Civil Infrastructure Researches, Vol. 7, Issue.1, Spring and Summer 2021, pp. 173-188

F. Masoumi-Zahandeh

Department of Civil Engineering, Nour branch, Islamic Azad University, Nour, Iran.

e-mail: masoumi.fereydoun@gmail.com

M. Hoseinzadeh

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Nour Branch, Nour, Iran.

e-mail: m_hoseinzadeh@iaunour.ac.ir

S. Rahimi

Department of Civil Engineering, School of Engineering, Islamic Azad University Nour Branch, Nour.

e-mail: s_rahimi@iaunour.ac.ir

M. Ebadi-Jamkhaneh*

Department of Civil Engineering, School of Engineering, Damghan University.

e-mail: m.ebadi@du.ac.ir

Investigation of the Behavior of Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall under Fire Loading

In this study, the seismic behavior of an all-steel buckling-restrained (AB) steel plate shear wall (SPSW) with incline slits under fire and cyclic loading was investigated. ABSPSW was composed of two thin steel infill plates with a narrow distance from each other, which were embedded with incline slits on each plate. These slits were in opposite directions to each other. The finite element (FE) numerical model was validated with three test specimens and after ensuring the modeling strategy, the parametric study was performed by considering variables such as wall plate thickness, slit width, strip width between two slits, and degree of temperature. A total of 256 FE numerical models were subjected to coupled temperature-displacement analysis. The results of the analysis showed that the high temperature reduced the seismic performance of the ABSPSW so that at 917oC, the load-bearing capacity was reduced by 92%. In addition, with the increase in the temperature, the yield point of the infill plate and frame occurred in a small displacement. The average decrease in shear strength at 458°C, 642°C, and 917°C was 18%, 46%, and 92%, respectively, compared to the shear strength at 20°C. Also, with increasing the temperature to 917°C, ductility increased by an average of 75%.

Keywords: Fire engineering, Steel structures, Thermal effects, Seismic engineering.

* Corresponding author

Received 16 September 2021, Revised 26 October 2021, Accepted 07 November 2021.
DOI: 10.22091/cer.2021.7372.1298

بررسی رفتار دیوار برشی فولادی کمانش‌تاب تحت اثر حریق

فریدون معصومی زهندی
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران.
پست الکترونیک:
masoumi.fereydoun@gmail.com

محمد حسین‌زاده
استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران.
پست الکترونیک:
m_hoseinzadeh@iaunour.ac.ir

سپیده رحیمی
استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران.
پست الکترونیک:
s_rahimi@iaunour.ac.ir

مهدی عبادی جامخانه*
استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران.
پست الکترونیک:
m.ebadi@du.ac.ir

در این تحقیق، رفتار دیوار برشی فولادی کمانش‌تاب تحت بارگذاری حریق و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. دیوار فولادی نوین مورد نظر در این مطالعه از دو ورق فولادی نازک با فاصله کم از یکدیگر تشکیل شده است که بر روی هر ورق فولادی شیارهای مورب تعبیه شده است که این شیارها در خلاف جهت یکدیگر می‌باشند. مدل عددی المان محدود با سه نمونه آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد و پس از اطمینان از نحوه مدل‌سازی، مطالعه پارامتریک با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر ضخامت ورق دیوار، عرض شیار، عرض نوار بین دو شیار و درجه حرارت انجام گرفت. در مجموع ۲۵۶ مدل عددی المان محدود تحت تحلیل کوپل دما- تغییرمکان قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که دمای زیاد، موجب کاستن عملکرد لرزه‌ای دیوار فولادی می‌شود، به طوری که در دمای ۹۱۷ درجه سلسیوس ظرفیت باربری، ۹۲ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش دما، نقطه تسلیم ورق و قاب در تغییرمکان کمتر اتفاق می‌افتد. میانگین کاهش مقاومت برشی در دماهای ۴۵۸، ۶۴۲ و ۹۱۷ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۸، ۴۶ و ۹۲ درصد در مقایسه با مقاومت برشی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین با افزایش درجه حرارت به ۹۱۷ درجه سلسیوس، شکل‌پذیری به طور میانگین ۷۵ درصد افزایش یافت.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی کمانش‌تاب، بارگذاری حریق، شیار، مقاومت برشی، روش المان محدود.

۱- مقدمه

از مزایای سیستم دیوار برشی فولادی با ورق نازک می‌توان به سختی اولیه قابل‌ملاحظه، مقاومت پس کمانشی بالا، جذب انرژی زیاد و کاهش وزن سازه اشاره نمود. این ویژگی‌ها، موجب شده است تا این سیستم به عنوان گزینه مناسب سیستم باربر جانبی برای سازه‌ها در نظر گرفته شود. در طول دهه‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای به منظور ارزیابی مقاومت، شکل‌پذیری، رفتار هیسترزیس، اثر اتصالات تیر به ستون، اثر بازشو، ضریب رفتار، اثر فولاد با تنش تسلیم پائین و غیره بر روی دیوارهای برشی فولادی صورت پذیرفت [۱-۴]. از جمله این مطالعات می‌توان به بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته توسط رابرتز و صبوری‌قمی[1]، آستانه اصل[2] و ویان و همکاران[3] اشاره نمود [۳، ۵ و ۶]. همچنین برای تحلیل و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۲۵، بازنگری ۱۴۰۰/۰۸/۰۴، پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۱۶.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2021.7372.1298

[1]- Roberts and Sbouri-Ghomi
[2]- Astaneh Asl
[3]- Vian

طراحی پانل‌های برشی فولادی، مدل‌های مختلفی نظیر مدل نواری پیشنهادی توربورن[۴] و همکاران و مدل اندرکنش ورق با قاب توسط صبوری‌قمی و رابرتز پیشنهاد شد [۳ و ۷].

در طی بررسی‌های مختلف توسط محققین، سه رویکرد کلی برای طراحی دیوارهای برشی فولادی در نظر گرفته شدند. اولین استراتژی، استفاده از ورق ضخیم‌تر، سخت‌کننده‌های عرضی، سخت‌کننده‌های متقاطع و قطری بود که موجب تقویت ورق فولادی دیوار برشی می‌شد [۸-۱۲]. همچنین راهکار دیگر، برای تقویت ورق فولادی و افزایش مقاومت کمانشی، استفاده از تخته‌های بتنی در دو طرف ورق فولادی دیوار بود [۱۳ و ۱۴]. نقص اصلی این تکنیک، استفاده زیاد از مصالح فولادی است. در عین حال، معمولاً تسلیم ورق فولادی در این تکنیک بعد از تسلیم کلی قاب فولادی اتفاق می‌افتد، که در نتیجه نمی‌تواند به عنوان وسیله استهلاک انرژی عمل کند. دومین استراتژی، استفاده از ورق فولادی نازک به منظور اجازه دادن و رخ دادن کمانش برشی در ورق فولادی با تعریف حفره‌هایی عمودی و بازشوهایی با اشکال مختلف در داخل و لبه‌های دیوار به منظور ضعیف کردن ورق فولادی دیوار بود [۱۵-۲۰]. به عنوان راهکار دیگر، از مصالح فولادی با نقطه تنش تسلیم پایین جهت کاستن مقاومت برشی استفاده شد [۲ و ۲۱-۲۴].

در این حالت، مقاومت پس کمانشی بزرگی در سیستم دیوار برشی فولادی در اثر ایجاد میدان کششی ایجاد می‌شود. تشکیل میدان کششی بعد از کمانش برشی ورق فولادی نازک می‌تواند به سیستم دیوار برشی فولادی برای تداوم مقاومت در برابر نیروی افقی کمک کند. از طرفی، نیروهای کششی که در اثر میدان کششی تولید شدند به طور مستقیم به ستون قاب منتقل می‌شوند و این موضوع می‌تواند باعث تسلیم زودرس آن شود. کمانش برشی الاستیک ورق فولادی معمولاً منجر به کاهش سختی و مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود. علاوه بر این، شکل‌گیری متناوب میدان کششی قطری و میدان فشاری تحت بار چرخه‌ای موجب آسیب رساندن به ورق می‌شود که توسط آزمایش و مدل‌سازی عددی ثابت شده است. سومین استراتژی، استفاده از ورق‌های نازک فولادی با تخته‌های مقاوم بتن در برابر کمانش بود. مشکل این روش در این بود که تخته مقاوم در برابر کمانش معمولاً از بتن ساخته می‌شود که طبیعتاً باعث افزایش وزن دیوار برشی شده و به دلیل مقاومت کششی پایین بتن، این تخته‌ها ممکن است تحت بارهای ناگهانی از قبیل زلزله دچار ترک‌هایی شوند [۲۵ و ۲۶].

با توجه به نواقص مطرح شده، نوع جدیدی از دیوار برشی فولادی کمانش‌تاب در سال ۲۰۱۷ توسط ونگ[۵] و همکاران معرفی شد. این دیوار برشی فولادی، از دو ورق فولادی نازک با فاصله کم از یکدیگر در داخل قاب فولادی قرار دارند. شیارهای مورب روی هر دو ورق فولادی ایجاد می‌شود. این شیارها بر روی ورق‌ها در جهت عکس یکدیگر قرار دارند [۲۷]. از مزایای این سیستم نسبت به سیستم دیوار برشی فولادی مرسوم می‌توان به این موضوع اشاره نمود که شرایط تنش ورق به طور متناوب از کشش و فشار قطری به کشش و فشار محوری تغییر پیدا می‌کند که به طور مؤثری آسیب پلاستیک را که معمولاً در ورق فولاد معمولی تحت کمانش برشی و تسلیم کششی اتفاق می‌افتد، از بین می‌برد. همچنین سختی و مقاومت این سیستم را می‌توان با تغییر در تعداد شیارها، عرض شیارها، فاصله نوارها و زاویه شیارها با محور افق بدون تغییر در ضخامت ورق فولادی دیوار تنظیم نمود.

