

Effect of Corrugated Steel Sheets on the Performance of Composite Shear Wall with Openings

Hadi Drijani¹, Hamzeh Dehghani^{2*}

1- Master of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Higher education complex of Bam, Bam, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Higher education complex of Bam, Bam, Iran

ABSTRACT

Corrugated steel plate composite shear walls are among the modern systems for strengthening and load-bearing in structures, combining concrete and steel to enhance seismic performance and increase resistance against lateral loads. This study investigates the impact of various parameters on the performance of corrugated steel plate composite shear walls with openings. For this purpose, an experimental composite shear wall with corrugated steel plates is initially validated. Subsequently, sensitivity analysis is then performed on the dimensions and types of elements used in the analysis. 32 numerical models in three types are analyzed to examine the effects of geometric shape and size of the openings, thickness and orientation of the corrugated steel plates, and the magnitude of axial compressive load. To identify the optimal model, seismic parameters such as stiffness, strength, ductility, and energy absorption capacity are evaluated. The results reveal that utilizing corrugated steel plates with vertical corrugations and circular openings significantly enhances the stiffness, ultimate strength, and energy absorption capacity of the wall. Furthermore, a relative increase in axial compressive load up to a certain limit improves these parameters. However, the highest ductility was observed when the axial compressive load ratio was 0.2

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 April 2025

Revise Date: 19 July 2025

Accept Date: 20 August 2025

Keywords:

Corrugated steel plate
Composite shear wall
Energy absorption
Ultimate strength
Seismic performance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.515441.3696

*Corresponding author: Hamzeh Dehghani
Email address: hdehghani@bam.ac.ir

تأثیر ورق‌های فولادی موج‌دار بر عملکرد دیوار برشی مرکب دارای بازشو

هادی دریجانی^۱، حمزه دهقانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

چکیده

دیوارهای برشی مرکب دارای ورق فولادی موج‌دار، یکی از سیستم‌های نوین مقاوم‌سازی و باربری در سازه‌ها است که از ترکیب بتن و فولاد برای بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش مقاومت در برابر بارهای جانبی استفاده می‌کند. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد دیوارهای برشی مرکب دارای ورق فولادی موج‌دار همراه با بازشو مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب با ورق فولادی موج‌دار صحت‌سنجی شده است سپس تحلیل حساسیت بر روی ابعاد و نوع المان مورد استفاده در تحلیل، انجام شده است. در ادامه ۳۲ مدل عددی در سه نوع به بررسی پارامترهای شکل هندسی و درصد بازشو، ضخامت و جهت ورق فولادی موج‌دار و مقدار بار فشاری محوری می‌پردازند. برای انتخاب مدل بهینه، پارامترهای لرزه‌ای شامل سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، استفاده از ورق‌های فولادی موج‌دار با جهت موج قائم و بازشوه‌های دایره‌ای شکل، باعث افزایش قابل توجهی در سختی، مقاومت نهایی و توانایی جذب انرژی دیوار می‌شود. همچنین، افزایش نسبی بار فشاری محوری تا حد مشخصی، سبب بهبود این پارامترها می‌شود. با این حال، بیشترین میزان شکل‌پذیری در شرایطی مشاهده شد که نسبت بار فشاری محوری برابر با ۰/۲ باشد.

کلمات کلیدی: ورق فولادی موج‌دار . دیوار برشی مرکب . جذب انرژی . مقاومت نهایی . عملکرد لرزه ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.515441.3696					
10.22065/jsce.2025.515441.3696	۱۴۰۵/۰۱/۳۱	۱۴۰۴/۰۵/۲۹	۱۴۰۴/۰۵/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۲۸	۱۴۰۴/۰۱/۲۹
حمزه دهقانی			*نویسنده مسئول:		
hdeghani@bam.ac.ir			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی از ورق‌های فولادی که توسط تیر و ستون‌ها در بر گرفته شده، تشکیل شده‌اند و به‌عنوان عناصر مقاوم در برابر نیروهای جانبی ناشی از باد و زلزله در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از این نوع دیوار برشی در احداث ساختمان‌های جدید و نیز تقویت ساختمان‌های موجود، به ویژه در کشورهای مستعد زلزله، رشد چشم‌گیری داشته است. دیوارهای برشی فولادی از لحاظ سرعت اجرا، کیفیت، مقاومت و رفتار جایگزین مناسبی برای دیوارهای برشی بتنی مسلح محسوب می‌شوند. این سیستم در ناحیه رفتار غیرالاستیک، عملکرد بهتری در جذب انرژی نسبت به سیستم‌های مهاربندی دارد، همچنین بسیاری از خصوصیات عملکردی و اجرایی سیستم‌های بادبندی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز در این سیستم وجود دارد. به دلیل رفتار شکل‌پذیر فولاد و نیز تغییر شکل پلاستیک آن، استفاده وسیعی در سازه‌های فولادی می‌شود؛ علی‌رغم تمام مزیت‌ها، باید به این نکته توجه داشت که فولاد یک ماده‌ی آسیب‌پذیر در برابر آتش می‌باشد که حرارت بالا باعث کاهش سختی و مقاومت آن شده و در نتیجه منجر به شکست در برابر تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود [۱-۳]. در سال‌های اخیر، از انواع دیوارهای برشی مرکب به‌عنوان اصلی‌ترین عضو مقاوم در برابر نیروهای جانبی در مناطق لرزه‌خیز و در سازه‌های بلند، به طور گسترده استفاده شده است. این نوع از دیوارها ویژگی‌های مثبت دو ماده‌ی بتن و فولاد را با هم ترکیب کرده و جایگزین مناسبی برای دیوارهای بتن مسلح مرسوم به شمار می‌آیند. بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر، دو نوع دیوار برشی مرکب عبارتند از: دیوار برشی فولادی دارای پوشش بتنی و دیوار برشی مسلح بتنی با عضوهای مرزی فولادی. نوع اول شامل صفحه‌های فولادی ترکیب شده با دیوارهای بتنی است که این دیوارها می‌توانند تک پوسته یا دو پوسته باشند. این نوع دیوارها ظرفیت تغییر شکل بالا، استهلاک انرژی زیاد و رفتاری شکل‌پذیر دارند. یکی از مشکلات اصلی در دیوارهای برشی فولادی، کم‌انرژی شدن صفحه جان دیوار می‌باشد؛ بنابراین استفاده از دیوارهای برشی مرکب مطرح شده است. نوع دوم، شامل دیوار بتنی مسلح تقویت شده با اعضای مرزی فولادی یا اصطلاحاً ستون‌های فولادی می‌باشد. در زمینه مهندسی سازه، اطمینان از پایداری و عملکرد ساختمان‌ها در مناطق لرزه‌خیز، دغدغه اصلی است. دیوارهای برشی عناصر کلیدی در تأمین پایداری جانبی و مقاومت سازه‌ها در برابر نیروهای زلزله هستند. دیوارهای برشی مرکب که تلفیقی از فولاد و بتن هستند، به دلیل مقاومت و شکل‌پذیری بالاتر نسبت به دیوارهای بتن آرمه سنتی، به عنوان راه‌حلی امیدوارکننده مطرح شده‌اند. محققانی تمرکز پژوهش‌های خود را بر روی رفتار دیوار برشی قرار دادند و تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی در این خصوص انجام داده‌اند [۴-۶]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، مودهای خرابی و پارامترهای کلیدی دیوار برشی فولادی موجدار را بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مودهای خرابی، کم‌انرژی و ظرفیت نهایی ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش ضخامت ورق موجدار، دیوار برشی فولادی موجدار سه مود خرابی شامل کم‌انرژی در ورق موجدار، خرابی در تیر و خرابی در ستون از خود نشان داد. همچنین، مشخص شد که این دیوارها پیش از وقوع کم‌انرژی ورق به حد تسلیم رسیده‌اند و افزایش عمق موج موجب بهبود سختی اولیه و مقاومت نهایی شده است [۷]. شون و همکاران در سال ۲۰۱۷، رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. به‌منظور بررسی رفتار سیستم از بارگذاری رفت و برگشتی استفاده شد. در این تحقیق، یک مدل دیوار برشی فولادی ساده و دو مدل دیوار برشی فولادی موجدار افقی و قائم مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت نهایی دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای ۱/۷ تا ۱/۹ برابر قاب خمشی تنها بود و در اثر ایجاد مفاصل پلاستیک در ورق فولادی موجدار، جذب انرژی نیز در مقایسه با قاب خمشی معمولی ۲/۱ برابر افزایش یافته است [۸]. پنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ یک روش طراحی برای دیوار برشی فولادی موجدار تحت اثر حرکت زمین لرزه ارائه دادند. در این پژوهش با در نظر گرفتن یک ساختمان اداری ۶ طبقه به‌عنوان نمونه، بر مبنای تئوری طراحی مقاومت برشی اعضای فولادی، یک روش طراحی برای دیوار برشی فولادی موجدار ارائه شد؛ که در آن راستای موج، انتخاب شکل موج، ضخامت ورق و مقاومت اتصالات و مفاصل در نظر گرفته شد. در این پژوهش سه نوع شکل هندسی موج سینوسی، دوزنقه‌ای و مستطیلی در روند طراحی مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به پژوهش‌های گذشته از ورق موجدار دوزنقه‌ای در روش طراحی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش طراحی ارائه شده کاربردی و مؤثر بوده است [۹]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب با ورق فولادی را بررسی کردند. در این پژوهش سه نمونه آزمایشگاهی با ورق فولادی صاف، ورق موجدار با جهت‌گیری افقی و قائم مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج پژوهش، دیوارهای برشی مرکب موجدار نسبت به نمونه‌های با ورق فولادی صاف، از پیوند سطحی قوی‌تر و مهار موثرتر ترک‌ها، به ویژه ترک‌های مورب برخوردارند. تغییر شکل کمتر

ورق فولادی موجدار و پیوند بهتر آن با بتن، خطر پوسته شدن بتن را به طور قابل توجهی کاهش داد [۱۰]. حقی و همکارانش در سال ۲۰۲۰، عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور، تحلیل عددی انجام شد. ۳۲ تحلیل با متغیرهای مختلف از جمله نسبت ابعاد، نسبت بار محوری و طول المان مرزی، انجام شد. شانزده مدل تحت بار جانبی و شانزده مدل تحت بارهای محوری و جانبی قرار گرفتند. در این پژوهش، به منظور طراحی مدل‌ها، یک معادله ریاضی برای پیش‌بینی ظرفیت دیوارهای برشی مرکب بر اساس اصول مکانیک پیشنهاد شد [۱۱]. بای‌پور و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی و پیش‌بینی حداکثر ظرفیت برشی دیوارهای برشی مرکب از طریق تحلیل‌های المان محدود غیرخطی و روش سطح پاسخ پرداختند. در این مطالعه، ضخامت و مقاومت فشاری بتن، ضخامت ورق فولادی داخلی و تنش تسلیم آن به عنوان متغیرهای مورد بررسی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود، برای توسعه معادلات رگرسیون با استفاده از روش سطح پاسخ و رگرسیون خطی استفاده شد. این معادلات و نمودارها امکان پیش‌بینی ظرفیت برشی بر اساس مشخصات نمونه‌ها را فراهم آورد [۱۲]. کائو و همکاران در سال ۲۰۲۴ با مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی، رفتار هیستریزس دیوارهای برشی فولادی موجدار را تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های موجدار در مقایسه با ورق‌های صاف موجب افزایش چشمگیر در سختی اولیه، ظرفیت نهایی، و پایداری چرخه‌ای می‌شود. این دیوارها به دلیل عملکرد مطلوب در ناحیه پس‌کمانش، رفتار هیستریزس پایدار و انرژی جذب‌شده بیشتری از خود نشان دادند، که آن‌ها را برای کاربرد در مناطق با لرزه‌خیزی بالا بسیار مناسب می‌سازد [۱۳]. جیانگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی دو لایه با سخت کننده داخلی را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که سخت کننده داخلی باعث افزایش سختی اولیه، ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری دیوار می‌شود و همچنین تغییر شکل‌های غیرالاستیک را کاهش می‌دهد. این نتایج نشان داد که استفاده از سخت کننده داخلی، مخصوصاً در دیوارهای برشی مرکب با ورق‌های فولادی موجدار، می‌تواند عملکرد لرزه‌ای و دوام سازه را در مناطق زلزله‌خیز به طور قابل توجهی ارتقا دهد [۱۴]. در مطالعه‌ای دیگر، پاسالار و همکاران در سال ۲۰۲۴ اثر استفاده از سخت کننده‌های عمودی در دیوارهای فولادی موجدار را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش شامل آزمایش سه نمونه با سخت کننده‌های مختلف و همچنین مدلسازی عددی آن‌ها بود. یافته‌ها بیانگر آن بود که سخت کننده‌های عمودی نه تنها موجب افزایش شکل‌پذیری دیوار می‌شوند، بلکه عملکرد آن در جذب انرژی و مقاومت نهایی را نیز به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشند. همچنین، زاویه قرارگیری ورق موجدار (افقی یا عمودی) تأثیر بسزایی در الگوی توزیع کرنش و نوع مودهای خرابی دارد [۱۵]. فنگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ نیز در مطالعه‌ای نوآورانه، نوعی دیوار برشی مرکب جدید شامل ورق فولادی موجدار با سخت کننده عرضی و مقطع پرشده از بتن را بررسی کردند. این سیستم به‌عنوان جایگزینی سبک‌وزن و مقاوم برای دیوارهای برشی بتن‌آرمه سنتی پیشنهاد شد. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که چنین سیستمی می‌تواند سختی باقی‌مانده را تا ۲۵٪ و ظرفیت جذب انرژی را تا ۳۰٪ نسبت به دیوارهای مرسوم افزایش دهد. عملکرد لرزه‌ای این دیوارها به دلیل ترکیب مناسب فولاد شکل‌پذیر و بتن مقاوم، قابل توجه ارزیابی شد [۱۶].

