

مقاوم سازی ستون های دایره ای فولادی آسیب دیده با استفاده از CFRP

امید یوسفی^{۱*}، امیراحمد هدایت^۲، کامبیز نرماشیری^۳، علی کاربخش^۴، امین شبانی عماري^۵

- ۱- استادیار گروه عمران، واحد نیکشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نیکشهر، ایران
 - ۲- دانشیار گروه عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران
 - ۳- دانشیار گروه عمران، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران
 - ۴- استادیار گروه سیرجان، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران
 - ۵- کارشناسی ارشد گروه عمران، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران
- Omid.yousefi88@gmail.com

تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۰۹

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

چکیده

بیشتر اعضای سازه هایی که عمر مفید آن ها سپری شده است نیاز به تعمیر دارند، این اعضا ممکن است توسط عوامل مختلف آسیب ببینند که با توجه به هزینه بالای بازسازی، بخش عمده ای از بودجه عمرانی کشورهای پیشرفته، سالانه صرف ترمیم و بازسازی این سازه ها می شود. اعضای فشاری مانند ستون ها یکی از مهم ترین اجزای سازه هستند که در تحمل و انتقال کلیه بارهای عمودی و جانبی ساختمان نقش اساسی دارند. به طور کلی، هیچ ستونی نمی تواند به اندازه تمام ظرفیت خود تحمل کند و تحت کماتش دچار شکست می شود، در نتیجه بسیاری از پژوهشگران علاقه مند به مقاوم سازی و افزایش مقاومت ستون با استفاده از مواد و روش های جدید هستند. در این پژوهش ستون های دایره ای شکل فولادی با آسیب اولیه به صورت عمودی یا افقی با درصد های مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ بررسی شدند و تأثیر استفاده از الیاف پلیمری تقویت شده به فیبر کربن (Carbon Fiber Reinforced Polymer) برای مقاوم سازی مطالعه شد. تعداد ۲۶ نمونه ستون دایره ای شکل فولادی با ارتفاع یکسان و ابعاد آسیب متفاوت تحت بار فشاری توسط نرم افزار آباکوس (ABAQUS)، تحلیل شدند. عمده مشکل ستون های لاغر، کماتش کلی (Global Buckling) تحت بارهای فشاری است. برای افزایش دقت تحلیل از روش ترکیبی برای مطالعه کماتش های ناحیه خمیری بعد از کماتش اولیه استفاده شد. به این ترتیب ابتدا نمونه ها تحت تحلیل کماتشی قرار گرفتند و در ادامه از روش تحلیل غیرخطی ریکس (Riks) با در نظر گرفتن ناکاملی (Imperfection) به صورت کلی و موضعی برای تحلیل نمونه ها استفاده شد. نتایج نشان داد که ستون آسیب دیده دچار کاهش ظرفیت باربری و سختی شد، همچنین شکل آسیب نسبت به شکل عمودی در کاهش باربری نهایی مؤثرتر بود و توانست ظرفیت باربری را در آسیب ۱۰۰ درصدی تا ۵۲٪ کاهش دهد که این میزان کاهش نشان داد که هر اندازه که طول محیط ستون بیشتر آسیب ببیند شدت کاهش باربری نهایی بیشتر است. همچنین نتایج نشان دادند که حالت بحرانی زمانی است که کل ناحیه آسیب دیده دچار تخریب ۱۰۰ درصدی شود به طوری که تأثیر آسیب با درصد های کمتر از ۲۵ درصد حداکثر ۲/۶۶ درصد بود. حالت شکست در ستون لاغر به صورت کماتش کلی و موضعی اتفاق افتاد که همه ستون ها کماتش کلی را به شکل خم شدن ستون تجربه کردند ولی کماتش موضعی با توجه به نوع آسیب متفاوت بود. برای ستون بدون آسیب، حالت شکست، کماتش کلی با تمرکز در میانه ستون بود؛ در ستون با آسیب افقی ۱۰۰ درصد، ناحیه آسیب دیده دچار جمع شدگی شد و ستون با آسیب عمودی حالت شکست را به صورت بازشدگی ناحیه نقص تجربه کرد. در نمونه های با درصد آسیب کمتر، کماتش موضعی برای آسیب افقی به شکل تورفتگی مقطع در میانه ستون و برای آسیب عمودی به شکل بیرون آمدگی اتفاق افتاد. مقاوم سازی ستون ها با الیاف کربنی نشان داد که این الیاف تأثیر مناسبی در افزایش مقاومت، کنترل گسیختگی و کاهش تنش ها در محل آسیب دیده دارند و مقاوم سازی با ۴ لایه الیاف CFRP برای نمونه های آسیب دیده، توانست مقدار کاهش بار نهایی را تا ۵۱٪ جبران نماید که نشان از عملکرد مناسب این الیاف در مقاوم سازی دارد.

واژگان کلیدی: مقاوم سازی، ستون آسیب دیده، ستون فولادی، کماتش ستون، CFRP

۱- مقدمه

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 هزینه‌ی زیادی می‌طلبد مقاوم‌سازی یک راه‌حل قابل قبول برای بهبود ظرفیت تحمل بار و افزایش عمر بهره‌برداری است. استفاده از الیاف کربنی با اتصال چسبنده به عنوان یک ماده تقویت‌کننده خارجی برای بازیابی مقاومت ستون‌های فولادی در دهه‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است که بیشتر به دلیل نسبت مقاومت بالا به وزن، مقاومت در برابر خوردگی استثنایی و به ویژه مقاومت کششی زیاد این الیاف است.

جیو و ژائو (۲۰۰۴)، از CFRP برای تقویت و مقاوم‌سازی لوله‌ی فولادی در زردار که درز آن‌ها لب‌به‌لب جوش شده بود استفاده کردند، آن‌ها دریافتند که مقاومت کششی این لوله‌ها بین ۲۵٪ تا ۷۶٪ افزایش می‌یابد [1]. شت و فام (۲۰۰۶)، در مطالعه‌ای که روی مقاوم‌سازی ستون‌های کوتاه با الیاف CFRP انجام دادند، دریافتند که لایه‌های عرضی در محدود کردن کمانش موضعی بیرونی ستون تأثیر بیشتری دارند و مقاوم‌سازی ظرفیت باربری ستون کوتاه را تا ۱۸٪ و اعضای بلند را بین ۱۳٪ تا ۲۳٪ افزایش می‌دهد [2]. جائو و همکاران (۲۰۱۳)، لوله‌های توخالی فولادی را با ورق‌های CFRP تقویت کردند، آن‌ها دریافتند که تعداد لایه‌های استفاده شده، در افزایش مقاومت و سختی لوله‌ها مؤثر است [3]. هی و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی رفتار ستون دایروی فولادی پر شده با بتن معمولی، بتن بازیافتی و مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت فشار پرداختند. تعداد ۱۰ ستون دایروی مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن به صورت آزمایشگاهی مطالعه شدند، بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از CFRP برای مقاوم‌سازی باعث بالا رفتن ظرفیت فشاری و بار کمانش می‌شود و استفاده از این الیاف به صورت نیمه دورپیچ دارای کرنش فشاری محوری کمتر نسبت به دورپیچ کامل است [4]. ژو و همکاران (۲۰۲۱)، استفاده از الیاف CFRP برای مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی دایروی شکل پر شده با بتن را بررسی کردند، در این پژوهش ستون‌ها به صورت نرم‌افزاری تحت بارگذاری فشاری مطالعه شدند و نتایج نشان داد

که استفاده از الیاف CFRP باعث افزایش بار نهایی در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده می‌شود [5]. شهرکی و همکاران (۲۰۱۹)، مطالعه‌ای را روی ستون‌های فلزی دارای نقص انجام دادند آن‌ها از پروفیل قوطی با مقطع 40×40 میلی‌مترمربع 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 آسیب می‌شود [6]. کیخا (۲۰۱۹)، مطالعه‌ای را روی ارزیابی عملکرد سازه‌ای اعضای فولادی قوطی شکل آسیب‌دیده و مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP تحت ترکیب بار خمش، پیچش 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 [7]. ونگ و همکاران (۲۰۲۱)، مطالعه‌ای را روی ستون‌های فولادی دایروی و پر شده با بتن انجام دادند و در این پژوهش ستون‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت ترکیب بار فشاری، خمشی و پیچشی قرار گرفتند و رفتار سازه‌ای و حالت‌های شکست نمونه‌ها بررسی شدند، همچنین رابطه طراحی و تعیین ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها تحت این ترکیب بار ارائه شد [8]. یوسفی و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و نرم‌افزاری، مقاوم‌سازی تیر فولادی با آسیب اولیه به صورت یک‌طرفه و دوطرفه روی بال کششی را بررسی کردند، نتایج نشان داد که آسیب دوطرفه باعث کاهش ظرفیت باربری نسبت به آسیب یک‌طرفه می‌شود و همچنین آسیب یک‌طرفه علاوه بر کاهش باربری نهایی، کمانش کلی تیر را افزایش می‌دهد، مقاوم‌سازی با الیاف کاهش باربری را جبران کرد و در کاهش کمانش تیر نیز مؤثر بود [9]. قائم دوست و همکاران (۲۰۱۶)، پژوهشی را در مورد ستون‌های کوتاه قوطی شکل فولادی با آسیب اولیه انجام دادند که در آن آسیب به صورت افقی و عمودی در گوشه و مرکز ستون در نظر گرفته شد، آن‌ها دریافتند که آسیب گوشه تأثیر بیشتری در کاهش بار نهایی دارد [10]. کریمیان و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه‌ای را در مورد مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی دایروی شکل 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

