

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

بررسی رفتار سازه‌ها در زمین لرزه‌های گذشته نشان می‌دهد که پیچش حاصل از نامتقارنی یکی از دلایل آسیب‌پذیری‌های شدید بوده است. با توجه به مزیت‌های روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای که در آنها از تجهیزات الحاقی استهلاک انرژی نظیر میراگرها به‌منظور کنترل پاسخ‌ها در زلزله استفاده می‌شود، می‌توان به کنترل پیچش لرزه‌ای در سازه اقدام نمود اما زلزله‌های اخیر نشان داده‌اند که ساختمان‌های بتنی تحت اثر زلزله دچار آسیب‌هایی می‌شوند که تعمیر آنها را بسیار دشوار و حتی غیرممکن می‌گرداند لذا در این پژوهش به معرفی سیستم نوینی پرداخته شده است که با استفاده از سازوکار حرکت گهواره‌ای در دیوارهای برشی سازه، آسیب را به فیوزهای سازه منتقل می‌کند و باعث می‌شود سازه بتنی در زلزله و بعد از آن ایمن باقی بماند و تعمیرپذیری بسیار ساده‌ای داشته باشد. جزئیات دقیق اتصالات، طراحی و تحلیل غیرخطی این سیستم در نرم‌افزارهای ABAQUS و SAP2000 انجام شده است. پیچش در سازه از نوع جرم متمرکز مدل‌سازی شده است و خروج از محوریت‌های ۵ و ۱۰ و ۲۰ درصدی در سازه بتنی اعمال شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که استفاده از این سیستم نوین در مقایسه با سازه‌های بتنی فاقد آن به طرز مؤثری آسیب وارده به سازه را کاهش داده و سازه بتنی سالم باقی مانده است و با تغییر نیروی پس کشیدگی کابل‌های پس کشیده کنترل پیچش لرزه‌ای انجام شده است، همچنین سطوح عملکردی سازه نیز در ناحیه IO باقی مانده است.

واژگان کلیدی: ساختمان خسارت محدود، دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای، نرم‌افزار ABAQUS، نرم‌افزار SAP2000.

کنترل پیچش لرزه‌ای در ساختمان‌های بتنی با استفاده از دیوارهای برشی تعمیرپذیر دارای حرکت گهواره‌ای

محسن رستمی (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
st_m_rostami@azad.ac.ir

فاطمه گرجی سینکی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

عبدالرضا سروقد مقدم

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

موضوع باعث ایجاد ایده جدیدی به‌منظور محدود کردن خسارت در نقاط مشخصی از سازه شده است. بدین وسیله می‌توان با تعویض المان‌های آسیب‌دیده با سرعت بیشتری از ساختمان‌ها بهره‌برداری کرد. یکی از روش‌های نوین برای بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی استفاده از سیستم‌هایی است که موجب محدود شدن خسارت در سازه می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به سیستم‌های دارای حرکت گهواره‌ای اشاره کرد. در این سیستم‌ها ساختمان اصلی به صورت الاستیک رفتار می‌کند به طوری که جذب انرژی و عملکرد غیرخطی تنها در قسمت‌های مشخصی از ساختمان که از قبل پیش بینی شده‌اند، اتفاق می‌افتد.

توسعه سریع مناطق پر جمعیت شهری و در نتیجه نیاز به فضای مناسب برای زندگی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر توسعه مناطق مسکونی شهری تأثیر می‌گذارد. سیستم‌های رایج مقاوم در برابر نیروی زلزله، اغلب رفتاری غیرخطی را در طی یک زلزله بزرگ، در سراسر سازه تجربه می‌کنند که نهایتاً تغییر شکل باقیمانده و خرابی توزیع شده در سازه را نتیجه می‌دهد، به طریقی که تعمیر این خرابی‌ها مقرون‌به‌صرفه نیست و برخی اوقات به تخریب سازه منجر می‌گردد، به همین دلیل پس از زلزله‌ای نسبتاً شدید این ساختمان‌ها دچار خسارت و تخریب شده و به‌منظور استفاده مجدد از سازه احتیاج به صرف وقت و هزینه زیاد به دلیل گسترده‌گی خسارت در سازه می‌باشد و این

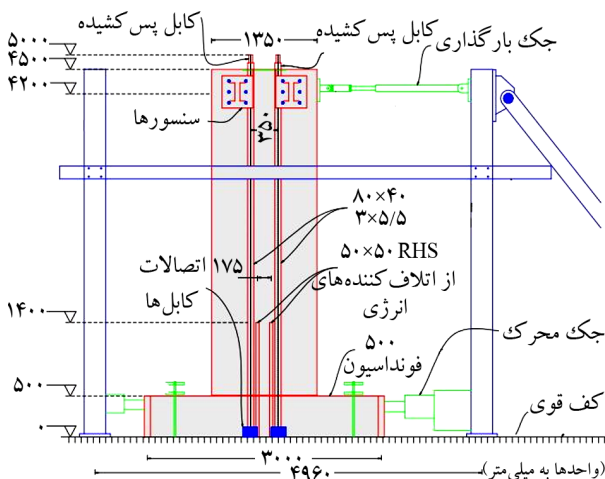
۲- معرفی سیستم دارای حرکت گهواره‌ای

حرکت گهواره‌ای در حالت کلی در اثر بلند شدن فونداسیون از سطح خاک و دوران سازه ایجاد می‌شود اما در نمونه‌های نوین حرکت گهواره‌ای بلند شدن و دوران دیوار برشی بتنی بر روی فونداسیون نیز در نظر گرفته شده است.

موری و همکاران [۱] به مطالعه بلندشدگی در زیر دیوارهای برشی در یک قاب دو بعدی پرداختند. قاب مورد مطالعه آنها شامل دو دهانه بود که یک دهانه آن دارای دیوار برشی و دهانه دیگر دارای قاب ساده بوده است که بر اساس نتایج آزمایشگاهی نحوه توزیع آسیب در قاب و دیوار برشی بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. وادا و همکاران [۲] به بررسی یک قاب بهسازی شده به وسیله سیستم دیوارهای بتنی دارای حرکت گهواره‌ای پیش‌تینده به همراه میراگرهای فولادی به منظور کنترل آسیب لرزه‌ای و افزایش مقاومت قاب پرداختند. عملکرد لرزه‌ای سازه قبل و بعد از بهسازی به وسیله تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت به این نتیجه رسیدند که سیستم‌های گهواره‌ای می‌توانند به طور عمده پاسخ لرزه‌ای ناشی از حرکات زمین لرزه را کاهش دهند. وادا و همکاران [۳] در مقاله‌ای با عنوان مقاوم‌سازی لرزه‌ای قاب‌های SRC موجود با استفاده از دیوارهای گهواره‌ای و میراگرهای فولادی به مقاوم‌سازی یک قاب بتن آرمه ۱۱ طبقه پرداختند و نتیجه مهم مقاله آنها این بود که سیستم مقاوم‌سازی شده به طور مؤثر تغییر شکل‌های سازه را کنترل نموده و آسیب سازه را در مقابل زمین لرزه‌های شدید کاهش می‌دهد. نیکنام و فیلیاترو [۴] در مقاله‌ای تحت عنوان طراحی و آزمایش لرزه‌ای سیستم‌های متصل به دیوار گهواره‌ای به تشریح روشی برای طراحی مستقیم بر اساس جابه‌جایی، برای سیستم‌های متصل شده به دیوار گهواره‌ای پرداختند. این سیستم جدید سیستم مقاوم لرزه‌ای جدیدی ارائه می‌دهد که ترکیبی از ابزارهای میراگر جاری شونده با دیوارهای گهواره‌ای بتنی پیش‌تینده می‌باشد. همچنین ژو و همکاران [۵] در مقاله‌ای به معرفی دیوارهای گهواره‌ای به منظور تحقق بخشیدن به انعطاف‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها

پرداختند. سیستم سازه‌ای مورد مطالعه آنها از دیوارهای بتن مسلح مرکزی و قاب‌های بتن مسلح فولادی SRC تشکیل شده است. سه نوع سازه، مورد مطالعات تحلیلی آنها قرار گرفته است، یکی با دیوارهای برشی رایج، یکی با دیوارهای گهواره‌ای و دیگری با دیوارهای گهواره‌ای و میراگرهای ویسکوز. در طول تحلیل تاریخچه زمانی مشخص شد که در دو سیستم گهواره‌ای، دوره تناوب ۲ ثانیه افزایش یافته و تغییر مکان نسبی طبقات ۳۰ درصد افزایش یافته است. تویگدن و همکاران [۶] در مقاله‌ای با عنوان آزمایش دینامیکی دیوارهای گهواره‌ای پیش‌تینده به ارائه نتایج اولیه از یک آزمایش تجربی به منظور درک بیشتر خصوصیات دینامیکی دیوارهای گهواره‌ای پیش‌تینده پرداختند.

