

مقاوم سازی فشاری ستون فولادی دایروی با خوردگی موضعی توسط CFRP

امید یوسفی^۱، امیراحمد هدایت^{۲*}، کامبیز نرماشیری^۴، علی کاربخش^۵

۱- دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

۲- دانشیار گروه عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

۳- دانشیار گروه عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

۴- دانشیار گروه عمران، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

۵- استادیار گروه عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

* نویسنده مسئول: امیر احمد هدایت

پست الکترونیک: Amirahmad1356@yahoo.com

چکیده

سازه های فولادی به دلایل متعدد مانند وارد شدن بارهای تصادفی، خوردگی و کاهش مقاومت دچار آسیب می شوند که نیاز به ترمیم و بهسازی دارند. در این تحقیق به ستون های دایروی شکل فولادی، آسیب به صورت خوردگی موضعی اعمال شد و تأثیر استفاده از الیاف پلیمری تقویت شده به فیبر کربن برای مقاوم سازی مطالعه شد. تعداد ۱۹ ستون دایروی شکل فولادی با ارتفاع و ابعاد آسیب یکسان تحت بار فشاری با نرم افزار آباکوس مدل سازی شدند که از این تعداد ۶ نمونه به صورت آزمایشگاهی تحلیل شدند. در نمونه های آزمایشگاهی، از خوردگی پیش رونده برای ایجاد آسیب در نمونه ها استفاده شد و در تحلیل نرم افزاری برای بالابردن دقت تحلیل از روش ترکیبی برای مطالعه کمانش های ناحیه خمیری بعد از کمانش اولیه استفاده شد. به این ترتیب ابتدا نمونه ها تحت تحلیل کمانشی قرار گرفته و در ادامه از روش تحلیل غیرخطی ریکس با در نظر گرفتن ناکاملی به صورت کلی و موضعی برای تحلیل نمونه ها استفاده شد. نتایج نشان داد که ستون های دارای خوردگی دچار کاهش ظرفیت باربری و سستی شدند و تخریب کامل ناحیه آسیب دیده ظرفیت باربری را برای ستون با آسیب میانه به میزان ۴۰٪ و برای ستون با آسیب نزدیک به تکیه گاه به میزان ۲۱٪ کاهش داد، که نشان دهنده بحرانی تر بودن آسیب در میانه ی ستون است. استفاده از الیاف کربنی توانست کاهش باربری را به میزان ۳۳٪ جبران کند و تأثیر مناسبی را در کنترل گسیختگی ها و کاهش تنش ها در محل آسیب دیده نشان داد.

کلمات کلیدی

مقاوم سازی، خوردگی، ستون فولادی، کمانش ستون، CFRP

امروزه در دنیا بسیاری از سازه‌های زیربنایی که در گذشته ساخته شده‌اند به دلایل مختلف از قبیل تغییر کاربری، مسائل خوردگی و خطاهای طراحی فاقد مقاومت و شکل‌پذیری لازم در برابر بارهای اعمالی تشخیص داده می‌شوند، از آنجایی که جایگزینی سازه‌ها وقت و هزینه زیادی می‌طلبد مقاوم‌سازی یک راه حل قابل قبول برای بهبود ظرفیت تحمل بار و افزایش عمر بهره‌برداری شده است. خوردگی فولاد به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان دلیل اصلی زوال و خرابی زودرس در اعضای فلزی پذیرفته شده است و عمدتاً عرشه‌ها و پایه‌های پل‌ها در معرض آسیب دیدگی ناشی از خوردگی هستند. مالومبلا و همکاران، مطالعه‌ای را به‌صورت آزمایشگاهی بر رفتار سازه‌ای تیرهای بتنی دارای خوردگی انجام دادند. خوردگی بر بال میلگردهای کششی اعمال شد و از نسبت ۵ درصد محلول سدیم کلرید برای ایجاد خوردگی استفاده شد آن‌ها دریافتند که کرنش‌های طولی، عمق تار خنثی و مقدار تحمل بار به میزان خوردگی وابسته است [۱]. در تحقیق دیگری که بالیم و همکاران درباره رفتار سازه‌ای تیر دارای خوردگی تحت بار ثابت انجام دادند نتایج به‌طور واضحی نشان داد که تغییر شکل تیرها با افزایش میزان خوردگی افزایش می‌یابد [۲].

یکی از رایج‌ترین روش‌های تقویت سازه‌های فولادی استفاده از ورق‌های فولادی است. با توجه به اینکه ورق‌های فولادی دارای بار مرده زیاد، اشتباهات ناشی از جوشکاری و عوارض ناشی از خوردگی است استفاده از ماده جایگزینی که مشکلات ذکر شده را مرتفع نماید اجتناب‌ناپذیر است. به همین منظور در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی بر روی پلیمر مسلح شده به فیبر^۱ انجام شده است که از آن به توان به جای ورق‌های فولادی استفاده کرد. FRP به دلیل خواص تقویتی که دارد از قبیل مقاومت کششی بالا، وزن کم، مدول الاستیسیته بالا، نداشتن عوارضی چون خوردگی، راحتی جابه‌جایی و نصب، به‌عنوان اولین گزینه به‌منظور جایگزینی ورق‌های فولادی برای مقاوم‌سازی و تقویت لرزه‌ای مدنظر قرار می‌گیرد.

استفاده از الیاف پلیمری مسلح شده به فیبر کربن^۲ برای مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی دایروی شکل، پر شده با بتن توسط ژو و همکاران انجام شد در این تحقیق ستون‌ها به‌صورت نرم‌افزاری تحت بارگذاری فشاری مطالعه شدند و نتایج نشان داد که استفاده از الیاف CFRP باعث افزایش بار نهایی در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده می‌شود [۳].

در نظر گرفتن عواملی نظیر تعداد لایه‌ها و فاصله نوارهای الیاف کربنی مطالعه‌ای بود که توسط ساندراراجا و همکاران بر روی عضو قوطی شکل انجام شد، آن‌ها دریافتند که استفاده از الیاف به‌صورت عرضی و طولی باعث افزایش بیشتر در سختی و ظرفیت باربری در مقایسه با استفاده از الیاف به‌صورت طولی می‌شود [۴].

مطالعه‌ی روش‌های نصب ورق‌های کربنی به‌منظور کنترل رفتار کمانشی در مقاطع فولادی توسط هریس و همکاران انجام شد. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش تعداد لایه‌ها منجر به افزایش استحکام و بهبود عملکرد اعضاء فولادی خواهد شد و انتخاب و جهت‌گیری مناسب الیاف کربنی تأثیر قابل توجه در مقاوم‌سازی مقاطع فولادی دارد [۵]. پرابو و همکاران، الیاف کربنی را با در نظر گرفتن ضخامت و فاصله نوارها به دور مقطع فولادی پر شده با بتن پیچیدند و به بررسی آزمایشگاهی رفتار تنش-کرنش و مدهای شکست نمونه‌های مقاوم سازی شده با الیاف کربنی به‌صورت عرضی پرداختند، در این تحقیق مشاهده شد زمانی که فاصله نوارهای پلیمری کربن زیاد می‌شود کمانش در قسمت بدون الیاف رخ می‌دهد و تعداد لایه‌های بیشتر تأثیر بهتری در کنترل تغییر شکل محوری دارد [۶].

بررسی تقویت لوله‌های فولادی دایره‌ای با مقاومت بسیار بالا که با جوش لب‌به‌لب متصل شده بودند توسط جیاو و همکاران انجام شد، آن‌ها از فولاد با مقاومت بالا و سه نوع از رزین‌های اپوکسی با برش‌های مختلف برای تقویت استفاده کردند. مطالعه برای تعیین مقاومت برشی لبه بین الیاف کربنی و فولاد انجام شد. نمونه‌ها تحت تنش محوری قرار گرفتند و سه نوع مد گسیختگی شامل گسیختگی چسب، پارگی الیاف کربنی و گسیختگی ترکیبی مشاهده شد [۷]. تاو و همکاران، به بررسی ژاکت‌های الیاف کربنی در مقاوم‌سازی ستون‌های قوطی شکل و دایروی شکل کوتاه پر شده با بتن پرداختند. تعداد ۹ ستون کوتاه با مقاطع دایروی و قوطی شکل به‌صورت آزمایشگاهی

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Carbon Fiber Reinforced Polymer

مطالعه گردید و تأثیر استفاده از الیاف کربنی در افزایش ظرفیت باربری مشاهده شد. افزایش تعداد لایه‌ها در افزایش ظرفیت باربری مؤثر بود و این افزایش در ستون‌های دایروی نسبت به قوطی شکل بیشتر بود [۸].

مقاوم‌سازی با الیاف کربنی به صورت عرضی و طولی در ستون کوتاه در آزمایشگاه توسط هایدرو ژائو انجام شد و این روش باعث افزایش ظرفیت تسلیم و به تأخیر انداختن کمانش در ستون شد [۹]. همچنین بررسی مدهای کمانش، رفتار تنش-کرنش و ظرفیت باربری نهایی ستون قوطی شکل فولادی کوتاه مقاوم‌سازی شده با الیاف کربنی توسط سیواسنکر و همکاران انجام شد که نشان داد با افزایش بار، الیاف کربنی در ستون احاطه شده دچار پارگی می‌شوند [۱۰].

هی و همکاران، رفتار ستون دایروی فولادی پر شده با بتن معمولی، بتن بازیافتی و مقاوم‌سازی شده با الیاف کربنی تحت فشار را مطالعه کردند، در آن بررسی استفاده از الیاف کربنی باعث افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری شد و استفاده از این مصالح به صورت نیمه دور پیچ دارای کرنش فشاری محوری کمتر نسبت به دور پیچ کامل شد [۱۱]. کالواگونتا و همکاران، در مطالعه‌ای بر روی ستون کانال شکل لبه‌دار مقاوم‌سازی شده با الیاف کربنی تحت بار محوری مشاهده کردند که در مقطع کاملاً مقاوم‌سازی شده تا ۱۶/۷۵ درصد و در نمونه مقاوم‌سازی شده در جان تا ۱۰/۲۶ درصد ظرفیت باربری افزایش یافته است؛ به دلیل لایه‌لایه شدن و جدا شدن الیاف کربنی، کاهش ظرفیت و شکست ناگهانی ملاحظه گردید و همچنین آماده‌سازی سطح و دما دو عامل مهم برای دست یافتن به چسبندگی مناسب بین فولاد و الیاف می‌باشند [۱۲].