با توجه به تأثیر عوامل محیطی بر عملکرد رفتار سازه‌ها، مخصوصاً سازه‌های بلندمرتبه و خاص، بایستی خطرات محیطی که موجب مختل نمودن عملکرد سازه می‌شود را در طراحی آنها در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین

[4]- Thorburn

[5]- Wang

عوامل محیطی، آتش‌سوزی ساختمان‌ها است و برای لحاظ کردن اثرات آن در سازه‌ها باید رفتار مصالح و اجزای مختلف سازه تحت بارگذاری حریق مورد بررسی قرار بگیرد. تأثیر حرارت بر فولاد از لحاظ خواص مکانیکی با زوال خصوصیات مقاومتی و سختی آن همراه است. حرارت زیاد، بر سختی الاستیک، مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته مصالح فولاد تأثیرگذار است. به دلیل انبساط حرارتی فولاد، در اعضای سازه‌های مقید، نیروهای مازاد بر نیروهای داخلی اعضا بر آنها اعمال می‌شود که قابل ملاحظه است و موجب تغییرشکل‌های بزرگ در سازه می‌شود و باید در طراحی لحاظ گردد [۲۸].

با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، لیو و چن[۶] به بررسی اندرکنش میان آثار ناشی از آتش و انفجار بر عملکرد ستون‌ها و قاب‌های یک سازه فولادی پرداختند. آنها در مدل سه‌بعدی، کمانش موضعی و کمانش پیچشی- جانبی تیرها را منظور کردند که به موجب آن، هنگامی که ستون‌های بحرانی سازه در معرض آتش قرار گرفتند، دچار کمانش شده و سازه دچار خرابی پیشرونده گردید [۲۹]. یانگ[۷] و همکاران در سال ۲۰۰۵، به بررسی آزمایشگاهی کمانش موضعی ستون‌های فولادی در برابر آتش پرداختند. هدف مطالعه آنها بررسی تغییرات مقاومت نهایی ستون‌های فولادی و آثار کاهنده ناشی از افزایش حرارت بر مقاومت ستون بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بارهای نهایی ستون‌ها با افزایش نسبت عرض به ضخامت یا درجه حرارت، کاهش می‌یابند [۳۰]. لیو در سال ۲۰۰۸، به بررسی قابلیت بهره‌برداری و استفاده مجدد از ساختمان‌های با قاب فولادی در شرایط انفجار و آتش به کمک روش عددی پیشنهادی پرداخت. پس از انجام تحلیل‌های متعدد، مشخص گردید که سازه در برابر اثرات مذکور، کاملاً آسیب‌پذیر است که به دلیل مقاومت کم سازه در برابر آتش، اعضای آن دچار تغییرشکل شدند [۳۱]. در سال ۲۰۰۹، به بررسی پاسخ حرارتی و سازه‌ای سه قاب فولادی کامپوزیتی دوطبقه با دو دهانه تحت بار حرارتی پرداخته شد. این آزمایش‌ها با یکدیگر از نظر تعداد و موقعیت نقاط در معرض حرارت تفاوت داشتند. تحقیقات نشان داد که تغییرشکل‌های ایجاد شده در قاب‌ها، تابعی از تعداد و موقعیت نقاطی است که در معرض بارگذاری حرارتی قرار گرفتند [۳۲]. پژوهشگران دیگری، به بررسی خرابی پیشرونده ساختمان‌های فولادی تحت شرایط آتش پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که قاب‌های مهاربندی نشده با نسبت بارگذاری کمتر و مقطع تیر بزرگ‌تر، دمای گسیختگی بالاتری را نیاز خواهد داشت که در اثر آن خرابی کلی در سازه اتفاق بیافتد [۳۳]. هوهلر[۸] و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی رفتار ورق دیوار برشی فولادی تحت بارهای لرزه‌ای و آتش پرداختند. شش نمونه دیوار برشی فولادی با ابعاد ۲/۷ در ۳/۷ متر که قاب‌های اطراف آن از فولاد سرد نورد شده بودند و ورق‌های فولادی دیوار با استفاده از صفحات گچی پوشانده شده بود، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که آتش باعث تغییر مود خرابی دیوار می‌گردد. در اثر حریق، کمانش موضعی ورق به کمانش کلی تبدیل می‌شود و ظرفیت باربری جانبی آن نیز حدود ۳۵٪ کاهش می‌یابد [۳۴].

ریو[۹] و همکاران در سال ۲۰۲۱ به تحلیل خرابی پیشرونده ورق‌های فولادی تحت بارگذاری حریق پرداختند. آنها توانستند مدل محاسباتی جدید برای تحلیل انتقال حرارت و رفتار خرابی پیشرونده ورق‌های فولادی دارای سخت‌کننده تحت حریق ارائه دهند [۳۵]. محققان همچنین آزمایش‌های حریق بر روی ورق‌های فولادی سرد نورد شده را انجام دادند. نتایج تحقیقات نشان داد که در صورت استفاده از مقاطع مربع یا مستطیلی توخالی در دیوارهای سرد نورده شده نسبت به

[6]- Liew and Chen
[7]- Yang
[8]- Hoehler
[9]- Ryu

مقاطع معمولی، مقاومت در برابر حریق بالاتری خواهند داشت [۳۶]. در مقاله‌ای دیگر در سال ۲۰۱۹، بررسی مقاومت برشی نهایی تیر ورق‌های فولادی در شرایط معمولی و دمای بالا پرداخته شد. پژوهشگران نتایج عددی خود را با ضوابط طراحی آیین‌نامه یوروکد۳[10] مقایسه کرده و رابطه جدیدی برای سهم جان تیر ورق از مقاومت کمانش برشی در دو وضعیت دمایی مختلف ارائه نمودند [۳۷].

در واقعیت به دلیل اینکه ممکن است پس از وقوع زلزله اصلی، زیرساخت‌هایی نظیر تأسیسات برقی و گاز دچار آسیب شده و این آسیب منجر به آتش‌سوزی گردد، بنابراین بررسی ظرفیت باقیمانده سیستم برای مقابله با پس‌لرزه‌های بعدی و به طور کلی، تعیین ظرفیت باربری سیستم نیاز به بررسی جامعی دارد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه آتش و سازه‌های فولادی شامل دیوار برشی فولادی، ملاحظه می‌گردد که تحقیقات اندکی بر روی رفتار این سیستم صورت پذیرفته است و نتایج محدودی ارائه شده است. همچنین یافته‌های کمی در ارتباط با دیوارهای برشی فولادی کمانش‌تاب تمام فولادی وجود دارد. از این‌رو، در این مقاله، به بررسی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی کمانش‌تاب تمام فولادی در مقابل آتش و میزان آسیب‌پذیری آن پرداخته شده است. در این تحقیق، پس از حصول اطمینان از عملکرد مدل عددی، ابتدا مدل المان محدود از سیستم دیوار برشی نازک فولادی کمانش‌تاب، تحت حریق با الگوی بارگذاری ISO-834 قرار داده می‌شود [۳۸]. سپس، دیوار برشی فولادی مطابق با الگوی بارگذاری ATC-24 تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد تا رفتار و عملکرد آن بررسی گردد [۳۹].

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل‌های عددی

مدل‌های شبیه‌سازی شده در مطالعه حاضر، مطابق با مدل ارائه شده توسط ونگ و همکاران می‌باشد [۲۷]. ابعاد ورق فولادی دیوار برابر با ۲ متر و ضخامت ۶ میلیمتر می‌باشد. از مقاطع Hشکل به سطح مقطع ۳۰۰×۳۰۰×۱۶×۱۶ برای المان‌های مرزی استفاده شده است. تنش تسلیم مصالح فولادی به‌کار رفته در المان‌های مرزی برابر با ۳۴۵ مگاپاسکال و در ورق فولادی دیوار برشی برابر با ۲۳۵ مگاپاسکال می‌باشد. فرآیند مدل‌سازی با کمک برنامه المان محدود آباکوس نسخه ۶/۱۴ انجام گرفته است و المان‌های پوسته‌ای S4R چهارگره‌ای انتگرال کاهش یافته برای مش‌بندی المان‌های مرزی و ورق دیوار فولادی استفاده شده است [۴۰]. علاوه‌بر این، هندسه غیرخطی سیستم در تحلیل‌ها لحاظ شده است. ورق فولادی دیوار نیز به المان‌های مرزی با استفاده از قید tie متصل شده است.

تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر نسبت لاغری ورق دیوار، عرض شیار، عرض نوار بین دو شیار و دمای حریق بر رفتار دیوار برشی تمام فولادی کمانش‌تاب به روش المان محدود بررسی شدند. در جدول ۱، جزییات مدل‌های عددی مورد مطالعه در این مقاله ارائه شده است. با توجه به جدول، حرف IP از ابتدای دو حرف Infill Plate گرفته شده است. عدد بعد از آن بیانگر ضخامت ورق دیوار فولادی است. اعداد بعدی به ترتیب نمایانگر عرض شیار، عرض نوار بین دو شیار و دمای حریق می‌باشد. بدین ترتیب، ۲۵۶ مدل عددی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داده شد.

