

بررسی رفتار انواع دیوار برشی فولادی در قاب بتنی با اتصالات پیچی تحت شتابنگاشت زلزله

مهدی پرویزی^۱، مجتبی فتحی^{۲*}، سهیل مجید زمانی^۳، فرهاد رضایی^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۳- استادیار، مهندسی عمران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۴- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* کرمانشاه، صندوق پستی ۶۷۱۴۴۱۴۹۷۱، fathim@razi.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۳۱)

چکیده

در این مقاله تاثیر قرارگیری انواع سخت کننده‌ها و بازشوهای مختلف در رفتار لرزه‌ای اندرکنشی دیوار برشی فولادی در قاب بتنی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. دیوارهای برشی فولادی به کمک اتصالات پیچ و مهره به تسمه‌هایی که درون قاب بتنی پیش ساخته تعبیه شده‌اند، متصل شده‌اند. تحلیل‌های بار افزون و دینامیکی تحت هفت شتابنگاشت زلزله در نرم افزار ABAQUS انجام شده‌اند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که اتصالات پیچ و مهره‌ای تسمه‌ها با حفظ پایداری و مقاومت خود، عملکرد مناسبی در راستای باربری دیوار برشی فولادی از خود نشان دادند. اضافه کردن دیوار برشی فولادی به قاب بتنی، سختی اولیه، برش پایه را به ترتیب ۴ و ۴/۳ برابر افزایش داد. نمونه دارای بازشوهای در راستای قطر و سخت کننده‌های افقی و قائم بیشترین جذب انرژی (۲۲ درصد افزایش نسبت به نمونه ساده) را داشت. این مدل دارای بیشترین جابجایی نسبی (۲ برابر) و کمترین برش پایه (۱۰ درصد کاهش) بود. افزودن سخت کننده‌های افقی و قائم جذب انرژی را ۱۶ درصد افزایش داد. در حالی که اضافه کردن سخت کننده‌های قطری جذب انرژی صفحه دیوار برشی فولادی را ۲۵ درصد کاهش داد. همین مدل کمترین جابجایی نسبی (۱۵ درصد کاهش) و بیشترین برش پایه (۷ درصد افزایش) را از خود نشان داد. قرار دادن بازشوهای کناری در این مدل توانست جذب انرژی دیوار برشی را به مقدار ۳۵ درصد افزایش دهد.

واژگان کلیدی

سازه‌های بتنی، دیوار برشی فولادی، سخت کننده، بازشو، اندرکنش

Investigating the behavior of different kinds of steel plate shear wall in concrete frame with bolted connection, under earthquake acceleration

M. Parvizi, M. Fathi, S. Majid Zamani and F. Rezaei

Abstract

In this paper the effects of the placement of various kinds of stiffened and opened-steel plates shear walls on the interactional behavior of them in concrete frame, has been investigated. Steel plate shear walls have been bolted to concrete frame, by use of embedded plate in the concrete boundary elements. Push over and dynamic analysis under seven earthquake accelerations was done in ABAQUS software. The results showed that the proposed connection, by keeping up its stability and strength, showed appropriate function in the route of load bearing of shear wall. Also, it was observed that adding steel plate shear wall to concrete frame, has increased initial stiffness and base shear by 4 and 4.3 times, respectively. The sample with opening in diagonal line and horizontal and vertical stiffeners had maximum dissipated energy (22% increased). This sample showed the maximum relative displacement (increased 2 times) and minimum base shear force (decreased by 10%). Adding horizontal and vertical stiffeners to simple sample, increased dissipated energy by 16%. While, the sample with diagonal stiffeners decreased dissipated energy by 25%. This model showed the minimum relative displacement (decreased by 15%) and maximum base shear force (increased by 7%). Placing the opening at the middle of sides in this model, increased dissipated energy of steel plate by 35%.

Keywords

Concrete structures, Steel plate shear wall, Interaction, Stiffener, Opening

امروزه سازه‌های بتنی پیش‌ساخته با گسترش جوامع و با قابلیت تولید انبوه، در حال جایگزین شدن بجای سازه‌های بتنی درجا می‌باشند. خسارات زیاد این نوع سازه‌ها در طول زلزله‌های قوی ناشی از خرابی اتصالات و عدم شکل پذیری کافی است. چالشی که در قاب‌های پیش‌ساخته وجود دارد، مربوط به پیدا کردن روشی اجرایی و اقتصادی برای سیستم مهار جانبی با عملکرد لرزه‌ای و سازه‌ای بالا است. دیوار برشی فولادی یکی از سیستم‌های مهار جانبی به شمار می‌رود که از مزایایی همچون، سختی الاستیک بالا، قابلیت اتلاف انرژی، شکل‌پذیری زیاد، وزن بسیار کم در مقایسه با دیوار برشی بتنی و سرعت اجرای بالا برخوردار است. همچنین با توجه به قابلیت نصب صفحات دیوار برشی فولادی در قاب‌های بتنی، می‌توان آنها را در ترکیب با قاب‌های بتنی نیز بکار گرفت و انتظارات لرزه‌ای را برآورده ساخت. از این رو در این تحقیق، اندرکنش دیوار برشی فولادی در قاب بتنی مطالعه شده است و رفتار این سیستم پیشنهادی از جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه ابتدا به چند نمونه از مطالعات اخیر در زمینه اتصالات سازه‌های بتنی پیش‌ساخته و جزئیات اتصال اشاره شده است.

Choi و همکارانش [۱] ۵ اتصال تیر و ستون بتنی با مقیاس یک دوم را تحت بار لرزه‌ای شبیه‌سازی شده مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در طرح کلی اتصال پیشنهادی تیر به ستون، از متصل کننده‌های فولادی و ECC^۱ استفاده شد. تمام اتصالات پیش‌ساخته تا لحظه شکست رفتاری یکپارچه از خود نشان دادند و مقاومت اتصال پیش‌ساخته ۱/۱۵ برابر اتصال یکپارچه اندازه‌گیری شد. **Negro** و همکارانش [۲] پاسخ کلی یک ساختمان پیش‌ساخته بتنی سه طبقه با مقیاس واقعی را تحت بار شبه دینامیکی بررسی کردند. در ساخت این سازه چهار پیکربندی مختلف بکار گرفته شد. در آزمایش اول بر مبنای بررسی عملکرد سیستم دوگانه قاب-دیوار، دو دیوار برشی بتنی پیش‌ساخته را به سازه متصل کردند. این سیستم توانست زمین‌لرزه‌ای شدیدی که برای آن طراحی شده بود را، با پذیرش تغییر شکل‌های کوچک جانبی تحمل کند. در پیکربندی دوم اتصال دیوار به سازه قطع شد و طراحی تیر و ستون‌ها به صورت مفصل انجام شد. این پیکربندی عملکردی انعطاف پذیر از خود نشان داد و تغییر شکل‌های بزرگی را تحت زمین‌لرزه‌های طراحی شده، از خود نشان داد. در دو پیکربندی دیگر یک سیستم اتصال ابداعی با تعریف اتصال در قطعات پیش‌ساخته، مورد مطالعه قرار گرفت. در حالت سوم این اتصال

فقط در طبقه آخر اجرا شد. بکار بردن این اتصال در طبقه آخر نه تنها از تاثیر مدهای بالاتر جلوگیری نکرد بلکه در کنترل جابجایی نسبی نیز ضعیف عمل کرد. در حالت چهارم با بکارگیری طرح اتصال در کلیه اتصالات سازه نقص‌های طرح سوم رفع شد. در مطالعه دیگر توسط **Negro** و همکارانش [۳] رفتار دو نوع اتصال مفصل با استفاده از میلگرد دوگانه و اتصال ابداعی خشک تیر به ستون، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد اتصال پیشنهادی رفتار قاب‌های بتنی را تحت بارهای لرزه‌ای بهبود می‌بخشد. **Parasteh** و همکارانش [۴] رفتار یک اتصال پیشنهادی برای تیر و ستون‌های پیش‌ساخته در مناطق با لرزه خیزی بالا را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. متغیرهای آزمایش شامل نوع خاموت (باز و بسته) و فاصله بین آنها در ناحیه اتصال تیر بود. اتصالات پیش‌ساخته مقاومت خمشی، کاهش سختی و ظرفیت دررفت کافی فراهم کردند. همچنین شکل پذیری و اتلاف انرژی به مراتب بالاتری نسبت به اتصالات یکپارچه داشتند. **Fathi** و همکارانش [۵] از یک المان رابط فولادی برای ایجاد اتصال صلب بین تیر و ستون پیش‌ساخته استفاده کردند. این المان، به دو صورت نمونه پیچی و جوشی پیشنهاد شد. این نمونه‌ها در مقیاس واقعی تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته و نتایج آنها از لحاظ میزان مقاومت، سختی، ظرفیت جذب انرژی و شکل پذیری و همچنین نحوه پیدایش و گسترش ترک با نتایج حاصل از آزمایش نمونه یکپارچه معمولی مورد مقایسه قرار گرفت. نمونه‌ها تمامی ضوابط آیین نامه ACI T1.1- 01 را برآورده کردند. **Yuksel** و همکارانش [۶] دو نوع اتصال خارجی مجزا برای سازه‌های بتنی پیش‌ساخته معرفی کردند. در اتصال صنعتی ستون پیوسته بود و فقط دارای یک فضای خالی کوچک در تراز دال بود. با کمک صفحات فولادی، تیر روی کربل ستون، جوش شد و آرماتورهای اضافی برای تحمل لنگر منفی از تیر وارد ناحیه اتصال شدند. در نهایت اتصال با اجرای بتن معمولی شکل گرفت. در اتصال نوع مسکونی ستون پیوسته نبود و چهار آرماتور بزرگ مقطع، از ستون پایین وارد حفره‌های استوانه‌ای ستون بالایی شدند و در نهایت با گروت پر شدند. بعد از قرار گرفتن تیر نیمه پیش‌ساخته در محل اتصال، آرماتورهای فوقانی و تحتانی تیر در اتصال جای گرفته و اتصال با بتن معمولی بتن ریزی شد. هر دو نوع اتصال تحت بارگذاری رفت و برگشتی، منحنی بار تغییر- مکان پایداری از خود نشان دادند. **Bahrami** و همکارانش [۷] دو نوع اتصال خمشی را برای سازه‌های بتنی پیش‌ساخته به صورت عددی بررسی کردند.