آسیب ۱۰۰ درصد، کل ناحیه آسیب دیده تخریب شده است. انتخاب ابعاد و شکل آسیب با توجه به مطالعه انجام شده توسط قائم دوست و همکاران (۲۰۱۶) [10] و کریمیان و همکاران (۲۰۱۷) [11] که از شکل آسیب مستطیلی به صورت افقی و عمودی برای ایجاد نقص روی ستون کوتاه استفاده کردند و همچنین انجام تحلیل های اولیه نرم افزاری صورت گرفت.

۲-۱- مشخصات ستون فولادی

ستون دایروی شکل فولادی مطالعه شده، از نوع سرد نورد شده (Cold-Formed)، با ارتفاع ۳۰۸۳ میلی متر، قطر ۱۰۵/۶۷ میلی متر و ضخامت ۲/۷۰ میلی متر است. این مقادیر از مطالعه انجام شده توسط بوچنان و همکاران (۲۰۱۸) [13]، استخراج شده اند. مشخصات هندسی ستون دایره ای شکل توخالی و خواص مواد آن در جدول (۱) ارائه شده است و مشخصات آسیب های افقی و عمودی ایجاد شده به همراه شرایط مرزی ستون در شکل (۱) قابل مشاهده است.

۲-۲- خواص الیاف کربنی

در این پژوهش برای مقاوم سازی ستون ها از الیاف کربنی (SikaWrap®-230 C) [14] با ضریب ارتجاعی ۲۳۸۰۰۰ مگاپاسکال، ضخامت نوار ۰/۱۳۱ میلی متر و نسبت پواسون ۰/۱۲ استفاده شده است. این الیاف به صورت یک جهته (Unidirectional) هستند. منحنی تنش-کرنش این مواد، رفتار کشسان خطی را تا مرحله گسیختگی بدون هیچ نقطه جاری شدن مشخصی را نشان می دهد. ویژگی های الیاف کربنی در جدول (۲) آورده شده است.

۲-۳- خواص چسب

چسب استفاده شده در این مطالعه پیشنهاد شده توسط سازنده الیاف کربنی است. چسبی که معمولاً برای این نوع از الیاف کربنی استفاده می شود چسب سیکادور ۳۳۰ (Sikadur®-330) [15] است. این چسب، ضریب ارتجاعی ۴۵۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۳۰ مگاپاسکال را دارد. خواص چسب از مطالعه انجام شده توسط کریمیان و همکاران (۲۰۱۷) [11] و شرکت سازنده استخراج شده است. در جدول (۲) مشخصات چسب مورد استفاده در این مطالعه آورده شده است.

ستون می شود [11]. یوسفی و همکاران (۲۰۲۱)، پژوهشی را روی ستون های فولادی دایروی شکل خورده شده به صورت آزمایشگاهی و نرم افزاری انجام دادند، آن ها از سیستم خوردگی پیش رونده برای ایجاد آسیب در دو ناحیه میانه و پایه ستون استفاده کردند؛ شکل آسیب ها دایروی با مقطع ثابت به قطر ۸۰ میلی متر بود، آن ها دریافتند که خوردگی باعث کاهش شکل پذیری و اتلاف انرژی در ستون های آسیب دیده می شود [12]. بوچنان و همکاران (۲۰۱۸)، پژوهشی را در مورد کماتش و ضریب لاغری ستون های دایروی شکل سرد نورد شده انجام دادند، در این پژوهش که به صورت نرم افزاری و آزمایشگاهی انجام شد ۵ نوع ستون با سطح مقطع مختلف و طول مختلف بررسی شد و نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شدند [13].

در بیشتر پژوهش های گذشته ستون ها بدون کماتش اولیه مدل سازی شده اند در صورتی که ستون های فولادی هنگام ساخت و حمل و نقل دچار کماتش می شوند. با توجه به اینکه کماتش کلی و موضعی تأثیر قابل توجهی در تعیین باربری نهایی ستون ها دارد، استفاده از روشی که به توان این کماتش ها را قبل از تحلیل نمونه ها اعمال نمود از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین عضو فولادی به دلایل مختلف می تواند دچار آسیب شود که به صورت خرابی بخش یا قسمتی از سطح عضو دیده می شود. در این پژوهش ناکاملی حاصل از کماتش های اولیه، پیش از تحلیل به نمونه ها اعمال شد و همچنین ابعاد مختلف آسیب با درصد های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ روی ستون ها مطالعه شد؛ در نهایت تأثیر استفاده از الیاف CFRP برای مقاوم سازی ستون ها بررسی شد.

۲- مشخصات مصالح و نمونه ها

در این پژوهش به منظور بررسی درصد آسیب و روش های مقاوم سازی، ۲۶ نمونه ستون تحت بار محوری استاتیکی مطالعه شدند. نمونه بدون آسیب به عنوان نمونه شاهد و ۲۵ نمونه ستون دارای درصد مختلف آسیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ به شکل های افقی و عمودی، که برخی از آن ها توسط الیاف کربنی مقاوم سازی شده اند بررسی شدند؛ در آسیب ۲۵ درصد، ضخامت سطح به اندازه ۲۵ درصد نسبت به ضخامت سطح سالم کاهش یافته است و در

جدول ۱. ابعاد و خواص ستون فولادی دایره‌ای شکل توخالی

D (mm)	t (mm)	L (mm)	λ	$L/(\omega_0 + e_0)$	E (N/mm ²)	F _y (N/mm ²)	F _u (N/mm ²)	ϵ_r %
105.67	2.70	3083.0	71.1	1044	226,600	250	614	59.0

Table 1. Dimensions and properties of CHS column

شکل ۱. جزئیات هندسی ستون مقاوم‌سازی شده و بدون مقاوم‌سازی با آسیب افقی و عمودی به همراه شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری

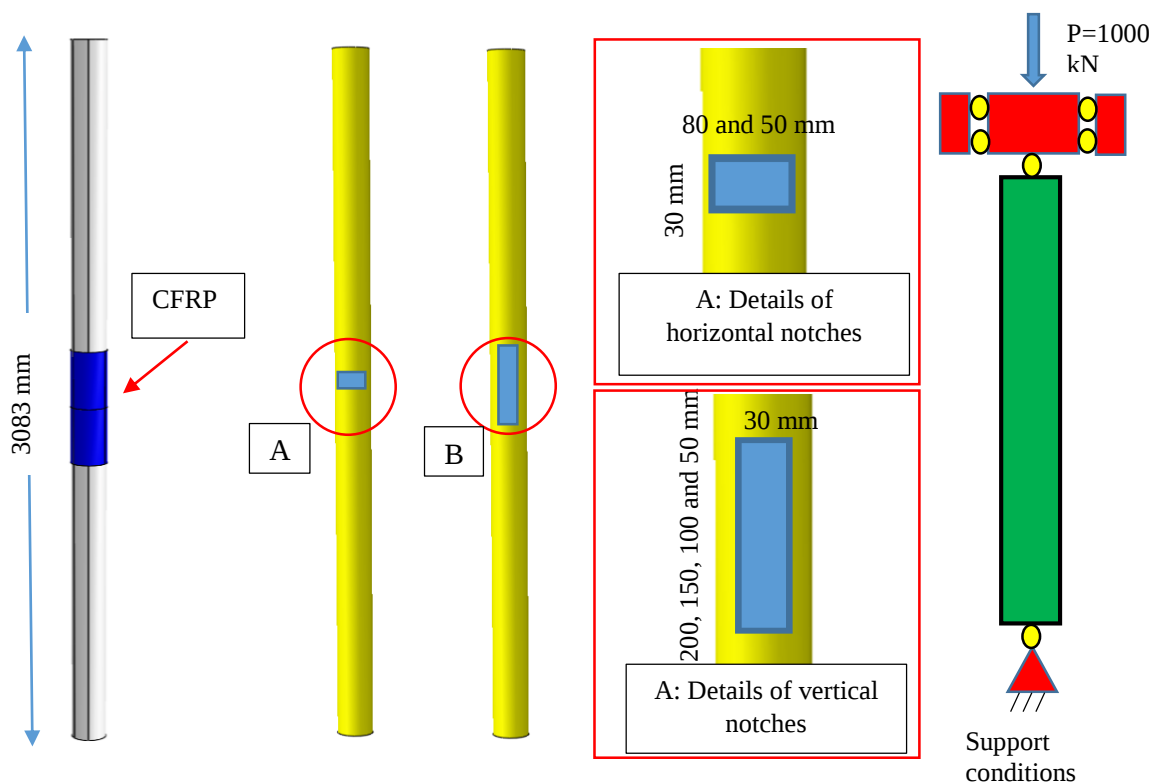


Fig. 1. Schematic details of the strengthened and non-strengthened column with horizontal and vertical damage with support and loading conditions

