

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در مقاله حاضر، عملکرد جانبی دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی با پوشش ورق فولادی تخت بر اساس تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در حوزه نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجا که مطالعات پیشین در این زمینه، بیشتر معطوف به بارگذاری استاتیکی (یک‌سویه و چرخه‌ای) می‌شود؛ ابتدا به کمک دو مدل عددی ارائه‌شده، به توسعه مدل‌های موجود برای پیش‌بینی مناسب پاسخ‌های دیوار برشی تحت اثر بارگذاری دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار المان محدود OpenSEES پرداخته شده است. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های مدل عددی توسعه‌یافته در این پژوهش، کاهش وابستگی به شرایط و نتایج آزمایش‌های تجربی می‌باشد که امکان مدل‌سازی دیوارهای برشی با پیکربندی‌های جدید را به صورت ساده‌تر فراهم می‌کند. با توجه به این مسئله، در ادامه ۱۸ نمونه دیوار برشی یک طبقه مدل‌سازی و در حوزه نزدیک گسل تحت اثر مجموعه‌ای از زمین‌لرزه‌های بدون پالس و پالس‌دار تحلیل و بررسی شده است. نتایج نشان داد، مشابه با مطالعات پیشین برای پیش‌بینی مناسب عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی، نیاز به در نظر گرفتن جزئیات بیشتر در مدل عددی است. جهت ارزیابی بهتر عملکرد دیوارهای برشی، اندازه‌گیری فولادهای به کار رفته لازم است و تنها بر اساس مشخصات اسمی نمی‌توان به نتیجه قطعی رسید. فاصله اتصال‌دهنده‌ها در پاسخ نمونه‌های دیوار برشی تأثیرگذار است و همچنین فاصله زیاد اتصال‌دهنده‌ها به خصوص در زمین‌لرزه‌های پالس‌دار موجب عملکرد نامطلوب دیوار برشی می‌شود.

واژگان کلیدی: دیوار برشی سردنورد شده فولادی، پوشش ورق فولادی تخت، بارگذاری دینامیکی غیرخطی، حوزه نزدیک گسل، مدل عددی.

مدل توسعه‌یافته دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی بر اساس مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی آن

سامان یغمایی سابق (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
s_yaghmaei@tabrizu.ac.ir

سمانه نورآئین

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز،
تبریز، ایران

۱- مقدمه

از این اعضا در ساختمان‌سازی به حدود سال ۱۸۵۰ میلادی در ایالات متحده آمریکا و بریتانیا بازمی‌گردد [۱].

امروزه در سرتاسر دنیا جایگاه مسائل مدیریتی در صنعت ساخت و ساز تثبیت شده است؛ در همین راستا، توجه به سازه‌های پیش‌ساخته و صنعتی می‌تواند مفید واقع شود. سازه‌های سردنورد شده فولادی به جهت دارا بودن شرایط ایده‌آل برای پیش‌ساختگی و صنعتی‌سازی می‌توانند به‌عنوان یک گزینه مناسب در کاهش بافت‌های فرسوده، روستایی، حاشیه‌نشین و ناهمگون و بازآفرینی شهری پایدار، حتی در مناطق مستعد زمین‌لرزه محسوب گردند.

در ساختمان‌های فولادی، دو گروه اصلی برای اعضای سازه‌ای وجود دارد. گروه اول، دسته‌ی آشنای اعضای گرم‌نورد شده و ساخته شده از ورق‌ها می‌باشد؛ گروه دوم که کمتر شناخته شده ولی امروزه از رشد چشمگیری برخوردار است، اعضای سردنورد شده از ورق یا نوارهای مسطح فولادی می‌باشد که توسط دستگاه غلتک، پرس و خم‌کن شکل داده می‌شود. در مقایسه‌ی ویژگی‌های این نوع از اعضای فولادی با سایر مصالح نظیر چوب و بتن می‌توان به سبکی، مقاومت و سختی بالا، سادگی در پیش‌ساختگی و قابلیت بازیافت آن اشاره کرد. اعضای سردنورد شده فولادی^۱، شاکله‌ی اصلی قاب‌های سبک فولادی^۲ را تشکیل می‌دهند. نخستین استفاده

بررسی توانایی مدل‌های عددی OpenSEES در پیش‌بینی پاسخ‌های دیوارهای برشی تحت بارگذاری دینامیکی بود. در مرحله‌ی اول، ابتدا مدل‌های عددی غیرخطی اولیه و ساده از دیوارهای برشی یک و دو طبقه، بر اساس نتایج آزمایش‌های استاتیکی مطالعات پیشین ساخته و سپس نتایج حاصل از مدل‌های عددی با آزمایش‌های دینامیکی مقایسه شد. مشاهدات نشان داد، این مدل‌ها نه به علت تفاوت‌های موجود در ماهیت بارگذاری دینامیکی نسبت به استاتیکی بلکه به علت سادگی چندان قادر به پیش‌بینی نتایج نیستند و برای پیش‌بینی مناسب عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی در مطالعات عددی آینده نیاز به در نظر گرفتن جزئیات بیشتری است. در مرحله‌ی دوم، مدل‌های عددی غیرخطی توسعه یافته از دیوارهای برشی یک و دو طبقه، بر اساس نتایج آزمایش‌های دینامیکی ساخته شد. در این مدل‌سازی تأثیر پایه‌های نگه‌دارنده و میله‌های مهارتی آنها، بست استاداها، قاب سردنورد شده‌ی فولادی دیوار و قاب‌بندی کف (در دیوارهای برشی دو طبقه) با استفاده از یک سری المان‌های اضافی در نظر گرفته شد. مشاهدات نشان داد، این مدل‌ها به خوبی قادر به پیش‌بینی نتایج هستند به خصوص تا قبل از نقطه‌ای که دیوار برشی به علت جدایی اتصال‌دهنده‌ها و پوشش از قاب، کاهش ناگهانی در مقاومت برشی تجربه می‌کند؛ زیرا هنگامی که اتصال‌دهنده‌ها و پوشش از قاب جدا می‌شوند سختی جانبی و مقاومت دیوار برشی به علت تغییر مکانیسم انتقال بار به طور قابل توجه کاهش می‌یابد؛ از این رو مدل‌های عددی چندان دقیق نیستند. همچنین در این مطالعه، نسبت میرایی لازم برای مدل‌سازی دینامیکی به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر نتایج شناخته شد؛ به طوری که مدل‌های عددی با استفاده از نسبت میرایی مناسب قادر به پیش‌بینی بهتر پاسخ‌ها بودند. ذکر این نکته لازم است که با توجه به اینکه مدل‌های عددی ارائه شده توسط آنها به نتایج آزمایش‌های تجربی بستگی داشت؛ امکان مدل‌سازی دیوارهای برشی با پیکربندی‌های جدید و بدون انجام آزمایش‌های تجربی فراهم نیست. در سال ۲۰۱۶، کچیدی و بورحله [۱۱] به مدل‌سازی عددی دیوارهای برشی با پوشش فولادی و چوبی، در نرم‌افزار OpenSEES پرداختند.

در سال‌های اخیر، در خصوص استفاده از سازه‌های سبک فولادی، تأمین ظرفیت باربری جانبی به عنوان یک مبحث چالش برانگیز، منجر به انجام مطالعات مختلف در این زمینه شده است. اولین مطالعات تجربی در زمینه عملکرد جانبی دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی با پوشش ورق فولادی تخت در سال ۱۹۹۷، توسط سرت و همکاران [۲] انجام شد. در این مطالعه، دیوارهایی با ابعاد $۰/۶۱ \times ۲/۴۴$ متر و $۱/۲۲ \times ۲/۴۴$ متر که در یک سمت با ورق فولادی به ضخامت $۰/۴۶$ یا $۰/۶۹$ میلی‌متر پوشیده شده بودند، تحت دو نوع بارگذاری یک‌سویه^۳ و چرخه‌ای^۴ مورد آزمایش قرار گرفتند. مطالعات آنها نشان داد، دیوارهای برشی با پوشش ورق فولادی عملکرد خوبی دارند و استفاده از ورق فولادی ضخیم می‌تواند ظرفیت طراحی بالاتری را فراهم کند؛ اما بیرون آمدن پیچ‌ها از قاب دیوار موجب پارگی لبه‌ی ورق فولادی می‌شود. نبود ضوابط لازم برای دیوارهای برشی با پوشش ورق فولادی در استانداردهای کانادایی (NBCC-2005 و CSA S136-2007) و بخش کانادایی استاندارد AISI S213-2007، آغازگر برنامه‌ی مطالعاتی چند مرحله‌ای در سال ۲۰۰۸، در دانشگاه مک‌گیل کانادا بوده است. مراحل اولیه‌ی این مطالعات به طور عمده شامل آزمایش‌های استاتیکی (یک‌سویه و چرخه‌ای) دیوارهای برشی یک طبقه [۳-۶] و مراحل پایانی شامل آزمایش‌های دینامیکی (میز لرزان) دیوارهای برشی یک و دو طبقه بود [۷]. در همین راستا در سال ۲۰۱۳، شمیم و همکاران [۸] به بررسی تجربی دیوارهای برشی یک و دو طبقه با پوشش ورق فولادی تخت، تحت بارگذاری دینامیکی پرداختند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی عملکرد لرزه‌ای و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های دینامیکی با آزمایش‌های استاتیکی مطالعات پیشین بود. مشاهدات آنها نشان داد، در عملکرد دیوارهای برشی، تحت آزمایش‌های دینامیکی و استاتیکی تفاوت قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و به طور کلی استفاده از بست استادا^۵ می‌تواند موجب افزایش مقاومت برشی دیوارها شود. در ادامه، شمیم و راجرز [۹] به مدل‌سازی عددی دیوارهای برشی یک و دو طبقه با پوشش ورق فولادی تخت در نرم‌افزار OpenSEES [۱۰] پرداختند. هدف از انجام این مطالعه،

سرعت با پیروید بلند در تاریخچه‌ی زمانی سرعت به دلیل اثرات جهت‌پذیری شکست، به‌عنوان یکی از ویژگی‌های اصلی این گونه از زمین‌لرزه‌ها محسوب می‌شود [۱۷-۱۹].

تحلیل استاتیکی غیرخطی (بارافزون) و دینامیکی غیرخطی (تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی)، روش‌های مورد استفاده برای تحلیل غیرخطی سازه می‌باشند. در مقایسه این دو روش، با توجه به اینکه در تحلیل دینامیکی غیرخطی در لحظه‌به‌لحظه اعمال شتاب‌نگاشت، پاسخ‌های سازه به دست می‌آید؛ این روش قادر است رفتار واقعی سازه در برابر زمین‌لرزه را به‌صورت دقیق‌تر ارائه دهد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد، بررسی عملکرد دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی، تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک گسل از جمله موضوعاتی است که کمتر به آن پرداخته شده است. پژوهش حاضر ابتدا به بررسی دو مدل عددی ارائه‌شده توسط شمیم و راجرز [۹] و کچیدی و بورحله [۱۱] برای مدل‌سازی دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی با پوشش ورق فولادی تخت، تحت اثر بارگذاری دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار OpenSEES می‌پردازد و در ادامه به کمک مدل‌های عددی بررسی شده، راهکارهایی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای آنها ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه اغلب مدل‌های ارائه‌شده در OpenSEES برای مدل‌سازی دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی، دارای داده‌های ورودی وابسته به نتایج آزمایش‌های تجربی هستند؛ بهبود مدل‌های عددی که در تعریف داده‌های آنها نیاز چندانی به انجام آزمایش‌های تجربی زمان‌بر و هزینه‌بر نیست، می‌تواند برای بررسی عملکرد این نوع از سیستم‌های باربر جانبی کارآمد باشد. شایان ذکر است که به‌طور کلی سازه‌های مطالعه شده در این پژوهش به سبب سبک بودنشان در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی، می‌توانند به‌عنوان یک راهکار مناسب در جهت پیشگیری و کاهش آسیب‌پذیری زمین‌لرزه، در مناطق لرزه‌خیز محسوب شوند؛ بنابراین شناخت و بررسی بهتر عملکرد لرزه‌ای این نوع از سازه‌های فولادی می‌تواند به‌عنوان یک قدم مثبت در رواج و به‌کار بستن آن در صنعت ساخت‌وساز کشور به حساب آید.

