

بررسی و مقایسه‌ی مؤثرترین روش‌های بهبود عملکرد پس از آتش ستون‌های فولادی کوتاه دارای نقص‌های افقی و قائم

حامد مخدومی درمیان (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

رضا رهگذر* (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

محسن محمدی زاده (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

امیر سعادی داریان (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید بهشتی

کامبیز نوماشیری (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

مهندسی عمران شریف، پاییز (۱۴۰۱)
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۳، ص. ۸۸-۷۷، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، به بررسی عملکرد ستون‌های فولادی قوطی‌شکل دارای خوردگی در دماهای مختلف و مقاوم‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. بنابراین، ستون‌هایی با جانمایی‌های مختلف نقص (۶ حالت) ساخته شده و تحت اعمال حرارت در ۲ دمای ۲۰° و ۷۰° درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند؛ در ادامه، جهت بهبود رفتار ستون‌ها، با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP و ورق فولادی در محل نقص، مقاوم‌سازی شده‌اند. سپس ظرفیت باربری کلیه‌ی نمونه‌های ستون (۳۸ نمونه)، به دست آمده است. نتایج پژوهش نشان دادند که هر دو عامل نقص و حرارت، منجر به کاهش مقاومت ستون‌ها و ضعف در عملکرد آن‌ها می‌شود، به‌صورتی که بیشترین کاهش مقاومت ستون به‌علت نقص در حدود ۳۲٪ و در اثر حرارت ناشی از افزایش دما، در حدود ۳۵٪ بوده است. همچنین مقایسه‌ی روش‌های مقاوم‌سازی نشان داد که استفاده از CFRP، تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد ستون‌های فولادی داشته است. در نهایت، جهت بررسی بیشتر، ۵ نمونه از ستون‌ها با نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی و راستی‌آزمایی شده‌اند.

hamy.mk@gmail.com
rahgozar@uk.ac.ir
mohsenmohammadizadeh@yahoo.com
amir_saedi_d@yahoo.com
narmashiri@iauzah.ac.ir

واژگان کلیدی: ستون فولادی، نقص، حرارت، کامپوزیت CFRP، ظرفیت باربری.

۱. مقدمه

استفاده از فولاد به‌عنوان مصالح ساختمانی از اوایل قرن ۲۰ آغاز شد و در حین جنگ دوم جهانی به‌صورت قابل توجهی گسترش یافت. پس از جنگ دوم جهانی، تهیه‌ی فولاد، امری به مراتب راحت‌تر از قبل شده بود که این امر سبب کاهش چشمگیر قیمت فولاد شد؛ لذا بسیاری از طراحان از اسکلت فلزی برای ساخت ساختمان‌ها استفاده کردند.^[۱] سازه‌های فولادی یکی از رایج‌ترین سازه‌ها هستند که امروزه استفاده می‌شوند. اعضاء سازه‌های فولادی معمولاً برای تحمل نیروهای فشاری یا خمشی و یا هر دو طراحی می‌شوند. سازه‌های فولادی با توجه به مزایایی از جمله: سرعت ساخت، حجم بیشتر فضاهای داخلی نسبت به سازه‌های بتنی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۱/۱۴۰۱، اصلاحیه ۳۹/۱/۱۴۰۱، پذیرش ۳۱/۳/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60114.3086

وزن کمتر ساختمان‌های فولادی از ساختمان‌های بتنی و در نتیجه نیروی اینرسی کمتر وارده به سازه‌های فولادی در هنگام زمین‌لرزه نسبت به سازه‌های فولادی و اجرای آسان‌تر به‌طور وسیعی در سراسر دنیا استفاده می‌شوند.

با توجه به بروز اشتباه‌ها در طراحی، ضعف و اشکال در اجرای سازه‌ها، جزئیات نامناسب میلگردها، محل قرارگیری سخت‌کننده‌ها، تغییر در کاربری ساختمان، خسارت‌های ناشی از خوردگی فولادها (در محیط‌های خورنده) و خسارت دیدگی سازه‌ها در اثر بلایای طبیعی و غیرطبیعی، مثل: باد، زلزله و آتش‌سوزی، نیاز به بهسازی و ترمیم برای رسیدن به عملکرد اولیه‌ی اعضاء سازه اجتناب‌ناپذیر است. مهم‌ترین ضعف سازه‌های فولادی، مقاومت پایین مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، یعنی فولاد، در برابر خوردگی و نقص‌های اجرایی و همچنین مقاومت بسیار کم در مقابل حرارت بالا و آتش‌سوزی است.^[۲]

پس دو بحران کلی پیشرو در سازه‌های فولادی عبارت است از:

الف) نقص ناشی از خوردگی

ب) آسیب به علت حرارت بالا و آتش.

-- نقص: نقص به دلیل خطاهای طراحی و یا عواملی نظیر: افزایش بار، تغییر کاربری سازه، خطاهای اجرایی، عوامل محیطی، تغییر آیین‌نامه‌ها و خوردگی ناشی از عوامل محیطی در سازه‌های فولادی رخ می‌دهد.

-- آسیب به علت حرارت بالا و آتش: به عقیده‌ی طراحان فولاد، علی‌رغم مزیت‌های بسیار بالای آن، در برابر حرارت بالا و آتش‌سوزی به شدت آسیب‌پذیر است. حرارت بالا و آتش موجب وقوع آسیب‌های گاه جدی به پیکره‌ی ساختمان می‌شود. تأثیر حرارت زیاد به‌خصوص در سازه‌ی فولادی از آن‌جهت خطرناک است که فولاد ساختمانی در اثر افزایش دما، مقاومت و سختی خود را به تدریج از دست می‌دهد؛ در نتیجه، ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری اعضاء فولادی با افزایش دما کاهش می‌یابد.^[۴] حتی با وجود تدابیر حفاظت در برابر آتش، به دلایل مختلفی همچون: قرار گرفتن در معرض آتش‌های شدیدتر از حالت پیش‌بینی شده یا از بین رفتن مواد محافظ در برابر آتش به دلیل اعمال ضربه (در مورد ساختمان‌های تجارت جهانی)، ریسک از دست رفتن مقاومت برخی از اعضا، بسیار بالاست. در صورتی که سازه در برابر خرابی پیش‌رونده، دوام اندکی داشته باشد، روش‌های مختلف بسیار زیادی برای حفظ مقاومت و پایداری سازه‌های فولادی در برابر حرارت وجود دارد. پس از خرابی بعضی از اعضا، امکان وقوع خرابی‌های پیش‌رونده‌ی فاجعه‌باری که منجر به تلفات جانی، مالی و تبعات اجتماعی غیرقابل جبران می‌شوند، وجود خواهد داشت.^[۴]

اما دانش بسیار کمی در باره‌ی رفتار حقیقی اعضاء فولادی با وضعیت تکیه‌گاهی و الگوهای حرارتی مختلف حاصل شده است. عدم فهم درست از رفتار واقعی سازه در حرارت و آتش منجر به یک طراحی غیراقتصادی و ناکارآمد می‌شود. این در حالی است که برخلاف باور عمومی، عضو فولادی محافظت نشده که قسمتی از یک سازه‌ی پیچیده است، امکان دارد بتواند پایداری و مقاومت کافی را در برابر آتش داشته باشد که بستگی به توانایی کل سازه در بازپخش نیروها از مناطقی با حرارت بالا به قسمت‌های خنک‌تر و جلوگیری از وقوع خرابی‌های پیش‌رونده دارد. در خصوص رفتار عضوهای فولادی به‌ویژه ستون‌های فولادی در حرارت بالا و یا آتش، مطالعاتی انجام شده است که به برخی از آن‌ها در اینجا اشاره شده است. بانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۵)،^[۵] آزمایش‌هایی را بر روی مقاومت آتش ستون‌های کوتاه جعبه‌یی و I شکلی در تایوان انجام دادند که هدف از آن‌ها بررسی رفتار ستون‌ها تحت بار آتش بوده است. کاهش مقاومت ستون‌های فولادی در دماهای مختلف و اثر نسبت عرض به ضخامت مقاطع در مقاومت نهایی ستون‌ها در دمای بالا ارزیابی و نتیجه‌گیری شد که بار نهایی ستون‌ها با افزایش نسبت‌های عرض به ضخامت و حرارت کاهش می‌یابد. ونگ^۲ و همکاران (۲۰۰۹)،^[۶] در بررسی رفتار ستون‌های فولادی محافظت شده در برابر آتش که بخشی از قسمت‌های محافظت شده آسیب دیده بود، دریافته‌اند که طول آسیب پوشش ضد حرقت، مقاومت زیادی در برابر حفاظت ستون‌های فولادی دارد و خرابی نمونه‌ها عمدتاً به دلیل کماتش و یا تسلیم قسمت پوشش ضد حرقت آسیب‌دیده است. کوری^۳ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۷] به بررسی پارامتریک ستون‌های فولادی تحت بارگذاری، مقاطع و نسبت‌های لاغری مختلف پرداختند و تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور را در عملکرد ستون‌های تحت شرایط آتش ارائه کردند. آثار مهار محوری نیز به دمای گسیختگی به نسبت بار و نسبت سختی مهار محوری بستگی

داشته است. بیستروم^۴ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۸] به بررسی نحوه‌ی افزایش دمای ستون‌های دایره‌یی توخالی فولادی تحت افزایش حرارتی محلی پرداختند و نتایج آن را با دستورالعمل Eurocode ۱-۲-۱۹۹۱ مقایسه کردند. فن^۵ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۹] نیز در بررسی آزمایشگاهی مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربع‌شکل (قوطی‌شکل) با فولاد S30408، تأثیر پارامترهای مختلف، مانند: نسبت بار II، خروج از مرکزیت و ابعاد مقطع در عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولاد را بررسی کردند و دریافته‌اند که نسبت بار و خروج از مرکزیت، پارامترهای کلیدی در تعیین دمای بحرانی و نحوه‌ی عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی بدون مهار محوری هستند. ایشان در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۸،^[۱۰] همانند پژوهش قبلی‌شان (۲۰۱۶)، مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربع‌شکل (قوطی‌شکل) را این بار با در نظر گرفتن قید، آزمایش کردند و دریافته‌اند که روند ظرفیت باربری ستون‌های فولادی فشرده دارای مهار محوری و خروج از مرکزیت در شرایط آتش‌سوزی دو مرحله را طی می‌کند: پیش‌کمانش و پس‌کمانش.

