

## Determining the appropriate thickness of the concrete panel to optimize the seismic behavior of the composite shear wall system

Moein Jalilian<sup>1</sup>, Mansour Ghalehnovi<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. of Structural Engineering, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor of Structural Engineering, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

The widespread application of modern lateral load-resisting systems, such as composite shear walls, necessitates a thorough investigation and optimization of their performance. The composite shear wall studied in this research comprises a steel plate and a concrete panel interconnected by shear connectors. This study focuses on modeling the independent behavior of steel and concrete and analyzing their interaction while investigating the sensitivity of system performance to changes in material strength and geometric parameters. Four key variables, including steel plate thickness, concrete panel thickness, concrete compressive strength, and steel yield strength, were selected with varying values assigned to each. The influence of these variables on the shear strength of the system was evaluated after validating the numerical model against experimental data and simulating 60 different combinations using the Abaqus software. The results revealed that geometric and dimensional parameters have a significantly greater impact on shear strength compared to material strength. For instance, increasing the steel plate thickness from 5 mm to 10 mm resulted in a 20–25% increase in shear strength, whereas an increase in steel yield strength only contributed a 3–5% improvement. Moreover, the system's response was highly sensitive to changes in concrete panel thickness; increasing the thickness to 70–80 mm enhanced shear strength by approximately 20%. Additionally, maintaining proportionality between the thicknesses of the steel plate and concrete panel is critical for buckling control. The study highlighted the existence of optimal values for each parameter, where variations in other factors become more pronounced. These findings provide valuable insights into the design and optimization of composite shear wall systems.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 18 September 2024

Revise Date: 04 February 2025

Accept Date: 11 March 2025

### Keywords:

Composite Shear Wall  
Concrete Panel Thickness  
Cyclic Loading  
Height-to-width Ratio  
Shear Connector Spacing  
ABAQUS

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.472964.3492

\*Corresponding author: Mansour Ghalehnovi

Email address: Ghalehnovi@um.ac.ir

## اثر تغییر مشخصات مقاومتی و هندسی مصالح بر رفتار دیوارهای برشی مرکب

امیرحسین بذرافشان<sup>۱\*</sup>، معین جلیلیان<sup>۲</sup>، منصور قلعه‌نوی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

کاربرد گسترده سیستم‌های نوین باربر جانبی مانند دیوار برشی مرکب، مطالعه و بهینه‌سازی عملکرد این سیستم را ضروری ساخته است. دیوار برشی مرکب مورد مطالعه در این پژوهش از یک ورق فولادی و پانل بتنی تشکیل شده است که توسط برشگیرها به هم متصل می‌شوند. این تحقیق به مدل‌سازی مجزای رفتار فولاد و بتن و بررسی برهم‌کنش آن‌ها پرداخته و حساسیت عملکرد سیستم نسبت به تغییرات در پارامترهای مقاومت مصالح و هندسه اجزا را مورد بررسی قرار داده است. چهار متغیر کلیدی شامل ضخامت ورق فولادی، ضخامت پانل بتنی، مقاومت فشاری بتن، و مقاومت تسلیم ورق فولادی انتخاب و مقادیر متنوعی برای هر یک در نظر گرفته شد. سپس، تأثیر این متغیرها بر مقاومت برشی سیستم پس از راستی‌آزمایی مدل‌سازی با نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ۶۰ مدل ترکیبی در نرم‌افزار آباکوس ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که پارامترهای هندسی و ابعادی نسبت به مقاومت مصالح تأثیر بیشتری دارند. به عنوان نمونه، افزایش ضخامت ورق فولادی از ۵ به ۱۰ میلی‌متر، منجر به افزایش ۲۰ تا ۲۵ درصدی مقاومت برشی شد، درحالی‌که افزایش مقاومت تسلیم ورق فولادی تنها ۳ تا ۵ درصد تأثیر داشت. همچنین، پاسخ سیستم به تغییر ضخامت پانل‌های بتنی بسیار حساس بود؛ به طوری‌که افزایش ضخامت پانل تا ۷۰ تا ۸۰ میلی‌متر، مقاومت برشی را حدود ۲۰ درصد افزایش داد. علاوه بر این، برای کنترل کماتش سیستم، تناسب ضخامت اجزای آن اهمیت ویژه‌ای دارد؛ ضخامت ورق فولادی و پانل بتنی باید متناسب باشند. نتایج نشان دادند که مقدار بهینه‌ای برای هر متغیر وجود دارد که تغییرات سایر عوامل در این حالت تأثیر بیشتری دارند.

کلمات کلیدی: سیستم باربر جانبی، دیوار برشی مرکب، مقاومت برشی، کماتش ورق فولادی، پانل بتن مسلح، مشخصات مقاومتی و هندسی، نرم‌افزار آباکوس

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.472964.3492	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.472964.3492	۱۴۰۴/۱۰/۳۰	۱۴۰۴/۱۲/۲۱	۱۴۰۴/۱۲/۲۱	۱۴۰۳/۱۱/۱۶	۱۴۰۳/۰۶/۲۸
*نویسنده مسئول: امیرحسین بذرافشان amir.bazrafshan1998@gmail.com					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت کره‌ی زمین و همچنین ارزشمند بودن اراضی، نیاز به ساخت سازه‌های بلندمرتبه در دهه‌های اخیر به شدت افزایش یافته است، از طرفی زلزله همواره ایمنی این گونه سازه‌ها را تهدید می‌کند و مهندسان عمران جهت بهبود عملکرد آن‌ها گام برمی‌دارند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در عملکرد سازه و تأمین مقاومت و پایداری آن به‌ویژه در برابر زلزله، سیستم باربر جانبی آن است. سیستم باربر جانبی به سیستمی اطلاق می‌شود که در برابر بارهای جانبی وارد بر سازه نظیر باد و زلزله مقاومت کرده و پایداری آن را تضمین می‌کند. سیستم‌های باربر جانبی انواع گوناگونی دارند که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به قاب خمشی، انواع مهاربندها، دیوار برشی و یا سیستم دوگانه اشاره نمود.

بتن ماده‌ای است که مقاومت کششی پایینی دارد و در مقابل هزینه‌ی تولید فولاد نیز زیاد است. در سال‌های اخیر استفاده از مقاطع مرکب به دلیل عملکرد مناسبی که بتن و فولاد در کنار یکدیگر از خود نشان می‌دهند به طور چشمگیری افزایش یافته است. دیوارهای برشی مرکب نیز از این قاعده مستثنی نیستند. سیستم دیوار برشی مرکب به جهت بهره‌گیری از مزایای دو سیستم دیوار برشی فولادی و دیوار برشی بتن مسلح، اعم از سختی اولیه و شکل‌پذیری بالا و البته ارتقا معایب آن‌ها در سایه‌ی ادغام این دو یکی از کامل‌ترین سیستم‌های باربر جانبی است که در کشورهای توسعه‌یافته به شدت مورد استقبال قرار گرفته است. از اجزای اصلی سازه‌ی دیوار برشی مرکب می‌توان به ورق فولادی، پانل بتن مسلح، برشگیرها، اجزای مرزی شامل تیرها و ستون‌ها، اتصالات ورق فولادی به اجزای مرزی و اتصالات تیر و ستون به یکدیگر اشاره نمود. پانل‌های بتنی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای سازه‌ی دیوار برشی مرکب علی‌رغم آن که در سختی جانبی سازه نقش دارند؛ ولی مهم‌ترین وظیفه‌ی آن‌ها مقید کردن تغییر شکل‌های خارج از صفحه‌ی ورق فولادی است که منجر به جلوگیری از کمانش زودرس آن می‌شود. در این سیستم ورق فولادی به‌وسیله‌ی برشگیرهایی به پانل بتنی متصل می‌گردد.

دیوار برشی مرکب خود انواع گوناگونی دارد و با توجه به عملکرد، پیکربندی و سایر عوامل به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شود؛ ولی در یک نوع متداول دسته‌بندی می‌توان آن را به دو گونه‌ی  $CFST^2$  و  $SPRC^1$  تقسیم نمود که تفاوت آن‌ها در محل قرارگیری اجزای سازه‌ی آن‌ها است. در  $SPRC$  ورق فولادی مدفون بین پانل‌های بتن مسلح است و در  $CFST$  داخل ورق‌های فولادی توسط بتن پر شده است [۱]. در یک دسته‌بندی دیگر دیوارهای برشی مرکب بر اساس وجود یا عدم وجود فاصله میان پانل بتنی و اجزای مرزی به دو نوع تقسیم می‌شوند که از مدل دارای فاصله به‌عنوان دیوار برشی مرکب نوین یاد می‌شود. در دیوار برشی مرکب نوین، پانل بتنی در تغییر شکل‌های کوچک نقشی در مقاومت و سختی سازه ندارد و در نتیجه نیروی کمتری به آن وارد شده و آسیبی جزئی متوجه آن می‌شود؛ ولی در دیوار برشی مرکب سنتی این آسیب بیشتر بوده و بتن از ابتدای بارگذاری در عملکرد سازه‌ی نقش دارد [۲]. دیوارهای برشی فولادی مزایای زیادی نسبت به انواع بتنی خود دارند که از جمله می‌توان به شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بیشتر، رفتار پلاستیک بهتر، ابعاد کوچک‌تر و مزایای معماری، کاهش وزن سازه و متعاقباً کاهش نیروهای زلزله‌ی وارد بر آن و در نهایت مقاومت بیشتر در برابر زلزله‌های متعدد اشاره نمود [۳]. از عمده مشکلات دیوار برشی فولادی نیز می‌توان به کمانش ورق فولادی اشاره نمود که این نقصان در دیوار برشی مرکب مرتفع گردیده است. از طرفی آسان‌تر بودن اجراء، مقاومت و سختی بالاتر و عدم تشکیل میدان کششی مورب و در نتیجه بهره‌گیری از ظرفیت تمام ورق فولادی نیز از دیگر مزایای دیوار برشی مرکب نسبت به فولادی تلقی می‌شود.

سیستم دیوار برشی مرکب علی‌رغم مزایای فراوانی که دارد به علت نوظهور بودن آن زوایای پنهان فراوانی برای مهندسان و پژوهشگران دارد تا جایی که به‌ندرت ضوابط مربوط به طراحی آن حتی در آیین‌نامه‌های معتبر مشاهده می‌گردد. این مسئله مهندسان را وادار به شناخت هرچه بیشتر رفتار دیوار برشی مرکب به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی کرده است و انجام آزمایش‌ها و پژوهش‌های مشابه راه مناسبی برای دستیابی به این شناخت است. در ادامه، ساخت چند نمونه‌ی آزمایشی و راستی‌آزمایی آن‌ها توسط مدل‌های معتبر در دستور کار قرار می‌گیرد تا در صورت صحت مدل‌سازی آن‌ها بتوان نمونه‌ی اصلی را با رویکردی مشابه در فضای نرم‌افزار پیاده‌سازی نمود.

<sup>1</sup> Steel Plate Reinforced Concrete

<sup>2</sup> Concrete-Filled Steel Tube

اثر تغییرات چهار پارامتر مقاومتی و هندسی مختلف بر روی نمونه‌ی اصلی مشاهده شده و خروجی‌های مدنظر اعم از مقاومت برشی سیستم در دریافت چهار درصد استخراج می‌گردند. در انتها نیز با مقایسه و بررسی خروجی‌ها، حساسیت رفتار سیستم به هر یک از متغیرهای چهارگانه مورد بحث قرار می‌گیرد تا از رهگذر آن بتوان دید مناسبی جهت طراحی در اختیار طراحان و پژوهشگران قرار داد.

نوآوری این پژوهش به‌طور خاص از ترکیب روش‌های نوین در مدل‌سازی و شبیه‌سازی نشأت می‌گیرد. در این تحقیق، مشخصات مصالح فولادی و بتنی با استفاده از رویکردهای نوین تعریف شده است. به‌طور خاص، از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی<sup>۳</sup> برای فولاد به جای استفاده از مدل‌های سنتی سخت‌شوندگی جنبشی<sup>۴</sup> بهره گرفته شده است که اجازه می‌دهد رفتار فولاد به‌طور دقیق‌تر و مطابق با شرایط واقعی بارگذاری چرخه‌ای در مطالعه مدلسازی شود. همچنین، رابطه در هم تنیدگی میان ورق فولادی و پانل بتنی در این مطالعه مدنظر قرار گرفته است، که به تحلیل بهتر برهم‌کنش میان این دو ماده منجر می‌شود. از سوی دیگر، بارگذاری چرخه‌ای به‌کار رفته در شبیه‌سازی‌ها، طیف وسیعی از کرنش‌ها را پوشش داده و اجازه ارزیابی دقیق‌تر پاسخ سازه‌ای را در برابر بارهای جانبی می‌دهد. یک تفاوت کلیدی این پژوهش با مطالعات پیشین، بررسی مقدار بهینه پارامترهای مختلف مؤثر بر عملکرد سیستم دیوار برشی مرکب، به‌ویژه ضخامت پانل بتنی است که در این مطالعه پوشش داده شده است. در بسیاری از تحقیقات قبلی، اهمیت و مقدار بهینه این پارامترها مورد توجه قرار نگرفته و فقط تمرکز بر برخی ویژگی‌های خاص بوده است. این تحقیق تلاش دارد تا این کمبود را جبران کرده و با ارائه نتایج جدید و کاربردی، به بهینه‌سازی سیستم‌های دیوار برشی مرکب و ارائه پیشنهادات مفید برای طراحی بهینه این سیستم‌ها کمک کند. در واقع، نوآوری مقاله در ارائه یک دیدگاه جامع‌تر و عمیق‌تر به‌ویژه در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای طراحی سیستم دیوار برشی مرکب است که به ارتقای دانش علمی و کاربردی در این حوزه منجر می‌شود.