شهرکی و همکاران، مطالعه‌ای را بر روی ستون‌های فلزی دارای نقص انجام دادند آن‌ها از پروفیل قوطی با مقطع 40×40 میلی‌متر مربع با ارتفاع ۲۵۰۰ میلی‌متر استفاده کردند و دریافتند که وجود آسیب باعث کاهش ظرفیت باربری ستون می‌شود و استفاده از CFRP باعث کاهش تنش‌ها در اطراف نقص می‌شود [۱۳]. کبخا، مطالعه‌ای را بر روی ارزیابی عملکرد سازه‌ای اعضای فولادی قوطی شکل آسیب‌دیده و مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP تحت ترکیب بار خمشی، پیچشی و بار موضعی انجام داد. نتایج نشان داد که آسیب باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود و در طول بارگذاری مقدار تنش‌ها در ناحیه آسیب‌دیده افزایش می‌یابد [۱۴]. ونگ و همکاران، مطالعه‌ای را بر روی ستون‌های فولادی دایروی و پر شده با بتن انجام دادند و در این تحقیق ستون‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP، تحت ترکیب بار فشاری-خمشی-پیچشی قرار گرفتند و رفتار سازه‌ای و حالت‌های شکست نمونه‌ها بررسی شد، همچنین رابطه طراحی و تعیین ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها تحت این ترکیب بار ارائه شد [۱۵]. مقاوم‌سازی تیر با آسیب اولیه به صورت یک‌طرفه و دوطرفه بر روی بال کششی توسط یوسفی و همکاران به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مطالعه شد. آسیب دوطرفه باعث کاهش ظرفیت باربری نسبت به آسیب دوطرفه شد همچنین آسیب یک‌طرفه علاوه بر کاهش باربری نهایی، کمانش کلی تیر را نیز سبب شد و افزایش داد؛ مقاوم‌سازی با الیاف کاهش باربری را جبران کرد و در کاهش کمانش تیر نیز مؤثر بود [۱۶]. قائم دوست و همکاران، تحقیقی را در مورد ستون‌های کوتاه قوطی شکل فولادی با آسیب اولیه انجام دادند که در آن آسیب به صورت افقی و قائم در گوشه و مرکز ستون در نظر گرفته شد [۱۷]. کریمیان و همکاران مطالعه‌ای را در مورد مقاوم‌سازی ستون‌های دایروی شکل فولادی کوتاه دارای آسیب توسط الیاف کربنی انجام دادند، آن‌ها دریافتند که وجود آسیب باعث کاهش ظرفیت باربری ستون‌های فولادی خواهد شد و آسیب‌های ایجاد شده باعث افزایش تغییر شکل‌های محوری و کمانش موضعی در ستون می‌شود [۱۸].

شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در ستون‌های آسیب‌دیده توسط یوسفی و همکاران مطالعه شد، در تحقیقی که به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری بر روی ۱۰ نمونه ستون دایره‌ای انجام دادند، آسیب را تنها به پایه و میانه ستون اعمال کردند، آن‌ها دریافتند که آسیب باعث کاهش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در ستون‌های آسیب‌دیده می‌شود و استفاده از الیاف کربنی می‌تواند رفتار سازه‌ای ستون آسیب‌دیده را بهبود ببخشد [۱۹].

در دهه‌ی اخیر مطالعات زیادی در مورد مقاوم‌سازی اعضای فولادی با الیاف کربنی انجام شده است، در اکثر تحقیقات گذشته ستون‌ها یا بدون آسیب بررسی شدند یا اینکه آسیب با ایجاد برش در ناحیه خاص مطالعه شده است در صورتی که خوردگی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل زوال اعضای فولادی نه تنها بر هندسه عضو، بلکه بر مواد ناحیه خورده شده نیز تأثیر می‌گذارد که این امر انگیزه‌ای شد برای این تحقیق تا با استفاده از سیستم خوردگی پیش‌رونده در آزمایشگاه بر روی ستون‌ها خوردگی ایجاد شود و رفتار سازه‌ای ستون و

حالت‌های کمانش آن مورد بررسی قرار گیرد، در نهایت استفاده از الیاف کربنی جهت مقاوم‌سازی ستون‌های خورده‌شده مطالعه گردد. در این مطالعه تعداد ۱۹ نمونه ستون دایروی شکل مورد بررسی قرار گرفتند که از این تعداد ۶ نمونه به صورت آزمایشگاهی و تئوری با نرم‌افزار آباکوس^۱ ۲۰۱۶ و مابقی تنها به صورت نرم‌افزاری تحلیل شدند. به ستون‌ها آسیب به صورت خوردگی با درصد مختلف ۵۰٪، ۱۰۰٪ و در موقعیت‌های مختلفی از طول ستون اعمال شد و یک ستون به عنوان ستون سالم و بدون خوردگی برای مقایسه در نظر گرفته شد. برای بررسی اثربخشی استفاده از الیاف CFRP، ستون‌های با آسیب ۱۰۰ درصد مقاوم‌سازی شدند. نتایج مطالعه نشان داد که وجود خوردگی در میانه ستون باعث کاهش شدید باربری ستون شد و استفاده از الیاف کربنی توانست به طور مناسب کاهش باربری را جبران و کمانش‌های محل آسیب را کنترل کند.

۲- مشخصات مصالح و نمونه‌ها

در این پژوهش تعداد ۱۹ ستون مورد بررسی قرار گرفتند که ۶ نمونه به صورت مدل‌سازی و آزمایشگاهی تحلیل شدند و ۱۳ نمونه از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶، مطالعه شدند.

۲-۱- مشخصات فولاد انتخابی

به منظور مطالعه رفتار ستون خورده شده، از ستون فولادی با قطر ۸۸ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰۰ میلی‌متر با مقاومت نهایی ۳۲۲ مگاپاسکال، کرنش نهایی ۱۰٪ و مدول الاستیسیته ۲۱۶ مگاپاسکال استفاده شد. سه نمونه‌ی دمبلی شکل از مقطع ستون توسط دستگاه CNC برش و برای انجام آزمایش کشش آماده شد. شکل ۱ مراحل برش نمونه‌ها و انجام آزمایش کششی برای آن‌ها را نشان می‌دهد. در جدول ۱ مقادیر آزمایش کشش برای سه دمبل و میانگین مقادیر ارائه شده است. قابل توجه است که دو عدد از دمبل‌ها (شماره‌ی ۱ و ۳) مربوط به ناحیه خوردگی است.



شکل ۱: مراحل برش نمونه‌ها و انجام آزمایش کششی: الف) برش لوله فولادی با دستگاه CNC، ب) دمبل‌های آماده شده، ج) انجام آزمایش کشش

Fig. 1. Steps of cutting samples and tensile test: a) Cutting steel pipe with CNC machine, b) Prepared dumbbells, c) Performing tensile test

¹ ABAQUS

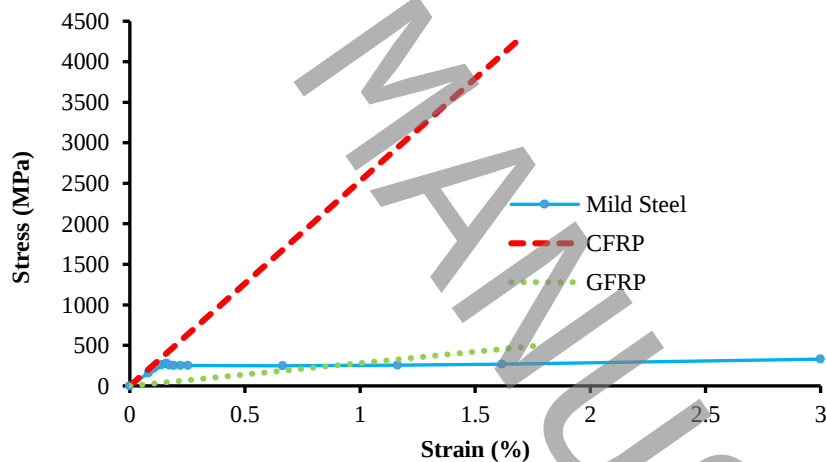
جدول ۱: ابعاد ستون فولادی دایره‌ای شکل توخالی و نتایج آزمایش کشش

Table 1. Dimensions of steel circular hollow section column and tensile test results

شماره آزمایش کشش	قطر ستون (میلی‌متر)	ضخامت ستون (میلی‌متر)	ارتفاع ستون (میلی‌متر)	ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)	تنش جاری شدن (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (%)
۱	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۶۳	۳۲۳	۱۱/۰۱
۲	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۷۶	۳۳۲	۱۱/۳
۳	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۶۱	۳۲۲	۱۰/۷
میانگین مقادیر	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۶۵	۳۲۵	۱۱/۰۰۳

۲-۲- مشخصات الیاف CFRP

جهت تقویت ستون دایروی فلزی دارای خوردگی تحت بار فشاری، از الیاف کربنی CFRP با مدول الاستیسیته ۲۳۸۰۰۰ مگاپاسکال و ضخامت نوار، ۰/۱۲۹ میلی‌متر و نسبت پواسون ۰/۱۷ استفاده شده است. شکل ۲، منحنی تنش-کرنش این مواد است که رفتار الاستیک خطی تا مرحله‌ی گسیختگی را بدون هیچ نقطه‌ی جاری شدن مشخص نشان می‌دهد، به همین دلیل تنها کافی است خصوصیات مکانیکی کشسان این مواد در نرم‌افزار داده شود. خصوصیات الیاف کربنی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۲: نمودار تنش-کرنش الیاف پلیمری در مقایسه با فولاد معمولی [۲۰]

Fig. 2. Stress-Strain diagram of FRP compared to mild steel [20]