برای گسترش نمونه از حالت کمانش به حالت گسیختگی نهایی، مدت زمانی سپری می‌شود و ظرفیت باربری مرحله‌ی پس‌کمانش می‌تواند به‌طور مؤثر عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی مقید را بهبود بخشد. ژینگ^۶ و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۱] در بررسی آزمایشگاهی ستون‌های I شکل در شرایط آتش‌سوزی، ۸ ستون با اعمال بار محوری را با نسبت‌های مختلف ظرفیت ستون به ستون و افزایش دمای ستون‌ها آزمایش و عملکرد آن‌ها را ارزیابی کردند و دریافته‌اند که مدل Kucukler نسبت به مبنای طراحی حرقت ستون‌ها در برابر آتش در دستورالعمل EN ۱۹۹۳-۱-۲، قابلیت اطمینان بیشتری دارد. برای مقاوم‌سازی و بهسازی قاب‌های فولادی و اعضاء مرتبط، روش‌های متفاوتی مرسوم است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از ورقه‌های الیاف پلیمری مرکب (FRP) و دورپیچ کردن اعضاء قابی با آن‌ها و پوشش سطح آسیب‌دیده با ورق فولادی اشاره کرد. دورپیچ FRP سبب بهبود رفتار مکانیکی فولاد می‌شود؛ کامپوزیت‌های FRP از مصالح نوین برای مقاوم‌سازی (مصالح کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف) هستند. FRP مصالحی است که برای بهسازی و مقاوم‌سازی در راستای افزایش طول عمر سازه استفاده می‌شود و در محاسبات اولیه، مقاومت سازه لحاظ نمی‌شود. گستره‌ی کاربرد FRP، شامل: تیرها، ستون‌ها، دال‌ها، دیوارهای بنایی، پل‌ها، سیلواها، کانال‌ها، مخازن آب و سدهاست.

کریمیان و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۲] رفتار سازه‌یی و تأثیر CFRP در تقویت ستون‌های کوتاه فولادی مقطع دایره‌یی توخالی (CHS) با نقص افقی و عمودی را بررسی کردند. شهرکی و همکاران اثرات الیاف پلیمری کربنی (CFRP) و همچنین صفحه‌های فولادی را برای مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی مقطع مربعی توخالی (SHS) دارای نقص را مورد مطالعه قرار دادند. موارد مورد مطالعه ظرفیت باربری محوری، تأثیر لاغری و رفتار ستون‌های فولادی در تحقیقتشان بود. نتایج پژوهش اخیر نشان داد که CFRP در بهبود ظرفیت نیروی محوری بهتر از صفحه‌های فولادی تقویتی عمل کرده است. شعبانی و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۳] تأثیر موقعیت نقص‌های قائم در رفتار ستون‌های فولادی SHS و همچنین تقویت ستون‌های مذکور با الیاف CFRP را بررسی کردند و دریافته‌اند که نقص مذکور (به ویژه نقص قائم پایین ستون - در میانه‌ی مقطع عرضی) سبب کاهش محسوسی در ظرفیت باربری ستون‌ها، همچنین کمانش محلی و پارگی جانبی محل نقص می‌شود که با استفاده از دورپیچ FRP، این موارد تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کنند. یوسفی و

سلسیوس قرار گرفته و پس از سرد شدن، آزمون فشاری بر روی ۱۴ نمونه‌ی بدون مقاومت سازی (۷ نمونه در دو تراز دمایی) انجام شده است. سپس ۲۴ نمونه‌ی دارای نقص (۶ حالت نقص - دو تراز دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد - دو روش مقاومت سازی) توسط الیاف ورق‌های فولادی CFRP مقاوم سازی شدند؛ همچنین نمونه‌های ذکر شده تحت آزمایش فشاری (همانند نمونه‌های بدون مقاومت سازی) قرار گرفتند. در نتیجه می‌توان گفت تأثیر مواردی، همچون: نوع نقص، تراز دمایی و نحوه‌ی مقاومت سازی، در عملکرد ستون‌های فولادی بررسی و مقایسه شده‌اند.

۲. مشخصات نمونه‌های ستون بررسی شده

در پژوهش حاضر، ستون‌های فولادی قوطی شکل توخالی به ابعاد $3 \times 10 \times 10 \times 32$ سانتی‌متر (ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر، ابعاد مقطع ۱۰ سانتی‌متری و ضخامت ۳ میلی‌متر) در ۲ درجه حرارتی مختلف (۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) که بالاتر از دمای شکست فولاد است و تأثیر بیشتری در مقاومت فولاد دارد، به صورت تقویت نشده و تقویت شده تحت بارگذاری و آزمایش قرار گرفته‌اند.

الف) نمونه‌های سالم و بدون نقص: ۲ عدد.

ب) نمونه‌های دارای نقص بدون تقویت: ۱۲ عدد.

سپس به منظور ارزیابی روش‌های مقاومت سازی ستون‌ها، در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های تقویت شده به وسیله‌ی الیاف CFRP و ورق فولادی محل نقص به این شرح، بررسی و آزمایش شده‌اند.

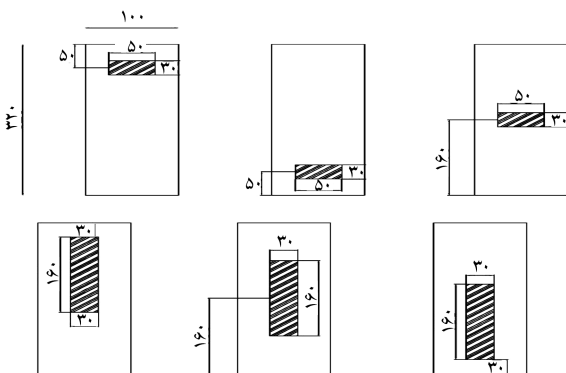
ج) نمونه‌های دارای نقص با تقویت FRP دولایه: ۱۲ عدد.

د) نمونه‌های دارای نقص با تقویت ورق فولادی محل نقص: ۱۲ عدد. نمونه‌ها، ابعاد نقص‌ها، محل جانمایی در شکل ۱ مشاهده می‌شوند.

نقص‌های ذکر شده‌ی ستون در کارخانه توسط دستگاه‌های برش CNC (کنترل عددی رایانه‌ای) ایجاد شده‌اند. تصاویر برش نمونه‌ها و نمونه‌های نقص‌دار در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شوند.

۱.۲. شرایط تکیه‌گاهی و لاغری ستون‌ها

تکیه‌گاه‌های ستون با توجه به فیکس و ثابت بودن دو فک دستگاه در جهت سطح مقطع عرضی به صورت گیردار بودند. در ستون‌های مطالعه شده، با توجه به دو انتهای گیردار ستون ($\lambda = k \times l/r, k = 0/5$) ضریب لاغری برابر ۵/۲ بوده



شکل ۱. ابعاد ستون‌ها، نقص‌ها و محل قرارگیری نقص.

