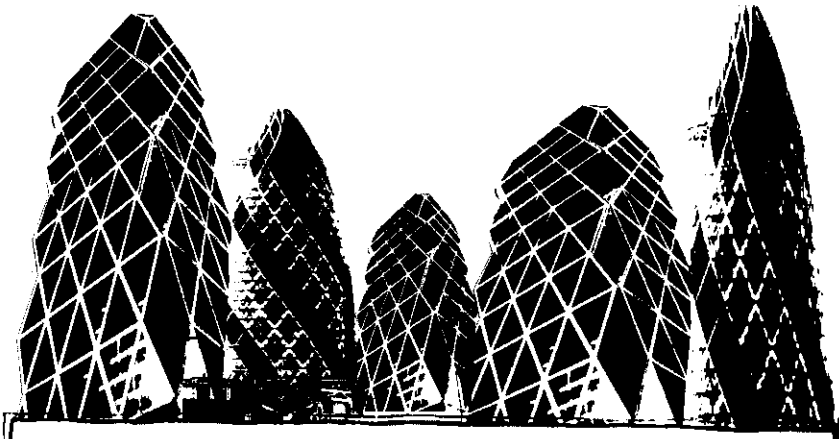


تامین سامانه باربر قائم و جانبی به کمک اعضای قطری

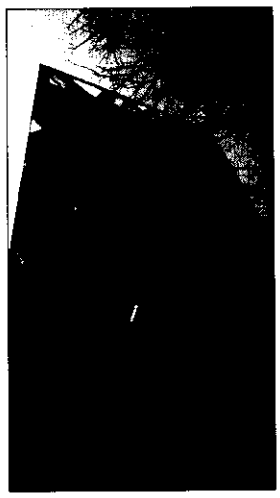
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

حمیدرضا بکتاش
عضو هیات علمی

چکیده

امروزه در سراسر جهان به طور گسترده از سامانه اعضای سازه‌های قطری به صورت یک پوسته، بیرونی که همزمان بارهای قائم و جانبی را در سازه‌های ساختمانی به دوش می کشند، استفاده می‌گردد. این سامانه به نامهای Exodiagonal یا Diagrid شناخته می‌شوند. آزادی عمل در طراحی سامانه باربر، بازدهی سازه ای قابل توجه اعضاء و درجات نا معین بالا که به نحو موثری از بروز خرابیهای پیش رونده جلوگیری مینماید، از جمله مزایای مهم این سامانه است . در اینجا به معرفی و تحلیل این سامانه و برتری‌های آن نسبت به سایر سامانه‌های باربر و مثالهای آن پرداخته می شود...

واژگان کلیدی: اعضای قطری، سامانه باربر، سازه‌های ساختمانی



شکل۱- برج Hearst در شهر نیویورک
شکل۲- ساختمان Re Swiss در لندن
شکل۳- ساختمان Tod's Omote-sando در توکیو

در سالهای اخیردرنمای خارجی بسیاری از ساختمانها از اعضای سازهای قطری استفاده می‌شود . در این نوع ساختارها از اعضای قطری با فواصل کم و نزدیک هم استفاده می‌شود به گونه‌ای که تفکیک عملکرد بارهای جانبی وقائم در آنها کاری دشوار است. چنین سازه هایی را به نامهای Diagrid یا Exodiagonal می‌شناسیم.در این سامانه باربر بر خلاف سامانه‌های بادبندی شده که گاهی بادبندها به صورت نمایان طراحی می‌گردند(همانند ساختمان John Hancockدر شیکاگو و یا بانک Iconic در China Tower واقع در هنگ کنگ) اعضای قطری، وظیفه انتقال بارهای قائم و جانبی را بدون استفاده از ستون‌های قائم به عهده دارند.

در واقع این سامانه که برای ساخت سازههای بلندمرتبه طراحی گردیده است، از مثلثهایی تشکیل شده که تکیه‌گاه تیرها را تامین می‌نماید. توزیع مناسب بار در این وضعیت موجب می‌گردد تا نیاز به ستونهای حجیم خصوصاً در گوشه‌های ساختمان برطرف گردد.