## ۲- کارهای انجام‌شده

در دو دهه‌ی اخیر و پس از انتشار کتابچه‌ی رفتار لرزه‌ای و طراحی دیوارهای برشی مرکب توسط آستانه اصل و ژائو<sup>۵</sup> [۴] توجه پژوهشگران زیادی به نحوه‌ی عملکرد و ویژگی‌های دیوار برشی مرکب معطوف شد. در این کتابچه آستانه اصل ضمن معرفی اجزای سازنده‌ی سیستم دیوار برشی مرکب و کاربردهای آن، یک نمونه‌ی بزرگ مقیاس را مدل‌سازی نمود و سپس با اختصاص فاصله‌ی میان اجزای مرزی و پانل بتنی تأثیر این متغیر را بر رفتار سیستم مشاهده کرد که پیش‌درآمد بسیاری از پژوهش‌های بعدی در این زمینه شد که در این قسمت به چند مورد از آن‌ها که مرتبط با مطالعات پارامتری و تأثیر متغیرهای مختلف بر رفتار دیوار برشی مرکب است، اشاره می‌گردد.

در یکی از نخستین پژوهش‌های عددی پیرامون رفتار دیوارهای برشی مرکب، در سال ۲۰۰۹ حاتمی و همکاران [۵] با انجام یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی درصد دسترسی به مقدار بهینه‌ی نسبت ضخامت پانل بتنی به ورق فولادی برآمدند و در این راستا با در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای ضخامت پانل بتنی دو پارامتر ضخامت ورق فولادی و فاصله‌ی میان برشگیرها (تعداد برشگیرها) را به‌عنوان متغیرهای مورد بررسی معرفی نمودند. تعداد برشگیرها دو مقدار ۹ و ۲۴ در نظر گرفته شد که نشانگر سه ردیف سه‌تایی و یا سه ردیف هشت‌تایی از برشگیرها بود. همچنین برای ضخامت ورق فولادی نیز سه مقدار ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد. با بررسی‌های به‌عمل آمده مشخص شد که با افزایش تعداد برشگیرها (کاهش فاصله‌ی میان آن‌ها) سختی سازه در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد افزایش یافته و در نتیجه، تغییر مکان جانبی ۲۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت ورق فولادی از ۲ به ۵ میلی‌متر تغییر مکان داخل و خارج از صفحه ۳۵ تا ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند ولی هنگامی که ضخامت ورق فولادی از ۵ به ۱۰ میلی‌متر می‌رسد کاهش اساسی در تغییر مکان داخل صفحه‌ی ورق مشاهده نمی‌شود و این مقدار برای تغییر مکان خارج از صفحه برابر با ۱۰ تا ۱۵ درصد است. در نتیجه مشخص می‌شود که افزایش ضخامت ورق فولادی مقداری بهینه دارد که باید به آن توجه شود.

در سال ۲۰۱۷ ونگ<sup>۶</sup> و همکارانش [۶] با انجام مطالعاتی بر روی سازه‌هایی که در قلمرو داخلی چین ساخته شده‌اند به بررسی رفتار دیوار برشی مرکب در این سازه‌ها پرداختند. یکی از زمینه‌های اصلی این مطالعات بررسی پارامتری چهار متغیر مؤثر اعم از نسبت

<sup>3</sup> Combined Hardening

<sup>4</sup> Kinematic Hardening

<sup>5</sup> Zhao

<sup>6</sup> Wang

ضخامت ورق فولادی به ضخامت پانل بتنی، نسبت بار محوری فشاری، مقاومت بتن و نسبت آرماتور جان (عرضی و طولی) بر عملکرد سیستم دیوار برشی مرکب بود. در این راستا با افزایش نسبت ضخامت ورق فولادی به ضخامت پانل بتنی مشاهده شد که مقاومت نهایی سیستم افزایش یافته و سهم ورق فولادی در تحمل بار نیز بیشتر می‌شود؛ هرچند با توجه به افزایش توأمان تغییرمکان تسلیم و نهایی، تغییرات ضریب شکل‌پذیری مشخص نمی‌باشد. دیگر پارامتر مورد مطالعه نسبت بار فشاری محوری بود که تأثیرات چشمگیری بر رفتار چرخه‌ای، ظرفیت تغییرشکل و زوال مقاومت بعد از رسیدن به مقدار نهایی دارد به‌صورتی که با افزایش این نسبت زوال مقاومت بیشتر شده و ظرفیت تغییرشکل و ضریب شکل‌پذیری متناظر با آن نیز کاهش می‌یابند. در گام بعدی مشاهده شد که با افزایش مقاومت بتن سهم پانل بتنی از تحمل بار افزایش یافته و مقاومت نهایی سیستم بیشتر می‌شود؛ همچنین ظرفیت تغییرشکل و ضریب شکل‌پذیری متناظر با آن نیز افزایش پیدا می‌کند. در انتها نیز اثر تغییرات نسبت آرماتور جان بررسی گردید و مشاهده شد که این پارامتر تأثیر خاصی بر روی رفتار سیستم اعم از ظرفیت باربری، عملکرد پس از بار نهایی، ظرفیت تغییرشکل و ضریب شکل‌پذیری نداشته و فقط اثر کوچکی بر ظرفیت خمشی سیستم دارد.

در سال ۲۰۱۹ کی<sup>۷</sup> و همکارانش [۷] مطالعه‌ای را جهت یافتن ضخامت پانل بتنی مورد تقاضا برای سیستم‌های دیوار برشی انجام دادند که در آن به بررسی پارامتری اثرات پنج عامل ضخامت پانل بتنی، مدول الاستیسیته‌ی بتن، ضخامت ورق فولادی، نسبت ابعادی پانل و فاصله‌ی میان برشگیرها بر نسبت دررفت بحرانی نیز پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که افزایش ضخامت پانل بتنی و مدول الاستیسیته‌ی بتن و همچنین کاهش فاصله‌ی میان برشگیرها باعث افزایش نسبت دررفت بحرانی شده و کاهش نسبت ابعادی پانل نیز منجر به کاهش نسبت دررفت بحرانی می‌شود. در بررسی ضخامت ورق فولادی نیز باید دو حالت کمانش الاستیک و غیرالاستیک در نظر گرفته شود؛ به‌طوری که برای حالت کمانش الاستیک با کاهش ضخامت ورق فولادی نسبت دررفت بحرانی کاهش یافته و برای حالت غیرالاستیک با افزایش ضخامت ورق فولادی نسبت دررفت بحرانی کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۲۰ کیم<sup>۸</sup> و همکارانش [۸] چهار پارامتر مقاومت بتن، نیروی تسلیم آرماتورها، نسبت آرماتور طولی و نسبت حجمی آرماتور عرضی را در نظر گرفتند و با تغییر مقادیر آن‌ها اثر این عوامل را بر روی نسبت دررفت میان‌طبقه‌ای مشاهده نمودند. در این پژوهش با توجه به روند بارگذاری سه سطح سرویس‌دهی، کنترل آسیب و جلوگیری از فروپاشی برای نمونه‌ها تعریف شد. سپس با بررسی‌های به‌عمل آمده مشخص شد که نسبت‌های دررفت مربوط به سطوح کنترل آسیب و جلوگیری از فروپاشی با افزایش مقاومت بتن به طرز چشمگیری افزایش یافتند. همچنین با افزایش نسبت حجمی آرماتورهای عرضی، افزایش قابل‌توجهی در نسبت دررفت سطح پیشگیری از فروپاشی پدیدار گشت. از طرفی تغییرات کمی در نسبت دررفت مربوط به سطح سرویس‌دهی برای تمام نمونه‌ها مشاهده شد و در مقایسه با تغییرات مقاومت فشاری بتن و درصد حجمی آرماتورهای عرضی، اثر نیروی تسلیم آرماتورها و نسبت آرماتورهای طولی بر دررفت ناچیز بود.

در سال ۲۰۲۱ ونگ و همکارانش [۹] مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی را بر روی سیستم دیوار برشی مرکب با اجزای پیش‌ساخته انجام دادند و بخش مهمی از پژوهش آن‌ها متعلق به بررسی پارامتری چند عامل از جمله نسبت ابعادی، نسبت ارتفاع به ضخامت ورق فولادی، فاصله‌ی میان بولت‌ها، فاصله‌ی میان پانل بتنی و ورق اتصال، ضخامت ورق اتصال و ضخامت پانل بتنی بود. از نتایج این آزمایش مشخص شد که در یک نسبت ابعادی ثابت، سختی اولیه و ظرفیت باربری جانبی با کاهش نسبت ارتفاع به ضخامت ورق فولادی افزایش می‌یابند و مشخصات فیزیکی اعم از استهلاک انرژی و تغییرمکان خارج از صفحه نیز عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. از طرفی در یک نسبت ثابت ارتفاع به ضخامت ورق فولادی، با افزایش نسبت ابعادی سختی اولیه، ظرفیت باربری جانبی، بار حداکثر و استهلاک انرژی افزایش پیدا می‌کنند. از دیگر نتایج این آزمایش به‌دست آمد که با افزایش فاصله‌ی میان بولت‌ها بارهای حداکثر، استهلاک انرژی تجمعی و ضرایب آسیب همگی دچار کاهش می‌شوند بدین معنی که ظرفیت سازه‌ای افت کرده ولی آسیب‌های وارده به پانل بتنی بیشتر می‌شوند. با افزایش فاصله‌ی میان پانل بتنی و ورق اتصال تغییرمکان خارج از صفحه‌ی ورق فولادی افزایش می‌یابد ولی اثرات این فاصله بر روی ظرفیت

<sup>7</sup> Qi  
<sup>8</sup> Kim

سازه‌ای نظیر بار حداکثر و انرژی مستهلک شده قابل چشم‌پوشی است. اما از طرفی تأثیر ضخامت ورق اتصال بر روی هر دو مورد ظرفیت‌های سازه‌ای و تغییر مکان خارج از صفحه قابل توجه است و با افزایش این ضخامت، انرژی مستهلک شده دچار افزایش شده و در عین حال تغییر شکل‌ها محدود می‌گردند. در انتها نیز با بررسی ضخامت پانل بتنی مشخص شد که اگر این پارامتر محدودکنندگی مناسبی برای تغییر شکل‌های خارج از صفحه ایجاد کند افزایش مقدار آن تأثیر خاصی بر روی ظرفیت لرزه‌ای سازه ندارد.

در سال ۲۰۲۱ یانگ<sup>۹</sup> و همکارانش [۱۰] یک بررسی پارامتری بسیار گسترده با چندین متغیر را در دستور کار قرار دادند و از رهگذر این مطالعه نتایج زیر حاصل شد. اولین متغیر مطالعه شده تعداد پانل‌های بتنی در اطراف ورق فولادی بود و مشخص شد که استفاده از پانل بتنی در هر دو طرف ورق فولادی بدلیل افزایش سختی اولیه و ظرفیت برشی حداکثر و همچنین کاهش تغییر شکل‌های خارج از صفحه‌ی ورق توجیه بیشتری دارد. متغیر دوم به صورت فاصله میان ورق فولادی و پانل بتنی تعریف شد و به دست آمد که با افزایش این فاصله مقاومت برشی کاهش می‌یابد و ورق فولادی تمایل بیشتری به کمانش در اطراف بولت‌ها دارد. متغیر بعدی نسبت لاغری یا نسبت ارتفاع به ضخامت ورق فولادی بود و همان‌طور که انتظار می‌رفت مقادیر کمتر این نسبت ظرفیت برشی بیشتری از خود نشان دادند. چهارمین متغیر درصد آرماتور بندی پانل بتنی بود و مشاهده شد که به‌طور کلی این درصد اثر اندکی بر روی سختی اولیه سیستم دارد و ظرفیت برشی آن را هم به مقدار کمی افزایش می‌دهد. با افزایش مقاومت فشاری بتن به‌عنوان دیگر متغیر مطالعه شده مشخص شد که به‌علت مقاومت بالای پانل‌ها در برابر آسیب این پارامتر تأثیر اندکی بر روی ظرفیت برشی دارد ولی تغییر مکان خارج از صفحه‌ی ورق فولادی و درجه‌ی آسیب پانل بتنی را کاهش می‌دهد. با افزایش ضخامت پانل بتنی در یک نسبت لاغری ثابت برای ورق فولادی، ظرفیت برشی سیستم افزایش پیدا می‌کند چراکه اولاً پانل بتنی در این حالت توانایی بیشتری در محدودسازی ورق فولادی دارد و ثانیاً بخش بیشتری از ظرفیت برشی سیستم را نسبت به حالتی که ضخامت پانل بتنی کمتر است به عهده می‌گیرد. در انتها نیز اثرات فاصله‌ی میان بولت‌ها بررسی شد و به دست آمد که با کاهش این فاصله (افزایش تعداد بولت‌ها) ظرفیت برشی سیستم افزایش پیدا کرده و در عین حال پانل بتنی توانایی بیشتری در محدود کردن تغییر شکل‌های خارج از صفحه‌ی ورق فولادی دارد، هر چند این فاصله باید به مقدار خاصی محدود گردد.