۳-۲- خصوصیات چسب

چسب، مسیر انتقال برش بین سطح فولاد و مواد کامپوزیت را تأمین و عملکرد همسان کامپوزیت و ستون را سبب می‌شود. نوارهای CFRP تقویتی با استفاده از اپوکسی مخصوص به ضریب ارتجاعی ۴۵۰۰ مگاپاسکال به ستون فولادی چسبانده می‌شوند. در جدول ۲ مشخصات چسب مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

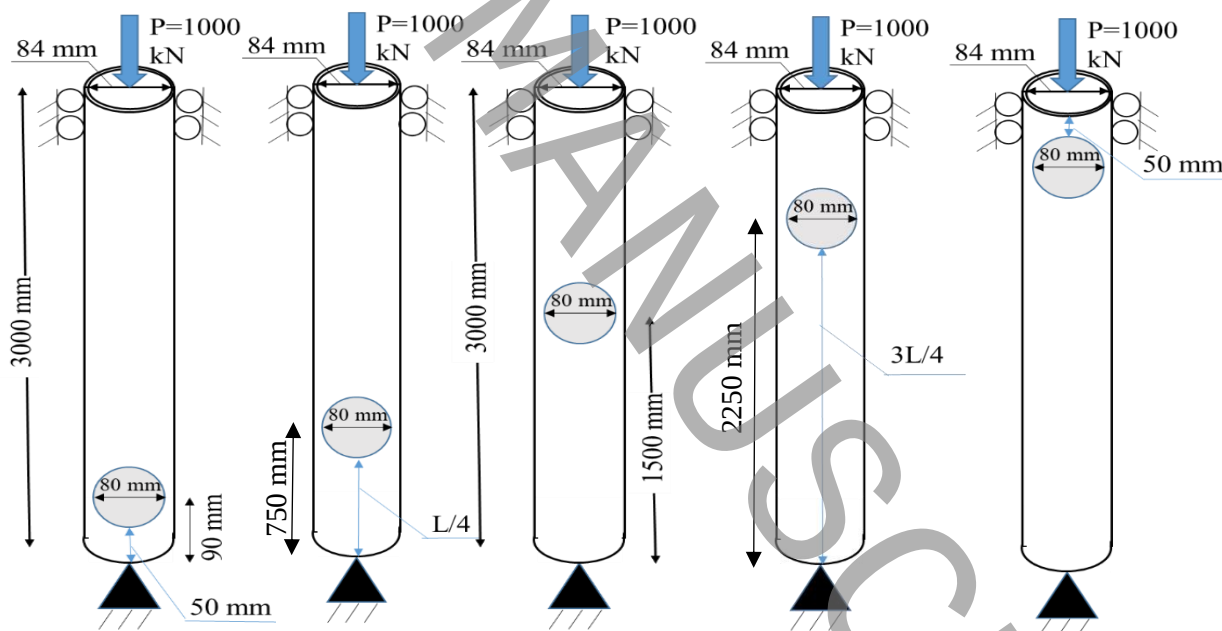
جدول ۲: خواص چسب و الیاف کربنی

Table 2. Properties of adhesive and carbon fibers

مواد	ضخامت	مقاومت کششی	ضریب ارتجاعی	کرنش نهایی
	(میلی متر)	(مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)	(%)
الیاف CFRP [۲۱] (SikaWrap®-230 C)	۰/۱۲۹	۴۳۰۰	۲۳۰۰۰۰	۱/۷
چسب [۲۲] (Sikadur_-330)	۰/۸۷۱	۳۰	۴۵۰۰	۰/۹

۴-۲- مشخصات نمونه‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی درصد آسیب و روش‌های مقاوم‌سازی، ۶ نمونه ستون به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری و ۱۳ نمونه تنها به صورت مدل‌سازی مطالعه شدند. نمونه بدون آسیب به عنوان نمونه کنترل و ۱۹ نمونه ستون با درصد مختلف آسیب در طول ستون، که برخی از آن‌ها توسط الیاف کربنی مقاوم‌سازی شده‌اند بررسی شدند. نام‌گذاری ستون‌ها با توجه به آسیب، موقعیت آن و نحوه‌ی مدل‌سازی انجام شد. ستون‌های آسیب‌دیده با حرف D شروع می‌شوند که عدد بعد آن موقعیت آسیب نسبت به پایه ستون است. به عنوان مثال در ستون D-90-100%-2T2L، ستون با خوردگی ۱۰۰٪ در فاصله ۹۰ میلی‌متری از تکیه‌گاه است که با ۴ لایه الیاف (۲ لایه عرضی و ۲ لایه طولی) مقاوم‌سازی شده است. مشخصات هندسی ستون دایروی شکل توخالی و مشخصات خوردگی آن‌ها در شکل ۳ قابل مشاهده است و همچنین در جدول ۳ نمونه‌های انجام‌شده در این پژوهش ارائه شده است.



شکل ۳: مدل هندسی، موقعیت آسیب و شرایط تکیه‌گاهی

Fig. 3. Geometric model, damage position and support conditions

جدول ۳: مشخصات نمونه‌ها
Table 3. Specimen Specifications

شماره	نمونه	طول و تعداد الیاف کربنی	درصد خوردگی	موقعیت اعمال خوردگی	نوع تحلیل
۱	Control	ندارد	ندارد	ندارد	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۲	D-90-50%	ندارد	۵۰	نزدیک تکیه‌گاه	نرم‌افزاری
۳	D-90-100%	ندارد	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۴	D-90-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۵	D-750-50%	ندارد	۵۰	L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۶	D-750-100%	ندارد	۱۰۰	L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۷	D-750-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۸	D-1500-50%	ندارد	۵۰	میانه ستون	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۹	D-1500-50%-1T1L	۲ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۵۰	میانه ستون	نرم‌افزاری
۱۰	D-1500-100%	ندارد	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۱۱	D-1500-100%-1T1L	۲ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری
۱۲	D-1500-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۱۳	D-1500-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۴۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری
۱۴	D-2250-50%	ندارد	۵۰	3L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۱۵	D-2250-100%	ندارد	۱۰۰	3L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۱۶	D-2250-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	3L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۱۷	D-2910-50%	ندارد	۵۰	نزدیک نقطه بارگذاری	نرم‌افزاری
۱۸	D-2910-100%	ندارد	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	نرم‌افزاری
۱۹	D-2910-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	نرم‌افزاری

۳- آزمایش‌های تجربی و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، لوله‌های فولادی به قطعاتی به طول ۳۰۰۰ میلی‌متر برش داده شدند. سپس با استفاده از سیستم اعمال خوردگی پیش‌رونده برای ایجاد آسیب در موقعیت‌های مورد مطالعه استفاده شد.

۳-۱- ایجاد آسیب در نمونه‌ها

به مجموع عواملی که باعث می‌شود عضو فولادی، عملکرد سازه‌ای اولیه که بر اساس آن طراحی شده را نداشته باشد نقص و یا آسیب در مقطع گفته می‌شود. نقص می‌تواند شامل خرابی و یا تغییر شکل در سطح مقطع و یا طول عضو باشد یا تغییر در خواص مواد شامل تغییر در تنش تسلیم آن باشد. خوردگی از مهم‌ترین دلایل خرابی اعضای فولادی است، در فرآیند خوردگی، نه تنها هندسه‌ی مقطع

آسیب می‌بیند بلکه خوردگی بر خواص مواد هم تأثیر می‌گذارد. به‌طور معمول خوردگی در فلزات به‌صورت سطحی یا موضعی بروز می‌نماید که در خوردگی سطحی، به دلیل اکسیداسیون سطح فلز، خواص فلز شامل تنش تسلیم، تحت تأثیر قرار می‌گیرد درحالی‌که خوردگی موضعی، کاهش مواد از سطح فلز است که باعث نازک شدن مقطع عضو و درنهایت ایجاد شکاف می‌شود [۲۳]. در این پژوهش با توجه به اینکه خوردگی تا چه میزان بر خواص مواد تأثیر گذاشته است ۲ نمونه از دمبل‌های آزمایش کشش از ناحیه‌ی خوردگی تهیه شدند و آزمایش کشش بر روی آن‌ها انجام شد و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است میزان تنش تسلیم برای آزمایش کشش ۱ و ۳ نسبت به نمونه‌ی ۲ به‌طور تقریبی ۳ درصد کمتر است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر خوردگی بر خواص مقطع فلزی در ناحیه‌ی آسیب‌دیده است. در این مطالعه از خوردگی موضعی برای اعمال آسیب بر نمونه‌ها استفاده شده است و عملکرد سازه‌ای آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

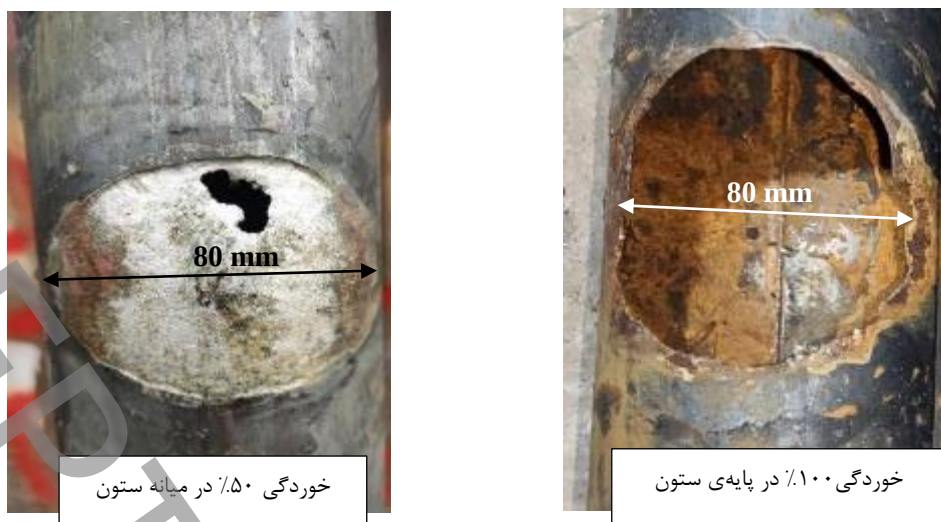
۳-۱-۱- فرآیند اعمال خوردگی

برای اعمال خوردگی از مبدل جریان الکتریسیته به ۱۲ ولت و محلول آب با سدیم کلرید به نسبت ۵٪ با توجه به مطالعه مالومبلا و همکاران استفاده شد [۱]. محلول سدیم کلرید در داخل لوله‌های پلاستیکی به قطر ۸۰ میلی‌متر که با استفاده از چسب ضد آب در محل‌های تعیین‌شده (محل اعمال خوردگی موضعی) نصب شدند ریخته شد. برای اعمال جریان یکنواخت بار مثبت در اطراف محل موردنظر و به فاصله ثابت نسبت به مرکز اعمال خوردگی، چهار عدد میخ با ضخامت ۳ میلی‌متر نصب شدند، به دلیل آنکه اگر بار مثبت به یک نقطه اعمال می‌شد خوردگی بیشتر در نزدیکی وجود محل اتصال بار مثبت به وجود می‌آمد. همچنین جریان بار منفی از طریق محلول به ناحیه اعمال شد.