چنین سامانه، باربر ساختمانی ' Exodiagonal 'مثل برج Hearst (شکل ۱) در شهر نیویورک و بسیاری موارد مشابه به سه دلیل عمده در سراسر جهان طرفداران بی‌شماری را به خود جلب نموده است :

نخست آنکه: باعث ایجاد آزادی عمل در معماری شده‌اند، بدین ترتیب که به‌کارگیری سطوح منحنی با اشکال گوناگون و هندسه، مدرن (Unorthodox) با استفاده از سامانه، باربرنسبتاً ساده امکان پذیر گردیده است. ساختمان Swiss Re (شکل ۲) در لندن یکی از نمونه‌هایی است که این قابلیتها را آشکار می‌سازد.

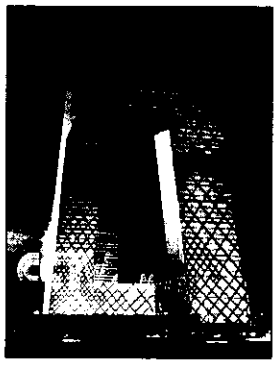
ساختمان Tod's Omotesando در توکیو (شکل ۳) که درآن از بتن آرمه در سیستم Exodiagonal استفاده شده ، یکی از شاهکارهای بدیع معماری به شمار می‌آید . ساختمان مرکز تلویزیون چین نیز یک کار منحصر به فرد به

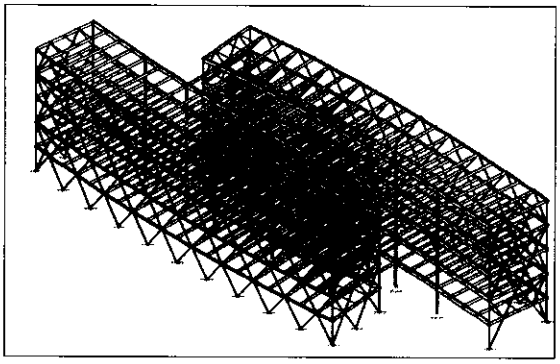
در Tod's Omotesando ساختمان توکیو که در آن از بتن آرمه در استفاده شده ، Exodiagonal سیستم یکی از شاهکارهای بدیع معماری به شمار میآید

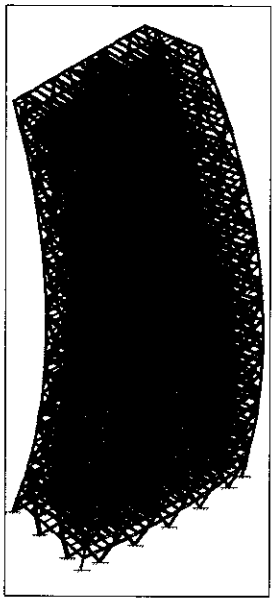
حساب می‌آید. در این ساختمان که هم اکنون در پکن در حال ساخت است، دهانه اعضای قطری متناسب با افزایش تنش وارده، کاهش می‌یابد. که در ادامه به نفصیل در خصوص این ساختمان بحث خواهد شد.

دومین دلیل رواج روزافزون این سامانه برخورداری از بازده سازهای بالاست. بدین معنا که وزن مصالح سازهای مورد نیاز در این سامانه در ازای یک نیروی مشخص از سایر سامانه‌های باربر متداول کمتر است. به عنوان مثال وزن اسکلت Hearst Tower Exodiagonal تقریبا ۲۰ درصد کمتر ازحالتی است که در این ساختمان از سامانه باربر قابهای خمشی مرسوم استفاده گردد. این بازدهی ناشی از عملکرد دوگانه اعضای Exodiagonal است. زیرا اعضای قطری خارجی هم بارهای جانبی و هم بارهای قائم را توام بدوش می‌کشند دراین وضعیت نیازی به هسته باربری داخلی مرسوم که فضای داخلی را محدود می‌نماید نیز نمی‌باشد.

سومین دلیل که شاید مهم‌ترین دلیل نیز به شمار می‌آید این است که که سیستم Exodiagonal از افزونگی بالایی







شکل۴- ساختمان CCTV واقع در پکن

شکل۵- مدل ساختمان پنج طبقه

شکل۶- مدل ساختمان ۳۰ طبقه

برخوردار است به عبارتی درجات نامعینی سازه در آن به نحو قابل توجهی افزایش می‌یابد . این عامل کانون توجه معماران، مهندسین و دولت‌هایی است که در پی یافتن راهی برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده ساختمان و افزایش مقاومت آنها در برابر بارهای شدید وارده از قبیل انفجارها، زلزله‌ها یا دیگربارگذاریهای پیش بینی نشده و بزرگ هستند.