همکاران (۲۰۲۱)، ستون‌های فولادی دایره‌ی توخالی (CHS) دارای خوردگی را که با FRP تقویت شده بودند، بررسی کردند و نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری و انعطاف‌پذیری نمونه‌های تقویت شده و همچنین تأخیر در کماتش موضع خورده شده، کنترل گسیختگی و کاهش تنش در محل خوردگی بود.^[۱۵]

در خصوص تأثیر حرارت و متعاقباً مقاومت سازی اعضاء فولادی و بتنی مطالعات محدودی در دسترس است؛ تاو و هان^[۱۶] (۲۰۰۷)، به ترمیم تیرستون‌های فولادی لوله‌ی دارای هسته‌ی بتنی (CFST) که در معرض آتش بودند، با استفاده از دورپیچ‌های CFRP پرداختند و نمونه‌های دایره‌ی بی و مربعی با شرایط مذکور را بررسی کردند و دریافتند که دورپیچ CFRP سبب افزایش ظرفیت باربری تیرستون‌های مذکور (CFST) می‌شود؛ در حالی‌که ترمیم با مواد مذکور، تأثیری در سختی نمونه‌های اخیر نداشته است. جیانگتاو^۸ و همکاران (۲۰۱۷)، عملکرد تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با میلگردهای CFRP نصب شده در نزدیک سطح (NSM) تحت تأثیر آتش را ارزیابی کردند. ایشان ۱۵ تیر بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با میلگرد و دو تیر مرجع (بدون تقویت) را تحت شرایط آتش استاندارد ISO۸۳۴ و دمای محیط بارگذاری کردند و دریافتند که مواد ضدحریق (محافظت‌کننده در برابر آتش)، مقاومت تیرهای تقویتی با روش NSM-FRP را افزایش می‌دهند؛ از طرفی، اجرای U شکل مواد ضدآتش، تأثیر موفق‌تری در مهار آتش نسبت به اجرای آن‌ها فقط در وجه زیر تیر داشته است.^[۱۷] عمران^۹ و همکاران (۲۰۱۸)، از یک روش مدل‌سازی عددی، جهت بررسی رفتار انتقال حرارت در ستون‌های فولادی تقویتی با CFRP و عایق‌بندی شده استفاده کردند. یک پژوهش تجربی جهت تعیین خواص گرمایی فیبرکربن، چسب، CFRP و مواد عایق‌بندی در دماهای بالا انجام و تأثیر ضخامت عایق در انتقال حرارت نیز بررسی شد؛ در نتیجه جزئیات مدل‌های المان محدود انتقال حرارت و خواص گرمایی مهم CFRP و مواد عایق‌بندی ارائه شد. چن^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر الیاف CFRP در رفتار ستون‌های فولادی حرارت دیده را ارزیابی کردند و به بررسی رفتار فشاری ستون‌های کوتاه فولادی قوطی شکل پر شده با بتن (CFST) که با الیاف CFRP تقویت شده بودند، پرداختند. ستون‌های مذکور قبل از تقویت، تحت تأثیر درجه‌های حرارت بالا (۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند و نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر مثبت دورپیچ FRP در مقاومت و سختی ستون‌های فولادی بود و افزایش تعداد لایه‌های FRP، سبب بهبود بیشتر پارامتر مذکور شده است. هی و چن^{۱۱} (۲۰۲۰)،^[۲] تأثیر درجه حرارت بالا و لایه‌های ورقه‌های CFRP (CFRP) یک، دو، سه و چهار لایه را در رفتار ستون‌های لوله‌ی فولادی بررسی کردند و دریافتند که ستون‌های فولادی دایره‌ی بی (CST) پس از تقویت ورق‌های CFRP، افزایش باربری بیشتری نسبت به ستون‌های مربعی فولادی (SST) به دست آوردند.

هیچ‌کدام از مطالعات اخیر، تأثیر همزمان نقص و حرارت در اعضاء فولادی و متعاقباً جبران ضعف‌های مذکور و کاهش مقاومت صورت گرفته را با روش‌های مقاومت سازی مطالعه نکرده‌اند. همچنین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی عملکرد ستون‌های فولادی در دماهای بالا، محدودیت‌هایی نظیر: عملکرد پس از آتش ستون‌ها، قابلیت بارگذاری مجدد بر روی آن‌ها پس از آتش، راهکارهای مقاومت سازی، ایجاد نقص در عملکرد ستون‌ها، نوع مقطع ستون‌ها و ... دارند. بنابراین در پژوهش حاضر، به بررسی ستون‌های فولادی قوطی شکل و مقاومت سازی آن‌ها با در نظر گرفتن نقص‌های مختلف در ستون در شرایط پس از حرارت پرداخته شده است. بدین منظور، ستون‌های بدون نقص و دارای ۶ نقص مختلف (در مجموع ۳۸ ستون) طراحی و ساخته شده‌اند. در ادامه، ستون‌ها در ۲ تراز دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه

جدول ۱. نتایج آزمون‌های کششی.

نمونه	حد جاری	مقاومت کششی	درصد ازدیاد
شماره مشخصات شدن	(MPa)	(MPa)	طول نسبی
۱ ورق	۳۴۴	۳۵۶	۳۶
۲ ورق	۳۳۱	۳۵۰	۳۰
۳ ورق	۳۳۳	۳۵۲	۳۶

جدول ۲. مشخصات کامپوزیت‌های CFRP استفاده شده‌ی ضخامت.

ضخامت	چگالی	مقاومت کششی	کرنش نهایی	مدول کشسانی
(mm)	(gr/cm ³)	(MPa)	(%)	(MPa)
۵/۱۱	۲۰۰	۳۹۰۰	۱/۷	۲۳۰۰۰۰

جدول ۳. خصوصیات رزین اپوکسی [۲۱].

مقاومت کششی	مدول کشسانی	کرنش نهایی
(MPa)	(MPa)	(%)
۳۰	۴۵۰۰	۰/۹

است. تنش تسلیم، مقاومت نهایی، و کرنش نهایی فولاد استفاده شده در ستون‌ها، میانگین نتایج به دست آمده به ترتیب $f_u = 352 MPa$ ، $f_y = 335 MPa$ و $\epsilon_{ts} = 3.4\%$ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مدول کشسانی $E = 270 GPa$ به دست آمده است.

۲.۳. مشخصات کامپوزیت‌های CFRP‌های استفاده شده

در پژوهش حاضر، جهت تقویت نمونه‌های ستون فولادی دارای نقص از الیاف کربن CFRP با مشخصات درج شده در جدول ۲ استفاده شده است. نحوه‌ی تقویت به صورت دورپیچ دولایه (دولایه‌ی طولی و دولایه‌ی عرضی) بوده است.

۳.۳. مشخصات چسب

چسب، مسیر انتقال برش بین سطح فولاد و مواد کامپوزیت را تأمین و عملکرد همسان کامپوزیت و ستون را سبب می‌شود. چسب به دو نوع اپوکسی و پلی‌استر تقسیم می‌شود. اپوکسی، بسیار گران‌تر از پلی‌استر است؛ ولی نوع بسیار معمول چسب‌های سازه‌یی بر پایه‌ی اپوکسی استوار است که نتیجه‌ی اختلاط رزین‌های اپوکسی با یک ماده‌ی سفت‌کننده (Hardener) است. کامپوزیت CFRP با استفاده از اپوکسی مخصوص به ستون فولادی چسبانده می‌شود. در جدول ۳، مشخصات چسب استفاده شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

۴.۳. مشخصات ورق‌های تقویتی

مشخصات مکانیکی ورق‌های تقویتی، همانند مشخصات ذکر شده جهت فولاد ستون‌ها در بخش ۱.۳ است.

۴. معرفی و نام‌گذاری نمونه‌های ستون فولادی

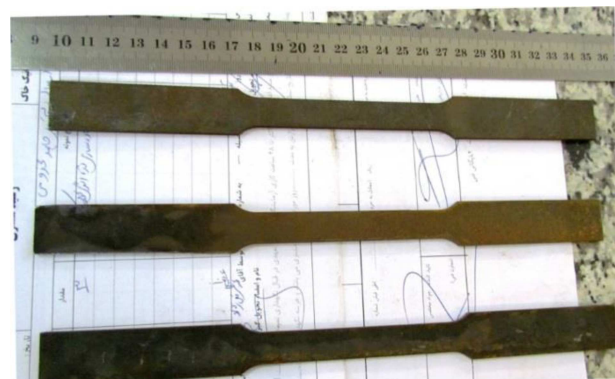
به‌طور کلی نمونه‌ها در دو درجه حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تقسیم‌بندی شده‌اند که با توجه به نوع و جانمایی نقص، تقویت و یا عدم تقویت ستون‌ها



شکل ۲. تصاویر برش CNC نمونه‌ها در کارخانه.



شکل ۳. تصاویر نمونه‌های سالم و نقص دار در کارخانه پس از برش CNC محل نقص.



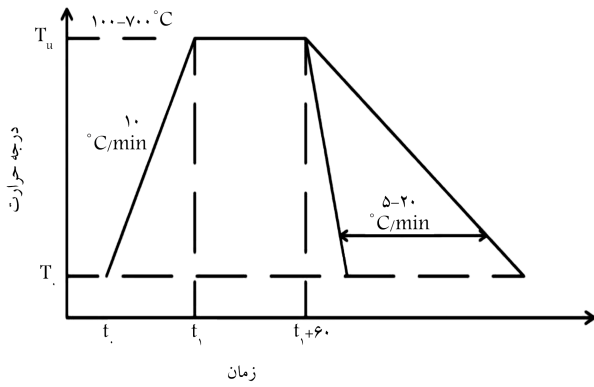
شکل ۴. تصاویر نمونه‌های آزمون‌های کششی با نمایش طول آن‌ها.

است که نشان‌دهنده‌ی لاغری بسیار پایین است و کوتاه بودن ستون‌ها را تأیید می‌کند و لاغری در ستون‌های کوتاه، تأثیر زیادی ندارد.