۲-۲- المان

رفتار دیوار برشی فولادی با استفاده از برنامه المان محدود آباکوس/استاندارد مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۴۰]. در مدل المان محدود، ورق فولادی دیوار و المان‌های مرزی با استفاده از المان S4R که یک المان پوسته‌ای چهارگره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته است، مدل

[10]- Eurocode 3

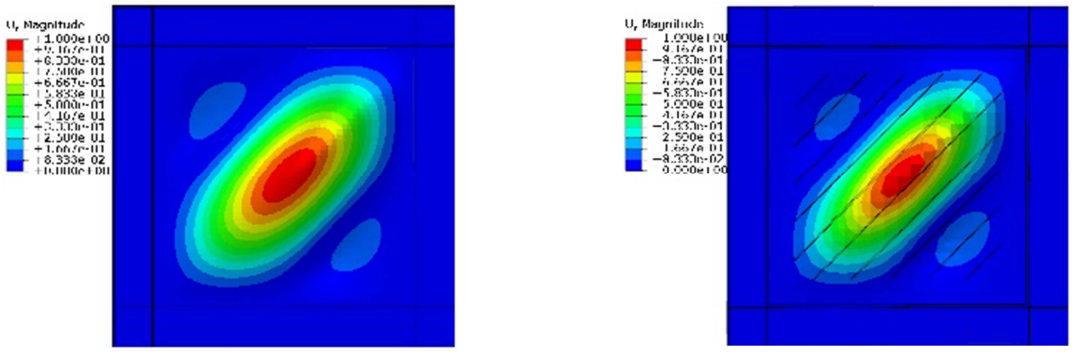
شده است. همچنین با انجام آنالیز حساسیت، اندازه کلی مش برابر با ۴۰ در ۴۰ میلیمتر حاصل شده است.

جدول ۱- معرفی و نامگذاری مدل‌های عددی

	دما (^{o}C)	عرض نوار (mm)	عرض شیار (mm)	ضخامت (mm)
IP	۲۰	۱۰۰	۱۰	۳
	۴۵۸	۱۵۰	۳۰	۴
	۶۴۲	۲۰۰	۶۰	۵
	۹۱۷	۲۵۰	۱۰۰	۶

۲-۳- ناکاملی اولیه

در تمام مدل‌ها، یک ناکاملی اولیه کوچک اعمال شده است. آیین‌نامه یوروکد۳ توصیه می‌کند که ناکاملی برون صفحه‌ای ورق‌ها باید کمتر از ۰/۰۰۵ عرض یا ۰/۰۰۵ ارتفاع پنل فولادی باشد [۴۱]. برای لحاظ نمودن ناکاملی اولیه به مدل‌ها، یک تحلیل کمانش انجام گرفت و مود کمانش اول آن استخراج شد. تحلیل کمانش الاستیک دیوار فولادی با ورق بدون شیار و با شیار در شکل ۱ نشان داده شده است.



(الف) (ب)

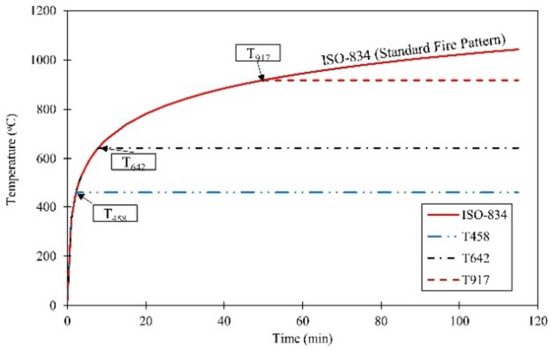
شکل ۱- ناکاملی هندسی اولیه برای دیوارهای برشی فولادی (الف) با و (ب) بدون شیار

۲-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

مطالعه حاضر، به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی تحت حریق انجام گرفته است. از این‌رو، مدل‌های شبیه‌سازی شده در دو گام تحلیل می‌شوند. در گام اول، حرارت تا رسیدن به دمای هدف و براساس استاندارد ISO-834 افزایش داده می‌شود [۳۸]. تأثیر آتش اغلب با استفاده از یک منحنی دما- زمان بیان می‌گردد. در تحقیق حاضر، از رابطه و منحنی ISO-834 استفاده شده است:

$$T = 345\log_{10}^{(8t+1)} + T_0 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، T_0 دمای اولیه و T دمای ثانویه برحسب درجه سلسیوس است. t دوره و زمانی که حریق طول می‌کشد و برحسب دقیقه است، می‌باشد (شکل ۲).



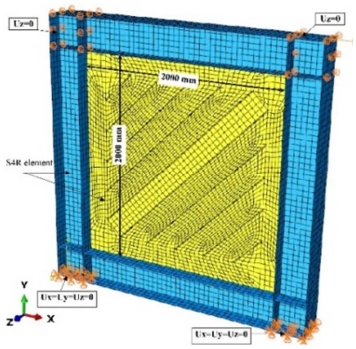
شکل ۲- الگوی بارگذاری آتش مطابق با استاندارد ISO-834 [۳۸]

در گام دوم، تحت دمای ثابت، تحلیل‌های چرخه‌ای انجام می‌شوند. بنابراین، در این سناریو، دیوار فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق با الگوی بارگذاری مندرج در ATC-24 قرار گرفته و رفتار آن در دمای بالا بررسی می‌شود [۳۹]. الگوی بارگذاری اعمال شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

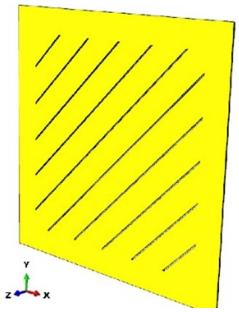
روش نیوتن- رافسون برای بروزرسانی ماتریس مماسی در طول تحلیل غیرخطی استفاده شده است. اتصالات بین المان‌های مرزی به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. قید tie در مرز مشترک بین ورق فولادی دیوار و المان‌های مرزی جهت شبیه‌سازی جوش بین آنها استفاده شده است [۴۰]. انتهای پایین المان‌های عمودی در سه راستای انتقالی محور مختصات مقید شدند که در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییرمکان در راستای محور z برای بالای انتهای المان‌های عمودی جهت منظور نمودن ممانعت از تغییرشکل برون محوری، مقید شده است. همچنین بار رفت‌وبرگشتی به انتهای سمت راست بالای المان افقی با روش کنترل تغییرمکان در تحلیل‌های چرخه‌ای غیرخطی اعمال شده است.

جدول ۲- الگوی بارگذاری چرخه‌ای

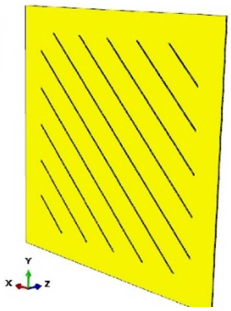
شماره سیکل	زاویه دریفت (رادیان)	شماره سیکل	زاویه دریفت (رادیان)	شماره سیکل	زاویه دریفت (رادیان)
۱	± ۰/۰۱۵	۳	± ۰/۰۰۷۵	۵	± ۰/۰۰۲۵
۲	± ۰/۰۲	۴	± ۰/۰۱	۶	± ۰/۰۰۵



(الف) مدل مش‌بندی شده و شرایط مرزی



(ب) نمای روبرو از دیوار دارای شیار



(پ) نمای پشت دیوار دارای شیار

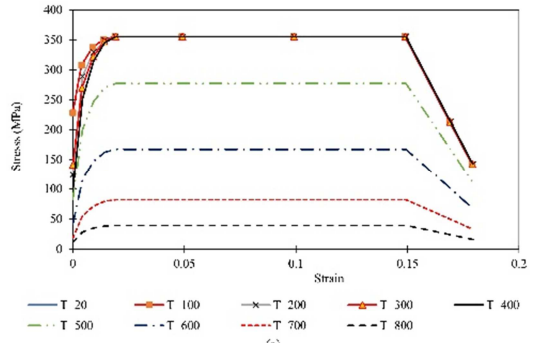
شکل ۳- مدل المان محدود

۲-۵- مصالح فولادی

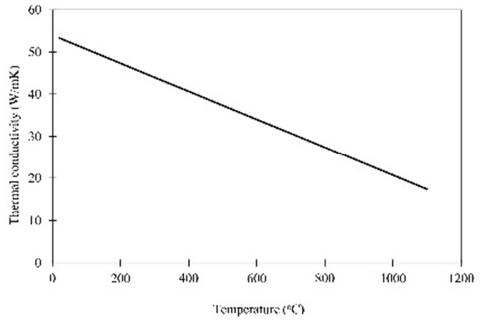
مدل سخت‌شوندگی جنبشی غیرخطی[11] با مدل خسارت شکل‌پذیر ماده[12] برای بیان رابطه تنش- کرنش

[11]- Nonlinear kinematic hardening model
[12]- Ductile material damage

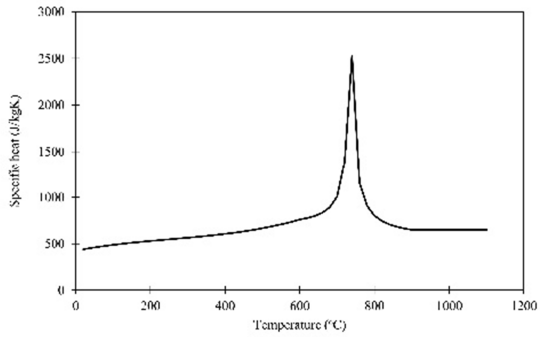
فولاد در تحقیق در نظر گرفته شده است [۴۰]. المان‌های مرزی از فولاد با تنش تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال و روق فولادی دیوار از فولاد با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال تشکیل شده است. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد در تحقیق به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. اثر بوشینگر در تغییرشکل پلاستیک برای مدل‌سازی واقعی‌تر رفتار مصالح تحت بارگذاری چرخه‌ای فرض گردیده است. علاوه بر این، معیار تسلیم فون میسز برای تسلیم مواد استفاده شده است. ضمناً، مشخصات مکانیکی مصالح وابسته به دما مطابق با استاندارد یوروکد۳ در شکل ۴ نشان داده شده است [۴۱].