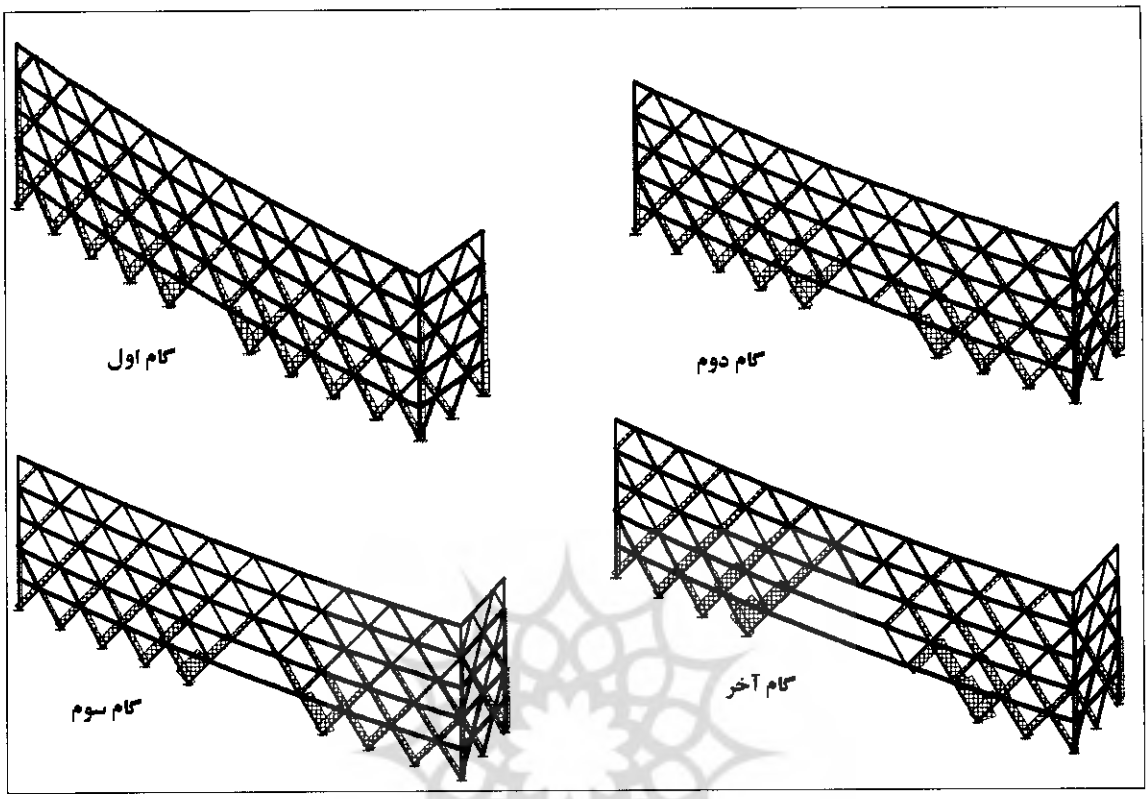
سازه‌های ساختمانی Exodiagonal شامل مجموعه منظمی از تقسیمات قطری متصل به هم می‌باشد که تماماً یا بطور جزئی سطح خارجی ساختمان را احاطه کرده و براساس آنچه در بالا توضیح داده شد، هم بارهای ثقلی و هم بارهای جانبی را تحمل می‌نمایند. بطور عام سیستم سازهای Exodiagonal فاقد اعضای قائم روی سطح خارجی ساختمان می‌باشد. در هنگام اعمال بارهای

در هنگام اعمال بارهای لحظهای شدید وجود درجات نامعین متعدد باز توزیع Exodiagonal در ساختار سریع نیرو را روی قسمتهای خارجی در تمام سطح پوسته تسهیل می‌نماید

لحظهای شدید وجود درجات نامعین متعدد در ساختار Exodiagonal باز توزیع سریع نیرو را روی قسمت‌های خارجی در تمام سطح پوسته تسهیل می‌نماید. اعتقاد بر این است که این نوع سازهها خاصیت ارتجاعی (Uniformly resilient) یکسانی در تمام سطوح داشته و بدین ترتیب عاری از آسیب‌پذیریهای ذاتی ناشی از هرگونه عدم یکنواختی می‌باشند. لیکن جزئیات طبیعت رفتاری این سامانه کماکان در دست بررسی و آزمایش می‌باشد .

