



Numerical Study of the Seismic Behavior of a Composite Shear Wall Consisting of Steel Sheet and Reinforced Concrete Cover

Hadis Hosaini¹, Ebrahim Khalilzadeh Vahidi^{2*}

¹M.Sc Student in Structure Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.16.2022

Revised: 06.01.2022

Accepted: 06.25.2022

Keyword:

Composite shear wall

Seismic behavior

Ultimate strength

Hardness

Dissipated energy

Ductility

*Corresponding Author:

Ebrahim Khalilzadeh Vahidi

Email:

e_vahidi2000@yahoo.com

ABSTRACT

A composite shear wall consisting of a steel sheet with a reinforced concrete cover is one of the most common systems resistant to lateral loads in tall structures. The main purpose of this study was to investigate the effect of reinforced concrete cover, steel sheet thickness, and door and window opening on the seismic behavior of steel frames with composite shear walls. For this purpose, in the present study, after validation of numerical modeling, 19 specimens of composite steel shear walls with a height of 3.2m and a span length of 5m were modeled. The results of this study show that the ultimate strength, stiffness, dissipated energy, and ductility in the model with a reinforced concrete cover without opening and with a steel sheet with a thickness of 15 mm, were respectively 12.24, 63.78, 7.82, and 4.37 times the reference model and in the same model without reinforced concrete cover, these values were correspondingly 8, 41.61, 4.46 and 6.24 times the reference model. In other words, due to the prevention of buckling of the steel sheet as a result of compressive force, the reinforced concrete cover increased the ultimate strength, dissipated energy, and ductility. In addition, in the reinforced concrete cover, increasing the thickness of the steel sheet from 10 to 15 mm had little impact on the ultimate strength.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

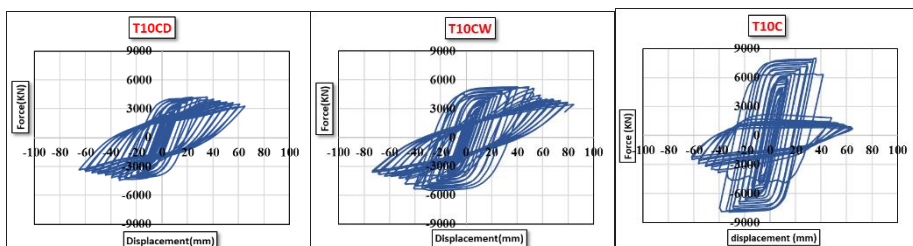
Composite steel shear wall is a steel shear wall reinforced with reinforced concrete coating on one or both sides of the steel sheet in order to prevent the buckling of the steel sheet. In AISC360 seismic criteria, this system is mentioned as composite steel shear wall. The reinforced concrete cover that is placed on one or both sides of the steel sheet is used in-situ or prefabricated, and its main role is to prevent the buckling of the steel sheet in the composite shear wall. This is done by connecting the steel sheet and the concrete cover with shear interfaces such as studs or shears. The presence of reinforcement in the concrete cover is to some extent malleable. In addition, steel sheets with a thickness of less than 10 mm are not recommended in composite steel shear walls according to AISC regulations. This is due to, firstly, thin sheets being problematic in transportation, manufacturing and installation, and secondly, such thin sheets might require a larger number of shear interfaces such as shears and studs to delay sheet buckling until sheet yielding for proper performance.

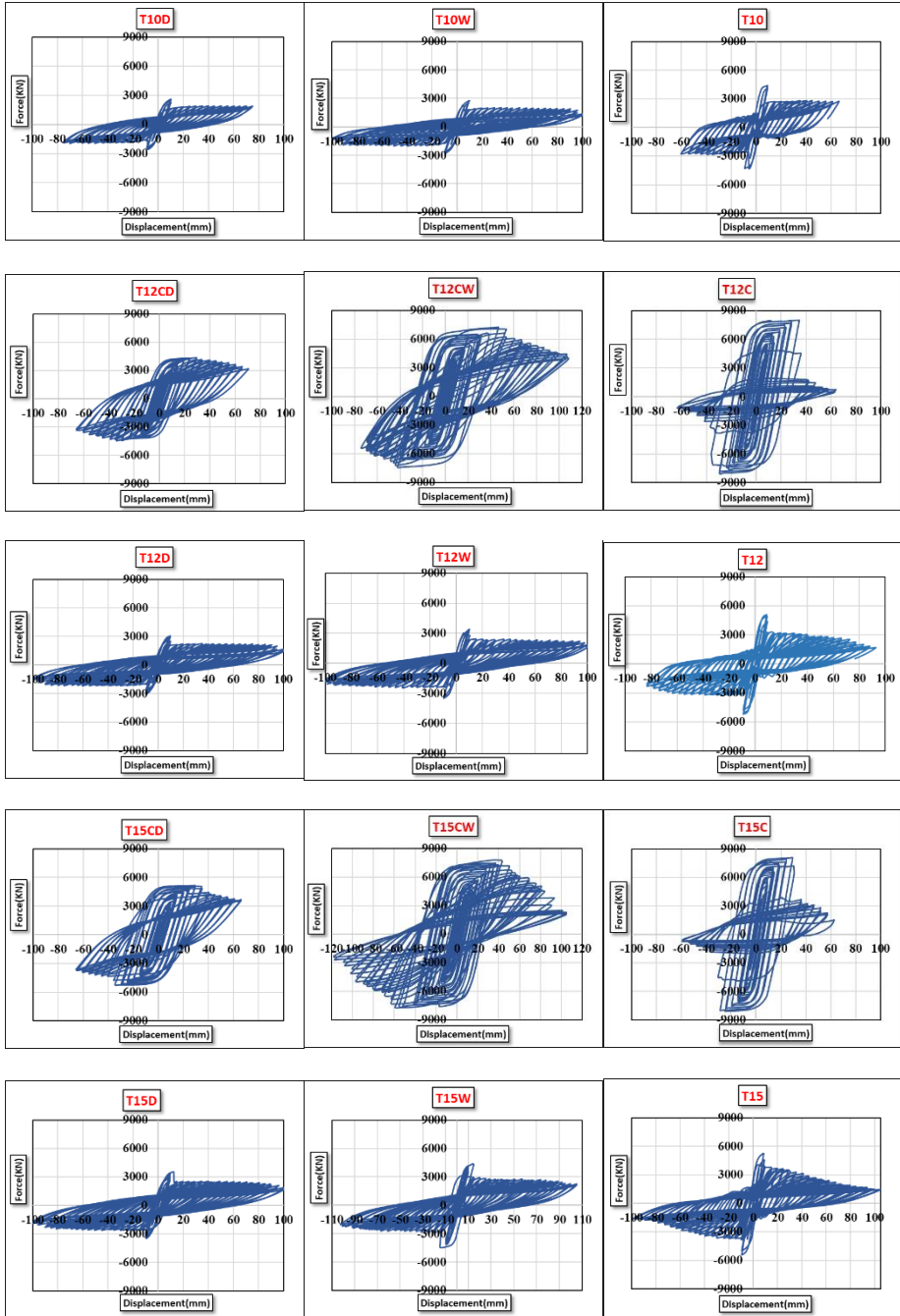
Methodology

According to previous research, the need to investigate the effect of factors such as door and window opening, concrete coating and steel plate thickness of composite shear wall is felt more than ever. For this purpose, in the present research, after the introduction and validation of numerical modeling in Abaqus software, the assumptions of modeling and the introduction of the studied numerical models were discussed. Then, the final strength, hardness, ductility and depreciated energy of the numerical samples were discussed and compared.

Results and discussion

In order to accurately evaluate the behaviour of the structure, it was necessary to check its hysteresis curves. Figures 4 and 5 respectively show the load-displacement cyclic diagram and how stress is distributed in the numerical examples. It is noteworthy that in Figure 5, the unit of stress is MPa.