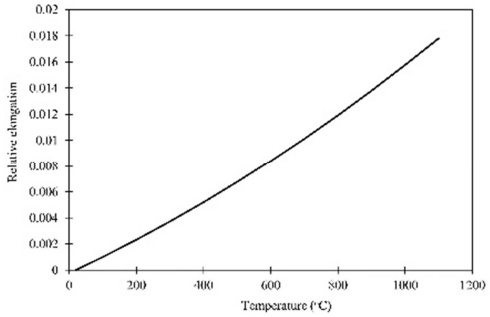
(الف) منحنی‌های تنش- کرنش



(ب) هدایت حرارتی



(پ) گرمای ویژه



(ت) تغییرطول حرارتی در دماهای مختلف

شکل ۴- مشخصات حرارتی مصالح فولادی

۳- اعتبارسنجی مدل عددی

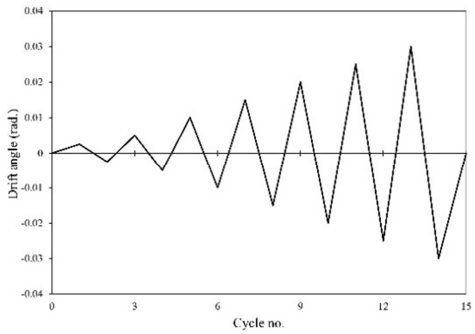
برای اعتبارسنجی مدل المان محدود عددی، از سه مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. در مدل نخست، دو نمونه از ورق فولادی دارای دو ردیف شیار تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط هیتاکا و ماتسویی[۱۳] قرار داده شد [۴۲]. در مدل دوم، رفتار یک دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه با ورق فولادی دارای تنش تسلیم پائین تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط چن و جانگ[۱۴] مورد بررسی قرار گرفت [۴۳]. به دلیل نبود مدل آزمایشگاهی از دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری حریق، از مدل آزمایشگاهی رفتار تیر تحت بارگذاری حریق که توسط توریک[۱۵] و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۴۴]. در ادامه، جزییات و نتایج هر سه مدل اعتبارسنجی تشریح می‌شوند.

(الف) مدل اعتبارسنجی اول

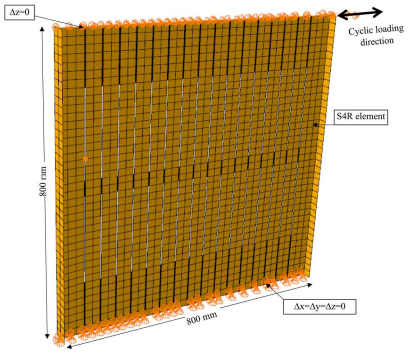
هیتاکا و ماتسویی، ۴۲ نمونه آزمایشگاهی شامل ورق فولادی با آرایش‌های مختلف شیارهای عمودی روی ورق فولادی را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادند. ورق فولادی مربع‌شکل به بعد ۸۰۰ میلیمتر بود که دو سخت‌کننده به عرض ۵۰ میلیمتر در دو لبه آن واقع

13- Hitaka and Matsui
14- Chen and Jhang
15- Toric

شده است. ضخامت ورق و سخت‌کننده برابر با ۴/۵ میلیمتر می‌باشد. تنش تسلیم و نهایی ورق‌ها به ترتیب برابر با ۲۹۷ و ۳۸۲ مگاپاسکال می‌باشند [۴۲]. از بین نمونه‌های آزمایش شده، دو نمونه با نام‌های A102(C) و A202(C) برای اعتبارسنجی انتخاب گردید. تفاوت این دو نمونه در فاصله شیارها از یکدیگر و طول شیار می‌باشد. در هر دو نمونه، عرض شیار برابر با ۳ میلیمتر اختیار شده است. همچنین فاصله شیارها از یکدیگر در نمونه‌های A102(C) و A202(C) به ترتیب برابر با ۴۲ و ۸۶ میلیمتر می‌باشد. همچنین طول شیارها در دو نمونه برابر با ۲۳۵ و ۱۶۸ میلیمتر در نظر گرفته شدند. الگوی بارگذاری چرخه‌ای در شکل ۵ به همراه نمونه مش‌بندی شده نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- مدل‌سازی عددی، (الف) الگوی بارگذاری چرخه‌ای [۴۲] و (ب) مدل مش‌بندی شده با شرایط مرزی

در شکل ۶ مقایسه‌ای بین نتایج نمودارهای نیرو- دوران و تغییرات سختی- شماره سیکل برای دو نمونه A102(C) و A202(C) صورت گرفته است. با توجه به نمودارها، می‌توان دریافت که حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه عددی A102(C) برابر با ۱۰۸/۳ کیلونیوتن است که تقریباً ۱/۵ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی است. همچنین براساس تغییرات سختی سیکل‌ها مشخص می‌شود که حداکثر اختلاف در مقدار سختی در سیکل‌های اول و سوم به میزان ۵ درصد بین دو نمونه المان محدود و آزمایشگاهی وجود دارد. با توجه به شکل ۶- ب، حداکثر اختلاف سختی بین دو نمونه آزمایشگاهی و عددی به تقریبا ۸ درصد می‌رسد که در سیکل شماره ۱ اتفاق می‌افتد.

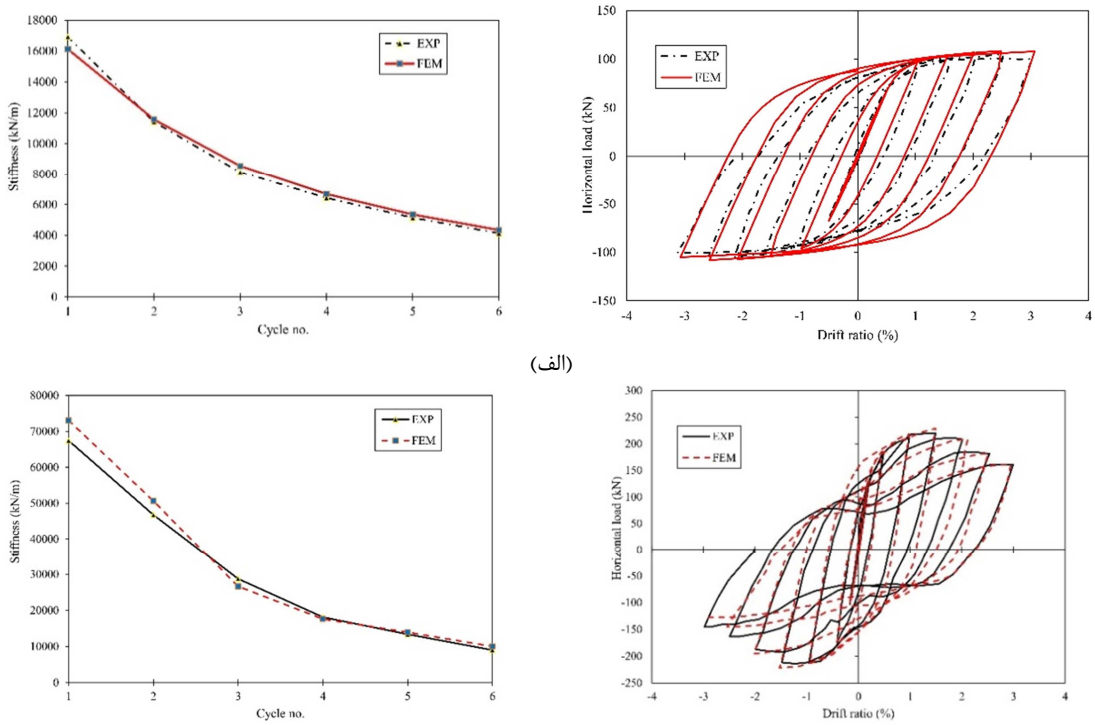
علاوه‌بر این در شکل ۷ مقایسه‌ای بین دو شکل مود نهایی دو نمونه آزمایشگاهی و عددی A202(C) نشان داده شده است که تمام موارد صحت نتایج مدل عددی را تأیید می‌نماید.

(ب) مدل اعتبارسنجی دوم

مدل صحت‌سنجی دوم از تحقیق انجام گرفته توسط چن و جانگ بر روی دیوار فولادی برشی متشکل از ورق فولادی با تنش تسلیم پائین انتخاب شده است. آنها در این تحقیق، از ورق فولادی با تنش تسلیم و تنش نهایی ۹۳ و ۲۷۲ مگاپاسکال استفاده نمودند [۴۲]. عملکرد پنج نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نمونه شماره ۱ از تحقیق آنها برای اعتبارسنجی مرحله دوم انتخاب شده است. ورق مربع‌شکل دیوار فولادی به بعد ۱۲۵۰ و ضخامت ۸ میلیمتر می‌باشد. برای تیر و ستون‌های اطراف ورق فولادی دیوار برشی به ترتیب از مقاطع H۲۴۴×۱۷۵×۷×۱۱ و H۲۵۰×۲۵۰×۹×۱۴ استفاده شده است. در جدول ۳، مشخصات مکانیکی مصالح ارائه شده است.

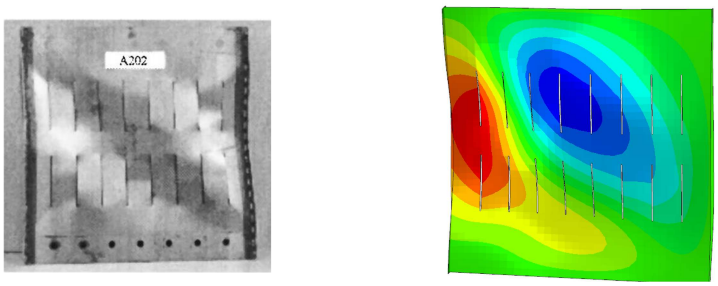
در شکل ۸ الگوی بارگذاری به‌کار رفته در مدل شماره ۱ و مدل مش‌بندی شده به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است. در شکل ۹ نیز مقایسه‌ای بین

نمودارهای نیرو- تغییرمکان دو نمونه آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است.