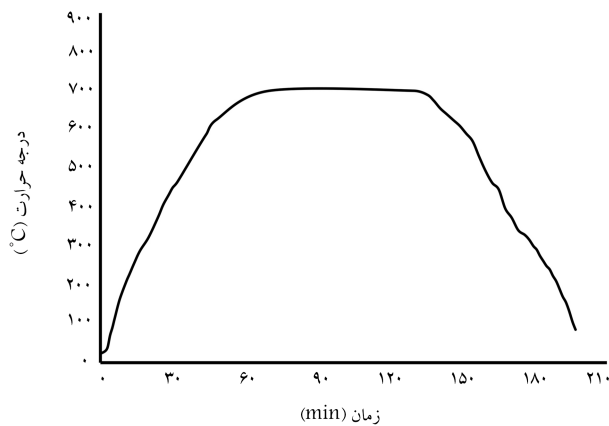
۳. مشخصات مصالح استفاده شده

۱.۳. مشخصات فولاد

با استفاده از آزمایش آزمون‌های کششی ورق فولادی، مشخصات فولاد استفاده شده در ستون‌ها و ورق‌های تقویتی به دست آمده است. نمونه‌های دمپلی مطابق دستورالعمل ASTM ۳۷۰ [۲۰] جهت آزمون کششی با برش CNC آماده شده‌اند (شکل ۴). خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش کششی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده



شکل ۵. نمودار پیش‌بینی پروسه‌ی افزایش حرارت و فاز خنک‌شدگی نمونه‌ها.



شکل ۶. نمودار دما - زمان (گرمایش - سرمایش) اعمالی به نمونه‌ها.



شکل ۷. تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد اعمال حرارت.



شکل ۸. نمونه‌ی ستون DHM مقاوم‌سازی‌شده با CFRP.

با کامپوزیت‌های CFRP و ورق فولادی نمونه‌های ستون نامگذاری شده‌اند:

V(Vertical)	H(Horizontal)	D(Defect)	Control
عمودی	افقی	نقص	نمونه کنترلی
	B(Bot)	M(Middle)	T(Top)
	پایین	وسط	بالا

نتیجه، انواع نقص‌ها با توجه به نوع نقص و محل نقص شامل این موارد است:

DHB	DHM	DHT
نقص افقی بالایی ستون	نقص افقی وسط ستون	نقص افقی پایینی ستون
DVB	DVM	DVT
نقص قائم بالایی ستون	نقص قائم وسط ستون	نقص قائم پایینی ستون

برای نمونه‌های تقویتی C۲۲TL که به معنی دولایه‌ی عرضی و دولایه طولی CFRP با الیاف یک جهته است؛ و برای نمونه‌های تقویتی با ورق از PL استفاده شده است که به معنای تقویت محل نقص با پلیت یا ورق فولادی است.

۵. پروسه‌ی اعمال حرارت بر روی ستون‌های فولادی

در آزمایش مذکور از یک کوره‌ی الکتریکی، با تنظیم دستی قدرت برای حرارت‌دهی نمونه‌ها استفاده شده است. دو ترموکوپل نوع K روی نمونه و کوره، دمای نمونه و کوره را ثبت می‌کردند. نمونه‌ها از دمای محیط به دماهای هدف با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه حرارت داده شده‌اند. ۲ حالت دمای هدف ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. به محض حرارت‌دهی نمونه تا دمای هدف، دما به مدت ۶۰ دقیقه ثابت نگه داشته شده است، تا شرایط پایداری حرارت در نمونه‌ها ایجاد و از توزیع یکنواخت دما در نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. سپس کوره خاموش و فاز خنک‌شدگی نمونه‌ها شروع شده است. نمونه‌ها، به‌طور طبیعی و با نرخ محدود ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه کاهش پیدا کرده است، تا به دمای اتاق برسد.^[۲۲]

در شکل ۵، منحنی در نظر گرفته شده برای اعمال حرارت به نمونه‌ها و در شکل ۶ نیز منحنی گرمایش، سرمایش واقعی اعمالی (براساس دماهای ثبت شده در زمان‌های مختلف) به نمونه‌ها مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل ۷، تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد از اعمال حرارت مشاهده می‌شوند. پس از اتمام این مرحله، آزمون‌های مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها در دمای محیط انجام شده است.

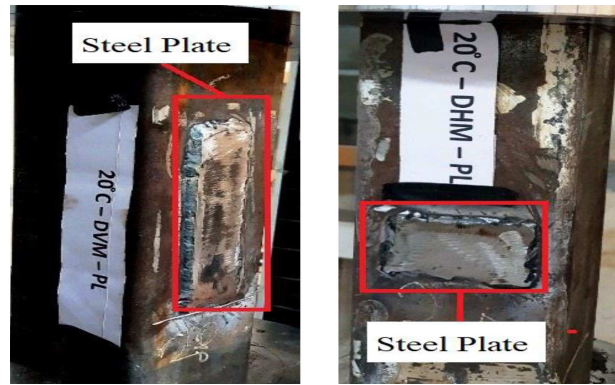
۶. مقاوم‌سازی نمونه‌ها

۱.۶. مقاوم‌سازی اعضا ستون فولادی با الیاف CFRP

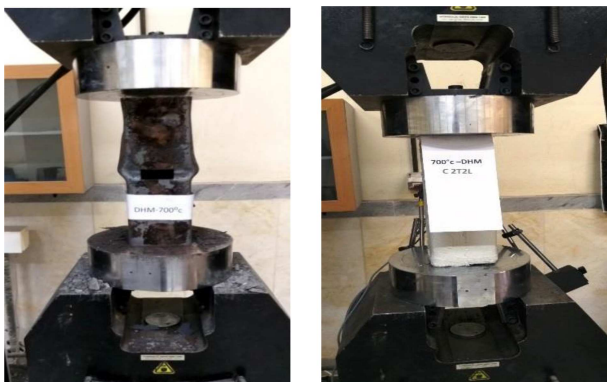
در پژوهش حاضر، نمونه‌های مطالعه شده‌ی دارای نقص ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط و بالاترین دمای اعمالی که حدوداً دمای شکست فولاد است) جهت بهبود عملکرد، به صورت دورپیچ کامل توسط الیاف CFRP احاطه و به صورت دولایه‌ی دورپیچ مقاوم‌سازی شده‌اند که بدین منظور از الیاف تک جهته به دو صورت عرضی و طولی استفاده شده است که لایه‌های اول و سوم به صورت عرضی و لایه‌های دوم و چهارم به صورت طولی بودند. نمونه‌ی ستون مقاوم‌سازی شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



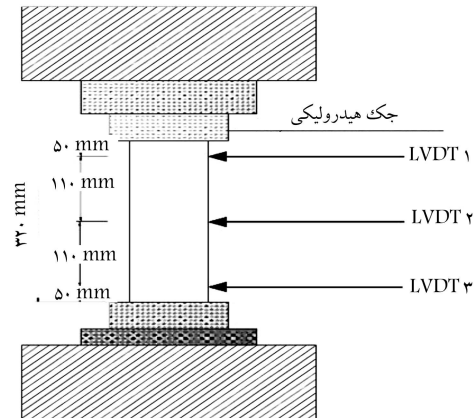
شکل ۱۱. بارگذاری نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت خارجی.



شکل ۹. نحوه‌ی مقاوم‌سازی نمونه‌ها به وسیله‌ی ورق‌های فولادی.



شکل ۱۲. بارگذاری نمونه‌های ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت خارجی.



شکل ۱۰. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها زیر جک.

نمونه‌هایی از بارگذاری ستون‌ها با حرارت اعمالی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت FRP مشاهده می‌شوند.

۸. نتایج به دست آمده از آزمایش فشاری ستون‌ها

در آزمایش فشاری نمونه‌ها، مقدار بیشینه‌ی بار (بار بحرانی) و تغییرمکان قائم متناظر بار بحرانی به دست آمده است. جهت تحلیل بررسی ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ها، نمودار نیرو - تغییرمکان قائم ستون‌ها استفاده شده است که از روی نمودار مذکور، بار بیشینه و تغییرمکان متناظر با آن به دست آمده است.