در سال ۲۰۲۲ نجم<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۱۱] مطالعه‌ی گسترده‌ای بر روی رفتار چرخه‌ای سیستم دیوار برشی مرکب انجام دادند که بخش عمده‌ی آن متکی بر بررسی پارامتری چهار عامل فاصله‌ی میان پانل بتنی و اجزای مرزی (شکاف)، ضخامت ورق فولادی، ضخامت پانل بتنی و فاصله‌ی میان برشگیرها بود. نتایج این آزمایش حاکی از آن بود که افزایش گپ بر روی ترتیب تسلیم اجزای سازنده تأثیر می‌گذارد و بدین صورت ابتدا تیرها و ورق فولادی تسلیم می‌شوند. همچنین مشخص گردید که سایر عوامل نظیر ضخامت ورق فولادی و پانل بتنی و فاصله‌ی میان برشگیرها باید به یک بازه‌ی مشخصی محدود گردند.

در سال ۲۰۲۳ جوادی<sup>۱۱</sup> [۱۲] و همکارانش با در نظر گرفتن پنج پارامتر از جمله نسبت ابعادی ورق فولادی، نسبت ابعادی دیوار برشی، تعداد و ضخامت ورق‌های فولادی و عرض ستون‌ها مطالعه‌ای بر رفتار دیوارهای برشی مرکب انجام دادند. نمونه‌ی آزمایش متشکل از ۶ ورق فولادی کوچک بود که از اطراف توسط ستون‌ها یا پانل‌های بتنی محصور شده بودند. در این بررسی تعداد ۲۴ نمونه مدل‌سازی شد و پس از راستی‌آزمایی مشخص گردید که با افزایش نسبت ارتفاع به عرض ورق فولادی مقاومت برشی سیستم افزایش پیدا می‌کند و این مسئله در حالتی که عرض ثابت است و ارتفاع در حال افزایش می‌باشد، نمود بیشتری دارد. از طرف دیگر با افزایش نسبت ارتفاع به عرض کل دیوار برشی در محدوده‌ی مورد نظر مقاومت برشی سیستم کاهش پیدا می‌کند. همچنین اگرچه با افزایش تعداد ورق‌های فولادی مدفون تا مقداری مشخص مقاومت افزایش پیدا می‌کند، ولی پس از آن به دلیل ایجاد کمانش محلی در ورق‌ها نمودار مقاومت نزولی می‌شود. مطابق انتظار معلوم گردید با افزایش ضخامت ورق فولادی مقاومت برشی به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد. در انتها نیز گزارش شد که با ازدیاد عرض ستون‌های اجزای مرزی، مقاومت سیستم صعودی می‌گردد و این افزایش در حالتی که عرض ستون از مقدار مشخصی عبور می‌کند نمود بیشتری دارد.

<sup>9</sup> Yang

<sup>10</sup> Najm

<sup>11</sup> Javadi

در سال ۲۰۲۳ گوان<sup>۱۲</sup> [۱۳] و همکارانش نوع خاصی از دیوار برشی مرکب را در نظر گرفتند که در آن لوله‌های فلزی مهار شده با خاموت درون بتن مدفون بودند. پنج پارامتر در این مطالعه بررسی شدند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها نسبت نیروی فشاری محوری بود. مشاهده شد که با افزایش این عامل تا رسیدن به مقداری مشخص، افزایش ظرفیت دیوار قابل ملاحظه است. اما پس از آن بهبود چشمگیری در ظرفیت اتفاق نمی‌افتد. از سوی دیگر با افزایش مقاومت تسلیم لوله‌های فلزی علی‌رغم افزایش اندک ظرفیت سیستم، شکل‌پذیری دچار کاهش شد. سومین عامل درصد آرماتور ستون‌ها بود که افزایش آن اگرچه باعث بهبود ظرفیت برشی سیستم گردید، اما شکل‌پذیری را به میزان اندکی کاهش داد. پارامتر دیگر که نقش مهمی در رفتار سیستم داشت، مقاومت فشاری بتن بود که هرچند افزایش آن باعث افزایش ظرفیت برشی سیستم می‌شد، اما شکل‌پذیری را به مقدار چشمگیری کاهش می‌داد که خود مقدمات وقوع شکست ترد را فراهم می‌کرد. آخرین عامل نیز فاصله‌ی میان خاموت‌ها در نظر گرفته شد و مشاهده گردید که اگرچه با کاهش فاصله‌ی میان آن‌ها ظرفیت کاهش و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد، اما مشکلات اجرایی باعث می‌گردند تا فاصله‌ی خاموت‌ها تا رسیدن به مقداری متعادل افزایش یابند.

با بررسی پژوهش‌های متعدد سعی شد تا حتی‌الامکان تأثیر تمامی پارامترهای حائز اهمیت بر روی سیستم دیوار برشی مرکب مشخص گردد، هرچند در این پژوهش‌ها مقایسه‌ی خاصی میان میزان تأثیرگذاری انواع پارامترهای مختلف اعم از مقاومتی و هندسی نشده است. از طرفی این مقایسه به علت آن که می‌تواند دید مناسبی جهت طراحی در اختیار طراحان قرار دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

### ۳- روش تحقیق

در این پژوهش سعی شده است تا با انجام یک مطالعه‌ی عددی بر روی مقاومت برشی سیستم دیوار برشی مرکب با بهره‌گیری از نمونه‌های متعدد، به نتیجه‌ی منطقی در مورد متغیرهای مؤثر بر عملکرد این سیستم دست یافت. پس از شناخت عوامل مؤثر، تلاش شده است تا میزان تأثیر این متغیرها و روش دستیابی به مقدار بهینه‌ی آن‌ها نیز شرح داده شود.

متغیرهای مختلفی برای بحث در مورد رفتار دیوار برشی مرکب مطرح شدند؛ اما سرانجام چهار متغیر در دو زمینه‌ی هندسه و مقاومت مصالح در نظر گرفته شدند. این متغیرها عبارت‌اند از ضخامت ورق فولادی، ضخامت پانل بتن مسلح، مقاومت ورق فولادی و مقاومت فشاری بتن. در طی این پژوهش سعی شد تا با تغییر مقادیر این متغیرها منطبق با علم آمار، آیین‌نامه‌ها، مسائل اجرایی و نتایج آزمایش‌های سایر پژوهشگران به ارزیابی مناسبی در مورد مقدار و چگونگی تأثیر هر کدام بر رفتار دیوار برشی مرکب نایل شد.

بدین منظور در ابتدا از نمونه‌های معتبر پژوهشگران پیشین برای فهم بهتر مسئله و افزایش دقت پیاده‌سازی مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس بهره‌جویی شده است. با مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزس و تغییر مکان‌های سیستم در دررفت‌های خاص صحت مدل‌سازی عددی تأیید می‌گردد. سپس با ساخت یک نمونه‌ی ابداعی و در عین حال کاربردی و منطبق با واقعیت، چگونگی عملکرد سیستم دیوار برشی مرکب در حالات مختلف بررسی شد. لازم به ذکر است برای مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس که یک نرم‌افزار شبیه‌سازی به روش اجزای محدود است استفاده شده و بارگذاری بر روی نمونه‌ها نیز به صورت چرخه‌ای انجام می‌گیرد.

در این پژوهش، پنج مقدار برای مقاومت فشاری بتن، دو مقدار برای مقاومت ورق فولاد، و دو مقدار نیز برای ضخامت ورق فولادی در نظر گرفته شده است. در مورد ضخامت پانل بتن مسلح، برای هر ضخامت مشخص ورق فولادی، سه ضخامت ویژه برای پانل بتنی در نظر گرفته شده است. بر این اساس، مجموعاً تعداد ۶۰ مدل را فراهم می‌شود. پس از تحلیل نمونه‌ها به کمک نرم‌افزار، پارامتر مقاومت نهایی سیستم در دررفت چهار درصد برداشت می‌شود؛ سپس با مقایسه‌ی این پارامتر مقدار تأثیر هر یک از متغیرهای چهارگانه بر رفتار سیستم دیوار برشی مرکب مشخص می‌گردد.

### ۳-۱- راستی‌آزمایی مدل‌سازی به کمک مدل‌های معتبر پیشین

<sup>12</sup> Guan

برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی عددی، مدلی مطابق با نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع مقایسه می‌شود. از میزان همخوانی داده‌های به‌دست‌آمده از مدل ساخته شده و نمونه‌های مرجع، صحت رویکرد و روند مدل‌سازی حاصل می‌شود.

در ادامه سعی شده است از دو نمونه مرجع معتبر در روند راستی‌آزمایی استفاده شود. نمونه آزمایشگاهی آستانه‌اصل و ژائو [۴]، به‌عنوان افراد پیش‌قدم در طراحی سیستم دیوار برشی مرکب، و نمونه آزمایش شده عرب‌زاده و همکاران [۱۴]، به‌عنوان یکی از پرکارترین افراد در این زمینه، نمونه‌های مناسبی جهت سنجش میزان درستی روند مدل‌سازی تشخیص داده شدند. در این راستا، از تمامی خصوصیات موردنظر جهت استفاده در شبیه‌سازی مدل اصلی اعم از رفتار مصالح و نوع آنالیز در نمونه‌های مربوط به راستی‌آزمایی نیز بهره‌جویی شده است تا امکان مقایسه فراهم گردد. از جمله می‌توان به استفاده از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی برای مصالح فولادی و مدل آسیب پلاستیک بتن<sup>۱۳</sup> اشاره کرد. همچنین در هر دو نمونه از حلگر صریح<sup>۱۴</sup> در نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل استفاده شده است که با افزایش گام‌های حل مسئله، انحراف سیستم از حالت تعادل را کاهش می‌دهد. در مورد المان‌های جزء محدود استفاده‌شده برای هر کدام از مقاطع در ادامه به تفصیل بحث خواهد شد.

### ۳-۱-۱- راستی‌آزمایی از طریق مدل آستانه‌اصل

آستانه اصل و ژائو [۴] در سال ۲۰۰۴ مدلی را جهت بررسی تفاوت عملکرد دیوار برشی مرکب سنتی و نوین طراحی نمودند که از مهم‌ترین مدل‌ها در این زمینه است. این مدل دو و نیم طبقه دارای جزئیات خاصی است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. ورق فولادی به‌کاررفته در این نمونه از جنس فولاد ASTM A36 و اجزای مرزی نیز از جنس فولاد ASTM A572 Gr50 هستند. در ساخت نمونه از بتن پیش‌ساخته با مقاومت ۲۸ مگاپاسکال بهره‌جویی شده است و اتصالات تیر به ستون نیز از نوع خمشی است. این نمونه با مقیاس ۱:۲ و دارای یک دهانه است. شکل ۱ کلیات نمای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شمایی از نمونه‌ی آزمایشی [۴].

جدول ۱ نیز ابعاد و مشخصات مصالح به‌کاررفته در مدل را نشان می‌دهد.

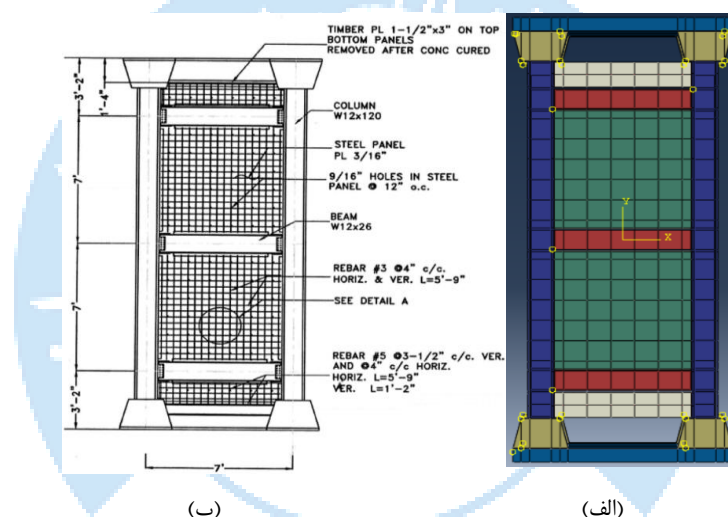
جدول ۱: مشخصات نمونه‌ی آزمایشی.