در شکل ۴ سیستم اعمال خوردگی نشان داده شده است و در شکل ۵ نمونه‌ها بعد از اعمال خوردگی قابل مشاهده هستند. قبل از انجام آزمایش و برای به دست آوردن زمان خوردگی در نمونه‌های اصلی، اعمال خوردگی بر روی نمونه‌های کوچک‌تر انجام گرفت و زمان تقریبی برای وجود آمدن خوردگی در ستون‌های اصلی تعیین گردید. به این ترتیب برای ایجاد خوردگی موضعی ۵۰٪، حدود ۱۲ ساعت و در خوردگی ۱۰۰٪ حدود ۱۸ ساعت از سیستم خوردگی استفاده شد.



شکل ۴: سیستم اعمال خوردگی بر نمونه‌ها
Fig. 4. Corrosion application system



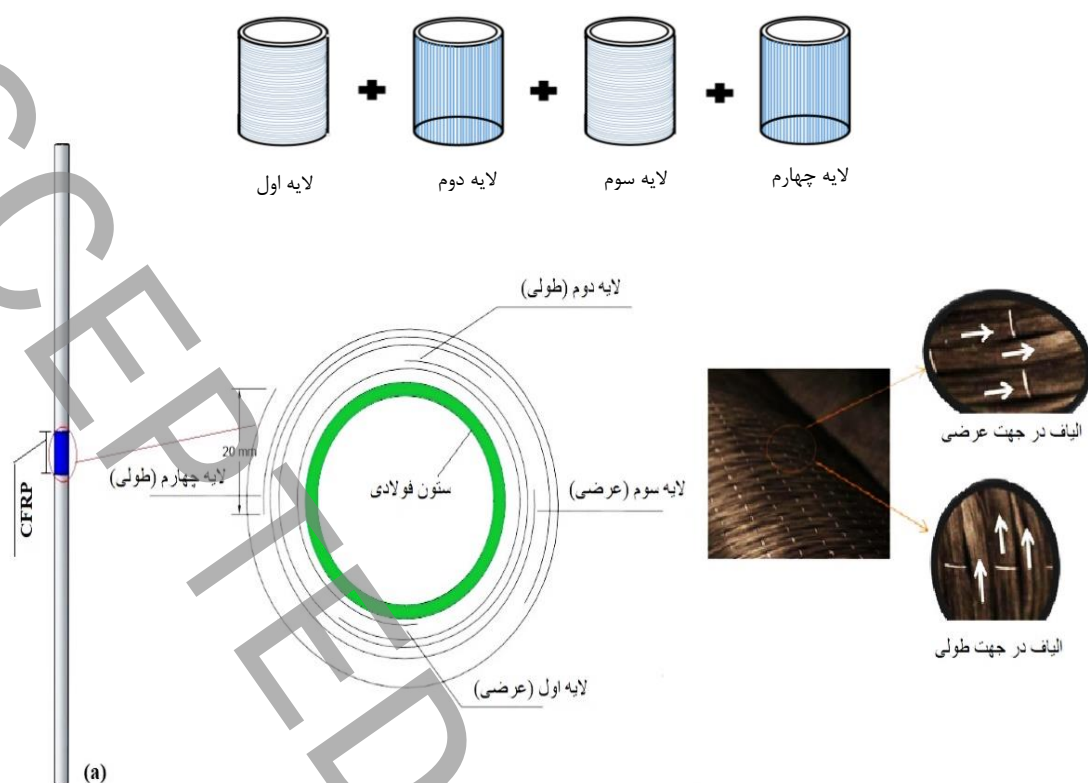
شکل ۵: نمونه‌ها بعد از اعمال خوردگی
Fig. 5. Samples after applying corrosion

۳-۲- نصب الیاف کربنی

به منظور ایجاد سطح تمیز، زبر و عاری از زنگ‌زدگی جهت چسباندن الیاف به لوله فولادی، لوله‌ها سندبلاست شدند. شکل ۶ مراحل انجام سندبلاست روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با محاسبه طول و عرض الیاف موردنیاز و در نظر گرفتن ۲۰ میلی‌متر پوشش روی هم، الیاف برش داده شدند. سپس آلودگی‌های سطح فولاد و الیاف با استفاده از دستمال تمیز و استون پاک شدند. برای چسباندن لایه‌های CFRP بر روی لوله فولادی از رزین اپوکسی (Sikadur330) استفاده شده است که این چسب از دو بخش A و B تشکیل شده است که به نسبت ۴ به ۱ مخلوط شدند. پس از آن با استفاده از قلم‌مو رنگ‌آمیزی، لوله فولادی و لایه‌های الیاف به چسب آغشته شدند و بر اساس الگوی مقاوم‌سازی، الیاف به دور لوله پیچانده شدند و بر روی هر لایه از الیاف نیز مجدداً چسب آغشته شد. در شکل ۶ تصویر مقاوم‌سازی لوله فولادی با الیاف کربنی نشان داده شده است. جیدمان الیاف به دور ستون فولادی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶: انجام سندبلاست، تمیز کردن الیاف کربنی و مقاوم‌سازی ستون‌ها
Fig. 6. Sandblasting, cleaning of carbon fibers and strengthening of columns



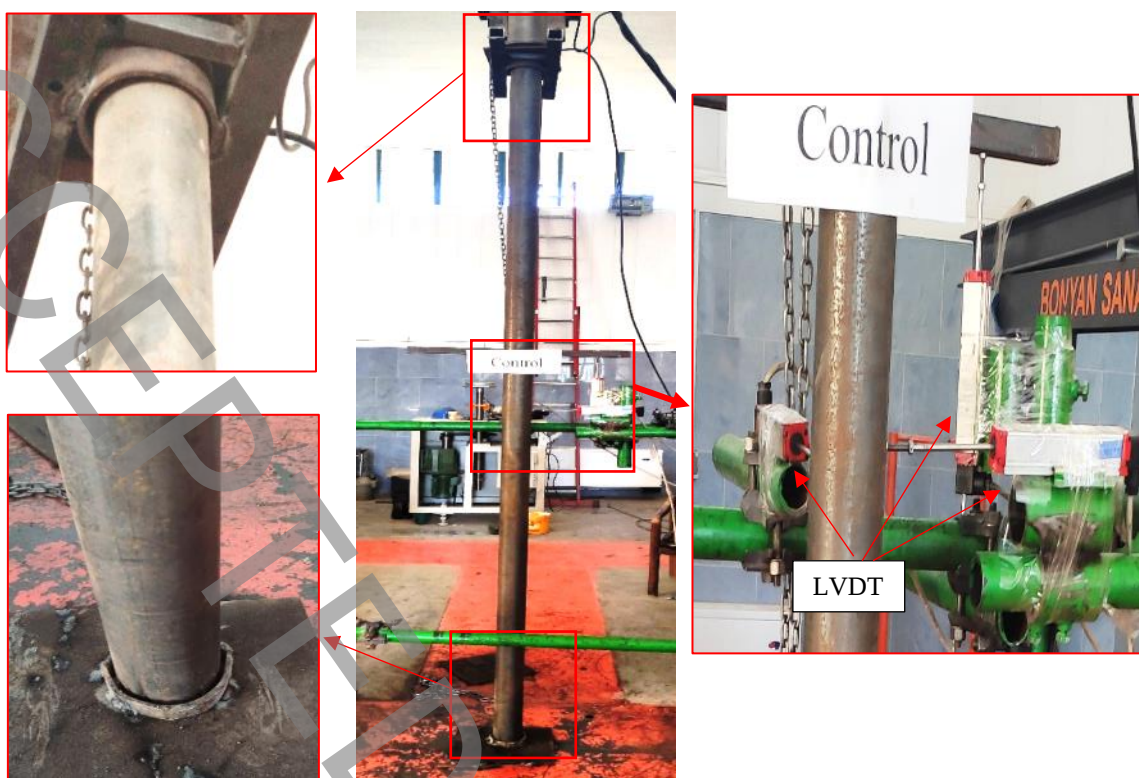
شکل ۷: مقاوم سازی ستون دایروی شکل با ۴ لایه الیاف
Fig. 7. Strengthening of a circular column with 4 layers of CFRP

۳-۳- انجام آزمایش فشار محوری در آزمایشگاه سازه

به منظور بررسی ظرفیت باربری و عملکرد ستون های دایروی شکل فولادی لاغر دارای آسیب خوردگی و بررسی اثر الیاف CFRP بر مقاوم سازی آن ها، نمونه های آزمایشگاهی پس از آماده سازی تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. برای لبه اعمال بار، تکیه گاه غلتکی به گونه ای آماده شد که ستون داخل آن قرار گرفته و به مرکزیت جک واقع شود. در لبه پایین ستون، به منظور اعمال شرایط مفصلی و جلوگیری از حرکت ستون از پایه، از یک مهار با ضخامت ۱۰ میلی متر و عرض ۳۰ میلی متر که به صفحه پایین ستون جوش شده بود استفاده شد. لازم به ذکر است ستون از هر دو لبه بالا و پایین هیچ گونه اتصال جوشی ندارد و کاملاً شرایط مفصلی منظور شد. شکل ۸ شرایط تکیه گاهی در بالا و پایین ستون را نشان می دهد. پس از قرار دادن ستون در محل اعمال بار، نیرو به صورت محوری توسط جک به نمونه ها وارد گردید و تغییر مکان به وسیله سه LVDT^۱ اندازه گیری شد. نیرو و تغییر مکان توسط دیتالاگر^۲ در سیستم ذخیره شدند در شکل ۸ نحوه ی قرارگیری ستون دایروی شکل و محل قرارگیری LVDT نشان داده شده است.