این مهم نیز در ساختمان مرکزی تلویزیون چین CCTV واقع در پکن مدنظر قرار گرفته است. ساختمان مزبور از دو برج تشکیل شده که توسط کنسولی L شکل به یکدیگر متصل شده‌اند، ارتفاع کنسول از زمین معادل ۳۶ طبقه ساختمان است و ارتفاع مجموعه حدود ۲۳۴ متر است سرپرست تیم طراحی "Rem Koolhaas" از شرکای دفتر مهندسی OMA واقع در هلند می‌باشد. براساس برنامه‌ریزیهای انجام شده ساخت CCTV تا سال ۲۰۰۸ به پایان خواهد رسید نمای خارجی از شیشه و فولاد است و به‌کارگیری سامانه Exodiagonal در آن قابهای مثلثی پدید آورده که چیدمان و ابعاد آنها تابعی از میزان افزایش تنش وارده است. اعضای سازهای از جنس فولاد ومقاطع مرکب بتنی-فولادی هستند که با عملکرد دوگانه، خود امکان انتقال و توزیع مناسب نیرو تا شالوده را فراهم آورده است.سختی مناسبی که حاصل از به‌کارگیری سامانه Exodiagonal است، تغییر شکل جانبی مجموعه را به حداقل رسانیده است.(شکل۴)

مطالعه و بررسی‌های انجام شده توسط مهندسان ساختمان شرکت مشاور KPFF در دفتر سنت لوئیس در سال ۲۰۰۵ که در آن از مدل سازی کامپیوتری استفاده شد به طور خاص به بررسی ویژگی افزونگی پرداخته است. در این تحقیق دو سازه، یکی بلند مرتبه و دیگری با تعداد طبقات اندک مدل سازی شدند. هر دو ساختمان در شرایط لرزه‌خیزی و بادخیزی نسبتاً معمولی فرض شده و سامانه سه بعدی Exodiagonal در آنها به‌کار گرفته شد. بارگذاری براساس استاندارد ASCE-۰۲ "حداقل بارهای طراحی برای ساختمانها و سازه‌های دیگر" برای حداقل بار



شکل۷- دیاگرام نیروی محوری اعضای قطری در گامهای تحلیل ساختمان ۵ طبقه

ثقلی و بار جانبی متوسط انجام شده است. تکیه‌گاههای قائم هر دو ساختمان پس از مدل سازی به‌تدریج براساس رویه خرابی پیش‌رونده حذف شدند و در هر مرحله سازهها مورد تحلیل مجدد قرار گرفته‌اند. (در یک سازه‌ی Exodiagonal تکیه‌گاه قائم عبارت است از یک جفت عضو قطری مجاور هم.) سپس بارها به تناسب اعضاء دوباره توزیع شده و با طراحی اعضاء اولیه مقایسه می‌شوند.

در مرحله بعد اعضای Exodiagonal واقع در مجاورت اعضای محذوف، برداشته می‌شوند. دوباره مدلها تحلیل می‌شوند و بارها بین اعضا به تناسب باز توزیع می‌گردد براساس این توزیع دوباره، نیروهای درونی مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مراحل به دفعات متعدد با برداشتن عضوها تکرار می‌شود. نتایج تحلیل‌های J.P. Miller و R.D. Antholz به طور خلاصه در اینجا بیان شده است. مدلهای ساخته شده شبیه به نوعی از ساختمانهای اداری مدرن می‌باشند.

مدل اولی که در شکل ۵ نشان داده شده، شامل ساختمان اداری ۵ طبقه فرضی می‌باشد که دارای اسکلت فولادی است. سازه‌ی کف شامل دال بتونی سبک وزنی است که روی عرشه فولادی مرکبی قرار گرفته است. عرشه، فولادی از تیرهای اصلی و فرعی I- شکل بال پهن فرض شده است.

مدل دوم که در شکل ۶ نشان داده شده است شامل ساختمان فرضی اداری ۳۰ طبقه با قاب فولادی است که درآن از یک هسته بتن آرمه نیزعلاوه بر سامانه محیطی Exodiagonal استفاده شده است.