جدول ۲. خواص چسب و الیاف کربنی

Material	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Ultimate Strain (%)
CFRP (SikaWrap_-230 C) [14]	0.131	4300	238000	1.8
Adhesive (Sikadur_-330) [15]	0.869	30	4.5	0.9

Table 2. Properties of adhesives and carbon fibers

۳- مدل‌سازی و تحلیل با نرم‌افزار

۳-۱- مدل‌سازی

ستون‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ آماده شدند تا رفتار سازه‌ای آن‌ها مطالعه شود. به منظور بررسی آثار آسیب و روش‌های مقاوم‌سازی، ۲۶ نمونه ستون مطالعه شدند، که نمونه بدون آسیب به عنوان نمونه شاهد بررسی شد و ستون‌های دیگر

شامل ابعاد مختلف آسیب افقی و عمودی در میانه عضو هستند. به منظور بررسی تأثیر آسیب بر ظرفیت باربری، ابتدا ستون با ابعاد آسیب ۳۰×۵۰ میلی‌متر مربع و درصدهای مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ (درصد آسیب با توجه به نسبت ضخامت ناحیه آسیب‌دیده به ضخامت ستون در نظر گرفته شد) بررسی شدند و برای سایر نمونه‌ها آسیب‌های ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد مطالعه

شدند. قابل توجه است که برای همه نمونه‌ها عرض مقطع آسیب، به اندازه ۳۰ میلی‌متر و به صورت ثابت در نظر گرفته شد. در شکل (۱)، هندسه ستون مقاوم‌سازی شده و بدون مقاوم‌سازی با آسیب افقی و عمودی نشان داده شده است.

۳-۲- تحلیل اجزای محدود

برای تحلیل نمونه‌ها از نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ استفاده شد و تحلیل غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد همراه با ناکاملی در نظر گرفته شدند. هیچ قطعه‌ای به شکل صاف و کاملی که در نرم‌افزار مدل می‌شود ساخته نمی‌شود، وجود این ناکاملی‌ها باعث بروز پدیده کمانش در عضو می‌شود، برای ایجاد اندکی تغییر شکل جزئی در مدل‌ها از دستور ناکاملی در نرم‌افزار استفاده شد. در مدل‌سازی برای بررسی رفتار سازه‌ای مقاطع دایره‌ای شکل توخالی و وضعیت تنش‌ها در ضخامت مقطع به ویژه در ناحیه آسیب‌دیده، از المان توپر (Solid)، ۲۰ گرهی (C3D20R) همراه با انتگرال کاهش‌یافته استفاده شد. انتخاب نوع مش توپر، نسبت به مش از نوع پوسته (Shell) که ۴ گرهی است، با توجه به تعداد گره‌های بیشتر، دقت بیشتر را سبب می‌شود و از طرفی با توجه به وجود آسیب در ستون‌ها، برای بررسی شرایط تنش‌ها در ضخامت عضو، انتخاب مش از نوع توپر انتخاب بهتری است. در این مطالعه دو نوع ناکاملی کلی و موضعی استفاده شدند، برای این منظور نمونه‌ها ابتدا تحت تحلیل کمانشی قرار گرفتند و حالت‌های کمانش موضعی و کلی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. سپس ناکاملی کلی که شامل دو مقدار $e_0 + \omega_0$ (ترکیب به ترتیب نقص اولیه و خروج از مرکزیت) و کسری از طول مؤثر $L/1000$ و دو مقدار ناکاملی موضعی $t/10$ و $t/100$ ضخامت مقطع) برای تحلیل به نمونه‌ها اعمال شدند.

$e_0 + \omega_0$ با توجه به رابطه (۱) تعیین شد [16-18]؛ در این رابطه E مدول یانگ، I ممان دوم، N بار محوری، D متوسط قطر خارجی، ω جابه‌جایی جانبی میانه ستون، ε_{min} و ε_{max} بیشترین و کمترین مقدار کرنش است. که این مقادیر از پژوهش بوچنان و همکاران (۲۰۱۸) [13]، برای ستون 106×3-3080-P استخراج شدند.

$$\frac{EI (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})}{DN} - \omega_0 = \omega_0 + e_0 \quad (1)$$

بوچنان و همکاران (۲۰۱۸) [13] در تحقیقی که انجام دادند از دو مقدار ناکاملی ($e_0 + \omega_0$ و $t/10$) در شبیه‌سازی استفاده کردند که باعث شد نتایج نرم‌افزاری به نتایج آزمایشگاهی خیلی نزدیک باشد و مقدار خطای کمی در تعیین ظرفیت باربری مشاهده شود؛ در نتیجه در این پژوهش نیز این دو مقدار استفاده شدند. در نهایت برای مشاهده کمانش غیرخطی نهایی، از تحلیل ریکس استفاده شد. برای شبیه‌سازی الیاف کربنی و چسب نیز از المان سه‌بعدی توپر به صورت ۲۰ گرهی استفاده شد و به دلیل خواص خطی، در نرم‌افزار نیز به صورت خطی تعریف شدند. با توجه به اینکه الیاف کربنی دارای ضریب ارتجاعی بالا در جهت طولی هستند و در جهت عرضی چنین ویژگی را ندارند خواص به صورت مقادیر مهندسی اعمال شدند که برای این کار مقدار ضریب ارتجاعی الیاف که در جدول (۲) بیان شده است به عنوان E_1 و برای مقادیر E_2 و E_3 مقدار ۱۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار، الیاف و چسب به صورت مواد مرکب (Composite) تعریف شدند به شکلی که ۸ لایه در نظر گرفته شد که از این میان ۴ لایه برای چسب به ضخامت ۰/۸۶۹ میلی‌متر و ۴ لایه برای الیاف با ضخامت ۰/۱۳۱ میلی‌متر است (ضخامت الیاف و چسب طبق دستورالعمل کارخانه مدل‌سازی شد و ضخامت آن‌ها در جدول (۲) موجود است). برای الیاف کربنی لایه‌های اول و سوم با زاویه صفر درجه و برای لایه‌های دوم و چهارم زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. با این روش لایه‌ها یکی در میان به صورت طولی و عرضی مدل شدند و در نهایت چسب و الیاف با دستور Tie روی ستون نصب شدند.

چگونگی مدل کردن شرایط مرزی در حل مسئله و به دست آوردن نتایج مؤثر است و باید تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد، بر این اساس با توجه به شرایط تکیه‌گاهی ستون در آزمایشگاه، دونقطه مرجع (Refrence point) در بالا و پایین ستون تعریف شدند و شرایط تکیه‌گاهی مفصلی به شکلی که همه درجات آزادی انتقالی در بالا و پایین به‌جز امکان تغییر مکان محوری ستون در بالا، بسته شدند و به نقاط مرجع اعمال شدند. همچنین بار به صورت فشاری و از نوع استاتیکی بر سطح مقطع عضو در بالا وارد شد. در تحلیل نمونه‌ها، بارگذاری تا زمانی که نمونه‌ها به حالت شکست برسند و کرنش خمیری حاصل شود

ادامه یافت.