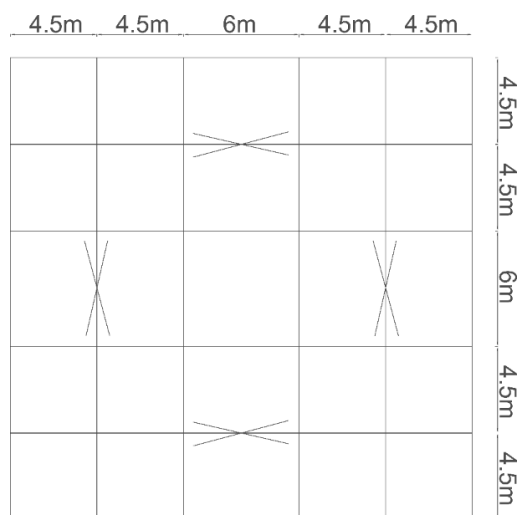
در اتصال اول با قرارگیری تیر روی کربل فولادی مدفون در ستون، اتصال به کمک بستن آرماتورهای رزوه شده تحتانی تیر، به کربل فولادی برقرار شد. در اتصال نوع دوم از یک قوطی فولادی مدفون در ستون برای انتقال بار به ستون استفاده شد. بدین ترتیب که دو آرماتور تحتانی تیر به یک ناودانی جوش شده و در نهایت با قرارگیری این ناودانی روی قوطی و جوش این دو مقطع به هم اتصال شکل گرفت. نمونه‌ها تحت بار جانبی قرار گرفتند و مقاومت جانبی، سختی جانبی و شکل پذیری به ترتیب ۹۸، ۸۰ و ۸۰ درصد نمونه یکپارچه اندازه‌گیری شد. Yan و همکارانش [۸] یک اتصال جدید برای سازه‌های پیش‌ساخته معرفی کردند. در این اتصال ستون، اتصال و قسمتی از تیر که دور از اتصال قرار داشت به صورت پیش ساخته بودند. در حالی که قسمتی از تیر که نزدیک اتصال بود به صورت درجا بتن ریزی شد. آرماتورها در این ناحیه با استفاده از غلاف گروت^۲ متصل شدند. نمونه‌ها تحت بارگذاری رفت و برگشتی آزمایش شدند. رفتار اتصالات مشابه اتصالات درجا بود. با این تفاوت که توزیع ترک، کرنش آرماتورها و تغییر شکل اتصال فرق داشت و همچنین لغزش آرماتورها نیز مشاهده شد.

با مرور مطالعات پیشین در زمینه سازه‌های بتنی پیش‌ساخته مشاهده می‌شود که اجرای این اتصالات از پیچیدگی خاصی برخوردار هستند.

در مورد دیوار برشی فولادی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است که به تعداد محدودی از آنها در زمینه اندرکنش با اجزای مرزی و دیوار برشی‌های دارای بازشو و سخت کننده اشاره شده است.

Valizadeh و همکارانش [۹] رفتار دیوار برشی سوراخ‌دار را در مقایسه با دیوار برشی ساده انجام دادند. بازشوها در مرکز دیوار برشی قرار داشتند. نتایج حاصله حاکی از رفتار پایدار و عملکرد مطلوب سیستم تا جابجایی نسبی ۶ درصد بود. وجود بازشو باعث کاهش سختی اولیه و مقاومت شد و افزایش قطر بازشو این اثر را تشدید کرد. با وجود بازشو، پارگی در اطراف بازشو به علت تمرکز تنش رخ داد. در حالی که برای نمونه‌های ساده، پارگی در ناحیه اتصال رخ داد. Alavi و همکارانش [۱۰] یک ترکیب خاص از سخت کننده‌های قطری با بازشوی دایره‌ای در مرکز دیوار را، مورد بررسی قرار دادند. مقاومت برشی دیوار برشی سوراخ‌دار نزدیک به دیوار برشی سخت نشده با پانل یکپارچه بدست آمد. همچنین رفتار لرزه‌ای سیستم بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. Munisi و Shariatmadar [۱۱] دیوار

برشی فولادی سخت شده دارای ستون‌های مرزی قوطی شکل، پر شده با بتن را مورد مطالعه قرار دادند. این دیوار برشی نسبت به نمونه بدون بتن و تقویت نشده از ظرفیت پساکمانشی بیشتری استفاده کرد. بطوری که انرژی جذب شده ۱۱ درصد افزایش یافت در حالی که این نسبت برای انرژی جذب شده تجمعی حدود ۴۱۵ درصد (۴/۱۵ برابر) بود. Wang و همکارانش [۱۲] رفتارهای لرزه‌ای سازه و دیوار برشی فولادی نازک سخت نشده، برای چهار نمونه دیوار برشی فولادی سخت نشده سه طبقه، تحت بارهای رفت و برگشتی بررسی کردند. این نوع سازه دارای مقاومت بالا، ظرفیت اتلاف انرژی و شکل پذیری خوبی بود. نسبت دهانه به ارتفاع تاثیر کمی بر ظرفیت باربری، سختی اولیه و شکل پذیری داشت. از طرفی نسبت ارتفاع به ضخامت بیشترین تاثیر بر ظرفیت باربری داشت. Akin و همکارانش [۱۳] یک قاب بتنی دارای میان قاب تایل بتنویت را با صفحه فولادی بهسازی، و مورد آزمایش قرار دادند. ضخامت صفحه فولادی ۰/۳ میلیمتر و با استفاده از پیچ‌های به فاصله ۱۰ سانتی‌متر به دو طرف تایل متصل شد. مقاومت جانبی و جذب انرژی به مقدار زیادی افزایش یافت. Golhaki و همکارانش [۱۴] رفتار قاب بتنی دارای دیوار برشی فولادی را بررسی کردند. در این پژوهش به مقایسه ضریب رفتار سیستم، برای دو حالت قاب بتنی دارای دیوار برشی فولادی و بدون دیوار برشی فولادی پرداخته شد. Nie و همکارانش [۱۵] آزمایشاتی جهت بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی سخت شده با و بدون بازشو را انجام دادند. مقاومت و سختی در دیوارهای دارای بازشو کاهش یافت ولی با وجود سخت کننده، اثر بازشو کاهش یافت. Bhowmick [۱۶] رفتار دیوار برشی‌های دارای بازشو در مرکز و بدون سخت کننده را به صورت عددی مطالعه کرد و یک معادله برای مقاومت برشی چنین دیوار برشی‌هایی بسط داد. Wei و همکارانش [۱۷] به منظور کاهش خسارت وارده به اجزای مرزی دیوار برشی فولادی در اثر میدان کششی ایجاد شده، اتصال صفحه فولادی به اجزای مرزی را در گوشه‌ها برقرار کردند. نمونه‌ها تحت بارگذاری رفت و برگشتی، رفتار سازه‌ای قابل قبولی از خود نشان دادند. Barkhordari و Sadat kholerdi [۱۸] تاثیر فولاد نرم و ضخامت صفحه دیوار برشی را بر سیستم دیوار برشی فولادی نیمه مقید بررسی کردند. Sabouri و Ahuri [۱۹] چشمه بین دو بازشو در دیوار برشی فولادی را، مطالعه کردند و عرض مورد نیاز برای سخت کننده‌های اطراف آن را محاسبه کردند. Sabouri و Gheshlaghi [۲۰] دیوار برشی فولادی با



شکل ۱- پلان ساختمان مورد مطالعه

با در نظر گرفتن مقیاس یک دوم، با جایگذاری در رابطه (۱) و انتخاب مصالح ST-37 برای صفحه دیوار برشی فولادی، ضخامت صفحه ۱/۵۵ میلیمتر بدست می‌آید که ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

برای طراحی اتصالات صفحه دیوار برشی فولادی به اجزای مرزی، از نیروهای بین صفحه فولادی و اجزای مرزی مطابق شکل (۲) استفاده شده است.

برای طراحی اجزای مرزی و اتصالات، نیروی خطی $R_y F_y t_w$ روی اجزای مختلف اعمال شد؛ که در آن $R_y F_y t_w$ تنش تسلیم مورد انتظار می‌باشد. با توجه به ضخامت ۲ میلیمتر دیوار برشی فولادی و مقدار $R_y = 1/15$ (مطابق مبحث دهم مقررات ملی ایران)، نیروی خطی ۵۵۲ N/mm مطابق شکل (۲-ب) حاصل می‌شود. این نیرو به همراه نیروی ثقلی ناشی از بار مرده و زنده، در طراحی اجزای مرزی و اتصالات بکار رفته است.

اتصال صفحه فولادی به اجزای مرزی، بوسیله تسمه‌های فولادی مدفون در بتن، تعریف شده است (شکل (۳)). برای متصل کردن صفحه دیوار برشی فولادی به این تسمه‌ها، اتصال پیچی به فواصل ۲۰ سانتیمتر بکار رفته است. از چهار نبشی نیز به عنوان المان مرزی در چهار ضلع دیوار برشی استفاده شده است.

مطابق با مبحث نهم و دهم مقررات ملی ساختمان و مشخصات مصالح ذکر شده در جدول (۱)، اجزای مرزی در مقابل نیروی خطی و نیروهای وارده ناشی از بارگذاری ثقلی ساختمان، طراحی شدند.

ستون‌های مرزی غیریکسان را مورد مطالعه قرار دادند و روابط تحلیلی برای چنین سیستم‌های پیشنهاد دادند.

با مروری بر تحقیقات پیشین در سازه‌های پیش‌ساخته بتنی قابل مشاهده است که اجرای این اتصالات مشکل بنظر می‌رسد و همچنین در این ناحیه به دلیل تقدم و تاخر بتن ریزی، اتصال سرد بوجود می‌آید. تا کنون مطالعه خاصی بر روی استفاده از دیوار برشی فولادی در قاب‌های بتنی صورت نگرفته است و انجام مطالعات لازم برای ترکیب این دو سیستم می‌تواند نتایج ارزشمندی را در اختیار محققین این زمینه قرار دهد. در این مطالعه عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی در قاب بتنی، تحت شتاب نگاشت زلزله و تحلیل بار افزون به صورت عددی بررسی شده است. همچنین برای مشخص شدن اندرکنش دیوار برشی فولادی در قاب بتنی، همین تحلیل‌ها نیز بر روی قاب بتنی تنها انجام شده است و نتایج در دو حالت مقایسه شده‌اند.