هولدن و همکاران [۷] در راستای پژوهش در زمینه حرکت گهواره‌ای بر روی دو نمونه دیوار برشی که نمونه اول دیوار برشی معمولی و نمونه دوم دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای بود به نتایج مهمی رسیدند. جزئیات دیوار برشی مورد مطالعه آنها در شکل (۱) آورده شده است. این سیستم در محل پای دیوار برشی به وسیله بولت‌هایی با تعداد و ظرفیت کم به گونه‌ای قرار داده می‌شود که امکان بلندشدگی دیوار برشی وجود داشته باشد و همچنین در این سیستم برای بازگشت به وضعیت اولیه از کابل‌های پس کشیده استفاده شده است. اشکالی که در این روش وجود دارد ایجاد ضربه نسبتاً شدید در پای دیوار برشی و تخریب آن قسمت می‌باشد.



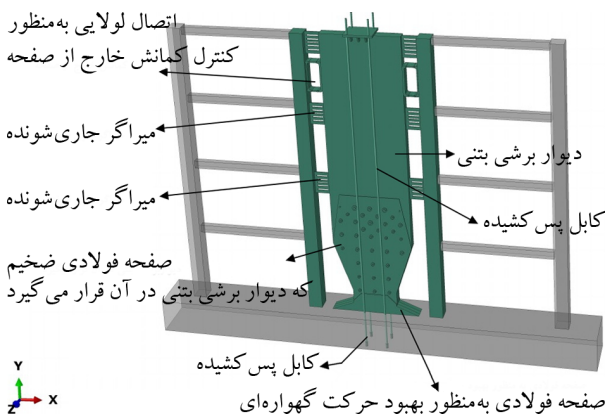
شکل (۱): نمونه دیوار برشی توسعه یافته توسط هولدن و همکاران [۷].

سخت ساختمان دقت بیشتری را نسبت به آنالیز بارافزون سه‌بعدی دارا می‌باشد.

۳- معرفی سیستم نوین دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای و طراحی آن در نرم‌افزار ABAQUS

در این سیستم نوین که بر اساس تئوری‌های قبلی توسعه یافته است به جای قرارگیری مستقیم دیوار برشی بر روی فونداسیون و تماس بتن با بتن از یک غلاف مخصوص فولادی مطابق شکل (۲) استفاده شده است. همچنین این دیوار برشی در قسمت پایینی و قرارگیری بر روی فونداسیون دارای باریک‌شدگی قابل توجهی می‌باشد تا بلندشدگی دیوار برشی بسیار ساده‌تر انجام شود. اتصال دیوار برشی بتنی و غلاف فولادی توسط بلت‌هایی با مقاومت بالا مطابق شکل انجام شده است. دیوار برشی بتنی در این روش در محدوده الاستیک باقی می‌ماند اما میراگرهای جاری‌شونده متصل به دیوار برشی در اثر بلندشدگی دیوار برشی قسمت عمده‌ای از نیروی لرزه‌ای وارده را مستهلک می‌نمایند. لازم به ذکر است به‌وسیله کابل‌های پس‌کشیده برگشت‌پذیری سیستم تأمین می‌شود. توضیحات کامل این سیستم نوین در شکل (۲) نشان داده شده است.

یکی از موضوعات بسیار مهم در عملکرد این سیستم دیوار برشی نوین این است که کمانش خارج از صفحه نداشته باشد. به همین دلیل از اتصالات لولایی خاصی استفاده شده است تا بتواند مانع کمانش خارج از صفحه دیوار برشی گردد. همچنین عملکرد



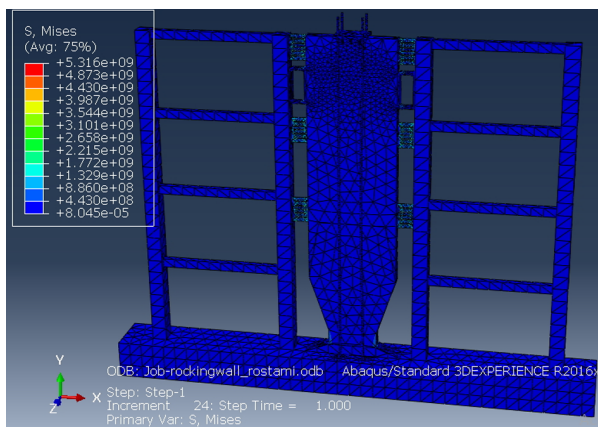
شکل (۲): جزئیات دیوار برشی طراحی شده در نرم‌افزار ABAQUS.

دیرلین و همکاران [۸] به آزمایش مقیاس کامل یک ساختمان گهواره‌ای پرداختند. از جمله نتایج کار آنها دریافت یکنواخت سازه و تمرکز خسارت در میراگرهای پای سازه گهواره‌ای بوده است.

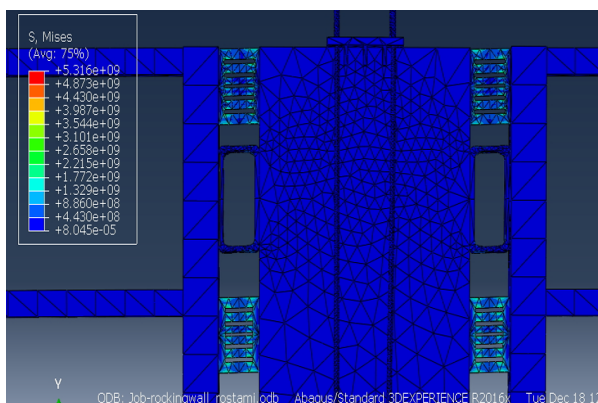
هاشمی و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰ مقاله‌ای با عنوان ارزیابی لرزه‌ای دیوارهای الواری دارای حرکت گهواره‌ای با شیوه‌های مختلف اتلاف انرژی ارائه کردند که در آن با طراحی میراگر دارای مفصل مکانیکی، پاسخ لرزه‌ای سازه را کاهش دادند. امپاماتریکاس و همکاران [۱۰] مطالعاتی بر روی اثر خروج از مرکزیت سختی و مقاومت بر پاسخ غیرخطی ساختمان‌های نامتقارن انجام داده‌اند و با ارائه یک مدل تحلیلی که پارامترهای کلیدی و ویژگی‌های دینامیکی سازه‌های واقعی را منظور می‌کند به این نتیجه رسیده‌اند که خروج از مرکزیت مقاومت، بیشتر از خروج از مرکزیت سختی بر روی پاسخ غیرخطی ساختمان نامتقارن اثر می‌گذارد. گو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای دیوارهای برشی حرکت گهواره‌ای در رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک پالس‌دار پرداختند. نتیجه مطالعه آنان کارایی مناسب دیوارهای گهواره‌ای در بهبود رفتار لرزه‌ای می‌باشد. همچنین مقاوم‌سازی دانشگاه تی‌آی‌تی ژاپن توسط دیوارهای برشی دارای حرکت گهواره‌ای در پژوهش‌ها و همکاران [۱۲] به‌طور کامل توضیح داده شده که یک پژوهش بسیار مهم کاربردی است زیرا این سیستم نوین را به‌صورت اجرایی در یک ساختمان میان‌مرتبه به کار برده است.

تسو و مقدم [۱۳] نیز با مطالعه بر روی یک ساختمان بتنی نامتقارن به این نتیجه رسیده‌اند که در ساختمان‌های نامتقارن که اثر پیش‌کش در آنها مهم است به‌جای استفاده از آنالیز بارافزون سه‌بعدی می‌توان ابتدا با استفاده از تحلیل دینامیکی خطی سه‌بعدی، چندین تغییر مکان هدف که هر کدام مربوط به یکی از قاب‌های برابر جانبی است را تعیین کرده و سپس برای هر کدام از این قاب‌ها به‌تنهایی تحلیل بارافزون دو بعدی انجام داد. دقت این روش در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان بسیار بالاست و حتی در سمت

خروجی‌های تحلیل نشان می‌دهند که عمده تنش‌ها در قسمت میراگرها رخ داده است و دیوار برشی بتنی در محدوده رفتار خطی باقی مانده است. در شکل (۵) خروجی تنش‌های مایز دید می‌شود. در شکل (۶) خروجی تنش‌های مایز در میراگرها دیده می‌شود که عمده تمرکز تنش در میراگرها بوده است.