<sup>13</sup> Concrete Damage Plasticity

<sup>14</sup> Explicit Solver

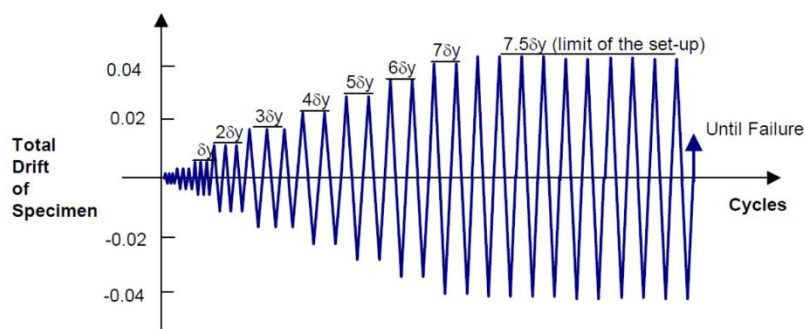
ستون‌ها	تیرها	ضخامت ورق فولادی	دیوار بتن مسلح		
			نوع دیوار	ضخامت دیوار	درصد آرماتور در هر جهت
W12x120	W12x26	4/8 mm	دارای پانل یکطرفه پیش ساخته	75 mm	0.7/92

سایر مشخصات نمونه اعم از محل جاگذاری آرماتورها، فواصل اجزا از یکدیگر و اندازه‌ی مقاطع در شکل ۲ نشان داده شده است. تمامی مشخصات و اندازه‌های فوق در نرم‌افزار پیاده‌سازی شده و شمای کلی نمونه‌ی ساخته شده در نرم‌افزار نیز در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲: مدل‌سازی نمونه‌ی آستانه اصل. (الف) پیاده‌سازی شمای کلی نمونه در نرم‌افزار و (ب) اندازه‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی [۴].

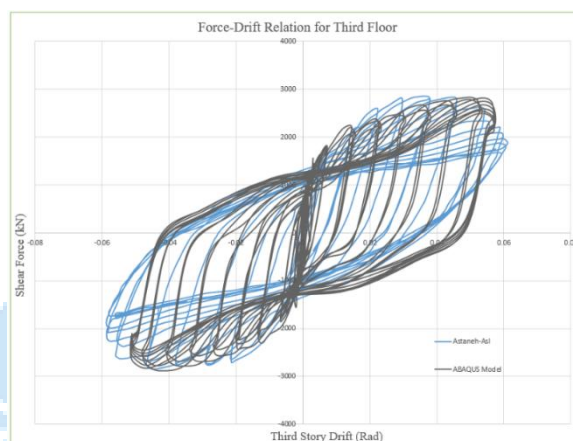
از دیگر نکات حائز اهمیت در مورد مدل‌سازی این نمونه، پیاده‌سازی روند و نحوه‌ی بارگذاری آن است. روند بارگذاری با استفاده از روش پیشنهادشده در دستورالعمل بارگذاری ATC 24 [۱۵] به دست آمده، در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳: نمودار بارگذاری اعمالی به نمونه [۲].

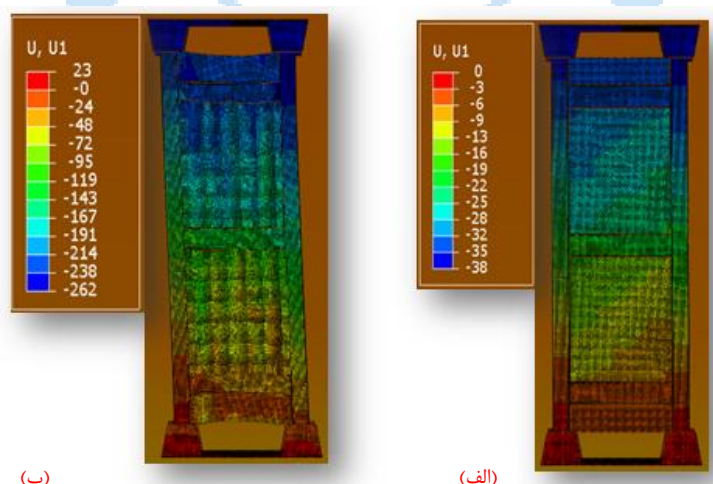
برای این نمونه تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم برابر با  $22/5$  میلی‌متر متناظر با  $0/006$  دررفت پیش‌بینی می‌شود. همچنین در این دررفت پیش‌بینی می‌شود که نمونه دچار تسلیم گردد. دررفت کلی نمونه به صورت تقسیم تغییر مکان بالای نمونه بر کل ارتفاع آن در نظر گرفته می‌شود و دررفت هر طبقه نیز به صورت تقسیم تغییر مکان نسبی آن طبقه بر ارتفاع همان طبقه محاسبه می‌گردد.

از مهم‌ترین معیارها برای سنجش صحت مدل‌سازی مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه‌ی مرجع با منحنی هیستریزس نمونه‌ی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار است. بدین منظور منحنی‌های هیستریزس پیش‌گفته که در آزمایش پیش‌رو بیانگر تغییرات نیروی برشی پایه در برابر دررفت طبقه‌ی سوم هستند، روی هم قرار گرفته‌اند که توافق مناسب آن‌ها در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴: روی هم گذاری منحنی‌های هیستریزس آزمایش تجربی و مدل نرم‌افزاری.

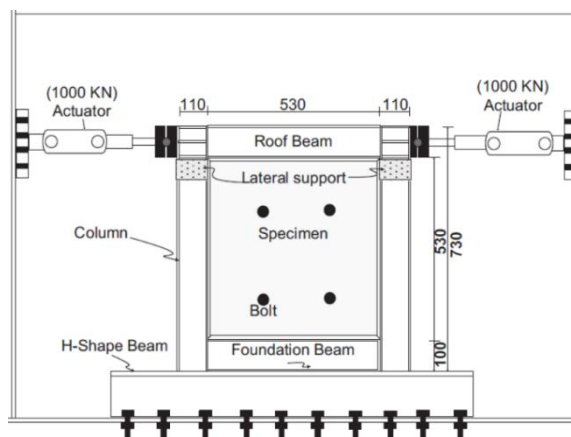
در این پژوهش دررفت  $0/006$  رادیان به عنوان نقطه‌ی شروع تسلیم نمونه و با تغییر مکان جانبی فوقانی  $38$  میلی‌متر به دست آمده است؛ همچنین طبق نتایج این پژوهش نقطه‌ی شکست نیز در دررفت  $0/042$  رادیان بوده و حداکثر تغییر مکان سازه در آن  $267$  میلی‌متر می‌باشد که رفتار متناظر آن با اندکی تفاوت در نرم‌افزار در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: حداکثر تغییر مکان جانبی فوقانی در دررفت (الف)  $0/006$  رادیان و (ب)  $0/042$  رادیان.

### ۳-۱-۲- راستی آزمایشی از طریق مدل عرب‌زاده و همکاران

در این مقاله آزمایش‌ها در دو گام طراحی شده‌اند که گام دوم شامل سه نمونه قاب تک دهانه یک طبقه با مقیاس ۱:۴ و چهار نمونه قاب تک دهانه سه طبقه با مقیاس ۱:۳ است. در تمامی نمونه‌ها از سیستم دیوار برشی مرکب برای تحمل بار جانبی بهره‌جویی شده است. شمای کلی نمونه‌های یک طبقه در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌ها به میلی‌متر هستند.



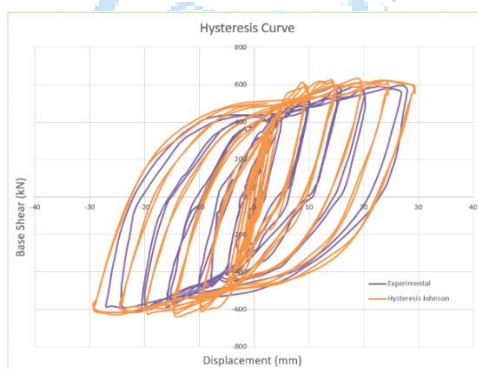
شکل ۶: پیکربندی عمومی نمونه‌های یک طبقه در مدل عرب زاده و همکاران [۱۲].

مشخصات کلی نمونه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات نمونه‌ی آزمایش (واحدها به میلی‌متر هستند).

مقاطع	ضخامت ورق	قطر بولتها	تعداد بولتها	درصد آرماتور	ضخامت پانل بتنی	شکاف
	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)			(میلی‌متر)	(میلی‌متر)
مشخصات	۲	۶	۴	۱	۳۰ در یک طرف	۱۱/۲۵

با روی هم گذاری منحنی هیستریزیس دو نمونه‌ی نرم‌افزاری و آزمایشگاهی توافق مناسب آن‌ها مشاهده می‌گردد که در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷: روی هم گذاری منحنی‌های هیستریزیس آزمایش تجربی و مدل نرم‌افزاری در نمونه‌ی عرب زاده و همکاران.

۳-۱-۳- مدل اصلی

۳-۱-۳-۱- هندسه و بارگذاری مدل اصلی

طبق آیین نامه AISC 341-16 [۱۶] و با فرض آن که ورق فولادی تحت برش خالص باشد، از رابطه‌ی (۱) می‌توان جهت برآورد نیروی منتقل شده از جانب ورق به اجزای مرزی (تیر و ستون) استفاده نمود.

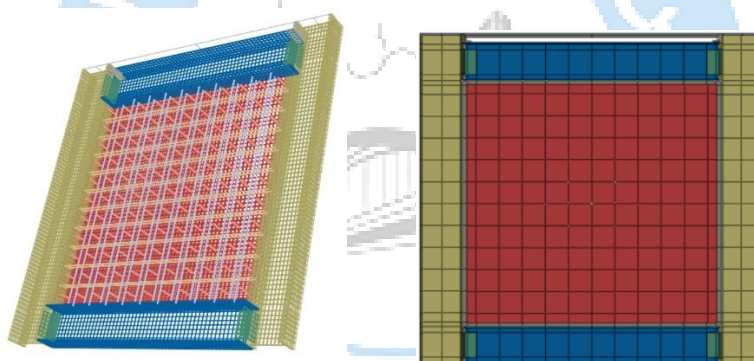
$$V = 0.6Af_y \quad (۱)$$

$$I_c \geq 0.00307 \left( \frac{t_w h^4}{L} \right) \quad (۲)$$

که در آن A سطح مقطع ورق و  $f_y$  نیروی تسلیم آن است. همچنین مشخصات مقطع ستون باید رابطه‌ی (۲) را نیز ارضا کند.

که در آن  $I_c$  ممان اینرسی مقطع ستون و  $L$ ،  $h$  و  $t_w$  به ترتیب عرض، ارتفاع و ضخامت ورق فولادی هستند.

شمای کلی مدل اصلی در نرم افزار و اجزای آن اعم از مقاطع تیرها و ستون‌ها، ورق فولادی، پانل بتنی، بولت‌ها، آرماتورها و نبشی جان در شکل ۸ قابل مشاهده است. فرض می‌شود که نمونه دارای یک دهانه بوده و ورق فولادی آن دارای عرض و ارتفاع سه متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. همچنین فاصله‌ای به اندازه‌ی ۵۰ میلی‌متر بین اجزای مرزی و پانل بتنی در نظر گرفته شده است. تمامی اتصالات به کاررفته در مدل نیز به صورت مفصلی بوده و از مقاطع نبشی جان به نحوی بهره‌جویی شده است که طول آن از دو سوم ارتفاع تیر بیشتر نباشد.

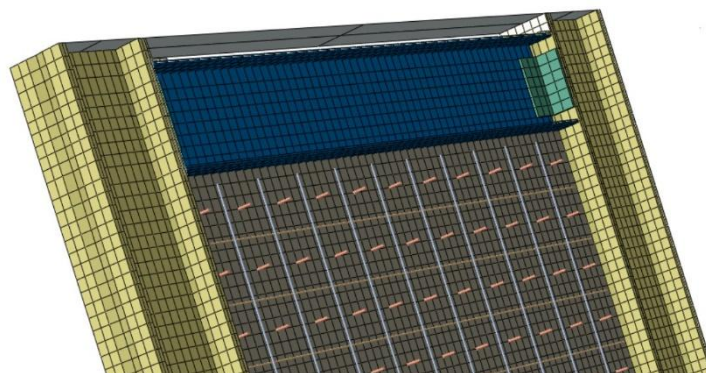


برای بارگذاری چرخه‌ای از دستورالعمل بارگذاری ATC 24 [۱۵] استفاده می‌شود. جهت دستیابی به عملکرد شبه‌استاتیکی، زمان بارگذاری باید به نحوی باشد که در لحظات آغازین نسبت انرژی جنبشی سیستم به انرژی داخلی آن بیشتر از ۰/۱ نباشد. بدین منظور و با اعمال زمان کلی ۱۸۶/۵ ثانیه نمودار بارگذاری طبق دستورالعمل حاصل می‌گردد. مقاطع نهایی اجزای مدل که براساس الزامات آیین‌نامه‌ای طراحی شده‌اند، با در نظر گرفتن تمامی موارد فوق در جدول ۳ مشخص شده است.