در این مطالعه، مدل‌های هیستریزس با قابلیت در نظر گرفتن زوال سختی، زوال مقاومت [۱۲-۱۴] و اثرات باریک‌شدگی در قالب مصالح تک‌محور جدید توسعه و به کتابخانه‌ی OpenSEES اضافه گردید. با توجه به اینکه مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی، به تأثیر مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی دیوارها بر رفتار هیستریزس آنها اذعان دارد؛ داده‌های ورودی مورد نیاز در این مدل‌ها برخلاف دیگر روش‌های مدل‌سازی دیوارهای برشی، به نتایج آزمایش‌های تجربی وابستگی کمتری داشت و بر اساس مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی دیوار تعیین می‌گردید. این مدل‌های عددی قادر بودند اثرات خستگی در دامنه‌های پایین جابه‌جایی (محدوده الاستیک) را در نظر بگیرند. همچنین مشابه با مطالعات شمیم و راجرز [۹]، دقت مدل‌های پیشنهادشده در مقایسه با نتایج آزمایش‌های پیشین تأیید شد؛ به‌خصوص تا قبل از نقطه‌ای که در آن دیوار برشی به علت جدایی اتصال‌دهنده‌ها و پوشش از قاب، کاهش ناگهانی در مقاومت برشی تجربه می‌کرد. ذکر این نکته لازم است که دامنه‌ی این مطالعات تنها مربوط به بارگذاری استاتیکی دیوارهای برشی می‌شد. همچنین در سال ۲۰۱۸، شرفی و همکاران [۱۵] در یک مقاله‌ی مروری، به تحلیل تحولات مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ظرفیت باربری جانبی قاب‌های سبک فولادی پرداختند و پیشرفت‌های مطالعاتی سیستم‌های باربر جانبی از جمله دیوارهای برشی و دیوارهای مهاربندی سردنورد شده فولادی را به همراه دیگر سیستم‌های مرسوم مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به شواهد زمین‌شناسی، به دلیل تراکم زیاد گسل‌های فعال در ایران، این منطقه از پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی برخوردار است؛ در نتیجه می‌توان دریافت بخش عظیمی از جمعیت کشور ساکن حریم گسل می‌باشد. از طرفی مطالعات نشان می‌دهد، خصوصیات زمین‌لرزه‌هایی که در نزدیک گسل ثبت می‌گردد به‌طور عمده با زمین‌لرزه‌های معمول دور از گسل متفاوت است؛ به‌نحوی که حرکات حوزه نزدیک گسل می‌تواند به مراتب آثار مخرب‌تری برجای بگذارد و فاصله مؤثر اثرات آن به بیش از ۵۰ کیلومتر برسد [۱۶-۱۷]؛ برای نمونه ظهور پالس مشخص

۲- روش‌شناسی پژوهش

مقاومت برشی در مقابل جابه‌جایی تجربه می‌کنند [۹]؛ وجود کتابخانه‌ی وسیع از مصالح و المان‌ها در OpenSEES، بررسی عملکرد جانبی دیوارهای برشی همراه با اثرات باریک‌شدگی را بدون نیاز به برنامه‌نویسی فرعی ممکن می‌سازد؛ (۲) سرعت بالای OpenSEES در انجام مدل‌سازی و تحلیل، امکان محاسبات پرتعداد و در نتیجه بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی تحت اثر زمین‌لرزه‌های متعدد را فراهم می‌کند.

۲-۲- روش مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار

با توجه به مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی مدل‌سازی دیوارهای برشی سردنورد شده‌ی فولادی، به‌طور کلی چهار روش محاسباتی برای بررسی عملکرد غیرخطی دیوارها در OpenSEES مطرح می‌شود: (۱) روش مبتنی بر اتصال‌دهنده^۷؛ (۲) روش المان فنر معادل^۸؛ (۳) روش مهاربند معادل^۹؛ (۴) روش شبکه‌ی مهاربند^{۱۰}. در شکل (۱) طرح کلی از این روش‌ها ارائه و در ادامه توضیحات مختصر در خصوص هر یک داده شده است.

مدل‌سازی به روش مبتنی بر اتصال‌دهنده: به‌طور کلی در این روش، به ترتیب دیافراگم صلب و المان‌های بدون طول^{۱۱} جایگزین پوشش و اتصال‌دهنده‌ها می‌شوند و برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی در دیوار برشی، مصالح Pinching4 به المان‌های بدون طول اختصاص می‌گیرد (شکل ۱-الف). مدل هیستریزس حاصل از این مصالح قادر به شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای با در نظر گرفتن زوال سختی، زوال مقاومت و اثرات باریک‌شدگی است و داده‌های ورودی آنها از نتایج آزمایش‌های تجربی حاصل می‌شود.

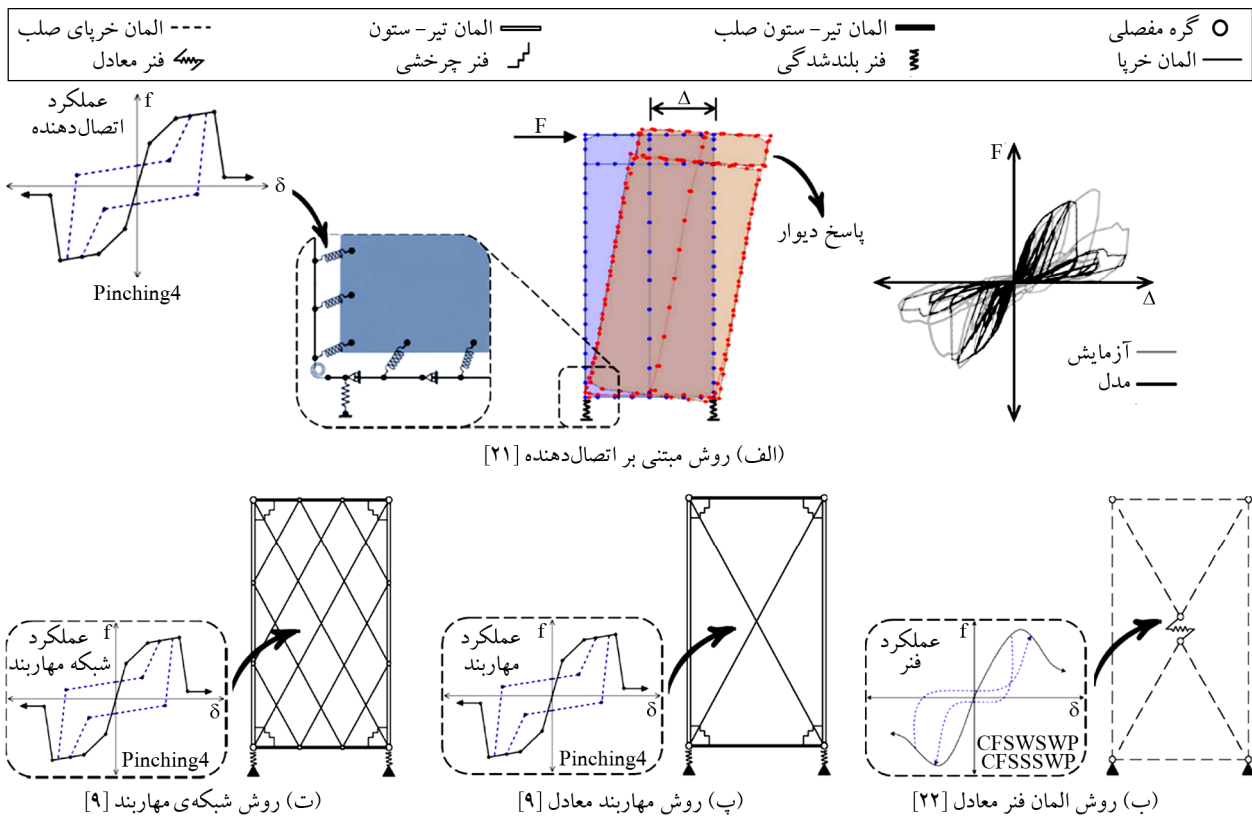
بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی دیوارهای برشی سردنورد شده‌ی فولادی نشان می‌دهد، محققان با توجه به اهداف مطالعات خود، به‌طور کلی از دو روش استفاده نموده‌اند: (۱) آزمایش‌های تجربی؛ (۲) نرم‌افزارهای تخصصی و مدل‌سازی عددی. البته ذکر این نکته لازم است که در برخی از مطالعات، با توجه به وسعت کار تحقیقاتی از هر دو روش بهره گرفته شده است. در این پژوهش، به سبب زمان‌بر و هزینه‌بر بودن انجام آزمایش‌های تجربی از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط، جهت انجام مطالعات استفاده شده است.

۲-۱- نرم‌افزار مدل‌سازی

استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای برخی از مطالعات زمان‌بر و هزینه‌بر با آزمایش‌های تجربی محسوب شود. امروزه، محققان جهت انجام مطالعات خود از بسته‌های نرم‌افزاری مختلف کمک می‌گیرند. در این خصوص، یوسفی و همکاران [۲۰] در زمینه‌ی دیوارهای برشی سردنورد شده‌ی فولادی به مقایسه‌ی نرم‌افزار OpenSEES با ABAQUS پرداخته‌اند. خلاصه‌ای از نتایج این مطالعه که شامل ابعاد مختلف استفاده از این دو نرم‌افزار برای مدل‌سازی ماکرو و میکروی دیوارهای برشی بود در جدول (۱) ارائه شده است. بر این اساس، در این پژوهش به دو علت عمده استفاده از OpenSEES ترجیح داده شد: (۱) با توجه به اینکه دیوارهای برشی با پوشش ورق فولادی به دلیل آغاز زود هنگام کمانش برشی در پوشش، باریک‌شدگی قابل توجهی از لحاظ پاسخ

جدول (۱): مقایسه‌ی نرم‌افزار OpenSEES با ABAQUS در زمینه‌ی مدل‌سازی دیوارهای برشی سردنورد شده‌ی فولادی [۲۰].

| متغیر | مدل‌سازی ماکرو (OpenSEES) | مدل‌سازی میکرو (ABAQUS) |
|--|---------------------------|----------------------------------|
| مدت زمان لازم برای مدل‌سازی و تحلیل | کوتاه | طولانی |
| امکان مشاهده‌ی خرابی موضعی (کمانش، خرابی پیچ و غیره) | ندارد | دارد |
| امکان پردازش گرافیکی نتایج | ندارد | دارد |
| امکان در نظر گرفتن اثرات باریک‌شدگی در رفتار چرخه‌ای | دارد | ندارد (مگر با برنامه‌نویسی فرعی) |
| میزان مطابقت سختی اولیه با نتایج تجربی | اختلاف جزئی | تطابق خوب |
| میزان مطابقت کلی با نتایج تجربی | تطابق خوب | تطابق خوب |



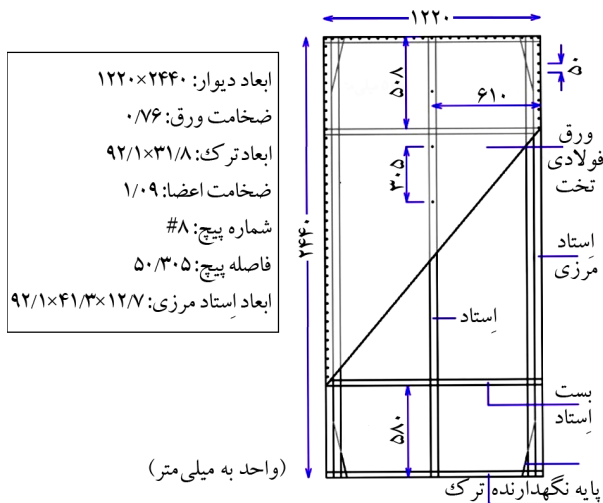
شکل (۱): روش‌های متداول مدل‌سازی دیوار برشی سردنورد شده فولادی در نرم‌افزار OpenSEES.

