



ارزیابی رفتار ستون‌های دابل ناودانی فولادی دارای نقص ناشی از جوشکاری مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP

فرزین وظیفه دان، مهدی شهرکی*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

کلمات کلیدی:

مقاوم‌سازی
نقص
CFRP
دابل ناودانی
جوش

خلاصه: در سال‌های اخیر مهندسان با مشکلات سازه‌های زیادی از قبیل کماتش، خوردگی و بارگذاری بیش از حد در سازه‌های فولادی آسیب‌دیده مواجه بوده‌اند. اشتباه نیروی کار در هنگام جوشکاری و همچنین تخریب جوش از جمله مشکلات عدیده در سازه‌های فولادی می‌باشد. از این رو مقاوم‌سازی و ترمیم محل جوش در سازه‌های فولادی امری اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله به بررسی تأثیر پلیمرهای مسلح شده به الیاف کربن برای مقاوم‌سازی ستون‌های دابل ناودانی فولادی دارای نقص ناشی از جوشکاری پرداخته شده است. برای این منظور هفت ستون فولادی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی گردید. یک ستون شاهد به عنوان اولین نمونه که هیچ نقصی بر روی آن قرار ندارد و سرتاسر جوشکاری شده، مدل‌سازی گردید. بقیه نمونه‌های دارای نقص با استفاده از الیاف CFRP مقاوم‌سازی شدند. از طرفی تقویت با استفاده از الیاف CFRP در جهت بهبود محل نقص، به شکل دقیق برای سه نمونه مورد بررسی قرار گرفت. مقاوم‌سازی این مقاطع با استفاده از الیاف CFRP نه تنها روش مؤثری برای افزایش حداکثر نیروی قابل تحمل محوری در این ستون‌ها می‌باشد بلکه کمک شایانی در جهت بهبود مقاومت و به تأخیر انداختن کماتش موضعی در آن‌ها کرده است. با توجه به نتایج مشاهده گردید که در بین تمامی نمونه‌ها، حداکثر ظرفیت باربری مربوط به نمونه 2UW3 بوده و به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی به میزان ۲۹/۹ و ۲۱/۷ درصد نسبت به نمونه 2UW3C1 افزایش یافته است. علاوه بر این نمونه‌های 2UW1C1 و 2UW3C1 به ترتیب در بین نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی بیشترین سختی را دارند.

۱- مقدمه

چسباندن کامپوزیت‌ها در مورد تیرهای بتنی و عرشه پل‌ها مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاصل بسیار موفقیت‌آمیز بود. همچنین ستون‌ها و بسیاری دیگر از المان‌های سازه‌ای با استفاده از کامپوزیت‌ها دورپیچ شدند. پس از آن مهندسیین ژاپنی دریافتند که این شیوه، روش مناسبی برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید می‌باشد و از آن‌ها در تعمیر و تقویت سازه‌ها استفاده کردند [۳]. پوشش‌های CFRP به منظور مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، چوبی و فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش‌های CFRP به عنوان جایگزین روش‌های دیگر مانند استفاده از صفحات فولادی، غلاف ستون‌های بتنی یا فلزی، کاربرد دارند [۳]. طیف گسترده‌ای از چسب را می‌توان برای پیوند بین CFRP و مواد فلزی به کار برد از جمله عناصر اپوکسی، پلی‌یورتان و اکریلیک [۴]. در ادامه مواردی از مطالعات انجام شده ارائه می‌شود.

به طور کلی استفاده از کامپوزیت‌ها از دهه ۱۹۴۰ آغاز و مانند بسیاری از فنون و تکنولوژی‌های دیگر ابتدا کاربرد نظامی داشت و بیشتر در صنایع هوا و فضا استفاده می‌گردید. به گونه‌ای که پس از جنگ جهانی دوم کاربرد پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری در صنایع موشک‌سازی در اروپای غربی و آمریکا به میزان هشتاد درصد افزایش یافت. با توجه به وزن کم و استحکام بالای آن بسیار مورد توجه قرار گرفته و در سایر زمینه‌ها از جمله صنعت ساختمان‌سازی، صنعت خودروسازی، ساخت اسکله‌ها و شناورها، کشتی‌ها و قایق‌های تندرو و سازه‌های دریایی نیز به کار گرفته شد [۱]. در صنعت ساختمان، نخستین کاربرد سازه‌ای کامپوزیت‌ها در دهه ۶۰ میلادی در چندین سازه در انگلستان و آمریکا انجام گردید، ولی تا دهه هشتاد میلادی چندان توجهی به این مصالح نمی‌شد [۲]. در اواسط سال ۱۹۸۰ میلادی در سوئیس

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mehdi.shahraki@iau.ac.ir



رفتار استاتیکی غیرخطی آن‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. در این مدل‌ها، تماس بین لایه‌های FRP و اعضای فلزی در نظر گرفته شده است. همچنین پروفیل جوش در محل تقاطع عضو اصلی با عضوهای فرعی مدل‌سازی شده است. نتایج نشان داد که نحوه قرارگیری این پوشش‌ها روی اتصال و اندازه طول آن‌ها روی عضو اصلی، تأثیر محسوس بر روی بهبود عملکرد اتصال دارند. همچنین این پوشش‌ها می‌توانند مقاومت نهایی اتصال را تا ۱۲۵ درصد افزایش و جابجایی‌ها را تا ۸۴ درصد کاهش دهند. نصیرائی و رضا دوست [۱۰] ظرفیت استاتیک اتصالات لوله ای X شکل مقاوم‌سازی شده با الیاف تحت بار فشاری را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها سختی اولیه، ظرفیت نهایی، نسبت ظرفیت و مکانیسم‌های شکست اتصالات لوله‌ای X شکل مقاوم‌سازی شده با الیاف FRP تحت بار فشاری را بررسی کردند. ابتدا یک مدل المان محدود ایجاد شد و با داده‌های تجربی موجود اعتبار سنجی گردید. سپس ۱۰۹ مدل المان محدود برای بررسی کارایی لایه‌های FRP و هندسه، بر عملکرد استاتیکی اتصالات X شکل مقاوم‌سازی شده ایجاد شد. در مدل‌های المان محدود، اثرات پروفیل جوش و تماس بین FRP و اعضا در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که FRP می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای سختی، ظرفیت نهایی و مکانیسم‌های شکست را بهبود بخشد.

با توجه به مطالعات فوق مشاهده شد که تحقیقات چندانی در مورد مقاوم‌سازی محل نقص جوش در ستون‌های دابل ناودانی انجام نشده است. علاوه بر این استفاده از جوش مجدد در محل‌هایی که نقص در جوش موجود در ستون‌های فولادی ناشی از اجرای نادرست، خوردگی ناشی از شرایط محیطی به وجود می‌آید، مشکلاتی از قبیل ایجاد گرمای زیاد در محل جوش و تخریب محل نقص، ایجاد تنش پسماند ناشی از جوشکاری، عدم اجرای صحیح جوش در ستون‌های موجود در ستون‌های تحت بار و ضمن بهره‌برداری را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این سهولت استفاده از الیاف CFRP، مقاومت ایجاد شده زیاد نسبت به وزن ناچیز آن و همچنین عدم نیاز به جوشکاری مجدد در ستون‌ها می‌تواند از جمله مزیت استفاده از این الیاف نسبت به اجرای جوش مجدد می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر الیاف CFRP برای مقاوم‌سازی ستون‌های دابل ناودانی فولادی ناشی از نقص در جوش پرداخته می‌شود. تأثیر سختی، جابجایی محوری قائم، شکل و محل قرارگیری ناحیه نقص در طول ستون مربعی شکل فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