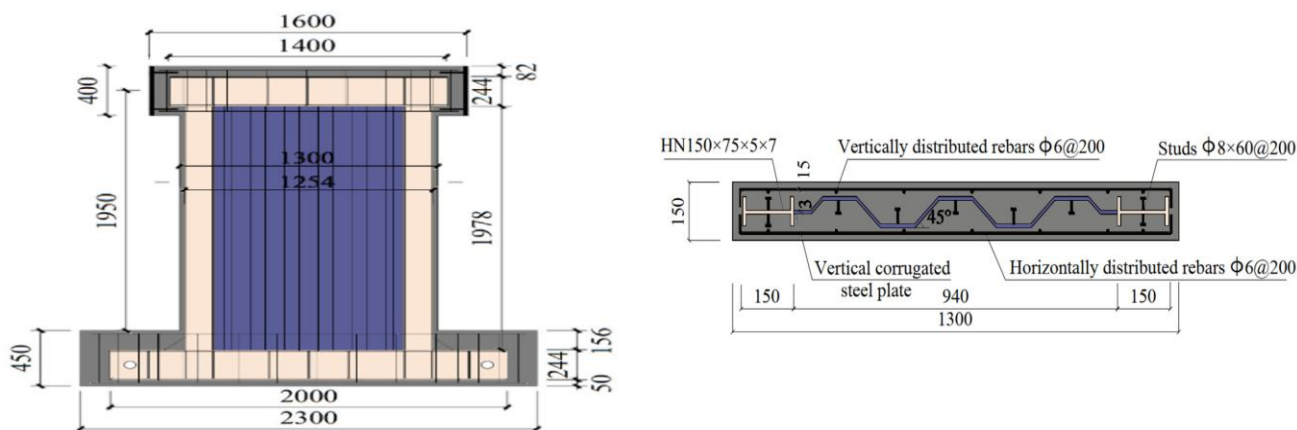
وجود پیشرفت‌های اخیر در طراحی دیوارهای برشی مرکب، چالش‌هایی همچون حضور بازشوها (به‌عنوان مؤلفه‌ای ضروری در طراحی معماری) می‌تواند منجر به تمرکز تنش، کاهش سختی جانبی و افت ظرفیت باربری گردد. از سوی دیگر، استفاده از ورق‌های فولادی موجدار به دلیل ویژگی‌هایی نظیر عملکرد پایدار در برابر کمانش، شکل‌پذیری بالا و افزایش نسبت استهلاک انرژی، به عنوان راهکاری کارآمد در تقویت عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی شناخته می‌شود. با وجود مزایای بالقوه، تأثیر خاص ورق‌های فولادی موجدار بر عملکرد دیوارهای برشی مرکب با بازشو تحت بارگذاری یکنواخت به طور کامل بررسی نشده است. این شکاف در دانش، چالش قابل توجهی را برای مهندسان به منظور بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها برای بهبود مقاومت لرزه‌ای ایجاد می‌کند. برای درک کامل رفتار دیوارهای برشی مرکب با بازشو، باید چندین عامل مهم مورد بررسی قرار گیرد. این عوامل شامل درصد و نوع بازشو هستند که می‌توانند توزیع تنش و مکانیزم‌های خرابی درون دیوار را به شدت تغییر دهند. علاوه بر این، ضخامت ورق‌های فولادی باید به دقت مورد توجه قرار گیرد، زیرا این پارامترها بر سختی کلی، مقاومت و شکل‌پذیری سیستم مرکب تأثیر می‌گذارند. این تحقیق از طریق شبیه‌سازی دقیق پیکربندی‌های مختلف دیوارهای برشی مرکب با بازشو و ورق‌های فولادی موجدار، به دنبال روشن کردن تعاملات پیچیده بین ورق‌های فولادی موجدار، بتن و بازشوها است. هدف نهایی این است که درک دقیقی از چگونگی تأثیرگذاری این متغیرها بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب به دست آید و بدین ترتیب، توصیه‌های عملی برای بهینه‌سازی طراحی آن‌ها و اطمینان از عملکردشان در کاربردهای واقعی ارائه شود. با بررسی عملکرد دقیق دیوارهای

برشی مرکب با ورق‌های فولادی موج‌دار تحت بارگذاری یکنواخت، این مطالعه داده‌های ارزشمندی را تولید می‌کند که می‌تواند در تدوین آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی آینده مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه، ساختار مقاله به تفکیک بخش‌ها ارائه می‌گردد. در بخش دوم، روش تحقیق شامل معرفی مدل آزمایشگاهی، صحت‌سنجی مدل عددی و تحلیل حساسیت ارائه شده است. در بخش سوم، تحلیل عددی مدل‌ها در شرایط مختلف و تأثیر پارامترهایی نظیر ضخامت ورق فولادی، جهت موج‌ها، ابعاد و نوع بازشو بر پارامترهای لرزه‌ای مانند سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی را بررسی شده است. در بخش چهارم، اثر میزان بار محوری فشاری اعمال شده بر عملکرد بهینه‌ترین مدل دیوار برشی مرکب دارای بازشو، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، در بخش پنجم نتایج حاصل جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی برای بهینه‌سازی طراحی دیوارهای برشی مرکب ارائه می‌گردد.

۲- صحت‌سنجی پاسخ‌های بدست آمده از اجزای محدود

۲-۱- معرفی نمونه آزمایشگاهی

برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل‌های عددی، نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب با ورق موج‌دار که توسط لو و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفته است، انتخاب شد. شکل ۱ مشخصات هندسی این نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این نمونه، برای تیر بتنی تحتانی از مقطعی مستطیل شکل به ابعاد ۳۵۰ در ۴۵۰ میلی‌متر و طول ۲۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. تیر بتنی فوقانی نیز مقطعی مستطیل شکل با ابعاد ۲۵۰ در ۴۰۰ میلی‌متر و طول ۱۶۰۰ میلی‌متر دارد. همچنین، تیرهای فولادی از پروفیل‌های $H244 \times 175 \times 7 \times 11$ ساخته شده‌اند. پانل بتنی دارای عرض ۱۳۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۱۹۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر است. درون این پانل، ستون‌های فولادی با مقطع $H150 \times 75 \times 5 \times 7$ و ورق‌های موج‌دار به طول ۹۴۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. اطراف دیوار برشی فولادی نیز با شبکه‌ای از آرماتور با فاصله محوری ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۶ میلی‌متر تقویت شده است. در این مطالعه، برای ساخت المان‌های فولادی از فولاد Q235 و برای المان‌های بتنی از بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال استفاده شده است.

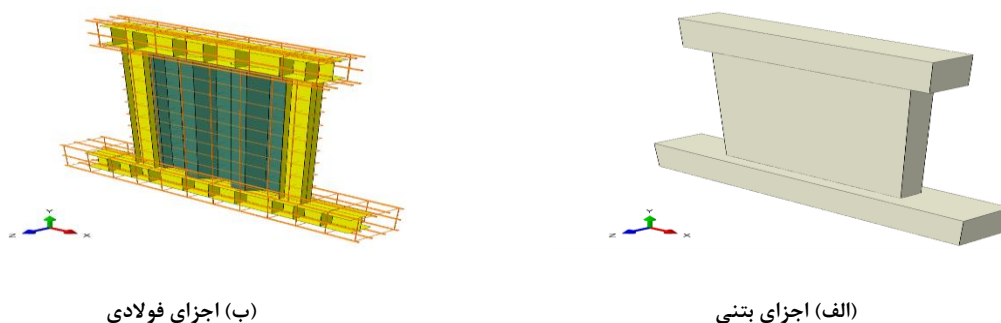


شکل ۱: مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی [۱۷].

۲-۲- مدل‌سازی در نرم افزار

برای مدل‌سازی دیوار برشی مرکب با ورق فولادی موج‌دار از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس [۱۸] استفاده شد. در گام نخست تمامی اجزای تشکیل دهنده دیوار به صورت جداگانه مدل شدند و سپس سازه مونتاژ شد که در شکل ۲ مدل عددی دیوار برشی مرکب قابل مشاهده

است. در این شبیه‌سازی، برای اجزای بتنی از المان حجمی^۱، برای المان‌های فولادی مدفون در بتن شامل تیر، ستون و ورق موجدار از المان پوسته‌ای^۲ و در نهایت برای مدل‌سازی گل‌میخ‌ها و میلگردها از المان میله‌ای^۳ استفاده شد.



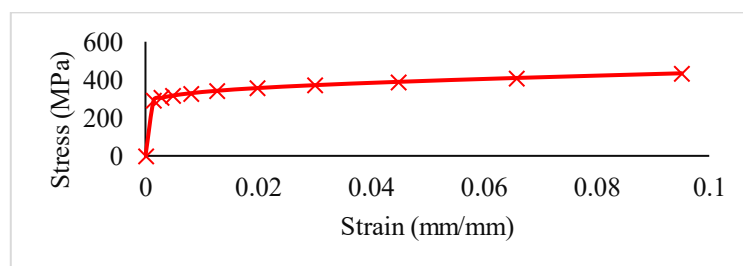
(ب) اجزای فولادی

(الف) اجزای بتنی

شکل ۲: مدل عددی دیوار برشی مرکب.

۲-۳- مشخصات مصالح

یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر همگرایی نتایج مدل‌سازی عددی، مشخصات دقیق مصالح به کار رفته در مدل است. در این پژوهش، برای تعیین مشخصات مصالح فولادی در نرم‌افزار، از مدل ارائه شده توسط رمبرگ و اسگود استفاده شد (شکل ۳). این مدل قادر است رفتار غیرخطی مصالح فولادی، به ویژه در ناحیه پلاستیک، را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند [۱۹]. بر مبنای مشخصات ارائه شده در مقاله مرجع، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم فولاد به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۲۹۲ مگاپاسکال می‌باشد. برای معرفی مشخصات مصالح بتن در آباکوس از مدل خسارت پلاستیک بتن^۴ استفاده شد. مدل خسارت پلاستیک بتن در نرم‌افزار آباکوس ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار پیچیده بتن و سایر مصالح شبه‌شکننده در انواع سازه‌ها است. این مدل، بر پایه تئوری پیوستگی و با استفاده از مفاهیم پلاستیسیته، رفتار بتن تحت شرایط محصورشدگی کم (حدود ۴ تا ۵ برابر مقاومت فشاری تک‌محوره) را به دقت شبیه‌سازی می‌کند. ویژگی بارز این مدل، قابلیت در نظرگیری کاهش سختی الاستیک در اثر اعمال بارهای تکراری یا تغییرات دمایی شدید در هر دو حالت کششی و فشاری است. این مدل از قانون جریان غیرهمسانگرد همراه با آسیب ایزوتروپیک الاستیک استفاده می‌کند و برای تعریف تابع جریان از رابطه هایپربولیک دروکر-پراگر بهره می‌برد. در واقع، مدل خسارت پلاستیک بتن را می‌توان تعمیمی از معیار شکست دروکر-پراگر دانست. در این مدل رفتار بتن در فشار و کشش به صورت مستقل تعریف می‌شوند که برای معرفی رفتار فشاری بتن از مدل معرفی شده توسط پارک و پائولی [۲۰] استفاده شد. برای بررسی رفتار کششی بتن، از مدل پیشنهادی انجمن بین‌المللی بتن^۵ (fib) استفاده شد [۲۱]. شکل ۴ منحنی بتن در کشش و فشار معرفی شده در آباکوس را نشان داده است.



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش فولاد مصرفی.

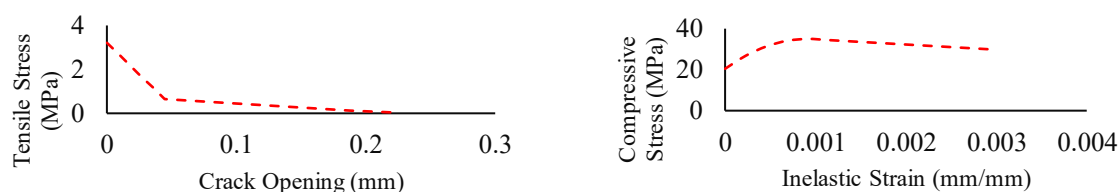
¹ Solid

² Shell

³ Wire

⁴ Concrete Damage Plasticity

⁵ The International Federation for Structural Concrete



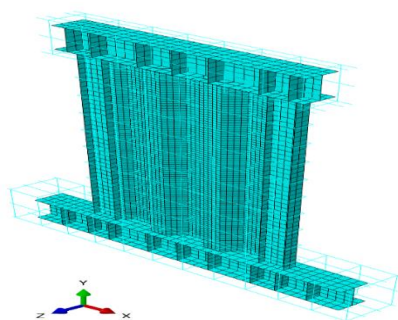
(ب) رفتار بتن در کشش

(الف) رفتار بتن در فشار

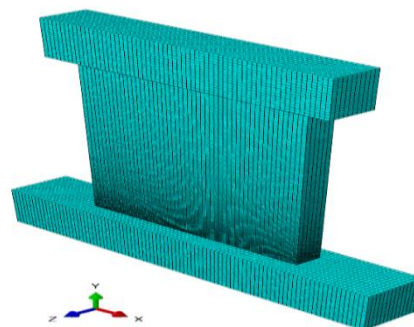
شکل ۴: منحنی بتن در کشش و فشار معرفی شده در نرم افزار.

۲-۴-مش بندی و تحلیل حساسیت

شکل ۵، مش بندی مدل عددی را نشان می دهد. در این مدل برای مش بندی منظم مدل، ابتدا المان‌ها بسته به نیاز پارتیشن بندی شدند و سپس در ادامه برای پانل و تیرهای بتنی از مش با المان ۸ گره‌ای با انتگرال گیری کاهش یافته (C3D8R) استفاده شد. برای اجزای پوسته‌ای شامل ورق فولادی موجدار، تیر و ستون فولادی از مش با المان ۴ گره‌ای با انتگرال گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شد. از آنجایی که میلگردها با المان خرابایی^۶ مدل سازی شدند برای مش بندی آنها از مش با المان ۲ گره‌ای (T3D2) استفاده شد. با تکرار و سعی و خطا اندازه مش برای دیوار بتنی ۲۵ میلی متر و در پایین دیوار ۵ میلی متر لحاظ شد. برای شبکه میلگردها از مش به اندازه ۱۰۰ میلی متر، برای قاب فولادی از مش به اندازه ۵۰ میلی متر و برای ورق فولادی موجدار از مش با اندازه ۲۵ میلی متر استفاده شد. به منظور مشخص کردن تعداد مش بهینه در اجزای دیوار برشی مرکب، تحلیل حساسیت مش انجام شد. برای این منظور پنج مدل با ابعاد مختلف پانل فولادی و بتنی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مطابق نمونه آزمایشگاهی، مدل‌ها تا جابجایی ۵۰ میلی متر تحت اثر بار یکنواخت قرار گرفتند و مقدار حداکثر تنش فون میسز به عنوان معیار همگرایی و تحلیل حساسیت مش مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۶ نمودار مقایسه‌ای این پنج مدل را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده است با کاهش اندازه مش، مقدار حداکثر تنش فون میسز به محدوده ۳۸۷/۵ مگاپاسکال رسیده است. از آنجایی که تعداد المان پانل فولادی و بتنی در اندازه مش ۱۵ و ۲۰ به مقدار قابل توجهی نسبت به اندازه مش ۲۵ میلی متر بیشتر شده است و همچنین زمان تحلیل مدل به شدت افزایش پیدا کرده است اما در مقابل مقدار حداکثر تنش فون میسز تغییر قابل توجهی نداشته است، از مش به اندازه تقریبی ۲۵ میلی متر در مدل استفاده شد.