بدون طول اختصاص می‌گیرد. مدل هیستریزیس این مصالح مشابه با Pinching4 است با این تفاوت که داده‌های ورودی آنها مربوط به مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی دیوار برشی است. از جمله ویژگی‌های این نوع از مدل‌سازی، جدید بودن مصالح استفاده شده در آن، وابستگی کم داده‌های ورودی مصالح به نتایج آزمایش‌های تجربی نسبت به مصالح Pinching4 و تعداد کم المان‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی می‌باشد [۱۱].

مدل‌سازی به روش مهاربند معادل: در این روش دو المان خریای مورب جایگزین پوشش و اتصال دهنده‌ها می‌شود و جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی در دیوار برشی، مصالح Pinching4 به این المان‌ها اختصاص می‌گیرد (شکل ۱-پ). داده‌های ورودی این مصالح از نتایج آزمایش‌های تجربی حاصل می‌شود. از مزایای این روش نسبت به روش مبتنی بر اتصال دهنده، تعداد کم المان‌های مورد نیاز و نبود محدودیت در استفاده از آن برای مدل‌سازی دیوار برشی با پوشش ورق فولادی است [۹].

همچنین ترکیب عملکرد قاب، پوشش و اتصال دهنده‌های پوشش به قاب تأمین کننده‌ی مقاومت برشی کل دیوار است که قادر به پیش‌بینی ابعاد اصلی عملکرد جانبی دیوار برشی می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که مدل‌سازی با این روش مختص دیوارهای برشی با پوشش صلب، نظیر تخته چوب و یا تخته گچ است و در دیوارهای برشی با پوشش ورق فولادی که امکان مقاومت فولاد در مقابل تغییر شکل‌های بزرگ وجود دارد؛ فرض جسم صلب اجرا شدنی نیست [۲۱].

مدل‌سازی به روش المان فتر معادل: در این روش در میانه‌ی دیوار برشی از یک المان بدون طول که متصل به المان‌های خریای^{۱۲} صلب مورب است استفاده می‌شود. این المان‌ها نیرو را به استاد‌های مرزی^{۱۳} منتقل می‌کنند و سختی و مقاومت جانبی دیوار برشی به‌طور مستقیم از المان بدون طول حاصل می‌شود (شکل ۱-ب). در این روش با توجه به نوع پوشش، برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی در دیوار، مصالح CFSW و CFSSWP به ترتیب برای پوشش چوبی و فولادی به المان



شکل (۲): مشخصات پیکربندی دیوار برشی یک طبقه (نمونه‌ی STI-c) [۹].

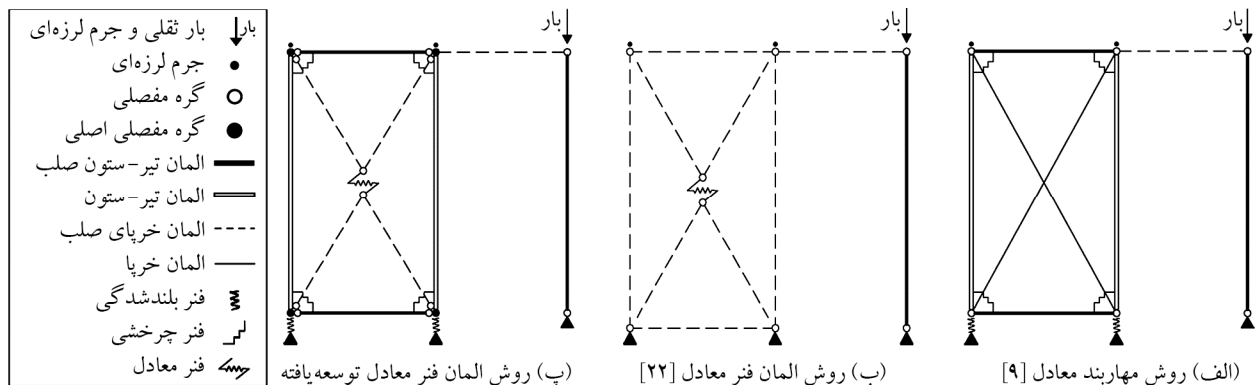
شایان ذکر است که در این برنامه‌ی مطالعاتی، برای مدل‌سازی دیوارهای برشی از روش مهاربند معادل استفاده شده بود؛ به نحوی که دو المان مورب جایگزین پوشش و اتصال‌دهنده‌ها می‌شد و برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی در دیوار برشی، مصالح $Pinching4$ به این المان‌ها اختصاص می‌یافت. جزئیات مدل‌سازی و المان‌ها در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. با توجه به اینکه در مدل‌سازی به روش مهاربند معادل، داده‌های ورودی مصالح غیرخطی وابسته به نتایج آزمایش‌های تجربی هستند و امکان ساخت دیوارهای برشی با پیکربندی‌های جدید وجود ندارد؛ کچیدی و بورحله [۱۱] برای مدل‌سازی دیوارهای برشی به روش المان فتر معادل، در قالب مصالح تک‌محور جدید، اقدام به ساخت مدل‌های هیستریزس نمودند که داده‌های ورودی آنها، وابستگی کمتری به نتایج آزمایش‌های تجربی داشت و امکان ساخت دیوارهای برشی با پیکربندی‌های جدید را فراهم می‌کرد.

مدل‌سازی به روش شبکه‌ی مهاربند: مطالعات انجام‌شده در خصوص مدل‌سازی و نتایج حاصل با این روش، نشان‌دهنده‌ی مشابهت با مدل‌سازی به روش مهاربند معادل است؛ با این تفاوت که در روش شبکه‌ی مهاربند، شبکه‌ای از المان‌های خراب‌جاگزین پوشش و اتصال‌دهنده‌ها شده و به علت تعدد المان‌ها، مدل‌سازی پیچیده‌تر است (شکل ۱-ت)؛ از این رو به نظر می‌رسد، مدل‌سازی به روش شبکه‌ی مهاربند چندان موجه نباشد [۹].

با توجه به این مسائل در این پژوهش، جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی سردنورد شده‌ی فولادی با پوشش ورق فولادی تخت از مدل‌سازی به روش‌های المان فتر معادل و مهاربند معادل استفاده شده است.

۳- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

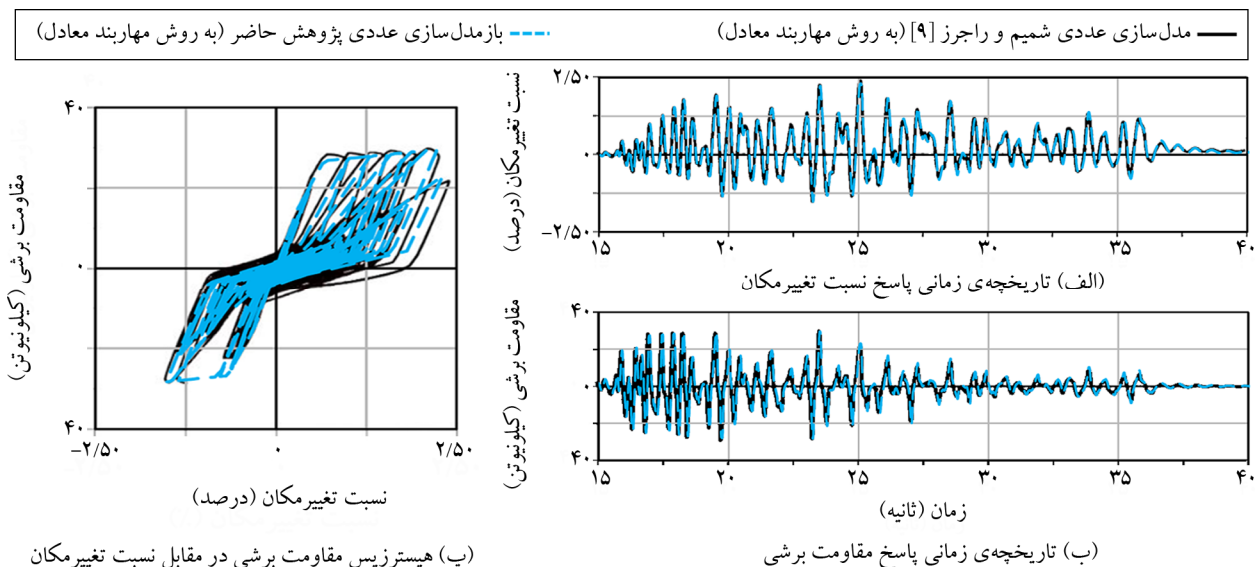
جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مورد نظر، در ابتدا با استفاده از روش‌های انتخاب‌شده برای مدل‌سازی، به ساخت و بررسی مدل‌های عددی دیوار برشی در نرم‌افزار OpenSEES پرداخته شد. سپس به کمک این روش‌ها، مدل عددی توسعه‌یافته با امکان مدل‌سازی دیوارهای برشی با پیکربندی‌های جدید، بدون نیاز به انجام آزمایش‌های تجربی و تحت اثر بارگذاری دینامیکی غیرخطی ارائه شد. در این پژوهش، از میان نمونه‌های دیوار برشی یک طبقه در برنامه‌ی مطالعاتی شمیم و راجرز [۹]، نمونه‌ی STI-c برای مدل‌سازی و رسیدن به مدل عددی توسعه‌یافته انتخاب شد. شکل (۲) مشخصات پیکربندی این نمونه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مدل‌سازی دیوار برشی یک طبقه (نمونه‌ی STI-c).

راستای اهداف مشترک با مطالعات آنها انجام شده بود کمک گرفته شد. نتایج ارائه شده نشان داد، مدل عددی به روش المان فشر معادل در پیش‌بینی پاسخ‌ها چندان خوب عمل نکرده است؛ با اینکه مطالعات کچیدی و بورحله [۱۱] نشان‌دهنده تطابق خوب بین نتایج حاصل از این روش با آزمایش‌های استاتیکی بود. طبق بررسی‌های به عمل آمده، علت این مسئله مطابق با مشاهدات شمیم و راجرز [۹]، به سادگی مدل عددی ارتباط داده شد نه به علت تفاوت‌های موجود در ماهیت بارگذاری دینامیکی نسبت به استاتیکی (شکل ۵). ذکر این نکته لازم است که در تمام مراحل بارگذاری این بخش از شتاب‌نگاشت مصنوعی حرکت زمین گنیک استفاده شده است (شکل ۶).