شکل (۵): خروجی تنش‌های مایز ایجاد شده در میراگرهای اطراف دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای.



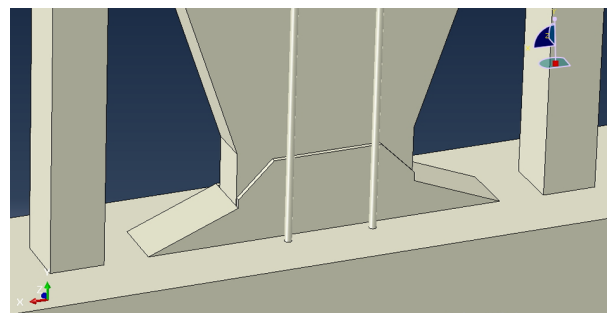
شکل (۶): الاستیک بودن دیوار برشی بتنی و اتصالات و پلاستیک شدن میراگرهای جاری شونده.

۴- صحت‌سنجی در نرم‌افزارهای ABAQUS و SAP2000

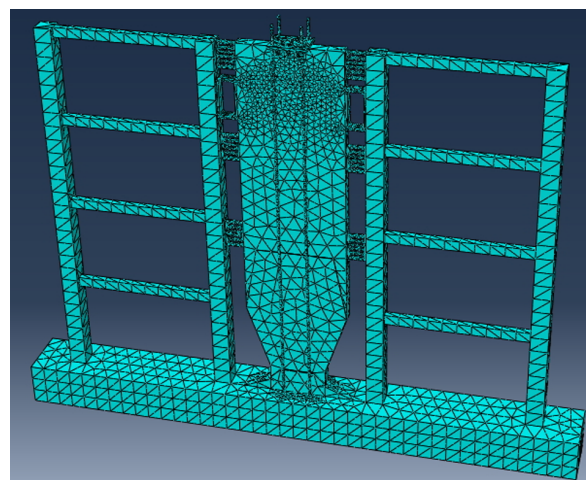
در ابتدا از آنجایی که در جزئیات اتصالات پای ستون دارای حرکت گهواره‌ای از میراگر جاری‌شونده استفاده شده است صحت‌سنجی یک نمونه میراگر جاری‌شونده با کار آزمایشگاهی [۱۴] انجام شده است. در شکل (۷) نمونه آزمایشگاهی و در شکل (۸) نمودار صحت‌سنجی دیده می‌شود.

مناسب این سیستم به طراحی بسیار وابسته است. برای مدل‌سازی سیستم گهواره‌ای در آباکوس از المان solid و برای مدل‌سازی بتن از مدل بتن آسیب‌دیده پلاستیک که برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن استفاده شده است. تماس بین غلاف فولادی و دیوار بتنی با استفاده از contact شبیه‌سازی شده است. بولت‌های متصل‌کننده دیوار و غلاف فولادی با المان solid مدل‌سازی شده‌اند و جنس آنها فولاد پر مقاومت است. روش طراحی سازه‌ها بر مبنای آیین‌نامه LRFD بوده است. همچنین در محل اتصال نیز باید جزئیات خاص شکل (۳) برای بهبود ایمنی حرکت گهواره‌ای انجام شود.

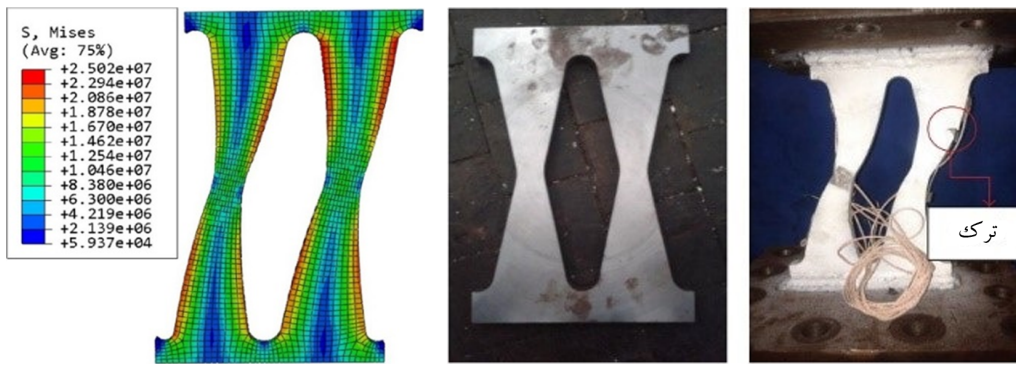
مش‌بندی به گونه‌ای بهینه انجام شده است تا در محل اتصالات و بولت‌ها مش‌های ریزتری اعمال شود تا دقت در تحلیل بالا رود. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، مش‌بندی کابل‌ها نیز به صورت مناسبی انجام شده است.



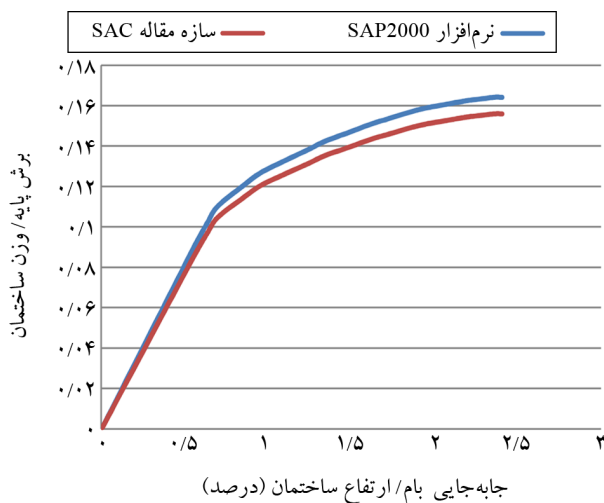
شکل (۳): نحوه اتصالات پای دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای.



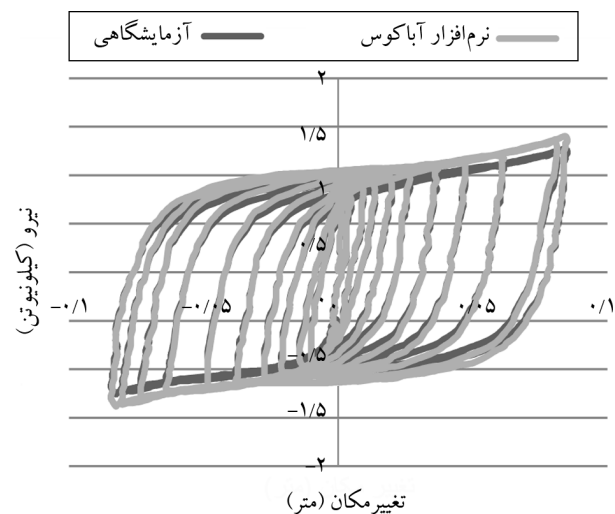
شکل (۴): مش‌بندی بهینه دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای و کابل‌های پس‌کشیده.



شکل (۷): نمونه آزمایشگاهی میراگر و مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار ABAQUS [۱۴].



شکل (۸): نمودار صحت‌سنجی بر مبنای مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS.



شکل (۹): خروجی منحنی بارافزون در پروژه SAC [۹] و مدل تحلیل شده در نرم‌افزار SAP2000.

در شکل (۹) خروجی منحنی بارافزون در پروژه ۹ طبقه SAC [۹] دیده می‌شود. خروجی شکل (۶) نشان‌دهنده‌ی مطابقت بسیار خوب صحت‌سنجی با پروژه ۹ طبقه SAC [۹] می‌باشد. از بین روش‌های مختلف خروج از مرکزیت می‌توان به روش‌های نواری یک‌طرف و نواری دوطرفه و روش نقطه‌ای اشاره نمود که در این پژوهش به دلیل مزایای روش نقطه‌ای از این روش برای اعمال خروج از مرکزیت استفاده شده است.