ساختار طبقات ، جزئیات پوسته و ارتفاع طبقات همانند مدل ساختمانی ۵ طبقه می‌باشد . تمام محیط بیرونی ساختمان توسط شبکه چهار خانه، سازه‌های Exodiagonal احاطه شده است. این اعضای شبکه‌های درهر ۴ طبقه همدیگر را قطع مینمایند. گره‌ها هر کدام تقریباً ۱۲/۲ متر از یکدیگر فاصله دارند.

با انجام تحلیل Delta – P و آنالیزهای دینامیکی روی هر دو مدل مشخص گردید در مقایسه با بیشتر سیستم‌های سازهای فولادی که به شکل معمول در این نوع از ساختمانها مورد استفاده قرار می‌گیرند، سیستم سازهای Exodiagonal از نقطه نظر مواد و مصالح کارآمدتر و مفیدتر به نظر می‌رسند.

از آنجایی‌که، هدف اصلی این تحقیق مطالعه خرابی‌های پیش رونده در سازههای ساختمانی Exodiagonal بود. این کار با برداشتن اعضای مورب از مدلها به صورت گام به گام و سپس مطالعه توانایی سازه در باز پخش بارها به

اعضای باقیمانده در هر مرحله صورت پذیرفت.

به‌طورکلی هر دو مدل مطالعاتی افزونگی مناسبی به هنگام حذف گام به گام اعضای قطری از خود به نمایش گذاردند.

در گام اول از تحلیل ساختمان ۵ طبقه دو المان قطری از وجه بلندتر ساختمان حذف شد. (شکل ۷) چنانکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود نیروی محوری در اعضای قطری مجاورنسبت به سایر اعضای محیطی افزایش یافته است. این افزایش حدود ۶۵ درصد نیروی محوری اولیه در این اعضا می باشد.

این مسئله ناشی از عملکرد خرپایی سامانه است که مانع از انتقال کل نیرو به نزدیکترین اعضا گردیده است و مابقی نیرو مابین اعضای دورتر توزیع شده است. در این

خرابی و در نتیجه حذف تعداد معدودی از المانهای قطری، عموماً سازه، کف را تحت تاثیر قرار نمیدهد. چرا که اعضای قطری قادر به تحمل توام نیروهای فشاری و کششی میباشند

مرحله تغییری در تکیه‌گاههای قاب کف رخ نداده‌است.

در گام بعدی از تحلیل افزونگی دو عضو قطری دیگر نیز برداشته شدند. نیروی محوری در اعضای همجوار المانهای محذوف تا سطح ۹۵ درصد بیش از نیروی اولیه افزایش یافت. در واقع عملکرد خرپایی موجب می‌شود تا افزایش نیرو تا حدود دوبرابر نیروی اولیه تنها به دو المان مجاور محدود گردد و مابقی نیرو در سایر المانهای دورتر توزیع شود. در این مرحله نیز کماکان تکیه گاههای کف تغییری ننمودهاند بدین معنی که المانهای کششی فوقانی سازه، کف را نگاهداری می‌نمایند.

در گام سوم، یک جفت المان قطری در طبقه دوم حذف شدند، بازتوزیع نیروها در شکل ۷ نمایش داده شده است. نیروهای محوری در اعضای قطری طبقه اول عموما نسبت به گام قبلی تغییر نکرده‌اند اما نیروی محوری در اعضای قطری طبقه دوم در مجاورت اعضای حذف شده ۲۵ درصد نسبت به نیروی اولیه افزایش یافته است. از سوی دیگر دهانه سازه، کف نیز افزایش یافته و درصورتی‌که تیرهای لبه ، فاقد شکل پذیری کافی باشند احتمال فروریزش آنها وجود دارد.