جزئیات مدل‌سازی و المان‌ها در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. با توجه به این مسئله جهت رسیدن به مدل عددی توسعه یافته، ابتدا به باز مدل‌سازی نمونه‌ی STI-c به روش مهاربند معادل پرداخته شد. مشاهدات نشان داد، مطابقت خوبی بین نتایج حاصل وجود دارد (شکل ۴). سپس در ادامه، همین نمونه با استفاده از روش المان فشر معادل مدل‌سازی شد. در این روش، داده‌های ورودی مصالح CFSSWP بر اساس مشخصات نمونه‌ی STI-c و مطابق با جدول (۲) در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در برنامه‌ی مطالعاتی شمیم و راجرز [۹] آزمون کشش (کوپن)^{۱۴} فولادهای به کار رفته در نمونه‌ی دیوار برشی ارائه نشده بود؛ در این مرحله جهت کسب نتایج دقیق، از مطالعات بلخ [۵] که در

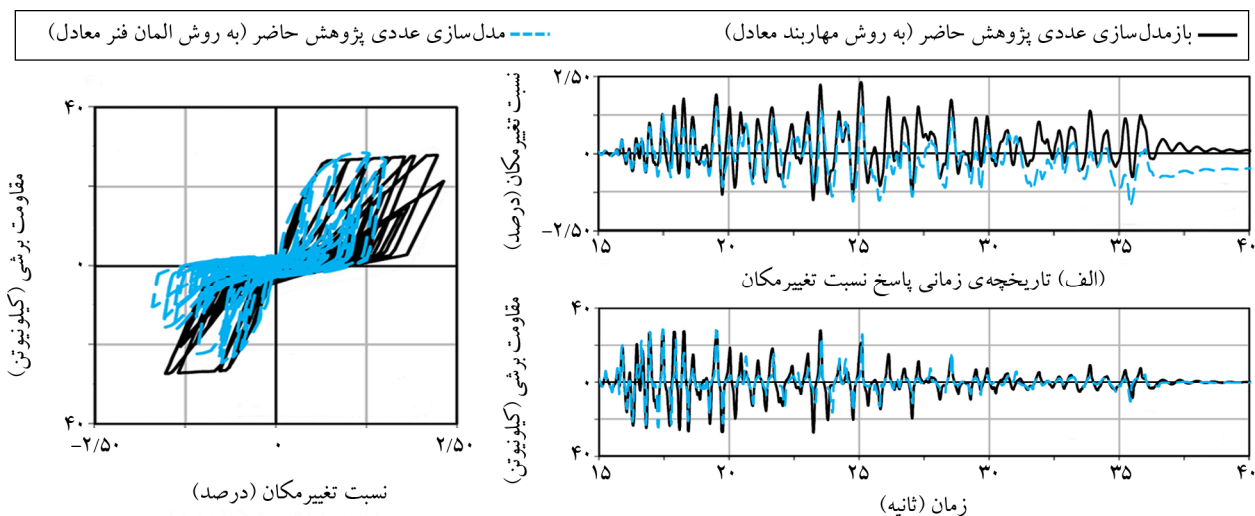


شکل (۴): صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی به روش مهاربند معادل (نمونه‌ی STI-c).

جدول (۲): داده‌های ورودی مصالح CFSSWP بر اساس مشخصات دیوار برشی یک طبقه (نمونه‌ی STI-c) [۹].

| مشخصه | داده ورودی | مشخصه | داده ورودی |
|---|------------|---|------------|
| ارتفاع دیوار (میلی‌متر) | ۲۴۴۰/۰ | ضخامت پوشش ورق فولادی* (میلی‌متر) [۵] | ۰/۷۶ |
| عرض دیوار (میلی‌متر) | ۱۲۲۰/۰ | تعداد پوشش ورق فولادی (یک یا دو طرف قاب) | ۱ |
| مقاومت نهایی اعضای قاب دیوار (مگاپاسکال) [۵] | ۴۹۶/۰ | قطر پیچ‌ها (میلی‌متر) [۲۴] | ۴/۱۷ |
| مقاومت تسلیم اعضای قاب دیوار (مگاپاسکال) [۵] | ۳۴۶/۰ | مقاومت برشی پیچ‌ها (نیوتن) [۲۴] | ۲۶۵۲/۶۲ |
| ضخامت اعضای قاب دیوار* (میلی‌متر) [۵] | ۱/۱۴ | فاصله پیچ‌ها در محیط پیرامونی قاب (میلی‌متر) | ۵۰/۰ |
| سطح مقطع اعضای قاب دیوار (میلی‌متر مربع) [۲۳] | ۴۳۸/۰ | قطر بولت‌های مهارسیستم پایه نگه‌دارنده (میلی‌متر) | ۲۲/۲۳ |
| مقاومت نهایی پوشش ورق فولادی (مگاپاسکال) [۵] | ۳۷۳/۰ | مساحت کل بازشوها (میلی‌متر مربع) | ۰/۰ |
| مقاومت تسلیم پوشش ورق فولادی (مگاپاسکال) [۵] | ۲۸۴/۰ | طول تجمعی بازشوها (میلی‌متر) | ۰/۰ |

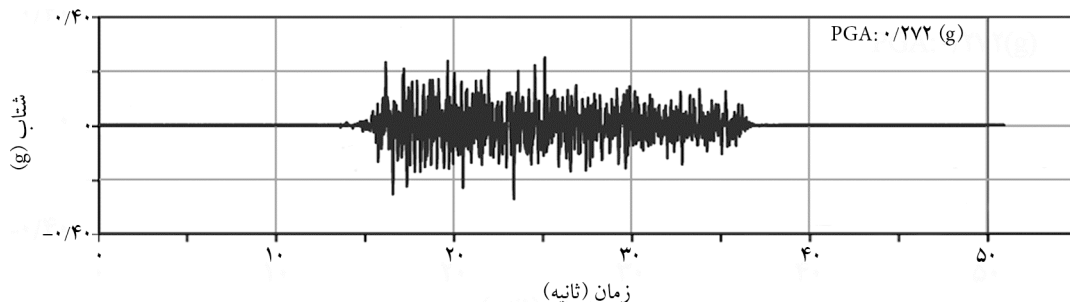
* ضخامت اندازه‌گیری شده‌ی فولاد



(پ) هیستریزس مقاومت برشی در مقابل نسبت تغییر مکان

(ب) تاریخچه‌ی زمانی پاسخ مقاومت برشی

شکل (۵): صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی به روش المان فنر معادل (نمونه‌ی ST1-c).



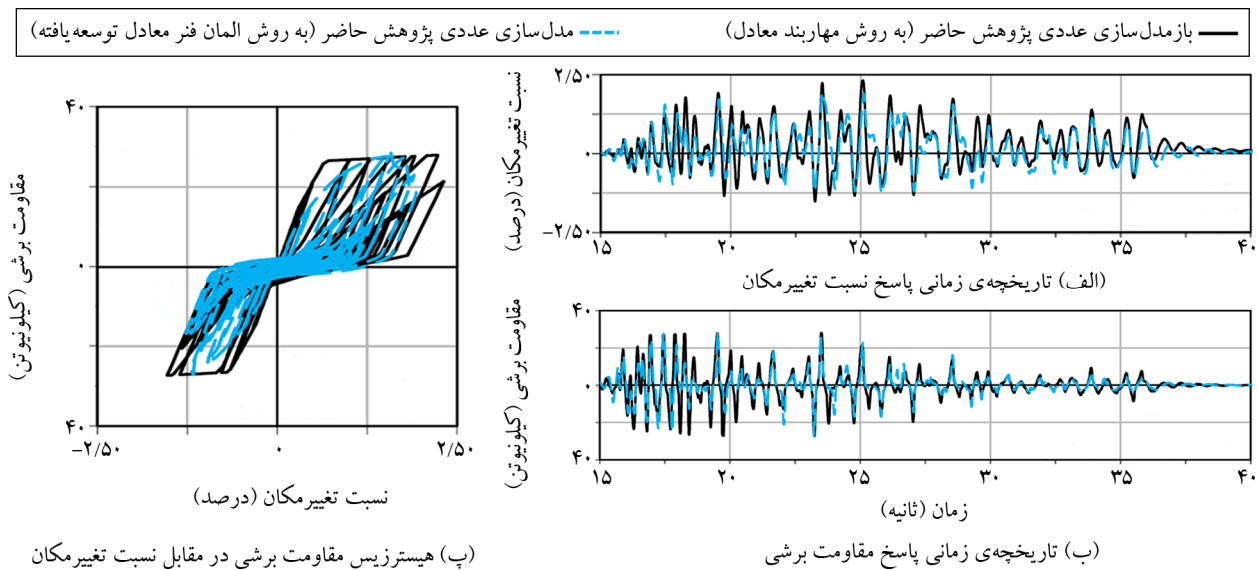
شکل (۶): شتاب‌نگاشت حرکت زمین کبک مطالعات شمیم و همکاران [۸].

فنر بلندشدگی: این عنصر نماینده‌ی میله‌های مهارى در پایه‌های نگه‌دارنده‌ی قاب دیوار است و برای کمک به بلند شدگی مطرح شده در جابه‌جایی کامل دیوار (جابه‌جایی برشی به همراه پوشش، جابه‌جایی خمشی و جابه‌جایی بلند شدگی) در نظر گرفته شده است. طبق مشاهدات، میله‌های مهارى در طول آزمایش دینامیکی، الاستیک باقی می‌ماند؛ به همین علت به صورت خطی مدل‌سازی شده‌اند. همچنین سختی فنر بلند شدگی که به طور مستقیم از داده‌های آزمایش دینامیکی به دست آمده؛ بر اساس نتایج حاصل از مقاومت برشی در مقابل جابه‌جایی بلند شدگی دیوار تخمین زده شده است.

فنر چرخشی: این عنصر نماینده‌ی سختی جانبی قاب دیوار، ناشی از اتصال اعضای قائم به افقی و سختی آن به طور مستقیم از داده‌های آزمایش چند قاب یک طبقه‌ی بدون پوشش، همراه با بست‌های استاد، تحت پروتکل بارگذاری یک‌سویه به دست آمده است.

با توجه به مسئله پیش آمده، برای بهبود پیش‌بینی پاسخ‌ها، به کمک روش‌های مدل‌سازی ارائه‌شده به توسعه‌ی مدل عددی پرداخته شد. در مدل عددی توسعه یافته، با توجه به جزئیات روش مهاربند معادل، عناصری همچون فنر بلندشدگی^{۱۵}، فنر چرخشی^{۱۶} و المان تیر-ستون^{۱۷} گنجانده شد. جزئیات مدل‌سازی و المان‌ها در شکل (۳-پ) نشان داده شده است. نتایج نشان داد، پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط مدل عددی توسعه یافته در مقایسه با مدل عددی ساخته شده به روش المان فنر معادل بهتر است؛ هر چند که سختی اولیه، مشابه با مشاهدات یوسفی و همکاران [۲۰] نشان‌دهنده‌ی یک تفاوت جزئی می‌باشد؛ اما به طور کلی تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج حاصل وجود دارد (شکل ۷).

مطابق با جزئیات مدل‌سازی عددی به روش مهاربند معادل [۹]، نقش و اثر هر یک از اجزای گنجانده شده در مدل عددی توسعه یافته به این شرح است:



شکل (۲): صحت سنجی مدل سازی عددی به روش المان فنر معادل توسعه یافته (نمونه STI-c).

جدول (۳): مشخصات کلی نمونه های دیوار برشی یک طبقه با پیکربندی های جدید.

| فاصله پیچ ها در محیط پیرامونی قاب (میلی متر) | ضخامت اعضای قاب دیوار* (میلی متر) | ضخامت پوشش ورق فولادی* (میلی متر) | نمونه |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|
| ۱۰۰ | ۱/۳۷ | ۰/۴۹ | W-new1 |
| ۷۵ | | | W-new2 |
| ۵۰ | | | W-new3 |
| ۱۰۰ | ۱/۳۷ | ۰/۶۹ | W-new4 |
| ۷۵ | | | W-new5 |
| ۵۰ | | | W-new6 |
| ۱۰۰ | ۱/۰۹ | ۰/۷۶ | W-new7 |
| ۷۵ | | | W-new8 |
| ۵۰ | | | W-new9 |
| ۱۰۰ | ۱/۳۷ | ۰/۷۶ | W-new10 |
| ۷۵ | | | W-new11 |
| ۵۰ | | | W-new12 |
| ۱۰۰ | ۱/۰۹ | ۰/۸۴ | W-new13 |
| ۷۵ | | | W-new14 |
| ۵۰ | | | W-new15 |
| ۱۰۰ | ۱/۳۷ | ۰/۸۴ | W-new16 |
| ۷۵ | | | W-new17 |
| ۵۰ | | | W-new18 |

* ضخامت اسمی (حداقل) فولاد

المان تیر- ستون: این المان نماینده ی استاد های مرزی قاب دیوار است. مدل سازی قاب با این المان ها موجب انعطاف پذیری جانبی و در نتیجه افزایش جابه جایی دیوار برشی، ناشی از کوتاه شدگی و کشیدگی استاد های مرزی (عملکرد قاب) شده است.