جدول ۳: مقاطع و ابعاد نهایی اجزای مدل اصلی.

جزء	مقطع تیر	مقطع ستون	ورق فولادی	برشگیر	آرماتور Y	آرماتور X	نبشی جان
مقطع یا ابعاد	W18x76	W18x158	۳۰۰۰×۳۰۰۰×۱۰ mm <sup>3</sup>	۳۷/۵mm×۱۳ mm <sup>2</sup>	۲۸۸۲mm×۱۳ mm <sup>2</sup>	۲۸۶۳mm×۱۳ mm <sup>2</sup>	۳۰۰×۳۰۰×۱۵ mm ۲L

در شکل ۹ محل قرارگیری آرماتورهای جهت X و Y، بولت‌ها و نبشی جان به تصویر کشیده شده است.



شکل ۹: جانمایی آرماتورهای جهت X و Y، بولت‌ها و نبشی جان در مدل اصلی.

### ۳-۱-۳-۲- مشخصات مصالح، قیدها و شرایط مرزی

جهت مدل‌سازی مصالح فولادی از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی [۱۷-۲۱] و برای مدل‌سازی مصالح بتنی از مدل آسیب پلاستیک بتن [۲۲-۲۴] استفاده شده است. از طرف دیگر با توجه به آن که نرم‌افزار آباکوس به‌عنوان یک نرم‌افزار بر پایه‌ی اجزای محدود شناخته می‌شود و از مهم‌ترین نکات در تحلیل اجزای محدود یک مدل، شبکه‌بندی اجزای آن است؛ در این بخش با انجام یک تحلیل حساسیت شبکه مناسب‌ترین اندازه‌ی شبکه‌بندی جهت ورود به نرم‌افزار ارائه شده است، بدین منظور یک نمونه‌ی خاص تحت اندازه‌های متفاوت شبکه تحلیل می‌شود و مقداری از اندازه‌ی شبکه که با کاهش آن تأثیر چندانی در مقاومت برشی سیستم مشاهده نمی‌گردد به‌عنوان اندازه‌ی مناسب شبکه‌بندی مشخص می‌شود. پس از انجام این آنالیز مقدار ۵۰ میلی‌متر به‌عنوان اندازه‌ی مناسب شبکه تعیین شده و شبکه‌بندی نهایی مدل طبق آن انجام می‌گیرد.

در مدل‌سازی پیش‌رو جهت ساده‌سازی از قید Tie برای شبیه‌سازی اتصالات جوشی و اتصال بولت‌ها به ورق فولادی بهره‌جویی شده است. از طرف دیگر میلگردها به صورت Embed درون پانل بتنی مدفون می‌شوند که در این حالت درجه آزادی انتقالی گره المان مدفون شده حذف می‌شوند و درجه آزادی گره‌های المان میزبان با توجه به درون‌یابی تعیین می‌گردد. درجه‌های آزادی انتقالی گره‌های پایینی سیستم به‌طور کامل بسته شده و با فرض وجود تیر و سقف، تمام درجات آزادی انتقالی خارج از صفحه‌ی سیستم در گره‌های بالایی آن نیز بسته شده‌اند.

برای تمامی اجزایی که با یکدیگر در تماس هستند دو رفتار در راستای عمودی و مماسی تعریف شده است و جهت جلوگیری از نفوذ اجزا به داخل یکدیگر از رفتار فشاری با ویژگی تماس سخت در راستای عمودی استفاده شده است؛ به‌گونه‌ای که اجزا بعد از برخورد بتوانند از هم جدا شوند. همچنین در مدل‌سازی برهم‌کنش میان ورق فولادی و پانل بتنی از مدل مماسی کولمب<sup>۱۵</sup> بهره‌جویی شده که با توجه به پژوهش‌های پیشین ضریب اصطکاک موجود در این مدل در بازه‌ی ۰ تا ۰/۷ تعیین گردیده است؛ قابل به ذکر است که در این پژوهش این مقدار ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۲۵-۲۷].

### ۳-۱-۳-۳- شیوه‌ی تحلیل و نوع المان جزء محدود در نرم‌افزار

<sup>15</sup> Coulumb

جهت تحلیل نمونه‌های ساخته شده در محیط نرم‌افزار تحت بار چرخه‌ای از حلگر صریح بهره‌جویی شده است. با وجود این که در این روش همگرایی سیستم در هر مرحله بررسی نمی‌شود، ولی برای کم کردن انحراف سیستم از حالت تعادل تعداد گام‌های حل مسئله افزایش می‌یابد. این امر خود موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی پژوهش شده و برای شبیه‌سازی مسائل دارای تغییر شکل‌های بزرگ و یا مشخصات مصالح پیچیده مناسب است. بدین ترتیب جهت شبیه‌سازی اجزای مرزی نمونه‌ها از حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و نوع المان اجزای مختلف در جدول ۴ مشخص گردیده است.

جدول ۴: متغیرهای مختلف و مقادیر به کاررفته‌ی آن‌ها در مدل‌سازی.

نام جز	مقطع جز	نوع المان جز محدود
ورق فولادی	با ضخامت متغیر ۵ و ۱۰ میلی‌متر	S4R <sup>16</sup>
پانل بتنی	با چهار ضخامت متغیر ۵۰، ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر	C3D8R <sup>17</sup>
جز قائم	W1۸×۱۵۸	S4R
جز افقی	W1۸×۷۶	S4R
برشگیرها	به قطر ۱۰ میلی‌متر	B31 <sup>18</sup>
آرما تورها	۲۵٪ سطح مقطع پانل بتنی	T3D2 <sup>19</sup>
نبشی جان	۲L ۳۰۰×۳۰۰×۱۵	C3D8R

### ۳-۱-۳-۴- متغیرهای مورد مطالعه و مقادیر آن‌ها

همان‌طور که بیان شد بررسی پارامتری چهار متغیر پیش‌گفته در دستور کار است، بدین منظور با استفاده از جدول ۵ و اعمال مقادیر موجود در آن به بررسی اثر تغییرات هر کدام از این پارامترها بر رفتار سیستم دیوار برشی مرکب پرداخته می‌شود.

جدول ۵: متغیرهای

متغیر	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	مقاومت تسلیم ورق فولادی (مگاپاسکال)	ضخامت ورق فولادی (میلی‌متر)	ضخامت پانل بتنی (میلی‌متر)
مقادیر	۳۲-۲۶-۲۰/۴۵-۳۹-۵	۳۶۰-۲۴۰	۱۰-۵	۱۰۰-۸۰-۷۰-۵۰

با توجه به آن که بتن مورد استفاده در این پژوهش در رده‌ی بتن با مقاومت معمولی است، مقاومت فشاری آن در بازه‌ی ۲۰ تا ۴۵ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود که با میانگین‌گیری، سایر مقادیر نیز حاصل می‌شوند. از طرفی فولادهای مصرفی موجود در بازار غالباً دو نوع St-37 و St-52 هستند که به ترتیب مقاومت تسلیمی برابر با ۲۴۰ و ۳۶۰ مگاپاسکال دارند. همچنین در آیین‌نامه نیز حداقل ضخامت لازم برای ورق فولادی برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که این عدد و مقداری پایین‌تر جهت مشاهده‌ی بهتر رفتار ورق فولادی و دستیابی به مقاومت پساکمانشی آن بعد از فروپاشی پانل بتنی انتخاب شده‌اند. در انتها نیز ضخامت پانل بتنی با توجه به مقدار کمینه‌ی مشخص شده در آیین‌نامه‌ی AISC341-16 [۱۶] که برای پانل‌های دو طرفه برابر با ۱۰۰ میلی‌متر است، در نظر گرفته شده است. مقادیر پایین‌تر نیز جهت بررسی چگونگی عملکرد سیستم و امکان سبک‌سازی سازه مشخص گردیده‌اند.

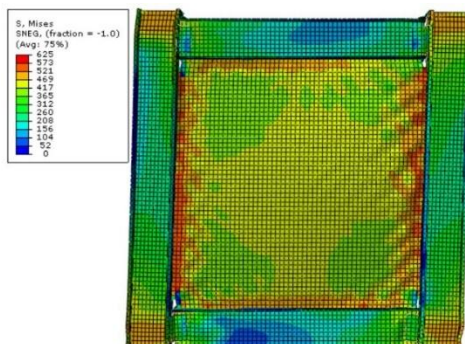
<sup>16</sup> Three-dimensional- 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration

<sup>17</sup> An 8-node linear brick, reduced integration

<sup>18</sup> A 2-node linear beam in space.

<sup>19</sup> A 2-node linear 3-D truss

به عنوان مثال در شکل ۱۰ کانتوری از تنش فون مایزس<sup>۲۰</sup> در اجزای مختلف سیستم در سیکل آخر بارگذاری برای نمونه‌ای با مشخصه‌ی ۲۴۰-۳۲/۵-۱۰۰-۵ آورده شده است که در آن اعداد به ترتیب از چپ به راست بیانگر ضخامت ورق فولادی، ضخامت پانل بتنی، مقاومت بتن و مقاومت فولاد هستند.



شکل ۱۰: تنش فون مایزس در اجزای مختلف سیستم در سیکل آخر بارگذاری برای نمونه با مقاومت تسلیم ورق فولادی ۲۴۰ و به ضخامت ۵ میلی‌متری با پوشش پانل بتنی به مقاومت فشاری ۳۲ مگاپاسکال و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر

#### ۴- بحث بر روی نتایج

پس از تحلیل ۶۰ مدل پیش‌گفته به کمک نرم‌افزار، نتایج زیر حاصل می‌شود که در چند بخش به آن پرداخته می‌شود. در ادامه سعی شده است با تغییر مقدار یک متغیر و ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها، تأثیرات ناشی از آن متغیر مشاهده شود. لازم به ذکر است نتایج عمدتاً در دررفت چهار درصد بررسی می‌شوند که مطابق نتایج آزمایش‌های انجام پذیرفته، دررفت نهایی سیستم پیش از خرابی محسوب می‌شود [۴]. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، مقاومت برشی سیستم دیوار برشی مرکب به عنوان مشخصه پاسخ مورد نظر در این پژوهش مشخصه‌ی در نظر گرفته شده است. افزون بر این، ثبت تغییر مکان لحظه‌ای تحلیل، منحنی هیستریزیس نمونه‌ها را نیز به دست می‌دهد.