۱.۸. نتایج به دست آمده از نمونه‌های تقویت نشده‌ی ۲۰، ۷۰۰ درجه و مقایسه‌ی نتایج

در شکل ۱۳، نمونه‌ی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان برای نمونه‌ی کنترلی (بدون نقص) تقویت نشده مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۴، نتایج کامل نمونه‌های تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. نتایج جدول اخیر نشان می‌دهد که:

-- به دلیل کاهش سطح مقطع عرضی در محل نقص، ضعف و نقص سبب کاهش ظرفیت باربری و تحمل بارهای قائم است، به صورتی که:

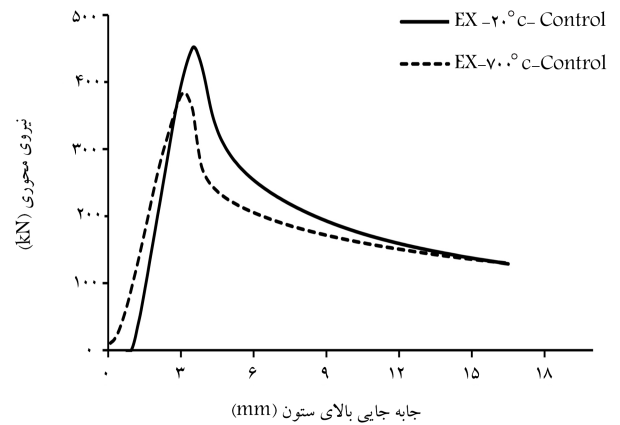
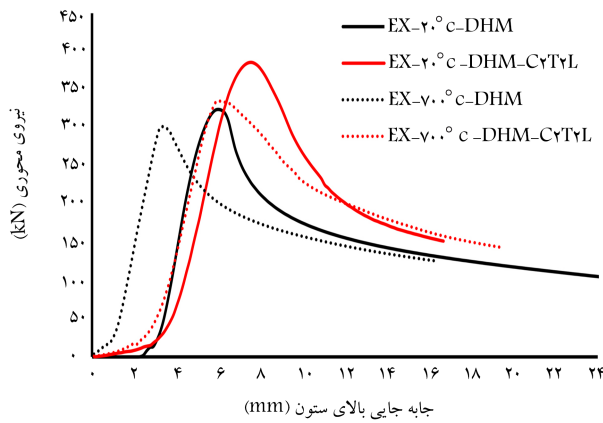
الف) کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های ستون ۲۰ درجه را نمونه‌ی دارای نقص

۲.۶. مقاوم‌سازی با ورق فولادی

به منظور مقاوم‌سازی اعضاء فشاری فولادی دارای سوراخ، از ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد ۱ سانتی‌متر بزرگ‌تر از ابعاد سوراخ استفاده شده است. مشخصات مکانیکی ورق‌های مذکور، همانند مشخصات ذکر شده جهت فولاد نمونه‌های ستون است. همچنین ورق‌های اشاره شده بر روی مکان سوراخ‌ها جوش داده شده‌اند. صفحه‌ی فولادی جوش داده شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود (نمونه‌هایی با سوراخ‌های افقی و عمودی در وسط). همچنین، برای اتصال جوش، از جوش گوشه استفاده شده است.

۷. پروسه‌ی انجام آزمایش فشاری ستون‌های فولادی در آزمایشگاه

به منظور بررسی و تحلیل ستون‌های فولادی بدون نقص، دارای نقص بدون تقویت، و دارای نقص با تقویت، نمونه‌ها توسط جک ۱۰۰ تنی تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و در هر لحظه، نیرو و تغییرمکان قائم متناظر توسط سیستم نمایشی لودسل به صورت اتومات ثبت شده است. همچنین جهت ثبت تغییرمکان افقی (عمود بر راستای عضو) از سه عدد LVDT (ترانسفورماتورهای تفاضلی متغیر جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی) در بالا، وسط و پایین ستون که عمود بر راستای عضو کار گذاشته شده‌اند، استفاده شده است. در شکل ۱۰، نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی به همراه نصب LVDT ها مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب



شکل ۱۴. نمودار نیرو - تغییرمکان نمونه‌های تقویتی با CFRP و بدون تقویت با نقص افقی وسط در حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل ۱۳. نمودار نیرو - تغییرمکان، نمونه‌های کنترلی (بدون نقص) تقویت نشده در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۵. نتایج نمونه‌های تقویت شده با CFRP و تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۴. نتایج نمونه‌های تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

بیشینه‌ی بار قائم برای $P_{max}(KN)$ نمونه‌های ۷۰۰ درجه		بیشینه‌ی بار قائم برای $P_{max}(KN)$ نمونه‌های ۲۰ درجه	
شرح نمونه	تقویت نشده	شرح نمونه	تقویت شده
DHT	۳۵۰/۹۷	DHT	۳۸۶/۵۶
DHM	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۸۵/۵۶
DHB	۲۹۵/۱۵	DHB	۴۴۴/۱۷
DVT	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۳۰/۴۴
DVM	۳۴۱/۶۰	DVM	۴۲۷/۵۴
DVB	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۹۱

شرح نمونه	بیشینه‌ی بار قائم $P_{max}(KN)$		تغییرمکان متناظر با بار $\Delta(mm)$	
	۷۰۰°C	۲۰°C	۷۰۰°C	۲۰°C
Control	۴۵۱/۶۴	۳۸۳/۴۹	۳/۱۸۷۳	۳/۴۹
DHT	۳۷۷/۳۴	۳۵۰/۹۷	۳/۶۶	۴/۱۲
DHM	۳۲۴/۰۲	۳۰۱/۵۸	۳/۳۵	۶/۰۰
DHB	۳۵۳/۶۷	۲۹۵/۱۵	۴/۴۵	۴/۷۷
DVT	۴۰۹/۶۴	۳۲۲/۰۳	۳/۸۱	۳/۳۸
DVM	۳۹۳/۳۰۲	۳۴۱/۶۰	۳/۸۴	۳/۵۱
DVB	۴۰۵/۹۳	۲۶۱/۵۸	۲/۸۸	۴/۱۰

افقی وسط ستون دارد (کاهش ۲۸ درصدی نسبت به نمونه‌ی کنترلی در ۲۰ درجه).

ب) کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های ستون ۷۰۰ درجه را نمونه‌ی دارای نقص قائم پایین ستون دارد (کاهش ۳۲ درصدی نسبت به نمونه‌ی کنترلی در ۷۰۰ درجه).

تمامی نمونه‌های ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با توجه به کاهش مقاومت فولاد در دما و حرارت بالا، ظرفیت باربری کمتری نسبت به نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد دارند، که این کاهش ظرفیت باربری برای نمونه‌ی کنترلی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۵٪ نسبت به ۲۰ درجه سانتی‌گراد است و بیشترین کاهش ظرفیت باربری در مقایسه‌ی نمونه‌های مشابه در دو درجه حرارتی مذکور، مربوط به نمونه با نقص قائم در پایین ستون است، که کاهش ۳۵ درصدی ظرفیت باربری را با افزایش درجه حرارت به دنبال دارد.

تغییرمکان محوری هنگام بار بیشینه، در نمونه با نقص افقی وسط در حرارت ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، بیشترین مقدار را دارد.

۲.۸. نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های تقویت شده‌ی ۲۰ و ۷۰۰ درجه و مقایسه با سایر نتایج

نمونه‌های دارای نقص به دو صورت: (۱) با دورپیچ CFRP (۲) با ورق فولادی در محل نقص تقویت شده و سپس تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند، که نتایج به این

شرح بوده است:

الف) نمونه‌های تقویت شده با CFRP: در شکل ۱۴، نمونه‌ی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان (نمونه با نقص افقی که بحرانی‌ترین حالت باربری را داشته است)، نمونه‌های تقویت شده با CFRP و بدون تقویت مشاهده می‌شود. در جدول ۵ نیز نتایج کامل نمونه‌های مذکور در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

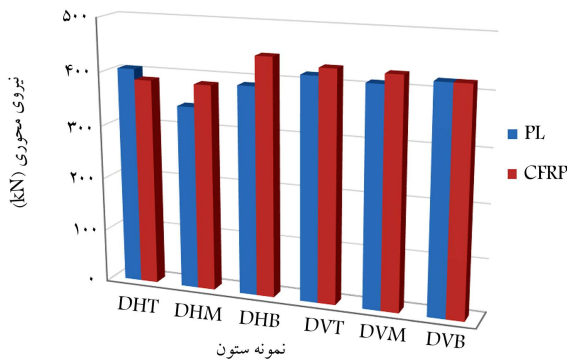
همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود:

در هر دو گروه ۲۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، تقویت و دورپیچ FRP سبب افزایش باربری و بهبود عملکرد ستون‌ها شده است. به‌صورتی که:

الف) افزایش ۲۶ درصدی تحمل بارهای قائم در نمونه با نقص افقی پایین، بیشترین تأثیر را در نمونه‌های ۲۰ درجه داشته است.

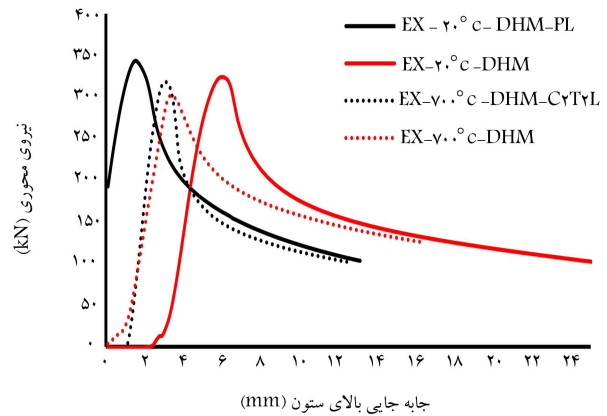
ب) افزایش ۴۵ درصدی تحمل بارهای قائم در نمونه با نقص افقی پایین، بیشترین تأثیر را در نمونه‌های ۷۰۰ درجه داشته است که بیشترین میزان افزایش در بین کل نمونه‌های دو گروه درجه حرارتی را نیز شامل می‌شود.