قائم‌دوست و همکاران [۵] رفتار ساختاری ستون‌های کوتاه فولادی ناقص را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به نتایج نشان دادند که ورق‌های CFRP می‌توانند مقاومت از دست رفته به دلیل نقص را تا حد زیادی جبران نمایند. همچنین ظرفیت باربری افزایش یافته و کماتش موضعی نیز به تأخیر خواهد افتاد. یانگ^۱ و همکاران [۶] عملکرد فشاری محوری ستون‌های فولادی تقویت شده را با روش‌های آزمایشگاهی و عددی ارزیابی کردند. با توجه به نتایج نشان دادند که مقاوم‌سازی، سختی محوری و حداکثر بار ستون‌ها را افزایش می‌دهد. تنگ^۲ و همکاران [۷] مطالعه تجربی رفتار خستگی صفحات فولادی جدار نازک دارای جوش لب به لب تقویت شده با استفاده از ورق‌های CFRP را مورد بررسی قرار دادند. اتصالات فولادی جوش داده شده در سازه‌ها مستعد شکست خستگی هستند. در این زمینه، الیاف CFRP دارای قابلیت قابل توجهی برای تقویت خستگی سازه‌های فولادی هستند. اثر تقویت CFRP بر رفتار خستگی با تغییر طرح تقویت (یک طرفه یا دو طرفه) و تعداد لایه‌های ورق CFRP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که عمر خستگی صفحات فولادی جوش لب به لب با تقویت CFRP در مقایسه با عمر خستگی صفحات فولادی جوش لب به لب بدون تقویت CFRP تقریباً یک تا ده برابر افزایش یافته است. همچنین بیان شد که نمونه‌های سه لایه دو طرفه بهترین اثر را بر عمر خستگی نشان می‌دهند. هو^۳ و همکاران [۸] تحلیل رفتار کماتشی ستون‌های فولادی تقویت شده با CFRP از طریق المان محدود و شبکه عصبی را بررسی کردند. ابتدا مدل‌های المان محدود ستون‌ها تحت فشار محوری و خارج از مرکز ساخته شد. منحنی‌های نیرو-جابجایی، حالت‌های شکست، و منحنی‌های تنش-جابجایی حاصل از مطالعه عددی و تجربی مطابقت خوبی داشتند. با توجه به نتایج بیان شد شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند مسائل غیرخطی بسیار پیچیده و محاسباتی را مدیریت کنند و یک ابزار عملی برای پیش‌بینی ظرفیت کماتش ستون‌های فولادی تقویت شده با CFRP می‌باشد. رضا دوست و همکاران [۹] تأثیر الیاف FRP بر مقاومت نهایی و تغییر شکل اتصالات لوله‌ای X شکل تحت بارگذاری محوری فشاری را مورد بررسی قرار دادند. ابتدا نتایج حاصل از مدل‌های المان محدود با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. برای بررسی متغیرهای مختلف در مقاوم‌سازی اتصالات لوله‌ای X شکل با استفاده از الیاف FRP از جمله جنس، طول، زاویه دورپیچ و تعداد لایه‌ها، ۷۵ اتصال در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده ایجاد و تحلیل شدند تا

1 Yang
2 Tong
3 Hu

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها

Table 1. specimens properties

ارتفاع موثر CFRP (میلی‌متر)	طول جوش (میلی‌متر)	نام نمونه
۰	۱۰۰۰	CONTROL
۰	۷۵۰	2UW1
۲۵۰	۷۵۰	2UW1C1
۰	۵۰۰	2UW2
۵۰۰	۵۰۰	2UW2C1
۰	۲۵۰	2UW3
۷۵۰	۲۵۰	2UW3C1

و همچنین الیاف CFRP مورد استفاده را نشان می‌دهد. منظور از welding defect، منطقه بدون جوش می‌باشد.

۳- مشخصات مواد و مصالح

۳-۱- مشخصات فولاد

برای به دست آوردن مشخصات فولاد مورد استفاده، نمونه‌های دمبلی‌شکل که از ستون‌های فولادی انتخاب و توسط دستگاه CNC برش زده شده است، در آزمایشگاه مکانیک خاک بیرجند تحت آزمایش تست کششی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که نحوه انتخاب مشخصات نمونه‌های دمبلی‌شکل فولادی و نحوه انجام آزمایش تست کششی فولاد بر اساس آیین‌نامه استاندارد ASTM370 و ASHTOT299 انتخاب شد. شکل شماره ۲ مشخصات نمونه‌های دمبلی‌شکل و تست آزمایش کششی و شکل ۳ نتایج حاصل از تست کششی در آزمایشگاه برای فولاد مورد استفاده را نشان می‌دهد. از طرفی نتایج حاصل از تست کششی در جدول شماره ۲ مشخص شده است.

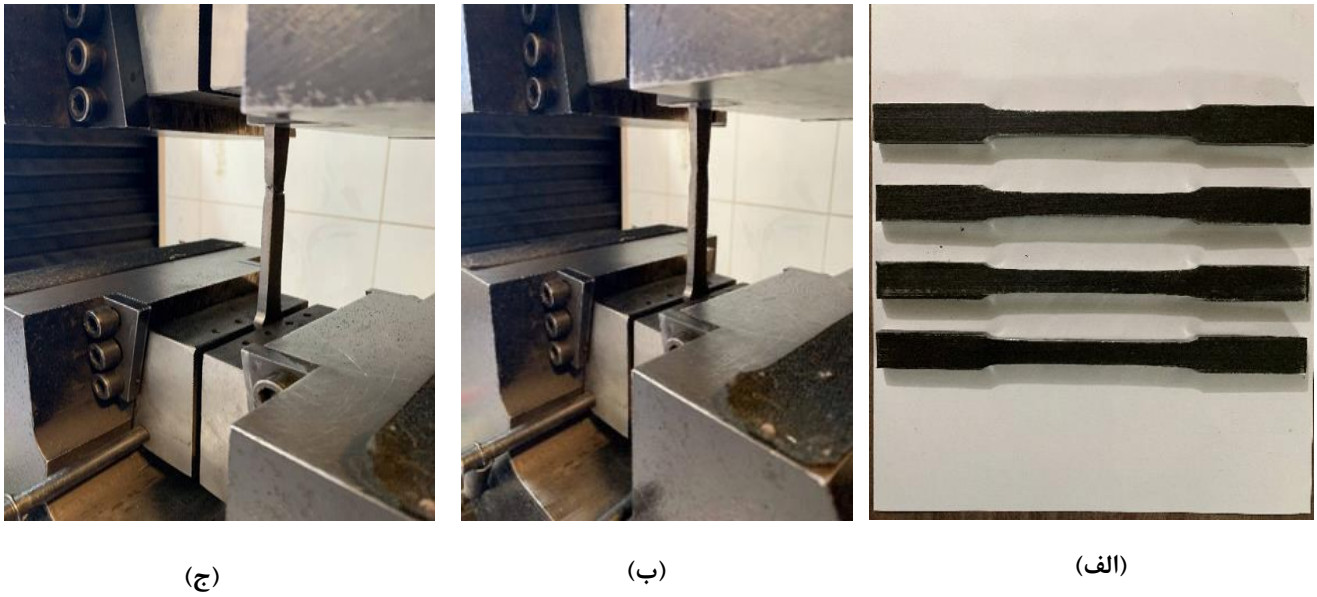
۳-۲- مشخصات فولاد

مشخصات فولاد مورد استفاده پس از انجام آزمایش تست کششی در جدول شماره ۲ مشخص شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، فولاد مورد استفاده بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ایران از نوع فولاد نرمه ST37 می‌باشد.

۲- مشخصات ستون‌های مورد استفاده

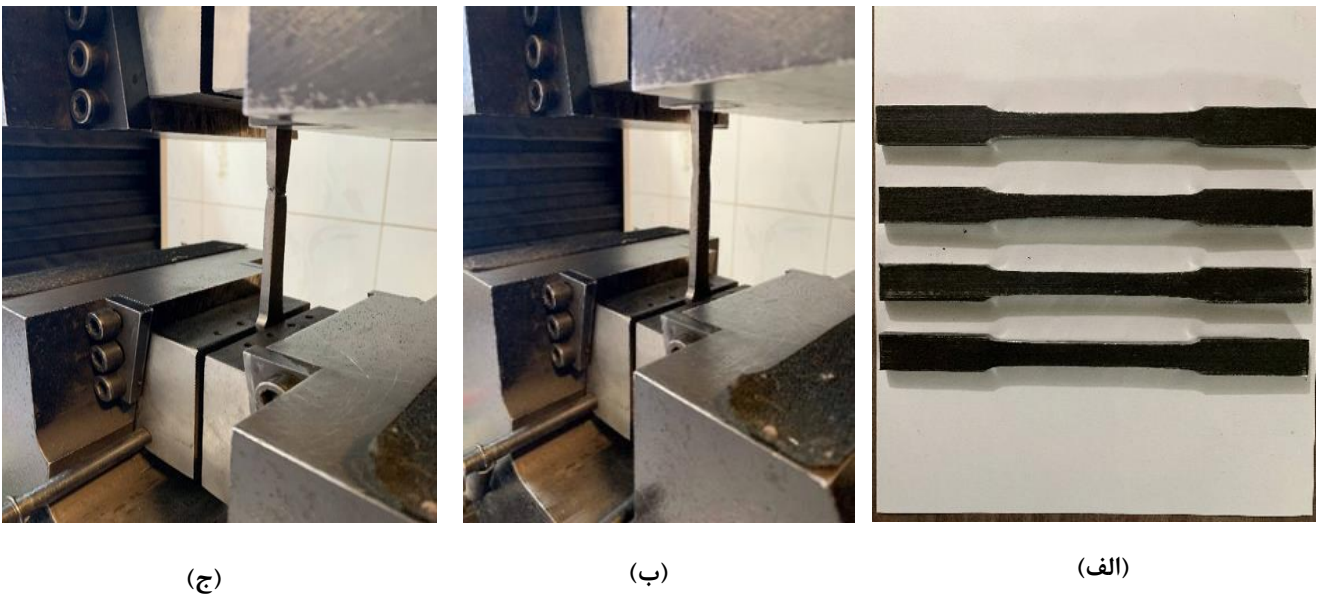
سطح مقطع ستون‌های مورد استفاده $100 \times 100 \times 5$ میلی‌متر و ارتفاع هر کدام از ستون‌ها نیز ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شرایط تکیه‌گاهی در دو انتهای ستون در بالا به صورت مفصلی و در پایین به صورت صلب در نظر گرفته شده است، به طوری که در بالا یک صفحه فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و در پایین یک صفحه فولادی به همراه هشت لچکی برای استحکام بیشتر در انتهای ستون‌ها جوش داده شده است. به دلیل ایجاد نمونه‌هایی با شرایط تکیه‌گاهی گیرداری که همواره در عمل نیز امکان‌پذیر است، مقدار طراحی ضریب طول مؤثر کمانش جهت ستون‌های مورد بحث 0.7 در نظر گرفته می‌شود. ستون انتخابی در محدوده ستون‌هایی با کمانش غیرارتجاعی بوده، به گونه‌ای که ستون در رده ستون‌های متوسط قرار می‌گیرد. ضریب لاغری $(\lambda=KL/t)$ برابر $18/66$ در ستون‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نمونه‌های مورد استفاده، $2U$ نشان‌دهنده دویل ناودانی، W نشان‌دهنده محل نقص در جوش، C نشان‌دهنده الیاف CFRP و عدد بعد از آن تعداد لایه CFRP دورپیچ را نشان می‌دهد. مشخصات نمونه‌ها، پارامترهای نقص در جوش و ضخامت الیاف CFRP در جدول ۱ مشخص شده است.