۴- دیوارهای برشی با پیکربندی های جدید

۴-۱- مدل سازی و تحلیل

با توجه به اینکه مدل عددی توسعه یافته قادر به پیش بینی پاسخ های دیوار برشی، تحت اثر بارگذاری دینامیکی غیرخطی بود و داده های ورودی مصالح به کار رفته در این مدل عددی، برخلاف دیگر روش های مدل سازی وابستگی کمتری به نتایج آزمایش های تجربی داشت و بر اساس مشخصه های فیزیکی و مکانیکی دیوار تعیین می شد؛ مدل سازی دیوارهای برشی با پیکربندی های جدید، تحت اثر بارگذاری دینامیکی غیرخطی امکان پذیر شد. بر همین اساس، مطابق با جدول (۳) به مدل سازی ۱۸ نمونه دیوار برشی یک طبقه، به روش المان فنر معادل توسعه یافته پرداخته شد. برای پیش بینی دقیق پاسخ ها، مشخصات فولادهای به کار رفته، بر اساس نتایج آزمون کشش برنامه ی مطالعاتی یو و چن [۲۵] تعیین شده است. همچنین برای مدل سازی این نمونه ها نیاز به دانستن سختی فنر بلندشدگی، سختی فنر چرخشی و نسبت میرایی بود. هر چند که برای پاسخ سازه های سردنورد شده فولادی، انتخاب نسبت میرایی

جدول (۴): داده‌های لازم برای تهیهی شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز از پایگاه داده‌های PEER [۲۷].

| ردیف | مشخصه | مقدار |
|------|------------------------|---------------------------------------|
| ۱ | نوع گسل | امتداد لغز ^{۱۸} (SS) + معکوس |
| ۲ | بزرگا | ۸/۰، ۶/۰ (کمینه، بیشینه) |
| ۳ | R_JB (کیلومتر) | ۶۰، ۰ (کمینه، بیشینه) |
| ۴ | R_rup (کیلومتر) | ۶۰، ۰ (کمینه، بیشینه) |
| ۵ | Vs30 (متر بر ثانیه) | ۷۵۰، ۳۷۵ (کمینه، بیشینه) |
| ۶ | D5-95 (ثانیه) | ۶۰، ۱۰ (کمینه، بیشینه) |
| ۷ | پالس | رکوردهای بدون پالس یا پالس‌دار |
| ۸ | بیشینه‌ی تعداد رکوردها | ۱۰۰ (≥ ۱۰۰) |
| ۹ | ضریب مقیاس اولیه | ۳، ۰/۳۳ (کمینه، بیشینه) |
| ۱۰ | مؤلفه‌ی طیف | H2 |
| ۱۱ | نسبت میرایی | ٪۵ |
| ۱۲ | متوسط مجموعه | حسابی |
| ۱۳ | روش مقیاس‌بندی | حداقل MSE |
| ۱۴ | محدوده‌ی پریود | ۰/۴۵، ۰/۰۶ (کمینه، بیشینه) |
| ۱۵ | وزن | ۱، ۱ |

هنوز هم یک مسئله‌ی حل‌نشده است [۲۶]؛ اما با توجه به مشابهت نتایج واسنجی نمونه‌های دیوار برشی مطالعات شمیم و راجرز [۹]، متوسط نتایج آنها به‌عنوان مقادیر مناسب در نظر گرفته شد. داده‌های مورد نیاز جهت در نظر گرفتن مصالح CFSSWP، برای تمام نمونه‌های دیوار برشی، در بخش پیوست ارائه شده است. برای تحلیل نمونه‌های دیوار برشی، با استفاده از پایگاه داده‌های PEER [۲۷]، به تفکیک هفت عدد شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌ی بدون پالس و پالس‌دار تهیه شد. جهت استفاده از این پایگاه، ابتدا طیف طرح مورد نظر بر اساس محل فرضی احداث سازه و مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۲۸] در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد و با زمین نوع دو (II) در نظر گرفته شد. سپس با توجه به فرضیات، داده‌های لازم برای تهیهی شتاب‌نگاشت‌های مناسب تعیین شد (جدول ۴). لازم به ذکر است در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز، به تمامی ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران توجه شد. نتایج حاصل از این پایگاه برای رکوردهای بدون پالس و پالس‌دار در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۱): زمین‌لرزه‌های بدون پالس و پالس‌دار انتخاب‌شده برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی.

| ردیف | شناسه | نام | سازوکار | سال | بزرگا (Mw) | بیشینه شتاب* (g) | ضریب مقیاس |
|------|-------|------------|------------------------------|------|------------|------------------|------------|
| ۱ | ۱۳۹ | طبس | شیب لغز ^{۱۹} معکوس | ۱۹۷۸ | ۷/۳۵ | ۰/۴۰۹ | ۱/۱۹ |
| ۲ | ۷۵۵ | لوما پریتا | مورب لغز ^{۲۰} معکوس | ۱۹۸۹ | ۶/۹۳ | ۰/۴۸۵ | ۱/۲۵ |
| ۳ | ۱۲۰۸ | چی چی | مورب لغز معکوس | ۱۹۹۹ | ۷/۶۲ | ۰/۱۹۰ | ۲/۱۶ |
| ۴ | ۱۷۸۷ | هکتور ماین | امتداد لغز | ۱۹۹۹ | ۷/۱۳ | ۰/۳۲۸ | ۱/۲۷ |
| ۵ | ۴۰۶۹ | پارک فیلد | امتداد لغز | ۲۰۰۴ | ۶/۰۰ | ۰/۱۷۰ | ۲/۵۶ |
| ۶ | ۴۴۵۵ | مونت‌نگرو | شیب لغز معکوس | ۱۹۷۹ | ۷/۱۰ | ۰/۲۵۵ | ۱/۷۸ |
| ۷ | ۵۶۲۳ | ایواته | شیب لغز معکوس | ۲۰۰۸ | ۶/۹۰ | ۰/۲۴۳ | ۲/۰۸ |

| ردیف | شناسه | نام | سازوکار | سال | بزرگا (Mw) | بیشینه شتاب* (g) | پریود پالس (ثانیه) | ضریب مقیاس |
|------|-------|--------------|----------------|------|------------|------------------|--------------------|------------|
| ۱ | ۸۲۸ | کیپ مندوسینو | شیب لغز معکوس | ۱۹۹۲ | ۷/۰۱ | ۰/۶۶۲ | ۲/۹۹۶ | ۰/۸۱ |
| ۲ | ۱۰۵۲ | نورث ریج | شیب لغز معکوس | ۱۹۹۴ | ۶/۶۹ | ۰/۴۳۳ | ۰/۷۲۸ | ۱/۲۳ |
| ۳ | ۱۴۰۲ | چی چی | مورب لغز معکوس | ۱۹۹۹ | ۷/۶۲ | ۰/۳۹۹ | ۷/۸۷۵ | ۱/۱۸ |
| ۴ | ۴۲۲۸ | نیگاتا | شیب لغز معکوس | ۲۰۰۴ | ۶/۶۳ | ۰/۵۹۹ | ۱/۷۹۹ | ۰/۶۷ |
| ۵ | ۴۴۵۱ | مونت‌نگرو | شیب لغز معکوس | ۱۹۷۹ | ۷/۱۰ | ۰/۳۶۸ | ۱/۴۴۲ | ۱/۱۷ |
| ۶ | ۴۸۴۷ | چووتسو | شیب لغز معکوس | ۲۰۰۷ | ۶/۸۰ | ۰/۴۵۶ | ۱/۴۰۰ | ۱/۲۱ |
| ۷ | ۶۹۲۸ | دارفیلد | امتداد لغز | ۲۰۱۰ | ۷/۰۰ | ۰/۳۵۷ | ۱۰/۶۳۳ | ۱/۵۴ |

* مؤلفه‌ی افقی H2 به‌عنوان مؤلفه‌ی بزرگ‌تر شتاب‌نگاشت با طیف طرح مورد نظر مقایسه شده است.

۴-۲- نتایج حاصل از تحلیل

پس از مدل سازی نمونه های دیوار برشی با پیکربندی جدید، هر یک از نمونه ها تحت اثر زمین لرزه های بدون پالس و پالس دار تحلیل شد. با توجه به تعداد شتاب نگاشت های مورد نظر، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران، متوسط نتایج به عنوان نتیجه ی نهایی تلقی گردید. نتایج حاصل از این تحلیل ها در جدول (۶) ارائه شده است. ذکر این نکته لازم است که مطابق با این استاندارد، تغییر مکان نسبی واقعی که با استفاده از تحلیل غیرخطی و با منظور نمودن اثر $P-\Delta$ محاسبه می شود نباید از $2/5$ درصد ارتفاع تجاوز نماید:

$$\text{متر} \left(\frac{0.025 \times 2.44}{0.025} = 0.061 \right)$$

برای بررسی بهتر تحلیل های انجام شده بر روی نمونه ها، نتایج حاصل به صورت جداگانه از چند جهت مدنظر قرار داده شد: (۱) از نظر تغییر مکان جانبی ثبت شده؛ (۲) از نظر تغییر مکان جانبی

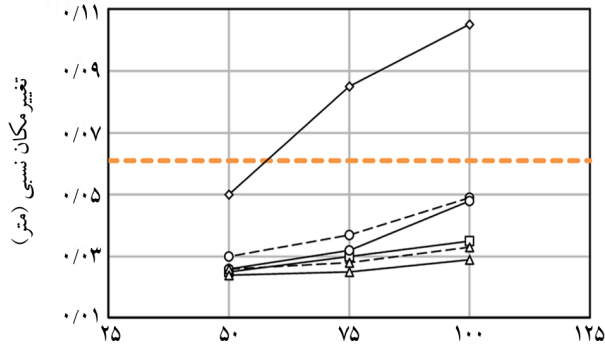
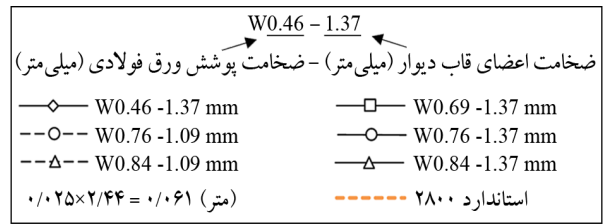
ثبت شده، بر اساس بدون پالس و پالس دار بودن زمین لرزه؛ (۳) از نظر دوره ی تناوب ثبت شده؛ (۴) از نظر تأثیر پریرود پالس زمین لرزه بر تغییر مکان جانبی ثبت شده. بررسی تغییر مکان جانبی ثبت شده: در شکل (۸) تغییر مکان نسبی ثبت شده توسط نمونه های دیوار برشی ارائه شده است. مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران، از میان ۱۸ نمونه ی دیوار برشی، شش نمونه تحت اثر شتاب نگاشت های مورد نظر، تغییر مکانی فراتر از حد مجاز استاندارد را تجربه کرده است. نتایج حاصل نشان داد، افزایش ضخامت اعضا و پوشش ورق فولادی بدون در نظر گرفتن فاصله ی مناسب برای پیچ ها نه تنها چندان در بهبود تغییر مکان جانبی دیوار برشی مؤثر نیست بلکه در برخی موارد نتیجه ی عکس می دهد. این مسئله در دیوارهای برشی با فاصله ی پیچ ۱۰۰ میلی متر به شکل محسوس تری قابل مشاهده بود.

جدول (۶): متوسط نتایج حاصل از تحلیل نمونه های دیوار برشی با پیکربندی جدید، تحت اثر زمین لرزه های بدون پالس و پالس دار.