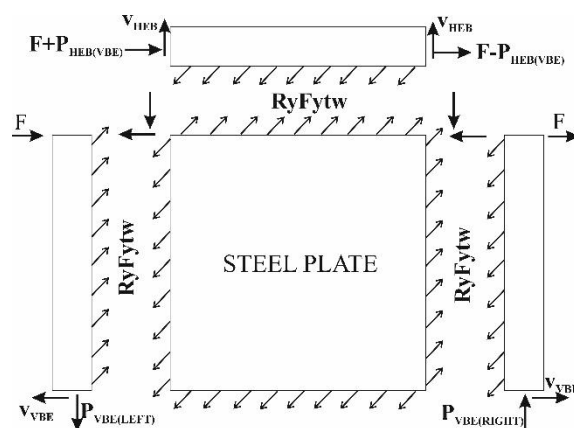
۲- مواد و روش

ابعاد نمونه‌ها از پلان ۵ طبقه مسکونی نشان داده شده در شکل (۱) انتخاب شده است. ارتفاع طبقه اول ۵ متر و سایر طبقات ۳/۵ متر می‌باشد. قاب مورد نظر از طبقه اول این ساختمان انتخاب شده است. با احتساب مقیاس یک دوم، دهنه قاب ۳ متر و ارتفاع آن ۲/۵ متر حاصل می‌شود. با این ابعاد، نسبت عرض به ارتفاع بزرگ‌تر از یک (برای عملکرد مطلوب دیوار برشی)، رعایت شده است. بار زنده طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار مرده طبقات بطور متوسط ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، در نظر گرفته شده است. مطابق با راهنمای بیستم آیین نامه آمریکا [۲۱]، برای این سیستم ضریب رفتار ۵ در نظر گرفته شده است. ساختمان در منطقه لرزه‌خیزی زیاد و خاک نوع ۲ قرار گرفته است. با بارگذاری ساختمان و محاسبه برش پایه طبق تحلیل استاتیکی معادل، برش وارده به این قاب ۱۴۰ تن بدست می‌آید.

از رابطه (۱) برای طراحی ضخامت صفحه فولادی استفاده شده است.

$$t_w = \frac{V_u}{0.42 F_y L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (1)$$

که در آن t_w ضخامت صفحه فولادی، V_u نیروی برشی، F_y تنش تسلیم مصالح صفحه، L_{cf} طول صفحه، برابر ۲۵۰۰ میلیمتر، α ضریب کاهش مقاومت و برابر ۰/۹ و زاویه میدان کشش نسبت به افق می‌باشد. این زاویه بین ۳۵ تا ۵۵ درجه متغیر است که در این پژوهش ۴۵ فرض شده است.



(الف) چگونگی توزیع نیروی مرزی

50 250 50

120

Q25 BOLTS

36 206

STEEL SHEAR WALL (PL 2500x2000x2 mm)

SECTION A-A
SCALE 1:1

24Q12@10
10 Q20 REBAR

SECTION B-B
SCALE 1:1

10 Q20 REBAR
6 Q25 BOLTS
25Q10@10

SECTION C-C
SCALE 1:1

CONCRETE FRAME WITH STEEL SHEAR WALL (RIGID CONNECTION)
SCALE 1:1

DETAIL
SCALE 1:1

1 BOLT
Nom. Dia.=20

PL-Shear wall t=2mm

PL 400x80x8mm. L 100x100x10

PL-Shear wall t=2mm

Filler plate t=4mm.

PL 100x100x8mm

SECTION D-D
SCALE 4:1

PL-Shear wall t=2mm

PL 150x80x8

L 100x100x10

Filler plate t=4mm.

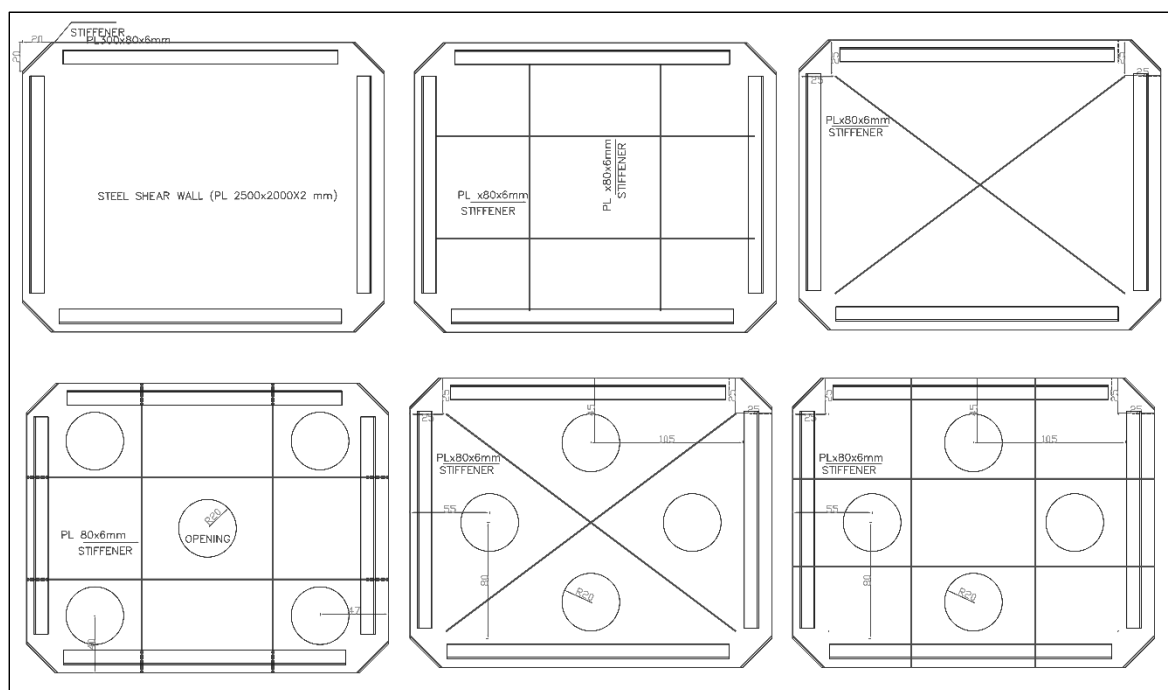
SECTION C-C
SCALE 4:1

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح

آراماتور	پیچ	مصلح فولادی	بتن	اجزا
۴۰۰	۱۰۰۰	۲۴۰	۴۵	تنش تسلیم (مگا پاسکال)

اثر بازشو در ظرفیت و سختی اولیه، سخت‌کننده‌های قائم و افقی در اطراف سخت‌کننده‌ها و در دو طرف دیوار برشی فولادی، قرار گرفتند.

مشخصات هندسی اجزای نمونه قاب، جزئیات مقاطع و اتصالات در شکل (۳) و هندسه صفحات فولادی، آرایش سخت‌کننده‌ها و بازشوها در شکل (۴) نشان داده شده است. قطر بازشوها ۴۰ سانتیمتر انتخاب شده است. همچنین برای کاهش



شکل ۴- صفحات دیوار برشی‌های مختلف

مقررات ملی ساختمان، از فرمول $E_c = 5000\sqrt{f_c}$ و نسبت پواسن برای بتن برابر $\nu = 0.2$ لحاظ شده است.

$$f_c = f'_c \left(2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right) ; \varepsilon \leq \varepsilon_0$$

$$f_c = f'_c \left(1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right) \right) ; \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1 \quad (3)$$

$$f_c = 0.2f'_c ; \varepsilon_1 \leq \varepsilon$$

برای منحنی کشش-کرنش کششی از رابطه (۴) استفاده شده است.

$$f_t = E_c \varepsilon ; \varepsilon \leq \varepsilon_t$$

$$f_t = \lambda f'_c \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_t}{\varepsilon_m - \varepsilon_t} \right) ; \varepsilon_t \leq \varepsilon \quad (4)$$

که در آن $\varepsilon_0 = 0.002$ ، $\varepsilon_{cu} = 0.0038$ ، $\varepsilon_m = 1.0\varepsilon_t$ و $\varepsilon_t = f_t/E_c$ و $0.1 \leq \lambda \leq 0.25$.

برای تعریف پارامترهای خسارت بتن نیز از رابطه (۵) استفاده شده است [۲۵].

برای جلوگیری از پارگی دیوار برشی در گوشه‌ها، از هر طرف در گوشه به اندازه ۲۰ سانتیمتر بریده شده است و یک سخت‌کننده در جداره آن نصب شده است [۲۲]. برای تعیین عرض و ضخامت سخت‌کننده‌ها نیز از معیار رابطه (۲) استفاده شده است [۲۳].

$$\frac{h_s}{t_s} \leq 0.48 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} ; t_w \leq t_s \leq 5t_w \quad (2)$$

که در آن t_w ضخامت صفحه فولادی، t_s ضخامت سخت‌کننده و h_s عرض سخت‌کننده می‌باشد.

۳- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی رفتار دیوار برشی در قاب بتنی از مدل سازی سه بعدی در نرم افزار آباکوس بهره گرفته شده است. برای شبیه سازی مصالح بتنی از مدل Concrete Damage Plasticity با در نظر گرفتن خسارت وارد بر بتن استفاده شده است. برای منحنی تنش-کرنش فشاری بتن از رابطه هاگنستاد^۴ مطابق روابط (۳) [۲۴] استفاده شده است. مدول الاستیسته بتن، مطابق مبحث نهم

$$d_t = 1 - \frac{(f_t + n_t f_{t0})}{E_c \left(\frac{n_t f_{t0}}{E_c} + \varepsilon_t \right)} \quad (5)$$

$$d_c = 1 - \frac{(f_c + n_c f_{cu})}{E_c \left(\frac{n_c f_{cu}}{E_c} + \varepsilon_c \right)}$$

که در آن $n_t = 1$ و $n_c = 2$ پیشنهاد شده است.