۵- ایجاد خروج از مرکزیت با قرار دادن جرم نقطه‌ای در لبه سازه با ثابت بودن جرم کل (حالت نقطه‌ای)

در این روش برای ایجاد خروج از مرکزیت فرض شده است که در لبه سازه جرمی قرار داده شده است. شکل (۱۰) پلان سازه را نشان می‌دهد که در آن ابعاد پلان سازه a و b فرض شده است.

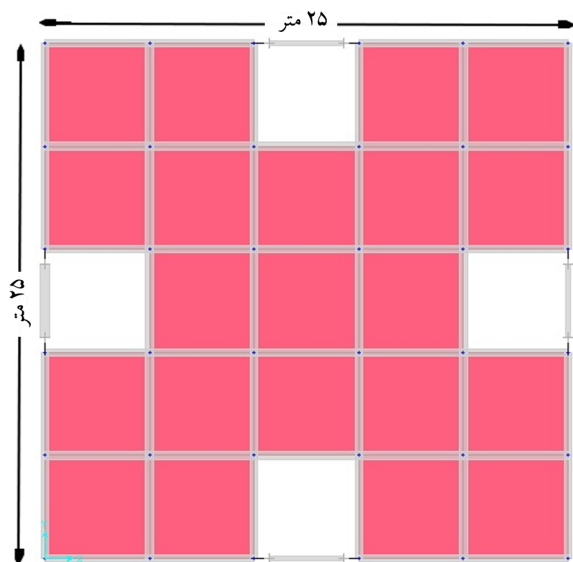
به علت اهمیت بسیار زیاد جزئیات اتصالات و نحوه ایجاد بلندشدگی در ستون‌های دهانه مهاربندی، در ابتدا مدل‌سازی و تحلیل ستون‌های دهانه‌های مهاربندی در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. این ستون‌های دهانه‌های مهاربندی به همراه کابل‌های پس‌کشیده نقش اصلی در ایجاد حرکت گهواره‌ای در سازه را ایجاد می‌کنند. در حقیقت قسمت عمده برگشت‌پذیری چنین سیستم‌هایی با کابل‌های پس‌کشیده تأمین می‌گردد. همچنین به دلیل زمان‌بر بودن تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS، سازه‌های بتنی در نرم‌افزار SAP2000 با دیوارهای برشی دارای حرکت گهواره‌ای مدل‌سازی شده‌اند و تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی آنها انجام شده است و صحت‌سنجی مدل نرم‌افزار SAP2000 با مدل ۹ طبقه سازه SAC [۹] انجام شده است که خروجی آن در شکل (۹) دیده می‌شود.

آن در جدول (۱) آورده شده است.

همان گونه که به وضوح مشخص است ابعاد پلان در تمامی سازه‌ها ۲۵ در ۲۵ متر بوده و ارتفاع طبقات نیز برابر ۳/۲ متر می‌باشد. شکل (۱۱) تصویر پلان سازه‌های مدل‌سازی شده می‌باشد که در تمامی سازه‌ها یکسان است.

جدول (۱): مشخصات سیستم‌های سازه‌ای مدل‌سازی شده.

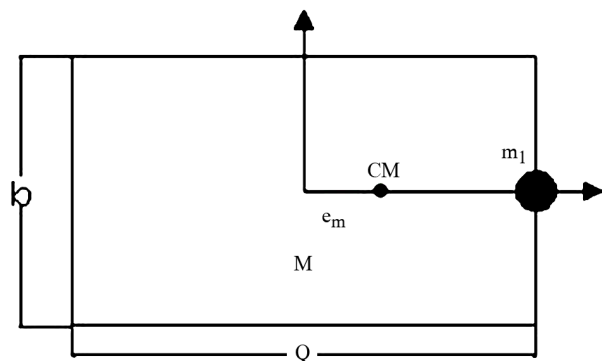
سیستم سازه‌ای	درصد پیش	ارتفاع هر طبقه	ارتفاع کل سازه
سازه ۴ طبقه نامنظم بدون پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰	۳/۲	۱۲/۸
سازه ۴ طبقه نامنظم بدون پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰	۳/۲	۱۲/۸
سازه ۴ طبقه نامنظم پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰/۰۵	۳/۲	۱۲/۸
سازه ۴ طبقه نامنظم پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰/۱	۳/۲	۱۲/۸
سازه ۴ طبقه نامنظم پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰/۱	۳/۲	۱۲/۸
سازه ۴ طبقه پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰/۲	۳/۲	۱۲/۸
سازه ۴ طبقه نامنظم پیش‌داری حرکت گهواره‌ای	۰/۲	۳/۲	۱۲/۸



شکل (۱۱): پلان سازه‌های مدل‌سازی شده.

۶- طراحی سازه‌های مورد بررسی

برای مقایسه بهتر سیستم‌های سازه‌ای، بارگذاری آنها بر طبق جدول (۲) و به صورت کاملاً مشابه انجام شده است. در اینجا به



شکل (۱۰): نحوه ایجاد خروج از مرکزیت از نوع حالت نقطه‌ای.

جرم m_1 در لبه سازه در فاصله $\frac{a}{2}$ از مرکز سطح پلان قرار دارد که اگر جرم کل برابر M فرض گردد برای محاسبه خروج از مرکزیت جرمی خواهیم داشت:

$$e_m = \frac{m_1 \frac{a}{2}}{M} = \frac{m_1 a}{2M} \quad (1)$$

که اگر خروج از مرکزیت به صورت درصدی از بعد سازه تعریف شود از رابطه (۱) نتیجه می‌شود:

$$e_m = \frac{m_1}{2M} \quad (2)$$

برای محاسبه ممان اینرسی از رابطه (۳) استفاده می‌گردد:

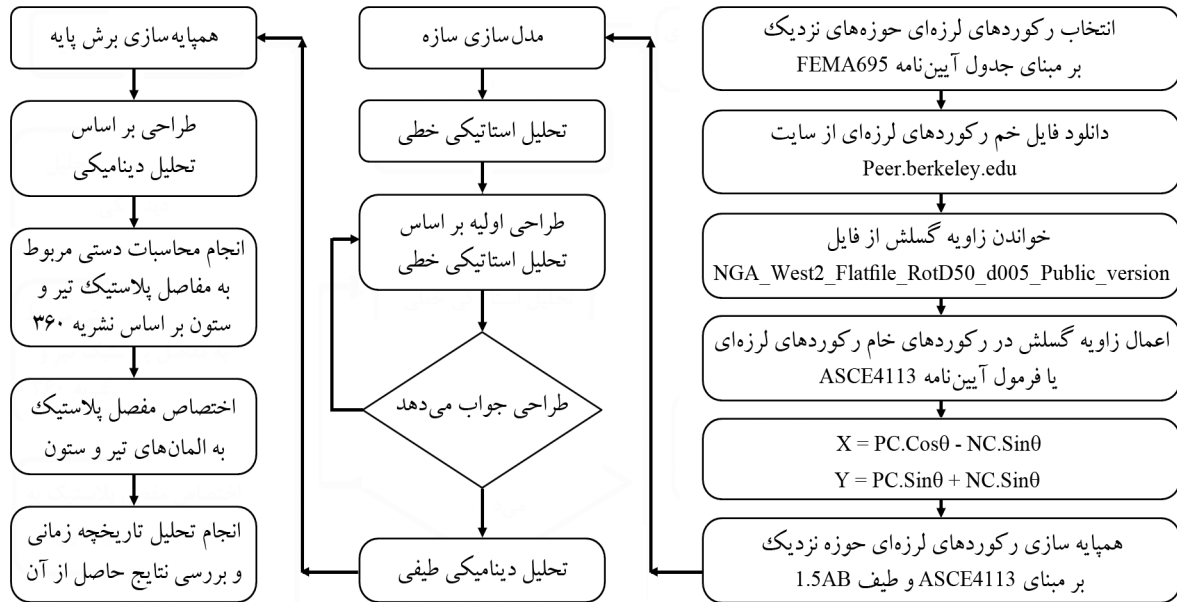
$$I_{cm} = (M - m_1) \left[\frac{(a^2 + b^2)}{12} + a^2 e_m^2 \right] + m_1 \left(\frac{a}{2} - ea \right)^2 \quad (3)$$

در این قسمت پس از طراحی اولیه در نرم‌افزار آباکوس، به بررسی و مقایسه سیستم نوین دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای با ابعاد هندسی و بارگذاری کاملاً مشابه در نرم‌افزار (SAP) می‌پردازیم. مدل رفتاری میراگرهای جاری‌شونده از نوع المان Multi Linear Plastic بوده است که بهترین رفتار غیرخطی را برای میراگرهای جاری‌شونده در نظر می‌گیرد. به دلیل وجود دیوارهای برشی دارای حرکت گهواره‌ای میرایی و اسکوز اثر چندانی روی این سازه‌ها ندارد. لازم به ذکر است که در تمامی مدل‌سازی‌ها فرض بر این است که فاصله بین دیوارها با تیرها و ستون‌های سازه به گونه‌ای است تا اثر میانقاب‌ها حذف شود. همچنین اسکلت تمامی سازه‌ها بتنی هستند.