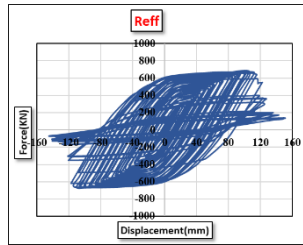


Figure 4. Cyclic load-displacement diagram

Conclusion

The results of this research are summarized as follows:

- 1- Covering reinforced concrete and increasing the thickness of the steel sheet delayed the buckling of the steel sheet due to the compressive force and use the energy consumption capacity of the steel sheet due to the tensile force. For this reason, the hysteresis diagram of samples covered with reinforced concrete was in a better condition. In addition, severe pinching was observed in samples with openings compared to samples without openings.
- 2- The ultimate loads of T12, T12C, T12CW and T12CD samples were 7.81, 12.21, 11.06 and 6.64 times that of the reference sample, respectively. In other words, the reinforced concrete coating caused a significant increase in the ultimate load of the samples, and the presence of the opening caused a decrease in the ultimate load. Of course, in samples with door opening, the decrease in ultimate load was more noticeable. Furthermore, increasing the thickness in samples with reinforced concrete coating did not have much impact on the ultimate load, while it had a positive effect on samples without reinforced concrete coating.
- 3- In the T10 and TC10 samples, the lateral stiffness was approximately 46 and 48.82 times the reference sample, respectively, and the lateral stiffness in the T10W and T10CW samples were 31.53 and 39.05 times the reference sample, respectively. In other words, the addition of reinforced concrete coating did not have much effect on the hardness of the samples without openings because the reinforced concrete coating had no contact with the surrounding beams and columns, while in the samples with openings, the reinforced concrete coating had a greater effect on the hardness because it delayed the buckling of the steel sheet.
- 4- The depreciated energy in T15 and T15C samples were 4.46 and 7.82 times that of the reference sample, respectively. In other words, due to the delayed buckling of the steel sheet by the reinforced concrete cover, the samples with reinforced concrete cover had greater depreciated energy compared to the samples without reinforced concrete cover.



شاپای الکترونیک: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی عددی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی مرکب متشکل از ورق فولادی و پوشش بتن مسلح

حدیث حسینی^۱، ابراهیم خلیل‌زاده وحیدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- استادیار، عضو هیأت علمی، گروه هنر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

دیوار برشی مرکب متشکل از ورق فولادی به همراه پوشش بتن مسلح، یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی، در سازه‌های بلند می‌باشد. هدف اصلی در این تحقیق بررسی اثر پوشش بتن مسلح، ضخامت ورق فولادی و بازشوی درب و پنجره بر رفتار لرزه‌ای قاب فولادی دارای این نوع دیوار برشی است. برای این منظور در تحقیق حاضر، پس از اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی، ۱۹ نمونه دیوار برشی فولادی مرکب با ارتفاع ۳/۵ متر و طول دهانه ۵ متر مدلسازی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت نهایی، سختی، انرژی مستهلک و شکل پذیری در نمونه با پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق با ضخامت ۱۵ میلی‌متر، به ترتیب ۱۲/۲۴، ۶۳/۷۸، ۷/۸۲ و ۴/۳۷ برابر نمونه مرجع و در نمونه مشابه بدون پوشش بتن مسلح این مقادیر به ترتیب ۸، ۱۰/۴، ۴/۴۶ و ۶/۲۴ برابر نمونه مرجع است. به عبارت بهتر، پوشش بتن مسلح به دلیل جلوگیری از کمانش ورق فولادی در اثر نیروی فشاری، سبب افزایش مقاومت نهایی، انرژی مستهلک و شکل پذیری شده است همچنین در نمونه‌های دارای پوشش بتن مسلح، افزایش ضخامت ورق فولادی از ۱۰ به ۱۵ میلیمتر، تأثیر چندانی بر روی مقاومت نهایی ندارد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴

کلید واژگان:

دیوار برشی مرکب
رفتار لرزه‌ای
مقاومت نهایی
سختی
انرژی مستهلک
شکل پذیری

*نویسنده مسئول: ابراهیم خلیل‌زاده
وحیدی

پست الکترونیک:

e_vahidi2000@yahoo.com



مقدمه

سیستم دیوار برشی برای تحمل نیروی جانبی زلزله و باد در ساختمان‌ها، در سه دهه اخیر مطرح و مورد توجه قرار گرفته و در جهان به سرعت در حال گسترش می‌باشد. [۱]. همچنین در ساخت ساختمان‌های جدید و همچنین تقویت ساختمان‌های موجود به خصوص در کشورهای زلزله خیزی همچون آمریکا و ژاپن به کار گرفته شده است. این سیستم‌ها در کنار مزایای فراوان دارای معایبی نیز می‌باشد.

سیستم‌های دیوار برشی فولادی یکی از انواع سیستم‌های دیوار برشی است، که در ساختمان‌هایی با ارتفاع متوسط تا بلند استفاده می‌شوند [۲]. این سیستم‌ها دارای مقاومت نهایی بالا، رفتار پلاستیک مشخص و ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند [۳]. همچنین در مقایسه با دیوارهای برشی بتن مسلح از سختی و وزن کمتر، زمان ساخت و ساز کمتر و هزینه‌ی پایین‌تر برخوردار هستند. این نوع از سیستم‌های دیوار برشی، به اتصالات دقیق و گاه پیچیده در عناصر قاب مرزی با استفاده از پیچ و مهره یا جوشکاری نیاز دارد. در دیوارهای برشی فولادی انرژی ورودی به سازه، از طریق عمل میدان کششی که در ورق فولادی پس از کمانش ایجاد خواهد شد، مستهلک می‌شود [۴-۶].

دیوار برشی فولادی مرکب عبارت است از، یک دیوار برشی فولادی که با پوشش بتن مسلح در یک یا هر دو طرف ورق فولادی به منظور جلوگیری از کمانش ورق فولادی، تقویت شده است [۷؛ ۸]. در ضوابط لرزه‌ای AISC360 [۹] این سیستم به عنوان دیوار برشی فولادی مرکب مطرح می‌باشد. پوشش بتن مسلح که در یک یا دو طرف ورق فولادی قرار می‌گیرد به صورت درجا در محل یا به صورت پیش‌ساخته استفاده می‌شود و نقش اصلی آن، جلوگیری از کمانش ورق فولادی در دیوار برشی مرکب می‌باشد، این عمل به وسیله اتصال ورق فولادی و پوشش بتنی با رابط‌های برشی چون گلمیخ یا برشگیر صورت می‌پذیرد [۱۰]. پوشش بتن مسلح روی ورق فولادی، به واسطه تشکیل میدان فشاری قطری در سختی و مقاومت برشی سیستم تأثیر می‌گذارد و به خاطر وجود آرماتور در پوشش بتنی مقداری شکل‌پذیر است. همچنین ورق‌های فولادی با ضخامت کمتر از ۱۰ میلی‌متر در دیوار برشی فولادی مرکب طبق آیین‌نامه AISC توصیه نمی‌شوند. زیرا اولاً ورق‌های نازک دارای مشکلاتی در حمل و نقل و ساخت و نصب هستند، ثانیاً چنین ورق‌های نازکی ممکن است برای عملکرد مناسب نیاز به تعداد بیشتری رابط برشی مانند برشگیر و گلمیخ داشته باشند تا کمانش ورق را تا تسلیم ورق به تأخیر بیندازد [۱۱].

مطالعات آزمایشگاهی زیادی در زمینه دیوار برشی مرکب تا کنون انجام شده است. یکی از این مطالعات، بررسی اثر بازشو بر روی عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی مرکب بوده که توسط قلعه نوعی و مقدادیان در سال ۲۰۱۹ [۱۲] انجام شده، می‌باشد. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است، که لایه‌های بتن مسلح از کمانش ورق فولادی جلوگیری می‌کند و سختی کلی سیستم سازه‌ای را افزایش می‌دهد. وی یانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ به بررسی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی مرکب بتن مسلح، تقویت شده با ورق فولادی پرداختند. آنها در مجموع شانزده نمونه دیوار برشی بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی و سه دیوار بتن مسلح متعارف در مقیاس یک دوم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد، در مقایسه با دیوار برشی بتن مسلح متعارف، ظرفیت بار و تغییر مکان دیوار برشی بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی به ترتیب ۱۰۶/۹۹ و ۱۲۱/۹۶ درصد افزایش می‌یابد و شکل‌پذیری و ضریب میرایی معادل به ترتیب ۲۵/۲ و ۲۴/۹۹ درصد به طور متوسط افزایش می‌یابد. عرب‌زاده و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۱ به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب تحت بارهای چرخه‌ای پرداختند. پارامترهای اصلی در این تحقیق، درز پوشش بتن مسلح، تعداد برشگیرها، ضخامت ورق فولادی و نسبت طول به عرض نمونه است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، استفاده از پوشش بتن مسلح بر روی ورق فولادی باعث بهبود خواص اصلی نمونه‌ها مانند اتلاف انرژی و مقاومت می‌شود.