مدول الاستیسیته فولاد ۲۰۰ گیگا پاسکال و نسبت پواسن آن ۰/۳ در نظر گرفته شده است. اما منحنی تنش-کرنش فولاد تحت بارگذاری رفت و برگشتی در مقایسه با بارگذاری یکنواخت کاملاً متفاوت است و استفاده از مدل رفتاری سنتی دقت مورد نظر را نخواهد داشت. بنابراین در شرایط بارگذاری

رفت و برگشتی باید از مدلی استفاده کرد که سخت شدگی رفت و برگشتی، کماتش، خسارت تجمعی و پدیده تنزل سازه را بتواند بخوبی شبیه سازی کند [۱۲]. در این پژوهش از مدل رفتاری Chaboche [۲۶ و ۲۷] استفاده شده است. در این مدل پارامترهای مربوط به سخت شدگی ترکیبی^۵ اعمال می‌شود. مقادیر این پارامترها با استفاده از مطالعه Wang و همکارانش بدست آمده است [۱۲]. این مدل فقط برای صفحه فولادی استفاده شده است. در جدول (۲) این پارامترها و مقادیر آنها ذکر شده است. همچنین برای پیچ‌ها و ارماتورها از رفتار سخت شدگی دو خطی کنماتیک^۶ استفاده شده است.

جدول ۲- پارامترهای مربوط به مدل سخت شدگی

اجزا	σ_0 (MPa)	σ_{∞} (MPa)	b_{iso}	$C_{kin,1}$ (MPa)	γ_1	$C_{kin,2}$ (MPa)	γ_2	$C_{kin,3}$ (MPa)	γ_3	$C_{kin,4}$ (MPa)	γ_4
صفحه	۲۴۰	۲۱	۱/۲	۴۹۲۴	۱۵۴	۳۱۰۱	۱۲۰	۲۷۳۰	۳۱	۱۴۵۰	۲۶

برای اجزای مرزی، تسمه‌های اتصال و پیچ از المان‌های سه بعدی، برای صفحه فولادی از المان‌های دو بعدی و برای ارماتورها از المان‌های خطی استفاده شده است. نوع المان‌ها در جدول (۳) شرح داده شده است.

جدول ۳- مشخصات المان‌های اجزا مختلف

اجزا	نوع المان
دیوار فولادی	S4R
جداره سوراخ و بازشوهای دیوار برشی	S3
اجزای مرزی بتنی	C3D8R
تسمه‌های مدفون در بتن	C3D8R
سخت کننده	S4R
نبشی	C3D8R
پیچ	C3D8R
آرماتور و خاموت	T3D2

۲۰ تن روی هر ستون ناشی از چشمه باربر ستون به هرستون، و بار خطی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر، به صورت استاتیکی، و پس از آن شتاب زلزله به تکیه‌گاه‌ها، به صورت دینامیکی اعمال شده است. از کلمات اختصاری NSM برای مدل سخت نشده بدون بازشو، SM برای مدل سخت شده با سخت‌کننده‌های افقی و قائم و بدون بازشو، DSM برای مدل دارای بازشوهایی در راستای قطر و سخت کننده‌های افقی و قائم، XM برای مدل سخت شده با سخت کننده‌های ضربدری، MXM برای مدل دارای بازشوهایی در وسط اضلاع صفحه فولادی و سخت کننده ضربدری، MSM برای نمونه با بازشوهایی در وسط اضلاع صفحه و سخت کننده‌های افقی و قائم و FM برای مدل قاب تنها انتخاب شده است. شکل (۵) نمونه‌های شبیه سازی شده و نحوه اتصال صفحه به اجزای مرزی را نشان می‌دهد.

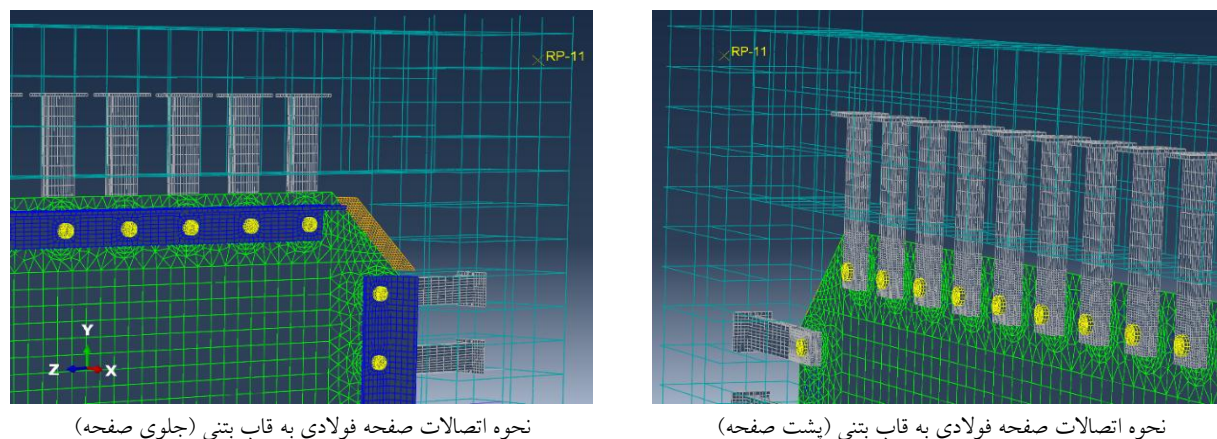
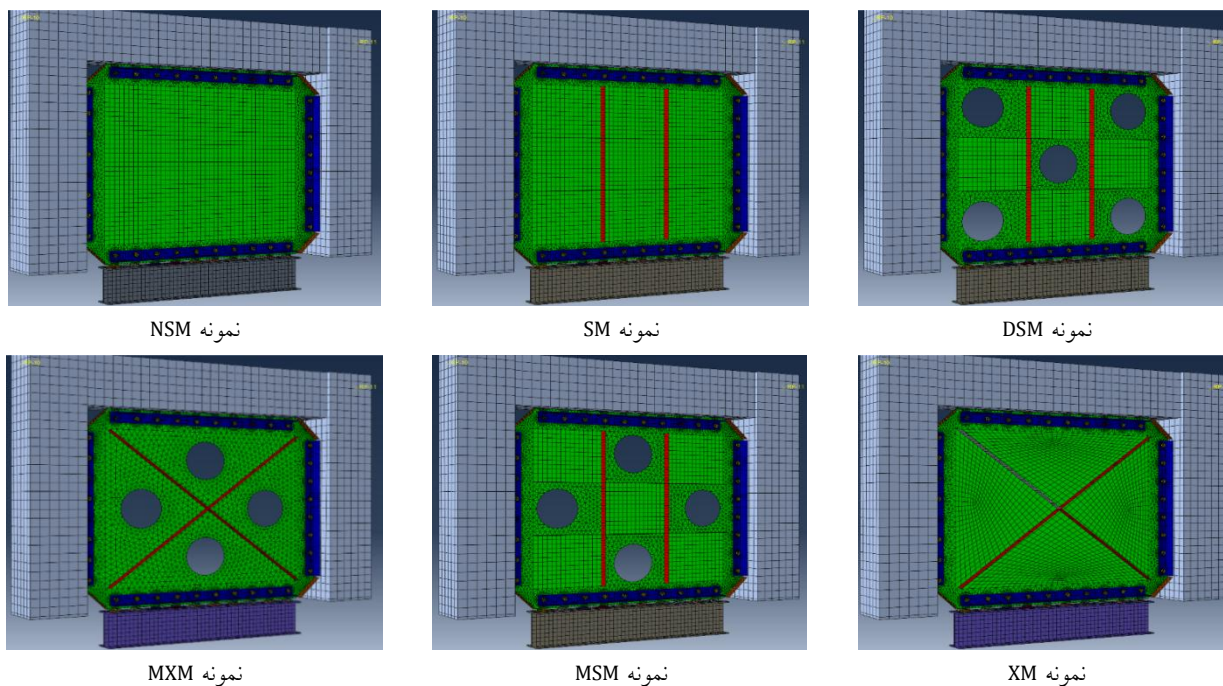
۴- اعتبار سنجی رفتار دیوار برشی

برای اعتبار سنجی رفتار دیوار برشی فولادی از مطالعه آزمایشگاهی صوری و سجادی [۲۲] (مدل بدون سخت کننده) استفاده شده است. در این مطالعه یک دیوار برشی فولادی با اجزای مرزی فولادی مطابق شکل (۶) به صورت آزمایشگاهی تحت بارهای رفت و برگشتی بررسی شده است. برای شبیه سازی اتصال صلب تیر به ستون و برای اتصال صفحه فولادی به اجزای مرزی از قید بستن استفاده شده است. مدول الاستیسیته و نسبت پواسن فولاد به ترتیب ۲۰۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ است. برای شبیه سازی ناحیه غیر خطی

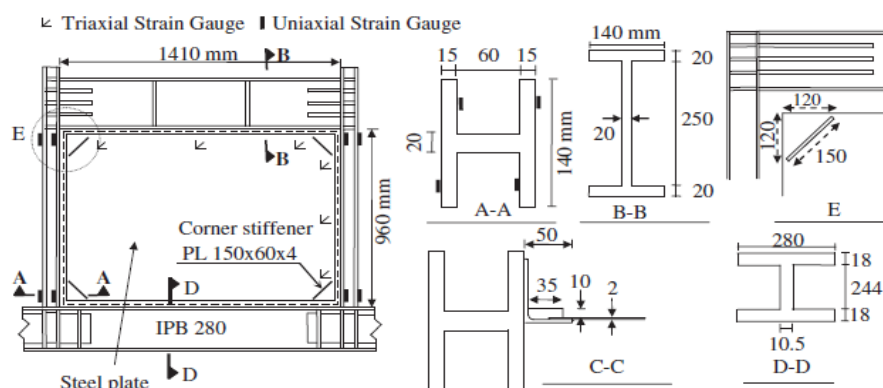
تسمه‌های اتصال و ارماتورها با استفاده از تکنیک جا دادن^۷ در اجزای مرزی بتنی قرار گرفته‌اند. در شبیه سازی اندرکنش میان صفحات در تماس با هم، در دو جهت عمودی (به صورت تماس سخت) و مماسی (به صورت اصطکاک با ضریب ۰/۲) تماس تعریف شده است. با توجه به اصطکاک بودن پیچ‌ها و فرض عدم لغزش صفحات در محل اتصال، تمام جداره سوراخ‌ها با استفاده از قید بستن^۸، به بدنه پیچ بسته شده است. پایین صفحه فولادی به تیر تکیه‌گاه پیچ شده است و پایین ستون بتنی به صورت مفصلی مقید شده‌اند. در ابتدا بارهای قائم

مصلح فولادی از روش شرح داده در قسمت قبلی (غیر خطی جنبشی) استفاده شده است. مقدار پارامترهای سخت شدگی جنبشی غیر خطی با درون یابی از اطلاعات مرجع [۱۲] بدست آمده و در جدول (۴) ذکر شده است.