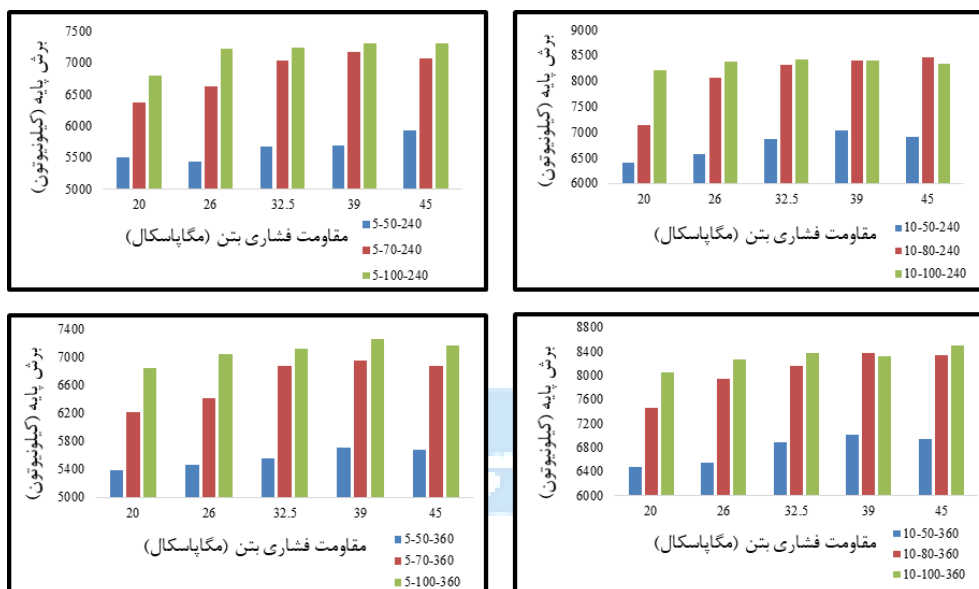
#### ۴-۱- تأثیر تغییرات ضخامت پانل بتنی

یکی از پارامترهایی که بررسی اثر تغییرات آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، ضخامت پانل بتنی است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است در این قسمت یک سیستم نام‌گذاری به صورت X-Y-Z برای نمونه‌ها تعریف شده است که در آن X ضخامت ورق فولادی، Y ضخامت پانل بتنی و Z مقاومت ورق فولادی است. در شکل ۱۱ نمودارهایی آورده شده است که تغییرات مقاومت برشی سیستم را در برابر مقادیر مختلف ضخامت پانل بتنی و به ازای مقاومت‌های فشاری مختلف بتن در دررفت چهار درصد نشان می‌دهند. از بررسی و مقایسه‌ی نمودارها می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

- در دررفت چهار درصد مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت پانل بتنی مقاومت سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اما این مقدار افزایش در هنگام تغییر ضخامت پانل از مقدار متوسط به مقدار بیشتر از آن بسیار اندک است.
- با مقایسه‌ی بین نمونه‌های دارای ضخامت پانل بتنی ۸۰ و ۵۰ میلی‌متر، مشاهده می‌شود که این افزایش چشمگیر مقاومت، به ضخامت و مقاومت ورق فولادی نیز بستگی دارد به صورتی که در نمونه‌های دارای ورق فولادی با ضخامت ۵ میلی‌متر، با افزایش مقاومت ورق فولادی از ۲۴۰ به ۳۶۰ مگاپاسکال افزایش مقاومت سیستم کمتر می‌شود.
- با مقایسه‌ی بین نمونه‌های دارای ضخامت متوسط و بیشتر از آن مشخص می‌شود که این افزایش اندک مقاومت به ضخامت و مقاومت ورق فولادی نیز وابسته است به نحوی که در نمونه‌های دارای ورق فولادی با ضخامت ۵ میلی‌متر، با

<sup>20</sup> Von Mises

افزایش مقاومت ورق فولادی از ۲۴۰ به ۳۶۰ مگاپاسکال افزایش مقاومت سیستم نیز بیشتر می‌شود. از طرفی در نمونه‌های دارای ورق فولادی با مقاومت ۳۶۰ مگاپاسکال، با افزایش ضخامت ورق فولادی از ۵ به ۱۰ میلی‌متر مقدار این افزایش مقاومت کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱- تغییرات برش پایه سیستم در برابر تغییرات ضخامت پانل بتنی در حالات مختلف در دریافت چهار درصد.

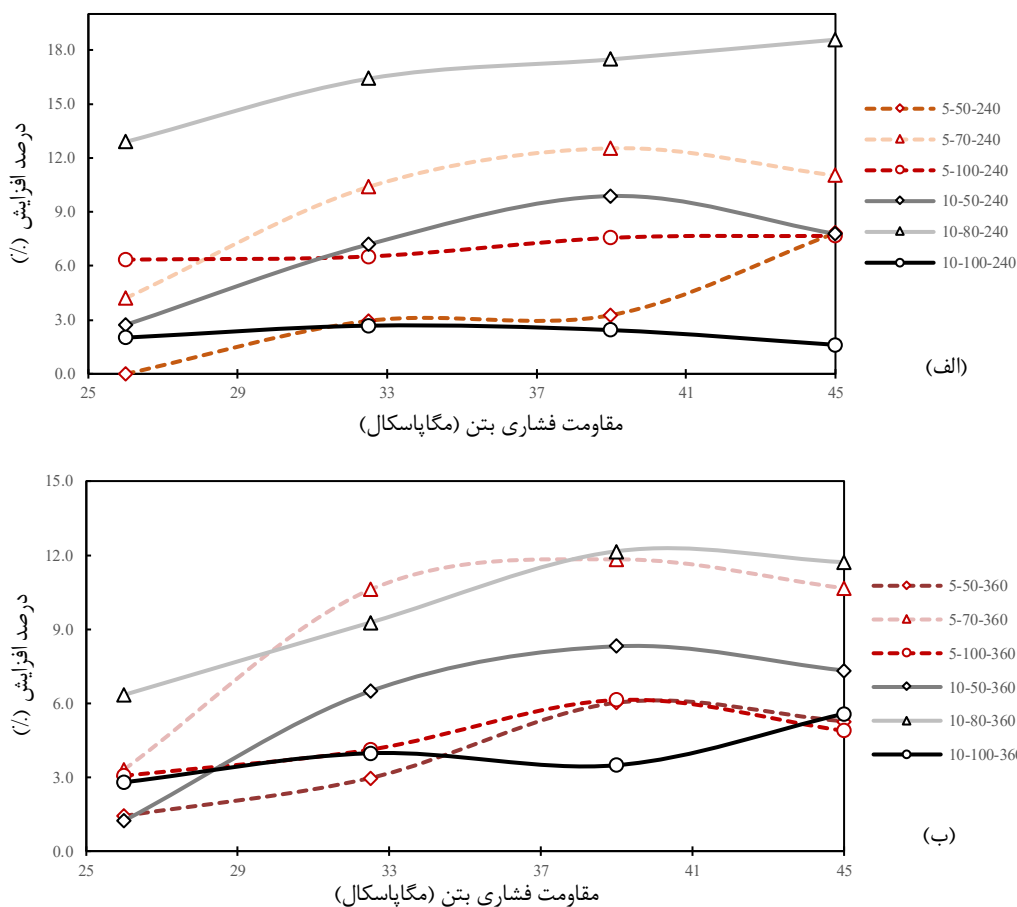
می‌توان نتیجه‌گیری نمود که اگرچه افزایش ضخامت پانل بتنی باعث افزایش مقاومت برشی سیستم می‌شود؛ اما برای مقدار آن باید حد خاصی در نظر گرفته شود چرا که با افزایش ضخامت پس از این حد، در عین حال که مصالح بسیار بیشتری مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما مقاومت برشی به مقدار اندکی افزایش پیدا می‌کند؛ می‌توان این حد را ضخامت بهینه‌ی پانل بتنی نام‌گذاری نمود. برای نمونه‌های دارای ورق فولادی به ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر این مقادیر ضخامت بهینه پانل بتنی به ترتیب، ۷۰ و ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند.

#### ۴-۲- تأثیر تغییرات مقاومت فشاری بتن

در شکل ۱۲، درصد افزایش مقاومت برشی سیستم در حالات مختلف هر نمونه نسبت به حالتی که مقاومت فشاری بتن همان نمونه برابر با ۲۰ مگاپاسکال است نشان داده شده است.

با بررسی و مقایسه‌ی نمودارهای فوق می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- همان‌گونه که قابل مشاهده است کلیت نمودارها افزایشی بوده و با افزایش مقاومت فشاری بتن مقاومت برشی دیوار افزایش پیدا می‌کند.
- بیشترین درصد افزایش مقاومت سیستم مربوط به مدل‌های با مقدار بهینه ضخامت پانل بتنی است که این نشان‌دهنده‌ی اهمیت استفاده از یک ضخامت مشخص و بهینه برای پانل‌هاست. به بیان دیگر با افزایش یا کاهش ضخامت پانل بتنی به مقادیری بالاتر یا پایین‌تر از ضخامت بهینه، افزایش مقاومت فشاری بتن به تغییری ناکارآمد یا حداقل کم‌بازده تبدیل می‌شود.



شکل ۱۲- درصد افزایش برش پایه‌ی سیستم در برابر تغییرات مقاومت فشاری بتن در حالات مختلف در دریافت چهار درصد برای مقاومت ورق فولادی (الف) ۲۴۰ مگاپاسکال و (ب) ۳۶۰ مگاپاسکال.

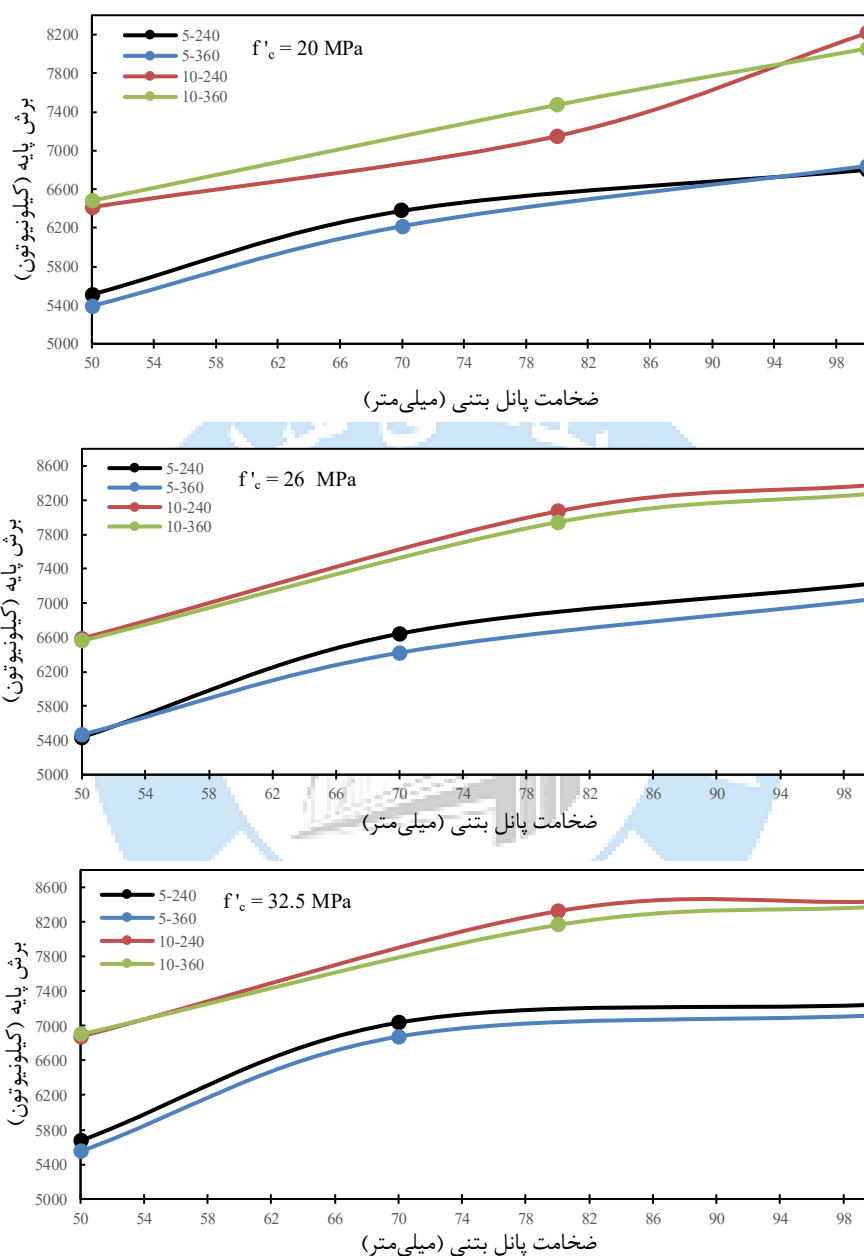
### ۳-۴- تأثیر تغییرات ضخامت و مقاومت ورق فولادی

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد ورق فولادی مهم‌ترین جزء سیستم دیوار برشی مرکب است و بررسی انواع مختلف آن و مشاهده‌ی نتایج حاصل شده کمک شایانی به فهم چگونگی عملکرد آن و متعاقباً دسترسی به یک دیدگاه مناسب برای طراحی بهینه و کارآمد آن خواهد داشت. در ادامه اثر تغییر مقاومت ورق فولادی بر روی نمونه‌های مختلف بررسی شده و نمودارها و مشاهدات حاصل از آن در شکل ۱۳ آورده شده است.