با توجه به تحقیقات گذشتگان، لزوم بررسی اثر عواملی نظیر بازشوی درب و پنجره، پوشش بتن و ضخامت ورق فولادی دیوار برشی مرکب بیش از پیش احساس می‌شود. به همین منظور در این تحقیق پس از مقدمه و

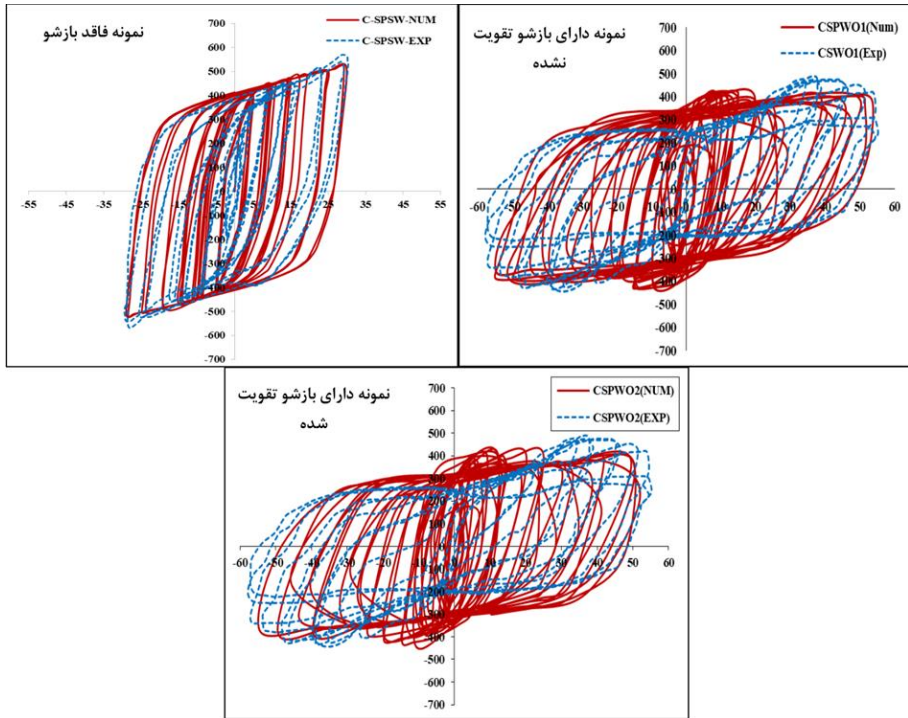
انجام اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Abaqus، به فرضیات مدل‌سازی و معرفی مدل‌های عددی مورد مطالعه، پرداخته خواهد شد. سپس مقاومت نهایی، سختی، شکل پذیری و انرژی مستهلک نمونه‌های عددی مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرد.

اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی

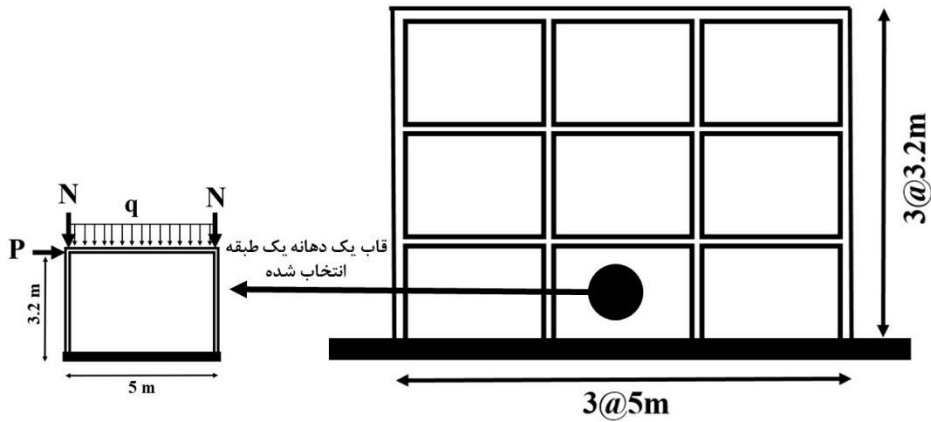
برای ارزیابی روش مدل‌سازی و دقت نتایج به دست آمده، انجام صحت‌سنجی امری ضروری می‌باشد. در این پژوهش جهت اعتبار سنجی مدل عددی در نرم‌افزار Abaqus، از نمونه‌های آزمایشگاهی قلعه‌نوعی و مقدادیان [۱۲] استفاده شده است. نمونه‌های انتخاب شده برای اعتبار سنجی شامل، یک نمونه بدون بازشو، یک نمونه دارای بازشوی مستطیلی 150×200 میلی‌متر و یک نمونه دارای بازشوی مستطیلی 150×200 میلی‌متر - که اطراف بازشو با شبکه میلگرد با زاویه ۴۵ درجه برای کاهش اثرات منفی بازشو تقویت گردیده است - می‌باشند. همه نمونه‌ها در مقیاس یک چهارم ساخته و در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. بر اساس شکل ۱ که در آن نمودار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی مقایسه شده است، می‌توان گفت که مدل‌سازی عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

فرضیات مدل‌سازی و معرفی نمونه‌های عددی مورد مطالعه

در این تحقیق، ابتدا بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ و مقررات ملی ساختمان ایران و با استفاده از نرم‌افزار Etabs ساختمان سه طبقه فولادی با پلان کاملاً منظم طراحی شده است. در طراحی سازه بار مرده ۷ کیلونیوتن بر متر مربع و بار زنده ۲ کیلونیوتن بر متر مربع فرض شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بعد از انتخاب یکی از قاب‌های کناری ساختمان، قاب یک دهانه یک طبقه که در دهانه وسط قاب قرار دارد برای تحلیل در نرم‌افزار Abaqus انتخاب شده است. ضخامت پوشش بتن مسلح روی ورق فولادی نمونه‌های عددی دیوار برشی مرکب، ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین از بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال استوانه‌ای برای آن استفاده شده است. برای اتصال پوشش بتن به ورق فولادی برش‌گیر در نظر گرفته شده است. برای ورق فولادی دیوار برشی مرکب، سه ضخامت مختلف ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات مقاطع و مصالح مورد قاب یک دهانه یک طبقه انتخاب شده که در شکل ۲ نشان داده شده است، در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مقایسه نمودار چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی



شکل ۲. قاب یک دهانه-یک طبقه انتخاب شده

جدول ۱. مشخصات مقاطع مورد استفاده در مدل سازی قاب ها

عضو	ابعاد (mm)	تنش تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
ستون	۲IPE۳۰۰+۲PL۳۰۰×۵	۲۳۵	۳۶۰	۲۰۰
تیر	۲IPE۳۰۰	۲۳۵	۳۶۰	۲۰۰
ورق فولادی دیوار برشی	t=۱۰mm t=۱۲mm t=۱۵mm	۲۳۵	۳۶۰	۲۰۰
برشگیر	Φ۲۰	۳۲۶	۴۹۲	۲۰۰
میلگرد	Φ۱۲	۴۰۰	۶۰۰	۲۰۰

با توجه به هدف اصلی تحقیق، که بررسی اثر نوع بازشو، پوشش بتن و ضخامت ورق فولادی بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی مرکب می‌باشد، ۱۹ حالت مختلف قاب یک دهانه- یک طبقه فولادی که مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است در نرم افزار اجزاء محدود تحلیل شده است.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های عددی مورد مطالعه

نام نمونه	شرح نمونه‌ها
Reff	نمونه مرجع (نمونه قاب خالی بدون دیوار برشی فولادی)
T10C	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر
T10CW	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و با بازشو پنجره دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر
T10CD	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و با بازشو درب دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر
T10	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر
T10W	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و با بازشو پنجره دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر
T10D	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و با بازشو درب دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر
T12C	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۲ میلی متر
T12CW	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و با بازشو پنجره دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۲ میلی متر
T12CD	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و با بازشو درب دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۲ میلی متر
T12	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۲ میلی متر
T12W	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و با بازشو پنجره دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۲ میلی متر
T12D	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و با بازشو درب دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۲ میلی متر
T15C	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر
T15CW	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و با بازشو پنجره دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر
T15CD	دیوار برشی فولادی مرکب دارای پوشش بتن مسلح و با بازشو درب دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر
T15	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر
T15W	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و با بازشو پنجره دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر
T15D	دیوار برشی فولادی بدون پوشش بتن مسلح و با بازشو درب دارای ورق فولادی به ضخامت ۱۵ میلی متر

بازشوی پنجره در وسط قاب و به صورت مسطیلی به طول ۱۲۰ و ارتفاع ۱۶۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. همچنین بازشوی درب در وسط قاب با طول ۹۰ و ارتفاع ۲۱۰ سانتی متر فرض شده است. درصد بازشوی درب و پنجره تقریباً یکسان و به میزان ۱۵/۱ درصد است.

