سازه‌ها با فرم‌های هندسی مختلف نشان می‌دهد که فرم استوانه‌ای نسبت به فرم مکعبی، آسیب‌پذیری کمتری در برخورد یک جسم از خود نشان می‌دهد [۳۳]. فرم مخروطی بسیار سازگار، فرم کروی و هرمی سازگار، فرم مکعبی ناسازگار و فرم استوانه‌ای خیلی ناسازگار با اصول پدافند غیرعامل می‌باشد.

سیستم دیاگرید با پیکربندی مثلثی خود قادر به شکل‌دهی ساختمان با هر فرمی می‌باشد از این نظر به راحتی با اصول پدافند غیرعامل تطابق پیدا می‌کند. سیستم سازه‌ای اصلی برج Technosphere یک سازه دیاگرید خارجی کروی می‌باشد (شکل ۱۴شکل (۱۴)).

شکل (۱۴): برج Technosphere در ابوظبی امارات.

۱۰-۱- سازه‌های دیاگرید کج

ساختمان‌ها به‌طور مرسوم به‌صورت عمودی، متعامد بر روی زمین ساخته می‌شوند. برج کج پیزا در پیزا ایتالیا مشهورترین ساختمان کج‌شده به‌علت نشست متعدد زمین می‌باشد. امروزه، ساختمان‌های کج دانسته برای ایجاد معماری چشمگیر طراحی و ساخته می‌شوند. برج دروازه پایتخت[1] در ابوظبی امارات یک نمونه ساختمان دیاگرید کج می‌باشد، این برج خمیده‌ترین برج جهان است که با ۱۸ درجه شیب بیشتر از برج پیزا با ۱۴ درجه شیب طراحی شده است (شکل ۱۵).

شکل (۱۵): الف) برج پیزا، ب) برج دروازه پایتخت.

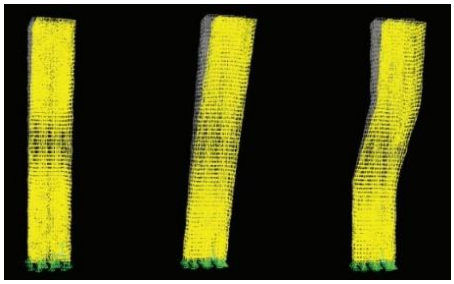
ساختمان‌های بلند بارهای ثقلی و جانبی بسیار بزرگی را تحمل می‌کنند، بنابراین، اثرات سازه‌ای ساختمان‌های بلند کج قابل ملاحظه است، و مطالعات دقیق برای طراحی ساختمان‌های بلند کج نیاز می‌باشد. مطالعات مون بر روی سازه‌های دیاگرید پیچیده از جمله سازه‌های کج نشان می‌دهد که سختی جانبی یک برج کج وابسته به زاویه انحراف (کج شدگی) می‌باشد. و با افزایش زاویه انحراف، تنش‌های متمرکز در ساختمان‌های بلند کج به‌علت خروج از مرکزیت آن‌ها گسترش می‌یابند [۳۴].

اگرچه طراحی سازه‌ای ساختمان‌های بلند به‌طور کلی حاکم بر سختی جانبی می‌باشد، اما بررسی دقیق الزامات مقاومت برای ساختمان‌های بلند کج ضروری می‌باشد [۳۴].

همچنین مون در سال ۲۰۱۱ با مقایسه عملکرد سازه‌ای سیستم سازه‌ای دیاگرید در برج‌های کج به دو روش، یکی بدون طبقه افست و دیگری با ۲۰ طبقه افست با یک برج راست ۶۰ طبقه (شکل ۱۶) مشاهده کرد که تغییرشکل جانبی توسط بارهای مرده و زنده در برج‌های کج به‌علت خروج از مرکزیت آن‌ها بسیار زیادی می‌باشد و تغییرشکل ایجادشده توسط بار باد در هر دو مورد برج کج مشابه با برج راست می‌باشد (جدول ۱) [۲۵]. مون برای مدل‌سازی مدل‌ها از نرم‌افزار Rhino/Grasshopper و برای تحلیل و طراحی مدل‌ها از نرم‌افزار SAP 2000 استفاده کرده است. تغییرشکل‌های ناشی از بار ثقلی را به‌طور قابل توجهی از طریق طراحی دقیق می‌توان مدیریت نمود. بنابراین، اگر الزامات طراحی غیرسازه‌ای در سازه‌های

[1] Capital Gate Tower

دیاگرید به خوبی رعایت شود، می‌توان یک ایده عملی برای برج‌های کج باشد.



شکل (۱۶): پیکربندی مختلف سازه‌های دیاگرید کج ۶۰ طبقه [۲۵].

جدول (۱): تغییرمکان جانبی برج‌های دیاگرید کج [۲۵].