ب) نمونه‌های تقویت شده با ورق فولادی در محل نقص: در شکل ۱۵، نمونه‌ی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان (نمونه با نقص افقی که بحرانی‌ترین حالت باربری



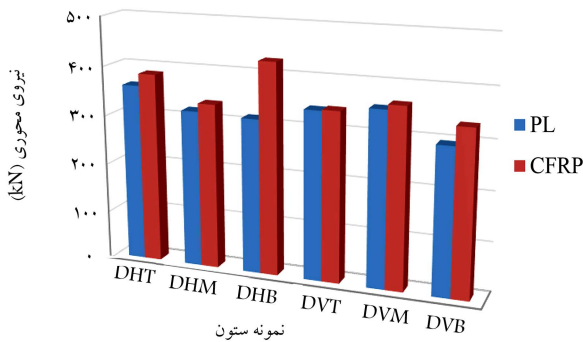
	DHT	DHM	DHB	DVT	DVM	DVB
PL	۴۰۵/۶۴	۳۴۳/۴۲	۳۸۹/۵۳	۴۱۵/۸۵	۴۰۹/۲	۴۱۹/۸۷
CFRP	۳۸۶/۵۶	۳۸۵/۵۶	۴۴۴/۱۷	۴۳۰/۴۴	۴۲۷/۵۴	۴۱۹/۹۱

شکل ۱۶. مقایسه‌ی ظرفیت باربری (بیشینه‌ی نیروی محوری قابل تحمل) نمونه‌های تقویتی با ورق و CFRP در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۵. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با نقص افقی وسط در ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۶. نتایج نمونه‌های تقویت شده با ورق و تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد.



	DHT	DHM	DHB	DVT	DVM	DVB
PL	۳۶۰/۳	۳۱۷/۸۶	۳۱۳/۰۶	۳۴۰/۷۵	۳۵۳/۲۳	۲۹۵/۶۵
CFRP	۳۸۵/۱۶	۳۳۴/۷۶	۴۲۷/۶۷	۳۴۲/۹۳	۳۶۳/۱۲	۳۳۳/۵۸

شکل ۱۷. مقایسه‌ی ظرفیت باربری (بیشینه‌ی نیروی محوری قابل تحمل) نمونه‌های تقویتی با ورق و CFRP در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

نسبت به نمونه‌های تقویتی با ورق دارند و تأثیر بیشتر دو لایه‌ی CFRP را نسبت به ورق تقویتی در بهبود رفتار ستون‌ها و ظرفیت باربری ستون‌ها نتیجه می‌دهند. همچنین در نمودارهای شکل ۱۷ نیز همانند شکل ۱۶، تأثیر بیشتر CFRP نسبت به ورق، در تمامی حالت‌های نقص، بدون استثناء مشخص است.

۹. مود خرابی نمونه‌ها

با توجه به بررسی نمونه‌ها، نحوه‌ی گسیختگی آن‌ها به این شرح است:

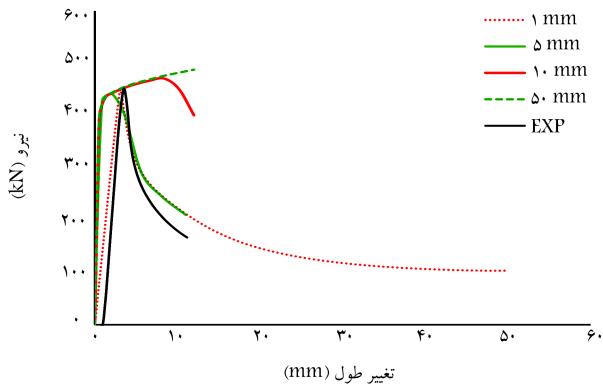
-- حالت خرابی برای نمونه‌های کنترلی تسلیم و به دنبال آن کماتش محلی متقارن است، به نحوی که دو ضلع مخالف به سمت داخل و دو ضلع دیگر به سمت بیرون کماتش می‌کنند (شکل ۱۸ الف). در نمونه‌های دارای نقص، در برخی نمونه‌ها با توجه به ضعیف شدن قسمتی از مقطع، کماتش موضعی اغلب در محل نقص به وجود آمده و موجب گسیختگی نمونه شده است (شکل ۱۸ ب)؛ و در برخی دیگر، نحوه‌ی خرابی همانند نمونه‌ی کنترلی بوده است. در نمونه‌های تقویت شده به وسیله‌ی ورق‌های فولاد نیز همانند نمونه‌های کنترلی، تسلیم به همراه

بیشینه‌ی بار قائم		بیشینه‌ی بار قائم		شرح نمونه	
شرح نمونه		شرح نمونه		شرح نمونه	
نمونه‌های ۷۰ درجه		نمونه‌های ۲۰ درجه		شرح نمونه	
تقویت نشده	تقویت شده	تقویت نشده	تقویت شده	تقویت نشده	تقویت شده
۳۶۰/۳	۳۵۰/۹۷	DHT	۴۰۵/۶۴	۳۷۷/۳۴	DHT
۳۱۷/۸۶	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۴۳/۴۲	۳۲۴/۰۲	DHM
۳۱۳/۰۶	۲۹۵/۱۵	DHB	۳۸۹/۵۳	۳۵۳/۶۷	DHB
۳۴۰/۷۵	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۱۵/۸۵	۴۰۹/۶۴	DVT
۳۵۳/۲۳	۳۴۱/۶۰	DVM	۴۰۹/۲۰	۳۹۳/۳۰۲	DVM
۲۹۵/۵۶	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۸۷	۴۰۵/۹۳	DVB

را داشته است)، نمونه‌های تقویت شده با ورق فولادی، و نمونه‌های بدون تقویت مشاهده می‌شوند. در جدول ۶، نیز نتایج کامل نمونه‌های مذکور در دو حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

مطابق جدول ۶: در هر دو گروه ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، تقویت با ورق فولادی در محل نقص، نیز همانند روش دیگر تقویت (استفاده از دورپیچ CFRP) سبب افزایش مقاومت ستون‌ها شده است؛ به صورتی که بیشترین افزایش در نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه با نقص افقی پایین ستون (۱۰٪ افزایش) و در نمونه‌های ۷۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه با نقص قائم پایین ستون (۱۳٪ افزایش) بوده است.

-- مقایسه‌ی دو حالت تقویت: در مقایسه بین نتایج نمونه‌های بدون تقویت و نمونه‌های تقویتی در هر دو حالت تقویت به طور جداگانه، مشاهده شد که درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویتی با CFRP بیشتر بوده و در نتیجه، تأثیرگذاری دورپیچ CFRP نسبت به ورق فولادی محسوس‌تر است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مقایسه‌ی دو حالت تقویت برای هر نوع نقص، به ترتیب در دماهای ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. نمودارهای شکل ۱۶ نشان می‌دهد که به جز حالت نقص افقی بالا (DHT)، در تمامی حالت‌ها، نمونه‌های تقویتی با کامپوزیت‌های CFRP (دولایه)، ظرفیت باربری بیشتری



شکل ۱۹. آنالیز حساسیت مش.

$$T(t) = -20t + TU \quad (2)$$

به منظور تحلیل نرم‌افزاری، دو فاز در نظر گرفته شده است:

(الف) فاز اول: تحلیل کوپل سازه‌ی استاتیکی و حرارتی (ترکیب سازه‌ی و حرارتی).

(ب) فاز دوم: تحلیل سازه‌ی استاتیکی.

به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر، ابتدا آنالیز حساسیت بر روی نمونه‌ی کنترلی انجام شده است و نتایج آن در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که مطابق آن، مش‌بندی با سایز ۵۰ میلی‌متر، دقت مناسبی نداشته و با کاهش سایز مش، دقت مدل‌سازی بهبود یافته است؛ به نحوی که سایز مش ۱ میلی‌متر، بهترین دقت را ایجاد کرده است. از طرفی دیگر، با توجه به نوع مدل‌سازی، اعمال سایز مش ۱ میلی‌متری، خللی در هم‌گرایی مدل ایجاد نکرده است. بنابراین در ادامه، از سایز ۱ میلی‌متری مش برای مدل‌سازی استفاده شده است.

در شکل ۲۰، نمونه‌ی از نمودارهای بار - جابه‌جایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به نتایج عددی، مدل اجزاء محدود، دقت و هم‌گرایی مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی در راستی‌آزمایی پیش‌بینی ظرفیت باربری نمونه‌های فشاری فولادی دارد. همچنین به منظور مطابقت مود خرابی در نتایج آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته، مقایسه‌ی از تغییرشکل نمونه‌ها در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، مدل المان محدودی با دقت مناسبی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی را تعیین کرده است.