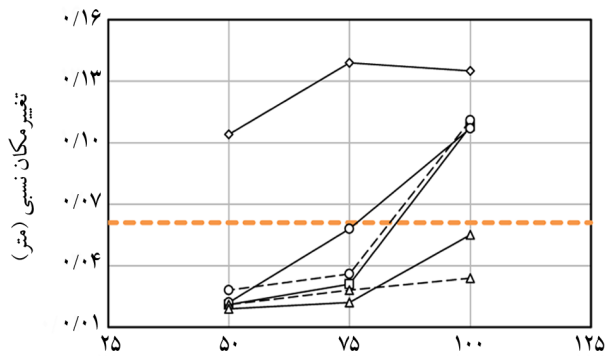
| زمین لرزه های پالس دار | | زمین لرزه های بدون پالس | | دوره ی تناوب (ثانیه) | نمونه |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|---------|
| مقاومت برشی (کیلو نیوتن) | تغییر مکان نسبی (متر) | مقاومت برشی (کیلو نیوتن) | تغییر مکان نسبی (متر) | | |
| ۱۲/۲۰۶ | ۰/۱۳۵ | ۱۲/۲۵۸ | ۰/۱۰۵ | ۰/۳۴۲ | W-new1 |
| ۱۴/۶۰۳ | ۰/۱۳۹ | ۱۴/۷۴۱ | ۰/۰۸۵ | ۰/۳۲۹ | W-new2 |
| ۱۸/۸۹۷ | ۰/۱۰۴ | ۱۹/۳۶۳ | ۰/۰۵۰ | ۰/۳۱۴ | W-new3 |
| ۱۹/۱۵۳ | ۰/۱۰۸ | ۱۹/۵۷۰ | ۰/۰۳۵ | ۰/۳۰۳ | W-new4 |
| ۲۲/۴۷۳ | ۰/۰۳۱ | ۲۲/۷۹۲ | ۰/۰۳۰ | ۰/۲۹۵ | W-new5 |
| ۲۴/۲۶۸ | ۰/۰۲۱ | ۲۶/۴۷۶ | ۰/۰۲۵ | ۰/۲۸۵ | W-new6 |
| ۱۹/۲۱۰ | ۰/۱۱۱ | ۱۹/۲۰۱ | ۰/۰۴۹ | ۰/۳۳۱ | W-new7 |
| ۲۲/۱۸۰ | ۰/۰۳۶ | ۲۲/۵۱۳ | ۰/۰۳۷ | ۰/۳۲۲ | W-new8 |
| ۲۴/۶۲۶ | ۰/۰۲۸ | ۲۵/۶۹۴ | ۰/۰۳۰ | ۰/۳۱۰ | W-new9 |
| ۱۸/۹۳۶ | ۰/۱۰۷ | ۱۹/۴۸۳ | ۰/۰۴۸ | ۰/۳۰۶ | W-new10 |
| ۲۱/۹۹۸ | ۰/۰۵۸ | ۲۲/۲۷۷ | ۰/۰۳۲ | ۰/۲۹۷ | W-new11 |
| ۲۴/۱۸۲ | ۰/۰۲۲ | ۲۶/۷۴۱ | ۰/۰۲۶ | ۰/۲۸۷ | W-new12 |
| ۲۲/۲۸۸ | ۰/۰۳۴ | ۲۲/۳۱۲ | ۰/۰۳۳ | ۰/۳۱۲ | W-new13 |
| ۲۴/۳۸۶ | ۰/۰۲۸ | ۲۴/۸۵۰ | ۰/۰۲۸ | ۰/۳۰۴ | W-new14 |
| ۲۴/۸۵۵ | ۰/۰۲۱ | ۲۸/۶۶۰ | ۰/۰۲۶ | ۰/۲۹۵ | W-new15 |
| ۲۲/۱۱۵ | ۰/۰۵۵ | ۲۲/۴۶۳ | ۰/۰۲۹ | ۰/۲۹۰ | W-new16 |
| ۲۳/۹۰۴ | ۰/۰۲۲ | ۲۵/۵۲۴ | ۰/۰۲۵ | ۰/۲۸۳ | W-new17 |
| ۲۵/۶۹۱ | ۰/۰۱۹ | ۲۹/۹۵۱ | ۰/۰۲۴ | ۰/۲۷۵ | W-new18 |

همچنین با توجه به اینکه ضخامت اسمی فولاد ۰/۶۹ میلی‌متر کمتر از فولاد ۰/۷۶ میلی‌متر است؛ انتظار می‌رفت دیوار برشی با پوشش ۰/۶۹ میلی‌متر تغییر مکان جانبی بیشتری را تجربه کند؛ اما در عمل عکس این مسئله رخ داد که علت آن را می‌توان به وجود تفاوت در ضخامت‌های بدون روکش فولاد ربط داد. در جدول (۷) ضخامت‌های اسمی، طراحی و بدون روکش فولادهای به کار رفته در مدل‌سازی نمونه‌های دیوار برشی با هم مقایسه شده است.

بررسی تغییر مکان جانبی ثبت‌شده، بر اساس بدون پالس و پالس‌دار بودن زمین‌لرزه: در شکل (۹) مقایسه‌ای از تغییر مکان نسبی نمونه‌های دیوار برشی، بر اساس بدون پالس و پالس‌دار بودن زمین‌لرزه ارائه شده است. نتایج حاصل نشان داد، با در نظر داشتن ضخامت ثابت برای اعضا و پوشش ورق فولادی، تأثیر زمین‌لرزه‌های پالس‌دار در نمونه‌های دیوار برشی با افزایش فاصله‌ی پیچ و دوره‌ی تناوب محسوس‌تر می‌شود؛ به‌نحوی که در برخی از نمونه‌ها، علی‌رغم وجود تغییر مکان جانبی مجاز تحت زمین‌لرزه‌های بدون پالس، پاسخی فراتر از این حد تحت زمین‌لرزه‌های پالس‌دار ثبت شده است؛ بنابراین در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک گسل که حرکات پالس‌گونه از ویژگی‌های آن محسوب می‌شود [۱۶-۱۹]، توجه به این نکته می‌تواند تأثیر بسزایی در تعیین عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی داشته باشد.



(الف) زمین‌لرزه‌های بدون پالس



فاصله پیچ‌ها در محیط پیرامونی قاب (میلی‌متر)
 (ب) زمین‌لرزه‌های پالس‌دار

شکل (۸): مقایسه متوسط تغییر مکان نسبی حاصل از تحلیل نمونه‌های دیوار برشی با پیکربندی جدید.

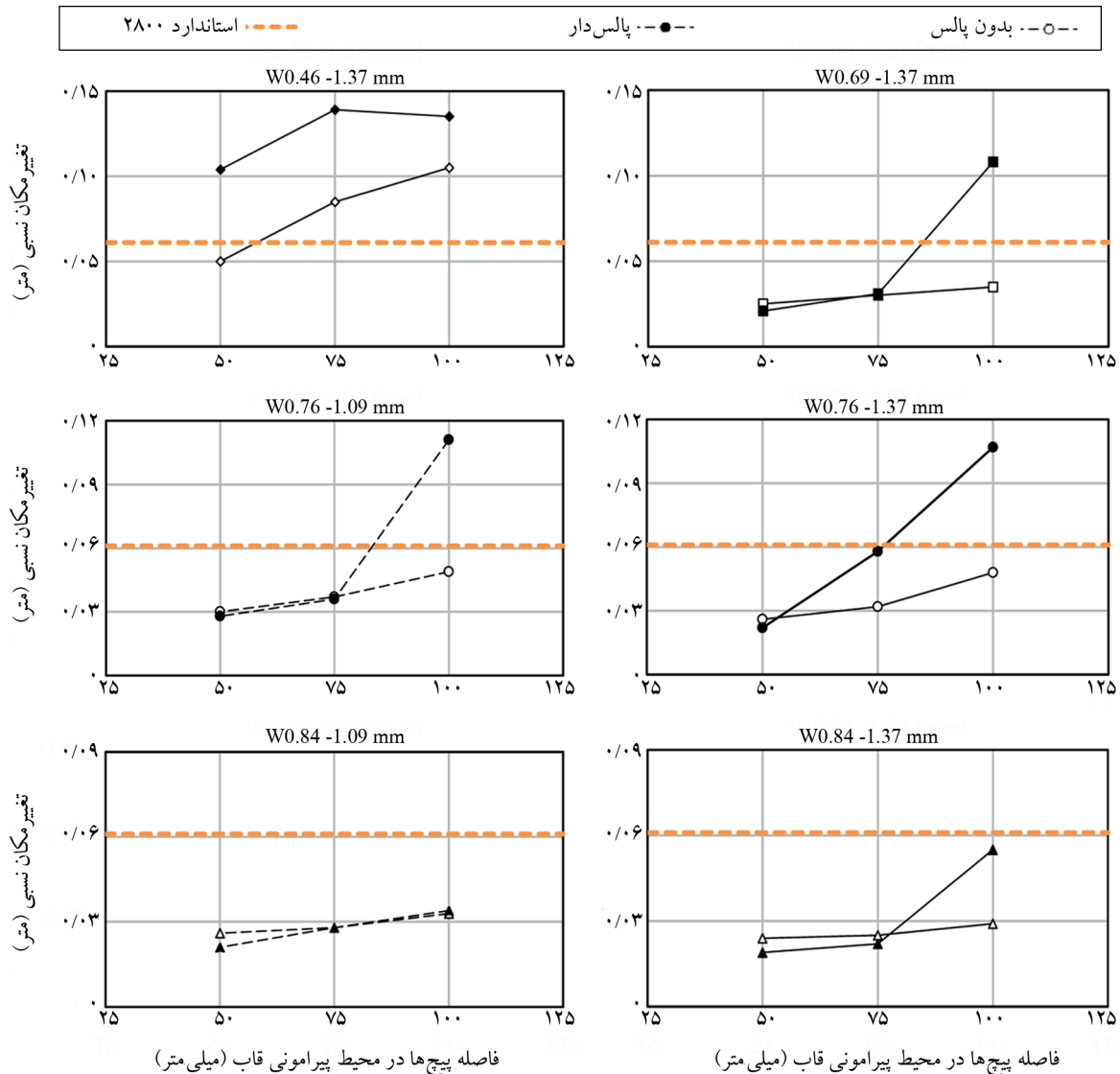
جدول (۷): مقایسه‌ی ضخامت‌های فولادهای به کار رفته در نمونه‌های دیوار برشی با پیکربندی جدید بر اساس برنامه‌ی مطالعاتی یو و چن [۲۵].

| عضو | ضخامت اسمی* (میلی‌متر) | ضخامت طراحی** (میلی‌متر) | ضخامت بدون روکش*** (میلی‌متر) | کشیدگی به ازای ۵۰ میلی‌متر (درصد) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| ورق فولادی ۰/۴۶ میلی‌متر | ۰/۴۶ | ۰/۴۸ | ۰/۴۸ | ۲۱ |
| ورق فولادی ۰/۶۹ میلی‌متر | ۰/۶۹ | ۰/۷۲ | ۰/۷۵ | ۲۷ |
| ورق فولادی ۰/۷۶ میلی‌متر | ۰/۷۶ | ۰/۷۹ | ۰/۷۳ | ۲۴ |
| ورق فولادی ۰/۸۴ میلی‌متر | ۰/۸۴ | ۰/۸۸ | ۰/۹۱ | ۳۳ |
| استاد ۱/۰۹ میلی‌متر | ۱/۰۹ | ۱/۱۵ | ۱/۰۹ | ۳۵ |
| ترک ۱/۰۹ ^{۱۱} میلی‌متر | ۱/۰۹ | ۱/۱۵ | ۱/۰۷ | ۲۹ |
| استاد ۱/۳۷ میلی‌متر | ۱/۳۷ | ۱/۴۴ | ۱/۳۶ | ۲۰ |
| ترک ۱/۳۷ میلی‌متر | ۱/۳۷ | ۱/۴۴ | ۱/۳۶ | ۱۶ |

***ضخامت اندازه‌گیری شده‌ی فولاد

**ضخامت حداکثر فولاد

*ضخامت حداقل فولاد



شکل (۹): مقایسه‌ی متوسط تغییر مکان نسبی حاصل از تحلیل نمونه‌های دیوار برشی با پیکربندی جدید، بر اساس بدون پالس و پالس‌دار بودن زمین‌لرزه.