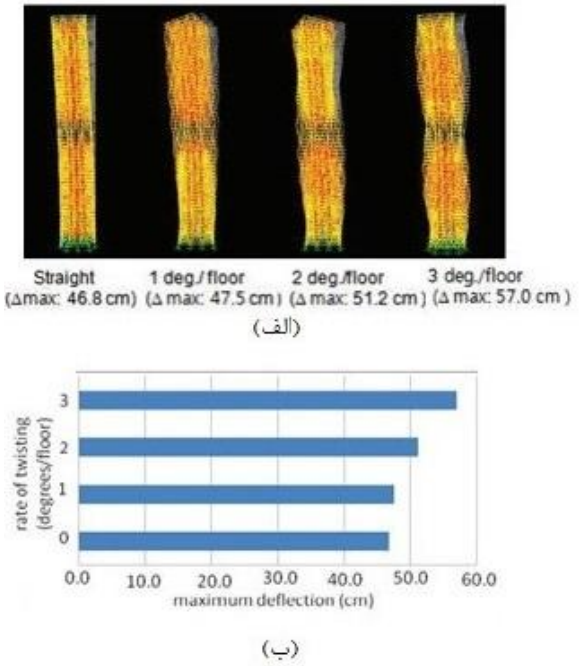
مدل	تغییرمکان جانبی تحت بار مرده و زنده (cm)	تغییرمکان جانبی تحت بار باد (cm)	تغییرمکان جانبی کل تحت بار مرده، زنده و باد (cm)
۱	-	۴۶/۸	۴۶/۸
۲	۳۹/۳	۴۷/۴	۸۶/۷
۳	۶۲/۵	۴۶/۵	۱۰۹/۰

۱۰-۲- سازه‌های دیاگرید پیچ‌خورده

یک روش جالب در طراحی ساختمان‌های بلند امروز اشکال پیچیده است. اشکال پیچ‌خورده به‌کار گرفته‌شده در ساختمان‌های بلند امروز می‌توان به‌عنوان یک واکنش به ساختمان‌های جعبه مستطیل شکل دانست. برج مارپیچ mode gakuen در aichi ژاپن و برج Jinling در چین دو سازه دیاگرید پیچ خورده هستند که هر بیننده‌ای را به خود مجذوب می‌کنند (شکل ۱۷).

شکل (۱۷): الف) برج mode gakuen spiral، ب) برج Jinling

مون در سال ۲۰۱۱، مدل ۶۰ طبقه سازه دیاگرید (شکل ۱۸-الف) که فقط از نظر درجه پیچش، با یکدیگر تفاوت داشتند را بر اساس سختی طراحی نمود و با مقایسه عملکرد لرزه‌ای آن‌ها مشاهده کرد که با افزایش درجه پیچش، سختی جانبی سازه کاهش می‌یابد و متعاقباً بیشینه انحراف در سازه نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۸- ب). این پدیده بسیار مرتبط با تغییر زاویه دیاگرید ناشی از پیچش برج می‌باشد، با افزایش درجه پیچش، زاویه دیاگرید بیش از شرایط مطلوب منحرف می‌شود، که منجر به کاهش قابل‌توجه سختی جانبی برج می‌شود [۲۵] و [۳۵].



شکل (۱۸): الف) درجه پیچش مختلف سازه‌های دیاگرید ۶۰ طبقه، ب) مقایسه بیشینه انحراف سازه‌ها [۲۵].

به‌طورکلی ساختمان‌های پیچیده شکل، مانند برج‌های پیچ‌خورده و شکل آزاد، نسبت به ساختمان‌های بلند منشوری قابل مقایسه عملکرد بهتری دارند، اشکال پیچیده در کاهش جریان گردابی ناشی از پاسخ دینامیکی ساختمان‌های بلند با اختلال در جریان گردابی مؤثر است [۲۵]، [۳۱] و [۳۵]. در واقع یک نرخ بهینه پیچش برای هر برج با پیکربندی خاص وجود دارد که بر اساس آزمایش‌های تونل باد با بررسی چندین مدل با نرخ‌های پیچش مختلف بدست می‌آید.

به‌طور کلی ساختمان‌های بلند پیچیده‌شکل امروز به طراحی، آنالیز و ساخت سیستم پیچیده‌تری نیاز دارند. برای اجرای بهتر و کیفیت بالای محیط ساخته‌شده نه تنها جنبه معماری بلکه مسائل مربوط به عملکرد سازه‌ای نیز باید در نظر گرفته شود.

۱۰-۳- سازه‌های دیاگرید با فرم آزاد[1]

سیستم سازه‌ای دیاگرید دارای پتانسیل بسیار زیادی برای توسعه به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین راه‌حل‌های سازه‌ای برای طراحی

[1] Free form

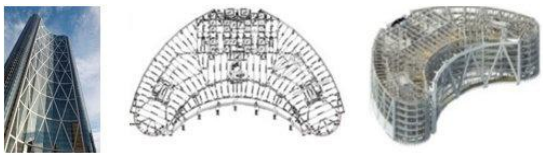
برج‌های شکل آزاد نامنظم می‌باشد زیرا واحدهای هندسی سازه‌ای مثلثی سیستم دیاگرید می‌تواند هر برج شکل آزاد با دقت بیشتر و بدون اعوجاج مشخص کند. در برج Phare در پاریس و برج Fiera Milano در میلان از سیستم سازه‌ای دیاگرید به‌عنوان سیستم سازه‌ای اصلی استفاده شده است (شکل ۱۹).