منحنی نیرو- نسبت دریفت رابطه بین سختی و سیکل‌های بارگذاری

شکل ۶- مقایسه نتایج مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی (الف) A102(C) و (ب) A202(C) [۴۲]



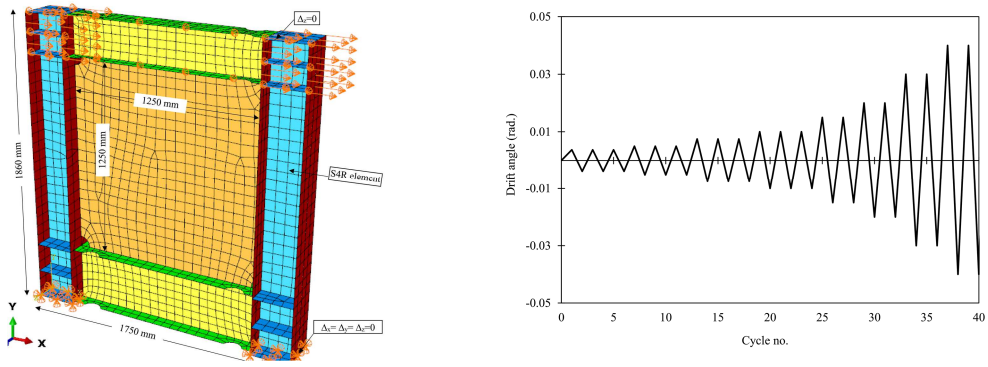
(الف) (ب)

شکل ۷- شکل مود نهایی نمونه (الف) آزمایشگاهی [۴۲] و (ب) عددی مدل A202(C)

مطابق با نمودار، مشخص می‌شود که حداکثر نیروی جانبی قابل تحمل توسط نمونه آزمایشگاهی برابر با ۱۱۹۰ کیلونیوتن است که تقریباً ۲/۵ درصد بیشتر از همان نیرو در مدل عددی است. همچنین دریافت می‌شود که حداکثر اختلاف تغییرات سختی در سیکل اول و به مقدار ۸ درصد می‌باشد. در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین تغییرشکل نهایی دو مدل عددی و آزمایشگاهی شماره ۱ نشان داده شده است که نشان از صحیح بودن نتایج مدل عددی دارد.

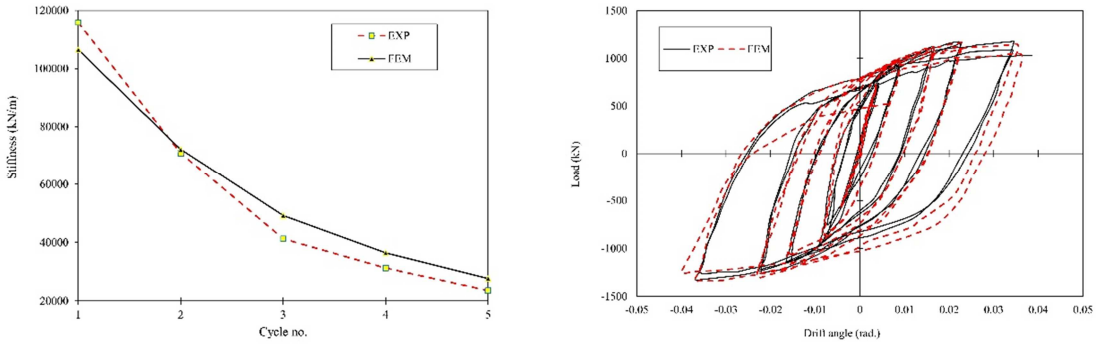
جدول ۳- مشخصات مکانیکی مصالح فولادی [۴۳]

ضخامت ورق (میلیمتر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (درصد)
۷	۴۴۵	۵۵۶	۱۳
۹	۳۳۶	۴۵۴	۱۲
۱۱	۴۳۹	۵۴۱	۱۳
۱۴	۳۱۷	۴۴۲	۱۲



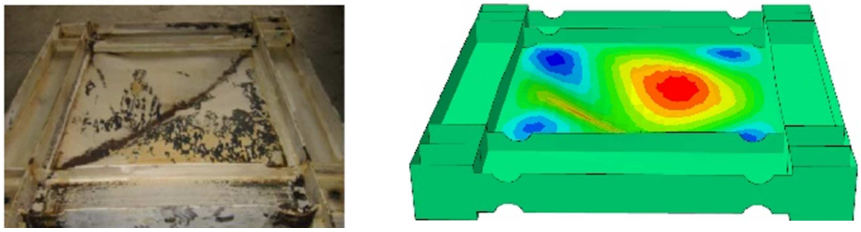
(الف) (ب)

شکل ۸- مدل عددی شماره ۱، (الف) الگوی بارگذاری چرخه‌ای و (ب) شرایط مرزی



(الف) منحنی نیرو- نسبت دریفت (ب) رابطه بین سختی و سیکل‌های بارگذاری

شکل ۹- مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی شماره ۱



(الف) (ب)

شکل ۱۰- شکل مود نهایی دو مدل عددی و آزمایشگاهی شماره ۱

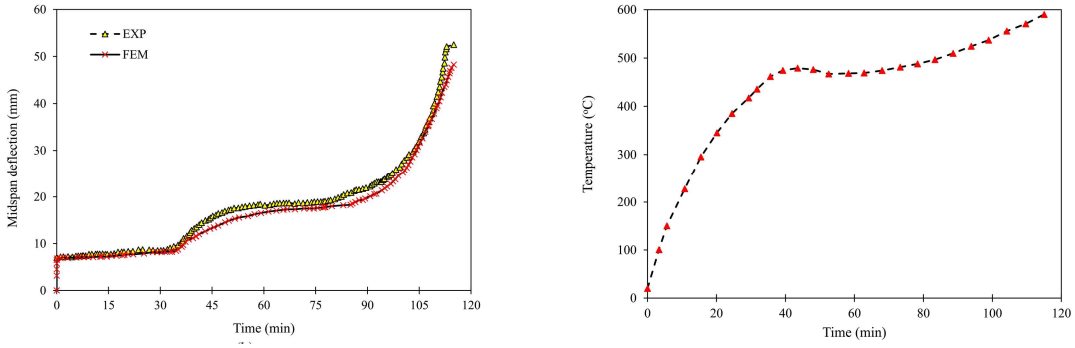
(ج) مدل اعتبارسنجی سوم

در سال ۲۰۱۳، توریک و همکاران مطالعه آزمایشگاهی روی یک تیر فولادی تحت حریق را انجام دادند. در این مطالعه از تیر به طول ۲/۵ متر متکی بر دو تکیه‌گاه مفصلی در ابتدا و انتهای دهانه استفاده شد [۴۴]. طولی به میزان ۱/۲۵ متر وسط دهانه تحت بارگذاری حریق مطابق با شکل (۱۱- الف) قرار داده شد. در گام اول، یک بار قائم ثابت ۲۰۰ کیلونیوتن به وسط دهانه اعمال گردید. در مرحله دوم، تغییرشکل ناشی از حضور آتش در وسط دهانه در مدت زمان ۱۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. تنش تسلیم فولاد به‌کار رفته در تیر فولادی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس برابر با ۳۷۰ مگاپاسکال و تنش نهایی آن برابر با ۵۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. مقایسه خیز وسط دهانه بین دو نمونه آزمایشگاهی و عددی در شکل (۱۱- ب) نمایش داده شده است. تغییرشکل محاسبه شده توسط توریک و همکاران و نتیجه مطالعه عددی با یکدیگر تطبیق قابل قبولی دارند. حداکثر میزان اختلاف بین نتایج دو نمونه را می‌توان در حدود ۲ درصد در مدت زمان بارگذاری یافت.