۳-۳- راستی آزمایی نتایج

به منظور راستی آزمایی نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی، ابتدا خواص مواد نمونه کشش فولاد که توسط بوچنان و همکاران (۲۰۱۸) [13] به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته بود با مدل سازی درستی آزمایی شد که نمودار تنش و کرنش آن در شکل (۲) نشان داده شده است. سپس به دلیل آن که نرم افزار آباکوس ۲۰۱۶ نیاز به خواص مواد به صورت تنش های واقعی و کرنش خمیری دارد، این مقادیر با استفاده از رابطه های (۲ و ۳) محاسبه شدند.

$$\epsilon_{plastic} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 - \epsilon_{nom}) \quad (3)$$

E ضریب ارتجاعی، σ_{nom} تنش مهندسی، ϵ_{nom} کرنش مهندسی، σ_{true} تنش واقعی و $\epsilon_{plastic}$ کرنش خمیری است. قابل توجه است که برای اعضای فشاری ϵ_{nom} به صورت منفی در رابطه ها قرار می گیرد. در جدول (۱)، خلاصه خواص و هندسه ستون 106×3-3080-P که به صورت آزمایشگاهی انجام شده است بیان شده است. تحلیل حساسیت اندازه شبکه، برای سه اندازه متفاوت ۰/۰۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲ متر در قالب نمودار در شکل (۳) نشان داده شده است. اندازه شبکه، دقت نتایج عددی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می دهد، دقت اندازه ۰/۰۱ و ۰/۰۱۵ متر تقریباً یکسان بود و با توجه به زمان تحلیل کمتر، اندازه شبکه ۰/۰۱۵ متر برای مدل سازی ستون انتخاب شد. در شکل (۴)، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری نشان داده شده است، همان گونه که در شکل مشخص است هماهنگی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده می شود. با توجه به مقدار خیلی کم تنش های پسماند (Membrane residual stresses) در مقاطع دایروی شکل سرد نورد شده، می توان از اعمال آن ها به نمونه ها در زمان تحلیل چشم پوشی کرد [19]. پارامترهای استفاده شده در این پژوهش شامل پارامترهای ثابت که عبارت اند

از دو مقدار ۰/۶۱۲ و ۰/۹۲۳ که به ترتیب $t/10$ و $\omega_0 + e_0$ هستند برای کماتش موضعی و کلی، به همراه استفاده از دو مدل اول تحلیل کماتشی به نمونه ها اعمال شدند و پارامترهای متغیر شامل تعداد و طول الیاف کربنی، ابعاد، جهت و درصد آسیب است. شرایط مرزی برای تکیه گاه به صورتی اعمال شد که فقط در جهت حرکت صفحه دوران داشته باشد و بار در بالای ستون به نمونه ها اعمال شد.

شکل ۲. مقایسه نمودار تنش-کرنش نمونه ی آزمایشگاهی ستون 3-106×3080-P و مدل سازی نرم افزاری

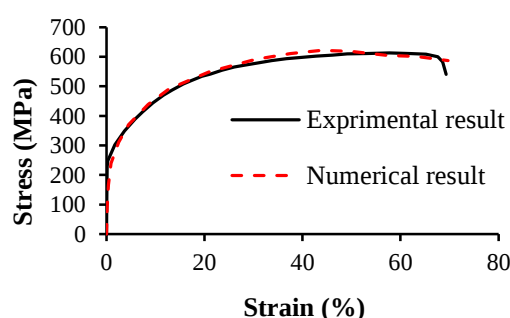


Fig. 2. Comparison of stress-strain diagram of 106 × 3-3080-P column and software modeling

برای درستی آزمایی مدل سازی الیاف کربنی، ستون کوتاه دارای مقاوم سازی (نمونه H1-100-10-2T2L) که توسط کریمیان و همکاران (۲۰۱۷) [11] به صورت آزمایشگاهی انجام شده است شبیه سازی شد. در نرم افزار لایه های اول و سوم با زاویه صفر درجه و برای لایه های دوم و چهارم زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. در واقع به دلیل مدول پایین در جهت عرضی، در آزمایشگاه نیز الیاف به صورت یکی در میان طولی و عرضی نصب می شوند شکل (۵). این نوع روش نصب برای الیاف کربنی از نوع پارچه ای (CFRP sheets)، به طور معمول استفاده می شود.

شکل ۳. نمودار حساسیت اندازه شبکه، برای ستون $106 \times 3-3080-P$ به صورت آزمایشگاهی [13] و مدل سازی با اندازه شبکه مختلف

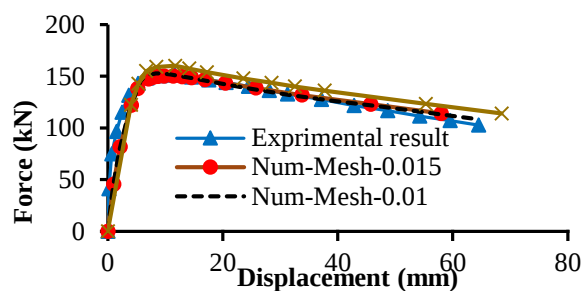


Fig. 3. Mesh size sensitivity diagram, for column $106 \times 3-3080-P$ [13] and modeling

شکل ۴. کماتش کلی ستون $106 \times 3-3080-P$: الف) به صورت آزمایشگاهی [13]، ب) مدل سازی نرم افزاری در این پژوهش

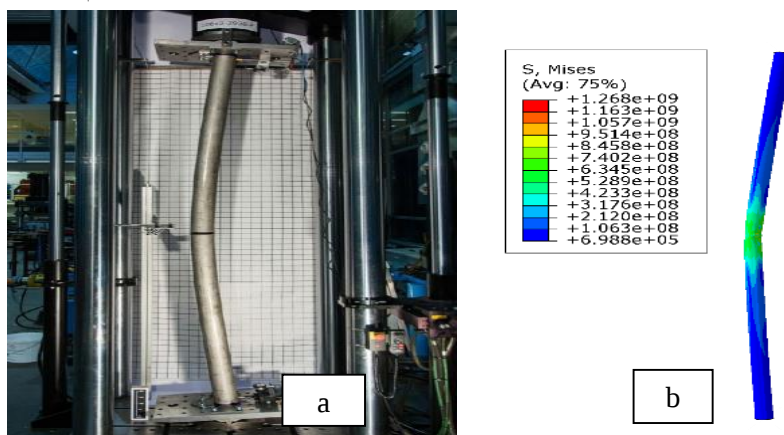


Fig. 4. Global buckling of the column $106 \times 3-3080-P$: a) Laboratory [13], b) Software modeling in this research

شکل ۵. چگونگی قرار گرفتن الیاف به دور ستون دایره ای شکل فولادی در آزمایشگاه

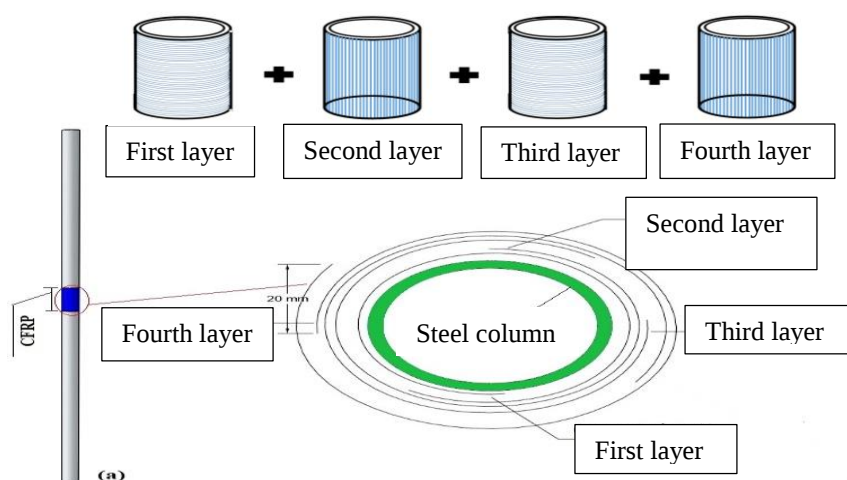


Fig. 5. Strengthening method of the circular steel column in the laboratory

سایر نمونه‌ها با آن سنجیده شود تحلیل شد. برای نام‌گذاری مدل‌ها از افقی و عمودی بودن، اندازه مقطع آسیب‌دیده، تعداد و اندازه‌ی طول الیاف کربنی استفاده شده است که آسیب افقی با (H) و آسیب عمودی با (V) نشان داده شد. در نام‌گذاری نمونه‌ها، علامت درصد نشان‌دهنده درصد آسیب است و در نمونه‌های دارای مقاوم‌سازی تعداد لایه‌های کربنی، به صورت دولایه (2L)، چهارلایه (4L) و عدد آخر نشان‌دهنده طول الیاف کربنی است.