شکل (۱۹): الف) برج Phare، ب) برج Fiera Milano.

۱۰-۴- فرم آیرودینامیکی سازه‌های دیاگرید

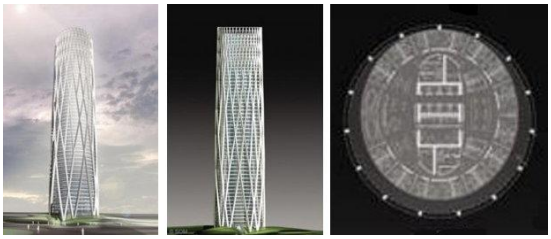
ارتفاع بلند برج‌ها و سرعت زیاد باد بخصوص در قسمت بالایی برج سبب می‌شوند که این سازه‌ها نسبت به محرک‌های باد و بخصوص نوسانات القاشده ناشی از گردابه‌ها، حساسیت زیادی از خود نشان دهند. برخی تغییرات در شکل کلی ساختمان تا حد زیادی می‌تواند اثرات نیروی باد بر ساختمان‌های بلند و خیلی بلند را کاهش دهد و همچنین فرم‌های آیرودینامیک موج را راحت‌تر از خود عبور می‌دهند. این تغییرات عبارتند از:

گوشه‌های ملایم[1]: گوشه‌های گردشده یا پخی لنگر پایه و جریان گردابی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در واقع، نیروهای آیرودینامیکی تا حد زیادی تحت تأثیر شکل ساختمان هستند. برج Bow کانادا در شکل (۲۰) نشان داده شده است، این برج دارای پلان هلالی‌شکل می‌باشد، گوشه‌های گرد آن به کاهش بارهای باد کمک می‌کند.



شکل (۲۰): برج Bow.

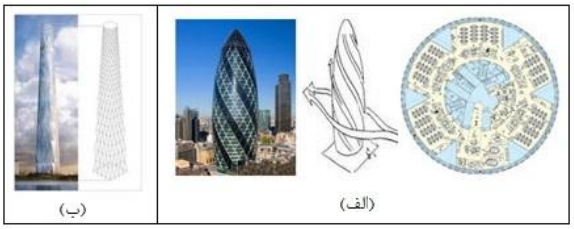
فرم‌های مخروطی: فرم مخروطی ساختمان‌ها که در آن‌ها سطح مقطع پلان در ارتفاع به تدریج کاهش می‌یابد، سبب کاهش اثرات نیروهای باد می‌شود. به‌عنوان مثال فرم مخروطی برج West Bay Office در قطر، که در شکل (۲۱)**شکل** (نشان داده شده است. در این برج زاویه اعضای قطری در ارتفاع کاهش یافته است.



شکل (۲۱): برج West Bay Office.

فرم‌های پیچ خورده: چرخش‌های بدنه آیرودینامیک حول یک محور با توجه به جهت باد سبب به حداقل رساندن تأثیر نیروی باد می‌گردد.

فرم‌هایی با سطح مقطع متغیر در ارتفاع: این عمل می‌تواند معماری را به‌سمت ایجاد فرم‌های جذاب سوق دهد. در برج Swiss Re (شکل ۲۲- الف) پلان دایره ای برج از پایین تا نیمه پهن می‌شود و سپس به‌سمت رأس آن باریک می‌شود. شکل آیرودینامیکی برج سبب می‌شود که باد در اطراف نمای آن جریان پیدا کند و اثر بارهای باد به روی سازه به حداقل برسد. در برج Lotte Super (شکل ۲۲- ب) هندسه سازه با تغییر از پایه مربع شکل به بالا با پلان دایره شکل ایجاد شده است. با واحدهای مثلثی شکل سیستم دیاگرید به خوبی این چالش هندسی تبدیل یک مربع به دایره انجام شده است. فرم این برج در کاهش نیروهای باد مؤثر می‌باشد.



شکل (۲۲): الف) برج Swiss Re، ب) برج Lotte Super.

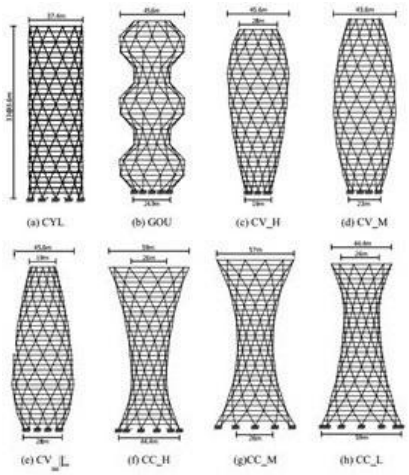
لی[2] و کانگ[3] در سال ۲۰۱۲ [۳۶] سازه‌های دیاگرید با اشکال مختلف در ارتفاع (شکل ۲۳) را با یکدیگر مقایسه نمودند. آن‌ها آنالیزهای دینامیکی غیرخطی برای ایجاد ظرفیت فروپاشی متوسط ($\widehat{S_{CT}}$) و نسبت حاشیه فروپاشی (CMR[4]) برای هر یک از مدل‌های آنالیز با استفاده از نرم‌افزار Perform 3D انجام داده‌اند. نسبت بین شدت فروپاشی متوسط و شدت MCE (S_{MT}) به‌عنوان نسبت حاشیه فروپاشی (CMR) تعریف شده است، که پارامتر

[1] Softening Corners

[2] Lee
[3] Kong
[4] Collapse Margin ratio

اصلی استفاده شده برای تعیین ایمنی فروپاشی سازه است.

$$CMR=\frac{\widehat{S_{CT}}}{S_{MT}}=\frac{SD_{CT}}{SD_{MT}} \quad (۱۱)$$



شکل (۲۳): سازه‌های مدل آنالیز ۳۳ طبقه [۳۶].