۴- نتایج و بحث

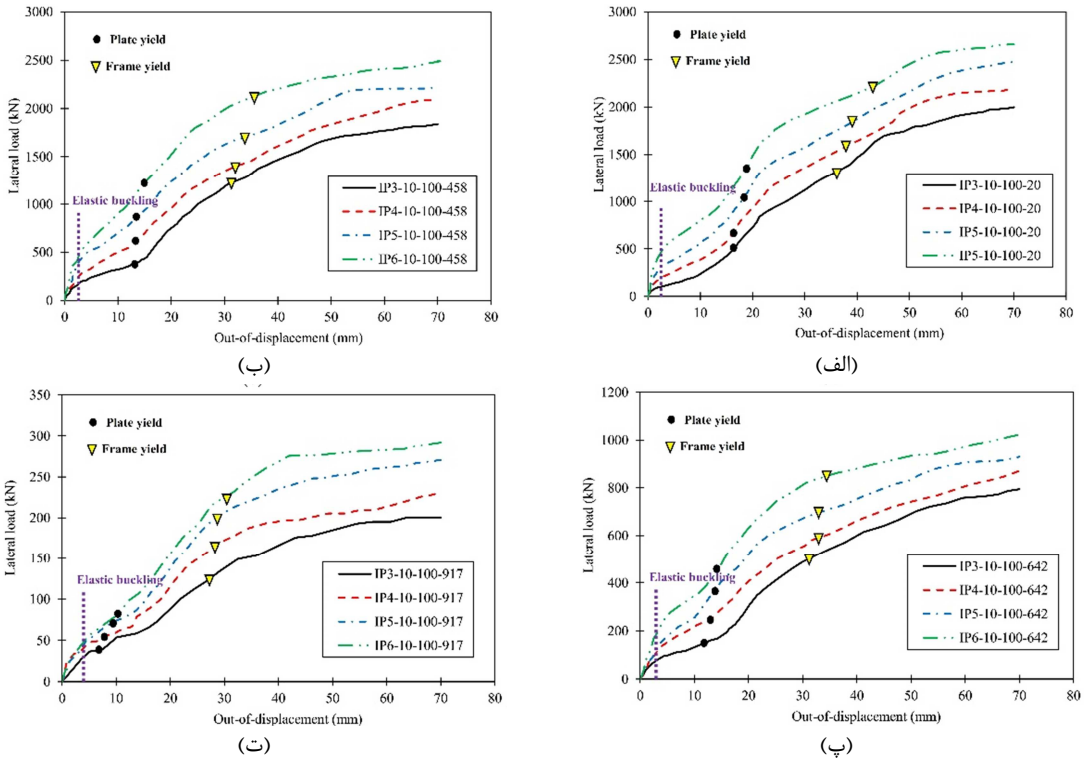
۴-۱- تأثیر نسبت لاغری ورق دیوار فولادی

برای مشاهده تأثیر نسبت لاغری بر رفتار دیوار برشی فولادی مورد بحث، از چهار مقدار ۶۶۶/۷، ۵۰۰، ۴۰۰ و ۳۳۳/۳ استفاده شده است. با توجه به بعد ورق دیوار برشی (۲۰۰۰ میلیمتر)، ضخامت ورق متناظر با مقادیر فوق برابر با ۳، ۴، ۵ و ۶ میلیمتر می‌شود. رفتار کمانشی دیوار برشی با ضخامت‌های مختلف ورق دیوار در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل، تغییرشکل‌های برون صفحه‌ای در برابر نیروهای جانبی اعمالی ارائه شده‌اند. همچنین در شکل ۱۳ نمودارهای نیرو- نسبت تغییرمکان نسبی نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۱۱- تغییرات دما، (الف) الگوی دما- زمان و (ب) منحنی تغییرشکل- زمان در وسط دهانه تیر

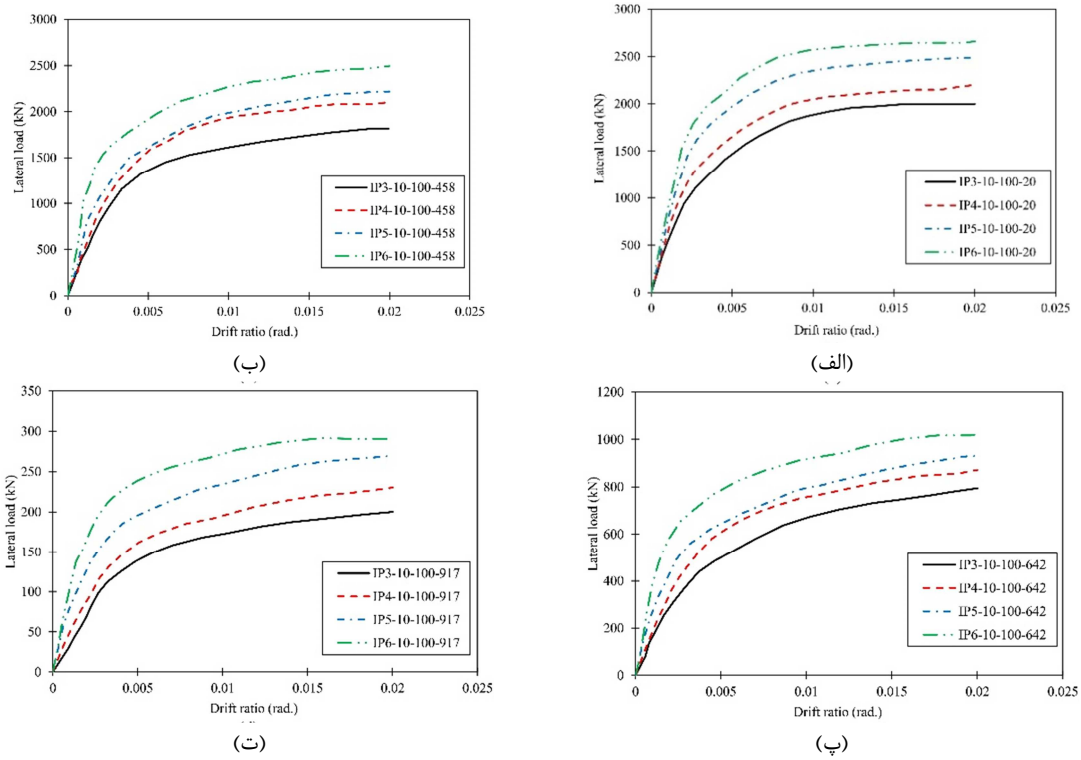


(الف) (ب) (پ) (ت)

شکل ۱۲- منحنی تغییرشکل برون محوری- بار جانبی برای مدل‌های عددی با ضخامت‌های مختلف در دمای (الف) ۲۰، (ب) ۴۵۸، (پ) ۶۴۲ و (ت) ۹۱۷ درجه سلسیوس

با توجه به تعداد زیاد نمونه‌ها، تنها نتایج نیروی جانبی- تغییرمکان برون صفحه‌ای نمونه‌های با عرض شیار و نوار ثابت برابر با ۱۰ و ۱۰۰ میلیمتر در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۲، مقاومت کمانشی و توالی تسلیم مؤلفه‌های سیستم دیوار برشی فولادی با ضخامت‌های مختلف ورق دیوار و دماهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش ضخامت ورق دیوار منجر به افزایش قابل ملاحظه در

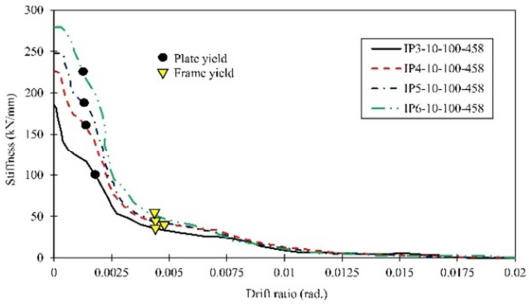
مقاومت کمانش و کاهش تغییرمکان برون صفحه‌ای می‌شود. به طور مثال، در دمای ۹۱۷ درجه سلسیوس، با افزایش ضخامت ورق دیوار از ۳ به ۶ میلیمتر، مقاومت کمانشی، افزایش تقریباً ۴۵ درصدی را خواهد داشت. همچنین کمانش الاستیک در تمام نمونه‌ها در محدوده ۱/۵ تا ۲/۵ میلیمتر از تغییرشکل برون محوری رخ می‌دهد.



شکل ۱۳- منحنی تغییرشکل جانبی- بار جانبی برای مدل‌های عددی با ضخامت‌های مختلف در دمای (الف) ۲۰، (ب) ۴۵۸، (پ) ۶۴۲ و (ت) ۹۱۷ درجه سلسیوس

علاوه‌بر این موارد، باید بیان نمود که با افزایش حرارت، نقطه تسلیم ورق و قاب در تغییرمکان کمتر اتفاق می‌افتد. با افزایش ضخامت ورق دیوار، نقطه تسلیم ورق در نسبت دریفت بالا رخ می‌دهد. با این‌حال، برای دیوار برشی فولادی با ضخامت ورق مختلف، نقطه تسلیم ورق همیشه قبل از نقطه تسلیم قاب است (شکل ۱۳). همچنین در تمام موارد با افزایش ضخامت مشاهده می‌شود که ظرفیت برشی نیز افزایش یافت.

نمودار سختی- نسبت دریفت برای دیوار برشی مورد نظر با ضخامت‌های مختلف در دماهای متفاوت در شکل ۱۴ نشان داده شد. برای دیوار برشی با ضخامت متفاوت ورق دیوار، سختی جانبی اولیه با کاهش ضخامت ورق دیوار، کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت دریفت، به تدریج ناپدید می‌شود. با این وجود، مشاهده می‌شود که دیوار برشی موردنظر تغییرشکل‌های الاستیک را با حداکثر سختی جانبی تجربه می‌کند. قبل از نسبت دریفت حدوداً ۰/۱۰ درصد، کاهش ناچیز در سختی وجود دارد و دلیل آن کمانش موضعی نوارهای بین دو شیار در ناحیه فشاری هستند. پس از نسبت دریفت ۰/۱۰ درصد، به دلیل توالی تسلیم نوارهای بین شیارها، کاهش در سختی اتفاق می‌افتد. ناحیه تسلیم با افزایش نیروی برشی به تدریج گسترش می‌یابد. افت ناگهانی در سختی جانبی زمانی به‌وجود می‌آید که نسبت دریفت به ۰/۴۷ درصد می‌رسد. دلیل این موضوع این است که تمام نوارهای مورب بین دو شیار تسلیم شده‌اند.