همان‌طور که در نمونه‌های فوق بیان شد، پوشش الیاف CFRP در محل‌ها به ترتیب برای نقص‌هایی با طول ۷۵۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع تمامی ستون‌ها ۱۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مشخصات مصالح فولادی به کار رفته طبق آزمایش تست کششی به دست آمده است. شکل ۱ مشخصات تمامی نمونه‌ها، ارتفاع نقص در جوش



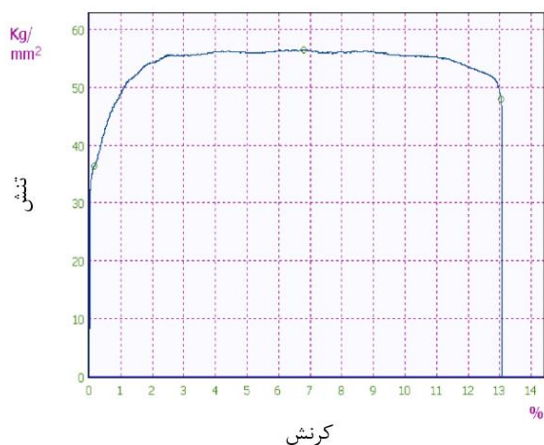
شکل ۱. مشخصات ابعاد هندسی نمونه ها

Fig. 1. Measured geometric dimensions of the specimens



شکل ۲. (الف) نمونه‌های تست کششی، (ب) انجام آزمایش تست کششی نمونه‌ها، (ج) نمونه‌ای از گسیختگی نمونه پس از آزمایش تست کششی

Fig. 2. (a) Tension test specimens, (b) Carrying out the tensile test of the specimens, (c) Sample of the failure of the specimen after the tension test



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش برای مواد فولادی

Fig. 3. Stress-strain curve for steel material

جدول ۲. مشخصات مواد ستون‌های فولادی

Table 2. Material properties of steel columns

ردیف	شماره آزمایشگاهی نمونه	مشخصات نمونه	نوع آزمایش	ابعاد ورق در آزمایش		سطح مقطع ورق فولادی (cm ²)	تنش تسلیم (Yield) (Mpa)	تاب نهایی کششی (Peak) (Mpa)	ازدیاد طول نسبی در حد گسیختگی
				عرض (mm)	ضخامت (mm)				
۱	۱-۱۶۶۱۴	ورق ارسالی مطابق الگوی کوچک استاندارد	کشش	۱۲/۵۰	۶	۰/۷۵	۳۴۲	۵۴۹	۲۵/۴
۲	۲-۱۶۶۱۴	ورق ارسالی مطابق الگوی کوچک استاندارد	کشش	۱۲/۵۰	۶	۰/۷۵	۳۵۷	۵۵۳	۲۳/۷
۳	۳-۱۶۶۱۴	ورق ارسالی مطابق الگوی کوچک استاندارد	کشش	۱۲/۵۰	۶	۰/۷۵	۳۳۸	۵۵۲	۲۷/۱
۴	۴-۱۶۶۱۴	ورق ارسالی مطابق الگوی کوچک استاندارد	کشش	۱۲/۵۰	۶	۰/۷۵	۳۷۲	۵۵۵	۲۸/۲

جدول ۳. مشخصات مواد الیاف کربن [۱۱].

Table 3. Material properties of carbon fiber [11].

عرض (mm)	ضخامت (mm)	کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
۵۰۰	۰/۱۳۱	۱/۸	۲۳۸۰۰۰	۴۳۰۰

جدول ۴. مشخصات چسب Sikadur-۳۳۰ [۱۲].

Table 4. Properties of the adhesive Sikadur-330 [12].

مقاومت کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)	مدول کششی (MPa)	درصد افزایش طول (%)
۳۰	۳۸۰۰	۴۵۰۰	۰/۹

تعداد هشت لچکی در کف هر کدام از ستون‌ها در چهار وجه استفاده شد. به منظور بررسی و تحلیل ظرفیت باربری و عملکرد ستون‌ها تحت نیروی فشاری محوری جهت ایجاد شرایط گیرداری تکیه‌گاهی و شاقول بودن، نمونه‌های آزمایشگاهی انتخابی، به گونه‌ای روی تکیه‌گاه قرار داده شد تا اطمینان حاصل شود که خط مرکزی آن دقیقاً هم‌تراز با محور جک باشد. ابعاد نقص و نمونه‌ها قبل از بارگذاری به دقت اندازه‌گیری شدند. بار فشاری محوری با استفاده از جک هیدرولیک بر روی ستون‌ها اعمال گردید. تغییر مکان توسط دو میله متحرک خطی (LVDT) که جهت اندازه‌گیری تغییر مکان عمودی در دو سر لودسل تعبیه گردیده، ثبت شد و نمودار نیرو-تغییر مکان آن‌ها توسط نرم‌افزار Lab view به دست آمد. در هر مرحله بارگذاری بر روی ستون‌ها، دقت دستگاه با بررسی نحوه صحیح قرار گرفتن LVDT ها و ستون در زیر جک دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. سپس بار محوری توسط پمپ اعمال بار به آهستگی با سرعت بارگذاری ثابت اعمال گردید و ستون با اعمال بار فشاری با افزایش‌های اندک تحت آزمایش قرار گرفت و مشاهده رخدادهایی مانند تغییر شکل محوری و بار نهایی توسط نرم‌افزار و دیتالاگر ۱۶ کاناله به دقت ثبت گردید. شکل ۴ نمونه‌ای از ستون‌های مورد بحث، ابزارهای متصل و مشخصات آزمایشگاهی را برای ستون تحت اثر بار محوری نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش فشاری پرداخته خواهد شد.

۳-۳- مشخصات CFRP

الیاف CFRP مورد استفاده در این پژوهش، از نوع یک جهته با نام C-Sikawrap230 و مشخصات کارخانه‌ای ارائه شده در جدول ۳ می‌باشد.

۳-۴- مشخصات چسب

چسب مورد استفاده به منظور اتصال بین فولاد و الیاف CFRP، وظیفه انتقال نیرو بین آن دو را بر عهده دارد و اجرای سازه‌ای یکپارچه‌ای را برای ستون و کامپوزیت‌ها به وجود می‌آورد. ورق‌های CFRP با چسب اپوکسی Sikadur-330 به سطح ستون متصل شده است. جدول ۴ مشخصات چسب مورد استفاده را نشان می‌دهد.

۴- روش آزمایشگاهی

جهت انجام امور آزمایشگاهی، تعداد هفت ستون برای انجام آزمایش در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان انتخاب شدند. نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری توسط دستگاه جک بارگذاری فشاری با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن و لودسل با ظرفیت ۴۵۰ کیلونیوتن تا شکست تحت آزمایش قرار گرفتند. در نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده، الیاف CFRP برای محصور کردن نمونه‌ها در اطراف محل نقص، به صورت دورپیچ کامل شامل دو لایه، اولین لایه عمود بر جهت اعمال بار و لایه دوم در جهت اعمال بار و با ارتفاعی متناظر با طول هر کدام از نقص‌ها اعمال گردید [۱۳]. همچنین



شکل ۴. ستون فولادی در جک هیدرولیکی و قرارگیری LVDT

Fig. 4. Steel columns in hydraulic jack and installation of LVDT

میکسر بادی، همزن، پمپ ارلس، ماسه و داربست به محل انجام کار منتقل می‌شوند. کلیه ماشین‌آلات، تجهیزات، ابزار و مصالح مورد استفاده در عملیات‌های سندبلاست باید مطابق استانداردهای ذیربط بوده و مورد تأیید واحد نظارت باشد. به لحاظ شرایط جوی و مساعد بودن هوا، سندبلاست که عمدتاً بر اساس استاندارد سوئدی S1/21SA انجام می‌گیرد، شروع و پس از اتمام سندبلاست هر ناحیه، در همان روز ۲۰ دقیقه بعد از هواگیری و تمیز نمودن سطح کار مراحل بعدی صورت می‌پذیرد. البته پس از تأیید دستگاه نظارت و رعایت مسائل فنی از قبیل ضخامت مناسب لایه، تمیزی کاری و عدم وجود هر نوع خلل و فرج سطح رنگ و هر نوع عیب دیگر، عملیات اجرا می‌شود. شکل ۵ فرآیند سندبلاست را نشان می‌دهد.