مطالعات لی و کانگ نشان می‌دهد که سازه‌های استوانه‌ای و سازه‌های مقعر با مرکز جرم پایین (مدل CC-L) بیشترین و سازه‌های نوع کدویی و سازه‌های مقعر با مرکز جرم بالا (مدل CC-H) کمترین مقدار CMR را دارند. سازه‌های دیاگریدی که مرکز جرم بالاتری نسبت به سطح زمین دارند، زمان تناوب بیشتری دارند. و سازه‌هایی که زمان تناوب بیشتری دارند، شتاب طیفی MCE، ظرفیت متوسط و CMR کمتری دارند. به‌طور کلی حاشیه فروپاشی در سازه‌های دیاگرید نوع مقعر نسبت به سازه‌های دیاگرید نوع محدب بیشتر می‌باشد.

۱۱- مزایای سیستم سازه‌ای دیاگرید

- افزایش کارایی سیستم به علت تحمل همزمان بارهای ثقلی و جانبی توسط اعضای قطری
- افزایش پایداری به علت پیکربندی مثلثی آن
- ارائه مسیرهای انتقال بار متناوب در صورت شکست سازه‌ای
- افزایش قابلیت استفاده از نور طبیعی و امکان بهره‌گیری از مناظر بیرون به علت عدم وجود ستون‌های عمودی در پیرامون سازه
- انعطاف‌پذیری در طراحی معماری فضای داخلی ساختمان
- تطبیق‌پذیری هندسی؛ این سیستم سازه‌ای قادر به شکل‌دهی ساختمان‌هایی با شکل پیچیده از جمله ساختمان‌های دوار، پیچ‌خورده، کج‌شونده و شکل آزاد است.
- صرفه‌جویی در مصالح مصرفی در مقایسه با سایر سیستم‌ها (سبکی)
- پتانسیل زیباشناختی ارائه‌شده توسط پیکربندی هندسی منحصر به فرد سیستم

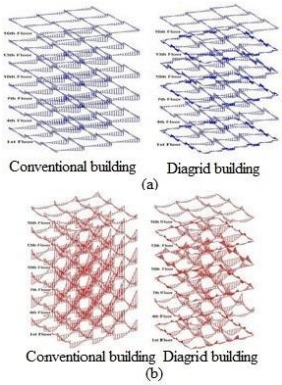
۱۲- معایب سیستم سازه‌ای دیاگرید

- پیچیدگی در طراحی و ساخت گره‌ها و اتصالات
- هزینه بالای اتصال
- هزینه بالای نصب و مشکلات دقت و صحت در اجرا

در واقع مزایای سیستم سازه‌ای دیاگرید بیشتر از معایب آن می‌باشد، از این رو این سیستم‌ها مورد توجه بسیاری از معماران و مهندسان طراح سازه واقع شده است.

۱۳- مقایسه سیستم دیاگرید با سیستم قاب خمشی

در سازه دیاگرید، بخش عمده بار جانبی توسط اعضای مورب خارجی تحمل می‌شود. استفاده از سیستم سازه‌ای دیاگرید در ساختمان در مقایسه با سیستم قاب خمشی سبب کاهش قابل ملاحظه نیروی برشی و لنگر خمشی در تیرهای داخلی و محیطی می‌شود. نیروی محوری در ستون‌های داخلی ساختمان دیاگرید در مقایسه با ساختمان با سیستم قاب خمشی بیشتر است اما لنگر خمشی در ستون‌های داخلی به‌طور قابل توجهی کمتر می‌باشد (شکل ۲۴). از این رو در ساختمان دیاگرید در مقایسه با ساختمان متداول مقاطع تیرها و ستون‌ها کاهش می‌یابد [۳۷].



شکل (۲۴): a) دیاگرام نیروی برشی تیرهای ساختمان قاب خمشی و دیاگرید، b) دیاگرام لنگر خمشی تیرهای ساختمان قاب خمشی و دیاگرید [۳۷].

اگر قاب صلب برای یک ساختمان خیلی بلند استفاده شود، ابعاد ستون‌ها به‌تدریج به‌سمت پایه به‌علت تجمع بار ثقلی در پایه افزایش می‌یابد و مقدار مواد مورد نیاز برای مقاومت در برابر

نیروهای جانبی نیز افزایش می‌یابد. با افـزایش ارتفـاع سـاختمان مصالح مصرفی نیز افزایش می‌یابد. افزایش وزن مصالح مصرفی بـا افزایش ارتفاع ساختمان به‌طور قابل توجهی در سازه‌های دیاگرید کمتر است. در سازه‌هـای حـدود ۶ تـا ۱۲ طبقـه، قـاب معمـولی نسبت بـه سیسـتم دیاگریـد مقـرون بـه صـرفه‌تـر اسـت، امـا در سازه‌های با بیش از ۱۲ طبقه سیسـتم قـاب معمـولی نسـبت بـه سیستم دیاگرید غیراقتصادی می‌باشد [۳۸].