برای نمونه در ستون H-50-30-50%:

H: نشان‌دهنده شکل آسیب به صورت افقی، 50: نشان‌دهنده طول مقطع آسیب به میلی‌متر، 30: نشان‌دهنده عرض مقطع آسیب به میلی‌متر و عدد آخر درصد آسیب است. در نمونه V-200-30-4L250، V: نشان‌دهنده شکل آسیب به صورت عمودی، 200: نشان‌دهنده طول مقطع آسیب به میلی‌متر، 30: نشان‌دهنده عرض مقطع آسیب به میلی‌متر، 4L250: مقاوم‌سازی با ۴ لایه الیاف کربنی به طول ۲۵۰ میلی‌متر است. شایان ذکر است که در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده میزان آسیب به صورت حالت بحرانی و ۱۰۰ درصد انتخاب شده است. مشخصات کلیه نمونه‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

۴- تفسیر و تحلیل نتایج

۴-۱- ظرفیت باربری

در جدول (۳) نتایج تحلیل نرم‌افزاری نمونه‌های مقاوم‌سازی و بدون مقاوم‌سازی نشان داده شده است. به منظور بررسی تعداد و طول مؤثر الیاف کربنی، از ۲ یا ۴ لایه و سه طول ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر برای مقاوم‌سازی استفاده شدند. همچنین برای بررسی تأثیر درصد آسیب، ابتدا ستون با آسیب افقی ۳۰×۵۰ میلی‌متر مربع با درصدهای مختلف آسیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مطالعه شد و برای سایر نمونه‌ها درصدهای ۵۰ و ۱۰۰ اعمال شد. با توجه به اینکه دو پارامتر وقت و هزینه، از عوامل تأثیرگذار در انتخاب روش مناسب برای مقاوم‌سازی اعضای فولادی هستند، برای مقاوم‌سازی در ابتدا از دولایه الیاف کربنی استفاده شد. با توجه به اینکه استفاده از دولایه الیاف کربنی ظرفیت باربری ستون آسیب‌دیده را به‌طور کامل جبران نکرد در نهایت از

شکل‌های (۶ و ۷) نشان می‌دهند که مدل‌سازی الیاف با دقت مناسبی انجام گرفته است.

شکل ۶. گسیختگی الیاف CFRP برای ستون H1-100-10-2T2L انجام‌شده به صورت آزمایشگاهی [11] و نرم‌افزاری در این پژوهش

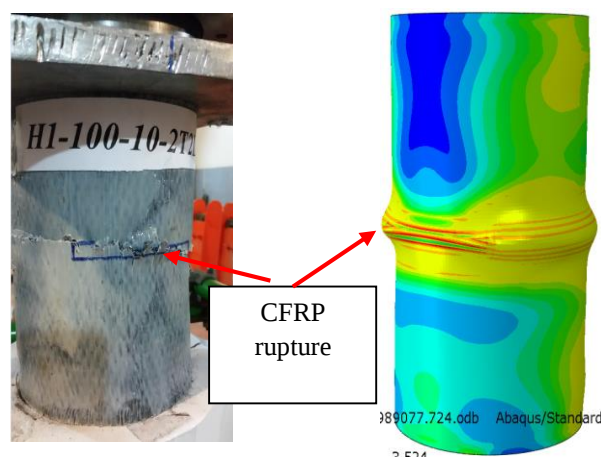


Fig. 6. CFRP rupture for H1-100-10-2T2L performed in laboratory [11] and software in this research

شکل ۷. نمودار نیرو به تغییر مکان برای ستون H1-100-10-2T2L انجام‌شده به صورت آزمایشگاهی [11] و نرم‌افزاری در این پژوهش

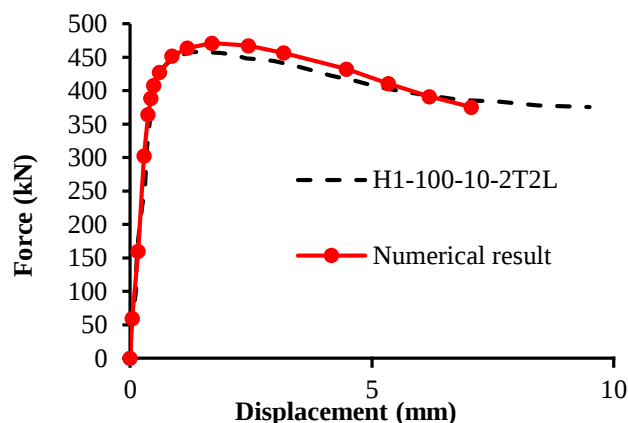


Fig. 7. Force to displacement diagram for H1-100-10-2T2L performed experimentally [11] and software in this research.

۴-۳- نام‌گذاری نمونه‌ها

در این مطالعه مقاطع فولادی شامل یک نمونه کنترل و مقاطع آسیب‌دیده دارای عرض ثابت به‌اندازه‌ی ۳۰ میلی‌متر هستند. نمونه کنترل (نمونه بدون آسیب و مقاوم‌سازی) برای اینکه بار نهایی

درصد نسبت به ستون سالم و ۳۸ درصد نسبت به همان ستون بدون مقاوم سازی بود. از آنجایی که هدف از این پژوهش جبران آسیب به وجود آمده و رساندن ظرفیت باربری به میزان نمونه بدون آسیب است، مقاوم سازی ستون های آسیب دیده با الیاف طول ۱۰۰۰ میلی متر، میزان باربری نهایی را بیشتر از ستون سالم نشان داد که از نظر اقتصادی به صرفه نیست، در نتیجه طول مقاوم سازی ۲۵۰ میلی متر برای سایر نمونه ها انتخاب شد.

اعمال آسیب 30×50 میلی متر مربع به صورت عمودی باعث شد که ستون باربری نهایی برابر با $140/2$ کیلونیوتن را تجربه کند. به دلیل تأثیر ناچیز آسیب عمودی نسبت به شکل افقی آن، طول های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی متر نیز به صورت عمودی و تخریب ۱۰۰ درصد بررسی شدند که به ترتیب ظرفیت باربری $134/58$ ، $130/1$ و $128/88$ کیلونیوتن حاصل شد. به منظور مطالعه درصد آسیب با توجه به ضخامت مقطع، مقادیر آسیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیز مطالعه شدند که شکل های افقی آسیب ها آثار مخرب تری را نشان دادند. در شکل (۱۱) نمودار مقایسه نیرو به تغییر مکان برای آسیب افقی و عمودی نشان داده شده است.

با توجه به تأثیر بیشتر آسیب افقی نسبت به شکل عمودی آن، می توان نتیجه گرفت هرچه مقدار عرض آسیب (در طول کمان افقی ستون دایره ای) بیشتر می شود سختی ستون نیز نسبت به طول عمودی، به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و باعث شکست سریع تر ستون می شود. همچنین شرایط تکیه گاهی و ایجاد کمانش کلی در میانه ستون، نیز می تواند به عنوان عاملی مهم در مقدار کاهش سختی و مقاومت ستون مؤثر باشد.

چهار لایه الیاف کربنی برای مقاوم سازی استفاده شد. چگونگی مقاوم سازی بر اساس مطالعه آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط کریمیان و همکاران (۲۰۱۷) [۱۱]، که از چهار لایه الیاف کربنی به صورت طولی و عرضی استفاده کرده اند صورت گرفت، درصد افزایش یا کاهش باربری نهایی نمونه ها نسبت به نمونه کنترل مقایسه شد. با توجه به جدول (۳) وجود آسیب افقی در ستون H-50-30 با ابعاد 50×30 میلی متر مربع و درصد آسیب ۲۵٪، باعث کاهش باربری نهایی به اندازه ۲/۶۶ درصد و برای آسیب های ۵۰٪ و ۷۵٪ میزان کاهش باربری نهایی به ترتیب ۶/۵ و ۱۰ درصد مشاهده شد. پس از آسیب ۷۵٪، ظرفیت باربری به میزان قابل توجه کاهش یافت به طوری که با آسیب ۱۰۰٪، کاهش ۲۰ درصدی در مقدار باربری نهایی دیده شد.