۴-۱-۳- آماده کردن ستون‌های فولادی و مقاوم‌سازی محل نقص

قبل از انجام مراحل مقاوم‌سازی باید تمام آلودگی‌های سطح فولاد و الیاف عاری از هرگونه رطوبت و ماده دیگری باشد. سپس به منظور چسباندن الیاف CFRP بر روی ستون‌های فولادی، چسب که از دو بخش A و B تشکیل شده است به نسبت ۴ به ۱ مخلوط شده و حداقل به مدت سه دقیقه دو جزء با هم ترکیب می‌شوند. این عمل باید به وسیله یک سر مته مخلوط‌کن که به یک مته الکتریکی وصل شده با سرعت کم انجام شود،

۴-۱-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

۴-۱-۱-۱- برش دادن نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی انتخابی، ابتدا چهارده ناودانی شماره ۱۰ به ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده و به صورت قطعی‌های مربعی شکل که هر وجه آن بعد از جوشکاری ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد آماده می‌شود. سپس برای تراز بودن دقیق سطح ستون‌ها، هفت صفحه فولادی به ابعاد ۲۰×۱۵×۵ میلی‌متر در سر ستون‌ها جهت اعمال بار به صورت محوری و در کف ستون‌ها جهت ایجاد تکیه‌گاه در نظر گرفته می‌شود. جهت گیرداری کف ستون‌ها از هشت لچکی در چهار وجه دور تا دور ستون که سهم هر وجه، دو لچکی به ابعاد ۱۰×۵×۵ میلی‌متر می‌باشد، استفاده شد. در ادامه با توجه به الگوهای نقص ذکر شده در نمونه‌ها، نقص‌هایی به ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر برای ستون‌های 2UW1 و نقص‌هایی به ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر برای ستون‌های 2UW2 و همچنین نقص‌هایی به طول ۷۵۰ میلی‌متر برای ستون‌های 2UW3 در نظر گرفته شد. علت انتخاب نقص‌ها با توجه به نسبت ارتفاع ستون‌های مورد نظر انتخاب گردید.

۴-۱-۲- سندبلاست نمونه‌های مورد آزمایش

ابتدا کلیه وسایل، تجهیزات و مصالح مورد نیاز از قبیل کمپرسور باد،



شکل ۵. فرآیند سندبلاست (الف) محل سندبلاست و آماده‌سازی نمونه‌ها، (ب) سندبلاست محل نقص نمونه‌ها، (ج) نمونه‌ای از ستون‌ها بعد از انجام عملیات سندبلاست

Fig. 5. Sand blasting process (a) place of sand blasting and preparation of specimens, (b) sand blasting of defective areas of specimens, (c) a specimen of columns after sand blasting



شکل ۶. مراحل آماده‌سازی چسب و اپوکسی

Fig. 6. Adhesive and epoxy preparation steps

از قلم‌موی رنگ‌آمیزی، ستون‌های فولادی و ورق‌های CFRP به چسب آغشته شده و بر اساس الگوی مقاوم‌سازی، الیاف به دور ستون‌های مورد نظر در محل‌های نقص جوش پیچیده می‌شوند. بر روی هر لایه از الیاف نیز مجدداً یک لایه چسب دیگر زده شده تا برای چسباندن لایه بعدی آماده شود. سپس نمونه‌های دارای الیاف با توجه با بروشور الیاف CFRP به مدت یک هفته در محیط آزمایشگاه گذاشته شده تا برای انجام سایر مراحل آزمایش آماده شوند. چسباندن الیاف CFRP به نمونه در شکل ۷ آورده شده است. و همچنین شکل ۸ تعدادی از ستون‌های آماده شده بعد از مقاوم‌سازی با استفاده از الیاف CFRP برای انجام آزمایش فشاری در زیر جک بارگذاری را نشان می‌دهد.

تا اینکه به ماده‌ای نرم و طوسی رنگ تبدیل شود. از طرفی باید دقت شود که در هنگام مخلوط کردن چسب از هواگیری آن جلوگیری به عمل آید. در ادامه مخلوط چسب در ظرف تمیزی ریخته شده و مجدداً به مدت یک دقیقه با سرعت کم به هم زده می‌شود تا میزان هوای محبوس در آن به حداقل برسد. شکل ۶ نمونه‌ای از چسب و اپوکسی مورد استفاده و نحوه آماده‌سازی چسب را نشان می‌دهد.

با محاسبه طول و عرض الیاف مورد نیاز و در نظر گرفتن ۲۰ میلی‌متر اورلب، به کمک یک قیچی ساده، الیاف CFRP برش داده می‌شوند. علاوه بر این به منظور تمیز بودن سطح الیاف، ورق‌های CFRP برش خورده نیز توسط استون و پنبه تمیز می‌گردند. پس از آماده‌سازی الیاف، با استفاده



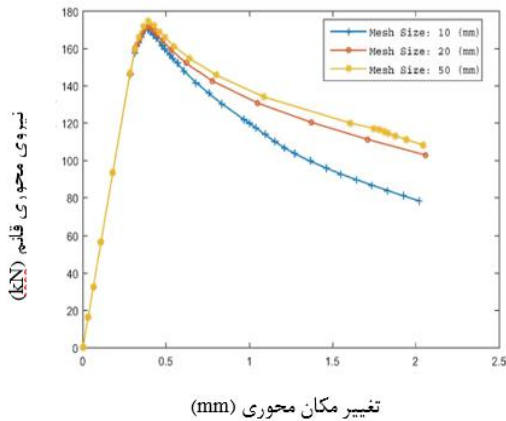
شکل ۷. چسباندن الیاف CFRP به نمونه

Fig. 7. Attaching CFRP fibers to the specimen



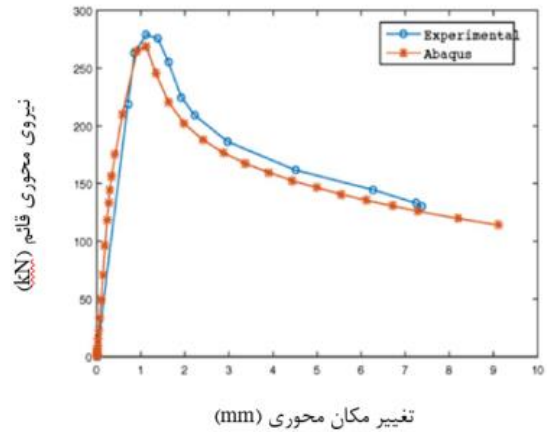
شکل ۸. مقاوم‌سازی نقص‌ها توسط الیاف CFRP و آماده شدن نمونه‌ها برای فرآیند بارگذاری

Fig. 8. Strengthening of defects by CFRP fibers and preparation of specimens for loading process



شکل ۱۰. مطالعات اندازه مش بندی

Fig. 10. Mesh size studies



شکل ۹. نتایج به دست آمده از اعتبارسنجی [۱۴].

Fig 9. Validation results [14].