درسی رفتار انواع دیوار برشی فولادی در قاب بتنی با اتصالات پیچ...



شکل ۵- نمونه‌های شبیه سازی شده و جزئیات اتصال آنها به قاب بتنی



شکل ۶- نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه صبوری و سجادی [۲۲]

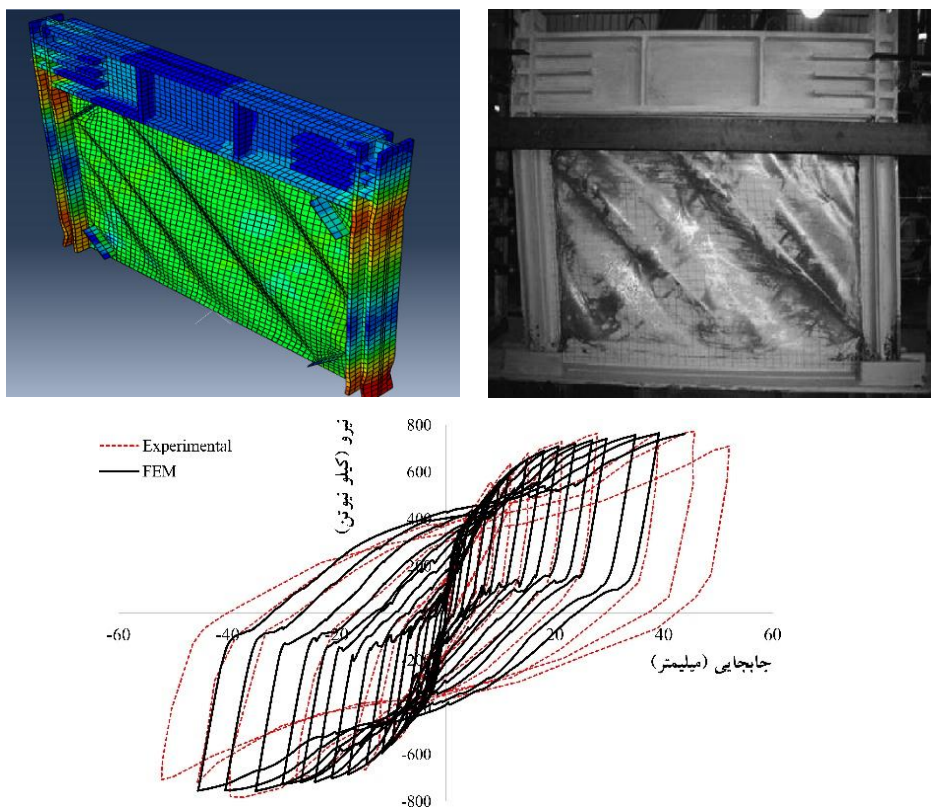


جدول ۴- پارامترهای مربوط به مدل سخت شدگی مصالح در مطالعه صبوری و سجادی [۲۳]

اجزا	σ_0 (MPa)	σ_{∞} (MPa)	b_{iso}	$C_{kin,1}$ (MPa)	γ_1	$C_{kin,2}$ (MPa)	γ_2	$C_{kin,3}$ (MPa)	γ_3	$C_{kin,4}$ (MPa)	γ_4
صفحه	۱۹۲/۸	۳۵	۳/۵	۵۲۰۰	۲۲۰	۲۳۰۰	۱۲۳	۲۷۳۰	۵۳	-	-
تیر و ستون	۴۱۴/۹	۱۵	۱/۰۸	۴۹۲۵	۱۵۴	۳۱۰۰	۱۲۰	۲۷۰۰	۳۰	۱۴۵۰	۲۶

تکیه‌گاه‌ها به صورت گیردار و تمام درجات آزادی آن بسته شده است. بارگذاری مطابق شرایط آزمایشگاه با الگوی بارگذاری مطابق با ATC-24 اعمال شده است. برای مش‌بندی صفحه فولادی از المان S4R و برای اجزای مرزی از C3D8R استفاده شده است.

شکل (۷) دو مدل شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی، و نمودار بار- تغییر مکان را برای هر دو مدل نشان می‌دهد. مقایسه حلقه‌های منحنی بار-تغییر مکان، و مقایسه تغییر شکل‌ها به خوبی روش شبیه‌سازی رفتار دیوار برشی فولادی را اعتبار سنجی می‌کند.



شکل ۷- اعتبار سنجی نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی [۲۲]

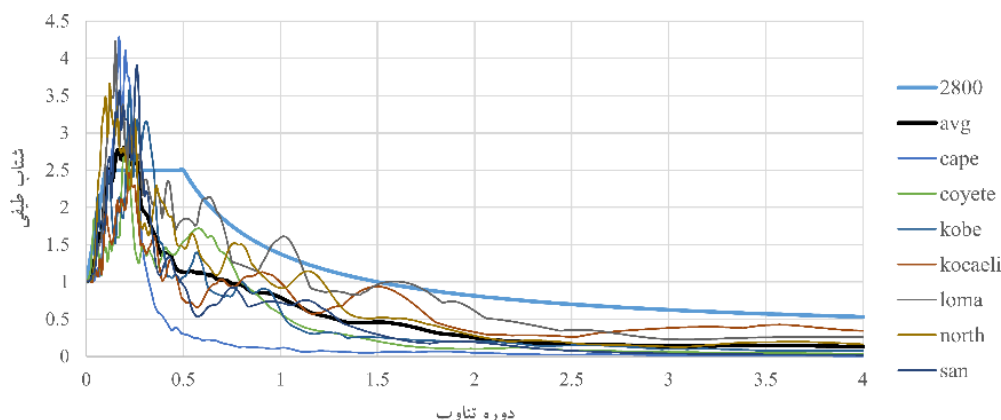
۵- نتایج تحلیل عددی

جهت بررسی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی در قاب بتنی، به نمونه‌ها شتاب نگاشت‌های زلزله حوزه دور از گسل، و مطابق با محل پلان ساختمان، برای خاک نوع ۲ اعمال شده است. در ادامه، نمونه‌ها تحت تحلیل بار افزون (بارگذاری جابجایی کنترل) قرار گرفته‌اند. در جدول (۵) مشخصات شتاب نگاشت‌ها نشان شده است. برای هم‌پایه سازی این شتاب نگاشت‌ها از

طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده شده است. شکل (۸) طیف پاسخ هر کدام از این شتاب نگاشت‌ها و طیف طرح ۲۸۰۰ را نشان می‌دهد. بر اساس روش استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ضریب هم‌پایه سازی ۲/۷ بدست آمد. قبل از اعمال شتاب نگاشت‌ها و تحلیل بار افزون، بار قائم ستون‌ها و تیر طی یک تحلیل استاتیکی^۹ به نمونه‌ها وارد شد که تنش‌های اولیه ناشی از بارهای مرده و زنده در اجزا شکل گیرد.

جدول ۵- پارامترهای مربوط به مدل سخت شدگی مصالح در مطالعه صیوری و سجادی [۲۳]

زلزله	ایستگاه	ماکزیمم شتاب ثبت شده (g)
Cape Mendocino	Shelter Cove Airport	۰/۲۲۸۵
Coyote Lake	SJB Overpass Bent	۰/۰۵۷
Kobe	Chihaya	۰/۰۹۲
Loma Perietta	Gilroy Array	۰/۱۰۲
Northridge	LA-Wonderland Ave	۰/۱۰۳
San Fernando	Pasadena-Old Seismo Lab	۰/۰۹۵
Kocaeli	Istanbul	۰/۰۶



شکل ۸- طیف پاسخ شتاب نگاشت‌ها به همراه طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران

۵-۱- عملکرد اتصالات و رفتار نمونه‌ها

به منظور بررسی پایداری و مقاومت اتصالات طراحی شده، و همچنین عملکرد دیوار برشی فولادی با اجزای مرزی بتنی، در ابتدا روی نمونه‌ها تحلیل بار افزون (بارگذاری جابجایی کنترل) انجام شد. از آنجا که اجزایی با تنش تسلیم‌های مختلف در مدل وجود دارد، برای نمایش بهتر کانتورهای تنش، فقط خود دیوار برشی فولادی و اتصالات آن در شکل‌ها نشان داده شده است و نواحی تسلیم شده با رنگ خاکستری نشان داده شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، اتصالات برای نیروی مرزی مطابق شکل (۲-ب) طراحی شده‌اند. پس انتظار می‌رود در صورت استفاده از ظرفیت دیوار برشی فولادی، پایداری و مقاومت اتصالات، حفظ شود. در شکل (۹) عملکرد دیوار برشی فولادی، اتصالات و نواحی تسلیم نشان داده شده است. در مدل NSM موج‌های تنش به خوبی تشکیل شده است. اتصالاتی که در راستای قطر هستند بیشترین تنش را تحمل می‌کنند و قسمت اندکی از آنها و جداره سوراخ آنها (به علت تمرکز تنش) به تسلیم رسیده‌اند. در مدل SM مطابق انتظار، موج‌های تنش