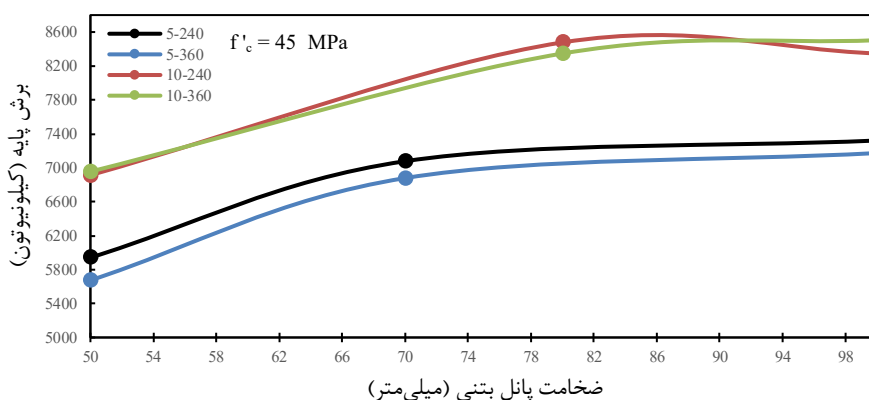
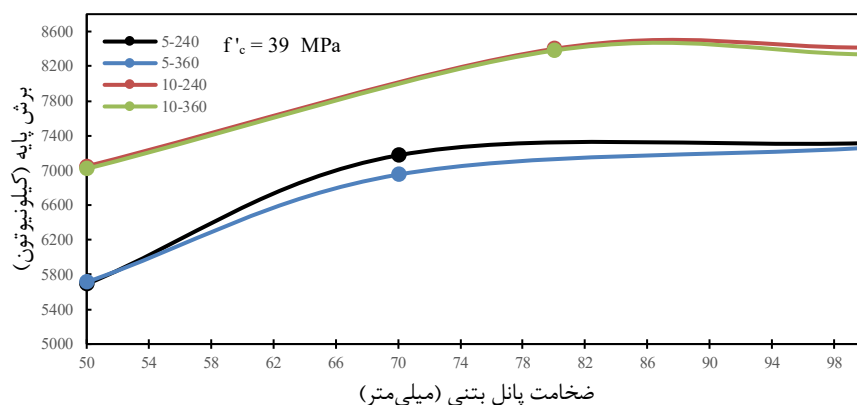
از بررسی و مقایسه‌ی نمودارها در رابطه با تغییرات مقاومت ورق فولادی می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

- با افزایش ضخامت ورق فولادی از ۵ به ۱۰ میلی‌متر، افزایش مقاومت برشی چشمگیری در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه‌ی آن حدود ۲۴ درصد است.
- می‌توان بیان کرد مقدار افزایش مقاومت برشی سیستم به عواملی همچون ضخامت پانل بتنی و مقاومت ورق فولادی بستگی دارد، اما میزان تأثیر آن‌ها در مقایسه با اثر ضخامت ورق فولادی قابل چشم‌پوشی کردن است.
- با افزایش ضخامت ورق فولادی از ۵ به ۱۰ میلی‌متر، نمونه‌های دارای ضخامت پانل بتنی کمتر (۵۰ میلی‌متر) افزایش مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند و این مسئله نقش پررنگ‌تر ورق فولادی در این نمونه‌ها را نمایان می‌سازد.

براساس نتایج آشکار است که نمونه‌های دارای فولاد با تنش جاری شدن بالاتر (۳۶۰ مگاپاسکال)، حساسیت نسبتاً بیشتری به تغییرات ضخامت ورق فولادی دارند و با افزایش ضخامت، نرخ افزایش مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه با فولاد دارای تنش تسلیم پایین‌تر (۲۴۰ مگاپاسکال) تجربه می‌کنند. هر چند این بالاتر بودن نرخ افزایش مقاومت تنها در حدود ۳ تا ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۱۳- درصد افزایش برش پایه‌ی سیستم در برابر تغییرات ضخامت و مقاومت ورق فولادی در حالات مختلف در دریفیت چهار درصد با مقاومت‌های فشاری متفاوت (ادامه دارد).



شکل ۱۳ (ادامه): درصد افزایش برش پایه‌ی سیستم در برابر تغییرات ضخامت و مقاومت ورق فولادی در حالات مختلف در دریافت چهار درصد با مقاومت‌های فشاری متفاوت.

از طرفی تغییر مقاومت ورق فولادی نیز آثاری در رفتار سیستم دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در تعدادی از نمونه‌ها با افزایش مقاومت ورق فولادی از ۲۴۰ به ۳۶۰ مگاپاسکال، مقاومت برشی سیستم به مقدار اندکی کاهش پیدا می‌کند که بیشترین مقدار آن حدود ۴/۵ درصد است.
- در سایر نمونه‌ها نیز مقاومت برشی سیستم به مقدار اندکی افزایش پیدا می‌کند که اکثریت آن‌ها بین صفر تا یک درصد بوده و بیشینه‌ی آن نیز ۴/۵ درصد است.
- به‌صورت کلی می‌توان عنوان کرد افزایش مقاومت ورق فولادی تأثیر چندانی در مقاومت برشی سیستم در گام‌های نهایی تحلیل ندارد و تنها در میانه‌های تحلیل باعث افزایش ناچیزی در مقاومت برشی سیستم می‌شود.

#### ۴-۴- تحلیل داده‌ها به کمک یادگیری ماشین

یادگیری ماشین، یک حوزه مهم در علم رایانه و هوش مصنوعی است که به رایانه‌ها و سیستم‌ها امکان می‌دهد از تجربه‌ها و داده‌ها یاد بگیرند و بدون نیاز به برنامه‌ریزی صریح، قواعد و الگوریتم‌های خاصی را بهینه‌سازی کنند. در واقع، هدف اصلی یادگیری ماشین، ایجاد الگوریتم‌ها و مدل‌هایی است که بتوانند از داده‌های ورودی خود الگوها و قواعدی را استخراج نمایند و بر اساس آن‌ها تصمیم‌گیری کنند یا پیش‌بینی صورت بگیرد.

از روش‌های یادگیری ماشین در تحلیل داده‌ها استفاده می‌شود، بدین منظور چند مدل یادگیری ماشین برای داده‌های خروجی نرم‌افزار توسعه یافته است. در این راستا از زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط ژوپیتر بهره‌جویی می‌گردد. همچنین برای بخش یادگیری

ماشین از کتابخانه‌ی sklearn کمک گرفته شده است. شایان ذکر است که sklearn یک کتابخانه‌ی متن‌باز در زبان برنامه‌نویسی پایتون است.

برای یادگیری ماشین سه مدل رگرسیون غیرخطی درجه دو، رگرسیون غیرخطی درجه سه و روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم به کار گرفته شده‌اند. رگرسیون غیرخطی درجه  $n$  روشی است که در آن ابتدا ورودی دریافت می‌شود و سپس با تولید عبارات حداکثر از درجه  $n$ ، وزن بهینه را برای عبارات تولید شده پیدا می‌کند [۲۸].

یکی از روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم XGBRegressor است. درخت تصمیم با تولید بازه‌های مختلف و متعدد برای ورودی، آن‌ها را دسته‌بندی می‌کند و سپس خروجی را بر اساس روش‌های عددی مانند میانگین‌گیری، پیش‌بینی می‌کند. لازم به ذکر است که روش XGBRegressor از چندین درخت تصمیم استفاده می‌کند، به طوری که خروجی هر درخت به عنوان ورودی درخت بعدی در نظر گرفته می‌شود. سپس با مشتق‌گیری و استفاده از قاعده زنجیره‌ای به تصحیح خطای خروجی هر درخت می‌پردازد [۲۹].

#### ۴-۴-۱- رابطه‌سازی برای دستیابی به مقاومت برشی سیستم به کمک چهار متغیر اصلی

در ابتدا ۶۰ داده خروجی نرم‌افزار آباکوس به دو دسته ۴۵ تایی و ۱۵ تایی تقسیم می‌شوند، به طوری که مدل‌ها بر روی ۴۵ داده تمرین داده شده و سپس بر روی ۱۵ داده‌ی دیده نشده تست می‌شوند. برای ارزیابی خروجی مدل از ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات استفاده می‌گردد.

در این بخش جهت تحلیل داده‌ها، چهار متغیر مقاومت فشاری بتن، ضخامت پانل بتن مسلح، ضخامت ورق فولادی و مقاومت ورق فولادی به عنوان ورودی و مقاومت برشی سیستم در دریافت چهار درصد به عنوان هدف در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر هدف در این بخش ارائه‌ی مدلی جهت پیش‌بینی مقاومت برشی سیستم بر اساس چهار متغیر اخیر است. یکی از روش‌های ارزیابی صحت این مدل بهره‌جویی از مشخصه‌ی ضریب تعیین است که یک معیار آماری برای ارزیابی تناسب بین مدل رگرسیون و داده‌ها است. این مقدار نشان می‌دهد چقدر از واریانس متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل در مدل توضیح داده می‌شود. مقدار ضریب تعیین بین صفر تا یک قرار می‌گیرد که معنای آن به شرح زیر است.

- مقدار صفر به معنای آن است که متغیرهای مستقل هیچ گونه توضیحی از واریانس متغیر وابسته ارائه نمی‌دهند.
- مقدار یک به معنای آن است که متغیرهای مستقل به طور کامل واریانس متغیر وابسته را توضیح می‌دهند.

با در نظر گرفتن چهار متغیر پیش‌گفته به عنوان متغیر، مقاومت برشی سیستم به عنوان هدف و پیاده‌سازی الگوریتم‌های لازم در پایتون جدول ۶ برای حالات مختلف مدل‌سازی به دست می‌آید.

جدول ۶: مشخصه‌های ارزیابی جهت رابطه‌سازی در حالات مختلف.

متغیرهای سنجش	رگرسیون خطی درجه دو	رگرسیون خطی درجه سه	روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم
ضریب تعیین نمونه‌های تمرین	۰/۹۸	۰/۹۹	۱/۰۰
ضریب تعیین نمونه‌های آزمون	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
خطای مجذور میانگین مربعات	۱۴۰/۹۸	۱۱۲/۴۶	۱۲۰/۱۱

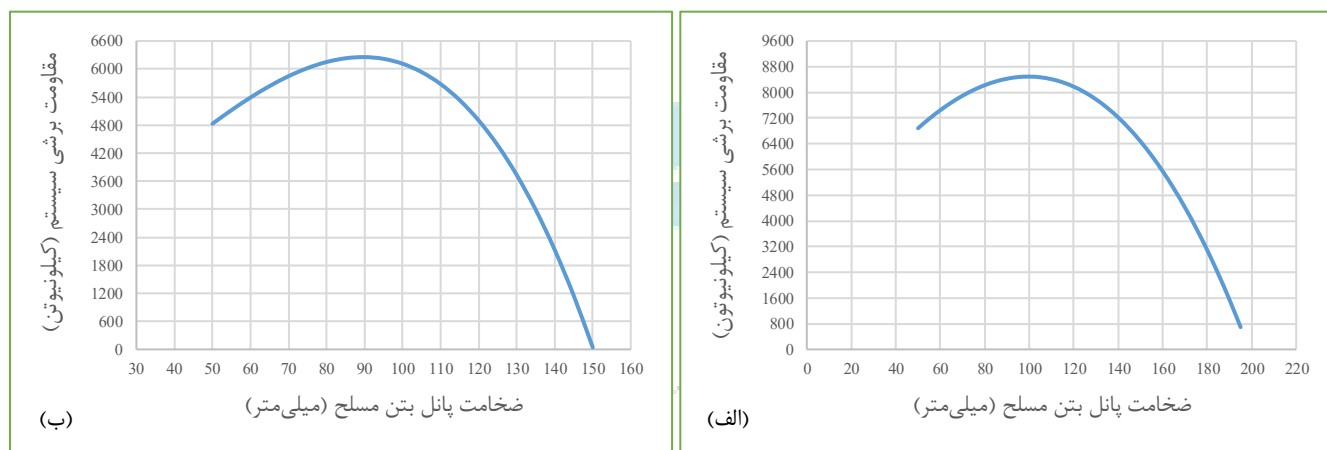
از جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های خروجی نرم‌افزار بسیار نظام‌مند هستند و با دقت مناسبی می‌توان برای آن‌ها رابطه‌سازی کرد. مقدار بالا و نزدیک به یک مشخصه‌ی ضریب تعیین در هر سه حالت شاهدی بر این مدعاست.

## ۴-۴-۲- بررسی اثر تغییرات ضخامت پانل بتن مسلح بر مقاومت برشی سیستم به کمک رگرسیون

## غیرخطی درجه سه

در این بخش با استفاده از مدل‌های به دست آمده اثر تغییر ضخامت پانل بتن مسلح در یک بازه‌ی وسیع بر مقاومت برشی سیستم در دررفت چهار درصد مشاهده می‌شود و سعی بر آن است تا بتوان به یک نتیجه‌گیری منطقی از افزایش ضخامت پانل بتن مسلح دست یافت. بدین منظور از هر سه روش پیش گفته می‌توان بهره جست؛ ولی به عنوان مثال روش رگرسیون غیرخطی درجه سه در نظر گرفته شده است.

برای هر دو مقدار ضخامت ورق فولادی این اثرات بررسی شده و در پی آن نتایجی به دست آمده‌اند که در شکل ۱۴ قابل مشاهده هستند.



شکل ۱۴: تغییرات مقاومت برشی سیستم در برابر تغییرات ضخامت پانل بتن مسلح در دررفت چهار درصد با استفاده از رگرسیون غیرخطی درجه سه در حالتی که ضخامت ورق فولادی (الف) ۱۰ میلی‌متر و (ب) ۵ میلی‌متر باشد.