در مدل‌سازی نمونه‌های عددی، برای اعضای فولادی علاوه بر مشخصات الاستیک و پلاستیک، از مدل آسیب انعطاف پذیر^۱ استفاده شده است [۱۴]. همچنین در مدل‌سازی بتن از مدل پلاستیک آسیب بتن^۲ استفاده شده [۱۴؛ ۱۵]، که برای مواد ترد و شکننده از جمله بتن تحت بارگذاری رفت و برگشتی و یک جهته قابل استفاده است. در این مقاله از مدل هسو و همکاران (۱۹۹۴) برای نشان دادن رفتار فشاری و کششی بتن استفاده شده است [۱۶]. همچنین در مدل پلاستیک آسیب بتن، به منظور شبیه سازی رفتار پلاستیک بتن، مقدار زاویه اتساع، خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک، پارامتر ویسکوز به ترتیب ۳۱ درجه، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

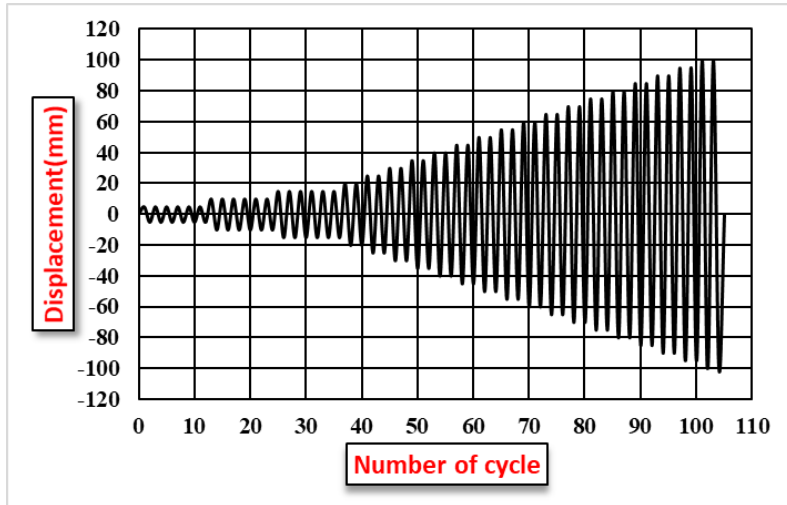
در همه مدل‌های عددی نوع تحلیل استاتیکی انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، بار محوری روی ستون‌ها، بار گسترده خطی روی تیر و بار جانبی در مدل‌سازی نمونه‌های عددی در نظر گرفته شده است. بار جانبی به صورت رفت و برگشتی تا ۱۰۰ میلی متر که به اندازه ۳/۱۳ درصد ارتفاع طبقه است، اعمال شده است. پروتکل بارگذاری که در شکل ۳ نشان داده شده، به صورت جایجایی کنترل و بر اساس دستورالعمل ATC24 تعریف شده است. در فرآیند مدل‌سازی، المان‌های جامد از نوع C3D8R برای مدل‌سازی پوشش بتنی که برای اجسام توپر مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب می‌شود. المان پوسته سه بعدی S4R برای ورق فولادی و تیر و ستون استفاده می‌شود. از المان B31 برای مدل‌سازی برشگیرها استفاده می‌شود. برای سازگاری لایه میانی ورق فولادی و پوشش بتنی از یک المان تماسی استفاده گردید. لایه میانی بین ورق فولادی و پوشش بتن مسلح توسط المان تماسی بدون اصطکاک^۳ و بدون اجازه نفوذ ورق فولادی به بتن مسلح، مدل شد.

مش‌بندی سیستم به گونه‌ای عمل می‌شود که فقط دو گره در دو انتهای برشگیرها داشته باشیم. همچنین باید اظهار داشته شود که لبه‌گیر (وصله) که معمولاً برای اتصال صفحه پرکننده به قاب اطراف استفاده می‌شود مدل‌سازی نمی‌شوند و فرض بر این است که ورق فولادی به طور مستقیم به قاب متصل است. دلیل اصلی استفاده از بتن با مقاومت بالا به این دلیل است که ترک خوردگی را در پوشش بتن به حداقل می‌رساند. مقدار میلگرد برابر با ۰/۰۱ درصد حجم بتن است و میلگردها در یک لایه قرار می‌گیرند.