به‌عنوان یکی از ویژگی‌های اصلی این گونه از زمین‌لرزه‌ها است [۱۷-۱۹]. در این پژوهش، با توجه به زمین‌لرزه‌های پالس‌دار مورد نظر (جدول ۵)، به‌طور کلی با افزایش پریود پالس، شاهد کاهش تغییر مکان جانبی ثبت‌شده توسط نمونه‌های دیوار برشی بوده‌ایم. به‌عنوان نمونه، نتایج دو نمونه از دیوارهای برشی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در رابطه با این مسئله، مطالعات سامرویل [۲۹] در زمینه‌ی تأثیر پریود پالس بر طیف پاسخ شتاب و سرعت نشان داد؛ در پالس‌های سرعت با پریود بلند که موضوع بسیاری از زمین‌لرزه‌های بین ورقه‌ای حوزه‌ی نزدیک گسل است؛ سرعت عامل اصلی و مؤثر بر عملکرد سازه می‌باشد [۱۷]. بر اساس این

بررسی دوره‌های تناوب ثبت‌شده: در جدول (۶) دوره‌ی تناوب حاصل از مدل‌سازی، برای هر یک از نمونه‌های دیوار برشی ارائه شده است. این بررسی که بر اساس ضخامت‌های بدون روکش فولاد در برنامه‌ی مطالعاتی یو و چن [۲۵] انجام شد، نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه‌ی منطقی بین دوره‌های تناوب با ضخامت اعضا و پوشش ورق فولادی و همچنین فاصله‌ی پیچ‌ها بود که می‌تواند گواه بر صحت مدل‌سازی نمونه‌های دیوار برشی باشد. بررسی تأثیر پریود پالس زمین‌لرزه بر تغییر مکان جانبی ثبت‌شده: بررسی سرعت ثبت‌شده از زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک گسل، نشان‌دهنده‌ی پالس مشخص سرعت با پریود بلند

که مدل عددی توسعه یافته مشابه با مطالعات پیشین تفاوت جزئی در سختی اولیه دارد؛ اما به طور کلی یک تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج حاصل مشاهده می شود.

افزایش ضخامت اعضا و پوشش ورق فولادی بدون در نظر گرفتن فاصله مناسب برای پیچ ها نه تنها چندان در بهبود تغییر مکان جانبی دیوار برشی مؤثر نیست بلکه در برخی موارد نتیجه عکس می دهد. این مسئله در دیوارهای برشی با فاصله پیچ ۱۰۰ میلی متر به شکل محسوس تری قابل مشاهده است.

با توجه به اینکه در عمل، ضخامت بدون روکش فولاد تعیین کننده عملکرد دیوار برشی است؛ اندازه گیری ضخامت فولاد و انجام آزمون کشش لازم می باشد و تنها بر اساس مشخصات اسمی فولادهای به کار رفته، نمی توان عملکرد دیوارهای برشی را ارزیابی نمود.

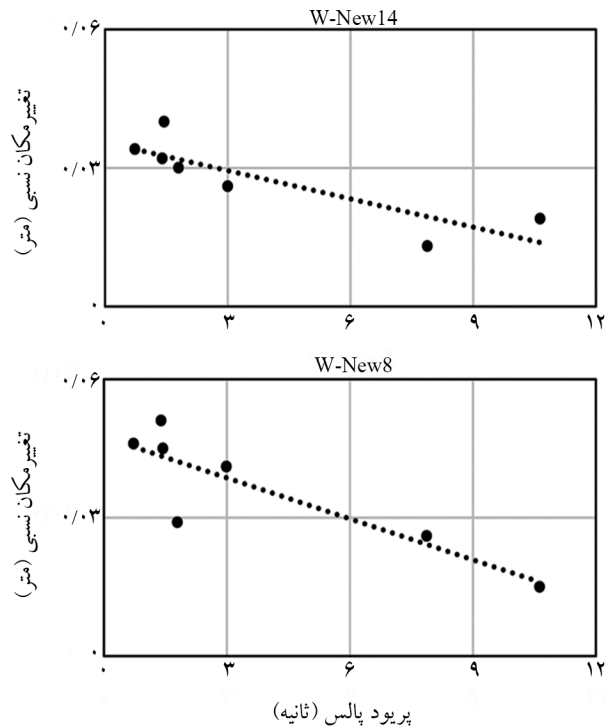
در دیوارهای برشی با فاصله پیچ ۱۰۰ میلی متر، تأثیر زمین لرزه های پالس دار محسوس تر است؛ به نحوی که در برخی از نمونه ها، علی رغم وجود تغییر مکان جانبی مجاز تحت زمین لرزه های بدون پالس، پاسخی فراتر از این حد تحت زمین لرزه های پالس دار ثبت شده است؛ بنابراین در زمین لرزه های حوزه نزدیک گسل که حرکات پالس گونه از ویژگی های آن محسوب می شود توجه به این نکته می تواند تأثیر بسزایی در عملکرد لرزه ای دیوارهای برشی داشته باشد.

متوسط دوره تناوب ۱۸ نمونه دیوار برشی یک طبقه حدود ۰/۳ ثانیه محاسبه شد. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر پریود پالس بر طیف پاسخ شتاب و سرعت سازه، به طور کلی می توان دریافت به دلیل کوتاه بودن دوره تناوب دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی یک طبقه، پالس های سرعت با پریود بلند تأثیر چندان در عملکرد لرزه ای و پاسخ های ثبت شده توسط آنها نخواهند داشت.

قدردانی

نویسندگان از جناب آقای دکتر ایمان شمیم، استادیار محترم دانشکده مهندسی عمران شیراز، به سبب ارائه اطلاعات لازم در جهت پیشبرد اهداف پژوهش حاضر تشکر می نمایند.

مطالعات، به طور کلی می توان دریافت به دلیل کوتاه بودن دوره تناوب دیوارهای برشی سردنورد شده فولادی یک طبقه، پالس های سرعت با پریود بلند تأثیر چندان در عملکرد لرزه ای و پاسخ های ثبت شده توسط آنها نخواهند داشت.



شکل (۱۰): تأثیر پریود پالس زمین لرزه های پالس دار مورد نظر در پژوهش حاضر بر تغییر مکان نسبی نمونه های W-new14 و W-new8.

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، به کمک دو مدل عددی ارائه شده، به توسعه مدل های موجود برای پیش بینی مناسب پاسخ های دیوار برشی تحت اثر بارگذاری دینامیکی غیرخطی در نرم افزار المان محدود OpenSEES پرداخته شد. با توجه به کاهش نیاز مدل عددی توسعه یافته به شرایط و نتایج آزمایش های تجربی و در نتیجه فراهم آمدن امکان مدل سازی دیوارهای برشی با پیکربندی های جدید، ۱۸ نمونه دیوار برشی یک طبقه مدل سازی و تحت اثر مجموعه ای از زمین لرزه های بدون پالس و پالس دار تحلیل و بررسی شد. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

برای پیش بینی مناسب عملکرد لرزه ای دیوارهای برشی، نیاز به در نظر گرفتن جزئیات بیشتر در مدل عددی است؛ هر چند

مراجع

11. Kechidi, S. and Bourahla, N. (2016) Deteriorating hysteresis model for cold-formed steel shear wall panel based on its physical and mechanical characteristics. *Thin-Walled Structures*, **98**, 421-430.
12. Ibarra, L.F., Medina, R.A., and Krawinkler, H. (2005) Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34**(12), 1489-1511.
13. Ibarra, L.F. and Krawinkler, H. (2005) *Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations*. Report No. PEER Report 2005/06. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley.
14. Lignos, D.G. and Krawinkler, H. (2011) Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, **137**(11), 1291-1302.
15. Sharafi, P., Mortazavi, M., Usefi, N., Kildashti, K., Ronagh, H., and Samali, B. (2018) Lateral force resisting systems in lightweight steel frames: Recent research advances. *Thin-Walled Structures*, **130**, 231-253.
16. PEER (2010) *Technical Report for the PEER Ground Motion Database Web Application-Beta Version*. Technical Report. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley.
17. Gioncu, V. and Mazzolani, F.M. (2010) 'Peculiar features of near-source ground motions.' In: *Earthquake Engineering for Structural Design*, Spon Press, New York, pages 249-275.
18. Yaghmaei-Sabegh, S. (2010) Detection of pulse-like ground motions based on continues wavelet transform. *Journal of Seismology*, **14**(4), 715-726.
19. Yaghmaei-Sabegh, S., Jafari-Koucheh, E., and Ebrahimi-Aghabagher, M. (2020) Estimating the seismic response of nonlinear structures equipped with nonlinear viscous damper subjected to pulse-like ground records. *Structures*, **28**, 1915-1923.
20. Usefi, N., Ronagh, H., Kildashti, K., and Samali, B. (2018) Macro/micro analysis of cold-formed steel members using ABAQUS and OPENSEES.
1. Yu, W.W., LaBoube, R.A., and Chen, H. (2019) 'Introduction.' In: *Cold-Formed Steel Design*. John Wiley & Sons, Hoboken, 1-35.
2. Serrette, R., Encalada, J., Hall, G., Matchen, B., Nguyen, H., and Williams, A. (1997) *Additional Shear Wall Values for Light Weight Steel Framing (Draft)*. Report No. LGSRG-1-97. Technical Report. Department of Civil Engineering, Santa Clara University, Santa Clara.
3. Ong Tone, C. and Rogers, C.A. (2009) *Tests and Evaluation of Cold-Formed Steel Frame/Steel Sheathed Shear Walls*. Research Report. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
4. El-Saloussy, K. (2010) *Additional Cold-Formed Steel Frame/Steel Sheathed Shear Wall Design Values for Canada*. Master Thesis. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
5. Balh, N. (2010) *Development of Seismic Design Provisions for Steel Sheathed Shear Walls*. Master Thesis. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
6. DaBreo, J. (2012) *Impact of Gravity Loads on the Lateral Performance of Cold-Formed Steel Frame/Steel Sheathed Shear Walls*. Master Thesis. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
7. Shamim, I. (2012) *Seismic Design of Lateral Force Resisting Cold-Formed Steel Framed (CFS) Structures*. Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
8. Shamim, I., DaBreo, J., and Rogers, C.A. (2013) Dynamic testing of single-and double-story steel-sheathed cold-formed steel-framed shear walls. *Journal of Structural Engineering*, **139**(5), 807-817.
9. Shamim, I. and Rogers, C.A. (2013) Steel sheathed/CFS framed shear walls under dynamic loading: numerical modelling and calibration. *Thin-Walled Structures*, **71**, 57-71.
10. McKenna, F. (2011) Opensees: A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, **13**(4), 58-66.

واژه‌نامه

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Cold-Formed Steel (CFS) | ۱- سردنورد شده‌ی فولادی |
| Lightweight Steel Frame (LSF) | ۲- قاب سبک فولادی |
| Monotonic Loading | ۳- بارگذاری یک‌سویه |
| Cyclic Loading | ۴- بارگذاری چرخه‌ای |
| Blocking Stud | ۵- بست استاد |
| Rupture Directivity | ۶- جهت‌پذیری شکست |
| Fastener Based Method | ۷- روش مبتنی بر اتصال‌دهنده |
| Equivalent Spring Element Method | ۸- روش المان فنر معادل |
| Equivalent Brace Method | ۹- روش مهاربند معادل |
| Brace Net Method | ۱۰- روش شبکه‌ی مهاربند |
| Zero-Length Element | ۱۱- المان بدون طول |
| Truss Element | ۱۲- المان خرپا |
| Chord Stud | ۱۳- استاد مرزی |
| Tension Test (Coupon) | ۱۴- آزمون کشش (کوپن) |
| Uplift Spring | ۱۵- فنر بلندشدگی |
| Rotation Spring | ۱۶- فنر چرخشی |
| Beam-Column Spring | ۱۷- المان تیر-ستون |
| Strike Slip | ۱۸- امتداد لغز |
| Dip Slip | ۱۹- شیب لغز |
| Oblique Slip | ۲۰- مورب لغز |
| Track | ۲۱- ترک |

13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures (SS18), University of Western Australia, Perth.