در شکل (۸)، نمودار مقایسه باربری نهایی ستون H-50-30 دارای آسیب افقی با درصدهای مختلف نشان داده شده است. همچنین مشاهده می شود که عمده کاهش باربری زمانی اتفاق می افتد که آسیب ۱۰۰ درصدی به وجود آید و کل مقطع آسیب دیده دچار خرابی شود. باید توجه داشت که وجود آسیب در میانه ستون که تحت بار فشاری است و کمانش کلی دارد، باعث شد که سختی ستون به میزان قابل ملاحظه ای کم شود. در واقع نسبت به میزان بار ثابت، ستون در زمانی که آسیبی به آن وارد می شود مقاومت کمتری دارد و دچار کمانش و تغییر مکان افقی بیشتر نسبت به ستون سالم می شود. با افزایش ابعاد آسیب به اندازه 80×30 میلی متر مربع در نمونه H-80-30 میزان کاهش باربری برای آسیب های ۵۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب از ۸/۳ درصد به ۵۲ درصد رسید. شکل (۹)، مقایسه نمودار دو ستون H-50-30-100% و H-80-30-100% را نشان می دهد.

برای جبران آسیب به وجود آمده طول های مختلف الیاف کربنی استفاده شدند. شکل (۱۰)، نشان دهنده تأثیر مناسب الیاف در جبران سختی و ظرفیت باربری ستون است. به شکل کلی استفاده از این الیاف با توجه به ضریب ارتجاعی بالایی که دارند سختی ستون را افزایش دادند و ناحیه آسیب دیده پوشش یافت. افزایش باربری نهایی برای ستون H-50-30-4L1000 که مقاوم سازی شده با طول ۱۰۰۰ میلی متر است به اندازه ۱۸

جدول ۳. مشخصات، ابعاد آسیب و ظرفیت باربری نمونه‌ها

No	Specimen	Deficiency			CFRP length (mm)	Load bearing Capacity	
		Length (mm)	Width (mm)	Position		Load (kN)	Increase/ decrease (%)
1	Control	N/A	N/A	N/A	N/A	150.2	-
2	H-50-30-25%	50	30	Horizontal	N/A	146.4	-2.66
3	H-50-30-50%	50	30	Horizontal	N/A	140.2	-6.5
4	H-50-30-75%	50	30	Horizontal	N/A	135.3	-10
5	H-50-30-100%	50	30	Horizontal	N/A	120.5	-20
6	H-80-30-50%	80	30	Horizontal	N/A	137.74	-8.3
7	H-80-30-100%	80	30	Horizontal	N/A	72.46	-52
8	H-50-30-2L250	50	30	Horizontal	250	137.51	-8.44
9	H-50-30-4L250	50	30	Horizontal	250	154.85	+3
10	H-50-30-4L500	50	30	Horizontal	500	166.18	+10
11	H-50-30-4L1000	50	30	Horizontal	1000	177.78	+18
12	H-80-30-4L250	80	30	Horizontal	250	148.8	-1
13	V-50-30-25%	50	30	Vertical	N/A	149.4	-0.53
14	V-50-30-50%	50	30	Vertical	N/A	147	-2.13
15	V-50-30-100%	50	30	Vertical	N/A	140.2	-6.6
16	V-100-30-50%	100	30	Vertical	N/A	145.75	-2.96
17	V-100-30-100%	100	30	Vertical	N/A	134.58	-10
18	V-150-30-50%	150	30	Vertical	N/A	143.8	-4.26
19	V-150-30-100%	150	30	Vertical	N/A	130.1	-13.3
20	V-200-30-50%	200	30	Vertical	N/A	142.1	-5.39
21	V-200-30-100%	200	30	Vertical	N/A	128.88	-14
22	V-50-30-2L250	50	30	Vertical	250	146.2	-2.66
23	V-50-30-4L250	50	30	Vertical	250	156.12	+3.9
24	V-100-30-4L250	100	30	Vertical	250	155.88	+3.7
25	V-150-30-4L250	150	30	Vertical	250	154.1	+2.5
26	V-200-30-4L250	200	30	Vertical	250	153	+1.8

Table 3. Specifications, damage dimensions and bearing capacity of the samples

شکل ۹. نمودار مقایسه نیرو به تغییر مکان ستون‌های دارای آسیب به شکل

افقی نسبت به نمونه کنترل

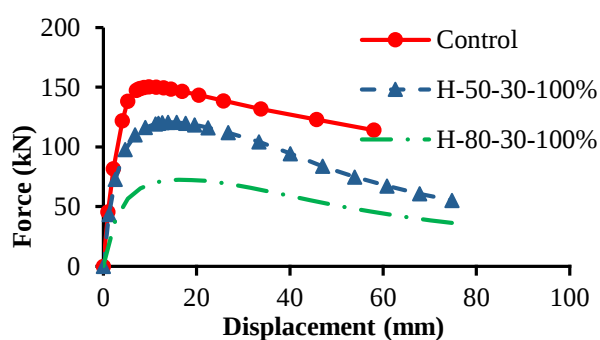


Fig. 9. Force-Displacement of the columns with horizontal damage comparison to the control sample

شکل ۸. نمودار نیرو به تغییر مکان برای ستون با درصد آسیب افقی

مختلف

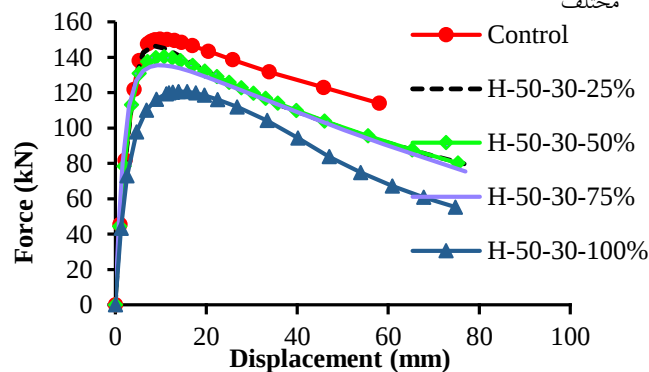


Fig. 8. Force-Displacement of the columns with different horizontal damage percentages

۴-۲- حالت‌های شکست و خرابی نمونه‌ها

نمونه‌های مقاوم‌سازی شده و بدون مقاوم‌سازی تحت بارگذاری فشاری توسط نرم‌افزار تحلیل شدند و تا زمان رسیدن به باربری نهایی و مشاهده کرنش‌های خمیری، بارگذاری ادامه یافت. در شکل (۱۲-الف)، نمونه با آسیب افقی و درصد آسیب ۵۰ درصد است که اعمال بار علاوه بر کماتش کلی ستون باعث به وجود آمدن تورفتگی اطراف آسیب و افزایش تنش‌ها در این ناحیه شد. برای ستون با همان اندازه و درصد آسیب ولی به شکل عمودی، حالت شکست به شکل بیرون آمدگی در ناحیه آسیب که به اصطلاح به شکست پافیلی (Elephant foot failure) معروف است مشاهده شد (شکل ۱۲-ب). در شکل (۱۳-الف)، برای نمونه بدون مقاوم‌سازی و دارای آسیب افقی ۱۰۰ درصد، افزایش بارگذاری باعث تشدید تنش‌ها در اطراف ناحیه آسیب‌دیده شد و بعد از گذر از مرحله کشسان ستون تغییر شکل داد. علاوه بر کماتش کلی در راستای ستون، کماتش موضعی به صورت جمع‌شدگی در لبه‌های آسیب به وجود آمد و در ادامه کماتش کلی ستون منحرف به سمتی دیگر شد. برای ستون با آسیب ۱۰۰ درصد به شکل عمودی، افزایش بارگذاری سبب افزایش سطح مقطع آسیب شد و پس از تشدید تنش‌ها، کماتش موضعی به وجود آمد. در واقع در آسیب عمودی تمایل به باز شدن لبه‌های ناحیه آسیب‌دیده مشاهده شد (شکل ۱۳-ب). برای مقاوم‌سازی از چهار لایه الیاف کربنی استفاده شد که باعث تأخیر در کماتش موضعی در ناحیه آسیب‌دیده شد. همان‌گونه که در شکل‌های (۱۳-پ و ۱۳-ت) قابل مشاهده است الیاف کربنی در ناحیه آسیب‌دیده دارای شدت تنش بیشتری هستند و به حالت گسیختگی رسیده‌اند.