¹ Ductile damage

² Concrete damage plastic

³ Friction

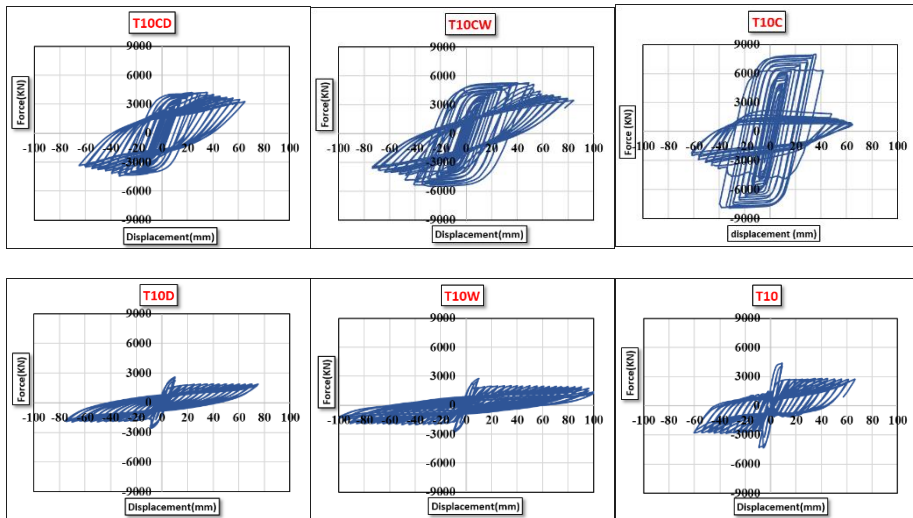


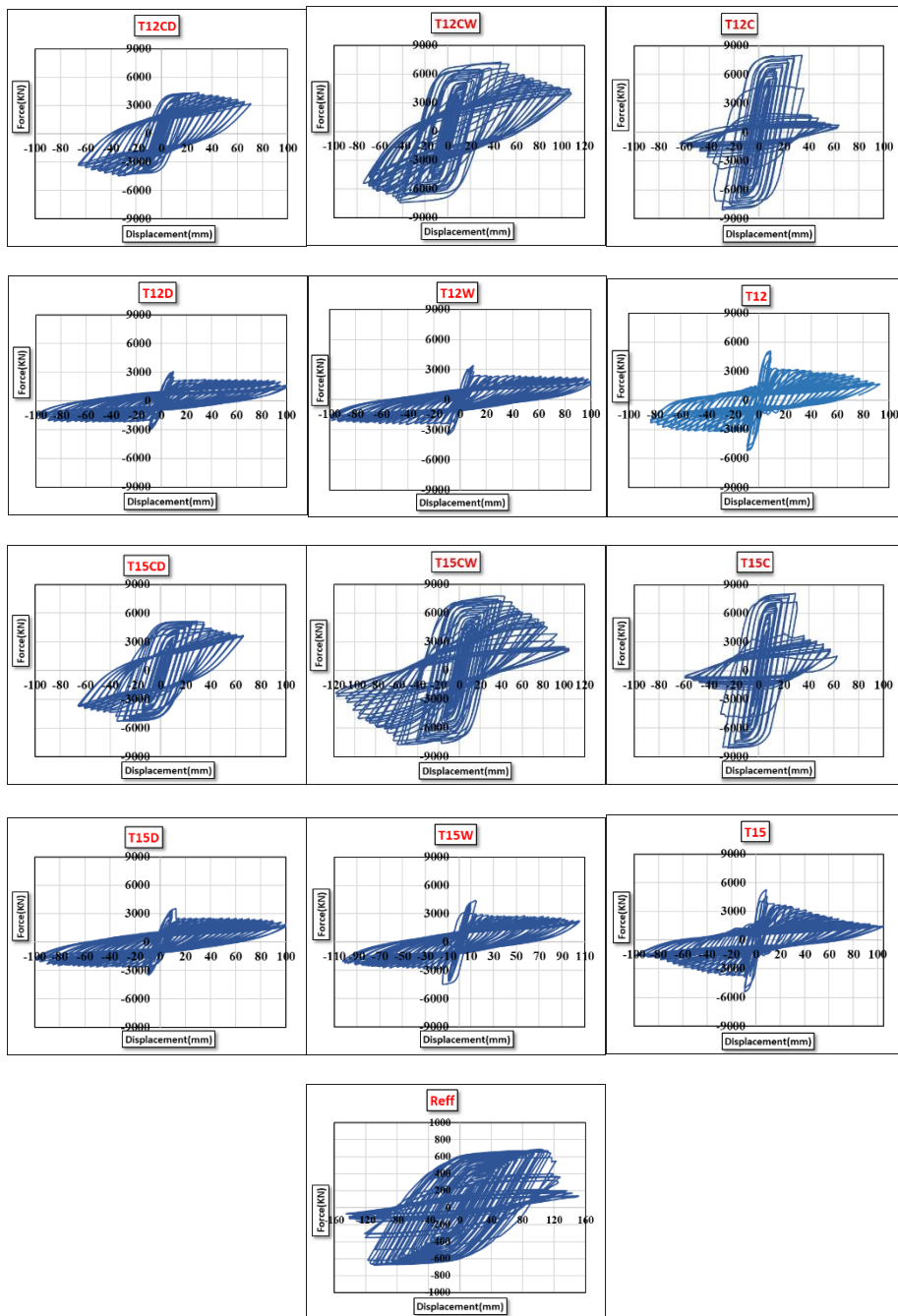
شکل ۳. پروتکل بارگذاری مورد استفاده

بحث و بررسی نتایج مدلسازی عددی

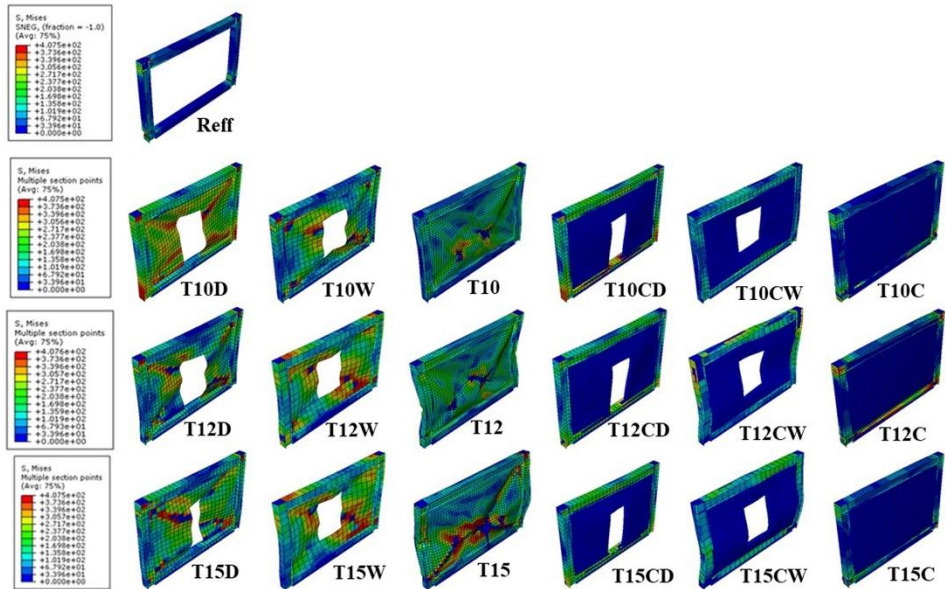
نمودار چرخه‌ای

جهت ارزیابی دقیق رفتار سازه، بررسی منحنی‌های هیستریزیس آن ضروری است. در شکل ۴ و ۵ به ترتیب، نمودار چرخه‌ای بار-جابجایی و نحوه توزیع تنش در نمونه‌های عددی نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در شکل ۵، واحد تنش مگاپاسکال است.





شکل ۴. نمودار چرخه‌ای بار-جابجایی



شکل ۵. توزیع تنش در نمونه‌های عددی

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در نمونه مرجع، ابتدا با افزایش جابجایی مقدار مقاومت به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و سپس وارد ناحیه پلاستیک شده و سختی آن کاهش پیدا می‌کند و در نهایت پس از تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر، افت مقاومت شدیدی مشاهده شده است.

در نمونه‌های عددی دارای پوشش بتن مسلح نیز، در ناحیه الاستیک با افزایش جابجایی مقدار مقاومت نیز به صورت خطی و پس از آن سختی کاهش یافته و وارد ناحیه پلاستیک شده است که در ناحیه پلاستیک به مرور ترک‌ها شروع به گسترش نموده‌اند و پس از گسیختگی کامل پوشش بتنی روی ورق فولادی، افت مقاومت مشاهده شده است و افت مقاومت تا لحظه کماتش ورق فولادی و گسیختگی کامل نمونه عددی ادامه داشته است. لازم به ذکر است که پوشش بتن مسلح روی ورق فولادی سبب شده است که افت مقاومت دیرتر اتفاق بیفتند به عبارت بهتر پوشش بتن مسلح با به تأخیر انداختن کماتش در اثر نیروی فشاری، ظرفیت استهلاک انرژی در اثر نیروی کششی را افزایش داده است.

در نمونه‌های عددی بدون پوشش بتن مسلح، در ابتدا با افزایش جابجایی مقاومت به صورت خطی افزایش یافته است و پس از کماتش ورق فولادی در ناحیه فشاری، افت مقاومت و پینچینگ شدید در نمودار هیستریزس آنها مشاهده شده است.

از مقایسه نمودار هیستریزس نمونه‌های بدون بازشو و نمونه‌های با بازشو می‌توان نتیجه گرفت که مقدار پینچینگ در نمونه‌های بدون بازشو شدیدتر بوده است. همچنین با توجه به جدول ۳ و شکل ۴، نمونه‌های دارای بازشوی درب به مراتب مقاومت نهایی و افت مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های دارای بازشوی پنجره داشته‌اند.