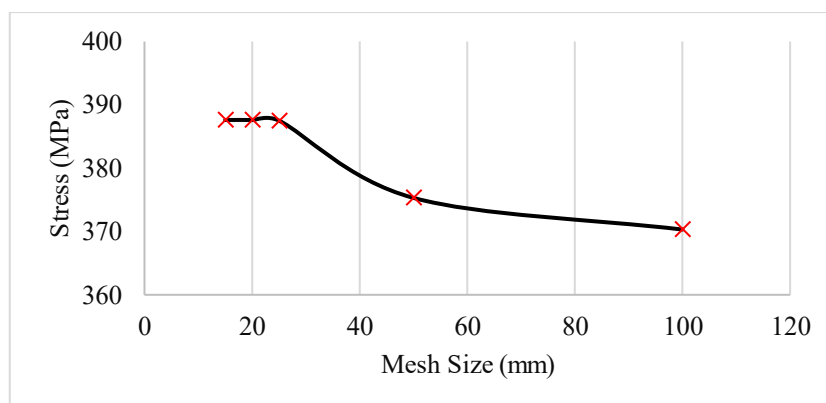
(ب) مش بندی اجزای فولادی



(الف) مش بندی اجزای بتنی

شکل ۵: مش بندی مدل عددی در نرم افزار.

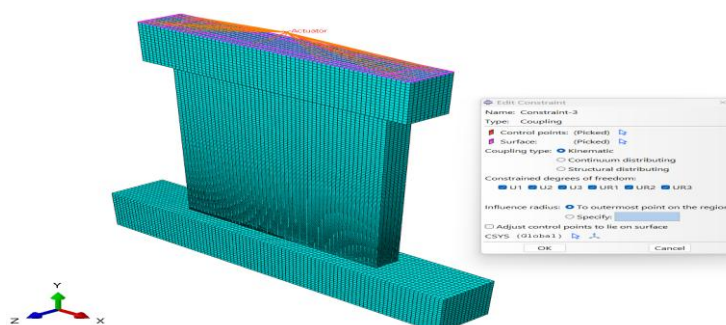
⁶ Truss



شکل ۶: مقایسه نتایج تحلیل حساسیت مش.

۲-۵- اندرکنش‌ها، شرایط مرزی و مشخصات حلگر

در مدل عددی برای اتصال ورق موجدار به تیر و ستون فولادی از قید تای^۷ استفاده شد. اتصال ورق فولادی موجدار به تیر و ستون فولادی با استفاده از قید هندسی نوع تای صورت گرفت. در این قید، سطح ورق به‌عنوان سطح تابع و سطوح تیر و ستون فولادی به‌عنوان سطح مرجع در نظر گرفته شدند. این نوع اتصال موجب انتقال کامل تنش و کرنش بین اجزای فولادی شده و معادل یک اتصال صلب در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای معرفی تماس بین اجزای فولادی شامل تیر و ستون فولادی و شبکه میلگردها با بتن، از قید نواحی مدفون^۸ استفاده شد. در این مدل‌سازی، اجزای فولادی به‌عنوان ناحیه مدفون و بتن به‌عنوان ناحیه میزبان در نظر گرفته شدند، به‌طوری‌که گره‌های المان‌های فولادی به گره‌های میزبان در بتن متصل شده و جابجایی آن‌ها به‌صورت کامل تابع رفتار بتن اطراف است. در نهایت برای اعمال بار به مدل عددی، سطح بالایی تیر به یک نقطه مرجع همانند شکل ۷ کوپل شد. برای شبیه‌سازی شرایط مرزی نمونه آزمایشگاهی، کف تیر بتنی پایین و دو سطح بالایی آن مقید شد. همچنین تیر بالایی در راستای عمود بر صفحه مقید شد. برای اعمال بار به مدل عددی، بار محوری به میزان ۵۰۰ کیلونیوتن ابتدا به مدل اعمال شد و سپس با حفظ این مقدار بار، بار جانبی به مدل اعمال می‌شود که بار محوری به صورت نیرو و بار جانبی به صورت جابجایی به مدل اعمال شده است (شکل ۸). با هدف انجام تحلیل سریع و دقیق از رفتار نمونه آزمایشگاهی در نرم‌افزار، از روش حل صریح با حلگر دینامیکی صریح^۹ استفاده شد. این روش به دلیل توانایی در مدل‌سازی پیچیدگی‌های ناشی از تماس بین اجزای فولادی و بتنی، انتخاب مناسبی برای این مطالعه بود.

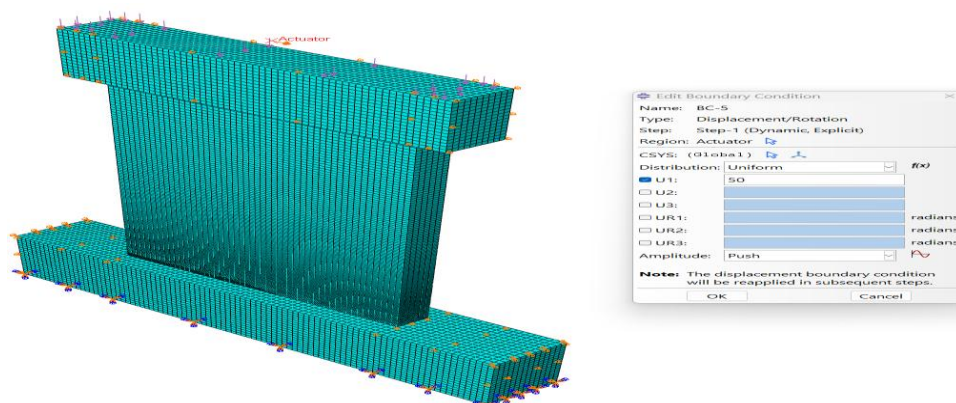


شکل ۷: معرفی قید کوپل برای اعمال بار به مدل عددی.

⁷ Tie

⁸ Embedded region

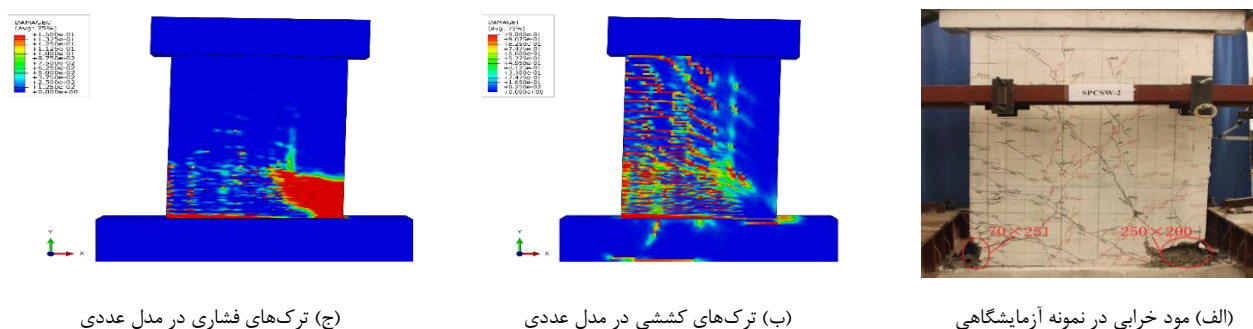
⁹ Dynamic Explicit



شکل ۸: معرفی شرایط مرزی و اعمال بار به مدل عددی.

۲-۶- مقایسه نتایج صحت سنجی

شکل ۹ مقایسه ترک‌های کششی و فشاری ایجاد شده در مدل عددی با مود گسیختگی نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. از آنجایی که نمونه آزمایشگاهی تحت بار چرخه‌ای بررسی شده است و مدل عددی صرفاً تحت بار مونوتونیک، ترک‌های کششی در مدل عددی در سمت چپ پانل بتنی توزیع شده است و در گوشه پایین سمت راست دیوار، همانند نمونه آزمایشگاهی بتن دچار آسیب شده است.



(ج) ترک‌های فشاری در مدل عددی

(ب) ترک‌های کششی در مدل عددی

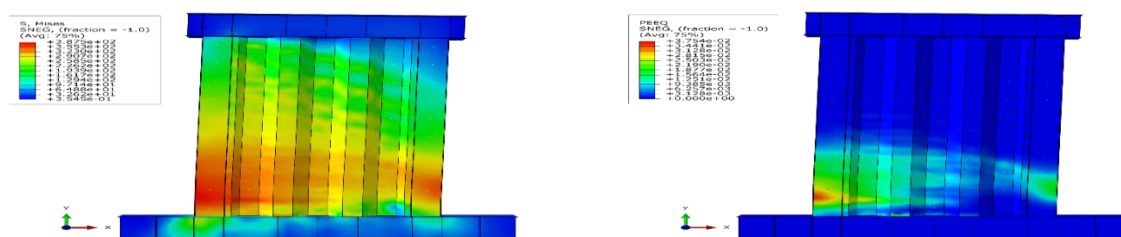
(الف) مود خرابی در نمونه آزمایشگاهی

شکل ۹: مقایسه توزیع ترک‌ها در مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی.

شکل ۱۰ توزیع کرنش و تنش را در پانل فولادی موجدار نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، حداکثر مقادیر کرنش و تنش در محل ایجاد ترک‌های کششی توزیع شده‌اند. در نهایت شکل ۱۱ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که مقاومت نهایی در نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب برابر با $732/9$ کیلونیوتن و 749 کیلونیوتن است. این نشان می‌دهد که نتایج مدل عددی حدود 2% با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد و در نتیجه مدل عددی به میزان قابل قبولی قادر به پیش‌بینی رفتار نمونه آزمایشگاهی است. افت ناگهانی نیرو در نمودار آزمایشگاهی پس از جابجایی حدود 35 میلی‌متر عمدتاً ناشی از آسیب موضعی بتن و پدیده پینچینگ^{۱۰} است. همچنین، با استفاده از روش پارک [۲۲]، منحنی‌های نیرو-ظرفیت ایده‌آل‌سازی شده و پارامترهایی نظیر نیروی تسلیم و نهایی، تغییر مکان‌های متناظر، سختی اولیه و جذب انرژی در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی محاسبه شده است (شکل ۱۱).

¹⁰ Pinching

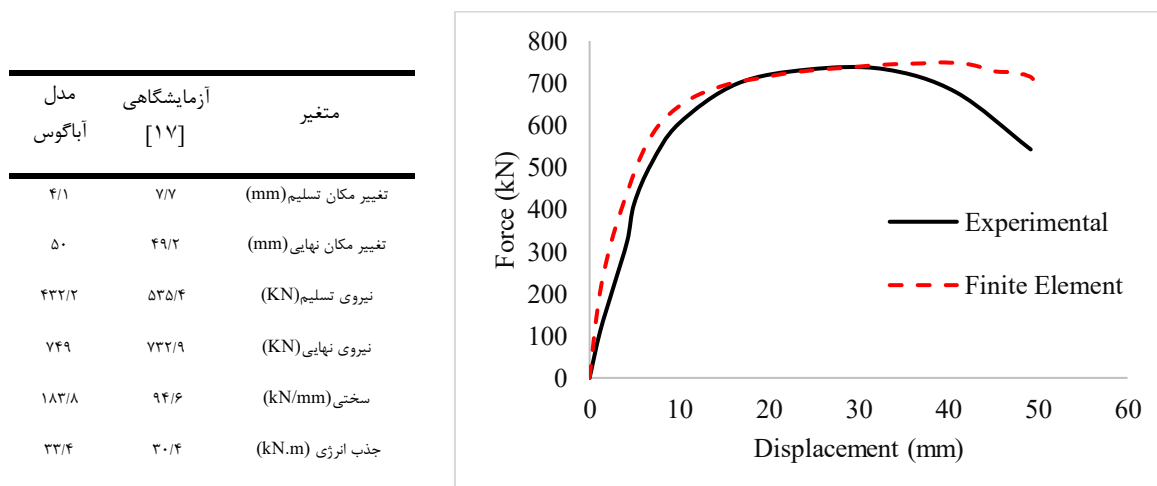
۳- نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها



(ب) توزیع تنش فون میسر

(الف) توزیع کرنش پلاستیک معادل

شکل ۱۰: توزیع کرنش و تنش در پانل فولادی موجدار.



شکل ۱۱: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی.

۳-۱ معرفی مدل‌ها

در این پژوهش با هدف بررسی تاثیر پارامترهای درصد بازشو، ضخامت و جهت ورق فولادی موجدار بر عملکرد لرزه‌ای سازه، ۲۴ مدل عددی در دو نوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل‌های اول پارامترهای ضخامت ورق فولادی موجدار (۳ میلی‌متر) ثابت در نظر گرفته شده است. در این مدل متغیرها شامل جهت گیری ورق موجدار (افقی یا قائم)، شکل هندسی بازشو (مستطیل یا دایره‌ای شکل) و درصد بازشو (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) می‌شود. در نامگذاری مدل‌های عددی، حرف اول (حرف V یا H) مخفف جهت موج قائم^{۱۱} یا افقی^{۱۲} است. دومین حرف (حرف R یا C) مخفف بازشو مستطیل^{۱۳} شکل یا دایره‌ای^{۱۴} شکل است. اعداد پس از حروف به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت ورق فولادی موجدار و درصد بازشو است. برای مثال در مدل VC3-10 از ورق فولادی موجدار به ضخامت ۳ میلی‌متر و با جهت موج قائم استفاده شده است؛ شکل هندسی و درصد بازشو در این مدل دایره‌ای شکل و به میزان ۱۰٪ است. در نوع دوم، مدل‌ها مشابه مدل‌های نوع اول است با این تفاوت که در این مدل‌ها ضخامت ورق فولادی موجدار از سه میلی‌متر به شش میلی‌متر تغییر پیدا کرده است.