خلاصه مدل‌سازی سازه‌های دارای حرکت گهواره‌ای و فاقد

جدول (۲): جزئیات بارگذاری.

بار زنده بام (کیلوگرم بر متر مربع)	بار مرده بام (کیلوگرم بر متر مربع)	بار زنده (کیلوگرم بر متر مربع)	بار مرده (کیلوگرم بر متر مربع)
۱۵۰	۳۰۰	۲۰۰	۶۵۰



شکل (۱۲): روند طراحی سازه‌های مورد بررسی.

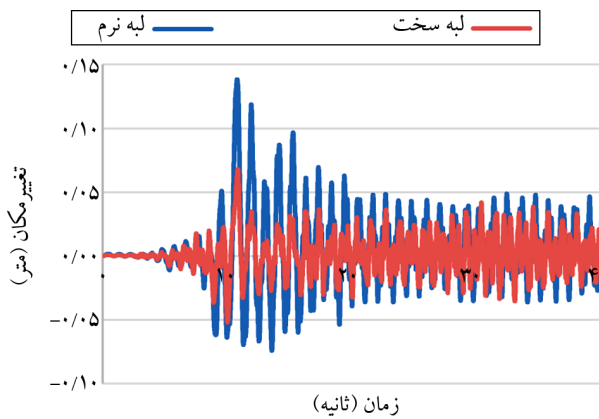
شکل (۱۳) خروجی زلزله کیپ‌مندوسینو بر روی سازه مجهز به حرکت گهواره‌ای و دارای کابل‌های پس کشیده را نشان می‌دهد. خروج از مرکزیتی ۲۰ درصدی به این سازه اعمال شده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود، ماکزیمم تغییر مکان دو لبه نرم و سخت در این سازه برابر ۷ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین این سازه به علت سازوکار حرکت گهواره‌ای و کابل‌های پس کشیده دارای قابلیت بسیار مهم خودمحموری بوده و تغییر مکان‌های ماندگار آن نسبت به سازه فاقد حرکت گهواره‌ای نصف شده است.

شکل (۱۴) مربوط به خروجی زلزله کیپ‌مندوسینو در سازه ۴ طبقه گیردار (فاقد حرکت گهواره‌ای) می‌باشد. همان‌طور که به وضوح دیده می‌شود حداکثر میزان تغییر مکان بین دو لبه نرم و سخت در این سازه برابر ۱۲ سانتی‌متر است. همچنین تغییر مکان‌های ماندگار در لبه‌های سخت و نرم متفاوت بوده و در لبه نرم که بحرانی‌تر است این میزان تقریباً برابر ۹ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) دیده می‌شود که سازه مجهز

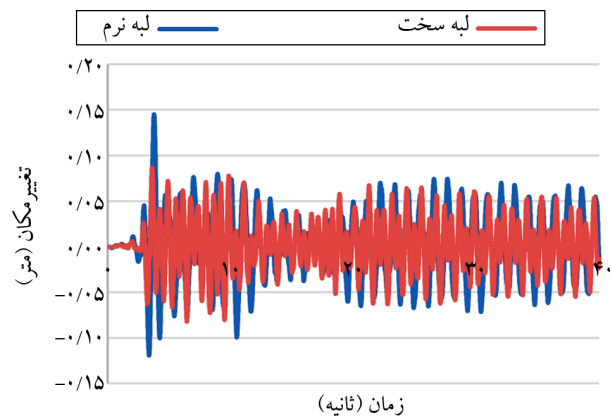
دلیل اختصار از آوردن جزئیات محاسبات بارگذاری خودداری شده است. نوع در نظر گرفتن نامتقارنی در سازه از نوع جرم متمرکز بوده است. خروج از مرکزیت مدل‌سازی شده به ترتیب ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۲۰ درصد بوده است که در این مقاله به جهت خلاصه کردن خروجی‌ها و نتایج، خروجی‌های پیش‌ساخته ۲۰ درصدی ارائه شده است. بر مبنای شکل (۱۲) طراحی سازه‌های مورد بررسی انجام گرفته است.

۷- مقایسه تغییر مکان‌های ایجاد شده

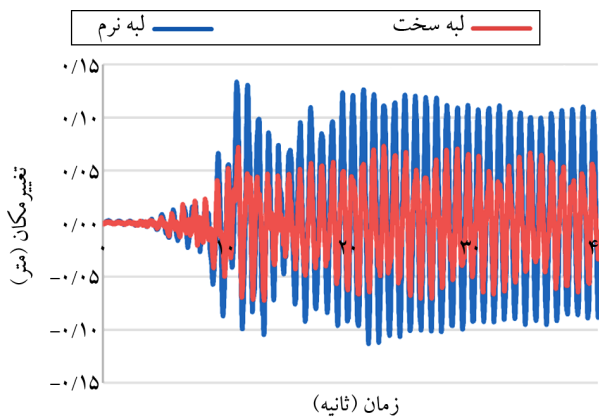
در سیستم حرکت گهواره‌ای نوین اشاره شده، کابل‌های پس کشیده نقش بسیار مهمی در کنترل تغییر مکان‌های سازه‌ای دارند و می‌توانند قابلیت خودمحموری و برگشت‌پذیری سازه به جای اولیه خود را ایفا کنند. تغییرات نیروی پس کشیدگی به گونه‌ای بوده است که بتوان پیش‌لرزه‌ای را کنترل نموده و هر رشته کابل ۲۰ تن نیروی پس کشیدگی دارد که در هر سمت سازه از چند رشته کابل استفاده شده است.



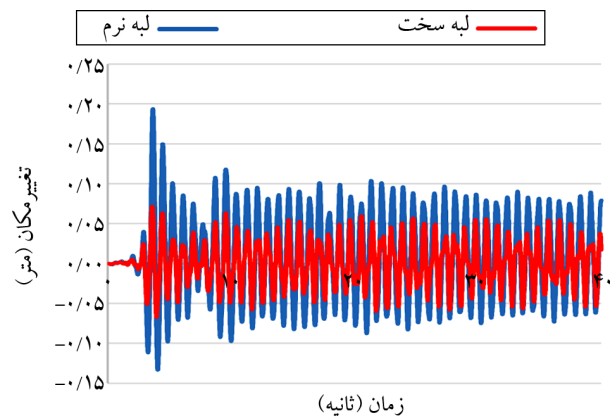
شکل (۱۵): خروجی زلزله لندرز بر روی سازه ۴ طبقه دارای حرکت گهواره‌ای با خروج از مرکزیت ۲۰ درصد.



شکل (۱۳): خروجی زلزله کیپ‌مندوسینو بر روی سازه ۴ طبقه دارای حرکت گهواره‌ای با خروج از مرکزیت ۲۰ درصد.



شکل (۱۶): خروجی زلزله لندرز در سازه ۴ طبقه گیردار با خروج از مرکزیت ۲۰ درصدی.



شکل (۱۴): خروجی زلزله کیپ‌مندوسینو در سازه ۴ طبقه گیردار با خروج از مرکزیت ۲۰ درصدی.

تحت زلزله لندرز است میزان حداکثر تغییر مکان دو لبه نرم و سخت برابر ۵ سانتی متر است، اما تغییر مکان ماندگار در این سازه برابر ۱۰ سانتی متر می‌باشد؛ بنابراین در این زلزله نیز سازه با حرکت گهواره‌ای و کابل‌های پس کشیده دارای عملکرد مناسبی در تأمین کنترل پیچش لرزه‌ای می‌باشد. همچنین با توجه به این دو نمودار مشاهده می‌شود که در سازه دارای حرکت گهواره‌ای به علت استفاده از کابل‌های پس کشیده و قابلیت خودمحصوری سازه بعد از ۲۰ ثانیه تقریباً تغییر مکان لبه نرم و سخت آن کاملاً یکسان شده است و سازه تقریباً پیچشی رفتار نمی‌کند اما در سازه گیردار کاملاً برعکس بوده و تغییر مکان لبه سخت و نرم سازه از ۲۰ ثانیه به بعد تقریباً با یکدیگر در حدود ۵ سانتی متر و بیشتر اختلاف دارند و سازه کاملاً پیچشی رفتار می‌کند.