بر اساس پوش نمودار هیستریزس نمونه‌های عددی، مقدار پارامترهای لرزه‌ای استخراج شده است. در جدول ۳ پارامترهای لرزه‌ای استخراج شده نشان داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌ای نمونه‌های عددی

نسبت شکل پذیری به نمونه مرجع	شکل پذیری	نسبت انزوی مستهلک شده به شده نمونه مرجع	نسبت انزوی مستهلک شده (kN.mm)	نسبت سختی به نمونه مرجع	نسبت سختی (kN/mm)	نسبت مقاومت به نمونه مرجع	مقاومت نهایی (kN)	ضخامت ورق (mm)	نمونه عددی	
									Reff	نمونه مرجع
1.00	2.7	1.00	142361.51	1.00	12.31	1.00	655.66	-	T10	بدون پوشش
3.40	9.17	2.73	388188.08	46.02	566.51	6.67	4370.58	10	T12	بدون پوشش
4.43	11.97	4.09	582153.7	55.90	688.18	7.81	5120.38	12	T15	بدون پوشش
6.24	16.85	4.46	634599.26	61.07	751.73	8.00	5242.53	15	T10C	با پوشش
3.01	8.14	7.02	998695.35	48.82	600.99	12.14	7957.03	10	T12C	با پوشش
3.84	10.36	7.73	1100799.1	57.36	706.07	12.21	8003.98	12	T15C	با پوشش
4.37	11.8	7.82	1113079.44	63.78	785.15	12.24	8026.16	15	T10W	بدون پوشش
5.83	15.73	2.81	400335.17	31.53	388.1	4.20	2752.22	10	T12W	بدون پوشش
6.27	16.93	3.31	471767.46	35.44	436.27	5.18	3395.66	12	T15W	بدون پوشش
6.66	17.98	4.14	589559.8	46.26	569.47	6.64	4355.92	15	T10CW	با پوشش
5.64	15.22	5.95	847475.13	39.05	480.68	9.54	6257.88	10	T12CW	با پوشش
5.94	16.05	6.37	906595.59	41.13	506.28	11.06	7251.94	12	T15CW	با پوشش
6.21	16.76	7.15	1017264.52	52.74	649.22	11.87	7783.9	15	T10D	بدون پوشش
3.43	9.27	2.12	302344.67	22.77	280.26	3.97	2603.35	10	T12D	بدون پوشش
5.06	13.67	3.17	451059.42	26.71	328.83	4.63	3036.49	12	T15D	بدون پوشش
5.23	14.11	4.10	583373	29.98	369.06	5.45	3574.28	15	T10CD	با پوشش
2.41	6.52	3.95	562498.03	26.95	331.72	6.44	4221.64	10	T12CD	با پوشش
2.91	7.87	4.13	588040.04	31.59	388.89	6.64	4354.87	12	T15CD	با پوشش
3.06	8.26	4.81	684755.4	34.14	420.26	7.82	5124.15	15		

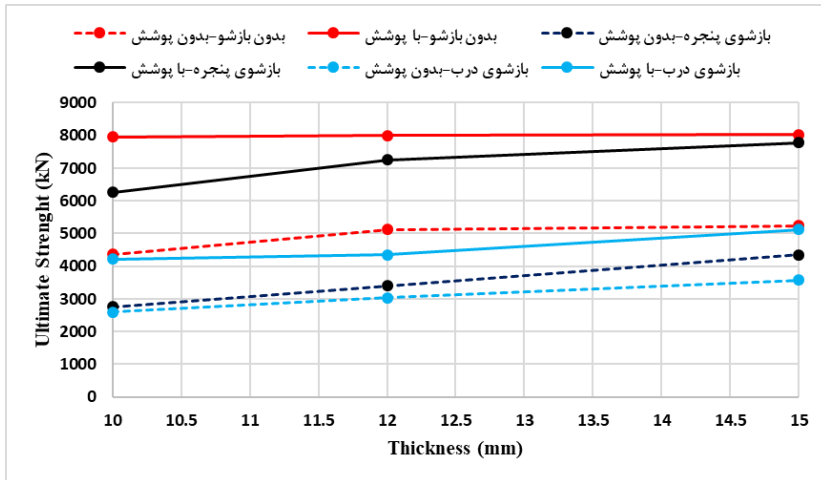
مقاومت نهایی

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، مقاومت نهایی است. در جدول ۳، مقدار مقاومت نهایی نمونه‌های عددی و نسبت آنها به مقاومت نهایی نمونه مرجع نشان داده شده است. همچنین در شکل ۶، نمودار ضخامت-مقاومت نهایی برای نمونه‌های عددی تحلیل شده رسم شده است.

بر اساس شکل ۶ و جدول ۳، پوشش بتن مسلح روی ورق فولادی سبب افزایش چشم‌گیر مقاومت نهایی نمونه‌های عددی شده است، به گونه‌ای که در نمونه با پوشش بتن مسلح و بدون بازشو و دارای ورق با ضخامت ۱۰ میلی متر، مقدار مقاومت نهایی حدود ۱۲/۴ برابر نمونه مرجع شده است، در حالی که در نمونه مشابه بدون پوشش بتن مسلح مقاومت نهایی حدود ۶/۶۷ برابر نمونه مرجع شده است. به عبارت بهتر به نظر می‌رسد، پوشش بتن مسلح با به تأخیر انداختن کماتش ورق در اثر نیروی فشاری و استفاده از ظرفیت کششی آن، موجب افزایش مقاومت نهایی شده است.

همچنین در اثر وجود بازشو مقدار مقاومت نهایی افت کرده است و در نمونه دارای بازشوی درب مقاومت نهایی افت بیشتری کرده است. به گونه‌ای که در نمونه با بازشوی پنجره و دارای پوشش بتن مسلح و ورق با ضخامت ۱۰ میلی متر، مقاومت نهایی حدود ۹/۵۴ برابر نمونه مرجع و در نمونه مشابه دارای بازشوی درب، مقاومت نهایی ۶/۴۶ برابر نمونه مرجع شده است. به نظر می‌رسد، علت این اتفاق تضعیف میدان کشش و فشار قطری به دلیل وجود بازشوی پنجره باشد.

بر اساس شکل ۶، افزایش ضخامت ورق فولادی در نمونه‌های بدون بازشو و دارای پوشش بتن مسلح تأثیر چندانی بر روی مقاومت نهایی نداشته است، در حالی که در نمونه‌های دارای بازشوی درب و بدون پوشش بتن مسلح، افزایش ضخامت بر روی افزایش مقاومت نهایی تأثیر بیشتری داشته است. به نظر می‌رسد علت این پدیده، افزایش بار کماتش ورق فولادی در اثر افزایش ضخامت ورق فولادی است و در نتیجه استفاده بیشتر از ظرفیت فشاری ورق فولادی است. بر اساس شکل ۶، کمترین مقاومت نهایی مربوط به نمونه‌های بدون پوشش بتن مسلح و دارای بازشوی درب می‌باشد. همچنین بیشترین مقاومت نهایی مربوط به نمونه‌های دارای پوشش بتن مسلح و بدون بازشو می‌باشد.



شکل ۶. نمودار ضخامت-مقاومت نهایی نمونه‌های عددی

سختی

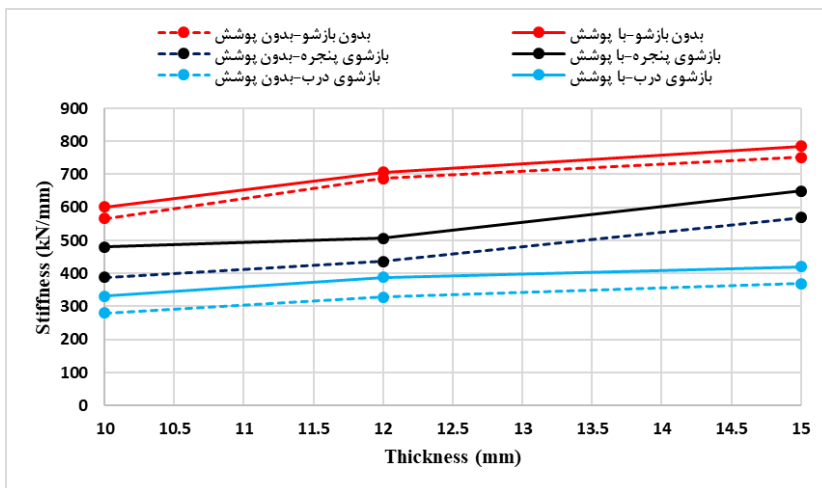
سختی سازه، میزان مقاومت آن در برابر تغییر شکل است. در این تحقیق، مقدار سختی از نمودار دوطرفی ایده‌آل سازی شده که در شکل ۹ نشان داده شده، به دست آمده است. استفاده از دیوار برشی فولادی مرکب یکی از راه‌های افزایش سختی سازه در برابر نیروهای جانبی و جلوگیری از آسیب به آن است [۱۱؛ ۱۷]. در این قسمت، به بررسی عوامل موثر بر سختی قاب دارای دیوار برشی فولادی مرکب پرداخته می‌شود. سختی نمونه‌های عددی در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است.