¹¹ Vertical
¹² Horizontal
¹³ Rectangle
¹⁴ Circle

۳-۲ مدل های نوع اول

شکل های ۱۲ و ۱۳ توزیع ترک های کششی و فشاری، توزیع تنش فون میسز حداکثر و کرنش پلاستیک توزیع شده در اجزای فولادی در مدل های نوع اول به ترتیب دارای بازشو مستطیل شکل و دایره ای شکل را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده است، در هر دو نوع بازشو، در مدل های دارای ورق فولادی موجدار قائم، از آنجایی که سطح مقطع موجدار ورق به تیرها متصل شده است، ترک های کششی در تیر بتنی بالایی نیز گسترش یافته اند. همچنین با افزایش سطح بازشو، تمرکز تنش ها از پای دیوار (سمت چپ) کاسته شده است و به صورت قطری در گوشه های بازشو متمرکز شده اند. رفتار توزیع ترک های فشاری نیز مانند ترک های کششی است که با افزایش سطح بازشو، ترک ها به صورت قطری در محل بازشو متمرکز شده اند. همانطور که قابل مشاهده است در محلی که سطح مقطع موجدار ورق به المان های مرزی متصل شده است، تمرکز تنش بیشتر می باشد و همچنین با افزایش اعمال بار، تنش های حداکثر در محل ترک خوردگی بتن توزیع شده اند. در هر دو نوع بازشو، حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده در مدل های دارای ورق فولادی موجدار قائم نسبت به مدل های دارای ورق فولادی موجدار افقی بیشتر شده است. با تغییر شکل هندسی بازشو از مستطیل شکل به دایره ای شکل مقدار حداکثر کرنش های پلاستیک به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است به طوری که حداکثر کرنش پلاستیک مدل VC3-10 نسبت به مدل VR3-10 به میزان ۶۵٪ کمتر شده است. در این مدل ها، کمترین میزان کرنش پلاستیک مربوط به مدل HC3-10 (دیوار برشی مرکب دارای بازشو دایره ای شکل به میزان ۱۰٪ سطح کل و دارای ورق فولادی موجدار افقی به ضخامت ۳ میلی متر) است که مقدار آن برابر با ۰/۰۳ است و بیشترین مقدار برابر با ۰/۱۴ است که مربوط به مدل VR3-20 (دیوار برشی مرکب دارای بازشو مستطیل شکل به میزان ۲۰٪ سطح کل و دارای ورق فولادی موجدار قائم به ضخامت ۳ میلی متر) می باشد. شکل ۱۴ مقایسه منحنی ظرفیت مدل های نوع اول را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده است، در تمامی این مدل ها، مدل های دارای ورق فولادی موجدار از ظرفیت بیشتری نسبت به ورق های فولادی موجدار افقی برخوردار بوده اند و همچنین مقایسه نوع بازشوها نشان می دهد که بازشو دایره ای شکل عملکرد بهتری نسبت به بازشو مستطیل شکل داشته است. برای بررسی عملکرد لرزه ای مدل های عددی، منحنی های نیرو ظرفیت به روش پارک به منحنی دوخطی تبدیل شد و سایر مدل ها بر همین اساس دوخطی شدند. شکل ۱۵ مقایسه مقاومت، سختی الاستیک، جذب انرژی و شکل پذیری مدل های نوع اول را نشان می دهد. در مدل بدون بازشو، مقاومت نهایی برابر با ۷۴۹ کیلونیوتن است. مقایسه مدل های دارای بازشو شکل نشان می دهد که بیشترین مقدار مقاومت نهایی مربوط به مدل دارای بازشو دایره ای شکل است که مقدار آن برابر با ۵۷۷/۲ کیلونیوتن است و به میزان ۲۳٪ نسبت به مدل مبنا کاهش پیدا کرده است. کمترین میزان مقاومت نهایی مربوط به مدل دیوار برشی مرکب دارای بازشو مستطیل شکل به میزان ۳۰٪ و با ورق موجدار افقی (-HR3) (30) است که نسبت به مدل مبنا به میزان ۶۰٪ مقاومت نهایی آن کاهش پیدا کرده است. مقایسه مقاومت نهایی مدل های نوع اول نشان می دهد که مدل های دارای ورق فولادی موجدار قائم، مقاومت نهایی بیشتری نسبت به مدل های دارای ورق فولادی موجدار افقی دارند. همچنین بازشوهای دایره ای شکل از مقاومت نهایی بیشتری نسبت به مدل های مشابه با بازشو مستطیل شکل برخوردار هستند. در مدل بدون بازشو سختی الاستیک برابر با ۱۳۸/۸ کیلونیوتن بر میلی متر است. بررسی مدل های دارای بازشو نشان می دهد که با افزایش درصد بازشو، سختی الاستیک کاهش می یابد به طوری که در هر دو مدل بازشو با تغییر میزان بازشو از ۱۰ درصد به ۳۰ درصد، سختی الاستیک در مدل های دارای بازشو مستطیل شکل و دایره ای شکل به ترتیب به میزان ۵۳٪ و ۴۶٪ کمتر شده است. همچنین بررسی شکل هندسی بازشو نشان می دهد که با استفاده از بازشو دایره ای شکل، سختی الاستیک کمتر کاهش پیدا می کند به طوری که مقایسه مدل های VR3-10 و VC3-10 با مدل مبنا نشان می دهد که در شرایط یکسان استفاده از بازشو مستطیل شکل و دایره ای شکل به ترتیب منجر به کاهش ۲۴٪ و ۱۰٪ سختی الاستیک می شود. در حالت کلی بیشترین میزان سختی الاستیک در مدل های نوع اول مربوط به مدل VC3-10 است که مقدار آن برابر با ۱۶۶/۱ کیلونیوتن بر میلی متر مربع است. از آنجایی که در تمامی این مدل ها جابجایی نهایی برابر با ۵۰ میلی متر است، ضریب شکل پذیری به جابجایی متناظر با نقطه تسلیم سازه وابسته است و در واقع هرچه میزان ضریب شکل پذیری بیشتر باشد، نشان می دهد که سازه زودتر دچار تسلیم شده است و برای مقابله با نیروی جانبی از ظرفیت پلاستیک خود بهره برده است. در مدل مبنا (مدل بدن بازشو) ضریب شکل پذیری برابر با ۱۲/۳ است. به صورت کلی در تمامی مدل های نوع اول با افزایش ابعاد بازشو با هر شکل هندسی، ضریب شکل پذیری کاهش پیدا کرده است.

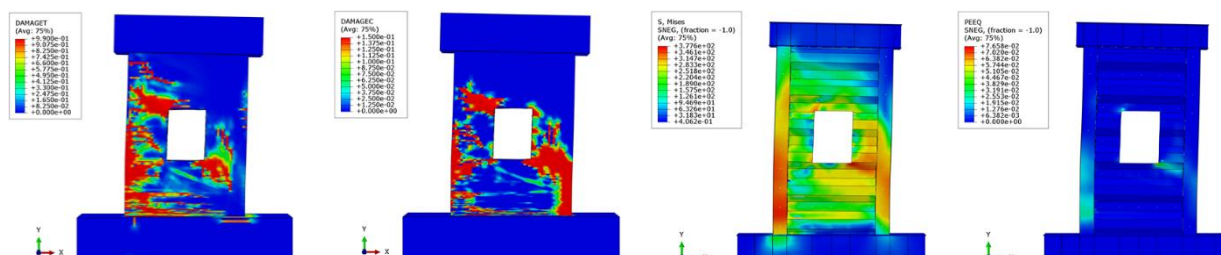
توزیع کرنش پلاستیک در مدل
های دارای باز شو مستطیل شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

توزیع تنش فون میسز در مدل
های دارای باز شو مستطیل شکل
با ضخامت ۳ میلی متر

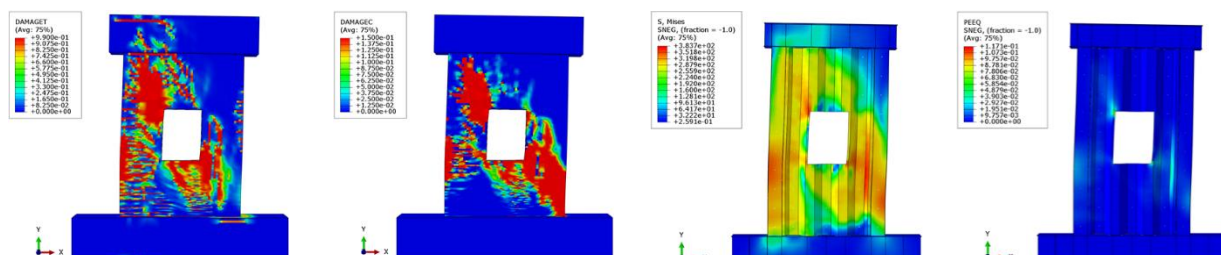
توزیع ترک‌های فشاری در مدل
های دارای باز شو مستطیل شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

توزیع ترک‌های کششی در مدل های
دارای باز شو مستطیل شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

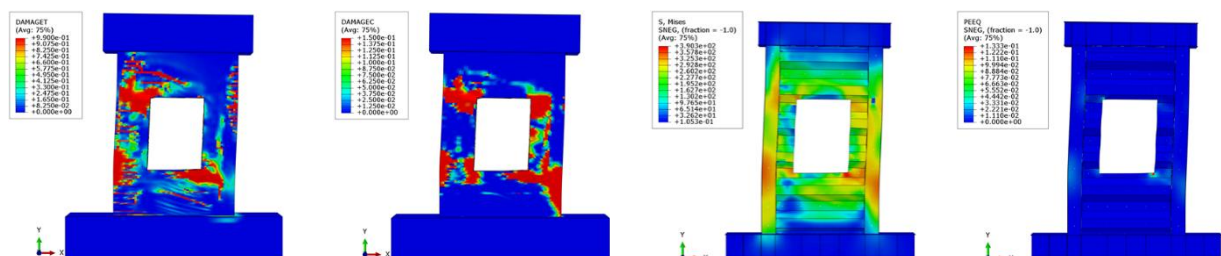
مدل HR3-10



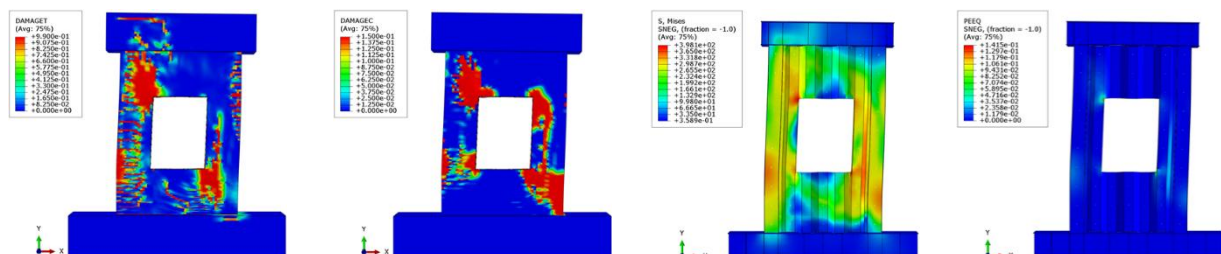
مدل VR3-10



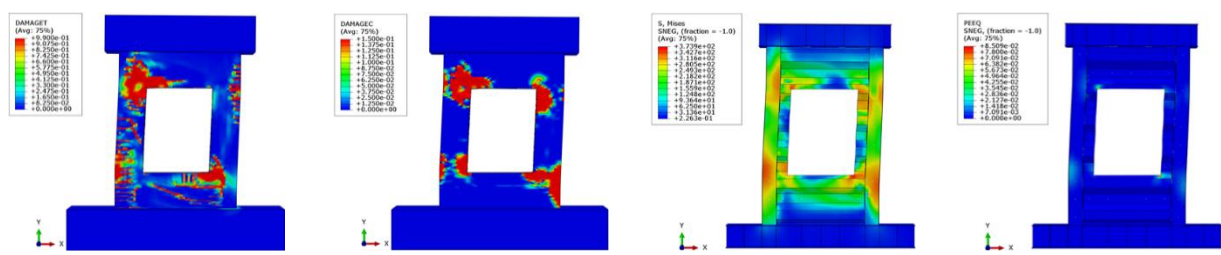
مدل HR3-20



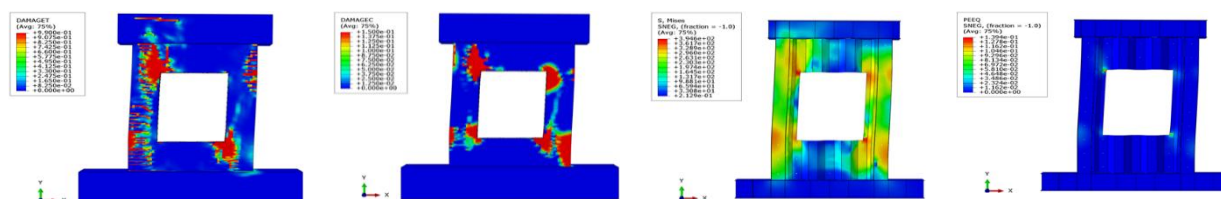
مدل VR3-20



مدل HR3-30



مدل VR3-30



شکل ۱۲: توزیع ترک‌های کششی و فشاری، توزیع تنش فون میسز حداکثر و کرنش پلاستیک توزیع شده در مدل‌های نوع اول دارای باز شو مستطیل شکل.

توزیع کرنش پلاستیک در مدل
های دارای باز شو دایره ای شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

توزیع تنش فون میسز در مدل
های دارای باز شو دایره ای شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

توزیع ترک‌های فشاری در مدل
های دارای باز شو دایره ای شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