۱.۱. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به بررسی اثر حرارت و نقص در ظرفیت ستون‌های فولادی پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا ۱۴ ستون شامل نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های دارای نقص (نوع نقص) ساخته و در ۲ تراز دمایی ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. سپس آزمون فشار بر روی نمونه‌ها انجام شده و نمودارهای بار - جابه‌جایی به‌دست آمده است. در ادامه، ۲۴ ستون دیگر جهت مقاوم‌سازی نقص‌ها به‌وسیله‌ی ورق‌های فولادی و کامپوزیت‌های FRP استفاده و در دو تراز دمایی ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند. خلاصه‌ی نتایج ۳۸ آزمایش انجام‌شده به این شرح است:

(الف) ضعف و نقص باعث کاهش مقاومت ستون‌ها می‌شود که بیشترین درصد کاهش ظرفیت باربری در نمونه‌های با دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) مربوط به نمونه با نقص افقی میانه‌ی ستون (۲۸٪) و در نمونه‌های ۷۰ درجه



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۸. مود خرابی نمونه‌ها.

کمانش موضعی رخ داده است (شکل ۱۸ ج). در نمونه‌های تقویت شده به‌وسیله‌ی CFRP نیز اغلب در ۲ ضلع، کمانش محلی داخلی رخ داده و در نهایت، با لایه‌لایه شدن ورق فولاد و CFRP در نواحی گوشه‌های ستون، پارگی رخ داده و نمونه گسیخته شده است. علاوه بر این، اگرچه وقوع کمانش در دو ضلع دیگر ستون که در آن کمانش موضعی به بیرون از طریق محبوس شدن ستون توسط CFRP به تأخیر افتاده است، پس از افزایش دامنه‌ی کمانش موضعی، پارگی CFRP در دو ضلع دیگر نیز رخ داده است (شکل ۱۸ د).

۱.۰. مدل‌سازی المان محدود

به منظور گسترش نتایج آزمایشگاهی، ۵ نمونه دارای نقص در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ۱۲ مدل‌سازی و راستی‌آزمایی شده‌اند که به این شرح هستند:

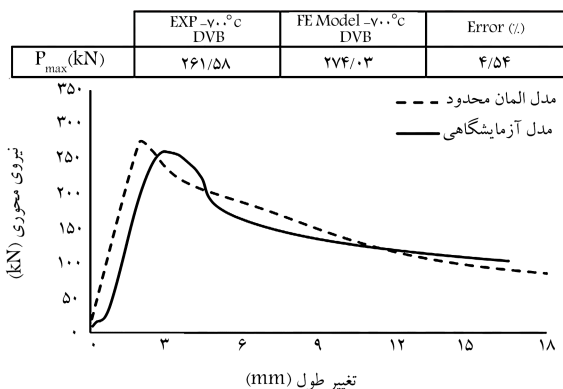
۱. نمونه‌ی بدون نقص (Control)،
۲. نمونه با نقص قائم پایین نمونه (DVB)،
۳. نمونه با نقص افقی وسط نمونه (DHM)،
۴. نمونه با نقص افقی وسط نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی (DHM-PL)،
۵. نمونه با نقص افقی وسط نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی (DVB-CVTVL).

خواص مصالح، فرایند بارگذاری و کلیه‌ی مشخصات هندسی و مکانیکی مدل‌های عددی مطابق با فرایند استفاده شده در آزمایش‌هاست. در مدل‌سازی مذکور، از المان مکعبی ۳ درجه آزادی، ۸ گره‌ی با گرادیان حرارتی (C3DAT) و از المان S4R (المان صفحه‌ی ۴ گره‌ی) که از المان‌های Shell است، برای مدل‌سازی CFRP استفاده شده است.

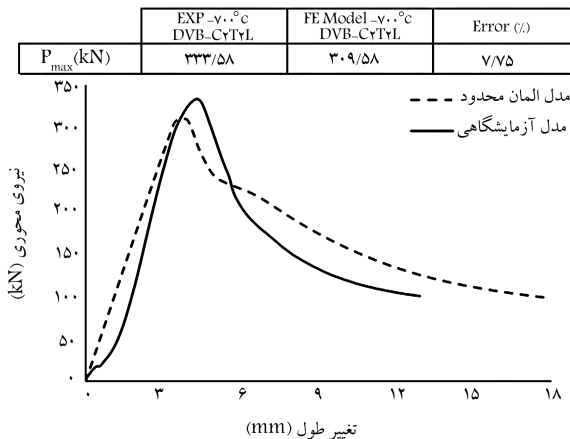
۱.۱.۰. پروسه‌ی اعمال حرارت و تحلیل

جهت اعمال حرارت همانند نمونه‌ی آزمایشگاهی (نمودار شکل ۵ در بخش ۵)، از توابع ۱ و ۲ به ترتیب جهت گرمایش و سپس سرمایش استفاده شده است:

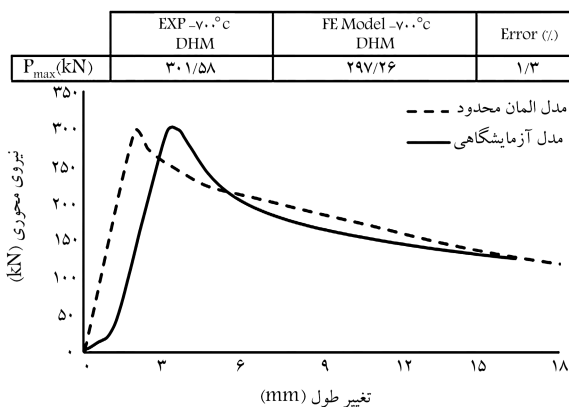
$$T(t) = 10t + T_0 \quad (1)$$



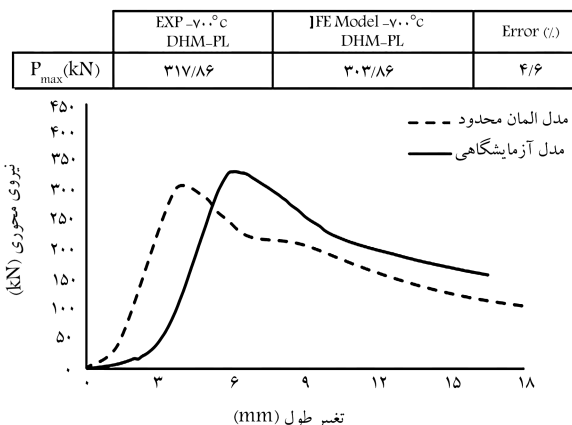
ج) نمونه DVB در دمای ۷۰۰ درجه؟



د) نمونه DVB-C γ T γ L در دمای ۷۰۰ درجه.

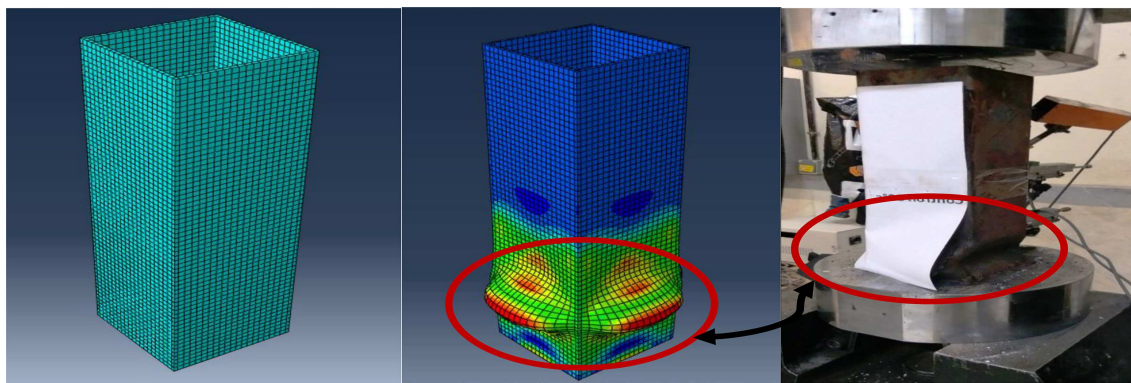


الف) نمونه DHM در دمای ۷۰۰ درجه؟



ب) نمونه DHM-PL در دمای ۷۰۰ درجه؟

شکل ۲۰. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابجایی در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی.



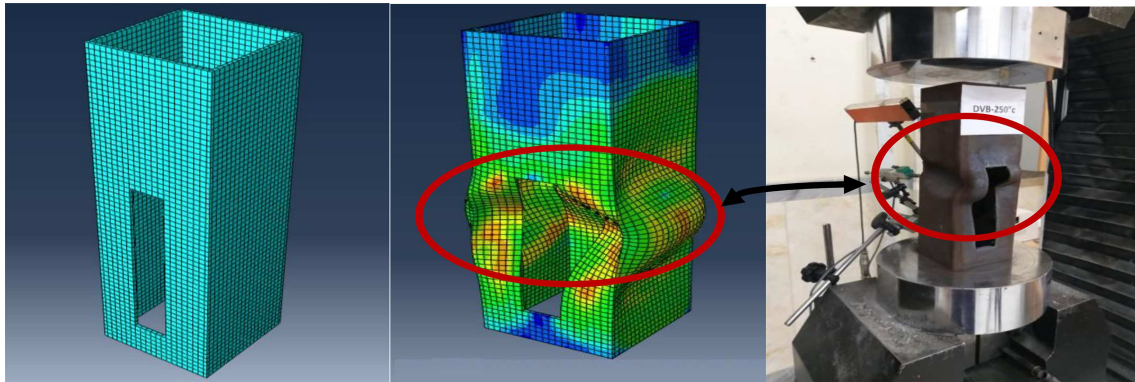
شکل ۲۱. مدل‌سازی نمونه‌ی کنترلی در نرم‌افزار آباکوس، حالت تغییرشکل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی.