بر اساس شکل ۷ و جدول ۳، پوشش بتن مسلح در نمونه‌های بدون بازشو تأثیر کمی بر روی سختی جانبی داشته است، در حالی که در نمونه‌های دارای بازشو، پوشش بتن مسلح اثر زیادی بر روی سختی سازه داشته است. به گونه‌ای که در نمونه‌های T10 و TC10 به ترتیب سختی جانبی در حدود ۴۶ و ۴۸/۸۲ برابر نمونه مرجع است و سختی جانبی در نمونه‌های T10W و T10CW به ترتیب ۳۱/۵۳ و ۳۹/۰۵ برابر نمونه مرجع بوده است.

سختی جانبی نمونه‌های T10CW و T10CD به ترتیب ۳۱/۵۳ و ۲۶/۹۵ برابر نمونه مرجع است، به عبارت بهتر به دلیل این که بازشو سبب تضعیف میدان کشش می‌گردد، وجود بازشو در دیوار برشی مرکب سبب کاهش سختی می‌شود و اثر بازشوی درب در کاهش سختی سازه بیشتر بوده است.

در همه نمونه‌ها، سختی با ضخامت رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر، افزایش ضخامت در نمونه‌های بدون بازشو و نمونه‌های دارای بازشوی پنجره تأثیر زیادی بر روی افزایش سختی سازه داشته است، ولی در نمونه دارای بازشوی درب اثر کمی بر روی افزایش سختی سازه داشته است.

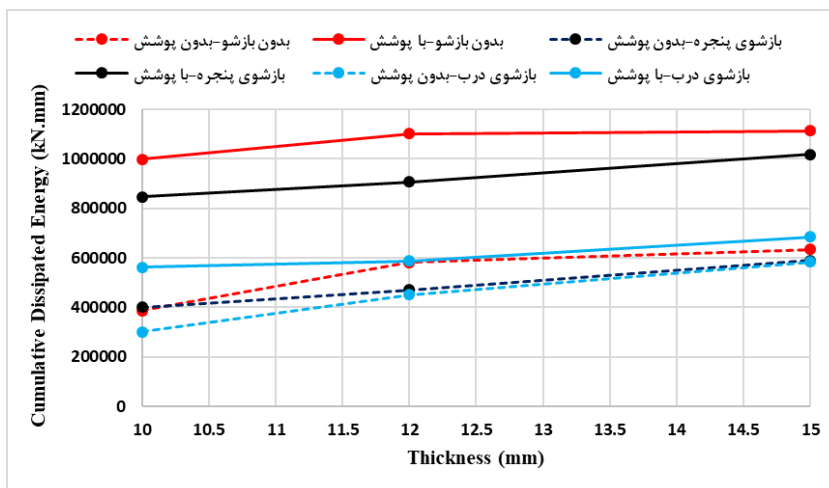
کمترین سختی مربوط به نمونه‌های دارای بازشوی درب بدون پوشش بتنی بوده است و بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه‌های بدون بازشو و دارای پوشش بتن مسلح بوده است.



شکل ۷. نمودار ضخامت-سختی نمونه‌های عددی

انرژی مستهلک

انرژی مستهلک در هر چرخه، مساحت محصور به نمودار هیستریزیس، در آن چرخه است. به میزانی که انرژی مستهلک سازه زیاد باشد، در حین زلزله کمتر دچار آسیب می‌گردد. [۱۸؛ ۱۹] در این تحقیق انرژی مستهلک تجمعی برای هر کدام از نمونه‌های عددی در چرخه آخر بارگذاری، محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول ۳ و شکل ۸ به ترتیب مقادیر انرژی مستهلک و نمودار ضخامت-انرژی مستهلک برای نمونه‌های عددی نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار ضخامت-انرژی مستهلک نمونه‌های عددی

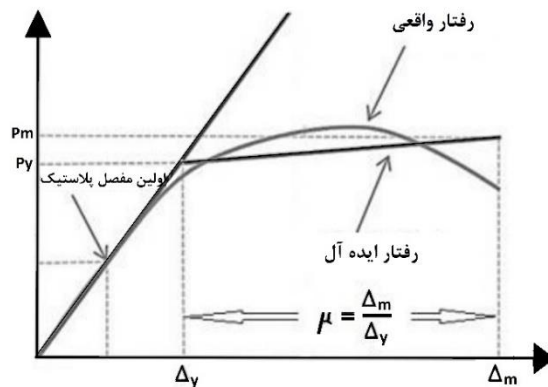
همان‌طور که در شکل ۸ و جدول ۳ نشان داده شده است، انرژی مستهلک در نمونه‌های T15 و T15C به ترتیب ۴/۴۶ و ۷/۸۲ برابر نمونه مرجع است. به عبارت بهتر، به دلیل به تأخیر افتادن کمانش ورق فولادی توسط

پوشش بتن مسلح، نمونه‌های دارای پوشش بتن مسلح در مقایسه با نمونه‌های بدون پوشش بتن مسلح انرژی مستهلک بیشتری دارند.

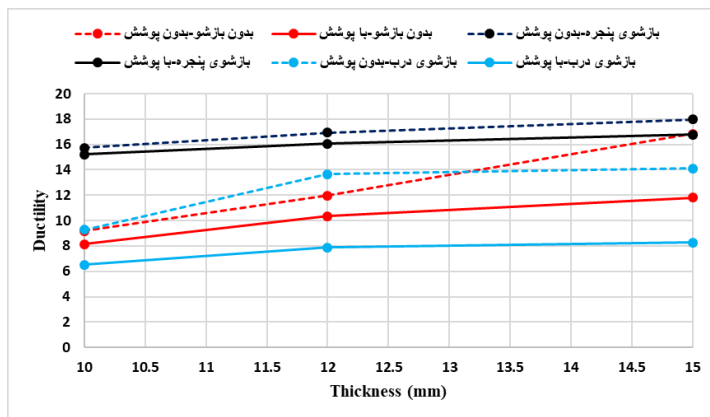
در نمونه‌های دارای دیوار برشی مرکب وجود بازشو در دیوار باعث کاهش انرژی مستهلک، شده است البته مقدار کاهش در نمونه‌های دارای بازشوی درب بیشتر است، در حالی که در نمونه‌های بدون پوشش بتن مسلح، وجود بازشو تأثیر کمتری در کاهش انرژی مستهلک داشته است.

شکل پذیری

ظرفیت تغییر شکل، شاخص مهمی در رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی مرکب است که با استفاده از ضریب شکل پذیری جابجایی و به صورت نسبت جابجایی حد نهایی به جابجایی حد تسلیم تعریف می‌شود [۲۰]. همان‌طور که در شکل ۹ در این تحقیق، مقدار جابجایی حد تسلیم و جابجایی نهایی از نمودار دوخطی ایده‌آل شده به دست آمده است. به میزانی که شکل پذیری زیاد باشد، سازه قبل از گسیختگی تغییر شکل‌های بزرگی را تحمل می‌کند. مقادیر تغییر شکل نمونه‌ها در جدول ۳ و نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹. نمودار ایده‌آل دو خطی و نمودار واقعی