^۱ Linear Variable Differential Transformer

^۲ Data Logger



شکل ۸: شرایط تکیه‌گاهی در آزمایشگاه برای بالا و پایین ستون و نصب LVDT جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها
Fig. 8. Laboratory support conditions for top and bottom of the column and LVDT installation

۴- مدل سازی ستون‌ها

برای مدل‌سازی نمونه‌ها از نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ استفاده شد و تحلیل غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد در نظر گرفته شد.

۴-۱- تعریف المان

در مدل‌سازی برای بررسی رفتار سازه‌ای مقاطع دایره‌ای شکل توخالی و وضعیت تنش‌ها در ضخامت مقطع به‌خصوص در ناحیه آسیب‌دیده، از المان توپر^۱، ۱۰ گرهی (C3D10) همراه با انتگرال کاهش‌یافته استفاده شد.

۴-۲- مقاومت‌های نمونه‌های نرم‌افزاری

برای مدل‌سازی الیاف کربنی، با توجه به اینکه این الیاف دارای ضریب ارتجاعی بالا در جهت طولی بوده و در جهت عرضی چنین ویژگی را ندارند خواص به‌صورت مقادیر مهندسی اعمال شدند که برای این کار مقدار ضریب ارتجاعی الیاف که در جدول ۲ بیان شده است به‌عنوان E_1 و برای مقادیر E_2 و E_3 مقدار ۱۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار، الیاف کربنی و چسب به‌صورت مواد مرکب^۲ تعریف شدند به‌طوری‌که ۸ لایه در نظر گرفته شد که از این میان ۴ لایه برای چسب و ۴ لایه برای الیاف کربنی است (بر اساس دستورالعمل کارخانه مجموع ضخامت یک‌لایه الیاف کربنی و چسب باید یک میلی‌متر باشد [۲۱])، که با توجه به ضخامت ۰/۱۲۹ میلی‌متر برای الیاف کربنی، ضخامت ۰/۸۷۱ میلی‌متر برای الیاف چسب مدل‌سازی شد. ضخامت‌های لایه‌ی کربنی و چسب در جدول ۲ موجود است. برای الیاف کربنی لایه اول و سوم با زاویه صفر درجه و برای لایه‌های دوم و چهارم زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. با این

¹ Solid

² Composite

روش لایه‌ها یکی در میان به‌صورت طولی و عرضی مدل شدند، درواقع به دلیل ضریب ارتجاعی پایین در جهت عرضی، در آزمایشگاه نیز الیاف به‌صورت یکی در میان طولی و عرضی نصب شدند. درنهایت از قید Tie برای نصب چسب و الیاف بر روی ستون استفاده شد. در نرم‌افزار آباکوس روش‌های مختلفی برای اتصال چند قطعه به یکدیگر وجود دارد که استفاده از قید Tie در مطالعه‌ی قائم‌دوست و همکاران [۱۷] و کریمیان و همکاران [۱۸] برای نصب الیاف کربنی بر روی عضو فولادی در نرم‌افزار استفاده شده است. استفاده از قید Tie، نه‌تنها باعث اتصال مناسبی بین لایه‌ی چسب و الیاف بر روی عضو فولادی شد بلکه تغییر شکل‌های به وجود آمده بر روی الیاف کربنی، تحت بارگذاری فشاری را نزدیک به نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داد.

۴-۳- بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

با توجه به شرایط تکیه‌گاهی ستون‌ها در آزمایشگاه، نمونه‌های مدل شده نیز در دو انتها دارای تکیه‌گاه‌های مفصلی می‌باشند. نحوه‌ی مدل کردن شرایط مرزی در حل مسئله و استحصال نتایج مؤثر است و بایستی تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد و بار ۱۰۰۰ کیلونیوتنی به‌صورت فشار محوری بر سطح مقطع عضو وارد گردید.

۴-۴- ایجاد نقص در نمونه‌ها

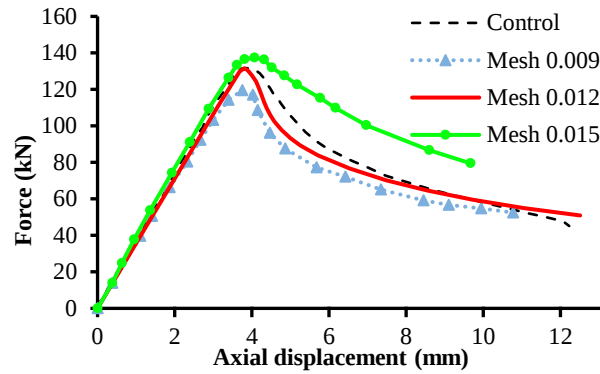
برای ایجاد خوردگی در مدل‌های نرم‌افزاری، از ابعاد آسیب نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. به‌این‌ترتیب در نمونه‌های آسیب‌دیده، آسیب دایروی شکل به قطر ۸۰ میلی‌متر اعمال شد که برای آسیب ۵۰٪ با توجه به همین نسبت از ضخامت محل خوردگی کاسته شد و در آسیب ۱۰۰٪ یک حفره به قطر ناحیه آسیب در ستون ایجاد شد. به دلیل آن‌که خوردگی علاوه بر هندسه‌ی مقطع، بر خواص مواد قسمت آسیب‌دیده تأثیر می‌گذارد و دارای تنش تسلیم کمتری است در مدل‌سازی از مقدار میانگین خواص که در جدول ۱ ارائه شده است استفاده شد. همچنین به دلیل آن‌که هیچ قطعه‌ای به شکل صاف و کاملی که در نرم‌افزار مدل می‌شود ساخته نمی‌شود و وجود این ناکاملی‌ها باعث بروز پدیده کمانش در عضو می‌شود، برای ایجاد اندکی تغییر شکل جزئی در مدل‌ها از دستور ناکاملی^۱ در نرم‌افزار استفاده شد.

در نرم‌افزار از تحلیل غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد همراه با ناکاملی برای مدل‌سازی استفاده شد و دو نوع ناکاملی کلی و موضعی به نمونه‌ها اعمال شدند. برای اعمال ناکاملی در نمونه‌ها، ابتدا مدل‌ها تحت تحلیل کمانشی قرار گرفتند و حالت‌های کمانش محاسبه شد، سپس دو مد کمانش اولیه، به‌صورت ناکاملی کلی و موضعی به مدل اعمال شد. تعیین ناکاملی با استفاده از مطالعه هدایت و همکاران انجام گرفت [۲۴] و مقدار $L/1200$ به‌عنوان ناکاملی کلی و ۵٪ از ضخامت جداره به‌عنوان ناکاملی موضعی در تحلیل مدل‌ها استفاده شد، سپس نمونه‌ها تحت آنالیز ریکس تحلیل شدند.

۴-۵- راستی آزمایشی نتایج

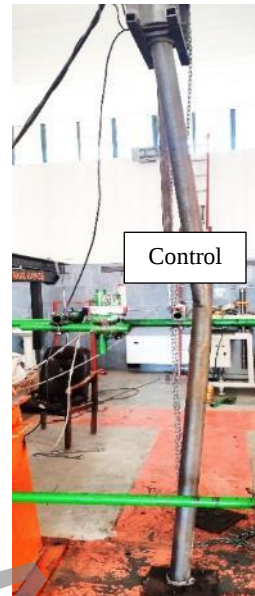
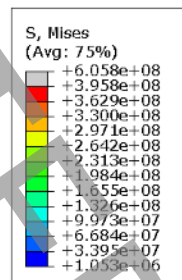
شبیه‌سازی نرم‌افزاری و آزمایشگاهی به‌منظور تعیین مناسب‌ترین ارتباط بین تنش- کرنش انجام گردید و هدف مشاهده تغییر شکل، بار نهایی و شکست مانند نمونه آزمایشگاهی بود. به جهت کنترل و انتخاب بهترین اندازه شبکه در نرم‌افزار چند نمونه شبکه با اندازه‌های ۱۵، ۱۲ و ۹ میلی‌متر امتحان شدند و بهترین اندازه‌ی شبکه برای عضو فولادی، الیاف CFRP و چسب انتخاب شد. نتایج مدل‌سازی با اندازه‌ی شبکه ۱۲ میلی‌متر با نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بود و این اندازه‌ی شبکه برای سایر نمونه‌ها از این نوع ستون استفاده شد. لازم به ذکر است استفاده از شبکه با اندازه‌ی کوچک‌تر از ۹ میلی‌متر ضمن بالا بردن بسیار زیاد زمان تحلیل از انطباق کافی نسبت به اندازه‌ی شبکه ۱۲ میلی‌متر برخوردار نبود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود شبکه‌بندی تأثیر قابل‌توجهی بر نمودار نیرو-تغییر مکان داشت و اندازه‌ی شبکه‌ی ۱۲ میلی‌متر انطباق خوبی با نمونه‌ی آزمایشگاهی دارد. مقایسه‌ی حالت کمانش نمونه‌ی کنترل به‌صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری انجام‌شده در این تحقیق در شکل ۱۰ نشان داده شده است، همچنین نمودار صحت سنجی نسبت نیرو به تغییر مکان محوری نمونه‌های با آسیب ۱۰۰٪ در میانه و ستون مقاوم‌سازی شده در شکل ۱۱ قابل‌مشاهده است.