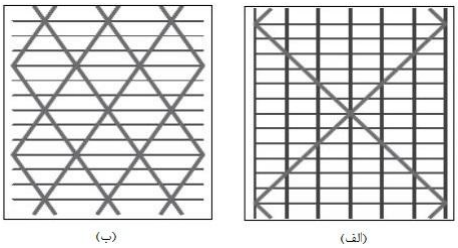
دریفت طبقه و برش طبقه در ساختمان دیاگرید در مقایسـه با ساختمان قاب ساده خیلی کمتر می‌باشد. به‌دلیل اینکه بارهـای جانبی توسط ستون‌های مورب تحمل می شود، تغییرمکان جانبی در هر طبقه در سازه دیاگرید در مقایسه با ساختمان قـاب سـاده بسیار کمتر است. سیستم دیاگرید مقاومت بیشتری در ساختمان فراهم می‌کند که باعث می‌شود سیسـتم مـؤثرتر باشـد. سیسـتم سازه‌ای دیاگرید انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی معماری فضای داخلی و نمای ساختمان فراهم می‌کند [۳۸]، [۳۹].

هرچه ارتفاع ساختمان افزایش یابد زمـان تنـاوب سـازه نیـز افزایش می‌یابد اما زمان تناوب در دیاگرید نسـبت بـه سـاختمان قاب ساده کمتر می‌باشد، بنابراین، ساختمان دیاگریـد نسـبت بـه قاب معمولی سـخت‌تـر اسـت و نیـروی جـانبی بیشـتری جـذب می‌کند [۳۸].

۱۴- برتـــری سیســـتم دیاگریـــد نســـبت بـــه سیستم‌های مهاربندی متداول و سیستم لوله‌ای

مزیـت اصـلی سیسـتم سـازه‌ای دیاگریـد در برابـر سیسـتم‌هـای مهاربندی متداول، در حذف ستون‌های عمودی و انتقال بار ثقلـی و نیروهای جانبی توسط شبکه‌هـای دیاگریـد بـه پـی سـاختمان می‌باشد. حال آنکه سیستم‌های مهاربندی متداول، تنهـا در برابـر نیروهای باد و زلزله مقاومت می‌کنند.

در مقایسه با سیستم لوله‌ای بدون اعضای مـورب، سـازه‌هـای دیاگرید در به حداقل رساندن تغییرشـکل برشـی مؤثرترنـد، زیـرا برش را از طریق عمل محوری اعضای مورب حمـل مـی‌کنـد، در حالی‌که سیستم لولـه‌ای، بـرش را از طریـق خمـش سـتون‌هـای عمودی تحمل می‌کند. سازه‌های دیاگرید، به هسته صـلب برشـی نیاز ندارند، چراکه توسط دیاگریدهای محیطی تحمل می‌شود. در شـکل (۲۵) سیسـتم دیاگریـد در مقایسـه بـا سیسـتم لولـه مهاربندی‌شده نشان داده شده است.



شکل (۲۵): الف) سیستم لوله مهاربندی‌شده، ب) سیستم دیاگرید [۳۹].

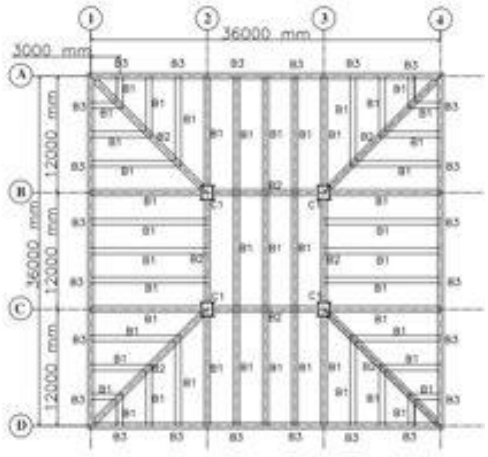
حذف ستون‌های عمودی در سیستم دیاگرید در جهت ایجـاد بیشـینه فضـای مفیـد مـؤثر بـوده و از نظـر زیباشـناختی، نمـای ساختمان‌های دیاگرید دارای جلوه‌ای بصری و معمارانه مـی‌باشـد. علاوه براین، با استفاده از اعضای مورب، سازه‌های دیاگرید در کل مصالح سازه‌ای کمتری نسبت بـه سیسـتم‌هـای سـازه‌ای متـداول متشکل از اعضای متعامد استفاده می‌کنند.

در سازه‌های لوله‌ای فولادی مرسـوم از اتصـالات صـلب بـین ستون‌ها و تیرها استفاده می‌شود، در حالی‌که سازه‌هـای دیاگریـد به‌علت مثلثی شکل بودن، نیاز به اتصالات گیردار نیسـت. اتصـال مفصلی در مورد سازه‌های دیاگرید به خوبی کار می‌کند.