شکل ۱۰. نمودار نیرو به تغییر مکان برای ستون‌های دارای آسیب افقی و مقاوم‌سازی شده با الیاف کربنی

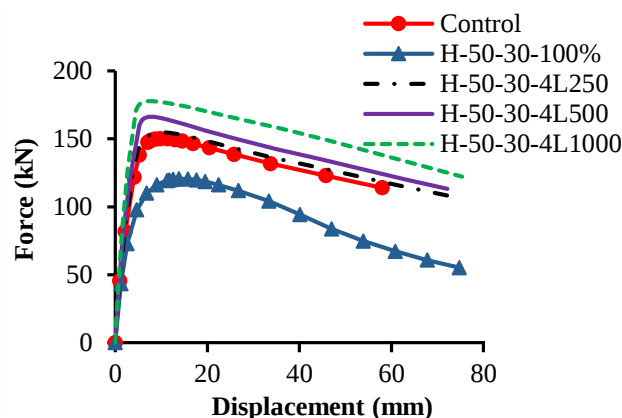


Fig. 10. Force-Displacement diagram for horizontal damaged columns strengthened with carbon fiber

شکل ۱۱. نمودار مقایسه نیرو به تغییر مکان ستون‌های دارای آسیب افقی نسبت به آسیب قائم

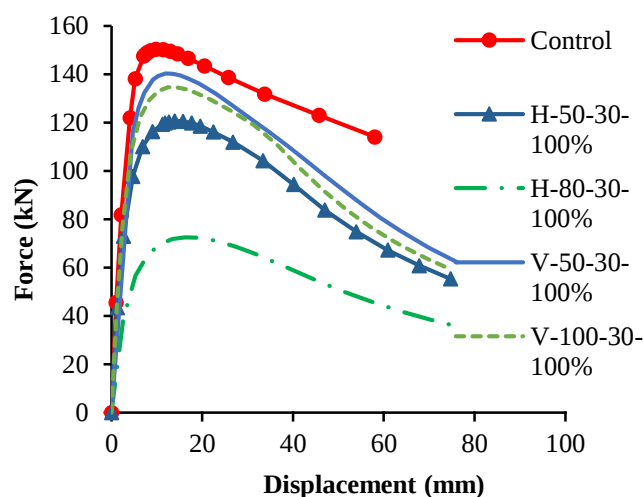


Fig. 11. Force-Displacement comparison of the columns with horizontal and vertical damage

شکل ۱۲. مقایسه حالت‌های شکست نمونه‌ها: (الف) نمونه H-50-30-50%؛ (ب) نمونه V-50-30-50%

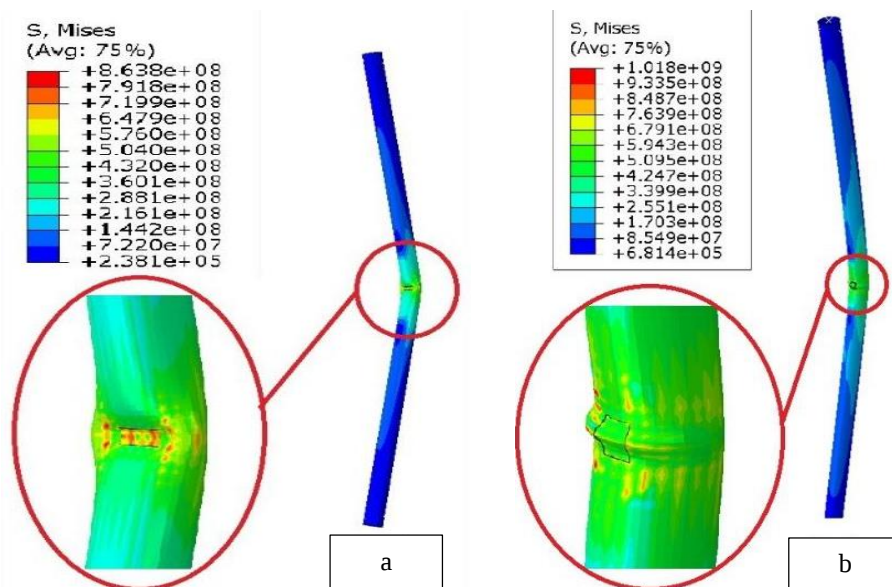


Fig. 12. Comparison failure modes of the samples: (a) H-50-30-50%; (b) V-50-30-50%

شکل ۱۳. مقایسه حالت‌های شکست نمونه‌ها: (الف) نمونه H-80-30-100%؛ (ب) نمونه‌ی V-200-30-100%؛ (پ) نمونه H-80-30-4L250؛ (ت) نمونه V-200-30-4L250

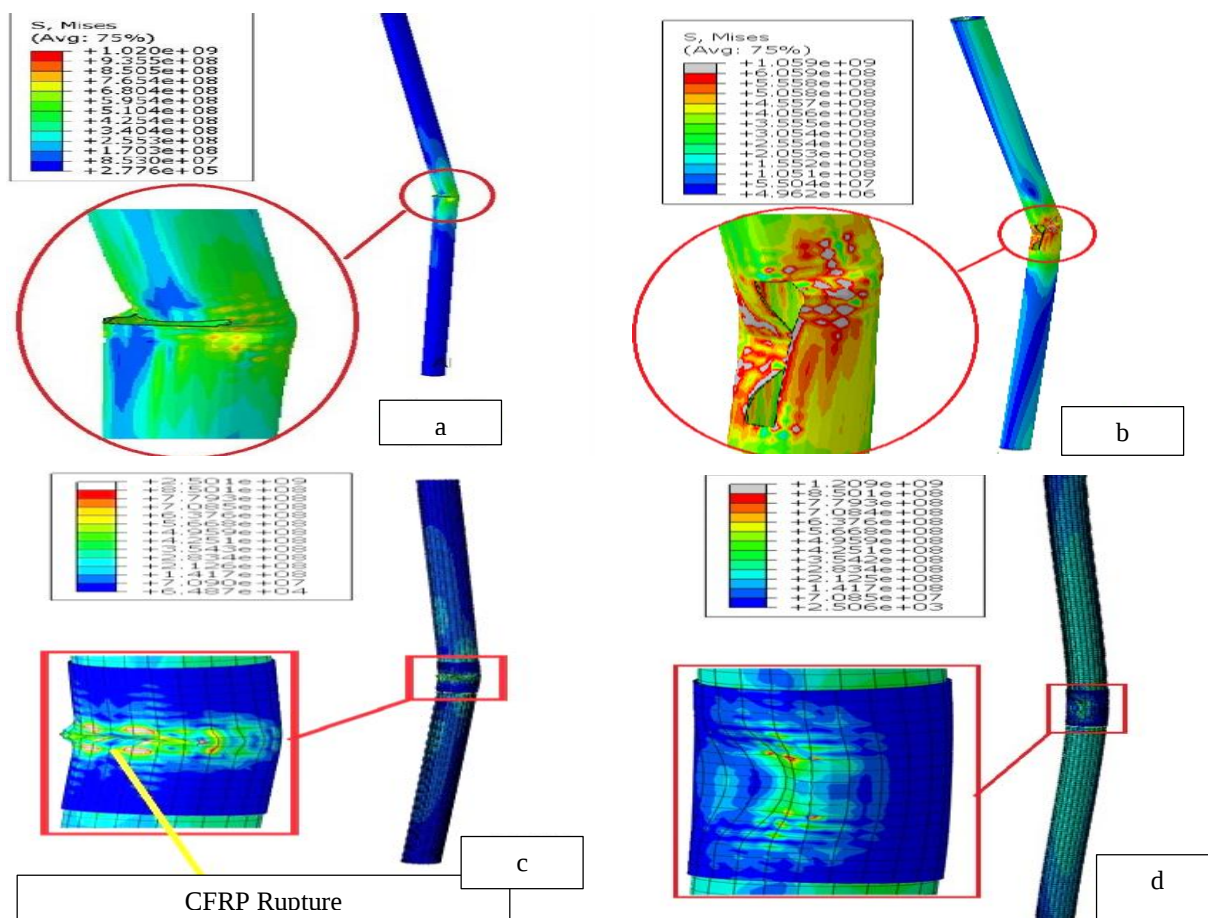


Fig. 13. Comparison failure modes of the samples: (a) H-80-30-100%; (b) V-200-30-100%; (c) H-80-30-4L250; (d) V-200-30-4L250

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس ۲۰۱۶ به تحلیل و بررسی اثر آسیب بر ظرفیت باربری و گسیختگی ستون آسیب دیده پرداخته شد و در ادامه برای مقاوم سازی ستون های دایروی شکل آسیب دیده از دو و چهار لایه الیاف کربنی استفاده شد. در مدل سازی ستون، ابتدا برای به دست آوردن حالت های کمانش، تحلیل کمانشی انجام شد. در ادامه برای رسیدن به حالت شکست و مشاهده کمانش های بعد از کمانش اولیه از تحلیل غیرخطی ریکس و اعمال مقادیر ناکاملی استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی درصد آسیب، شکل و ابعاد آن در کاهش باربری نهایی ستون و مقاوم سازی جهت جبران کاهش مقاومت ایجاد شده در ستون های دایروی شکل فولادی بود. برای این منظور تعداد ۲۶ نمونه ستون که دارای آسیب به شکل افقی و عمودی بودند بررسی و مقایسه شدند که نتایج زیر حاصل شد.