به حرکت گهواره‌ای دارای عملکرد بسیار مناسب‌تری از نظر کنترل پیچش لرزه‌ای می‌باشد زیرا هم تغییر مکان‌های دو لبه نرم و سخت سازه بسیار به یکدیگر نزدیک‌تر هستند و هم اینکه در این سازه به علت استفاده از کابل‌های پس کشیده و قابلیت خودمحصوری تغییر مکان‌های ماندگار بسیار کمتری (در حدود نصف) نسبت به سازه مشابه فاقد حرکت گهواره‌ای داشته است. با مقایسه بین شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود که در شکل (۱۵) که به بررسی خروجی زلزله لندرز بر روی سازه با سیستم گهواره‌ای می‌پردازد میزان ماکزیمم تغییر مکان سازه میان دو لبه نرم و سخت برابر ۵ سانتی متر می‌باشد. همچنین در این نمودار تغییر مکان ماندگار برای لبه نرم حداکثر برابر ۷ سانتی متر است اما در شکل (۱۶) که مربوط به سازه بدون حرکت گهواره‌ای

۸- مقایسه سطوح عملکرد بین سیستم دارای دیوار برشی حرکت گهواره‌ای و سیستم دیوار برشی معمولی

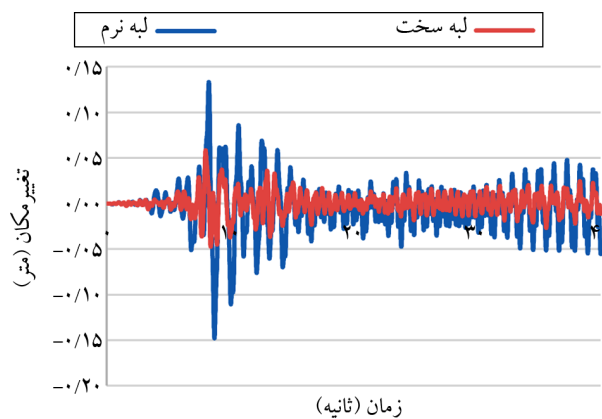
بر مبنای مفاهیم لرزه‌ای هرچه قدر که رفتار سازه به سمت سطح استفاده بی‌وقفه حرکت کند مناسب‌تر است زیرا سطوح عملکردی در سازه به سمت ایمنی بیشتر متمایل می‌گردد. همچنین یکی از موارد بسیار مهم که در بحث حرکت گهواره‌ای کنترل شده باید مد نظر قرار گیرد میزان تغییر مکان‌های قائم در ستونی است که دارای حرکت گهواره‌ای می‌باشد زیرا اگر میزان این تغییر مکان‌های قائم بسیار زیاد باشد (بیشتر از ۵ سانتی‌متر) می‌تواند اثرات نامطلوبی را بر روی سیستم سازه‌ای بگذارد لذا در این پژوهش با در نظر گرفتن تمامی موارد اشاره شده طراحی حرکت گهواره‌ای کنترل شده در سازه به گونه‌ای انجام شده است که تغییر مکان قائم ستون دارای حرکت گهواره‌ای به میزان ۱ سانتی‌متر محدود گردد. شکل (۱۹) میزان تغییر مکان قائم ستون دارای حرکت گهواره‌ای را نشان می‌دهد که به میزان ۱ سانتی‌متر تغییر مکان قائم محدود شده است.

در زیر هر یک از رشته کابل‌های سازه که دارای Grade 270 می‌باشند یک میراگر جاری‌شونده از نوع Multi Linear Plastic قرار داده شده است تا در هنگامی که نیروی محوری زیادی در کابل‌ها ناشی از حرکت گهواره‌ای ایجاد می‌گردد در ابتدا میراگر جاری شده و سپس کابل دچار جاری‌شدگی گردد. البته باید به این موضوع توجه بسیار شود که تحت هیچ شرایطی نباید کابل دچار گسیختگی گردد زیرا این موضوع می‌تواند مشکلاتی نظیر تغییر مکان‌های بیش از حد را برای سازه و عدم خودمحوری را در سیستم ایجاد کند. در شکل (۲۰) خروجی مفصل پلاستیک در سازه‌های مورد بررسی دیده می‌شود.

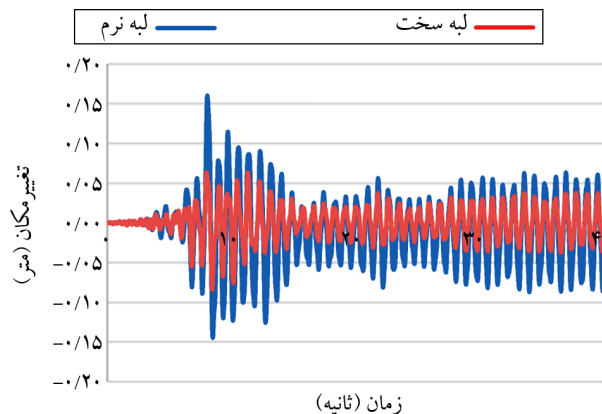
در شکل (۲۰) محل تشکیل مفصل پلاستیک در هر دو سازه به وضوح قابل مشاهده است که در سیستم حرکت گهواره‌ای مفصل پلاستیک در ناحیه IO هستند اما در سازه بتنی فاقد حرکت گهواره‌ای مفصل پلاستیک در ناحیه LS می‌باشند، پس استفاده از سیستم حرکت گهواره‌ای منجر به افزایش سطح ایمنی در سازه شده است.

شکل (۱۷) مربوط به خروجی زلزله نورتریج بر روی سازه ۴ طبقه دارای حرکت گهواره‌ای با خروج از مرکزیت ۲۰ درصد می‌باشد. در این سازه تحت اثر زلزله نورتریج حداکثر تغییر مکان دو لبه نرم و سخت برابر ۱۰ سانتی‌متر شده است و همچنین میزان تغییر مکان ماندگار در سازه برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد.

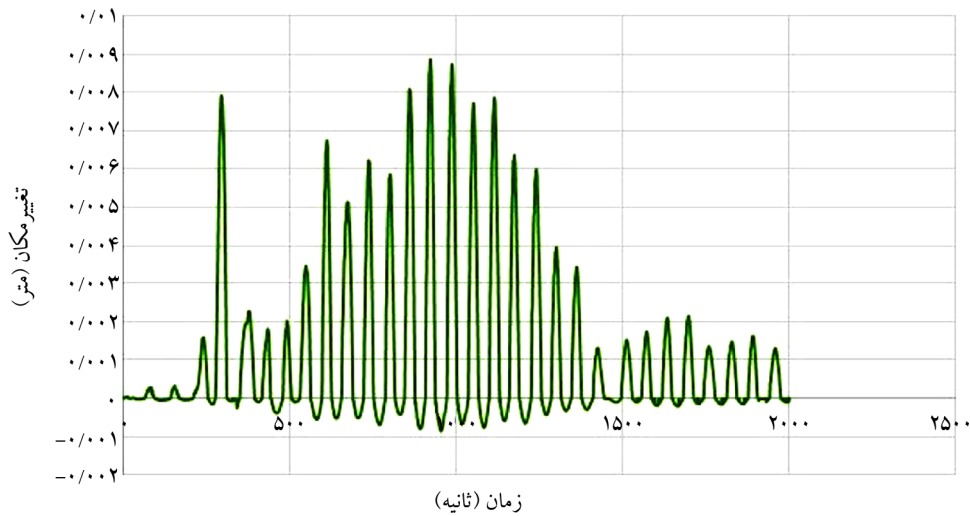
شکل (۱۸) مربوط به خروجی زلزله نورتریج بر روی سازه ۴ طبقه گیردار با پیچش ۲۰ درصدی می‌باشد. در سازه مذکور میزان حداکثر تغییر مکان دو لبه سخت و نرم برابر ۱۱ سانتی‌متر و همچنین تغییر مکان ماندگار در سازه برابر ۸ سانتی‌متر است. به‌طور کلی با بررسی تمام نمودارهای بالا نتیجه‌گیری می‌شود سازه دارای سیستم حرکت گهواره‌ای و کابل‌های پس کشیده به خوبی توانسته پیچش را کنترل نماید و نسبت به سازه مشابه گیردار خود دارای رفتار لرزه‌ای بسیار بهتری به میزان ۳۰ درصد باشد.