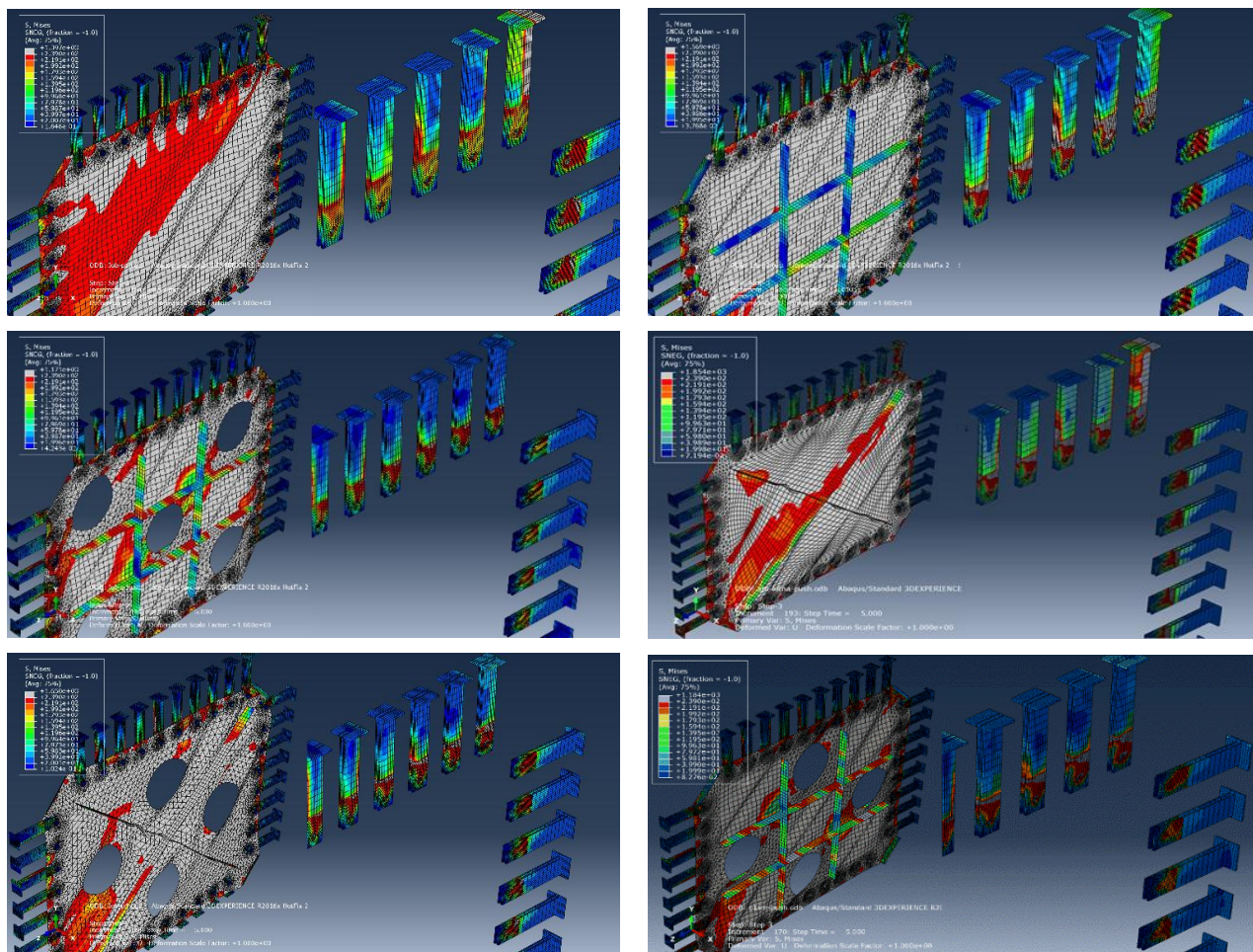
در چشمه‌های محدود به سخت کننده‌ها، شکل گرفته و عملکرد سخت کننده‌ها به صورت الاستیک باقی مانده است. این مدل نسبت به مدل NSM دارای ناحیه تسلیم شدگی بیشتری، به دلیل تاخیر در رخداد کماتش در اثر وجود سخت کننده‌ها می‌باشد. به دلیل وجود نواحی بیشتر تسلیم در این مدل، قسمت اندکی از اتصالات در مقایسه با مدل NSM نیز به تسلیم رسیده است. در مدل DSM عملکرد دیوار برشی فولادی و سخت کننده‌ها مشابه مدل SM می‌باشد ولی چون که صفحه فولادی دارای بازشوهایی در راستای قطری است، از ظرفیت دیوار کاسته شده و تسمه‌های اتصال اتصال در این مدل بصورت الاستیک باقی مانده‌اند. از آنجا که سخت کننده‌ها در مدل XM در جهت اصلی میدان کشش قطری هستند، در باربری شرکت کرده و به تسلیم رسیده‌اند. در واقع در میدان کشش اصلی، به دلیل سختی بیشتر سخت کننده، در باربری سهم شده است.

در این مدل سخت کننده عمود بر میدان کشش دچار اعوجاج شده و قسمت اندکی از صفحات اتصال در راستای قطر نیز به تسلیم رسیدند. در دو مدل دیگر، یعنی با اضافه کردن



بازشو در وسط اضلاع صفحه، نواحی تسلیم بیشتری به چشم می‌خورد. ولی همچنان تسمه‌های اتصال به صورت الاستیک باقی مانده‌اند.

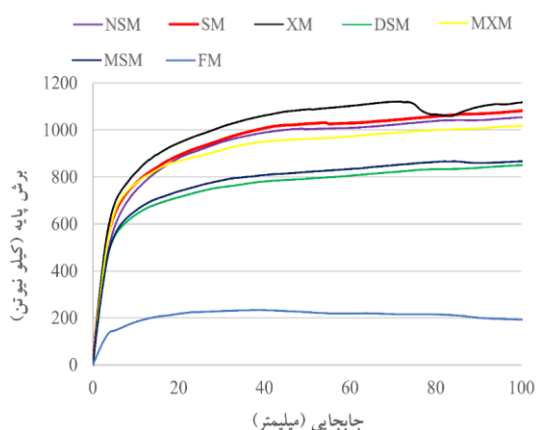
مشاهده می‌شود که طراحی اتصال پیشنهادی تحت نیروی مرزی مطابق شکل (۲-ب)، به خوبی جوابگوی عملکرد مطلوب دیوار برشی بوده است.



شکل ۹- عملکرد صفحه فولادی‌های مختلف در قاب بتنی در تحلیل بار افزون

۲-۵- نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ها

نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های مختلف تحت تحلیل بار افزون (بارگذاری جابجایی کنترل) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که سختی اولیه نمونه‌های قاب بتنی با دیوار برشی فولادی، تقریباً یکسان ولی سختی نمونه FM، ۲۵٪ درصد سختی سایر نمونه‌هاست. در میان مدل‌های دارای دیوار برشی، میزان باربری مدل XM از همه مدل‌ها بیشتر و باربری مدل DSM از همه مدل‌ها کمتر است. دلیل این امر وجود سخت کننده‌ها در راستای قطر و داشتن عملکردی مشابه مهاربند می‌باشد که باربری را افزایش می‌دهد.

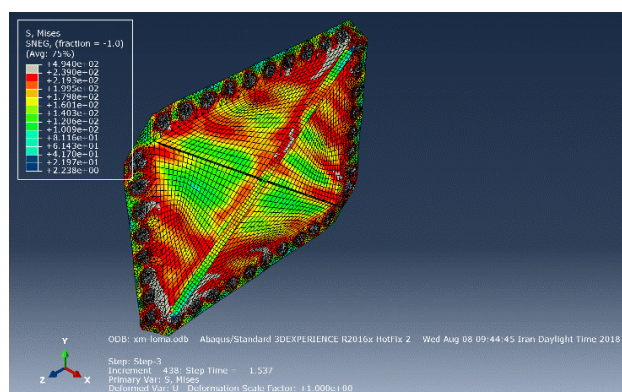
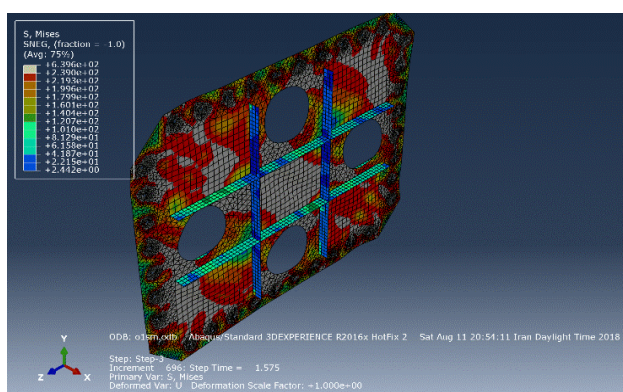
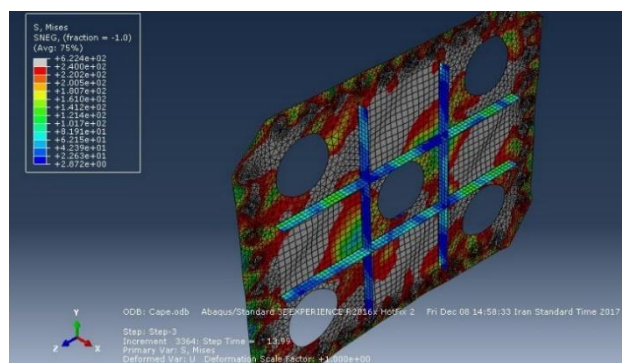
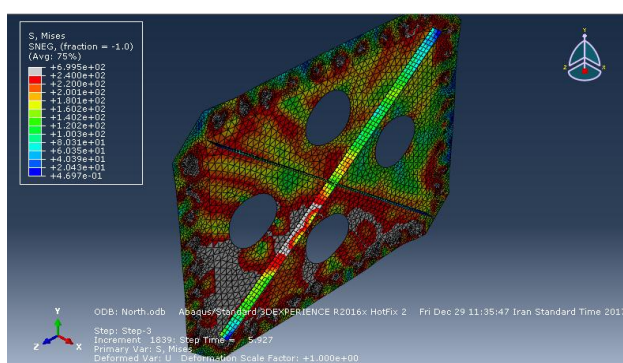
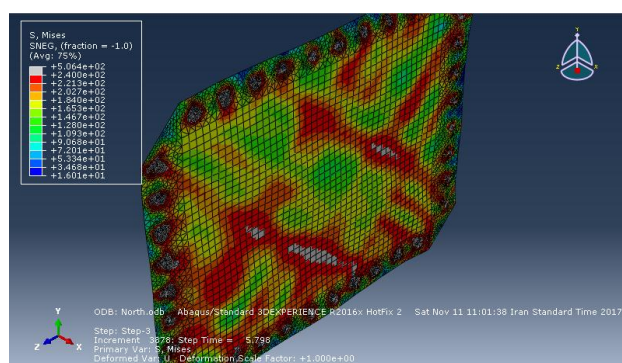
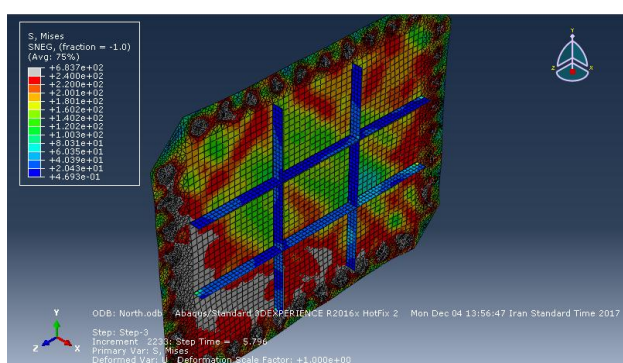


شکل ۱۰- منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌های مختلف تحت تحلیل بار افزون

۳-۵- رفتار نمونه‌ها تحت شتاب نگاشت زلزله

پس از مشاهده عملکرد مطلوب اتصالات و دیوار برشی فولادی، شتاب نگاشت‌های زلزله طی یک آنالیز دینامیکی استاندارد^{۱۰} به نمونه‌ها اعمال شد. شکل (۱۱) عملکرد انواع دیوار برشی فولادی را در برابر زلزله نشان می‌دهد. مشابه شکل (۹)، برای نمایش بهتر کانتورهای تنش، فقط دیوار برشی فولادی به همراه اتصالات آنها در شکل‌ها نشان داده شده است و نواحی تسلیم شده با رنگ خاکستری نشان داده شده است.