۵- روش مدل سازی نمونه ها در نرم افزار آباکوس

برای مدل سازی نمونه ها از نرم افزار آباکوس ورژن ۲-۱۴-۶ استفاده شده است. به منظور آنالیز رفتار ستون ها، کمانش های موضعی و کلی نمونه ها، مدل های فولاد، چسب و CFRP از المان های سه بعدی هشت نقطه ای (3D-8R) استفاده شد. روش آنالیز استاتیکی از نوع استاتیک ریکس برای مشاهده بهتر کمانش موضعی نمونه ها در ناحیه کمانش انتخاب گردید. مشخصات مصالح برای صفحات فولادی، الیاف CFRP، تنش جاری شدن و تنش نهایی ستون های دابل ناودانی برابر با مقادیر به دست آمده از نتایج تست کششی استفاده شده و ضریب پواسون برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. تکیه گاه ها در یک طرف ستون ها گیردار و در طرف دیگر مفصلی در نظر گرفته شد. برای اتصال بین CFRP و چسب با ستون از دستور اتصال Tie استفاده گردید و مشخصات غیرخطی و ایزوتروپیک^۱ مصالح فولادی تعریف و مشخصات CFRP به علت یک جهته بودن از نوع خطی و ارتوتروپیک^۲ معرفی شد. بدین منظور ابتدا دقت نرم افزار با توجه به نتایج تحقیق پارک و همکاران [۱۴] اعتبارسنجی گردید. معیار همگرایی در این شبیه سازی ها بر اساس نیرو-جابجایی و رسیدن به بار بحرانی ستون و بررسی رفتار پس از کمانش آن بوده است. با توجه به این سنجش مشخص شد که منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه مدل سازی شده به روش اجزای محدود انطباق مناسبی با نمونه آزمایشگاهی داشته و بنابراین می توان نتیجه گرفت که پارامترهای

- 1 Isotropic
- 2 Orthotropic

مختلف مدل سازی از قبیل اندازه مش، شرایط مرزی و خواص مصالح به درستی انتخاب و اعمال شده است. نتایج حاصل از دو حالت مقاوم سازی شده آزمایشگاهی و مطالعه عددی توسط نرم افزار در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین جهت تعیین اندازه سائز مش برای انجام مطالعات عددی، سه اندازه مش ۱۰، ۲۰ و ۵۰ میلی متر مطابق شکل ۱۰ بررسی شده است. در ابتدا میزان حداکثر بار محوری فشاری برای نمونه مورد نظر با در نظر گرفتن هر یک از سائزهای مش بیان شده محاسبه گردید. سپس اندازه مشی که بزرگترین مقدار نیروی قابل تحمل محوری را با مشخص کردن مدهای پس از کمانش ستون در برداشته، به عنوان سائز مش مورد نظر برای تحلیل سایر نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت.

۶- بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی

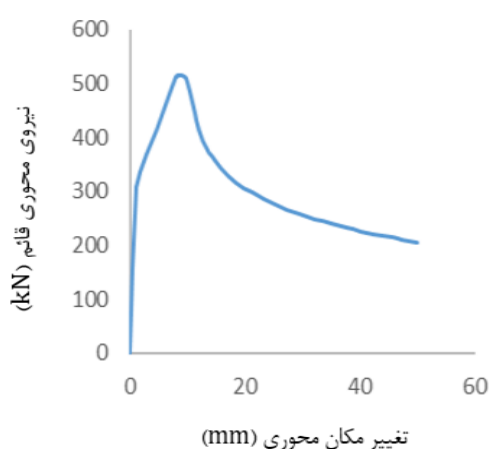
۶-۱- رفتار ستون CONTROL در گروه ۱

گروه یک تنها شامل یک ستون به عنوان نمونه CONTROL با سطح مقطع ۵×۱۰۰×۱۰۰ بوده که دارای یک جوش سرتاسری و بدون الیاف CFRP می باشد. در جدول ۵ نتایج حداکثر نیروی محوری و سختی ستون در نمونه CONTROL، به دست آمده در آزمایشگاه و مدل سازی نرم افزاری نشان داده شده است. شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نشان دهنده نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی برای ستون CONTROL دارای جوش سرتاسری و بدون استفاده از الیاف CFRP می باشند. با توجه به این دو شکل می توان مشاهده کرد که تطابق خوبی بین

جدول ۵. نتایج به دست آمده از بارگذاری آزمایشگاهی و مدل‌سازی نمونه‌های گروه ۱

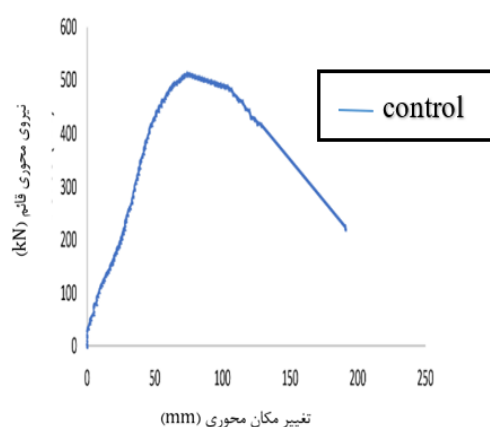
Table 5. Summary of Test and FEM results of group 1

نام نمونه	حداکثر نیروی محوری و سختی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
CONTROL	حداکثر نیرو (kN)	۵۱۲	۵۱۶/۲
CONTROL	سختی (kN/mm)	۶۹/۱۸	۵۹/۶



شکل ۱۲. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج مدل‌سازی برای ستون CONTROL

Fig. 12. Force-displacement obtained from modelling results for CONTROL column



شکل ۱۱. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی برای ستون CONTROL

Fig. 11. Force-displacement obtained from experimental results for CONTROL column

در ستون‌های این گروه مشاهده می‌گردد. شکل ۱۳ توزیع تنش و کمانش موضعی در بالای ستون CONTROL که بر اثر بارگذاری محوری ایجاد شده را نشان می‌دهد.

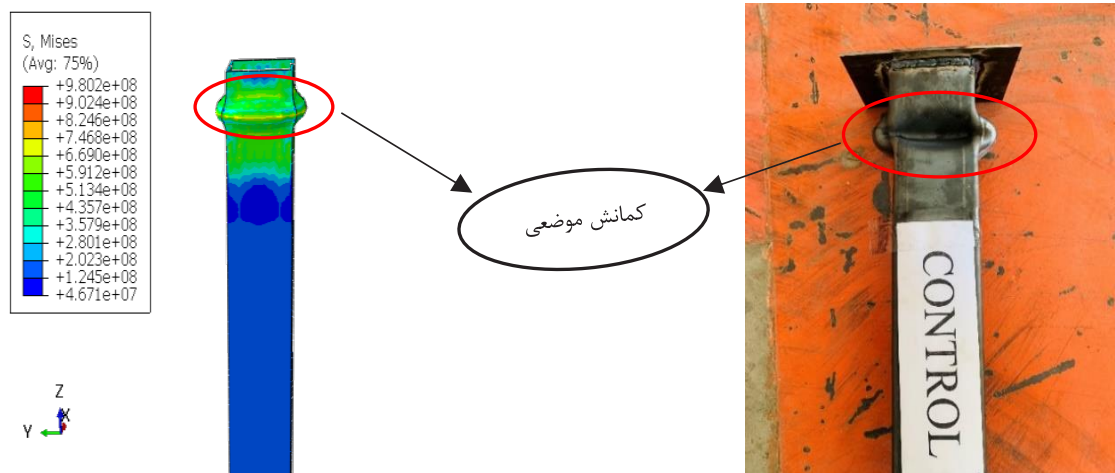
۶-۲- رفتار ستون‌ها در گروه ۲

این گروه شامل دو ستون قوطی شکل فولادی 2UW1 و 2UW1C1 می‌باشد. جدول ۶ حداکثر نیروی قابل تحمل محوری و سختی ستون‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این جدول بیانگر آن است که نمونه آزمایشگاهی مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، نیروی قابل تحمل محوری را ۴/۸ درصد و سختی را ۶۵/۹ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده افزایش داده است. همچنین نمونه مدل‌سازی مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP،

نتایج وجود دارد. علاوه بر این با توجه به جدول ۵، حداکثر نیروی محوری برای ستون CONTROL در نمونه آزمایشگاهی نسبت به مدل‌سازی به میزان ۰/۸ درصد کاهش یافته است. همچنین میزان سختی برای این ستون در مدل‌سازی آزمایشگاهی نسبت به عددی به میزان ۱۶/۱ درصد افزایش یافته است.

۶-۱-۱- مدهای شکست در ستون CONTROL در گروه ۱

در این گروه مدهای شکست ستون CONTROL در دو حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مد شکست در این ستون‌ها به صورت کمانش کلی قابل مشاهده نیست، لذا در این حالت تغییر شکل‌های محلی به صورت کمانش موضعی در اطراف محل نقص



شکل ۱۳. مقایسه مدهای شکست برای نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی برای ستون CONTROL

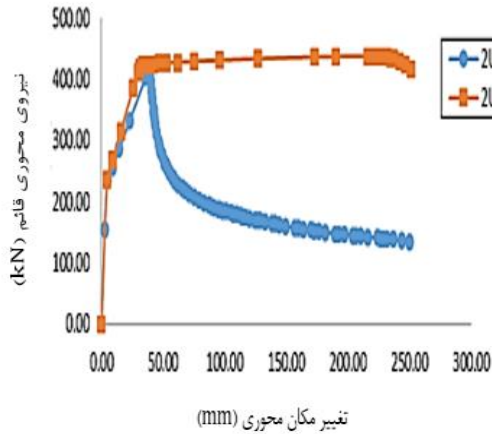
Fig. 13. Comparison of failure modes for experimental and modelling specimens for CONTROL column

و ۱۵ نمودارهای نیرو به تغییر مکان محوری در نمونه‌ها و همچنین جدول ۵ نتایج حاصل از مقایسه آزمایشگاهی و مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی ظرفیت باربری بالاتری نسبت به نمونه‌های مدل‌سازی دارند، که این امر نشان‌دهنده انجام صحیح مقاوم‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه و استفاده صحیح از چسب و الیاف می‌باشد.