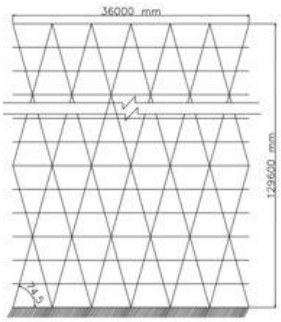
اثر تأخیر برشی سازه دیاگرید به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسـبت به سازه لوله‌ای کمتر است، زیرا در مقایسه با سازه‌های لوله قـابی سختی سازه‌ای بالاتری دارند.

۱۵- توزیع بار در سیستم دیاگرید

جانی و پاتل در سـال ۲۰۱۳ [۴۰] نحـوه توزیـع بـار در سیسـتم سازه‌ای دیاگرید را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظـور یـک ساختمان فولادی دیاگریـد ۳۶ طبقـه را بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار ETABS آنالیز و طراحـی نمودنـد. پـلان و ارتفـاع بـه‌ترتیـب در شکل‌های (۲۷ - ۲۶) نشان داده شده است.



شکل (۲۶): پلان طبقات [۴۰].

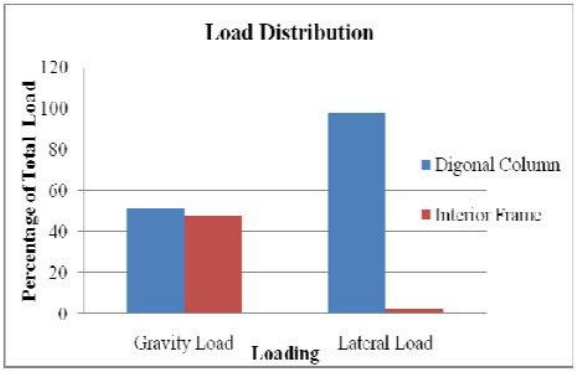


شکل (۲۷): ارتفاع ساختمان ۳۶ طبقه [۴۰].

توزیع بار ثقلی و بار جانبی بین ستون‌های داخلی و قطرهای محیطی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲۸) نشان داده شده است ۹۷/۶۸ درصد و ۲/۳۱ درصد بار جانبی به ترتیب توسط قاب‌های خارجی و داخلی تحمل شده است. درحالی که ۵۱/۶۲ درصد و ۴۳/۲۸ درصد بار ثقلی به ترتیب توسط قاب‌های خارجی و داخلی تحمل شده است. بنابراین، می‌توان گفت بار جانبی توسط ستون‌های قطری دیاگرید در محیط تحمل می‌شود، درحالی که بار ثقلی توسط هر دو ستون‌های داخلی و ستون‌های قطری محیط تحمل می‌شود. در نتیجه ستون‌های داخلی اساساً مقاوم بار ثقلی هستند.

جدول (۲): توزیع بار در سیستم دیاگرید ۳۶ طبقه [۴۰].

بارگذاری	بار کل بر روی سیستم دیاگرید (KN)	بار کل بر روی اعضای قطری پیرامونی (KN)	بار کل بر روی ستون‌های داخلی (KN)
بار ثقلی	۳۵۱۲۶۴/۲۴	۱۸۱۳۳۲/۱۲	۱۶۹۹۳۲/۱۲
بار جانبی	۳۲۲۷/۶۰	۳۱۵۲/۹۲	۷۴/۶۸



شکل (۲۸): توزیع بار در قاب خارجی و داخلی [۳۳].

مقاله حاضر مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد حدیث سعیدی نژاد با عنوان بررسی ترکیب سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید و هگزاگرید در ساختمان‌های بلندمرتبه می‌باشد [۴۱].

۱۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توجه به مطالعات انجام‌شده به معرفی سیستم سازه‌ای دیاگرید پرداخته شده است، همچنین این سیستم با توجه به شاخص‌های آسیب‌پذیری ساختمان از نظر معماری و سازه بررسی شده است. سیستم دیاگرید با توجه به پیکربندی مثلثی دارای ویژگی‌های مطلوب زیر می‌باشد:

- سیستم دیاگرید با پلان متقارن و بدون فرورفتگی و پیش‌آمدگی (مانند پلان دایره‌ای) می‌تواند انرژی ناشی از انفجار بیشتری را جذب کرده و آسیب‌های ناشی از موج انفجار را کاهش دهد.
- فرم استوانه‌ای سازه با سیستم دیاگرید نسبت به فرم مکعبی آسیب‌پذیری کمتری در برخورد با یک جسم از خود نشان می‌دهد.
- سازه‌هایی با فرم هندسی مخروطی بسیار سازگار، سازه با فرم هندسی کروی و هرمی سازگار، سازه با فرم مکعبی ناسازگار و سازه با فرم استوانه‌ای بسیار ناسازگار با اهداف و اصول پدافند غیرعامل می‌باشد.
- سیستم دیاگرید دارای سختی و مقاومت بیشتر و تغییرمکان جانبی کمتری در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای متداول می‌باشد.
- از مزایای دیگر آن می‌توان به نمای زیبا، انعطاف‌پذیری در طرح‌های معماری، امکان ایجاد فرم‌های آزاد و پیچیده و نامنظم در ساختمان‌ها و کاهش مصالح مصرفی می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان اذعان داشت که سیستم سازه‌ای دیاگرید یکی از کارآمدترین سیستم‌ها در ساخت ساختمان‌های بلند مرتبه مطابق با اصول پدافند غیرعامل می‌باشد.