21. Buonopane, S.G., Bian, G., Tun, T.H., and Schafer, B.W. (2015) Computationally efficient fastener-based models of cold-formed steel shear walls with wood sheathing. *Journal of Constructional Steel Research*, **110**, 137-148.
22. Kechidi, S. and Bourahla, N. (2021) *Cold-Formed Steel Sheathed Shear Wall Panel examples*. (2016, March 13 - last update). [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Cold-Formed_Steel_Steel_Sheathed_Shear_Wall_Panel_examples [2021, February 10].
23. *Bailey Metal Products Limited* [Online]. Available: <http://www.bmp-group.com/resource-library/main/load-tables> [2021, February 10].
24. American Iron Steel Institute (AISI) (2016) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI S100)*. 16w/S1-18 ed. Washington, D.C.
25. Yu, C. and Chen, Y. (2009) *Steel Sheet Sheathing Options for Cold-Formed Steel Framed Shear Wall Assemblies Providing Shear Resistance-Phase 2*. Report No. UNT-G70752. Research Report. Department of Engineering Technology, University of North Texas, Denton.
26. Campiche, A., Fiorino, L., and Landolfo, R. (2020) Numerical modelling of CFS two-storey sheathing-braced building under shaking-table excitations. *Journal of Constructional Steel Research*, **170**, 106110.
27. *NGA-West2 -- Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes*. [Online]. Available: <https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/new> [2021, February 10].
28. Permanent committee for revising the Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings-Standard No. 2800*. 4th ed. Building Housing Research Center (BHRC), Teheran (in Persian).
29. Somerville, P.G. (2005) Engineering characterization of near fault ground motions. *New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE)*, Taupo.

پیوست

جدول پیوست: داده‌های مورد نیاز مصالح CFSSSWP برای مدل سازی دیوارهای برشی با پیکربندی‌های جدید.

| نمونه | | | | | | | | | مشخصه |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---|
| W-new9 | W-new8 | W-new7 | W-new6 | W-new5 | W-new4 | W-new3 | W-new2 | W-new1 | |
| ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ارتفاع دیوار (میلی متر) |
| ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | عرض دیوار (میلی متر) |
| ۳۸۲/۰ | ۳۸۲/۰ | ۳۸۲/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | مقاومت نهایی اعضای قاب دیوار (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۳۱۳/۰ | ۳۱۳/۰ | ۳۱۳/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | مقاومت تسلیم اعضای قاب دیوار (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۱/۰۸ | ۱/۰۸ | ۱/۰۸ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ضخامت اعضای قاب دیوار* (میلی متر) [۲۵] |
| ۴۳۸/۰ | ۴۳۸/۰ | ۴۳۸/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | سطح مقطع اعضای قاب دیوار (میلی متر مربع) [۲۳] |
| ۳۸۳/۰ | ۳۸۳/۰ | ۳۸۳/۰ | ۳۷۹/۰ | ۳۷۹/۰ | ۳۷۹/۰ | ۳۷۹/۰ | ۳۷۹/۰ | ۳۷۹/۰ | مقاومت نهایی پوشش ورق فولادی (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۳۳۷/۰ | ۳۳۷/۰ | ۳۳۷/۰ | ۳۲۳/۰ | ۳۲۳/۰ | ۳۲۳/۰ | ۳۵۲/۰ | ۳۵۲/۰ | ۳۵۲/۰ | مقاومت تسلیم پوشش ورق فولادی (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۰/۷۳ | ۰/۷۳ | ۰/۷۳ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۴۸ | ۰/۴۸ | ۰/۴۸ | ضخامت صفحه‌ی پوشش فولادی (میلی متر) [۲۵] |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | تعداد صفحه‌ی پوشش فولادی (یک یا دو طرف قاب) |
| ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | قطر پیچ‌ها** (میلی متر) [۲۴] |
| ۳۰۷۲/۴۶ | ۳۰۷۲/۴۶ | ۳۰۷۲/۴۶ | ۲۷۸۹/۴۷ | ۲۷۸۹/۴۷ | ۲۷۸۹/۴۷ | ۱۸۵۹/۶۵ | ۱۸۵۹/۶۵ | ۱۸۵۹/۶۵ | مقاومت برشی پیچ‌ها (نیوتن) [۲۴] |
| ۵۰/۰ | ۷۵/۰ | ۱۰۰/۰ | ۵۰/۰ | ۷۵/۰ | ۱۰۰/۰ | ۵۰/۰ | ۷۵/۰ | ۱۰۰/۰ | فاصله پیچ‌ها در محیط پیرامونی قاب (میلی متر مربع) |
| ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | قطر بولت‌های مهار سیستم پایه نگهدارنده (میلی متر) [۸] |
| ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | مساحت کل بازشوها (میلی متر مربع) |
| ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | طول تجمعی بازشوها (میلی متر) |
| W-new18 | W-new17 | W-new16 | W-new15 | W-new14 | W-new13 | W-new12 | W-new11 | W-new10 | |
| ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ۲۴۴۰/۰ | ارتفاع دیوار (میلی متر) |
| ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | ۱۲۲۰/۰ | عرض دیوار (میلی متر) |
| ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۳۸۲/۰ | ۳۸۲/۰ | ۳۸۲/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | ۵۳۸/۰ | مقاومت نهایی اعضای قاب دیوار (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۳۱۳/۰ | ۳۱۳/۰ | ۳۱۳/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | ۴۰۶/۰ | مقاومت تسلیم اعضای قاب دیوار (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۰۸ | ۱/۰۸ | ۱/۰۸ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ۱/۳۶ | ضخامت اعضای قاب دیوار* (میلی متر) [۲۵] |
| ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۴۳۸/۰ | ۴۳۸/۰ | ۴۳۸/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | ۵۴۴/۰ | سطح مقطع اعضای قاب دیوار (میلی متر مربع) [۲۳] |
| ۳۷۰/۰ | ۳۷۰/۰ | ۳۷۰/۰ | ۳۷۰/۰ | ۳۷۰/۰ | ۳۷۰/۰ | ۳۸۳/۰ | ۳۸۳/۰ | ۳۸۳/۰ | مقاومت نهایی پوشش ورق فولادی (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۳۲۵/۰ | ۳۲۵/۰ | ۳۲۵/۰ | ۳۲۵/۰ | ۳۲۵/۰ | ۳۲۵/۰ | ۳۳۷/۰ | ۳۳۷/۰ | ۳۳۷/۰ | مقاومت تسلیم پوشش ورق فولادی (مگاپاسکال) [۲۵] |
| ۰/۹۱ | ۰/۹۱ | ۰/۹۱ | ۰/۹۱ | ۰/۹۱ | ۰/۹۱ | ۰/۷۳ | ۰/۷۳ | ۰/۷۳ | ضخامت صفحه‌ی پوشش فولادی (میلی متر) [۲۵] |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | تعداد صفحه‌ی پوشش فولادی (یک یا دو طرف قاب) |
| ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | ۴/۸۳ | قطر پیچ‌ها** (میلی متر) [۲۴] |
| ۳۳۹۵/۸۸ | ۳۳۹۵/۸۸ | ۳۳۹۵/۸۸ | ۳۲۸۳/۹۹ | ۳۲۸۳/۹۹ | ۳۲۸۳/۹۹ | ۳۰۷۲/۴۶ | ۳۰۷۲/۴۶ | ۳۰۷۲/۴۶ | مقاومت برشی پیچ‌ها (نیوتن) [۲۴] |
| ۵۰/۰ | ۷۵/۰ | ۱۰۰/۰ | ۵۰/۰ | ۷۵/۰ | ۱۰۰/۰ | ۵۰/۰ | ۷۵/۰ | ۱۰۰/۰ | فاصله پیچ‌ها در محیط پیرامونی قاب (میلی متر مربع) |
| ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | ۲۲/۲۳ | قطر بولت‌های مهار سیستم پایه نگهدارنده (میلی متر) [۸] |
| ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | مساحت کل بازشوها (میلی متر مربع) |
| ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | طول تجمعی بازشوها (میلی متر) |

* متوسط ضخامت بدون روکش (اندازه گیری شده) استاد و ترک

** پیچ شماره ۱۰ (#۱۰)

Developed Model of Cold-Formed Steel Shear Walls Based on Its Physical and Mechanical Characteristics

Saman Yaghmaei-Sabegh^{1*} and Samaneh Nooraein²

1. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,
*Corresponding Author, email: s_yaghmaei@tabrizu.ac.ir
2. M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Research aim: Cold-formed steel (CFS) members form the main structure of lightweight steel frames (LSF). Structures made with these members, due to their lightweight compared to structures made with other building materials, can be considered as an appropriate solution to prevent and reduce earthquake vulnerability in seismic zones. On the other hand, geology evidence shows that due to the high density of active faults in Iran, this zone has a high seismic potential; as a result, it can be found that a large part of the country's population lives in the fault zone. In recent years, regarding the use of lightweight steel structures, providing lateral bearing capacity as a challenging subject has led to various studies in this field. These studies show that the study of the performance of CFS shear walls under near-fault field earthquakes is one of the subjects that has less addressed. In the present paper, the lateral performance of CFS shear walls with flat steel sheet sheathing has been studied based on non-linear dynamic analysis in the near-fault field.

Research methodology: Whereas today, the use of modeling software in the field of lightweight steel structures consider an appropriate alternative to some time-consuming and costly studies with experimental tests. In this research, the OpenSees finite element software has been used for studies. Considering that previous studies in the field of CFS shear walls more focus on static loading (monotonic and cyclic); first, with the help of two presented numerical models, the existing models have been developed for the appropriate prediction of CFS shear wall responses under non-linear dynamic loading. It should be noted that in this research, the use of OpenSees has been preferred over other software for two main reasons: 1) Considering that CFS shear walls with steel sheet sheathing due to the early onset of shear buckling in the sheathing, experience significant pinching of the strength versus displacement response; the presence of an extensive library of materials and elements in the OpenSees, makes it possible to study lateral performance of CFS shear walls with pinching effects without the need for subroutine coding; and 2) The high speed of the OpenSees in modeling and analysis, provides the possibility of numerous calculations and thus the study of the seismic performance of shear walls under multiple earthquakes. Also, considering that often the models presented in OpenSees for modeling CFS shear walls, contain data dependent to experimental tests; one of the most important features of the numerical model developed in this research is the reduce dependence from the conditions and results of experimental tests that provides the modeling of CSF shear walls with new configurations in a simpler way. It can be found that the improvement of numerical models that in defining their data is not so much required time-consuming and costly experimental tests, to study the performance of this type of lateral bearing systems is efficient. Due to this issue in the following, 18 specimens of single-storey CFS shear wall have been modeled with different configurations and have been analyzed and studied in the near-fault field under a set of no pulse-like and pulse-like earthquakes.

Findings: The results showed that the developed numerical model is able to predict CFS shear wall responses under non-linear dynamic loading and similar to previous studies, in order to appropriate predict the seismic performance of shear walls, it is necessary to consider more details in the numerical model. In order to better evaluating the performance of shear walls, the measurement of the used steels is necessary and a definite result only based on the nominal specifications cannot be reached. The spacing of the fasteners affects the response of the shear wall specimens and in addition, long spaces of fasteners, especially in pulse-like earthquakes, cause undesirable shear wall performance.

Keywords: Cold-Formed Steel Shear Wall, Flat Steel Sheet Sheathing, Non-Linear Dynamic Loading, Near-Fault Field, Numerical Model.