مدل DSM دارای بازشوهای در راستای قطر است که حدود ۲۰ درصد از ظرفیت دیوار برشی کاسته است. باربری مدل SM مشابه مدل NSM و باربری مدل MSM مشابه مدل DSM می‌باشد. در واقع اضافه کردن سخت‌کننده‌های افقی و قائم تاثیر ناچیزی در افزایش ظرفیت دیوار برشی داشته است. این نتیجه مشابه نتیجه مطالعه آزمایشگاهی Sabouri-Ghomi و همکارانش [۲۲] است. مشاهده می‌شود که باربری مدل FM، ۲۳ درصد نمونه NSM می‌باشد. در واقع با اضافه کردن یک صفحه فولادی ۲ میلیمتری باربری ۴/۳ برابر افزایش داشته است.



شکل ۱۱- رفتار دیوار برشی فولادی در قاب بتنی در برابر شتاب نگاشت زلزله

قطری، پتانسیل کمتری برای رسیدن به تسلیم را داراست. در شکل (۱۱) دیده می‌شود که قسمتی از سخت‌کننده‌های ضربدری

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مدل DSM قابلیت تسلیم شدگی بیشتر و مدل MXM، به دلیل وجود سخت‌کننده‌های

نیز به تسلیم رسیده است و نشان دهنده باربر بودن آن است. برای مدل‌های دارای سخت کننده‌های افقی و قائم، نواحی تسلیم بیشتری به چشم می‌خورد که بر خلاف اثر سخت کننده‌های ضربدری است. وجود بازشوها هم، با توجه به کاهش ظرفیت دیوار برشی، نواحی تسلیم را بیشتر می‌کند.

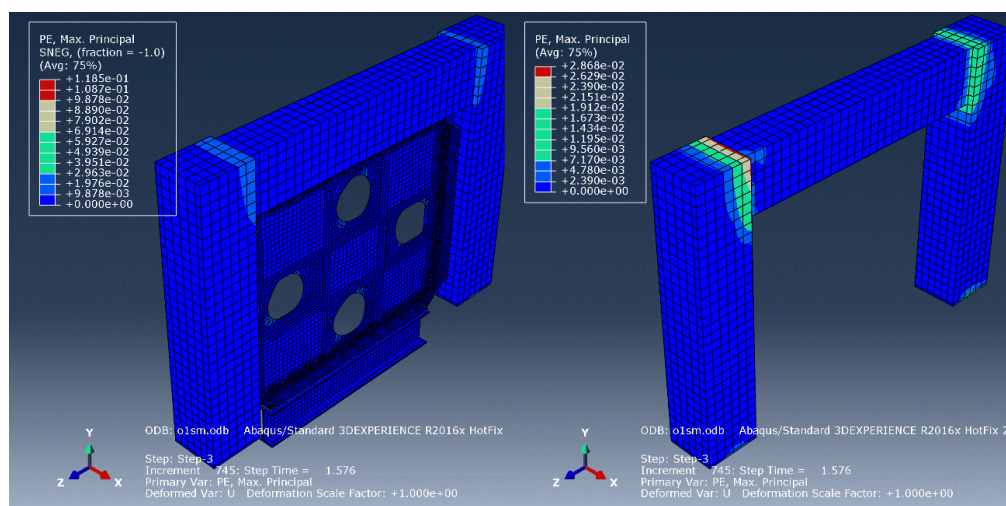
یکی دیگر از جنبه‌های پایداری ملحقات اتصال صفحه فولادی به اجزای مرزی بتنی، خراب نشدن بتن در نواحی اتصال است. شکل (۱۲) محل‌های ترک خوردن بتن را تحت بیشترین اثر زلزله نشان می‌دهد.

در شکل (۱۲)، سمت چپ کانتور کرنش‌های پلاستیک کششی را برای کل مدل نشان می‌دهد. اما به دلیل وجود مصالح مختلف در مدل‌ها، این کانتور برای بتن به خوبی واضح نیست.

بنابراین در شکل سمت راست، همه مصالح به غیر از بتن حذف شده است که بازه کانتورها، به خوبی قابل نمایش دادن باشد. با توجه به (۱۲)، نواحی خسارت دیده بتن مربوط به ناحیه اتصال تیر به ستون است و در طول نمونه‌ها که اجزای اتصال متصل شده است، هیچ خسارتی اتفاق نیفتاده است.

اثرات سخت کننده‌ها و بازشوها در قالب انرژی جذب شده، بیشترین برش پایه و جابجایی نسبی گزارش شده است. لازم به ذکر است که گزارش جذب انرژی بر پایه خرابی مصالح بتن (خرد شدگی در فشار و ترک خوردگی در کشش)، و تسلیم در مصالح فولادی می‌باشد.

برای بیان نتایج از میانگین خروجی‌های ۷ شتاب نگاشت، با روش SRSS استفاده شده است.



شکل ۱۲- محل خسارت و ترک خوردن اجزای بتنی

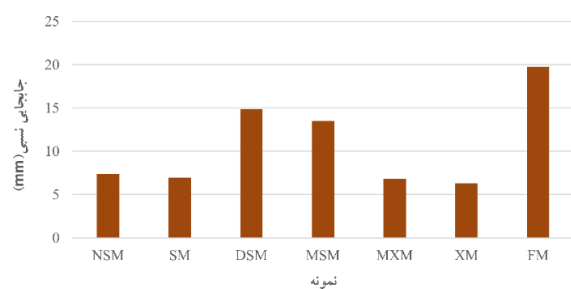
۵-۴- انرژی جذب شده

در این قسمت انرژی جذب شده اجزای مختلف تحت شتاب نگاشت‌های اعمالی گزارش شده است. این اجزا شامل دیوار برشی فولادی، تسمه‌های اتصال و اجزای مرزی بتنی می‌شود. در شکل (۱۳-الف) انرژی جذب شده سایر اجزا نسبت به دیوار برشی فولادی صفر به نظر می‌رسد. لذا در شکل (۱۳-ب) انرژی همه اجزا به غیر از دیوار برشی فولادی نشان داده شده است که قیاسی بهتر از انرژی جذب شده توسط این اجزا صورت گیرد.

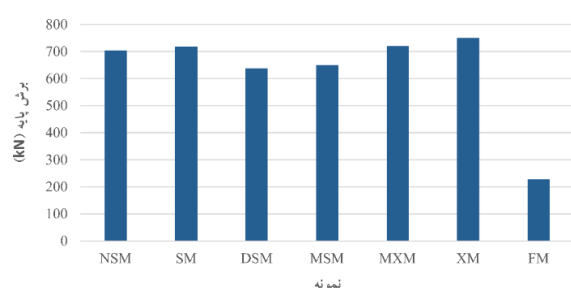
تسمه‌های اتصال دارای جذب انرژی ناچیزی می‌باشند. این امر بیان کننده الاستیک باقی ماندن آنها می‌باشد که نشان دهنده عملکرد درست و مطلوب تسمه‌های اتصال می‌باشد. مدل DSM با اینکه دارای بازشوهایی در محل قطره‌های اصلی دیوار برشی

فولادی است، دارای بیشترین جذب انرژی، و نسبت به مدل NSM، ۲۲ درصد جذب انرژی بیشتری داشته است. نواحی تسلیم نشان داده شده در شکل (۱۱)، می‌تواند بیان کننده این عملکرد باشد. اضافه کردن سخت کننده‌ها به مدل NSM میزان جذب انرژی را ۱۶ درصد افزایش داده است. این امر به دلیل تاخیر در کماتش دیوار برشی فولادی و تبدیل کماتش کلی به کماتش محلی در بین چشمه‌های محدود به سخت کننده‌هاست. بر خلاف سخت کننده‌های افقی و قائم، افزودن سخت کننده‌های ضربدری حدود ۲۵ درصد جذب انرژی خود صفحه فولادی را کاهش داده است. این امر به دلیل قرار گرفتن سخت کننده‌ها در مسیر میدان کشش و باربر بودن آنها می‌باشد. اضافه کردن بازشوهایی کناری به این مدل توانست جذب انرژی را به میزان

برش پایه را ۷ درصد افزایش داده است. مقادیر سایر نمونه‌ها از شکل (۱۴) قابل محاسبه است.



الف) جابجایی نسبی نمونه‌ها



ب) برش پایه نمونه‌ها

شکل ۱۴- مقایسه پیشینه برش پایه و جابجایی نسبی نمونه‌های مختلف

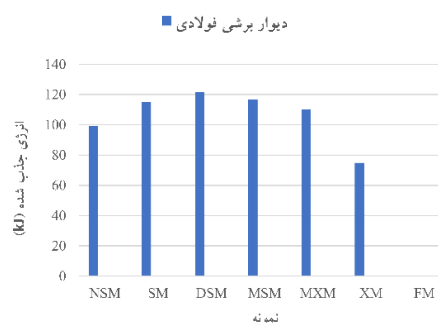
۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر اضافه کردن صفحه فولادی به قاب بتنی به عنوان دیوار برشی بررسی شده است. دیوارهای برشی فولادی به کمک اتصالات پیچ و مهره به تسمه‌هایی که درون قاب بتنی پیش‌ساخته تعبیه شده‌اند، متصل شدند. نمونه‌های با بازشو و سخت کننده‌های مختلف، تحت شتاب نگاشت زلزله و تحلیل بار افزون مطالعه شدند. نتایج تحلیل بیان کننده عملکرد مناسب تسمه‌های اتصال و به دنبال آن رفتار مطلوب دیوار برشی فولادی بود. بنابراین می‌توان ادعا کرد که جذب انرژی این سیستم بر عهده دیوار برشی فولادی بوده است. در نتیجه با توجه به پیچی بودن اتصال، می‌توان دیوار برشی فولادی را پس از زلزله‌های شدید تعویض کرد.