۶-۲-۱- مدهای شکست ستون‌های گروه ۲

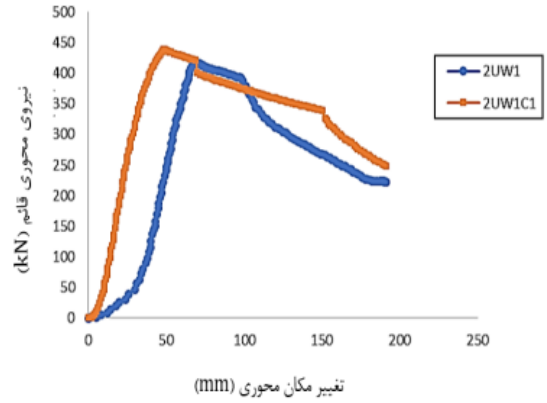
مد شکست در این ستون‌ها به صورت کمانش کلی قابل مشاهده است لذا در این حالت تغییر شکل‌های محلی به صورت کمانش موضعی در اطراف محل نقص در ستون‌های این گروه مشاهده می‌گردد. شکل ۱۶ توزیع تنش و کمانش موضعی در قسمت بالایی و میانی ستون که بر اثر بارگذاری محوری در محل نقص ایجاد شده است را نشان می‌دهد. در شکل ۱۷ کمانش به صورت موضعی در قسمت میانی و پایین نمونه 2UW1C1 مشاهده می‌شود که در این حالت با توجه به مقاوم‌سازی قسمت دارای نقص در بالای ستون توسط الیاف این کمانش‌ها به نیمه پایین ستون منتقل شده است. با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مدهای کمانش در دو حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی مشابه یکدیگر می‌باشند. همچنین می‌توان بیان کرد که استفاده از الیاف CFRP کمانش را به تعویق انداخته و مدهای شکست را به سایر قسمت‌های ستون منتقل کند.

نیروی قابل تحمل محوری را ۴/۴ درصد و سختی را ۸۷/۱ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده افزایش داده است. در نمونه آزمایشگاهی مشاهده شد که نمونه مقاوم‌سازی شده توانست نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده در حدود ۲ کیلونیوتن بار محوری بیشتری را تحمل کند. همچنین در نمونه مدل‌سازی هم تمام نتایج نشان دهنده افزایش توان باربری محوری در نمونه مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه بدون الیاف و مقاوم‌سازی نشده می‌باشد، که این افزایش برای این نمونه در حدود ۷/۱ کیلونیوتن مشاهده شد. همچنین نمونه آزمایشگاهی 2UW1، نیروی قابل تحمل محوری را ۱۸/۲ درصد و سختی را ۲۰/۳ درصد نسبت به نمونه CONTROL کاهش داده است. همچنین نمونه مدل‌سازی 2UW1، نیروی قابل تحمل محوری را ۱۹ درصد و سختی را ۹/۴ درصد نسبت به نمونه CONTROL کاهش داده است. علاوه بر این نوع شکست در نمونه با الیاف CFRP بسیار شکل مناسب‌تری نسبت به شکل شکست در نمونه بدون استفاده از الیاف داشت. به این صورت که در نمونه با الیاف که در قسمت نقص مقاوم‌سازی شده است از هم‌گسستگی در این ناحیه مشاهده نمی‌شود لذا تمام تغییرات در قسمت میانی و پایینی ستون رخ داد که این از نتایج خوب مقاوم‌سازی در نیمه بالای ستون مورد نظر می‌باشد. همچنین مشاهده شد که در ستون مقاوم‌سازی نشده این گسستگی باعث به وجود آمدن شیارهای بسیار در ناحیه نقص جوش شد و با افزایش روند بارگذاری نیز با یک کمانش کلی همراه بود. در نمونه مقاوم‌سازی شده در این گروه نیز دو کمانش موضعی و محلی در دو سمت ستون به همراه یک کمانش کلی مشاهده می‌شود. شکل‌های ۱۴



شکل ۱۵. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج مدل‌سازی برای ستون‌های 2UW1 و 2UW1C1

Fig. 15. Force-displacement obtained from modelling results for 2UW1 and 2UW1C1 columns



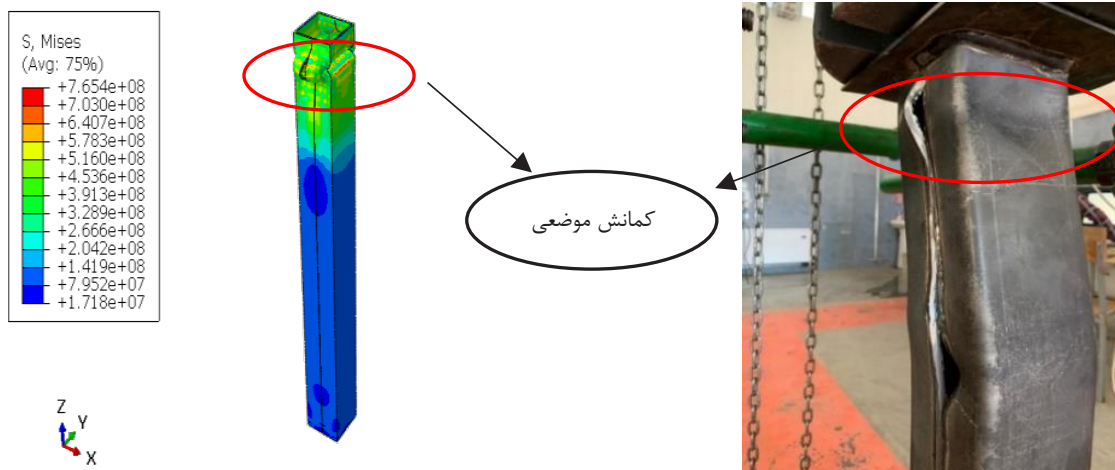
شکل ۱۴. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی برای ستون‌های 2UW1 و 2UW1C1

Fig. 14. Force-displacement obtained from experimental results for 2UW1 and 2UW1C1 columns

جدول ۶. نتایج به دست آمده از بارگذاری آزمایشگاهی و مدل‌سازی نمونه‌های گروه ۲

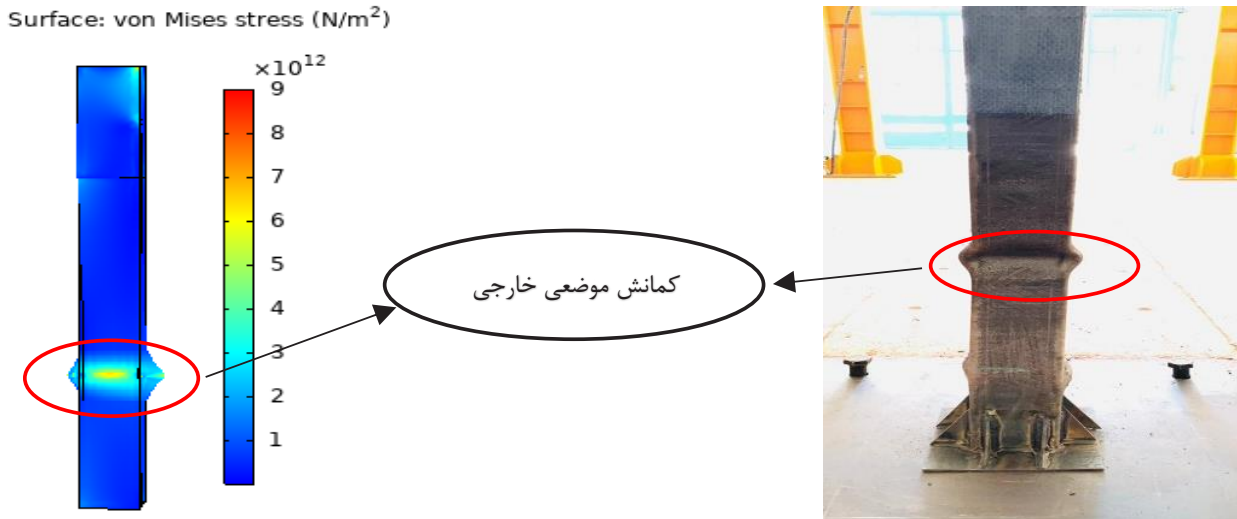
Table 6. Summary of Test and FEM results of group 2

نام نمونه	حداکثر نیروی محوری و سختی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
2UW1	حداکثر نیرو (kN)	۴۱۹	۴۱۸/۳
2UW1	سختی (kN/mm)	۵۵/۱۳	۵۳/۹۷
2UW1C1	حداکثر نیرو (kN)	۴۳۹	۴۳۶/۶۴
2UW1C1	سختی (kN/mm)	۹۱/۴۵	۱۰۱



شکل ۱۶. کمانش موضعی در آزمایشگاه و مدل‌سازی برای ستون فولادی 2UW1 بدون استفاده از الیاف CFRP