توزیع ترک‌های کششی در مدل
های دارای باز شو دایره ای شکل با
ضخامت ۳ میلی متر

مدل HC3-10

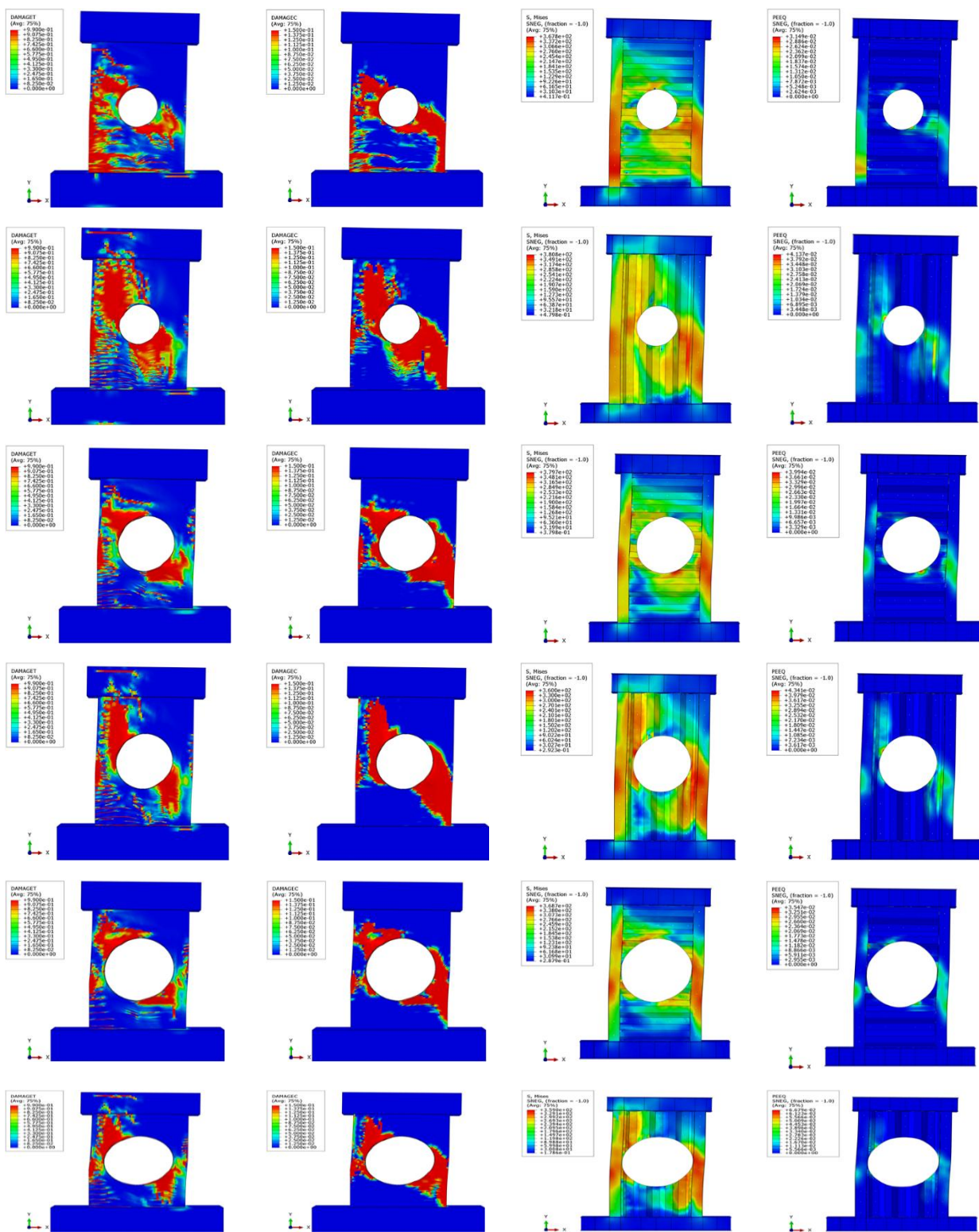
مدل VC3-10

مدل HC3-20

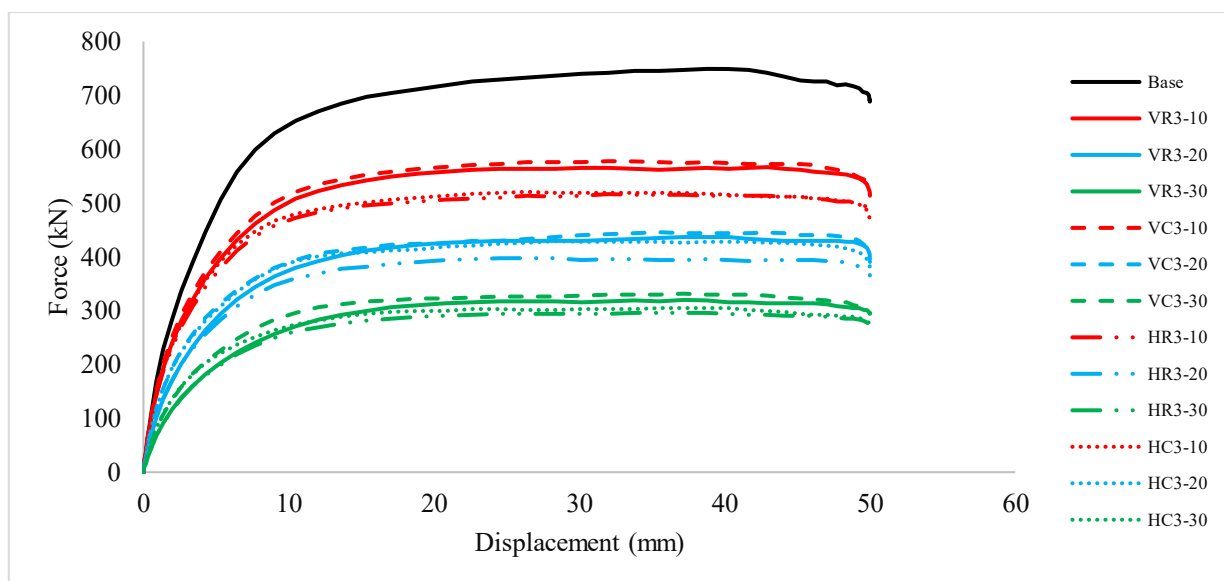
مدل VC3-20

مدل HC3-30

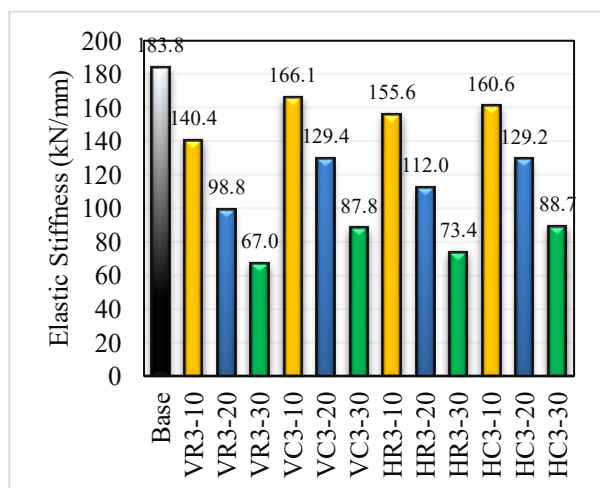
مدل VC3-30



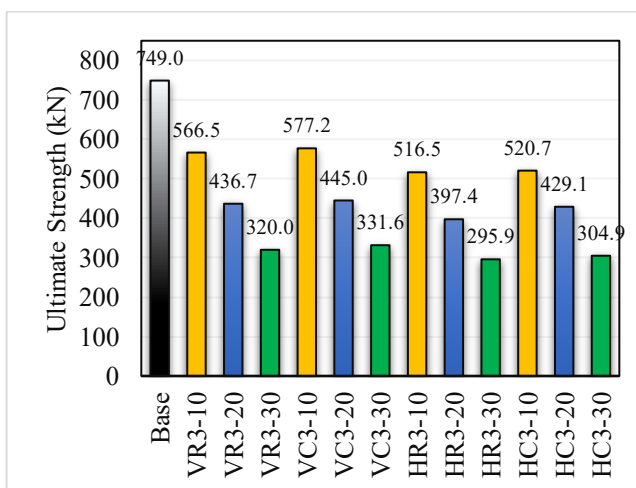
شکل ۱۳: توزیع ترک‌های کششی و فشاری، توزیع تنش فون میسز حداکثر و کرنش پلاستیک توزیع شده در مدل‌های نوع اول دارای باز شو دایره ای شکل.



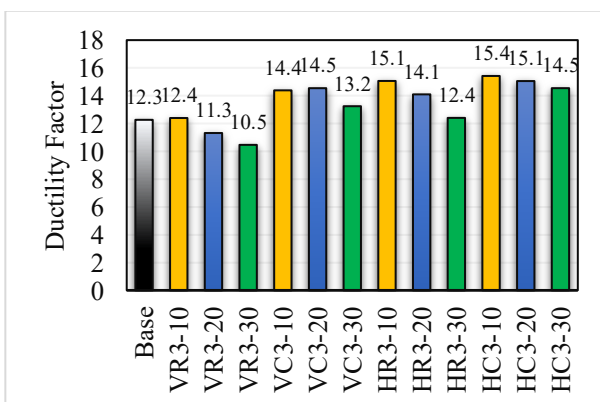
شکل ۱۴: مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های تیب اول



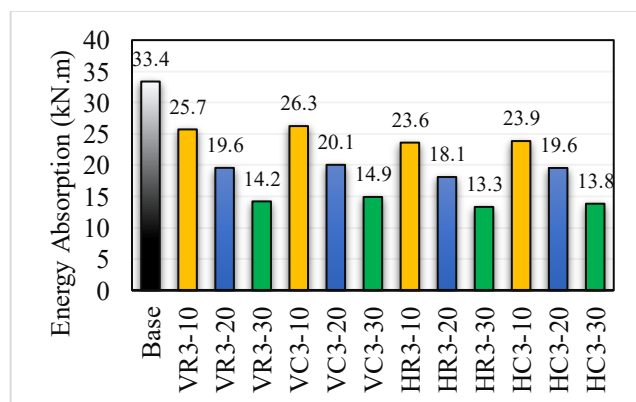
مقایسه سختی الاستیک مدل‌های نوع اول



مقایسه مقاومت نهایی مدل‌های نوع اول



مقایسه ضریب شکل‌پذیری مدل‌های نوع اول



مقایسه ظرفیت جذب انرژی مدل‌های نوع اول

شکل ۱۵: مقایسه مقاومت، سختی الاستیک، جذب انرژی و شکل‌پذیری مدل‌های نوع اول.

بر خلاف سختی الاستیک و مقاومت نهایی، مدل‌های دارای ورق فولادی موجدار افقی از ضریب شکل‌پذیری بالاتری برخوردار هستند به طوری که بیشترین میزان ضریب شکل‌پذیری مربوط به مدل عددی دیوار برشی مرکب دارای بازشو ۱۰٪ دایره‌ای شکل با ورق فولادی موجدار افقی (HC3-10) است که مقدار آن برابر با ۱۵/۴ است و نسبت به مدل مینا به میزان ۲۰٪ بیشتر شده است. در مدل مینا میزان جذب انرژی برابر با ۳۳/۴ کیلو نیوتن در متر است. در مدل‌های نوع اول، با افزایش ابعاد بازشوها میزان استهلاک انرژی کاهش پیدا کرده است. به طوری که به صورت میانگین در کل مدل‌ها با ایجاد بازشوها به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، ظرفیت جذب انرژی به ترتیب به میزان ۲۶٪، ۴۲٪ و ۵۸٪ کاهش پیدا کرده است. همچنین استفاده از ورق فولادی موجدار قائم با بازشو دایره‌ای شکل، نسبت به مدل مشابه با ورق فولادی موجدار افقی با بازشو مستطیل شکل باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود به طوری که ظرفیت جذب انرژی در مدل VC3-10 نسبت به مدل HR3-10 به میزان ۱۰٪ بیشتر شده است.

۳-۲ مدل‌های نوع دوم

مدل‌های نوع دوم مشابه نوع اول هستند با این تفاوت که در این مدل‌ها ضخامت ورق دو برابر شده است و مقدار آن برابر با ۶ میلی‌متر است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ توزیع ترک‌های کششی و فشاری را در مدل‌های نوع دوم نشان می‌دهد. در تمام مدل‌های نوع دوم همانند مدل‌های مشابه در نوع اول، زمانی که از ورق فولادی موجدار استفاده می‌شود، ترک‌ها تا تیر بتنی بالایی گسترش می‌یابند در حالی که در مدل‌های دارای ورق فولادی موجدار افقی، ترک‌ها بر روی پانل بتنی توزیع می‌شوند. با توجه به اینکه بار جانبی از سمت چپ به راست به مدل‌ها اعمال شده است، ترک‌های کششی در پای دیوار در سمت چپ توزیع شده‌اند و با افزایش ابعاد بازشو، از تمرکز این ترک‌ها کاسته شده و در اطراف بازشوها توزیع شده‌اند. در حالت کلی مقایسه توزیع ترک‌ها در هر دو نوع اول و دوم نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش ضخامت تغییری در نحوه ایجاد ترک‌های کششی و فشاری در بتن نداشته است و در هر دو نوع ترک‌ها تقریباً به شکل یکنواختی ایجاد شده‌اند. همانند ترک‌ها ایجاد شده در بتن در پانل فولادی نیز هنگامی که سطح مقطع ورق موجدار به تیرهای فولادی متصل است تنش‌های پلاستیک بیشتری به تیرها منتقل می‌شود. با افزایش ابعاد بازشوها تمرکز تنش روی لبه‌های بازشو و ستون‌ها بیشتر می‌شود. همانطور که قابل مشاهده است، در تمامی این مدل‌ها حداکثر کرنش پلاستیک در مدل‌های دارای بازشو مستطیل شکل نسبت به بازشو دایره‌ای شکل بیشتر شده است به طوری که مقدار حداکثر کرنش پلاستیک در مدل‌های VR6-30 و VC6-30 به ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۰۵۶ است. همچنین در این نوع در مدل‌های دارای ورق فولادی موجدار افقی، مقدار حداکثر کرنش پلاستیک نسبت به مدل‌های مشابه با ورق فولادی موجدار قائم کاهش پیدا کرده است به طوری که کرنش پلاستیک حداکثر در مدل HC6-30 برابر با ۰/۰۲۴ است و در حالی که مقدار حداکثر کرنش پلاستیک در مدل VC6-30 برابر با ۰/۰۵۶ است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دو برابر ضخامت ورق فولادی موجدار، مقدار حداکثر کرنش پلاستیک به صورت میانگین ۲۸٪ کمتر شده است. شکل ۱۸ مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های نوع دوم را نشان می‌دهد که در این مدل‌ها با افزایش ابعاد بازشو همانند مدل‌های نوع اول، سطح زیر منحنی کاهش پیدا کرده است و همچنین مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌ها نشان می‌دهد که در مدل‌های دارای ورق فولادی موجدار قائم، سطح زیر منحنی از مدل‌های مشابه با ورق فولادی موجدار افقی بیشتر است. شکل ۱۹ مقایسه مقاومت، سختی الاستیک، جذب انرژی و شکل‌پذیری مدل‌های نوع دوم را نشان می‌دهد. در این مدل‌ها، همانند مدل‌های نوع اول بیشترین میزان مقاومت نهایی مربوط به مدل VC6-10 است، که مقدار آن برابر با ۷۰۵/۱ کیلو نیوتن می‌باشد و نسبت به مدل مشابه در نوع اول (VR3-10) به میزان ۲۲٪ بیشتر شده است. در این مدل‌ها نیز همانند نوع اول بیشترین میزان مقاومت نهایی مربوط به مدل دارای ورق‌های فولادی موجدار قائم می‌باشد. در حالت بازشو مستطیل شکل به اندازه ۱۰٪ سطح کل دیوار، با تغییر جهت موج در ورق موجدار از قائم به افقی، مقاومت نهایی به میزان ۳۰٪ کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد به صورت میانگین در کل مدل‌ها مقاومت نهایی با افزایش ضخامت ورق از ۳ به ۶ میلی‌متر به میزان ۱۱٪ بیشتر شده است. بیشترین میزان سختی الاستیک مربوط به مدل VC6-10 است که مقدار آن برابر با ۱۷۴/۶ کیلو نیوتن بر میلی‌متر است و همچنین نسبت به مدل مشابه در نوع اول با افزایش دو برابری ضخامت ورق فولادی موجدار به میزان ۵٪ بیشتر شده است. در این مدل‌ها نیز مدل‌های دارای بازشو دایره‌ای شکل و نیز دارای ورق فولادی موجدار قائم از مقدار سختی الاستیک بیشتری برخوردار هستند.