¹ Imperfection



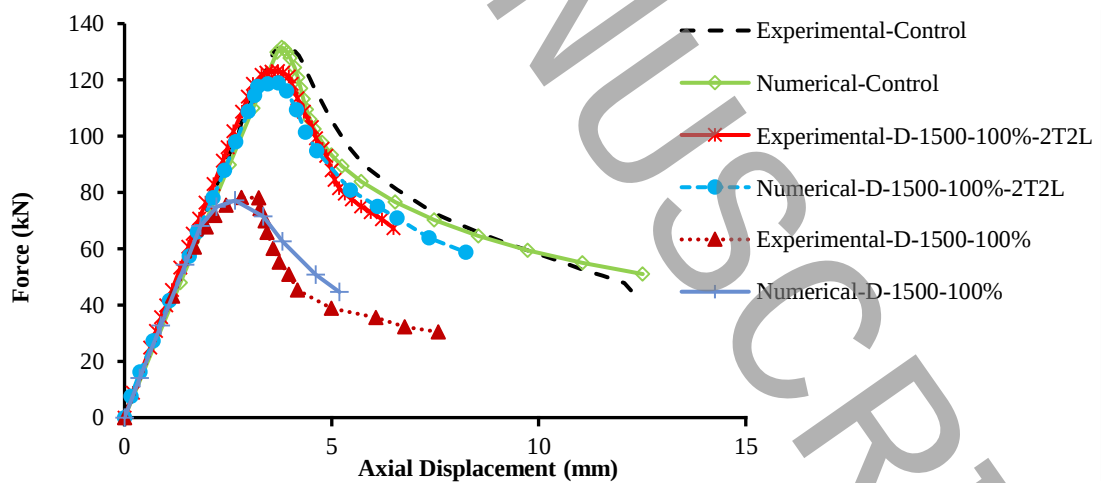
شکل ۹: نتایج مقایسه اندازه شبکه‌بندی ستون فولادی (ستون شاهد) با نتایج آزمایشگاهی

Fig. 9. Results of comparing the mesh sizes for control column



شکل ۱۰: کمانش کلی نمونه شاهد، انجام شده به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی در این تحقیق

Fig. 10. Global buckling of the control column, performed experimentally and modeling in this study



شکل ۱۱: نمودار صحت سنجی نسبت نیرو به تغییر مکان محوری نمونه‌های نرم‌افزاری با نتایج آزمایشگاهی برای ستون شاهد، ستون با آسیب ۱۰۰٪ در میانه و ستون مقاوم‌سازی شده

Fig. 11. Validity diagram of force to axial displacement of numerical and experimental cases, column with 100% damage in the middle and strengthened column

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

برای تحلیل مدل‌ها و مقایسه نتایج از مدل شاهد استفاده شد. بررسی‌ها مبتنی بر مقایسه نمودار نیرو- تغییر مکان قائم ستون دایروی شکل است و هدف بررسی اثر آسیب، وضعیت و محل آن و پوشش CFRP بر ظرفیت تحمل ستون دایروی شکل است. لازم به ذکر است نمونه شاهد فاقد آسیب دیدگی و بدون پوشش CFRP است. جدول ۴ میزان ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۴: مشخصات، موقعیت آسیب و ظرفیت باربری نمونه‌ها

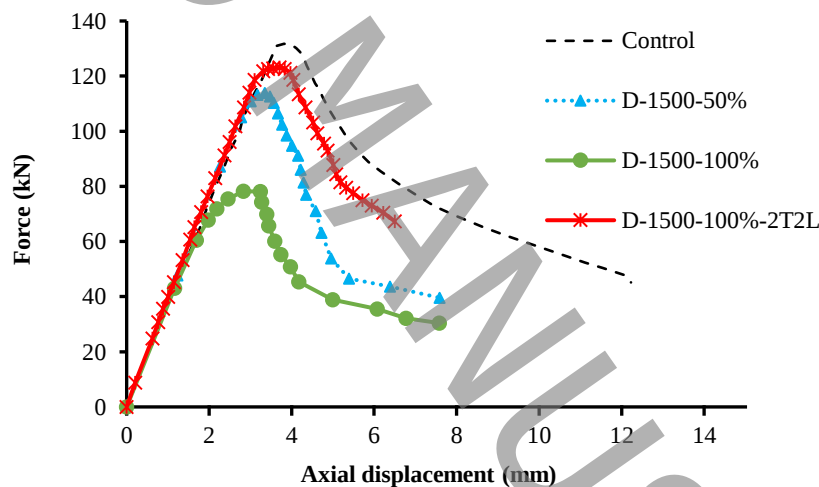
Table 4. Specifications, damage location and load bearing capacity of the specimens

شماره	نمونه	خوردگی		طول الیاف	ظرفیت باربری			
					نمونه‌های آزمایشگاهی		نمونه‌های نرم‌افزاری	
		درصد خوردگی	موقعیت		CFRP (میلی‌متر)	مقدار بار (کیلو نیوتن)	افزایش یا کاهش (%)	مقدار بار (کیلو نیوتن)
۱	Control	ندارد	ندارد	ندارد	۱۳۲/۰۲	-	۱۳۰/۱	-
۲	D-90-50%	۵۰	نزدیک تکیه‌گاه	-	-	-	۱۲۲	-۶/۲۲
۳	D-90-100%	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	-	۱۰۳/۴	-۲۱/۶۷	۱۰۴	-۲۰
۴	D-90-100%-2T2L	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	۲۰۰	۱۲۷/۱	-۳/۸	۱۲۵/۱	-۳/۸۱
۵	D-750-50%	۵۰	L/4 طول ستون	-	-	-	۱۱۸	-۹/۲
۶	D-750-100%	۱۰۰	L/4 طول ستون	-	-	-	۹۱/۶	-۲۹/۵
۷	D-750-100%-2T2L	۱۰۰	L/4 طول ستون	۲۰۰	-	-	۱۲۳	-۴/۶
۸	D-1500-50%	۵۰	میانه ستون	-	۱۱۳/۹	-۱۳/۷	۱۱۴	-۱۲/۳
۹	D-1500-50%-1T1L	۵۰	میانه ستون	۲۰۰	-	-	۱۲۵	-۳/۸
۱۰	D-1500-100%	۱۰۰	میانه ستون	-	۷۸/۲	-۴۰/۷	۸۰/۰۱	-۳۸/۵
۱۱	D-1500-100%-1T1L	۱۰۰	میانه ستون	۲۰۰	-	-	۹۸/۰۲	-۲۴/۶
۱۲	D-1500-100%-2T2L	۱۰۰	میانه ستون	۲۰۰	۱۲۳/۴	-۶/۸	۱۲۰	-۷/۷
۱۳	D-1500-100%-2T2L	۱۰۰	میانه ستون	۴۰۰	-	-	۱۳۸/۹	+۶/۷
۱۴	D-2250-50%	۵۰	3L/4 طول ستون	-	-	-	۱۱۶/۸	-۱۰
۱۵	D-2250-100%	۱۰۰	3L/4 طول ستون	-	-	-	۹۲	-۲۹
۱۶	D-2250-100%-2T2L	۱۰۰	3L/4 طول ستون	۲۰۰	-	-	۱۲۲/۴	-۵/۸
۱۷	D-2910-50%	۵۰	نزدیک نقطه بارگذاری	-	-	-	۱۲۱	-۶/۹
۱۸	D-2910-100%	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	-	-	-	۱۰۳/۴	-۲۰
۱۹	D-2910-100%-2T2L	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	۲۰۰	-	-	۱۲۶	-۳

۵-۱- بررسی ظرفیت باربری نمونه‌ها

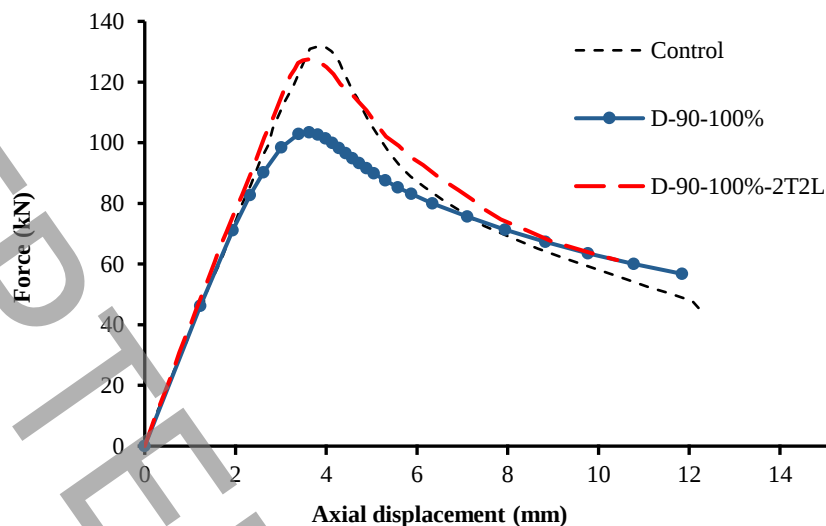
نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ۶ نمونه ستون آزمایش شده در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است و جزئیات آن‌ها به همراه حداکثر ظرفیت تحمل بار آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. برای بررسی اثرات آسیب، خوردگی به صورت ۵۰٪ و ۱۰۰٪، در طول ارتفاع به ستون‌ها اعمال شد. در خوردگی ۵۰٪، از ضخامت ناحیه‌ی خورده شده حدود یک میلی‌متر کم شد و ظرفیت باربری برای ستون با آسیب میانه ۱۳/۷ درصد و در تکیه‌گاه ۶/۲۲ درصد کاهش یافت که نشان می‌دهد ظرفیت باربری هرچه آسیب به میانه ستون نزدیک‌تر باشد کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. برای آسیب ۱۰۰٪، سطح ناحیه آسیب‌دیده کاملاً تخریب شد به این جهت کاهش ظرفیت باربری برای آسیب در میانه ستون ۴۰٪ و برای آسیب نزدیک به تکیه‌گاه ۲۱٪ بود. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که خوردگی در میانه ستون مخرب‌تر است و تأثیر بیشتری در کاهش ظرفیت باربری نسبت به آسیب در تکیه‌گاه دارد. یکی از دلایل شدت کاهش در ستون‌های دارای آسیب‌دیدگی در میانه ستون، واقع شدن کمانش کلی و موضعی حاصل از خوردگی در یک ناحیه (میانه ستون) است. همچنین وجود خوردگی سختی ستون را کاهش می‌دهد و هرچه به میانه ستون نزدیک‌تر باشد ستون با کاهش ناگهانی در ظرفیت باربری روبرو است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشهود است نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای عضو دارای آسیب در میانه، دچار کاهش ناگهانی شده است.