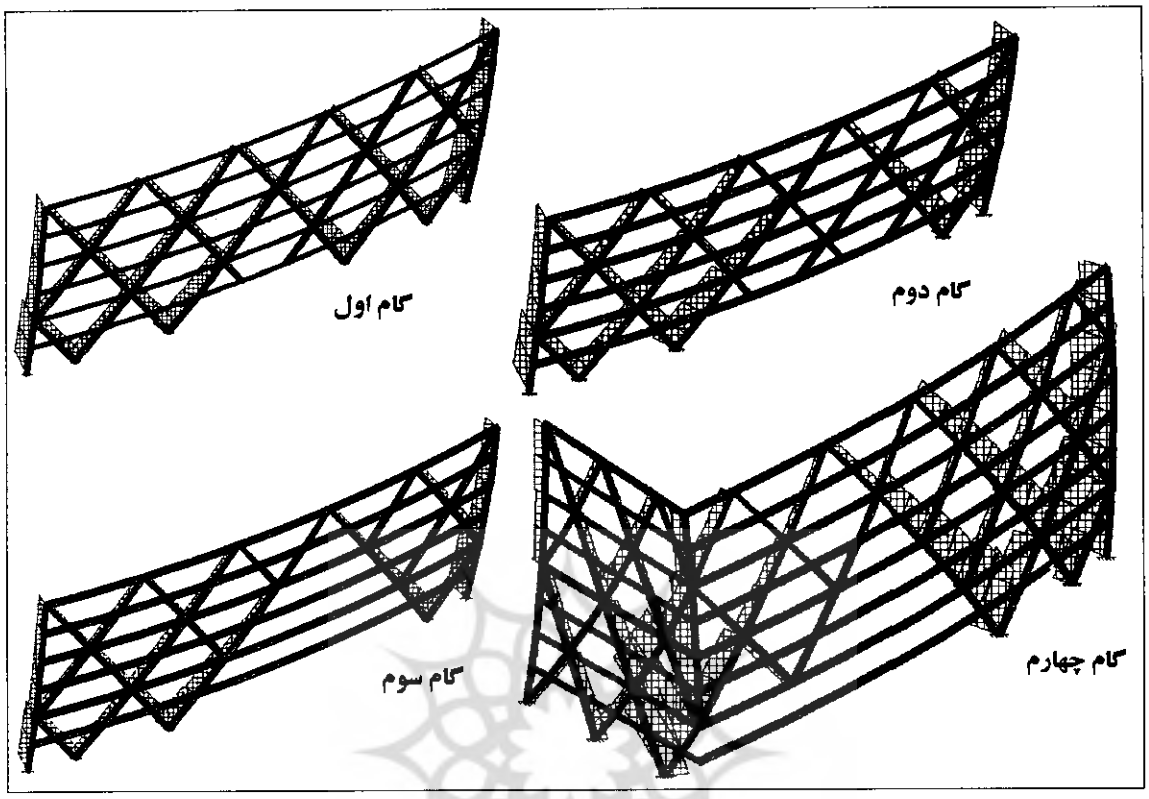
پس از انجام تحلیل‌های متعدد در نهایت ۱۵ عضو قطری حذف شدند از آنجایی‌که در این وضعیت به برخی اعضاء تا سه برابر نیروی اولیه ، بار وارد می‌شود، احتمال ریزش سازه وجود خواهد داشت لیکن در این میان نکته جالب پایداری تیر لبهای است در حالیکه دهانهای حدود سه برابر دهانه اولیه پیدا کرده است.

در ساختمان ۳۰ طبقه نیز نخست یک جفت المان قطری در امتداد ضلع بلند ، حذف گردید، چنانکه در گام اول از شکل ۸ دیده می‌شود بر نیروی محوری در اعضای مجاور حدود ۵۷ درصد نسبت به نیروی اولیه افزوده شده است و مانند مدل ۵ طبقه به علت عملکرد خرپایی سامانه، Exodiagonal ، مابقی نیرو بین سایر اعضاء توزیع گردیده است. با برداشتن دو عضو قطری دیگر مجدداً نیروی محوری در اعضای همجوار المانهای محذوف تا سطح ۹۵ درصد بیش از نیروی اولیه افزایش یافت به عبارتی تنها در دو عضو در مجاورت المانهای برداشته شده نیرو دو برابر شده و مابقی بین سایر اعضاء توزیع گردیده است. در اینجا نیز وضعیت تکیه‌گاهی سازه، کف تغییری ننموده و اعضای فوقانی به صورت المانهای کششی ، تیرهای سقف را نگه‌میدارند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که می‌توان هشت المان دیگر در پنج طبقه، نخست را برداشت بدون آنکه افزایش نیرویی در المانهای قطری طبقه اول رخ دهد. بدین ترتیب در گام سوم دوازده المان قطری حذف شدند.

چنانکه در نتایج تحلیل (شکل۸) مشاهده می‌شود، نیروی محوری در اعضای مجاور در این پنج طبقه تا حدود ۹۵ درصد مقادیر اولیه افزایش یافته است. در گام سوم با حذف تکیه‌گاه‌های تیرهای لبه امکان فروریزش قابها کف در تعدادی دهانه‌ها وجود خواهد داشت اگرچه در اینجا برخی تیرها با دهانهای حدود دو تا سه برابر دهانه اولیه خود کماکان پایداری خود را حفظ نمودند.