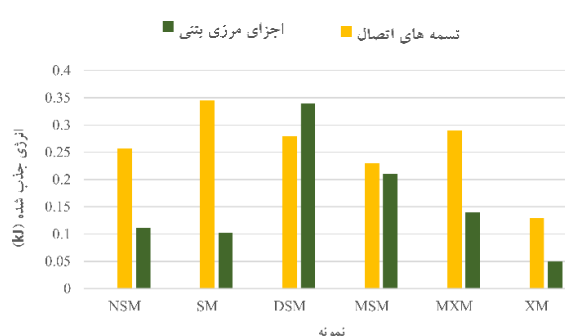
سختی اولیه قاب بتنی با اضافه کردن صفحه فولادی ۴ برابر و میزان باربری آن ۴/۳ برابر افزایش یافت.

برای معیار انرژی که یکی از معیارهای مهم در رفتار لرزه‌ای است، نمونه DSM نسبت به نمونه NSM توانست جذب انرژی را ۲۲ درصد افزایش دهد. با این وجود برش پایه را ۱۰ درصد کاهش ولی جابجایی نسبی را تا ۲ برابر افزایش داد. افزودن سخت کننده‌های افقی و قائم به مدل NSM باعث افزایش

۱۰ درصد نسبت به مدل NSM افزایش دهد. بازشوهای کناری تقریباً مشابه بازشوهای قطری عمل کردند و توانستند جذب انرژی را ۱۸ درصد نسبت به مدل NSM افزایش دهند.



الف) جذب انرژی دیوار برشی فولادی



ب) جذب انرژی اجزای موزی

شکل ۱۳- مقایسه انرژی جذب شده توسط اجزای نمونه‌های مختلف

۵-۵- برش پایه و جابجایی نسبی

در شکل (۱۴) پیشینه برش پایه و جابجایی نسبی مدل‌های مختلف نشان داده شده است. این جابجایی از تفریق جابجایی تراز تکیه‌گاه از جابجایی تراز سقف بدست آمده است. پیشینه برش پایه نمونه FM، ۳۰ درصد نمونه NSM می‌باشد و پیشینه جابجایی نسبی برای نمونه FM، ۲/۵ برابر نمونه NSM می‌باشد. نمونه DSM در بین نمونه‌های تقویت شده با دیوار برشی فولادی، دارای کمترین برش پایه و بیشترین جابجایی نسبی است. این نسبت‌ها برای برش پایه و جابجایی نسبی به ترتیب، ۰/۹۰ و ۲ برابر مدل NSM می‌باشد. همین امر بیشترین جذب انرژی را توجیه می‌کند. زیرا افزایش جابجایی نسبی تسلیم بیشتری را به همراه دارد. در نتیجه انرژی بیشتری جذب می‌شود.

افزودن سخت کننده‌های افقی و قائم به مدل NSM تنها ۲ درصد برش پایه را افزایش و ۷ درصد جابجایی نسبی را کاهش داده است. مدل XM جابجایی نسبی را ۱۵ درصد کاهش ولی



Vol. 155, pp. 330-344.

- [9] Valizadeh, H., Sheidaii, M. and Showkati, H. (2012), "Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 70, pp. 308-316.
- [10] Alavi, E. and Nateghi, F. (2013), "Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 89, pp. 9-20.
- [11] Munisi, A. and Shariatmadar, M.K. (2017), "Cyclic and Push-over ductile behavior of steel shear wall strengthened with stiffeners and steel column filled with concrete", *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 5, pp. 112-127.
- [12] Wang, M., Shi, Y., Xu, J., Yang, W. and Li, Y. (2015), "Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 112, pp. 373-386.
- [13] Akın, E., Korkmaz, Z.S., Korkmaz, H.H. and Diri, E. (2016), "Rehabilitation of infilled reinforced concrete frames with thin steel plate shear walls", *American Society of Civil Engineers*, Vol. 30, 04015098.

[۱۴] قلهکی، م.، خیرالدین، ع. و بابایی زاده، پ. (۱۳۹۶)، "ارزیابی ضریب رفتار قاب خمشی بتن آرمه دارای دیوار برشی فولادی با ورق نازک"، پژوهشنامه سازه و ساخت.

- [15] Nie, J.G., Zhu, L., Fan, J.S. and Mo, Y.L. (2013), "Lateral resistance capacity of stiffened steel plate shear walls", *Thin-Walled Structures*, Vol. 67, pp. 155-167.
- [16] Bhowmick, A.K. (2014), "Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations", *Journal of Thin-walled structures*, Vol. 94, pp. 30-42.
- [17] Wei, M.W., Liew, J.Y.R. and Fu, X.Y. (2017), "Experimental and numerical investigation of novel partially connected steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 132, pp. 1-15.

[۱۸] برخورداری، م. و خلدی، س. (۱۳۹۳)، "تأثیر فولاد نرم و تغییرات ضخامت ورق در رفتار پساکمانشی و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید"، پژوهشنامه سازه و فولاد، شماره پانزده بهار، ص. ۳۸-۲۹.

[۱۹] صیوری، س.، و آهوری، ا. (۱۳۹۵)، "بررسی عملکرد پانل میانی تقویت شده بین دو بازشو در دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده"، پژوهشنامه مهندسی عمران امیر کبیر، شماره چهل و شش، زمستان، ص. ۲۸-۱۹.

[۲۰] صیوری، س.، و قشلاقی، پ. (۱۳۹۵)، "بررسی تحلیلی، عددی رفتار دیوار برشی فولادی با ستونهای غیر یکسان"، پژوهشنامه سازه و فولاد، شماره نوزده بهار، ص. ۱۷-۵.

- [21] AISC, (2006), *Steel Design Guide 20, Steel Plate Shear Walls*, American Institute of Steel Construction.
- [22] Sabouri-Ghomi, S. and Asad Sajjadi, S.R. (2012), "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 75, pp. 152-159.
- [23] Alinia, M.M. and Shirazi, S.R. (2009), "On the design of stiffeners in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 2069-2077.
- [24] Akhavan, A.H. and Desai, C.S. (2012), "Application of the DSC model for nonlinear analysis of reinforced

۱۶ درصدی جذب انرژی شد. این افزایش به خاطر تاخیر در کمانش کلی دیوار برشی فولادی و تبدیل آن به کمانش محلی در بین چشمه‌های محدود به سخت کننده‌ها می‌باشد. همچنین این مدل برش پایه را ۲ درصد افزایش و ۷ درصد جابجایی نسبی را کاهش داد. همچنین اضافه کردن سخت کننده‌های قطری، جذب انرژی صفحه فولادی را ۲۵ درصد کاهش، جابجایی نسبی را ۱۵ درصد کاهش و برش پایه را ۷ درصد افزایش داد. با قرار دادن بازشوهای قطری در این مدل، ناحیه تسلیم افزایش، و جذب انرژی صفحه دیوار برشی نسبت به حالت بدون بازشو ۳۵ درصد افزایش یافت. قرار دادن بازشوهای کناری در درون سخت کننده‌های افقی و قائم باعث جذب انرژی ۱۸ درصدی نسبت به مدل NSM و افزایش ۲ درصدی نسبت به مدل SM شد. مدل دارای سخت کننده‌های قطری بیشترین ظرفیت باربری (۱۰ درصد افزایش نسبت به مدل ساده) و مدل با بازشوهای قطری کمترین ظرفیت باربری (۲۰ درصد کاهش نسبت به مدل ساده) را از خود نشان دادند.

۷- مراجع

- [1] Choi, H.K., Choi, Y.C. and Choi, C.S. (2013), "Development and testing of precast concrete beam-to-column connections", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 1820-1835.
- [2] Negro, p., Bournas, D.A. and Molinal, F.J. (2013), "Pseudo dynamic tests on a full-scale 3-story precast concrete building: global response", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 57, pp. 594-608.
- [3] Bournas, D.A., Negro, p. and Molinal, F.J. (2013), "Pseudo dynamic tests on a full-scale 3-story precast concrete building: Behavior of the mechanical connections and floor diaphragms", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 57, pp. 609-627.
- [4] Parastesh, H., Hajirasouliha, I. and Ramezani, R. (2014), "A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 70, pp. 144-157.
- [5] Fathi, M., Parvizi, M., Karimi, J. and Afroedoun, M.H. (2018), "Seismic design and performance of dry-assembled precast structures with adaptable joints", *International Journal of science and technology*, Vol. 25, pp. 1977-1986.
- [6] Yuksel, E., Karadogan, F.H., Bal, E.I., Ilki, A., Bal, A. and Inci, P. (2015), "Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 99, pp. 157-172.
- [7] Bahrami, S., Madhkan, M., Shirmohammadi, F. and Nazemi, N. (2017), "Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 132, pp. 808-821.
- [8] Yan, Q., Chen, T. and Xie, Z. (2018), "Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves", *Journal of Engineering Structures*,



- [26] Chaboche, J.L. (1986), "Time independent constitutive theories for cyclic plasticity", International Journal of Plasticity, Vol. 2, pp. 149–188.
- [27] Chaboche, J.L. (1989), "Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity", International Journal of Plasticity, Vol. 5, pp. 247–302.

concrete frames", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 50, pp. 98–107.

- [25] Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X.H. and Lam, D. (2014), "Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns", Journal of Engineering Structures, Vol. 72, pp. 102–112.

پی نوشت

¹ Engineered cementitious composite

² Grout sleeve

³ Design guide 20-AISC

⁴ Hognestad

⁵ Hardening=Combined

⁶ Kinematic hardening

⁷ Embedded

⁸ Tie

⁹ Static general

¹⁰ Dynamic implicit