استفاده از لایه‌های CFRP جهت تقویت ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری، کاهش کمانش موضعی و تأخیر در رخ دادن این کمانش شد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تأثیر الیاف بر عضو فشاری دارای خوردگی نشان داده شده است. استفاده از الیاف برای ستون D-901-100%-2T2L ظرفیت باربری را نسبت به نمونه بدون مقاوم‌سازی تا ۴۷٪ افزایش داد و این مقدار برای ستون با آسیب میانه و خوردگی ۱۰۰٪، برابر با ۳۳٪ بود. در نمودارهای نیرو به تغییر مکان می‌توان به خوبی تأثیر استفاده از الیاف CFRP جهت مقاوم‌سازی نمونه‌های دارای خوردگی را در افزایش ظرفیت باربری مشاهده نمود.



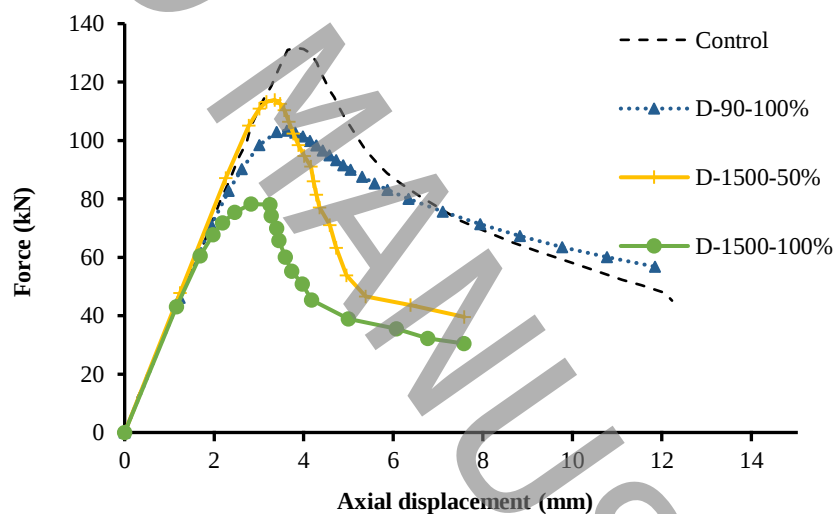
شکل ۱۲: نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ستون‌های دارای خوردگی در میانه ستون

Fig. 12. Force to axial displacement for corroded columns at the middle of the column



شکل ۱۳: نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ستون‌های دارای خوردگی در پایه ستون

Fig. 13. Force to axial displacement for corroded columns at the base of the column



شکل ۱۴: مقایسه نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ستون‌های دارای خوردگی در میانه نسبت به خوردگی در نزدیک تکیه‌گاه

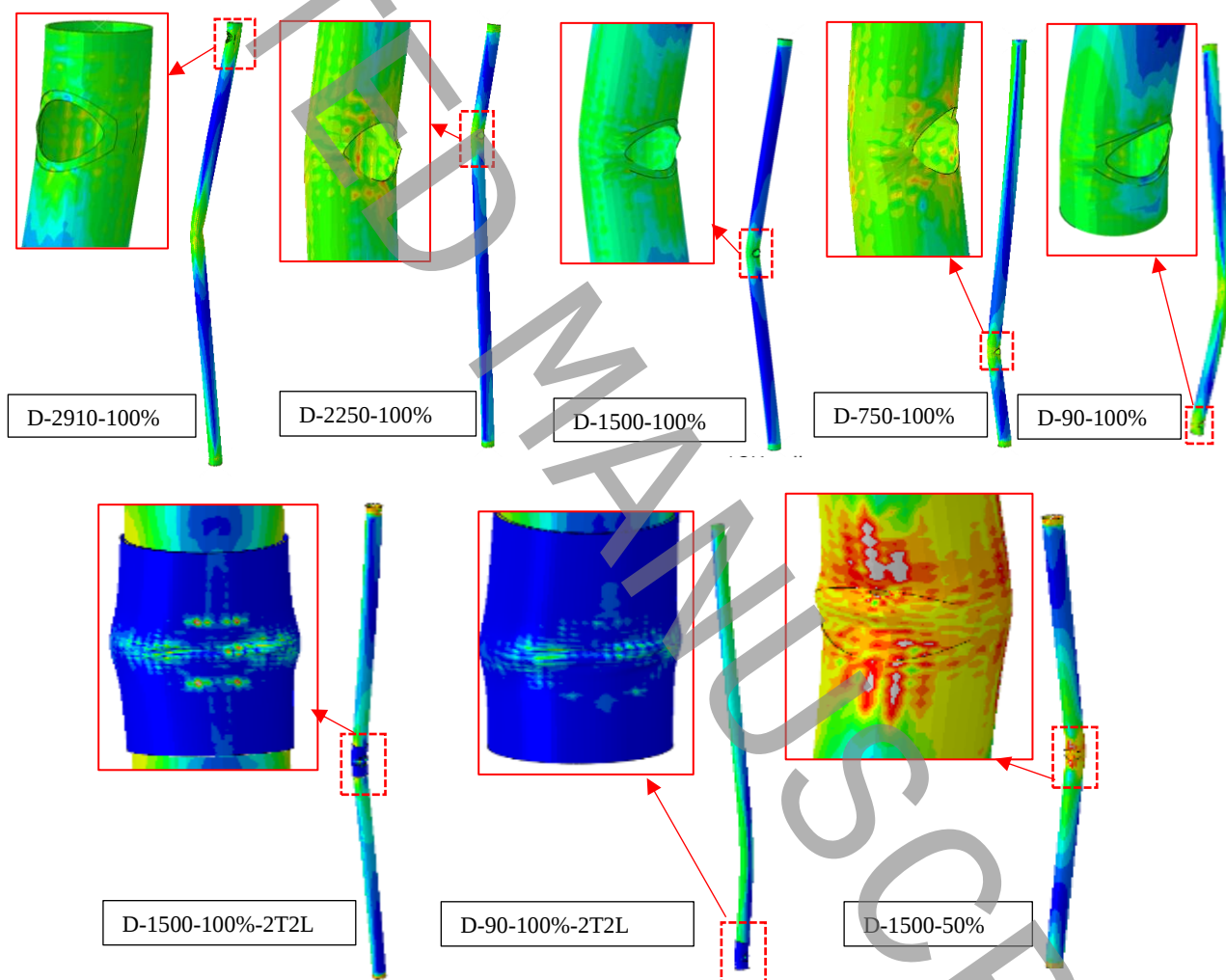
Fig. 14. Force to axial displacement for corroded columns in the middle campane to the corrosion near to the support

۲-۵- حالت‌های شکست نمونه‌ها

حالت‌های شکست ستون‌های انجام‌شده در این تحقیق در شکل‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. بررسی آزمایشگاهی و نرم‌افزاری ستون‌ها تحت بارگذاری فشاری تا رسیدن به کرنش پلاستیک و ظرفیت باربری نهایی انجام شد. نتایج نشان داد که شکست اولیه در ستون شاهد، کمانش کلی در میانه ستون بود. در ابتدای بارگذاری، ستون تمایل به کمانش کلی در طول ستون داشت و با ادامه بارگذاری و ورود به ناحیه پلاستیکی، ستون دچار خرابی ثانویه به شکل کمانش موضعی در میانه ستون شد (شکل ۱۰). در ستون D-

1500-50% پس از کماتش کلی، به دلیل کاهش ضخامت و سختی ستون در ناحیه آسیب‌دیده، کماتش موضعی در این ناحیه به شکل مچاله شدن مشاهده شد (شکل ۱۵ و ۱۶). برای ستون D-1500-100%، از آنجاکه افزایش خوردگی باعث تخریب ناحیه آسیب‌دیده شد، خرابی سریع‌تر اتفاق افتد و ناحیه آسیب‌دیده تحت بار فشاری به شکل جمع شدگی لبه‌های آسیب مشاهده شد (شکل ۱۷-الف). قابل ذکر است که کماتش کلی برای همه ستون‌های آسیب‌دیده به جز آن‌هایی که آسیب نزدیک تکیه‌گاه دارند در جهت ناحیه آسیب‌دیده به وجود آمد در حالی که ستون‌ها با آسیب نزدیک تکیه‌گاه در جهت خلاف ناحیه آسیب‌دیده دچار کماتش شدند (شکل ۱۸).

برای ستون‌های مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، بارگذاری فشاری منجر به تغییر شکل موضعی در ناحیه خوردگی شد که سبب افزایش تنش‌ها در الیاف CFRP گردید. در ستون‌های D-90-100%-2T2L و D-1500-100%-2T2L از طول ۲۰۰ میلی‌متر الیاف CFRP برای مقاوم‌سازی استفاده شد. استفاده از الیاف، میزان تنش‌ها در ناحیه آسیب‌دیده را کاهش داد و کماتش موضعی را در ناحیه خوردگی به تأخیر انداخت. حالت شکست برای ستون‌های مقاوم‌سازی شده به صورت کماتش کلی در طول ستون و بارگی الیاف بود. شکل‌های ۱۵، ۱۷-ب و ۱۸ حالت شکست لایه‌های CFRP در ناحیه آسیب‌دیده را نشان می‌دهند.