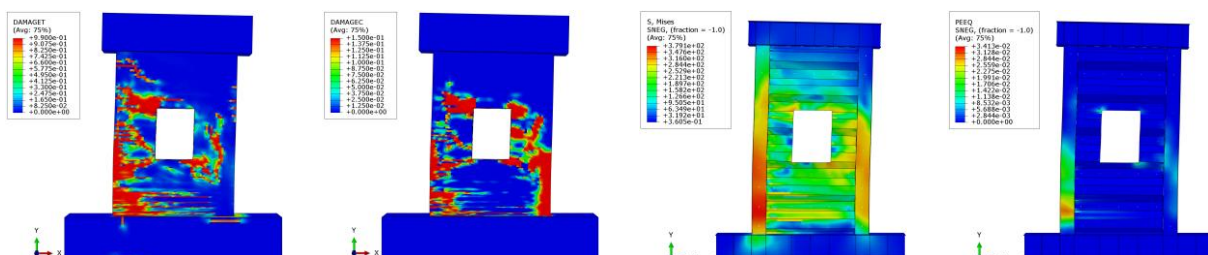
توزیع کرنش پلاستیک در مدل های دارای باز شو مستطیل شکل با ضخامت ۶ میلی متر

توزیع تنش فون میسز در مدل های دارای باز شو مستطیل شکل با ضخامت ۶ میلی متر

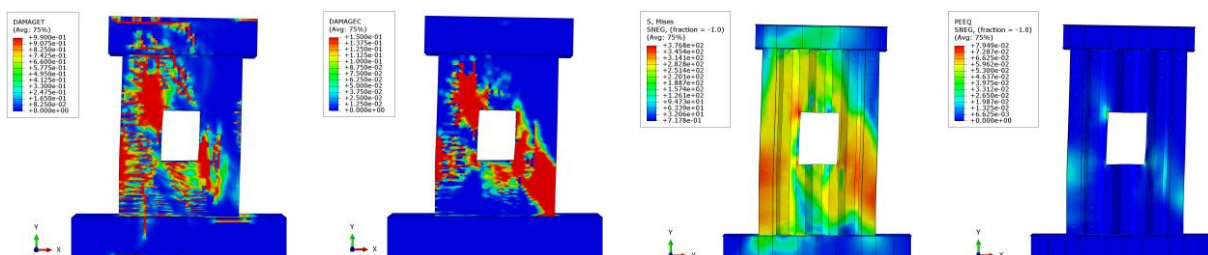
توزیع ترک های فشاری در مدل های دارای باز شو مستطیل شکل با ضخامت ۶ میلی متر

توزیع ترک های کششی در مدل های دارای باز شو مستطیل شکل با ضخامت ۶ میلی متر

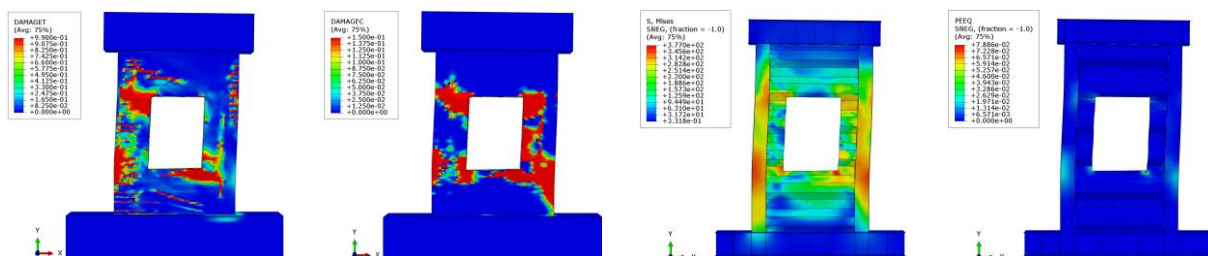
مدل HR6-10



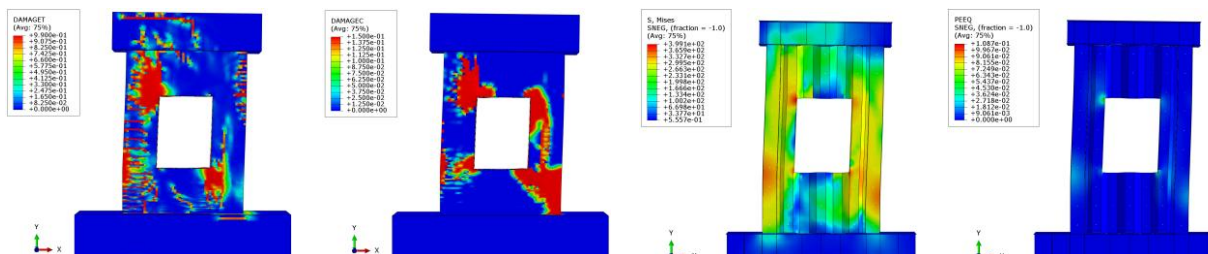
مدل VR6-10



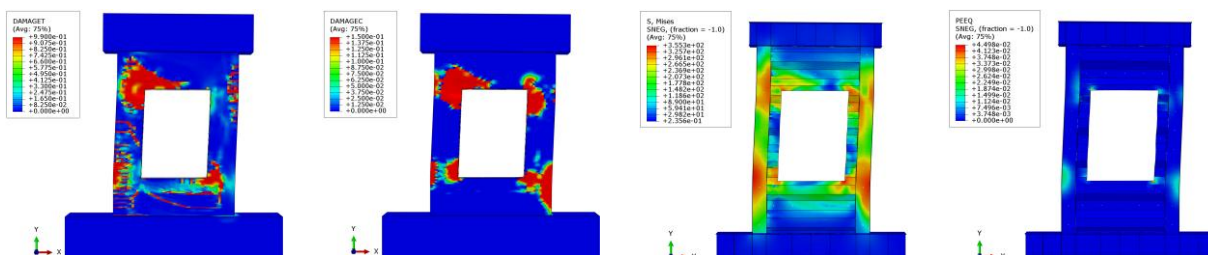
مدل HR6-20



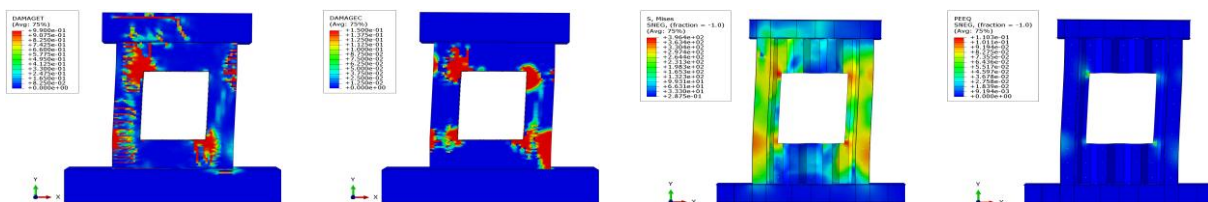
مدل VR6-20



مدل HR6-30



مدل VR6-30



شکل ۱۶: توزیع ترک های کششی و فشاری، توزیع تنش فون میسز حداکثر و کرنش پلاستیک توزیع شده در مدل های نوع دوم دارای باز شو مستطیل شکل.

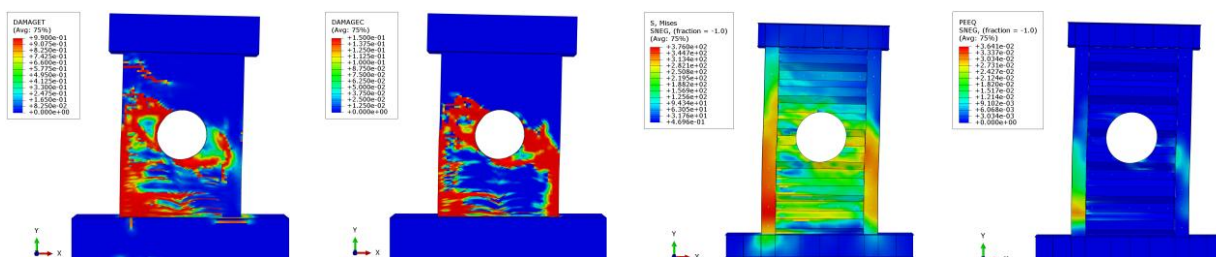
توزیع کرنش پلاستیک در مدل های دارای باز شو دایره ای شکل با ضخامت ۶ میلی متر

توزیع تنش فون میسز در مدل های دارای باز شو دایره ای شکل با ضخامت ۶ میلی متر

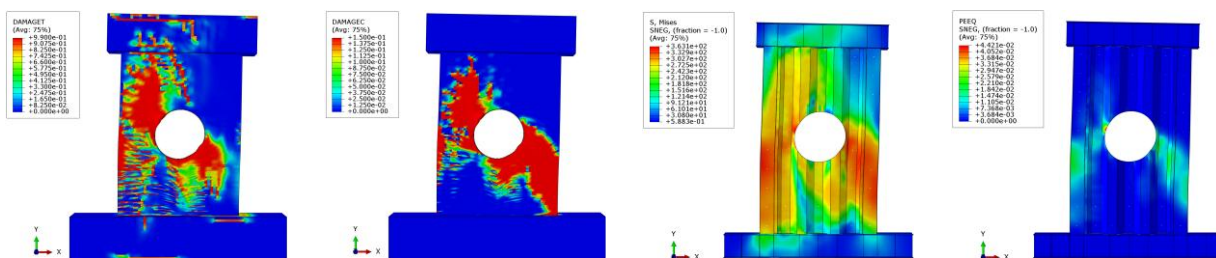
توزیع ترک های فشاری در مدل های دارای باز شو دایره ای شکل با ضخامت ۶ میلی متر