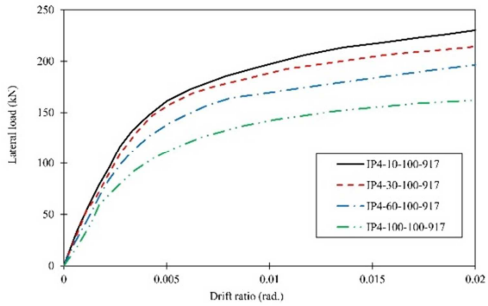
شکل ۱۴- منحنی سختی- نسبت دریفت مدل‌های عددی المان محدود با مقادیر متفاوت ضخامت ورق دیوار در دمای ۴۵۸ درجه سلسیوس

۴-۲- تأثیر عرض شیار

برای دست یافتن به سختی جانبی و ظرفیت برشی مطلوب، نیاز نیست تنها به استفاده از ورق فولادی با ضخامت مختلف یا مصالح فولادی با تنش تسلیم متفاوت محدود شد. بلکه می‌توان با تغییر در عرض شیار به سطوح مختلف از سختی جانبی و مقاومت برشی دست یافت. چهار مقدار برای عرض شیار شامل ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شدند. نمودار نیروی جانبی- نسبت دریفت برای نمونه‌های دارای عرض نوار برابر با ۱۰۰ و ضخامت ورق برابر با ۴ میلیمتر در شکل ۱۵ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی با افزایش عرض شیار کاهش می‌یابد. به طور نمونه، برای مدل‌های ارائه شده در شکل ۱۵، با افزایش عرض شیار از ۱۰ به ۱۰۰ میلیمتر، ظرفیت باربری جانبی از ۲۳۰ کیلونیوتن به ۱۶۲ کیلونیوتن رسیده است که ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین، سختی اولیه مدل‌ها نیز تقریباً ۳۵ درصد کاهش یافت.

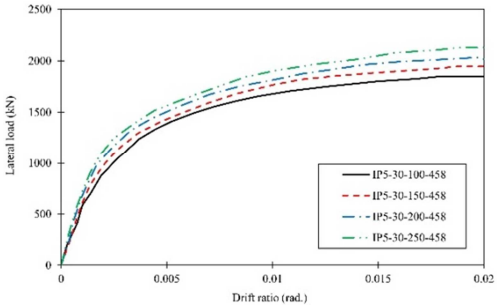
۴-۳- تأثیر عرض نوار

با توجه به جدول ۱، چهار مقدار برای عرض نوار در مطالعات پارامتریک لحاظ شد که برابر با ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلیمتر می‌باشد. در شکل ۱۶، رابطه بین نسبت دریفت و بار جانبی برای مدل‌های المان محدود با ضخامت ورق ۵ میلیمتر و عرض شیار ۳۰ میلیمتر در دمای ۴۵۸ درجه سلسیوس نشان داده شده است.



شکل ۱۵- منحنی بار جانبی- نسبت دریفت مدل‌های عددی المان محدود با عرض‌های شیار مختلف در دمای ۹۱۷ درجه سلسیوس

مقاومت برشی و سختی دیوارهای فولادی با عرض‌های مختلف نوار با افزایش عرض نوار رابطه مستقیمی دارد. با توجه به نتایج، با تغییر عرض نوار از ۱۰۰ میلیمتر به ۲۵۰ میلیمتر، ظرفیت باربری از ۱۸۵۱ کیلونیوتن به ۲۱۲۵ کیلونیوتن (تقریبا ۱۵ درصد) افزایش یافته است.

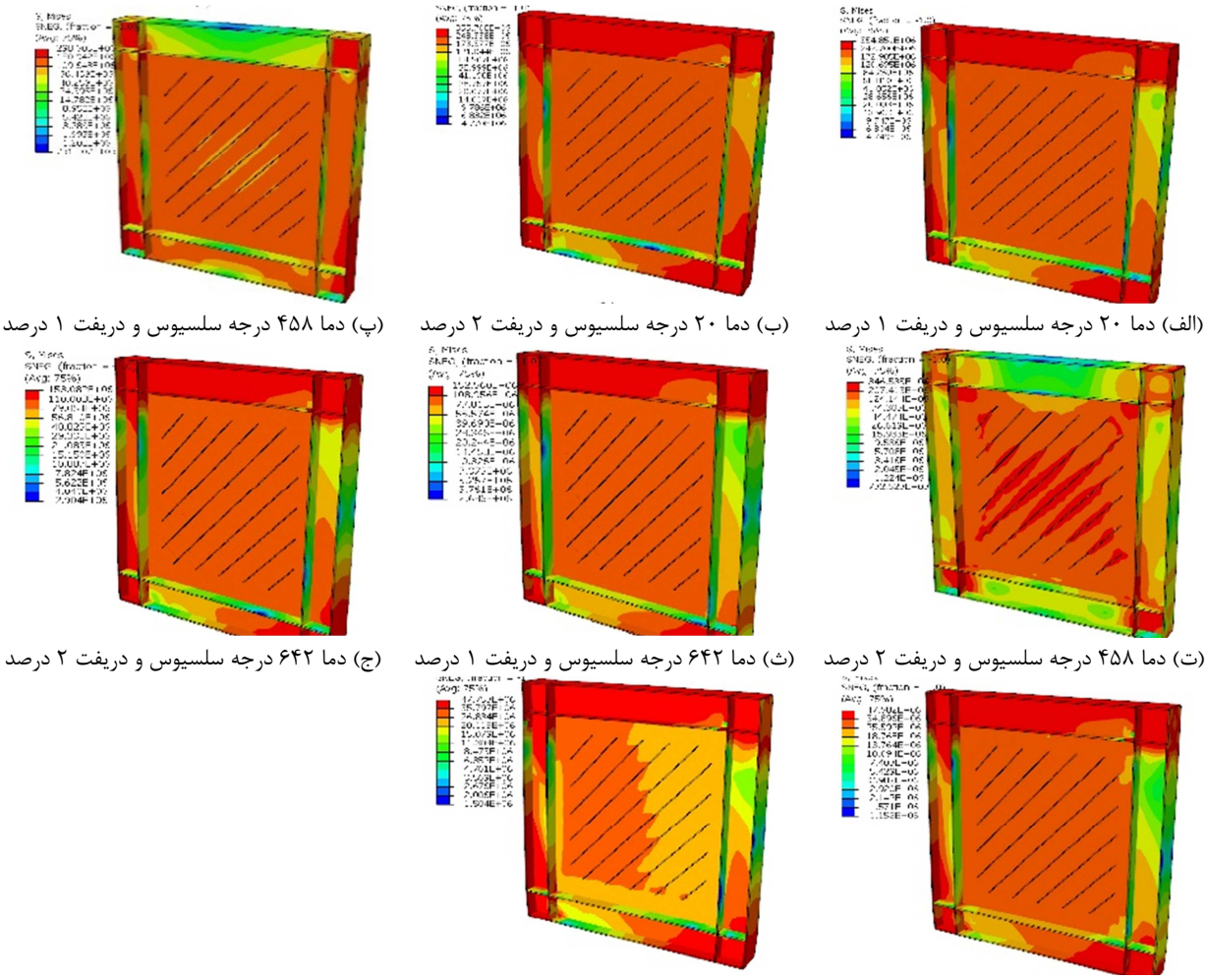


شکل ۱۶- منحنی‌های نیرو- نسبت دریفت برای مدل‌های المان محدود با عرض‌های نوار مختلف در دمای ۴۵۸ درجه سلسیوس

۴-۴- تأثیر دما

شکل ۱۷، توزیع تنش فون میسز دیوار برشی را در نسبت‌های مختلف دریفت و در دمای ۲۰ درجه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقدار و موقعیت تنش‌ها با کنتورهای رنگی نشان داده شده‌اند. بر این اساس، با افزایش دما، حداکثر تنش قابل تحمل توسط اعضای دیوار فولادی کاهش پیدا می‌کند. به عنوان نمونه در نسبت

دریفت ۱ درصد، با افزایش دما از ۴۵۸ به ۹۱۷، مقدار حداکثر تنش فون میسز از ۲۹۸/۶ به ۴۷/۶ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در دمای ۹۱۷ درجه سلسیوس، قبل از اینکه نمونه تحت بارگذاری جانبی قرار داده شود، تمام تنش‌های به‌وجود آمده در نمونه باعث تسلیم شدن اعضای ورق دیوار و المان‌های مرزی شد.



(الف) دما ۲۰ درجه سلسیوس و دریفت ۱ درصد (ب) دما ۲۰ درجه سلسیوس و دریفت ۲ درصد (پ) دما ۴۵۸ درجه سلسیوس و دریفت ۱ درصد

(ت) دما ۴۵۸ درجه سلسیوس و دریفت ۲ درصد (ث) دما ۶۴۲ درجه سلسیوس و دریفت ۱ درصد (ج) دما ۶۴۲ درجه سلسیوس و دریفت ۲ درصد

(چ) دما ۹۱۷ درجه سلسیوس و دریفت ۱ درصد (ح) دما ۹۱۷ درجه سلسیوس و دریفت ۲ درصد

شکل ۱۷- توزیع تنش فون میسز برای مدل عددی با ضخامت ورق ۳ میلیمتر، عرض شیار ۱۰ میلیمتر و عرض نوار ۱۰۰ میلیمتر در دماها و نسبت‌های دریفت مختلف

میزان کاهش مقاومت برشی نمونه‌های با ضخامت ورق دیوار ۳، عرض شیار ۱۰ و عرض نوار ۱۰۰ میلیمتر در دماهای ۴۵۸، ۶۴۲ و ۹۱۷ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۱۰، ۶۰ و ۹۰٪ در مقایسه با نمونه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد. با توجه به جدول ۱، افزایش در ضخامت ورق تأثیر مستقیم بر ضریب مقاومت برشی در دماهای بالا دارد. همچنین، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، میانگین کاهش مقاومت برشی در دماهای ۴۵۸، ۶۴۲ و ۹۱۷ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۸، ۴۶ و ۹۲٪ در مقایسه با مقاومت برشی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد. با افزایش دما مشخص شد که مود خرابی شامل تغییرشکل برون صفحه‌ای ورق دیوار فولادی و کمانش جانبی بال تیرها و در دمای ۹۱۷ درجه سلسیوس بال ستون‌های پیرامونی دیوار نیز دچار اعوجاج می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی رفتار دیوار برشی تمام فولادی کمانش‌تاب در دماهای مختلف می‌پردازد. برای این منظور ابتدا مدل عددی المان محدود در سه مرحله با نمونه‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. پس از

اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، ۲۵۶ مدل عددی از دیوار برشی فولادی کمانش‌تاب ساخته و تحت بارگذاری دو مرحله‌ای شامل حرارت و چرخه‌ای قرار داده شد. متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه شامل ضخامت ورق دیوار فولادی، عرض شیار، عرض نوار بین دو شیار و دما بود. مهم‌ترین یافته‌های تحقیق در ادامه ارائه شدند:

۱- در دمای معمولی ۲۰ درجه سلسیوس، وضعیت تنش دو سویه کشش- فشار در ورق‌ها به‌وجود می‌آید که در اثر تکرار سیکل‌های بارگذاری می‌تواند کمانش و خسارت را به تأخیر بیاندازد.