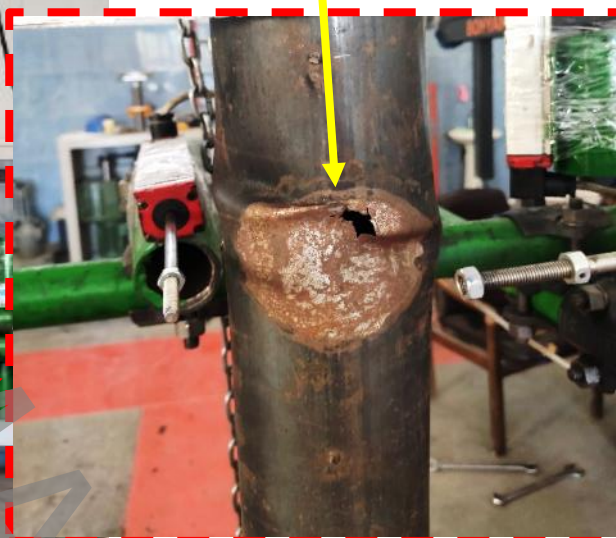


شکل ۱۵: کماتش کلی و موضعی برای ستون‌های مدل‌سازی شده

Fig. 15. Global and local buckling for modeled columns



به وجود آمدن کمانش موضعی به شکل
چین خوردگی در میانه ستون در خوردگی ۵۰٪



شکل ۱۶: حالت کمانش ستون با خوردگی ۵۰٪ در میانه انجام شده به صورت آزمایشگاهی
Fig. 16. Failure buckling for column with 50% corrosion at the middle



شکل ۱۷: حالت شکست ستون‌های انجام شده به صورت آزمایشگاهی و آسیب در میانه: الف) با آسیب ۱۰۰٪ و بدون مقاوم‌سازی، ب) با آسیب ۱۰۰٪ و مقاوم‌سازی شده با ۴ لایه الیاف کربنی

Fig. 17. Failure modes of the columns with corrosion at the middle: a) with 100% damage and unstrengthened, b) with 100% damage and strengthened with 4 layers of CFRP



شکل ۱۸: حالت شکست ستون‌های انجام‌شده در آزمایشگاه و دارای آسیب در پایه
Fig. 18. Failure modes of the columns with damage at the base

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایشگاه و مدل‌سازی به تحلیل و بررسی اثر آسیب بر ظرفیت باربری و گسیختگی ستون خورده‌شده پرداخته شد و در ادامه برای مقاوم‌سازی ستون‌های دایروی شکل آسیب‌دیده از دو و چهار لایه الیاف کربنی استفاده شد. خوردگی به صورت ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به نمونه‌ها اعمال شد. در خوردگی ۱۰۰٪، کل ناحیه موردنظر دچار تخریب شد و در درجه خوردگی ۵۰٪، ضخامت ناحیه آسیب به اندازه یک میلی‌متر کاهش یافت. در همه ستون‌ها پس از اعمال بارگذاری، کماتش کلی در طول ستون اتفاق افتاد در ستون با خوردگی ۵۰٪، کماتش موضعی به صورت مجاله شدن ناحیه آسیب مشاهده شد درحالی‌که برای درجات بالاتر

خوردگی که ضخامت ناحیه آسیب دچار تخریب شده است، ناحیه آسیب دیده دچار جمع شدگی گردید و در دو لبه‌ی کناری ناحیه موردنظر کمانش به صورت بیرون آمدگی اتفاق افتاد. نتایج همچنین نشان داد که در درجات بالای خوردگی، زمانی که کل ناحیه آسیب دیده تخریب می شود کاهش بار نهایی به طور ناگهانی اتفاق می افتد و موقعیت و مکان آسیب به خصوص اگر میانه ستون باشد بر مقدار کاهش ظرفیت باربری بسیار تأثیرگذار است. شاید بتوان یکی از دلایل مقدار کاهش بیشتر در میانه را با واقع شدن کمانش کلی و موضعی در یک ناحیه توجیه نمود. همچنین باید توجه کرد که خوردگی ضریب ارتجاعی و سطح مقطع ستون را تحت تأثیر قرار می دهد که باعث جابجایی مرکزیت گرانش شده و باعث مقدار لنگر بیشتر برای میانه ستون می شود. خوردگی نه تنها باعث کاهش ظرفیت بار نهایی می شود بلکه بر عملکرد سازه‌ای ستون نیز تأثیرگذار است. استفاده از الیاف CFRP باعث تأخیر در وقوع کمانش موضعی ستون می شود و با ضریب ارتجاعی بالایی که دارند سطح مقطع تخریب شده را پوشش می دهند که در نهایت عملکرد ستون به طور قابل ملاحظه بهبود می یابد.

فهرست مراجع

- [1] G. Malumbela, M. Alexander, P. Moyo, Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load, *Construction and Building Materials*, 24(6) (2010) 1051-1059.
- [2] Y. Ballim, J.C. Reid, Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams—an experimental critique of current test methods, *Cement and Concrete Composites*, 25(6) (2003) 625-632.
- [3] Y. Xu, H. Tang, J. Chen, Y. Jia, R. Liu, Numerical analysis of CFRP-confined concrete-filled stainless steel tubular stub columns under axial compression, *Journal of Building Engineering*, 37 (2021) 102130.
- [4] M. Sundararaja, S. Sivasankar, Behaviour of CFRP jacketed HSS tubular columns under compression an experimental investigation, *Journal of Structural Engineering*, 39(5) (2013) 574-582.
- [5] K.A. Harries, A.J. Peck, E.J. Abraham, Enhancing stability of structural steel sections using FRP, *Thin-walled structures*, 47(10) (2009) 1092-1101.
- [6] G.G. Prabhu, M. Sundararaja, Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) short columns externally reinforced using CFRP strips composite, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1362-1371.
- [7] H. Jiao, X.-L. Zhao, CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes, *Thin-walled structures*, 42(7) (2004) 963-978.
- [8] Z. Tao, L.-H. Han, J.-P. Zhuang, Using CFRP to strengthen concrete-filled steel tubular columns: stub column tests, in: *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, Elsevier, 2005, pp. 701-706.
- [9] J. Haedir, X.-L. Zhao, Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3) (2011) 497-509.
- [10] S. Sivasankar, T. Thilakranjith, M. Sundararaja, Axial Behavior of CFRP Jacketed HSS Tubular Members-An Experimental Investigation, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 61(413) (2012) 1729-1737.
- [11] D. He, J. Dong, Q. Wang, X. Chen, Mechanical behaviour of recycled concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP, in: *2011 International Conference on Multimedia Technology*, IEEE, 2011, pp. 1110-1113.
- [12] S. Kalavagunta, S. Naganathan, K.N.B. Mustapha, Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections, *Thin-Walled Structures*, 72 (2013) 14-19.
- [13] M. Shahraki, M.R. sohrabi, G. Azizian, K. Narmashiri, Reliability Assessment of CFRP-Strengthened Deficient Steel SHS Columns %J *AUT Journal of Civil Engineering*, 3(1) (2019) 23-36.
- [14] A.H. Keykha, Structural performance evaluation of deficient steel members strengthened using CFRP under combined tensile, torsional and lateral loading, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100746.

- [15] Y.-H. Wang, Y.-Y. Wang, X.-H. Zhou, R. Deng, Y.-S. Lan, W. Luo, P. Li, Q.-S. Yang, K. Ke, Coupled ultimate capacity of CFRP confined concrete-filled steel tube columns under compression-bending-torsion load, *Structures*, 31 (2021) 558-575.
- [16] O. Yousefi, K. Narmashiri, M.R. Ghaemdoost, Structural behaviors of notched steel beams strengthened using CFRP strips, *Steel and Composite Structures*, 25(1) (2017) 35-43.
- [17] M.R. Ghaemdoost, K. Narmashiri, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 1002-1011.
- [18] M. Karimian, K. Narmashiri, M. Shahraki, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 138 (2017) 555-564.
- [19] O. Yousefi, K. Narmashiri, A.A. Hedayat, A. Karbakhsh, Strengthening of corroded steel CHS columns under axial compressive loads using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 178 (2021) 106496.
- [20] F. Schué, FRP: strengthened RC structures. JG Teng, JF Chen, ST Smith and L Lam. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2001. pp 245, ISBN 0-471-48706-6, 53(2) (2004) 232-233.
- [21] S.J.S.I. SikaWrap®-230 C, India, Product Data Sheet, (2019).
- [22] S.J.S.D. Sikadur, Ireland, 30 Product Data Sheet, (2017).
- [23] M. Secer, E.T. Uzun, Corrosion Damage Analysis of Steel Frames Considering Lateral Torsional Buckling, *Procedia Engineering*, 171 (2017) 1234-1241.
- [24] A.A. Hedayat, Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 30-50.

Compressive strengthening of steel columns with local corrosion using CFRP

Omid Yousefi ¹, Amir Ahmad Hedayat ^{2,3*}, Kambiz Narmashiri ⁴, Ali Karbakhsh⁵

¹ Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

² Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

³ Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran

⁴ Department of Civil Engineering, Zahedan Branch, Islamic Azad University, Zahedan, Iran

⁵ Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

*Corresponding author: Amir Ahmad Hedayat

Email address: Amirahmad1356@yahoo.com

ABSTRACT

Steel structures are damaged for a variety of reasons including accidental loads, corrosion and reduced strength which need to be repaired and improved. In this investigation, local corrosion was applied to the steel circular columns and the effects of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) for strengthening has been studied. 19 specimens of steel Circular Hollow Section (CHS) column with the same height and damage dimensions under compressive load were analyzed by ABAQUS software which six cases of them were performed experimentally. In laboratory cases, progressive corrosion was used to create damage on the specimens. In order to improve the accuracy of the analysis, a combined method was used to study the post-buckling of the plastic zone. For this purpose, the specimens were first subjected to elastic buckling analysis and then Riks non-linear analysis with global and local imperfections was conducted. The results showed that the corrosion reduces the bearing capacity and rigidity of the steel columns and complete destruction of the corroded area reduced the load bearing capacity by 40% for the column with corrosion at the middle and by 21% for the damage close to the base, which shows the former is more critical. Strengthening of columns retrofitted with carbon fibers restored ultimate load reduction by 33% and have a positive effect on controlling fractures and reducing stresses at the damaged area.

Keywords

Strengthening, Corrosion, Steel column, Column buckling, CFRP