شکل ۱۰. نمودار ضخامت-شکل پذیری نمونه‌های عددی

بر اساس شکل ۱۰، پوشش بتن مسلح روی ورق فولادی باعث سبب کاهش مقادیر ضریب شکل پذیری نمونه‌های عددی شده است، همچنین با افزایش ضخامت ورق فولادی مقدار ضریب شکل پذیری افزایش یافته است. به گونه‌ای که ضریب شکل پذیری در نمونه‌های T10 و T12 و T15 به ترتیب ۳/۴، ۴/۴۳ و ۶/۲۴ برابر نمونه ضریب شکل پذیری نمونه مرجع بوده است ولی در نمونه‌های مشابه دارای پوشش بتنی (T10C و T12C و T15C) این مقادیر به ترتیب ۳/۰۱، ۳/۸۴ و ۴/۳۷ برابر نمونه مرجع است. علت این که با افزایش ضخامت ورق فولادی، مقدار ضریب شکل‌پذیری زیاد شده، به تأخیر افتادن کمانش ورق در اثر نیروی فشاری و استفاده از ظرفیت کششی ورق فولادی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌های با پوشش بتنی و دارای بازشوی درب بوده است، در حالی که بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌های بدون پوشش بتنی و دارای بازشوی پنجره است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از مقدمه، به اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی و در گام بعدی به فرضیات مدل‌سازی و معرفی نمونه‌های عددی پرداخته شده است. پس از تحلیل نمونه‌های عددی در نرم افزار Abaqus، نمودار هیستریزیس، مقاومت نهایی، سختی، انرژی مستهلک و شکل‌پذیری نمونه‌های عددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- ۱- پوشش بتن مسلح و افزودن ضخامت ورق فولادی سبب به تأخیر افتادن کمانش ورق فولادی در اثر نیروی فشاری و استفاده از ظرفیت استهلاک انرژی ورق فولادی در اثر نیروی کششی خواهد شد. به همین دلیل نمودار هیستریزیس نمونه‌های دارای پوشش بتن مسلح وضعیت بهتری دارد. همچنین در نمونه‌های دارای بازشو نسبت به نمونه‌های بدون بازشو پینچینگ شدیدی مشاهده شده است.
- ۲- مقاومت نهایی نمونه‌های T12، T12C، T12CW و T12CD به ترتیب ۷/۸۱، ۱۲/۲۱، ۱۱/۰۶ و ۶/۶۴ برابر نمونه مرجع است. به عبارت بهتر، پوشش بتن مسلح سبب افزایش چشم‌گیر مقاومت نهایی نمونه‌ها شده است و وجود بازشو سبب کاهش مقاومت نهایی شده است. البته در نمونه‌های دارای بازشوی درب کاهش مقاومت نهایی چشم‌گیرتر بوده است. همچنین افزایش ضخامت در نمونه‌های دارای پوشش بتن مسلح، تأثیر چندانی بر روی مقاومت نهایی نداشته است، در حالی که در نمونه‌های بدون پوشش بتن مسلح تأثیر مثبت داشته است.
- ۳- در نمونه‌های T10 و TC10 به ترتیب سختی جانبی در حدود ۴۶ و ۴۸/۸۲ برابر نمونه مرجع است و سختی جانبی در نمونه‌های T10W و T10CW به ترتیب ۳۱/۵۳ و ۳۹/۰۵ برابر نمونه مرجع بوده است. به عبارت بهتر، افزودن پوشش بتن مسلح تأثیر چندانی بر روی سختی نمونه‌های بدون بازشو نداشته است به دلیل این که پوشش بتن مسلح با تیر و ستون اطراف هیچ تماسی ندارد، در حالی که در نمونه‌های دارای بازشو پوشش بتن مسلح تأثیر بیشتری بر روی سختی داشته، چون باعث به تأخیر افتادن کمانش ورق فولادی شده است.
- ۴- انرژی مستهلک در نمونه‌های T15 و T15C به ترتیب ۴/۴۶ و ۷/۸۲ برابر نمونه مرجع است. به عبارت بهتر، به دلیل به تأخیر افتادن کمانش ورق فولادی توسط پوشش بتن مسلح، نمونه‌های دارای پوشش بتن مسلح در مقایسه با نمونه‌های بدون پوشش بتن مسلح انرژی مستهلک بیشتری دارند.

۵- ضریب شکل پذیری در نمونه‌های T10 و T12 و T15 به ترتیب $\frac{2}{4}$ ، $\frac{4}{43}$ و $\frac{6}{24}$ برابر نمونه ضریب شکل پذیری نمونه مرجع بوده است ولی در نمونه‌های مشابه دارای پوشش بتنی (T10C و T12C و T15C) این مقادیر به ترتیب $\frac{3}{10}$ ، $\frac{3}{84}$ و $\frac{4}{37}$ برابر نمونه مرجع است.

References

- [1] Salameh, M., Shayanfar, M., & Ali Barkhordari, M. (2021). Seismic displacements and behaviour factors assessment of an innovative steel and concrete hybrid coupled shear wall system. *Structures*, 34(4), 20-41. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.058>
- [2] Kamgar, R., Heidarzadeh, H., & Babadaei Samani, M. R. (2021). Evaluation of buckling load and dynamic performance of steel shear wall retrofitted with strips made of shape memory alloy. *Scientia Iranica*, 28(3), 1096-1108. <https://doi.org/10.24200/sci.2020.52994.2991>
- [3] Moradi, R., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2021). General Study of New Ideas and Practical of Friction Dampers for Passive Vibration Control of Structures. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 239-257. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.126575>
- [4] Shabanlou, M., Moghaddam, H., & Daryan, A. (2021). The Effect of Geometry on Structural Behavior of Buildings with Steel Plate Shear Wall System Subjected to Blast Loading. *International Journal of Steel Structures*, 21(2), 650-665. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00463-4>
- [5] Tan, J-K., Su, M-N., Wang, Y-H., Wang, K., Cao, Y-Q., & Li, P. (2022). Experimental study on cyclic shear performance of steel plate shear wall with different buckling restraints. *Structures*, 35(5), 469-482. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.021>
- [6] Yamada, M., & Yamakaji, T. (2021). Steel panel shear wall—Analysis on the center core steel panel shear wall system. In F. Mazzolani & R. Tremblay (Eds.), *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*. Chemical Rubber Company Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003211198-74/steel-panel-shear-wall-analysis-center-core-steel-panel-shear-wall-system-yamada-yamakaji>
- [7] Li, Y., Zhao, X., Tan, P., Zhou, F., & Jiang, J. (2021). Seismic behavior of a novel buckling-restrained steel plate shear wall. *Shock and Vibration*, 2021, 1-21. <https://doi.org/10.1155/2021/5599578>
- [8] Sarcheshmehpour, M., Shabanlou, M., Meghdadi, Z., Estekanchi, H. E., & Mofid, M. (2021). Seismic evaluation of steel plate shear wall systems considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 145, 106738. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106738>
- [9] Design, A. S. (1999). *Specification for structural steel buildings*. American Institute Of Steel Construction. <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/manual/15th-ed-ref-list/specification-for-structural-steel-buildings-allowable-stress-design-and-plastic-design.pdf>
- [10] Zhang, Q., Huang, Y., Xu, G., & Jiang, L. (2021, June 14-18). *Seismic Performance of a New Type Steel-Concrete Composite Shear Wall*. 6th World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture: Urban Planning Symposium, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/2/022041>
- [11] Wang, W., Wang, Y., & Lu, Z. (2018). Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete composite shear wall. *Engineering Structures*, 160, 281-292. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.050>

- [12] Todea, V. C. (2021). *Seismic Performance Of Composite Steel-Concrete Shear Walls With Central Openings* [PhD, Polytechnic University]. Timișoara, Romania. http://www.upt.ro/img/files/2020-2021/doctorat/teze/rezumateza/Todea_Rezumateza_en.pdf
- [13] Arabzadeh, A., Soltani, M., & Ayazi, A. (2011). Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings. *Thin-Walled Structures*, 49(7), 842-854. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.02.009>
- [14] Khalilzadeh Vahidi, E., & Moradi, R. (2019). Numerical study of the force transfer mechanism and seismic behavior of masonry infilled RC frames with windows opening. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 61-73. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091225>
- [15] Moradi, R., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2018). Comparison of Numerical Techniques of Masonry Infilled RC Frames for Lateral Loads. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 3(2), 102-118. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2019.82172>
- [16] Hsu, L., & Hsu, C-T. (1994). Complete stress—strain behaviour of high-strength concrete under compression. *Magazine of concrete research*, 46(169), 301-312. <https://doi.org/10.1680/mac.1994.46.169.301>
- [17] 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(Special Issue 4), 73-87. <https://doi.org/10.22065/jsce.2017.86522.1198>
- [18] Alimohammadi, H., Hesaminejad, A., & Yaghin, M. L. (2019). Effects of different parameters on inelastic buckling behavior of composite concrete-filled steel tubes. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(12), 603-608. <https://doi.org/10.31224/osf.io/wqgj8>
- [19] Moradi, R., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2021). Experimental Study of Rotational-Friction Damper with Two Slip Load and Evaluation of its Performance in RC Frame under Cyclic Loading. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(1), 121-137. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2021.292383.1209>
- [20] Hoseinzadeh Asl, M., & Safarkhani, M. (2017). Seismic behavior of steel plate shear wall with reduced boundary beam section. *Thin-Walled Structures*, 116, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.014>