توزیع ترک های کششی در مدل های دارای باز شو دایره ای شکل با ضخامت ۶ میلی متر

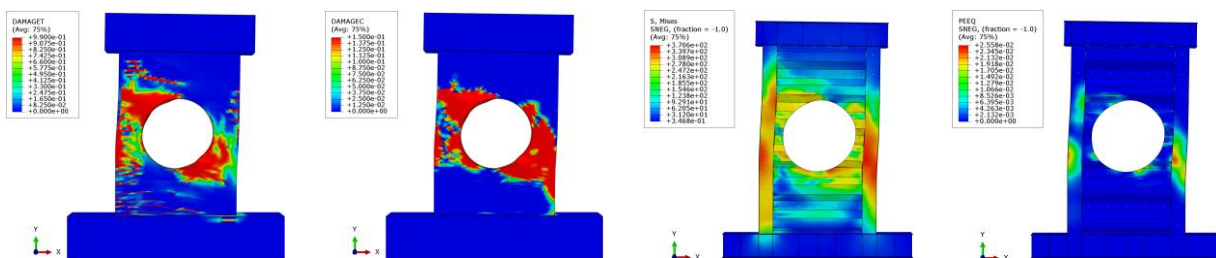
مدل HC6-10



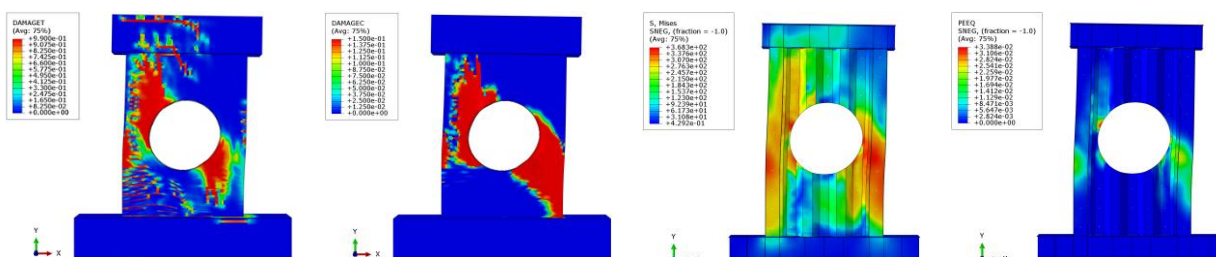
مدل VC6-10



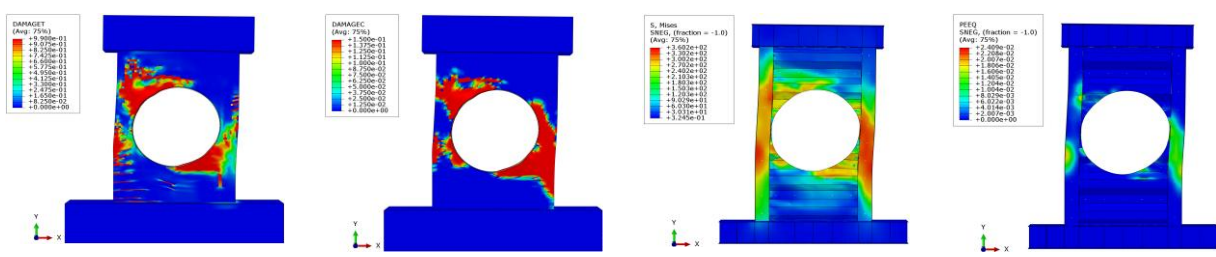
مدل HC6-20



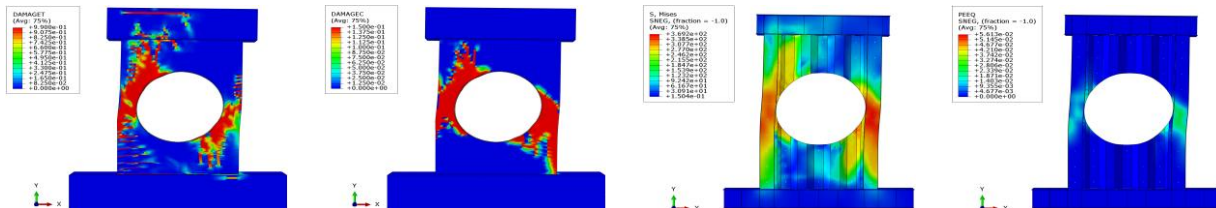
مدل VC6-20



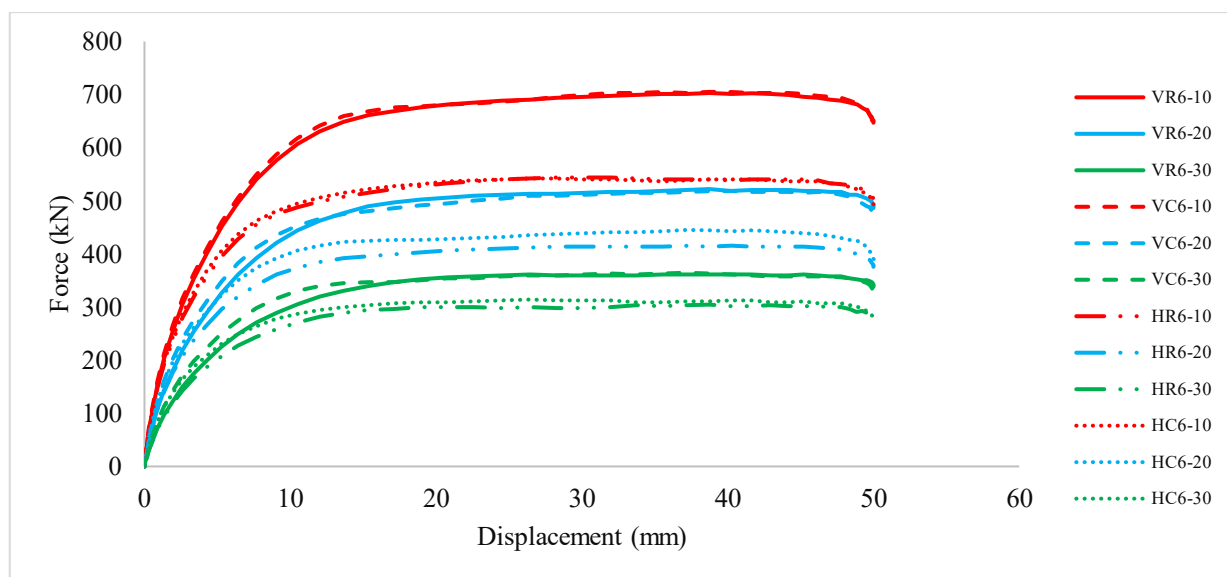
مدل HC6-30



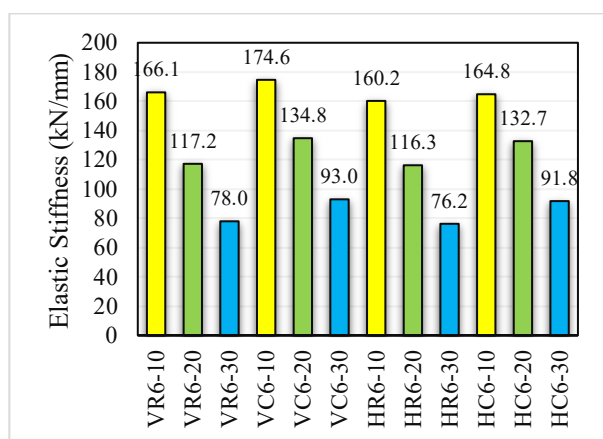
مدل VC6-30



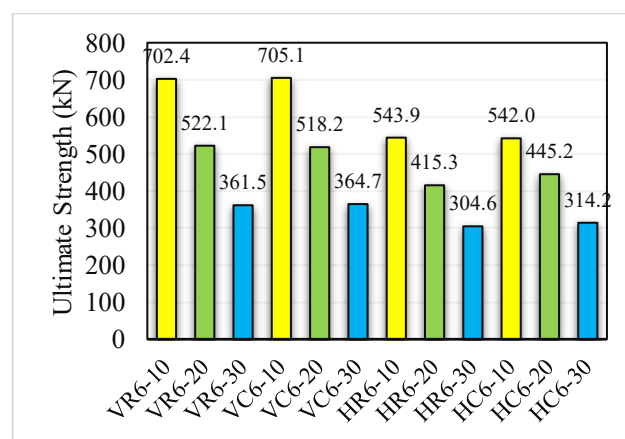
شکل ۱۷: توزیع ترک های کششی و فشاری، توزیع تنش فون میسز حداکثر و کرنش پلاستیک توزیع شده در مدل های نوع دوم دارای باز شو دایره ای شکل.



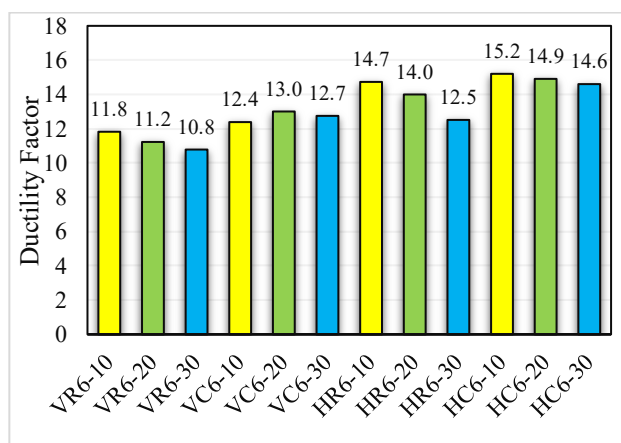
شکل ۱۸: مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های نوع دوم.



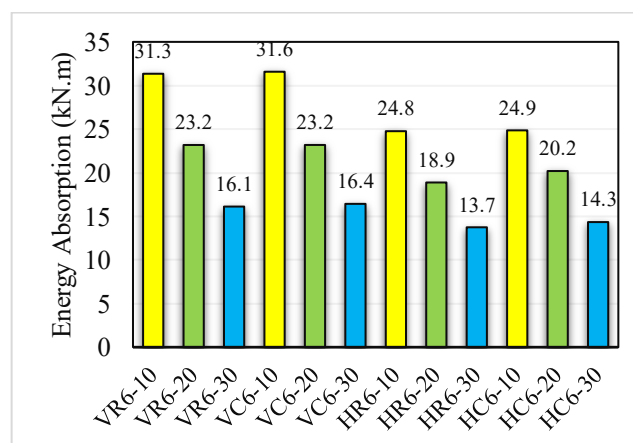
مقایسه سختی الاستیک مدل‌های نوع دوم



مقایسه مقاومت نهایی مدل‌های نوع دوم



مقایسه ضریب شکل‌پذیری مدل‌های نوع دوم



مقایسه ظرفیت جذب انرژی مدل‌های نوع دوم

شکل ۱۹: مقایسه مقاومت، سختی الاستیک، جذب انرژی و شکل‌پذیری مدل‌های نوع دوم.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دوبرابری ضخامت ورق فولادی موجدار، سختی الاستیک به طور میانگین به میزان ۷٪ بیشتر شده است. بیشترین میزان ضریب شکل‌پذیری مدل‌های نوع دوم مربوط به مدل HC6-10 است که مقدار آن برابر با ۱۵/۲ می‌باشد. مقایسه ضریب شکل‌پذیری مدل‌های نوع اول و دوم نشان می‌دهد که در نوع دوم مقدار حداکثر ضریب شکل‌پذیری ۱٪ نسبت به مدل مشابه در نوع اول کاهش پیدا کرده است. همانند مدل‌های نوع اول، ورق فولادی موجدار افقی باعث بهبود ضریب شکل‌پذیری شده است به طوری که مقایسه مدل‌های VC6-10 و HC6-10 نشان می‌دهد که در شرایط یکسان با تغییر جهت موج، ضریب شکل‌پذیری ۱۸٪ بیشتر شده است. نتایج نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، به صورت کلی افزایش ضخامت ورق فولادی تاثیر قابل توجهی بر ضریب شکل‌پذیری نداشته است. به صورت میانگین ضریب شکل‌پذیری مدل‌های نوع اول و دوم به ترتیب برابر با ۱۳/۶ و ۱۳/۲ است. در این مدل‌ها بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به مدل VC6-10 است که مقدار آن برابر با ۳۱/۶ کیلو نیوتن در متر می‌باشد و نسبت به مدل مشابه در نوع اول، ۲۰٪ بیشتر شده است. در این مدل‌ها باز شو دایره‌ای شکل و همچنین استفاده از ورق‌های فولادی موجدار قائم سبب بهبود ظرفیت جذب انرژی می‌شود به طوری که مقایسه مدل VC6-10 با مدل HR6-10 نشان می‌دهد که با استفاده از باز شو دایره‌ای شکل و ورق فولادی موجدار قائم، ظرفیت جذب انرژی نسبت به مدل دارای باز شو مستطیل شکل و ورق فولادی موجدار افقی، ۲۷٪ بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که به طور میانگین ظرفیت جذب انرژی مدل‌های نوع اول و دوم به ترتیب برابر با ۱۹/۴ و ۲۱/۵ کیلو نیوتن در متر است که با دو برابر شدن ضخامت ورق فولادی موجدار، جذب انرژی به میزان ۱۱٪ بیشتر شده است. اما تاثیر افزایش ضخامت ورق فولادی موجدار در مدل‌های دارای ورق موجدار قائم بیشتر از ورق موجدار افقی است.

بررسی نتایج مدل‌های نوع اول و دوم نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق فولادی موجدار از ۳ به ۶ میلی‌متر، تأثیر قابل توجهی بر بهبود برخی شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای داشته است. در مدل‌های تیپ دوم، افزایش ضخامت باعث کاهش تمرکز کرنش پلاستیک، افزایش مقاومت نهایی، سختی اولیه و ظرفیت جذب انرژی شده، اگرچه اثر آن بر ضریب شکل‌پذیری نسبتاً محدود بوده است. مقایسه دو راستای موجدار (قائم و افقی) نشان می‌دهد که ورق‌های موجدار در راستای قائم عملکرد سازه‌ای بهتری از خود نشان داده‌اند. در این حالت، توزیع تنش و جذب انرژی بهینه‌تر بوده و تمرکز نیروها در نواحی بحرانی بهتر کنترل شده است. در مقابل، ورق‌های موجدار افقی گرچه باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شوند، اما با کاهش مقاومت نهایی و ظرفیت جذب انرژی همراه بوده‌اند. از سوی دیگر، هندسه باز شو نقش کلیدی در پاسخ سازه داشته است. باز شوهای دایره‌ای شکل به دلیل تمرکز تنش یکنواخت‌تر و حذف گوشه‌های تیز، در اغلب شاخص‌ها عملکرد بهتری نسبت به باز شوهای مستطیلی نشان داده‌اند. کاهش کرنش‌های پلاستیک، افت کمتر در سختی و انرژی، و رفتار پایدارتر در مدل‌های دارای باز شو دایره‌ای گواهی بر این موضوع است.

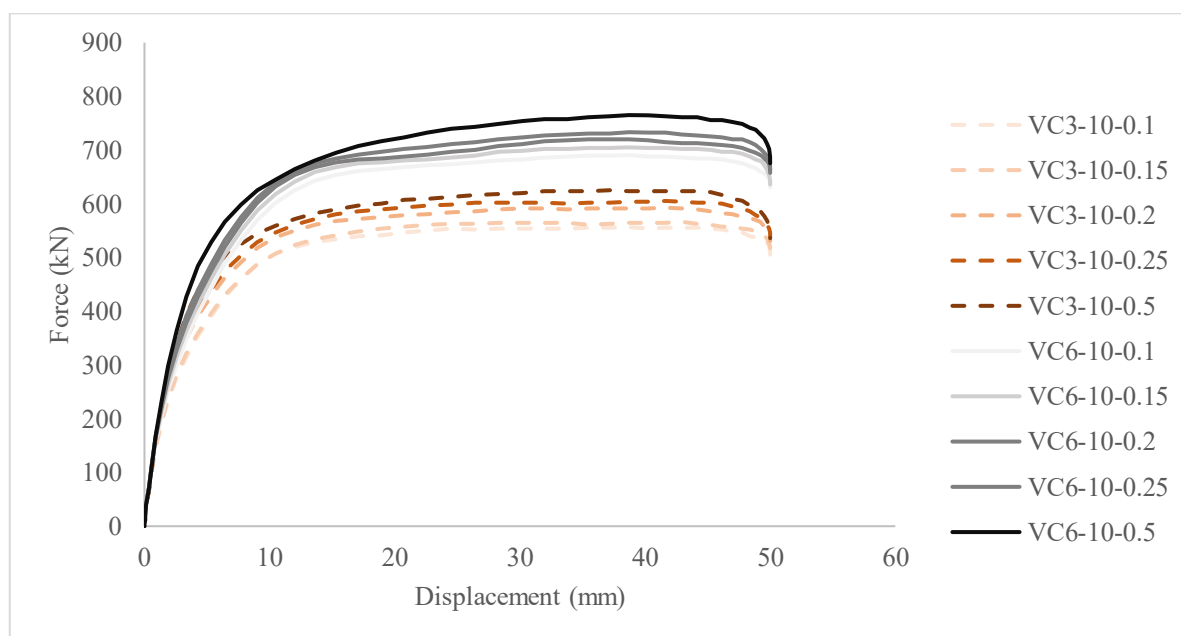
۴- بررسی تاثیر مقدار بار فشاری اعمالی به بهترین مدل دیوارهای برشی مرکب

بررسی مدل‌های نوع اول و دوم نشان داد که از نظر شکل هندسی باز شو، درصد باز شو و جهت موج در ورق‌های فولادی موجدار، مدل‌های دیوار برشی مرکب VC3-10 و VC6-10 دارای عملکرد بهتری است. در نوع سوم با استفاده از این دو مدل، به بررسی تاثیر مقدار بار فشاری اعمالی به دیوارهای برشی مرکب دارای باز شو پرداخته شده است. از آنجایی که در مدل‌های نوع اول و دوم نسبت بار محوری اعمالی یکسان می‌باشد در نام‌گذاری آنها به ضریب n اشاره‌ای نشده است. مطابق نمونه صحت سنجی شده، ضریب n بر اساس رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$n = \frac{N}{f_c A_c + f_a A_a + f_p A_p} \quad (1)$$

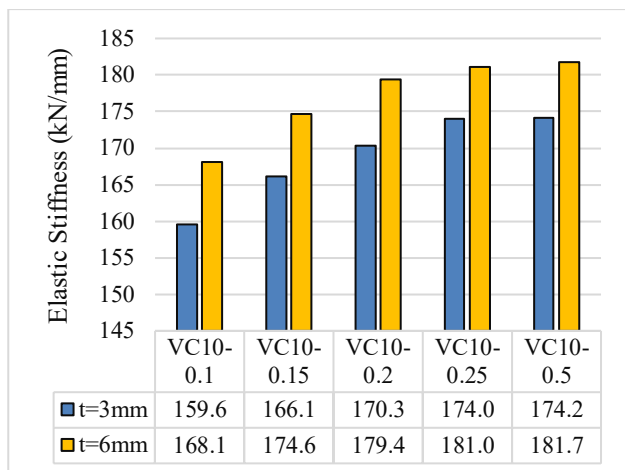
در این معادله f_c ، f_a و f_p به ترتیب نشان دهنده مقاومت فشاری بتن، تنش تسلیم ستون‌های محصور در بتن و تنش تسلیم ورق فولادی موجدار است. A_c ، A_a و A_p به ترتیب برابر با سطح مقطع دیوار بتنی، ستون‌های محصور در بتن و سطح مقطع ورق فولادی موجدار می‌باشد. N برابر با بار فشاری اعمالی به نمونه‌ها است. شکل ۲۰ مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های نوع سوم به همراه مدل‌های مشابه از نوع اول و دوم

با ضریب $n=0.15$ را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، با افزایش ضریب n (افزایش بار فشاری محوری) و افزایش ضخامت ورق فولادی موجدار، سطح زیر منحنی بیشتر شده است.

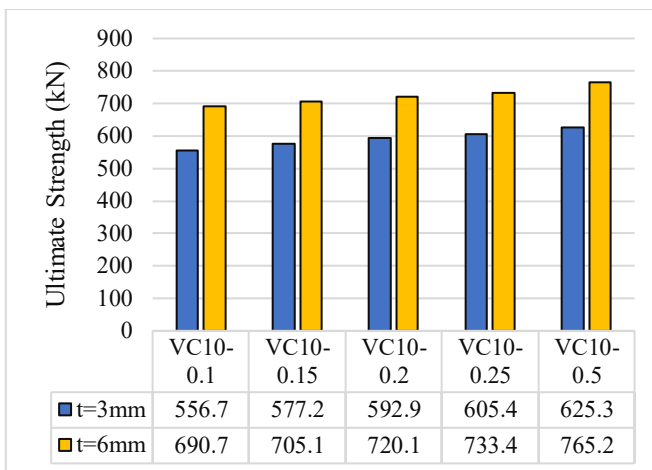


شکل ۲۰: مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های نوع سوم.