Fig. 16. Local buckling in the experimental and modelling for the 2UW1 steel column without using CFRP fibers



شکل ۱۷. حالت‌های کمانش موضعی و کلی در آزمایشگاه و مدل‌سازی برای ستون فولادی 2UW1C1 و مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP

Fig. 17. Local and general buckling modes in experimental and modelling for 2UW1C1 steel column reinforced with CFRP fibers

جدول ۷. نتایج به دست آمده از بارگذاری آزمایشگاهی و مدل‌سازی نمونه‌های گروه ۳

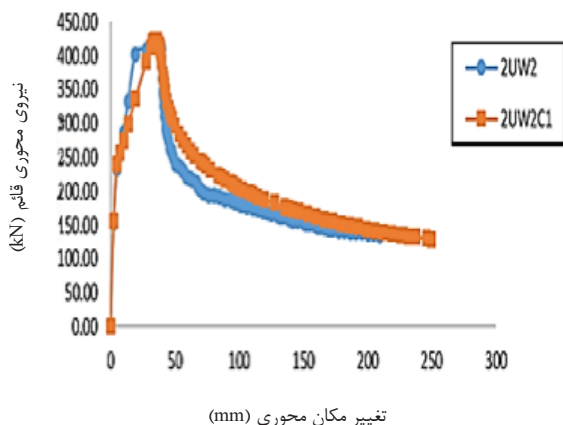
Table 7. Summary of Test and FEM results of group 3

نام نمونه	حداکثر نیروی محوری و سختی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
2UW2	حداکثر نیرو (kN)	۴۱۵	۴۱۶/۵
2UW2	سختی (kN/mm)	۵۵/۳۳	۵۹/۲۴
2UW2C1	حداکثر نیرو (kN)	۴۲۱	۴۲۳/۷۱
2UW2C1	سختی (kN/mm)	۹۶/۵۱	۹۸/۵

۷۲۱ مشاهده شد. همچنین نمونه آزمایشگاهی 2UW2، نیروی قابل تحمل محوری را ۱۸/۹ درصد و سختی را ۲۰ درصد نسبت به نمونه CONTROL کاهش داده است. همچنین نمونه مدل‌سازی 2UW2، نیروی قابل تحمل محوری را ۱۹/۳ درصد و سختی را ۰/۶ درصد نسبت به نمونه CONTROL کاهش داده است. همچنین نوع شکست در نمونه مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده بسیار شکل مناسب‌تری دارد، به این صورت که در نمونه مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP که در قسمت نقص مقاوم‌سازی انجام شده است، از هم‌گسستگی در این ناحیه مشاهده نمی‌شود. در نمونه مقاوم‌سازی شده در این گروه نیز فقط یک کمانش موضعی و محلی در قسمت پایینی ستون مشاهده می‌شود. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی برای ستون‌های فولادی 2UW2 و 2UW2C1 را نشان می‌دهد.

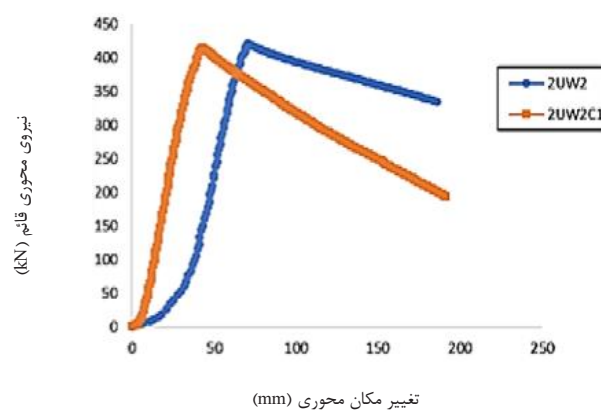
۳-۶ رفتار ستون‌ها در گروه ۳

این گروه شامل دو ستون قوطی شکل فولادی 2UW2 و 2UW2C1 می‌باشد. نتایج جدول ۷ بیانگر آن است که نمونه آزمایشگاهی مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، نیروی قابل تحمل محوری را ۱/۵ درصد و سختی را ۷۴/۴ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده افزایش داده است. همچنین نمونه مدل‌سازی مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، نیروی قابل تحمل محوری را ۱/۷ درصد و سختی را ۶۶/۳ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده افزایش داده است. در نمونه آزمایشگاهی مشاهده شد که نمونه مقاوم‌سازی شده توانست نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده، در حدود ۶۰۰ kg بار محوری بیشتری را تحمل کند، همچنین در نمونه مدل‌سازی نیز نتایج نشان‌دهنده افزایش ظرفیت باربری محوری در نمونه مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده می‌باشد، که این افزایش برای این نمونه در حدود ۱۴۸۰



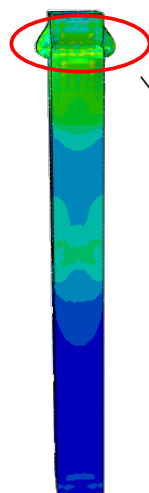
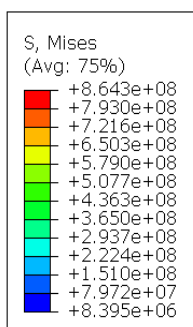
شکل ۱۹. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج مدل‌سازی برای ستون‌های 2UW2 و 2UW2C1

Fig. 19. Force-displacement obtained from modelling results for 2UW2 and 2UW2C1 columns



شکل ۱۸. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی برای ستون‌های 2UW2 و 2UW2C1

Fig 18. Force-displacement obtained from experimental results for 2UW2 and 2UW2C1 columns



کمانش موضعی



شکل ۲۰. حالت‌های کمانش موضعی و کلی در آزمایشگاه و مدل‌سازی برای ستون فولادی 2UW2 و بدون استفاده از الیاف CFRP

Fig. 20. Local and general buckling modes in the experimental and modelling for the 2UW2 steel column without using CFRP fibers

نقص ایجاد شده است را نشان می‌دهد. شکل ۲۰ نیز کمانش به صورت موضعی در قسمت پایینی نمونه 2UW2C1 را نشان می‌دهد. همچنین CFRP باعث می‌شود که کمانش موضعی در این ستون‌ها به تأخیر بیفتد. همان‌طور که از شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشخص است، مدهای کمانش در دو حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی مشابه یکدیگر می‌باشند.

۱- ۳- ۶- مدهای شکست ستون‌های گروه ۳
مد شکست در این ستون‌ها به صورت کمانش کلی قابل مشاهده است لذا در این حالت تغییر شکل‌های محلی به صورت کمانش موضعی در اطراف محل نقص در ستون‌های این گروه مشاهده می‌گردد. شکل ۲۰ توزیع تنش و کمانش موضعی در نیمه بالای ستون که بر اثر بارگذاری محوری در محل



شکل ۲۱. حالت‌های کمانش موضعی و کلی در آزمایشگاه و مدل‌سازی برای ستون فولادی 2UW2C1 و مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP

Fig 21. Local and general buckling modes in experimental and modelling for 2UW2C1 steel column reinforced with CFRP fibers

برای این نمونه در حدود $10/2$ کیلونیوتن مشاهده شد. همچنین نمونه آزمایشگاهی 2UW3، نیروی قابل تحمل محوری را $32/8$ درصد و سختی را $49/8$ درصد نسبت به نمونه CONTROL کاهش داده است. همچنین نمونه مدل‌سازی 2UW3، نیروی قابل تحمل محوری را $32/3$ درصد و سختی را $21/4$ درصد نسبت به نمونه CONTROL کاهش داده است. علاوه بر این نوع شکست در نمونه مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده، بسیار شکل مناسب‌تری دارد. به این صورت که در نمونه مقاوم‌سازی شده با الیاف، از هم‌گسستگی در این ناحیه مشاهده نمی‌شود. لذا تمام تغییرات در قسمت میانی و پایینی ستون رخ داد که این از نتایج خوب مقاوم‌سازی در نیمه بالای ستون مورد نظر می‌باشد. در نمونه مقاوم‌سازی شده در این گروه نیز یک کمانش کلی در کنار یک کمانش موضعی و محلی در قسمت پایینی ستون مشاهده می‌شود.