۱۷- منابع

۱. نخعی، جلال، شمسایی زفرقندی، فتحاله، کیانی، سعید، بررسی طراحی لایه‌بندی دفاعی محوطه ساختمان‌های بلند مرتبه اداری، فصلنامه پدافند غیرعامل، شماره ۲، صفحات ۵۳-۴۱، ۱۳۹۵.

۲. دفتر مقررات ملّی ساختمان، مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان، پدافند غیرعامل، چاپ هفتم، نشر توسعه ایران، ۱۳۹۳.

۳. فردوسی، سجاد، شکری فیروزجاه، پری، تعیین حداکثر تراکم ساختمانی با رویکرد کاهش آسیب‌پذیری در برابر زلزله، فصلنامه پدافند غیرعامل، شماره ۴، صفحات ۱۹-۹، ۱۳۹۴.

۴. شیراوند، محمودرضا، شعبانی، محمدجواد، ارزیابی رفتار سازه‌های

فولادی قاب خمشی ویژه و قاب مهاربندی تحت اثر بارگذاری انفجار، فصلنامه پدافند غیرعامل، شماره ۲، صفحات ۱۱۴-۱۰۹، ۱۳۹۲.

5. J. Leonard, "Investigation of shear lag effect in high-rise buildings with diagrid system," Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

6. B. Charnish and T. McDonnell, "The bow: unique diagrid structural system for a sustainable tall building," In CTBUH 8th World Congress, Dubai, March 2008.

7. W. Baker, C. Besjak, M. Sarkisian, P. Lee, and 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.

8. Y. J. Kim, M. H. Kim, I. Y. Jung, Y. K. Ju, and S. D. Kim, "Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures," Engineering Structures, vol. 33, no. 7, pp. 2134-2144, 2011.

9. Y. Zhang, "Seismic analysis of diagrid structural frames with shear-link fuse devices," Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol. 12, no. 3, pp. 463-472, 2013.

10. G. M. Montuori, E. Mele, G. Brandonisio, and A. De Luca, "Secondary bracing systems for diagrid structures in tall buildings," Engineering Structures, vol. 75, pp. 477-488, 2014.

11. K. Kwon and J. Kim, "Progressive Collapse and Seismic Performance of Twisted Diagrid Buildings," International Journal of High-Rise Buildings, vol. 3, no. 3, pp. 223-230, 2014.

12. I. Y. Jung, Y. J. Kim, Y. K. Ju, S. D. Kim, and S. J. Kim, "Experimental investigation of web-continuous diagrid nodes under cyclic load," Engineering Structures, vol. 69, pp. 90-101, 2014.

13. D. Lee, "Diagrid Generation Applied to X-shape Steel Tube of HSA800 with High Tensile Strength and Ductility," Applied and Computational Mathematics, vol. 4, no. 6, pp. 452-455, 2014.

14. A. R. Barbosa and G. Ramadhan, "Seismic Performance of a Tall Diagrid Steel Building with Tuned Mass Dampers," 2014.

15. Shahana, E. Aswathy, and S. Kumar, "Comparative Study of Diagrid Structures with and without Corner Columns," International Journal of Science and Research, pp. 2319-7064, 2015.

16. J. Sree Harsha, K. Raghu, and G. Narayana, "Analysis of Tall Buildings for Desired Angle of Diagrids," IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, vol. 4, no. 4, 2015.

17. S. H. Lee, S. J. Lee, J. H. Kim, and S. M. Choi, "Mitigation of stress concentration in a diagrid structural system using circular steel tubes," International Journal of Steel Structures, vol. 15, no. 3, pp. 703-717, 2015.

۱۸. طبایی، سید سعید، افشاری، محمد، ضیایی مهر، بهادر، بهار، امید، ارزیابی عملکرد سیستم ترکیبی دیاگرید در سازه‌های بلند مرتبه، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۹۴.

http://www.civilica.com/Paper-ICCE10-ICCE10_0422.html

19. K. Kamath, S. Hirannaiah, and J. C. K. B. Noronha, "An analytical study on performance of a diagrid structure using nonlinear static pushover analysis. Perspectives in Science," 8, pp. 90-92, 2016.

20. L. M. Arpitha, T. S. Sahana, and C. S. Siddu Karthik, "Comparative Study of Diagrid Structures over Braced tube Structures," International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. 5, no. 7, pp. 2319-8753, 2016.

۲۱. گودینی، جواد، وفامهر، محسن، پاسخ‌گویی هم‌زمان به ایمنی و امنیت در فرآیند طراحی معماری مجموعه‌های صنعتی با ایده دفاع عمقی، فصلنامه پدافند غیرعامل، شماره ۴، صفحات ۱۰۶-۹۵، ۱۳۹۶.