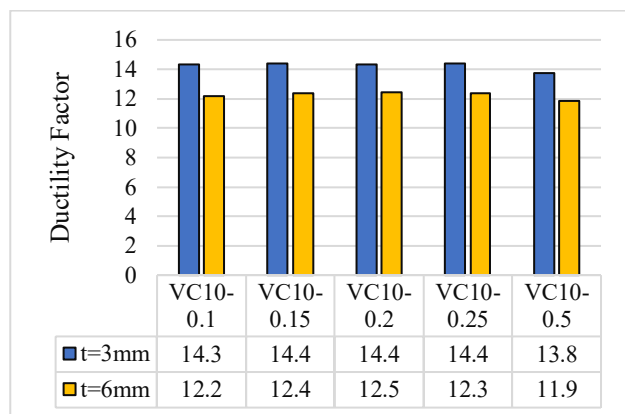
شکل ۲۱ مقایسه مقاومت، سختی الاستیک، جذب انرژی و شکل پذیری مدل‌های نوع سوم را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت بار فشاری محوری اعمالی به مدل‌ها، مقاومت نهایی نیز افزایش پیدا می‌کند. با افزایش نسبت بار محوری فشاری از 0.1 به 0.5 ، مقاومت نهایی مدل‌های دارای ورق فولادی به ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر به ترتیب به میزان 12% و 11% افزایش پیدا می‌کند. برخلاف سختی الاستیک، روند تغییر و افزایش مقدار مقاومت نهایی یکنواخت می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است، با افزایش نسبت بار محوری، سختی الاستیک افزایش پیدا می‌کند اما میزان افزایش سختی الاستیک در مدل‌های دارای ضریب 0.25 و 0.5 بسیار کمتر از تغییرات ضریب 0.1 و 0.15 می‌باشد. بر اساس شکل ۲۱ با تغییر نسبت بار محوری از 0.1 به 0.15 ، سختی الاستیک مدل‌های دارای ورق فولادی موجدار ۳ و ۶ میلی‌متر به میزان 4% بیشتر شده است در حالی با تغییر ضریب n از 0.25 به 0.5 ، سختی الاستیک تغییر قابل توجهی نداشته است. همانطور که قابل مشاهده است، در ابتدا با افزایش نسبت بار محوری تا $n=0.2$ ضریب شکل پذیری بیشتر شده است و سپس مقدار آن کاهش پیدا کرده است. به طوری که در مدل‌های دارای ضخامت ۳ میلی‌متر با افزایش ضریب n از 0.2 به 0.5 ضریب شکل پذیری به میزان 4% کاهش پیدا کرده است و در مدل‌های دارای ضخامت ۶ میلی‌متر به میزان 5% کمتر شده است. از سوی دیگر با افزایش ضخامت ورق فولادی در شرایط یکسان، حداکثر ضریب شکل پذیری به میزان 13% کمتر شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بار فشاری محوری، ظرفیت جذب انرژی بیشتر شده است و در هر دو ضخامت ورق فولادی موجدار، بیشترین میزان ظرفیت استهلاک انرژی مربوط به مدل دارای $n=0.5$ می‌باشد. در این مدل‌ها در شرایط یکنواخت با تغییر نسبت بار فشاری محوری از 0.1 به 0.5 میزان ظرفیت جذب انرژی مدل‌های دارای ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر به ترتیب به میزان 12% و 10% بیشتر شده است. در شکل ۲۲ ابتدا مقدار میانگین پارامترهای لرزه‌ای برای ضخامت‌های سه و شش میلی‌متر محاسبه شد و عدد بدست آمده بر اساس ضریب $n=0.1$ نرمال شد. این مقایسه نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بار فشاری محوری، پارامترهای سختی الاستیک، مقاومت نهایی و جذب انرژی افزایش می‌یابند اما مقدار حداکثر ضریب شکل پذیری در محدوده 0.15 تا 0.25 قرار گرفته است و از آنجایی که با افزایش نسبت بار محوری از 0.1 به 0.5 تنها 10% سبب بهبود پارامترهای لرزه‌ای می‌شود و در مقابل ضریب شکل پذیری کاهش می‌یابد، بهینه‌ترین میزان ضریب برابر با 0.2 است.



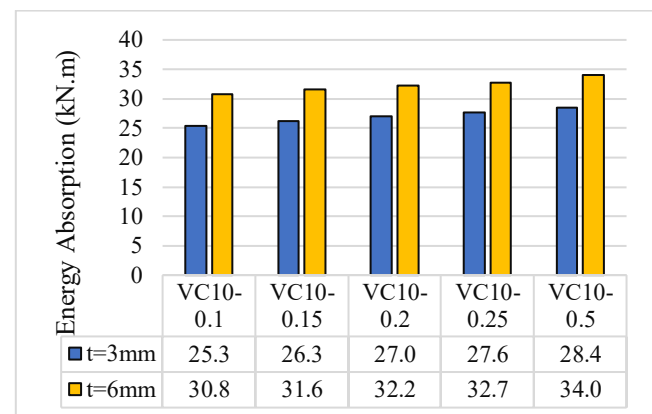
مقایسه سختی الاستیک مدل‌های نوع سوم



مقایسه مقاومت نهایی مدل‌های نوع سوم

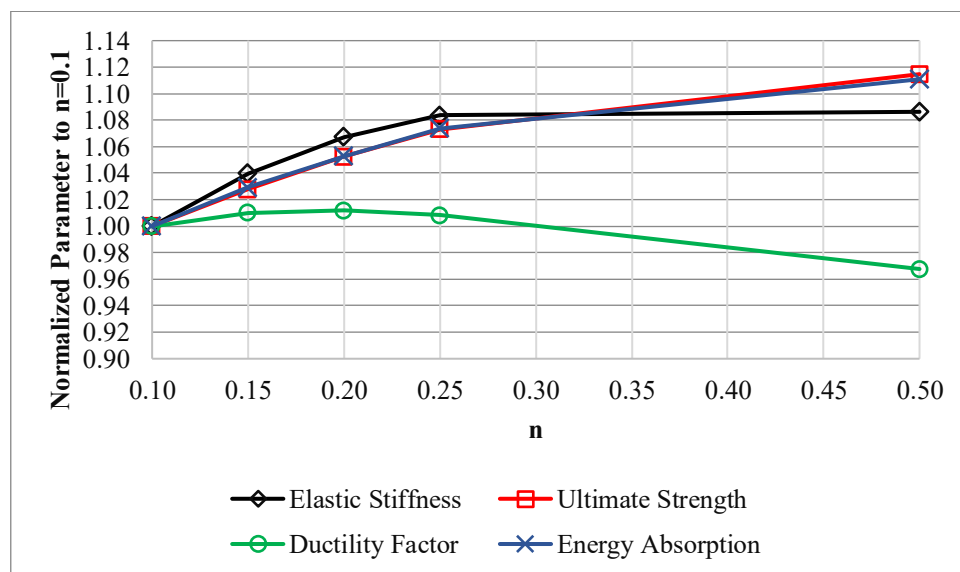


مقایسه ضریب شکل‌پذیری مدل‌های نوع سوم



مقایسه ظرفیت جذب انرژی مدل‌های نوع سوم

شکل ۲۱: مقایسه مقاومت، سختی الاستیک، جذب انرژی و شکل‌پذیری مدل‌های نوع سوم.



شکل ۲۲: مقایسه کلی مدل‌های نوع سوم.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر شکل هندسی بازشو، ابعاد بازشو، ضخامت و جهت ورق فولادی موجدار، و همچنین اثر بار محوری در دیوارهای برشی مرکب پرداخته شد. که نتایج حاصل از این مطالعه در ادامه ارائه شده است.

۱. جهت ورق فولادی موجدار تأثیر قابل توجهی بر توزیع ترک‌ها و کرنش پلاستیک دارد؛ ورق قائم کرنش پلاستیک بیشتری نسبت به ورق افقی ایجاد می‌کند و ترک‌های کششی در محل اتصال به تیر و ستون بیشتر مشاهده می‌شود.

۲. بازشوه‌های دایره‌ای شکل عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به بازشوه‌های مستطیلی دارند؛ به‌طور میانگین سختی الاستیک ۱۴٪، مقاومت نهایی ۲٪، ضریب شکل‌پذیری ۱۳٪ و ظرفیت جذب انرژی ۳٪ افزایش یافته است.

۳. ورق موجدار قائم نسبت به حالت افقی موجب افزایش ۱۴٪ مقاومت نهایی و ۱۳٪ جذب انرژی می‌شود، ولی ضریب شکل‌پذیری را به میزان ۱۶٪ کاهش می‌دهد.

۴. افزایش ضخامت ورق فولادی از سه به شش میلی‌متر به صورت میانگین منجر به افزایش ۷٪ سختی الاستیک، افزایش ۱۲٪ مقاومت نهایی، افزایش ۱۱٪ ظرفیت استهلاک انرژی و کاهش ۳٪ ضریب شکل‌پذیری می‌شود.

۵. در هر دو نوع اول و دوم بهینه‌ترین مدل مربوط به مدل دارای ورق فولادی موجدار قائم با بازشو دایره‌ای شکل می‌باشد که درصد بازشو به میزان ۱۰٪ سطح پانل بتنی انتخاب شده است.

۶. بررسی نسبت بار فشاری محوری در مدل‌های نوع سوم نشان داد که با افزایش نسبت بار فشاری محوری از ۰/۱ به ۰/۵ به صورت میانگین پارامترهای سختی الاستیک به میزان ۹٪، مقاومت نهایی به میزان ۱۲٪ و ظرفیت جذب انرژی به میزان ۱۱٪ بیشتر شده است. اما در مقابل بیشترین میزان ضریب شکل‌پذیری مربوط به نسبت بار فشاری محوری ۰/۲ می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، انجام مطالعات تکمیلی به منظور ارتقای درک رفتار دیوارهای برشی مرکب با ورق فولادی موجدار توصیه می‌شود. از جمله محورهای پیشنهادی می‌توان به انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای ارزیابی قابلیت اطمینان لرزه‌ای دیوارهای دارای بازشو اشاره کرد. همچنین، بررسی استفاده از ورق‌های فولادی موجدار به‌صورت نیمه‌مقید در دیوارهای برشی مرکب می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص نحوه انتقال نیرو و میزان شکل‌پذیری فراهم کند.

مراجع

- [1] Gholhaki, M., Karimi, M., Pachideh, G. (2019). Investigation of Subpanel Size Effect on Behavior Factor of Stiffened Steel Plate Shear Wall. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5, 73–87.
- [2] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O., Ghazvini, S. (2019). Specification of Response Modification Factor for Steel Plate Shear Wall by Incremental Dynamic Analysis Method (IDA). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6, 211–224.
- [3] Pachideh, G., Gholhaki, M., Yadegari, A., Shiri, M. (2018). Modeling and Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls Using the New Method. *2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Planning Elites*, Munich, Germany.
- [4] Yadegari, A., Pachideh, G., Gholhaki, M., Shiri, M. (2018). Seismic Performance of C-PSW. *2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Planning Elites*, Munich, Germany.
- [5] Deghani, H., Chatrazr, M. (2021). Analytical Assessment of Effects of Creating Grooves and Reinforced Polymer Sheets on Improving Seismic Performance of Thin Steel Shear Wall. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8, 211-232.
- [6] Gharaei-Moghaddam, N., Meghdadian, M., Ghalehnovi, M. (2023). Innovations and advancements in concrete-encased steel shear walls: A comprehensive review. *Results in Engineering*. 19, 101351.
- [7] Qiang, C., Jingyu, H., Peng, W., Long, Z., Chen, W., Yansheng, HZ. (2016). Research on failure modes and key parameters of corrugated steel shear walls. *MATEC Web of Conferences*. 05008, DOI: 10.1051/mateconf/20166.
- [8] Shon, S., Yoo, M., Lee, S. (2017). An experimental study on the shear hysteresis and energy dissipation of the steel frame with a trapezoidal-corrugated steel plate. *Journal of Materials*, 10, 261.

- [9] Peng, X., Lin, C., Zhang, T., Zhang, X. (2018). A design method of corrugated steel shear wall under earthquake motion. *Advances in Engineering Research, 7th International Conference on Energy and Environmental Protection*, 170, 1084-1088.
- [10] Wang, W., Ren, Y., Han, B., Ren, T., Liu, G., Liang, Y. (2019). Seismic performance of corrugated steel plate concrete composite shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28, e1564.
- [11] Haghi, N., Epackachi, S., Taghi Kazemi, M. (2020). Cyclic performance of composite shear walls with boundary elements. *Structures*, 27, 102-117.
- [12] Bypour, M., Yekrangnia, M., Kioumars, M. (2024). Predicting the shear capacity of composite steel plate shear wall with the application of RSM. *Engineering Structures*, 301, 117263.
- [13] Cao, Y., Liu, Z., Zhang, H. (2024). Experimental and Numerical Study on Hysteretic Behaviour of Corrugated Steel Plate Shear Walls under Lateral Loads. *Journal of Building Engineering*, 87, 108366.
- [14] Jiang, Z.-Q., Li, X.-J., Chen, Y., Wu, Y. (2024). Cyclic loading behavior of novel internally stiffened double steel plate shear wall. *Journal of Building Engineering*, 90, 109462.
- [15] Paslar, H., Ghassemieh, M., Heshmati, M. (2024). Experimental and Numerical Study on Vertically-Placed Stiffened Corrugated Steel Plate Shear Walls. *Thin-Walled Structures*, 196, 111435.
- [16] Feng, C., Zhao, L., Li, Y., Sun, Z. (2024). Experimental Study on Seismic Performance of Transversely Ribbed Corrugated Steel Plate-Concrete-Filled Steel Tube Shear Walls. *Buildings*, 14(9), 2708.
- [17] Luo, Q., Wang, W., Sun, Z., Xu, S., Wang, B. (2021). Seismic performance analysis of corrugated-steel-plate composite shear wall based on corner failure. *Journal of Constructional Steel Research*. 180, 106606.
- [18] ABAQUS Verification Manual 6.9.1. (2010). USA.
- [19] Jeyakumar, M., Christopher, T. (2013). Influence of residual stresses on failure pressure of cylindrical pressure vessels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26, 1415-1421.
- [20] Araba, A.M., Zinkaah, O., Alhawat, M., Alridha, Z. (2023). Flexural analysis of hybrid FRP-steel reinforced concrete cross-sections. *AIP Conference Proceedings*, 2806, 040016.
- [21] Fib model code for concrete structures 2010. (2013). *International Federation for Structural Concrete*, 48-73.
- [22] Park, Y.J., Ang, A.H.-S., & Wen, Y.K. (1987). *Damage-limiting aseismic design of buildings*. *Earthquake Spectra*, 3(1), 1-26.