- در ستون دارای آسیب با ابعاد 50×30 میلی مترمربع با درصد آسیب متفاوت، تأثیر آسیب بر ستون نشان داد که عمده کاهش باربری نهایی زمانی اتفاق افتاده است که ۱۰۰ درصد ناحیه ی آسیب دچار تخریب شده است. درحالی که برای آسیب ۲۵ درصد میزان کاهش ظرفیت باربری برای آسیب افقی $2/66$ درصد و برای ستون با آسیب عمودی این مقدار کمتر از یک درصد مشاهده شد که نشان دهنده عدم لزوم مقاوم سازی برای جبران کاهش بار به ویژه در شکل عمودی آسیب برای آسیب های کمتر از ۲۵ درصد است.

- در ستون دارای آسیب افقی با ابعاد 50×30 میلی مترمربع در وسط عضو، وجود آسیب ظرفیت تحمل بار در ستون دایروی شکل را تا ۲۰ درصد کاهش داد، که استفاده از ۴ لایه الیاف کربنی ظرفیت باربری نهایی تقلیل یافته را به طور کامل جبران کرد. الیاف کربنی با محصور نمودن ستون دایروی شکل فولادی باعث به تأخیر انداختن کمانش موضعی شدند و شدت تنش ها را در ناحیه آسیب کاهش دادند.

- ستون های دارای آسیب افقی نسبت به ستون با شکل آسیب عمودی، به طور قابل ملاحظه ای کاهش ظرفیت باربری را

تجربه کردند. با توجه به نتایج می توان نتیجه گرفت یکی از دلایل نسبت کاهش بیشتر در آسیب افقی، اعمال آسیب در بخش زیادی از محیط ستون و در مرکز آن انجام شده است و چون ستون تحت بار محوری خالص است، تمرکز کمانش کلی در این ناحیه اتفاق افتاده است و ستون نتوانسته است عملکرد سازه ای مناسبی را نشان دهد.

- حالت های شکست در نمونه کنترل به صورت کمانش کلی با تمرکز در میانه ستون، در نمونه های دارای آسیب افقی بدون الیاف کربنی، کمانش موضعی به شکل جمع شدگی لبه های ناحیه آسیب دیده و برای آسیب عمودی، کمانش موضعی به صورت بازشدگی لبه های آسیب مشاهده شد. باید توجه داشت که کمانش کلی در طول ستون برای همه ستون ها اتفاق افتاده است؛ در خصوص نمونه های تقویت شده به وسیله الیاف، تمرکز تنش ها در اطراف ناحیه آسیب دیده مشاهده شد.

۶- مراجع

- [1] Jiao H., Zhao XL. 2004 CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 42(7), 963-78.
- [2] Shaat A., Fam A. 2006 Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fibre reinforced polymers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(4), 458-70.
- [3] Gao XY., Balendra T., Koh CG. 2013 Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP. *Engineering Structures*, 46, 547-56.
- [4] Dong H., Jiangfeng D., Qingyuan W. & Xuelian C. 2011 Mechanical behaviour of recycled concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP. *International Conference on Multimedia Technology*, 26-28.
- [5] Xu Y., Tang H, Chen J., Jia Y. & Liu R. 2021 Numerical analysis of CFRP-confined concrete-filled stainless steel tubular stub columns under axial compression. *Journal of Building Engineering*, 37, 102130.
- [6] Shahraki M., sohrabi MR., Azizian G. & Narmashiri K. 2019 Reliability Assessment of CFRP-Strengthened Deficient Steel SHS Columns *AUT Journal of Civil Engineering*, 3(1), 23-36.

- [17] Zhao O., Gardner L., Young B. 2016 Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending-Part 1: Experiments and numerical modelling. *Thin-Walled Structures*, 101, 231-9.
- [18] Zhao O., Rossi B., Gardner L. & Young B. 2015 Behaviour of structural stainless steel cross-sections under combined loading-Part I: Experimental study. *Engineering structures*, 89, 236-46.
- [19] Cruise R., Gardner L. 2008 Residual stress analysis of structural stainless steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(3), 352-66.
- [7] Keykha AH. 2019 Structural performance evaluation of deficient steel members strengthened using CFRP under combined tensile, torsional and lateral loading. *Journal of Building Engineering*, 24, 100746.
- [8] Wang YH., Wang YY., Zhou XH. & et al. 2021 Coupled ultimate capacity of CFRP confined concrete-filled steel tube columns under compression-bending-torsion load. *Structures*, 31, 558-75.
- [9] Yousefi O., Narmashiri K., Ghaemdoost MR. 2017 Structural behaviors of notched steel beams strengthened using CFRP strips. *Steel and Composite Structures*, 25(1), 35-43.
- [10] Ghaemdoost MR., Narmashiri K., Yousefi O. 2016 Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP. *Construction and Building Materials*, 126, 1002-11.
- [11] Karimian M., Narmashiri K., Shahraki M. & Yousefi O. 2017 Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 555-64.
- [12] Yousefi O., Narmashiri K., Hedayat AA. & Karbakhsh A. 2021 Strengthening of corroded steel CHS columns under axial compressive loads using CFRP. *Journal of Constructional Steel Research*, 178, 106496.
- [13] Buchanan C., Real E., Gardner L. 2018 simulation and design of cold-formed stainless steel CHS columns. *Thin-Walled Structures*, 130, 297-312.
- [14] Sika, in, Sika Warp -230 C. Product Data Sheet, 13/06/2006.
- [15] Sikadur, in, Sikadur-330. Product Data Sheet, 21/02/2012.
- [16] Huang Y., Young B. 2014 Experimental investigation of cold-formed lean duplex stainless steel beam-columns. *Thin-Walled Structures*, 76, 105-17.

Strengthening of defected circular steel columns using CFRP

Omid Yousefi ^{1*}, Amir Ahmad Hedayat ², Kambiz Narmashiri ³, Ali Karbakhsh ⁴, Amin Shabani Ammari ⁵

1. Department of Civil Engineering, Nikshahr Branch, Islamic Azad University, Nikshahr, Iran

2. Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran

3. Department of Civil Engineering, Zahedan Branch, Islamic Azad University, Zahedan, Iran

4. Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

5. Department of Civil Engineering, Zahedan Branch, Islamic Azad University, Zahedan, Iran

Omid.Yousefi88@gmail.com

Abstract

Most members of structures whose useful life has elapsed need to be repaired. These members may be damaged by a variety of factors. Due to the high cost of reconstruction, a large portion of countries' development budgets are spent annually repairing and rehabilitate these structures. Compressive members such as columns are one of the most important components in a structure that play a major role in bearing and transporting all the vertical and lateral loads of the building. Basically, no column can bear to its fullest capacity and is failed by buckling. As a result, many researchers are interested in retrofitting and increasing column strength using new materials and methods. In this investigation, damaged circular hollow section steel columns with vertical and horizontal notches and different percentages of 25, 50, 75 and 100% were examined, also the effects of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) for strengthening has been studied. 26 specimens of steel Circular Hollow Section (CHS) column with the same height and different damage dimensions under compressive load were analyzed by ABAQUS 2016 software. The main problem with slender columns is the global buckling under compressive loads. 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 defect reduces the bearing capacity and rigidity of the steel columns and horizontal defect is more effective in reducing ultimate load in compare to vertical damage. Horizontal-defective columns experienced significantly lower load bearing capacity than vertical-defective columns and can reduce final load up to 52% in 100% damage, which this reduction indicated that by increasing damage along the perimeter of the column section, final load decreased sharply. The results also showed that it is critical when the deficiency zone is entirely destroyed, while the effect of damage less than 25% was maximum 2.66%. Columns failure occurred in the form of global and local buckling; in all cases global buckling emerged in the form of the column bending, but the local buckling was different according to the type of the damage. Failure modes of the control column is global buckling with focus on the middle of the column, for non-strengthened specimens with horizontal and 100% damage, local buckling is shrinkage of notch edges and for vertical notch is defect edges opening. In specimens with a lower percentage of damage, local buckling occurred for horizontal defects in the form of the inward buckling on the middle and for the vertical ones was outward buckling. Strengthening of columns retrofitted with CFRP presented that these kind of fibers have a positive effect on significant gaining ultimate load capacity, delaying defect buckling, controlling fractures and reducing stresses at the damaged area. CFRP strengthening of defected cases using 4 layers, restored the reduction of ultimate load up to 51%, which shows the proper performance of the fibers in retrofitting.

Keywords: Strengthening; Damaged column; Steel column; Column buckling; CFRP