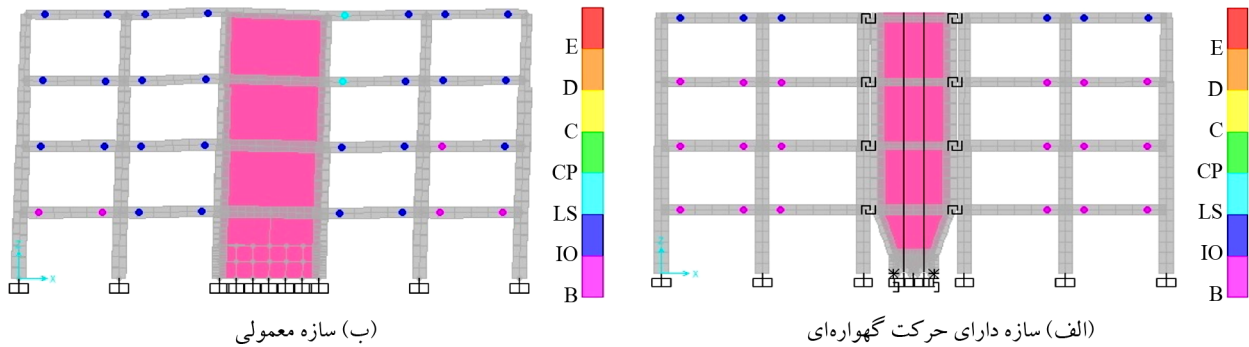
شکل (۱۷): خروجی زلزله نورتریج بر روی سازه ۴ طبقه دارای حرکت گهواره‌ای با پیچش ۲۰ درصد.



شکل (۱۸): خروجی زلزله نورتریج در سازه ۴ طبقه گیردار با خروج از مرکزیت ۲۰ درصدی.



شکل (۱۹): نمودار تغییر مکان قائم ستون با حرکت گهواره‌ای.



شکل (۲۰): نحوه توزیع مفاصل پلاستیک در (الف) سازه دارای حرکت گهواره‌ای و (ب) سازه معمولی.

تأثیرپذیری هر پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر به صورت زوجی، بررسی و نسبت به میزان تأثیرگذاری پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرند. پارامترها به مقدار x_{ij} وزن‌دهی می‌شوند که x_{ij} مقدار تأثیرگذاری پارامتر i بر پارامتر j می‌باشد. بدین صورت که برای پارامترهای بدون اثر (کاملاً اثرپذیر) مقدار عددی صفر، برای پارامترهایی با اثرگذاری کم مقدار عددی یک، برای پارامترهایی با اثرگذاری متوسط مقدار عددی دو، برای پارامترهایی با اثرگذاری زیاد مقدار عددی سه و برای پارامترهایی با اثرگذاری بسیار زیاد (کاملاً اثرگذار) مقدار عددی چهار برای x_{ij} در نظر گرفته شده است. دیاگرام رابطه بین پارامترها همان‌طور که در شکل (۲۱) به صورت خلاصه نشان داده شده است، رسم خواهد شد. همچنین مطابق با رابطه (۵) تأثیر هر پارامتر بر روی خودش صفر است.

$$\text{if } i = j \Rightarrow x_{ij} = 0 \quad (5)$$

۹- بررسی میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری عوامل مؤثر در حرکت گهواره‌ای

نظریه دیمتل یا به عبارتی تصمیم‌سازی بر اساس آزمون و ارزیابی آزمایشگاهی، برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در ایالات متحده ارائه شد. این نظریه برای تجزیه و تحلیل فاکتورهای سیستم با استفاده از ابزار ماتریس و نظریه گراف می‌باشد. جهت استفاده از این تکنیک ابتدا باید پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم (a_i) را شناسایی و مانند رابطه (۴) تعریف کنیم:

$$a_i \in \{a_1, \dots, a_n\} \quad (4)$$

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل: نیروی پس کشیدگی کابل، سختی المان Gap، سختی سازه، تغییر مکان سازه و مود اول ارتعاشی سازه می‌باشند.

پس از مشخص شدن پارامترهای مورد نظر، تأثیرگذاری یا

$$n_i = \left[\sum_{j=1}^n g_{ij} \right] \quad (i=1.2\dots n) \quad (11)$$

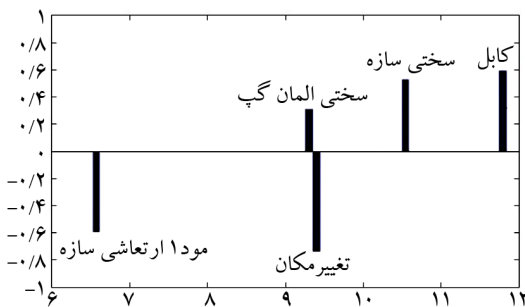
که در آن n_i ، مجموع ستون‌های ماتریس G می‌باشد. برای محاسبه تأثیرگذاری پارامتر نام طبق رابطه (۱۲) کافی است تا مقدار درجه تأثیرگذاری به مقدار درجه تأثیرپذیری اضافه شود. به همین شکل، برای محاسبه تأثیرپذیری پارامتر نام طبق رابطه (۱۳) کافی است تا مقدار درجه تأثیرگذاری از مقدار درجه تأثیرپذیری کسر شود.

$$P_i = m_i + -n_i \quad (i=1.2\dots n) \quad (12)$$

$$q_i = m_i - n_i \quad (i=1.2\dots n) \quad (13)$$

وزن‌دهی پارامترهای مختلف بر اساس یک تحلیل حساسیت بوده است. در نهایت، نمودار علت و معلولی، به شکل یک نمودار دو بعدی که محور عمودی آن، پارامترهای اثرگذار و محور افقی آن را نیز پارامترهای اثرپذیر تشکیل می‌دهند رسم خواهد شد. با تجزیه و تحلیل این نمودار می‌توان تصمیم مناسب را در رابطه با سیستم اتخاذ نمود. همانطور که در شکل (۲۲) دیده می‌شود اثر پس کشیدگی کابل و سختی و سختی تأثیرگذارترین پارامتر و مود اول ارتعاشی سازه نیز تأثیرپذیرترین پارامتر مورد بررسی بوده است.

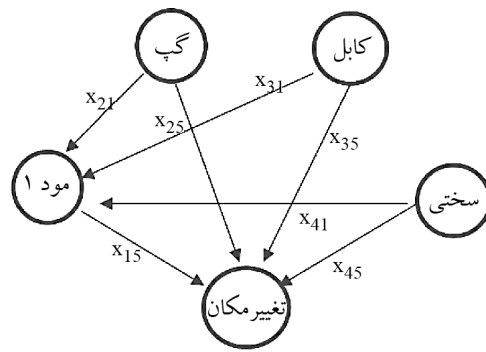
Figure 1
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help



شکل (۲۲): خروجی برنامه دیمتل.

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

۱. استفاده از سیستم حرکت گهواره‌ای کنترل شده به میزان قابل توجهی در حدود ۳۰ درصد نیروی محوری در اعضای سازه‌ای را کاهش می‌دهد.



شکل (۲۱): نمایی از دیاگرام رابطه بین پارامترهای مؤثر در سیستم حرکت گهواره‌ای مورد مطالعه.

با استفاده از مقادیر عددی x_{ij} ، ماتریس اولیه (ماتریس X) تشکیل خواهد شد. همانند رابطه (۶) که سطرها و ستون‌های ماتریس اولیه را مقادیر عددی x_{ij} تشکیل داده است.

$$X = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ a_2 & x_{21} & 0 & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & x_{n1} & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

سپس ماتریس نرمال‌سازی شده (ماتریس K) با استفاده از رابطه شماره (۷) تشکیل خواهد شد.

$$K = \frac{X}{\max_i \left[\sum_{j=1}^n x_{ij} \right]} = (K_{ij})_{n \times n} \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

پس از تشکیل ماتریس نرمال‌سازی شده، ماتریس رابطه اصلی (ماتریس G) با استفاده از رابطه شماره (۸) تشکیل خواهد شد:

$$G = K + K^2 + \dots + K^n = (G_{ij})_{n \times n} \quad (8)$$

زمانی که n به اندازه کافی بزرگ باشد، رابطه (۹) ارائه می‌شود (E: ماتریس واحد):

$$G = K(K - E)^{-1} \quad (9)$$

پس از تشکیل ماتریس G ، باید مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس G ، با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شوند:

$$m_i = \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (i=1.2\dots n) \quad (10)$$

که در آن m_i ، مجموع سطرهای ماتریس G می‌باشد.