۲- کمانش الاستیک در تمام نمونه‌ها در محدوده ۱/۵ تا ۲/۵ میلیمتر از تغییرشکل برون محوری رخ می‌دهد. همچنین با افزایش دما، نقطه تسلیم ورق و قاب در تغییرمکان کمتر اتفاق می‌افتد.

۳- با افزایش عرض شیار، ظرفیت باربری جانبی به طور میانگین ۲۵٪ در تمام گروه‌های دمایی کاهش یافته است. همچنین، سختی اولیه مدل‌ها نیز به طور میانگین تقریبا ۳۵ درصد کاهش یافت.

۴- میانگین کاهش مقاومت برشی در دماهای ۴۵۸، ۶۴۲ و ۹۱۷ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۸، ۴۶ و ۹۲٪ در مقایسه با مقاومت برشی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

مراجع

[1] Driver, R. G., Kulak, G. L., Kennedy, D. L., & Elwi, A. E. (1998). “Cyclic test of four-story steel plate shear wall”, *Journal of Structural Engineering*, *124*(2), 112-120.

[2] Wang, M., Yang, W., Shi, Y., & Xu, J. (2015). “Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials”, *Journal of Constructional Steel Research*, *107*, 194-210.

[3] Sabouri-Ghomi, S., & Roberts, T. (1992). “Nonlinear dynamic analysis of steel plate shear walls including shear and bending deformations”, *Engineering Structures*, *14*(5), 309-317.

[4] Rahmzadeh, A., Ghassemieh, M., Park, Y., & Abolmaali, A. (2016). “Effect of stiffeners on steel plate shear wall systems”, *Steel and Composite Structures*, *20*(3), 545-569.

[5] Astaneh-Asl, A. (2001). *Seismic behavior and design of steel shear walls*. Structural Steel Educational Council Moraga, CA.

[6] Vian, D., Bruneau, M., & Purba, R. (2009). “Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. II: Analysis and design recommendations”, *Journal of Structural Engineering*, *135*(3), 221-228.

[7] Thorburn, L. J., Montgomery, C., & Kulak, G. L. (1983). *Analysis of steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 107, University of Alberta, Edmonton, Canada.

[8] Alavi, E., & Nateghi, F. (2013a). “Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation”, *Journal of Constructional Steel Research*, *89*, 9-20.

[9] Guo, H., Li, Y., Liang, G., & Liu, Y. (2017). “Experimental study of cross stiffened steel plate shear wall with semi-rigid connected frame’, *Journal of Constructional Steel Research*, *135*, 69-82.

[10] Alavi, E., & Nateghi, F. (2013b). “Experimental study of diagonally stiffened steel plate shear walls”, *Journal of Structural Engineering*, *139*(11), 1795-1811.

[11] Guo, Y. L., Miu, Y., & Dong, Q. L. (2007). “Elastic buckling behavior of stiffened steel plate shear walls slotted at two edges”, *Progress in Steel Building Structures*, *9*(3), 58-62.

[12] Amiri, B., AghaRezaei, H., & Esmaeilabadi, R. (2018). “The effect of diagonal stiffeners on the behaviour of stiffened steel plate shear wall”, *Computational Engineering and Physical Modeling*, *1*(1), 58-67.

[13] Shafaei, S., Ayazi, A., & Farahbod, F. (2016). “The effect of concrete panel thickness upon composite steel plate shear walls”, *Journal of Constructional Steel Research*, *117*, 81-90.

[14] Han, Q., Zhang, Y., Wang, D., & Sakata, H. (2019). “Seismic behavior of buckling-restrained steel plate shear wall with assembled multi-RC panels”, *Journal of Constructional Steel Research*, *157*, 397-413.

[15] Elgaaly, M., & Liu, Y. (1997). “Analysis of thin-steel-plate shear walls”, *Journal of Structural Engineering*, *123*(11), 1487-1496.

[16] Sabouri-Ghomi, S., & Roberts, T. (1991). “Nonlinear dynamic analysis of thin steel plate shear walls”, *Computers & structures*, *39*(1-2), 121-127.

[17] Du, Y., Hao, J., Yu, J., Yu, H., Deng, B., Lv, D., & Liang, Z. (2018). “Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure”, *Journal of Constructional Steel Research*, *151*, 194-203.
[18] Shafaei, S., Farahbod, F., & Ayazi, A. (2017). “Concrete stiffened steel plate shear walls with an unstiffened opening”, *Structures*, *12*, 40-53.
[19] Meghdadaian, M., & Ghalehnovi, M. (2019). “Improving seismic performance of composite steel plate shear walls containing openings”, *Journal of Building Engineering*, *21*, 336-342.
[20] Farzampour, A., Laman, J. A., & Mofid, M. (2015). “Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings”, *Journal of Constructional Steel Research*, *114*, 258-268.
[21] Zirakian, T., & Zhang, J. (2015). “Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls”, *Journal of Constructional Steel Research*, *112*, 40-53.
[22] Ma, Z.-y., Hao, J.-p., & Yu, H.-s. (2018). “Shaking-table test of a novel buckling-restrained multi-stiffened low-yield-point steel plate shear wall”, *Journal of Constructional Steel Research*, *145*, 128-136.
[23] Zirakian, T., & Zhang, J. (2015b). “Seismic design and behavior of low yield point steel plate shear walls”, *International Journal of Steel Structures*, *15*(1), 135-151.
[24] Shekastehband, B., Azaraxsh, A., & Showkati, H. (2017). “Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only”, *Archives of civil and mechanical engineering*, *17*, 154-168.
[25] Qi, Y., Gu, Q., Sun, G., & Zhao, B. (2017). “Shear force demand on headed stud for the design of composite steel plate shear wall”, *Engineering Structures*, *148*, 780-792.
[26] Jin, S., Yang, S., & Bai, J. (2019). “Numerical and experimental investigation of the full-scale buckling-restrained steel plate shear wall with inclined slots”, *Thin-Walled Structures*, *144*, 106362.
[27] Wang, P., Xue, Z., & Xiao, S. (2017). “Seismic behavior of Self-Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall made by two incline-slotted infill plates”, *Journal of Constructional Steel Research*, *133*, 47-64.
[28] Gardner, L., & Baddoo, N. (2006). “Fire testing and design of stainless-steel structures”, *Journal of Constructional Steel Research*, *62*(6), 532-543.
[29] Richard Liew, J., & Chen, H. (2004). “Direct analysis for performance-based design of steel and composite structures”, *Progress in structural engineering and materials*, *6*(4), 213-228.
[30] Yang, K.-C., Chen, S.-J., Lin, C.-C., & Lee, H.-H. (2005). “Experimental study on local buckling of fire-resisting steel columns under fire load”, *Journal of Constructional Steel Research*, *61*(4), 553-565.
[31] Liew, J. R. (2008). “Survivability of steel frame structures subject to blast and fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, *64*(7-8), 854-866.
[32] Dong, Y., Zhu, E., & Prasad, K. (2009). “Thermal and structural response of two-storey two-bay composite steel frames under furnace loading”, *Fire safety journal*, *44*(4), 439-450.
[33] Sun, R., Huang, Z., & Burgess, I. W. (2012). “Progressive collapse analysis of steel structures under fire conditions”, *Engineering Structures*, *34*, 400-413.
[34] Hoehler, M. S., Smith, C. M., Hutchinson, T. C., Wang, X., Meacham, B. J., & Kamath, P. (2017). “Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads”, *Fire safety journal*, *91*, 524-531.
[35] Ryu, M. G., He, K., Lee, D. H., Park, S. I., Thomas, G., & Paik, J. K. (2021). “Finite element modeling for the progressive collapse analysis of steel stiffened-plate structures in fires”, *Thin-Walled Structures*, *159*, 107262.
[36] Tao, Y., Mahendran, M., & Ariyanayagam, A. (2021). “Fire tests of cold-formed steel walls made of hollow section studs”, *Journal of Constructional Steel Research*, *178*, 106495.
[37] Reis, A., Lopes, N., & Real, P. V. (2019). “Ultimate shear strength of steel plate girders at normal and fire conditions”, *Thin-Walled Structures*, *137*, 318-330.
[38] ISO-834. (1975). Fire resistance tests-elements-elements of building construction.
[39] Council, A. T. (1992). *Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures*. ATC-24.
[40] Abaqus, V. (2014). 6.14 Documentation. *Dassault Systemes Simulia Corporation*, *651*, 6.2.
[41] Standard, B. (2006). *Eurocode 3-Design of steel structures-*. BS EN 1993-1, 1, 2005.
[42] Hitaka, T., & Matsui, C. (2003). “Experimental study on steel shear wall with slits”, *Journal of Structural Engineering*, *129*(5), 586-595.
[43] Chen, S.-J., & Jhang, C. (2006). “Cyclic behavior of low yield point steel shear walls”, *Thin-Walled Structures*, *44*(7), 730-738.
[44] Torić, N., Harapin, A., & Boko, I. (2013). “Experimental verification of a newly developed implicit creep model for steel structures exposed to fire”, *Engineering Structures*, *57*, 116-124.