ج) جهت جبران ضعف باربری و کاهش مقاومت ستون‌های فولادی در اثر نقص و هم‌زمان حرارت، یکی از بهترین روش‌ها بدون افزایش محسوس وزن، استفاده از الیاف CFRP به صورت دورپیچ است که تعداد لایه‌های بیشتر به علت محصورکنندگی نقش بیشتری دارند.

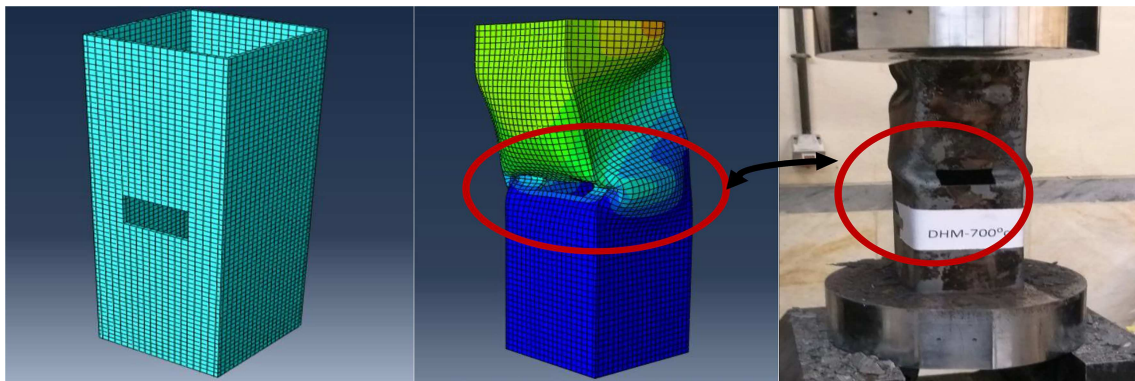
د) افزایش مقاومت نمونه‌ها بعد از تقویت دورپیچ CFRP از نتایج بدست آمده در این تحقیق بود که این تأثیر در نمونه‌های با دمای معمولی محیط و دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است که برای نمونه‌ها با نقص افقی پایین ستون

سانتی‌گراد مربوط به نمونه با نقص قائم پایین ستون (کاهش ۳۲ درصدی) است.

ب) حرارت و افزایش دما سبب کاهش مقاومت ستون‌های فولادی می‌شود، به طوری که با افزایش دما تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، که تقریباً دمای شکست فولاد است، کاهش ۱۵ درصدی ظرفیت باربری در نمونه‌ی کنترلی یا بدون نقص مشاهده می‌شود و بیشینه‌ی کاهش مقاومت مذکور در نمونه با نقص قائم ستون رخ داده است (۳۵٪ کاهش مقاومت).



شکل ۲۲. مدل سازی نمونه با نقص قائم پایین نمونه در نرم افزار آباکوس، حالت تغییر شکل نرم افزاری و آزمایشگاهی.



شکل ۲۳. مدل سازی نمونه با نقص افقی وسط نمونه در نرم افزار آباکوس، حالت تغییر شکل نرم افزاری و آزمایشگاهی.

و) تأثیر بیشتر تقویت CFRP نسبت به ورق در بهبود عملکرد ستون های فولادی از دیگر نتایج به دست آمده در مقایسه بین دو حالت تقویت بوده است، که در نمونه های ۷۰۰ درجه سانتی گراد محسوس تر بوده است.

ز) به منظور گسترش نتایج در مطالعات آینده، مدل المان محدودی نمونه دارای سوراخ و نمونه ای مقاوم سازی شده، مدل سازی و راستی آزمایی شده است. نتایج مدل المان محدودی، دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داشته است.

به میزان بیشینه بوده است.

در کل نمونه ها، نمونه ای ۷۰۰ درجه مذکور با ۴۵٪ افزایش باربری نسبت به نمونه ای مشابه تقویت نشده ای آن، بیشترین تأثیر را از استفاده ای دور پیچ CFRP داشته است.

ه) استفاده از دولاپه ای CFRP به علت محصورکنندگی ستون فولادی در مدهای خرابی و کماتش تأثیر داشته و کماتش پایداری را به میزان کمیته رسانده است.

پانویس ها

11. He & Chen
12. Abaqus

1. Yang
2. Wang
3. Correia
4. Bystr
5. Fan
6. Xing
7. Tao & Han
8. Jiangtao
9. Imran
10. Chen

منابع (References)

1. Saedi Daryan, A. and Ketabdari, H. "Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **31**(10), p. 04019221 (2019).
2. Ketabdari, H., Saedi Daryan, A. and Hassani, N. "Pre-

- dicting post-fire mechanical properties of grade 8.8 and 10.9 steel bolt”, *Journal of Constructional Steel Research*, **162**, p. 105735 (2019).
3. He, K. and Chen, Y. “Experimental investigation of fire-exposed steel tubular stub columns wrapped with CFRP sheets”, *Journal of Composite Structures*, **253**, pp. 112807-112823 (2020).
 4. Agarwal, J. and Haberland, M. “Robustness of structures: Lessons from failures”, *Journal of Structural Engineering International*, **1**, pp. 105-111 (2012).
 5. Yang, K.C., Chen, S.J., Lin, C.C. and et al. “Experimental study on local buckling of fire-resisting steel columns under fire load”, *Journal of Constructional Steel Research*, **61**, pp. 553-565 (2005).
 6. Wang, W.Y. and Li, G.Q. “Behavior of steel columns in a fire with partial damage to fire protection”, *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(6), pp. 1392-1400 (2009).
 7. Correia, A.M., Pires, T.A.C. and Rodrigues, J.P.C. “Behaviour of steel columns subjected to fire”, *In 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, pp. 879-890 (2010).
 8. Bystrom, A., Sjostrom, J., Wickstrom, U. and et al “Large scale test on a steel column exposed to localized fire”, *Journal of Structural Fire Engineering*, **5**(2), pp. 147-160 (2014).
 9. Fan, S., Ding, X., Sun, W. and et al. “Experimental investigation on fire resistance of stainless-steel columns with square hollow section”, *Thin-Walled Structures Journal*, **98**, pp. 196-211 (2016).
 10. Fan, S., Liu, M., Sun, W. and et al. “Experimental investigation of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints in fire”, *Fire Safety Journal*, **99**, pp. 49-62 (2018).
 11. Xing, Z., Zhao, O., Kucukler, M. and et al. “Testing of stainless steel I-section columns in fire”, *Journal of Engineering Structures*, **227**, p. 111320 (2021).
 12. Karimian, M., Narmashiri, K., Shahraki, M. and et al. “Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP”, *Journal of Constructional Steel Research*, **138**, pp. 555-564 (2017).
 13. Shahraki, M., Sohrabi, M.R., Azizyan, G.R. and et al. “Experimental and numerical investigation of strengthened deficient steel SHS columns under axial compressive loads”, *Structural Engineering and Mechanics Journal*, **67**(2), pp. 207-217 (2018).
 14. Shabani Ammari, A. and Narmashiri, K. “Effects of vertical deficiency location on the structural behavior of steel SHS short columns”, *Amirkabir (AUT) Journal of Civil Engineering*, **4**(4), pp. 1-14 (2020).
 15. Yousefi, O., Narmashiri, K., Hedayat, A.A. and et al. A. “Strengthening of corroded steel CHS columns under axial compressive loads using CFRP”, *Journal of Constructional Steel Research*, **178**, pp. 106496 (2021).
 16. Tao, Z. and Han, L.H. “Behaviour of fire-exposed concrete-filled steel tubular beam columns repaired with CFRP wraps”, *Thin-Walled Structures Journal*, **45**(1), pp. 63-76 (2007).
 17. Jiangtao, Y., Yichao, W., Kexu, H. and et al. “The Performance of near surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire”, *Fire Safety Journal*, **90**, pp. 86-94 (2017).
 18. Imran, M., Mahendran, M. and Keerthan, P. “Heat transfer modelling of CFRP strengthened and insulated steel tubular columns”, *Journal Construction and Building Materials*, **184**, pp. 278-294 (2018).
 19. Chen, Y., Wang, K., He, K. and et al. “Compressive behavior of CFRP-confined post heated square CFST stub columns”, *Thin-Walled Structures Journal*, **127**, pp. 434-445 (2018).
 20. ASTM A370, “Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products”, ASTM International, West Conshohocken, PA (2020) (www.astm.org).
 21. Sikadur®-330, Product Data Sheet, Edition 21/02/2012.
 22. Hassani, M., Safi, M., Rasti Ardakani, R. and et al. “Post-fire performance of steel reinforced concrete columns with different steel sections”, *Advances in Structural Engineering*, **24**(16), pp. 3724-3738 (2021).