۲۲. میرزایی علی‌آبادی، مهدی، پیری، حسن، کیانی، سعید، حسن‌نژاد، حامد، تعیین و اولویت‌بندی میزان تاثیر شاخص‌های آسیب‌پذیری در بخش سازه ساختمان مراکز داده، فصلنامه پدافند غیرعامل، شماره ۴، صفحات ۱۶-۱، ۱۳۹۶.

۲۳. عزیزپور، علی اشرف، اصول و ملاحظات معماری و شهرسازی در پدافند غیرعامل، ایلام، آستان جانان، ۱۳۹۵.

24. K. S. Moon, "Sustainable structural engineering strategies for tall buildings," The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 17, no. 5, pp. 895-914, 2008.

25. K. S. Moon, "Diagrid structures for complex-shaped tall buildings," Procedia Engineering, vol. 14, pp. 1343-1350, 2011.

26. S. Korsavi and M. R. Maqhareh, "The evolutionary process of diagrid structure towards architectural, structural and sustainability concepts: reviewing case studies," J. Arch. Eng. Technol., vol. 3, no. 2, 2014.

27. H. Tripathi and S. Singla, "Diagrid structural system for RC framed multistoreyed buildings," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 7, no. 6, pp. 2229-5518, 2016.

28. K. Moon, "Design and construction of steel diagrid structures," NSCC, School of Architecture, Yale University, New Haven, USA, 2009.

29. 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), The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), September 2013.

30. J. Kim and Y. H. Lee, "Seismic performance evaluation of diagrid system buildings," 2nd Specialty Conference on Disaster Mitigation, 2010.

31. M. M. Ali and K. S. Moon, "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects," Architectural Science Review, vol. 50, no. 3, pp. 205-223, 2007.

32. C. Huang, X. L. Han, J. Ji, and J. M. Tang, "Behavior of concrete-filled steel tubular planar intersecting connections under axial compression, Part 1: Experimental study," Engineering Structures, vol. 32, no. 1, pp. 60-68, 2010.

۳۳. اقبالی، سید رحمان، ابراهیمی، مهسا، اسدی ملک جهان، فرزانه، کوچکی محمدپور، محمدرضا، تحلیل تأثیر فرم ساختمان محفظه ایمنی راکتور در مقابل برخورد هواپیما، فصلنامه پدافند غیرعامل، شماره ۲، صفحات ۱۸۰-۱۷۱، ۱۳۹۶.

34. K. S. Moon, "Comparative Evaluation of Structural Systems for Tilted Tall Buildings," International Journal of High-Rise Buildings, pp. 89-98, 2014.

35. K. S. Moon, "Structural Engineering for Complex-Shaped Tall Buildings," Proceedings of Seventeenth the IIER International Conference, Hong Kong, 2015.

36. J. Lee and J. Kong, "Seismic Performance Evaluation of Tall Buildings with Axi-symmetric Plans," WCEE LISBOA, vol. 15, 2012.

37. S. Saket Yadav and V. Garg, “Advantage of Steel Diagrid Building over Conventional Building,” International Journal of Civil and Structural Engineering Research, vol. 3, no. 1, pp. 394-406, 2015.

38. M. I. Shah, S. V. Mevada, and V. B. Patel, “Comparative Study of Diagrid Structures with Conventional Frame Structures,” Manthan I. Shah et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications, vol. 6, no. 5, (Part - 2), pp. 22-29, pp. 2248-9622, 2016.

39. N. B. Panchal and V. R. Patel, “Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings,” International Journal of Research in Engineering and Technology, vol. 3, no. 03, pp. 374-378, 2014.

40. K. Jani and P.V. Patel, “Analysis and design of diagrid structural system for high rise steel buildings,” Procedia Engineering, vol. 51, pp. 92-100, 2013.

۴۱. سعیدی‌نژاد، حدیث، بررسی ترکیب سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید و هگزاگرید در ساختمان‌های بلند مرتبه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان، ۱۳۹۷.

Introduction of Diagrid Structural System

H. Saeidinejad, F. Omidinasab*

Abstract

Nowadays, the close confrontation between structure and architecture has led to the invention of newly structural systems that are responsive to structural and architectural needs. In recent years, the diagrid structural system has attracted the attention of many architects and engineers due to the structural efficiency and aesthetic potential provided by its unique geometric configuration. In this study, the features of the structural and the architecture of the diagrid system are discussed. Also, with a description of the studies done in field of the diagrid system, the design challenges and optimal design of the geometric configuration of the structural system are fully examined. This system has more stiffness and strength, and less lateral displacement to the other conventional systems. Other advantages include the beautiful appearance, flexibility in architectural designs, the possibility of creating freeform, twisted and irregular forms in buildings and reducing material. According to the results of this study it can be admitted that the diagrid system is one of the most efficient systems for building high-rise buildings.

Key Words: *Tall buildings, Structural systems, Diagrid system, Lateral force*

* Lorestan University (omidinasab.f@lu.ac.ir)- Writer-in-Charge