تحلیل‌های متعددی بر روی این مدل نیز انجام شد و در آخرین تحلیل ۱۸ المان حذف شدند که در دو طبقه، اول شامل المانهای گوشه نیز می‌شدند. در این وضعیت ، وجود بارهای سنگینی تا حدود سه برابر مقادیر اولیه، وقوع فروریزش را بسیار محتمل می‌سازد که صرف نظر از پیوستگی و شکل پذیری تیرهای لبه منجر به خرابی بخشهایی از کف ساختمان نیز خواهد شد.با این وجود المانهای واقع در یک یا دو دهانه دورتر از ناحیه خرابی به خوبی قادر به تحمل بار وارده می‌باشند. (شکل۸).

نتایج حاکی از وجود قابلیت افزونگی بسیار بالا در این سامانه باربر است. محل تقاطع اعضای قطری به نحوی ، بازتوزیع نیروها را تسهیل می‌نماید که به سرعت با دور شدن از محل خرابی بارهای حاصله کاهش می‌یابد و



شکل۸ - دیاگرام نیروی محوری اعضای قطری در گامهای تحلیل ساختمان ۳۰ طبقه

بدین ترتیب از پیشروی خرابی جلوگیری می‌شود. وجود مسیرهای متعدد توزیع نیرو نیز در این خصوص بسیار حائز اهمیت است. در سازه‌های سنتی اگر دو ستون دچار خرابی شوند بار ستون‌های مجاور آنها حدود ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد در حالی‌که این مقدار در اینجا تنها ۶۵ به درصد محدود می‌گردد. همچنین مشاهده شد که عملکرد قوسی اعضای قطری در این سامانه از افزایش شدید نیرو در تیرها جلوگیری می‌نماید. بدین‌ترتیب اگر این اعضا در وجوه خارجی سازه قادر به تحمل دو تا سه برابر نیروی اولیه وارده باشند، حتی با وقوع خرابی وسیع در پوسته تعداد اندکی از دهانه‌ها فروخواهند ریخت.

اگرچه در تحلیل‌های J.P. Miller و R.D. Antholz به بررسی تخریب‌های پیش‌رونده نظیر آنچه در برج‌های مرکز تجارت جهانی رخ داد ، پرداخته نشده است لیکن به نظر می‌رسد که سامانه Exodiagonal در این خصوص ذاتاً مقاوم است. بدیهی‌است تقویت اعضاء و اتصالات مربوطه با افزایش پیوستگی عملکرد این سامانه را بهبود خواهد بخشید.

همچنین از دیدگاه پایداری کلی نیز عملکرد این سامانه مطلوب ارزیابی می‌گردد چنانکه در تحلیل‌های پایداری (P-Delta) انجام شده توسط J.P. Miller و R.D. Antholz به هیچ‌گونه ناپایداری اشاره نشده است.

نکته حائز اهمیت آنست که خرابی و در نتیجه حذف تعداد معدودی از المانهای قطری، عموماً سازهء کف را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. چرا که اعضای قطری قادر به تحمل توام نیروهای فشاری و کششی می‌باشند. حتی در صورت از دست رفتن یکی از نقاط تکیه‌گاهی و دوبرابر شدن دهانه تیر نیز اگر تیر مزبور فاقد شکل‌پذیری و پیوستگی کافی باشد، خرابی به یک دهانه محدود می‌گردد.

سامانه باربر Exodiagonal علاوه بر ایجاد فرصت طراحی خلاق برای معمار از بازدهی اقتصادی بالا و قابلیت افزونگی مطلوبی برخوردار است و با به‌کارگیری قابلیت‌های آن می‌توان همزمان پاسخگوی نیازهای سازه و معماری ساختمان بود.

فهرست منابع:

1. John P.miller and R. Douglas Antholz, "Strong Diagonals", Civil Engineering Magazine, Nov. 2006
2. John P. Miller, SE and R. Doug Antholz, PE, "Redundancy of Exodiagonal Building Structures", 2006 Structures Congress, May 18-21, St. Louis, MO
3. "Civil Engineering News", Civil Engineering Magazine, Nov. 2006
4. http://en.wikipedia.org/