در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که برای ورق فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر تا ضخامت پانل بتنی ۱۰۰ میلی‌متر مقاومت برشی سیستم صعودی و برای مقادیر بالاتر از آن نمودار دچار نزول می‌گردد؛ همچنین برای ورق فولادی ۵ میلی‌متری نیز پس از افزایش ضخامت پانل بتن مسلح به مقادیری بالاتر از ۹۰ میلی‌متر، مقاومت برشی سیستم دچار کاهش می‌شود.

از بررسی نمودارهای فوق می‌توان نتیجه‌گیری نمود که اگرچه در ابتدای امر با افزایش ضخامت پانل بتن مسلح افزایش مقاومت برشی مشاهده می‌گردد، اما این افزایش مقاومت حدی دارد و در صورت افزودن به ضخامت پانل پس از این حد، مقاومت دچار افت شده یا حداقل افزایش نمی‌یابد.

شایان ذکر است که هرچه داده‌های ورودی به مدل‌های مبتنی بر رگرسیون غیرخطی بیشتر باشد، دقت رابطه‌سازی بیشتر است و در پژوهش پیش‌رو از تعداد محدود ۶۰ مدل برای رابطه‌سازی بهره‌جویی شده است؛ فلذا هدف از بررسی داده‌ها به کمک یادگیری ماشین در این مطالعه تنها آشنایی با کارکرد آن است و دستیابی به مدلی قابل‌اتکا نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

## ۴-۴-۳- تأثیر متغیرهای مختلف بر روی مقاومت برشی سیستم به کمک روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم

در آخرین قسمت از این فصل به بررسی مقدار تأثیر هر یک از متغیرهای چهارگانه بر مقاومت برشی سیستم با استفاده از روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم پرداخته می‌شود. با استفاده از الگوریتم‌های موردنیاز و رابطه‌های به دست آمده در قسمت‌های پیشین

می توان تأثیر هر کدام از متغیرهای مقاومت فشاری بتن، ضخامت پانل بتن مسلح، ضخامت ورق فولادی و مقاومت ورق فولادی را بر مقاومت برشی سیستم مشاهده نمود.

لازم به ذکر است در این مرحله نیز بهره گیری از هر سه روش رگرسیون غیرخطی درجه دو و سه و همچنین روش های مبتنی بر درخت تصمیم میسر است؛ ولی به دلیل کارآمدی بیشتر مورد اخیر انتخاب می شود. بدین منظور با انجام عملیاتی می توان به جدول ۷ دست یافت.

متغیر	ضخامت ورق فولادی	ضخامت پانل بتن مسلح	مقاومت فشاری بتن	مقاومت ورق فولادی
درصد وابستگی	۶۲	۳۲	۵	۱

جدول ۷: درصد وابستگی مقاومت برشی سیستم به هریک از متغیرهای چهارگانه با استفاده از روش های مبتنی بر درخت تصمیم در دریافت چهار درصد.

همان گونه که قابل مشاهده است، با استفاده از این روش به دست می آید که اثر تغییرات ضخامت اجزای سازه ای نظیر پانل بتن مسلح و ورق فولادی به مراتب بیشتر از مقاومت این مصالح است. به عبارت دیگر مقاومت برشی سیستم به ضخامت اجزای تشکیل دهنده آن وابستگی بیشتری دارد.

## ۵- نتیجه گیری

این پژوهش ابتدا به بررسی جامع سیستم های دیوار برشی مرکب پرداخته و مشخصات مصالح فولادی و بتنی به روش های نوین مدلسازی شدند. در این مطالعه، به جای استفاده از مدل های سنتی برای سخت شوندگی فولاد، از مدل سخت شوندگی ترکیبی بهره گرفته شده است که به شبیه سازی دقیق تر رفتار فولاد در برابر بارگذاری های چرخه ای کمک می کند. همچنین، رابطه در هم تنیدگی میان ورق فولادی و پانل بتنی در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است، که عملکرد برهم کنش این دو ماده را بهبود می بخشد. با انتخاب متغیرهای مؤثر شامل ضخامت ورق فولادی، ضخامت پانل بتنی، مقاومت فشاری بتن و مقاومت تسلیم ورق فولادی، تأثیر این پارامترها بر عملکرد سیستم دیوار برشی مرکب مورد تحلیل قرار گرفت. تفاوت عمده این تحقیق با مطالعات پیشین در عدم بررسی مقدار بهینه این پارامترها بوده است که در این مطالعه به طور جامع پوشش داده شده است. با استفاده از شبیه سازی های عددی در محیط نرم افزار آباکوس، ۶۰ مدل مختلف حاصل از ترکیب های مختلف این متغیرها مورد بررسی قرار گرفتند. مهم ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر هستند:

- (۱) تغییرات مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه های دارای ضخامت پانل بتنی بهینه ترین تأثیر را دارد و مقاومت برشی سیستم در این نمونه ها با افزایش مقاومت فشاری بتن دستخوش تغییرات بیشتری می شود.
- (۲) تغییرات مقاومت ورق فولادی بر روی نمونه های دارای ورق فولادی ضخیم تر تأثیر بیشتری دارد و این نمونه ها دچار افزایش مقاومت بیشتری می شوند؛ به عبارت دیگر برای نمونه های دارای ورق فولادی با ضخامت ۱۰ میلی متر استفاده از فولاد مرغوب تر توجیه بیشتری دارد.

- ۳) به طور کلی مشخصات مربوط به ابعاد و هندسه‌ی مصالح تأثیر بیشتری بر مقاومت برشی سیستم و رفتار اجزای آن نظیر کمانش ورق فولادی دارند. به عبارت دیگر دو متغیر ضخامت ورق فولادی و ضخامت پانل بتنی نسبت به مقاومت هر کدام عملکرد سیستم را دستخوش تغییرات بیشتری نمودند.
- ۴) جهت کنترل کمانش ورق فولادی لازم است که ضخامت اجزا با یکدیگر تناسب داشته باشند، بدین صورت که با افزایش ضخامت ورق فولادی، ضخامت پانل بتن مسلح نیز افزایش پیدا کند.
- ۵) در طی تحلیل مدل‌ها، مشاهده شد که افزایش مقدار هر کدام از متغیرهای فوق الزاماً باعث افزایش مقاومت برشی سیستم نمی‌شوند و یک حد بهینه برای این تغییرات وجود دارد.
- ۶) یکی از متغیرهایی که مقدار بهینه برای آن بسیار حائز اهمیت است پانل بتنی می‌باشد. بهره‌گیری از مقدار بهینه‌ی این پارامتر علاوه بر تأثیرات چشمگیر آن بر مقاومت و کاهش هزینه‌ی ساخت، باعث بهبود عملکرد سیستم نیز می‌شود؛ چراکه با به حداقل رساندن کمانش ورق فولادی، هدف اصلی سیستم دیوار برشی مرکب را فراهم می‌آورد.
- ۷) با تحلیل خروجی‌های نرم‌افزار به کمک حوزه‌ی یادگیری ماشین علاوه بر تأیید نتایج فوق از یک دیدگاه جدید، مشخص شد که متغیرها و خروجی‌های مذکور بسیار نظام‌مند هستند. بر این اساس، ایجاد مدل‌های عددی پیش‌بینی‌کننده و رابطه‌سازی برای آن‌ها امکان‌پذیر است. به عبارت دیگر به وسیله‌ی این حوزه و استفاده از داده‌های پژوهش‌های پیشین می‌توان نتایج مورد نیاز برای پژوهش‌هایی که مطالعه‌ی دشوار و زمان‌بری را دارند بدون انجام آن‌ها پیش‌بینی نمود.

## مراجع

- Huang, S.-T., Y.-S. Huang, A. He, X.-L. Tang, Q.-J. Chen, X. Liu, and J. Cai (2018), "Experimental study on seismic behaviour of an innovative composite shear wall", (in Journal of Constructional Steel Research, vol. 148, pp. 165-179).
- Astaneh-Asl, A., *Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls*. 2002: Structural Steel Educational Council Moraga, CA, USA.
- Gharaei-Moghaddam, N., M. Meghdadian, and M. Ghalehnavi (2023), "Innovations and advancements in concrete-encased steel shear walls: A comprehensive review", (in Results in Engineering, p. 101351).
- Zhao, Q. and A. Astaneh-Asl (2004), "Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls", (in Journal of Structural Engineering, vol. 130, no. 2, pp. 271-284).
- Rahai, A. and F. Hatami (2009), "Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings", (in Journal of Constructional Steel Research, vol. 65, no. 7, pp. 1528-1537).
- Wang, B., H. Jiang, and X. Lu (2017), "Seismic performance of steel plate reinforced concrete shear wall and its application in China Mainland", (in Journal of Constructional Steel Research, vol. 131, pp. 132-143).
- Qi, Y., Q. Gu, G. Sun, B. Zhao, and H. Wang (2019), "Concrete panel thickness demand for the design of composite steel plate shear wall", (in The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 28, no. 8,
- Kim, S., T. Moon, and S.J. Kim (2020), "Effect of uncertainties in material and structural detailing on the seismic vulnerability of RC frames considering construction quality defects", (in Applied Sciences, vol. 10, no. 24, p. 8832).
- Wang, D., Y. Zhang, Y. Zhu, C. Wu, Y. Zhou, and Q. Han (2021), "Mechanical performance of sustainable modular prefabricated composite shear panels under cyclic loading", (in Journal of Constructional Steel Research, vol. 179,
- Yang, X., L. Xu, and J. Pan (2021), "Mechanical behavior of full-scale composite steel plate shear wall restrained by ECC panels", (in Journal of Building Engineering, vol. 44,

11. Najm, H.M., A.M. Ibrahim, M.M.S. Sabri, A. Hassan, S. Morkhade, N.S. Mashaan, M.M.A. Eldirderi, and K.M. Khedher (2022), "Evaluation and Numerical Investigations of the Cyclic Behavior of Smart Composite Steel-Concrete Shear Wall: Comprehensive Study of Finite Element Model", (in *Materials*, vol. 15, no. 13, p. 4496).
12. Javadi, M., E.I. Saavedra Flores, S.J. Yanez, S. Avudaiappan, J.C. Pina, and C.F. Guzmán (2023), "Investigation of the influence of design parameters on the strength of steel-concrete composite shear walls by finite element simulations", (in *Buildings*, vol. 13, no. 1, p. 187).
13. Guan, M., X. Wang, J. Heng, M. Sha, and H. Du. *Parametric study on lateral behaviour of composite shear walls with high-strength manufactured sand concrete*. in *Structures*. 2023. Elsevier.
14. Arabzadeh, A., M. Soltani, and A. Ayazi (2011), "Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings", (in *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 7, pp. 842-854).
15. "ATC-24. Guide lines for Seismic testing of components of steel structures. Report 24, Applied Technology Council. Redwood City:CA;1992.", (in
16. *AISC 314-16, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. 2016, 130 East Randolph Street, Suite 2000, Chicago, Illinois.
17. Chaboche, J., K.D. Van, and G. Cordier (1979), "Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel", (in
18. Kaufmann, E., B. Metrovich, and A. Pense (2001), "Characterization of cyclic inelastic strain behavior on properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr. 50 rolled sections", (in
19. Chaboche, J.-L. (2008), "A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories", (in *International journal of plasticity*, vol. 24, no. 10, pp. 1642-1693).
20. Hedayat, A.A., E.A. Afzadi, and A. Iranpour. *Prediction of the bolt fracture in shear using finite element method*. in *Structures*. 2017. Elsevier.
21. Morrison, M., S. Quayyum, and T. Hassan (2017), "Performance enhancement of eight bolt extended end-plate moment connections under simulated seismic loading", (in *Engineering Structures*, vol. 151, pp. 444-458).
22. Lubliner, J., J. Oliver, S. Oller, and E. Oñate (1989), "A plastic-damage model for concrete", (in *International Journal of solids and structures*, vol. 25, no. 3, pp. 299-326).
23. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, *ABAQUS: theory manual*. Vol. 2. 1997: Hibbitt, Karlsson & Sorensen.
24. Alfarah, B., F. López-Almansa, and S. Oller (2017), "New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures", (in *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 70-86).
25. Wei, M.-W., J.R. Liew, and X.-Y. Fu (2017), "Panel action of novel partially connected buckling-restrained steel plate shear walls", (in *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 483-497).
26. Meghdadian, M. and M. Ghalehnovi (2019), "Improving seismic performance of composite steel plate shear walls containing openings", (in *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 336-342).
27. Mei, C., Y. Zhang, D. Wang, C. Wu, and Y. Xu. *Parameter optimal investigation of modular prefabricated two-side connected buckling-restrained steel plate shear wall*. in *Structures*. 2021. Elsevier.
28. Pedregosa, F. (2011), "Scikit-learn: Machine learning in python Fabian", (in *Journal of machine learning research*, vol. 12, p. 2825).
29. Chen, T. and C. Guestrin. *Xgboost: A scalable tree boosting system*. in *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*. 2016.