2. Wada, A., Qu, Z., and Sakata, H. (2002) Seismic Retrofit using Rocking Walls and Steel Dampers. *ATC/SEI Conference on Improving The Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, San Francisco, CA, U.S., Dec.
 3. Wada, A., QU, Z., Motoyui, S., and Sakata, H. (2011) Seismic Retrofit of Existing SRC Frames using Rocking Walls and Steel Dampers. *Front. Archit. Civ. Eng. China*, **5**(2), 752-733.
 4. Nicknam, A. and Filiatrault, A. (2015) Seismic Design and Testing of Propped Rocking Wall Systems. *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa.
 5. Zhou, Y., Li, R., and Lu, X.L. (2015) Earthquake-Resilient Tall Buildings Using Rocking Walls. *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa.
 6. Twigden, K.M., Henry, R.S., and Ma, Q.T. (2015) Dynamic Testing of Post-Tensioned Rocking Walls. *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa.
 7. Holden, T., Restrepo, J., and Mander, J.B. (2003) Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **129**(3), 286-296.
 8. Deierlein, G., Krawinkler, H., Ma, X., Eatherton, M., Hajjar, J., Takeuchi, T., Kasai, K., and Midorikawa, M. (2011) Earthquake resilient steel braced frames with controlled rocking and energy dissipation fuses. *Steel Construction*, **4**(3), 171-175.
 9. Hashemi, A., Zarnani, P., and Quenneville, P. (2020) Seismic assessment of rocking timber walls with energy dissipation devices. *Engineering Structures*, **221**, 43-56.
 10. Mpampatsikos, V., Bressanelli, M.E., Belleri, A., and Nascimbene, R. (2020) A non-dimensional parametric approach for the design of PT tendons and mild steel dissipaters in precast rocking walls. *Engineering Structures*, **212**(6), 110513.
 11. Guo, G., Qin, L., Yang, D., and Liu, Y. (2020) Dimensional response analysis of rocking wall-frame building structures with control devices subjected to near-fault pulse-like ground motions. *Engineering Structures*, **220**(10).
۲. میزان تغییر مکان قائم در ستون‌هایی که حرکت گهواره‌ای دارند باید در یک محدوده منطقی باشد که در این پژوهش میزان کمتر از ۵ سانتی‌متر تغییر مکان قائم ستون پیشنهاد می‌گردد که با افزایش ارتفاع سازه‌ها این میزان تغییر مکان قائم کمتر نیز باید گردد.
 ۳. با استفاده از سیستم حرکت گهواره‌ای می‌توان به طرز مؤثری سطح ایمنی در سازه را افزایش داد و سطح ایمنی را در سازه‌های بتنی از LS به IO رساند. این موضوع تنها با ایجاد جزئیات خاص در پای دیوار برشی و استفاده از میراگرهای جاری شونده و کابل پس کشیده ایجاد تأمین شده است.
 ۴. کابل‌های پس کشیده در سیستم حرکت گهواره‌ای تأثیری بیش از ۷۰ درصدی در کاهش تغییر شکل‌های سازه دارند و بعد از آن میراگر جاری شونده قرار می‌گیرد.
 ۵. بر اساس کد دیتمل نوشته شده نیروی پس کشیدگی و سختی سازه و سختی المان Gap تأثیرگذارترین و همچنین مود ارتعاشی و تغییر مکان‌های سازه تأثیرپذیرترین عوامل مؤثر در حرکت گهواره‌ای کنترل شده می‌باشند.
 ۶. استفاده از دیوار برشی دارای حرکت گهواره‌ای می‌تواند به طرز مؤثری موجب بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های مجهز به این سیستم نوین گردد.
 ۷. با تغییر نیروی پس کشیدگی کابل‌ها رفتار سازه نامتقارن همانند سازه متقارن شده است.
 ۸. استفاده از دیوار برشی نوین تعمیرپذیر دارای حرکت گهواره‌ای باعث شده است تا مود ارتعاشی غالب سازه مود اول ارتعاشی باشد و فاصله مود پیچشی با مود اول و دوم بسیار زیاد شود.
- مراجع**
1. Mori, K., Murakami, K., Sakashita, M., Kono, S., and Tanaka, H. (2002) Seismic Performance of Multi-Story Shear Wall With an Adjacent Frame Considering Uplift of Foundation. *The 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.

12. Wu, D., Zhao, B., and Lu, X. (2018) Dynamic behavior of upgraded rocking wall-moment frames using an extended coupled-two-beam model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **115**, 365-377. 10.1016/j.soildyn.2018.07.043.
13. Tso, W. and Moghadam, A.S. (2018) 'Seismic response of asymmetrical buildings using pushover analysis'. *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*.
14. Teruna, D. (2015) Experimental study of hysteretic steel damper for energy dissipation capacity. *Advances in Civil Engineering*, **24**, 210-224.

Seismic Torsion Control in Concrete Buildings Using Repairable Rocking Shear Walls

Mohsen Rostami^{1*}, Fatemeh Gorji Sinaki² and Abdolreza S. Moghadam³

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: st_m_rostami@azad.ac.ir
2. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Examination of the behavior of structures in past earthquakes shows that the asymmetric torsion has been one of the causes of severe vulnerabilities. Considering the advantages of modern seismic design methods in which energy dissipation additives such as dampers are used to control the responses in an earthquake, it is possible to control the seismic torsion in the structure.

However, recent earthquakes have shown that concrete structures are damaged by earthquakes, making them very difficult and even impossible to repair. For this reason, after relatively severe earthquakes, these buildings have been damaged and destroyed, and in order to reuse the structure, it is necessary to spend a lot of time and money due to the extent of damage to the structure, and this issue creates a new idea to limit damage. In this way, buildings can be exploited more quickly by replacing damaged elements. One of the new methods to improve the seismic performance of concrete buildings is the use of systems that limit damage to the structure. Among these methods, we can mention systems with rocking motion, in which the main building behaves elastically so that the energy absorption and nonlinear performance occur only in certain parts of the building that have been predicted. Therefore, in this study, a new system has been introduced using the mechanism of cradle movement in the shear walls of the structure, transmits damage to the structural fuses and makes the concrete structure safe in earthquake and after, and very repairable. Precise details of connections, design and nonlinear analysis of this system have been done in ABAQUS and SAP2000. The solid element was used to model the rocking system in ABAQUS and concrete damage plasticity model was used to modeling the concrete, which is used to model the nonlinear behavior of concrete. The contact between the steel bolts and the concrete shear wall is simulated using the contact element. The concrete shear wall in this method remains in the elastic range, but the dampers connected to the shear wall due to the elevation of the shear wall absorb most of the seismic force. It should be noted that the system reversibility is provided by post-tensioned cables. The torsion in the structure is of the concentrated mass type and the exit from the 5%, 10% and 20% axes is applied in the concrete structure. The results show that the use of this new system in comparison with concrete structures without it effectively reduces the damage to the structure and the concrete structure remains intact and by changing the retraction force of retracted cables seismic torsion control is performed. Also, the functional levels of the structure remain in the IO area. The use of a controlled rocking motion system significantly reduces axial force in structural members by about 30%. Post-tensioned cables in the cradle drive system have a more than 70% effect on reducing the deformation of the structure and then the flow damper is placed. According to the written DEMATEL code, the tensile strength and stiffness of the structure and the stiffness of the Gap element are the most effective; besides, the vibration mode and displacement of the structure are the most effective factors in controlled rocking motion.

The use of a new repairable shear wall with rocking motion has caused the vibration mode to dominate the structure of the first vibration mode and the distance between the torsion mode, and the first and the second modes are very large.

Keywords: Low Damage Building, Rocking Shear Wall, Nonlinear Time History Analysis, Seismic Torsion Control.