شکل ۲۲ نتایج آزمایشگاهی ستون‌های فولادی 2UW3 و 2UW3C1 دارای نقص و مقاوم‌سازی شده با الیاف و بدون الیاف در پایین و شکل ۲۳ نیز نتایج مدل‌سازی این ستون‌ها را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس نشان می‌دهد. مقایسه عملکرد الیاف CFRP در تقویت محل نقص نشان می‌دهد که نمونه 2UW3C1 در شرایط آزمایشگاهی دارای ظرفیت باربری بالاتری به میزان ۵ درصد نسبت به نمونه مدل‌سازی 2UW3C1 هستند. همچنین این گروه با توجه به بیشترین طول نقص‌ها در هر دو نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی، بیشترین اختلاف در تحمل نیروی محوری در حالت بین مقاوم‌سازی شده و نشده مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشخص است در ستون 2UW2C1، اختلاف کمی بین نیروی قابل تحمل برای دو ستون با و بدون استفاده از الیاف به میزان $1/5$ و $1/7$ به ترتیب برای نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی وجود دارد. همچنین تمرکز تنش مشاهده شده در میانه ستون در تمامی موارد مدل‌سازی شده بیانگر این واقعیت می‌باشد که تمام فشار توسط الیاف مهار شده است. با توجه به اختلاف نیروی وارده محوری کم، مدهای شکست متفاوتی برای این دو ستون رقم خورده است، بنابراین می‌توان گفت که در این گروه با توجه به نزدیکی اعداد به یکدیگر شکست مشابهی در مدل‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های مدل‌سازی مشاهده می‌شود.

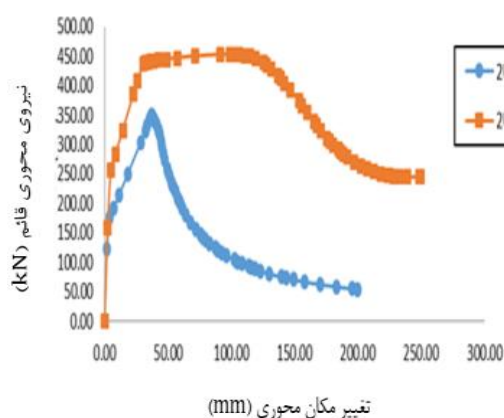
۴-۶ رفتار ستون‌ها در گروه ۴

این گروه شامل دو ستون قوطی شکل فولادی 2UW3 و 2UW3C1 می‌باشد، نتایج حاصل در جدول ۸ بیانگر آن است که نمونه آزمایشگاهی مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، نیروی قابل تحمل محوری را $29/9$ درصد و سختی را $86/5$ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده افزایش داده است. همچنین نمونه مدل‌سازی مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، نیروی قابل تحمل محوری را $21/7$ درصد و سختی را $33/9$ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده افزایش داده است. در نمونه آزمایشگاهی مشاهده شد که نمونه مقاوم‌سازی شده توانست نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده، در حدود $10/3$ کیلونیوتن بار محوری بیشتری را تحمل کند، همچنین در نمونه مدل‌سازی، نتایج نشان‌دهنده افزایش ظرفیت باربری محوری نمونه مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه مقاوم‌سازی نشده می‌باشد که این افزایش

جدول ۸. نتایج به دست آمده از بارگذاری آزمایشگاهی و مدل‌سازی نمونه های گروه ۴

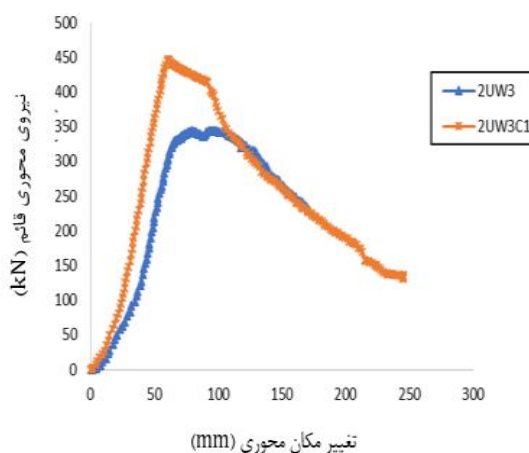
Table 8. Summary of Test and FEM results of group 4

نام نمونه	حداکثر نیروی محوری و سختی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج مدل‌سازی
2UW3	حداکثر نیرو (kN)	۳۴۴	۳۴۹/۵۴
2UW3	سختی (kN/mm)	۳۴/۷۴	۴۶/۸۵
2UW3C1	حداکثر نیرو (kN)	۴۴۷	۴۲۵/۴۹
2UW3C1	سختی (kN/mm)	۶۴/۷۸	۶۲/۷۵



شکل ۲۳. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج مدل‌سازی برای ستون‌های 2UW3 و 2UW3C1

Fig. 23. Force-displacement obtained from modelling results for 2UW3 and 2UW3C1 columns



شکل ۲۲. نیرو-تغییر مکان به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی برای ستون‌های 2UW3 و 2UW3C1

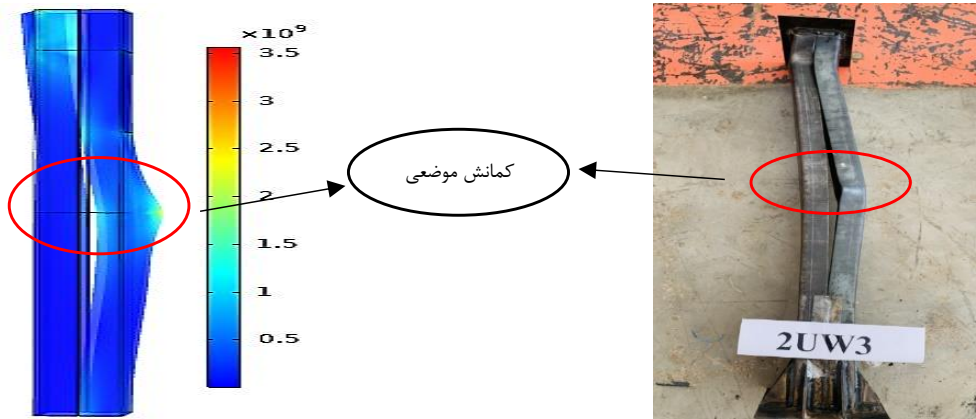
Fig. 22. Force-displacement obtained from experimental results for 2UW3 and 2UW3C1 columns

شروع جوشکاری در انتهای ستون می‌باشد. مقدار حداکثر نیروی محوری بر روی این نمونه مقدار ۳۴/۴ کیلو نیوتن می‌باشد که این مقدار کمترین مقدار تحمل نیرو در بین تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی است. همان‌طور که در تمامی شکل‌های ارائه شده در این گروه مشخص است، تغییر شکل‌های به دست آمده از مدل‌سازی ستون‌ها با استفاده از نرم‌افزار، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

همان‌طور که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود وجود بزرگترین نقص در تمامی نمونه‌ها با طول ۷۵۰ میلی‌متر در صورت مقاوم‌سازی با الیاف CFRP می‌توانند بیشترین تحمل نیروی محوری را در بین تمام نمونه‌ها بعد از نمونه

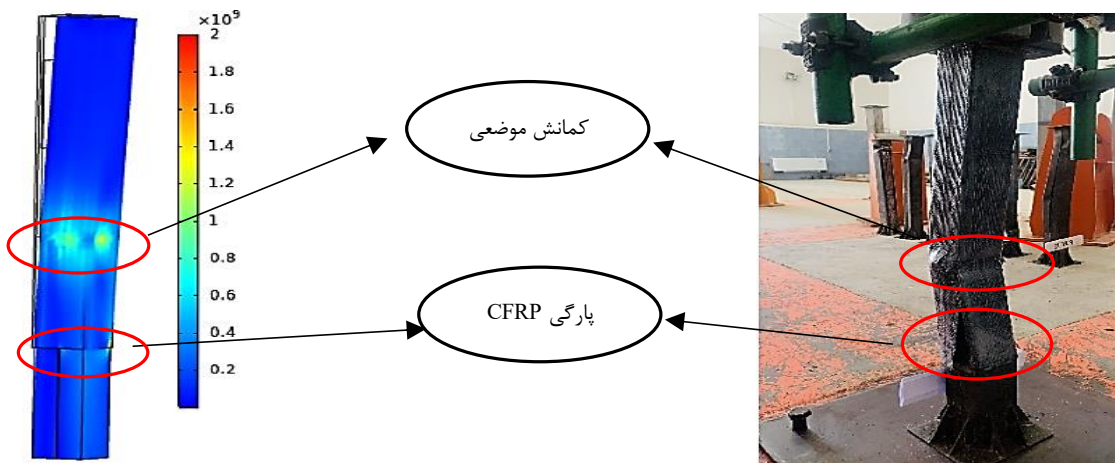
۶-۴-۱- مدهای شکست ستون‌های گروه ۴

شکل ۲۴ و ۲۵ توزیع تنش و کمانش موضعی را در اطراف محل نقص در ستون 2UW3 دارای نقص ۷۵۰ میلی‌متر به ترتیب برای حالت مقاوم‌سازی نشده و مقاوم‌سازی شده نشان می‌دهد. این نمونه ضعیف‌ترین نمونه در بین تمامی نمونه‌ها می‌باشد و کمترین بار محوری به میزان ۳۴۹/۵۴ کیلو نیوتن را می‌تواند تحمل کند. لذا مشاهده کمانش کلی به عنوان مد غالب کمانش و سپس کمانش موضعی در محل نقص‌ها از جمله نتایج قابل قبول از نمونه‌های مورد نظر می‌باشد. نتایج ناشی از شکست برای این نمونه نشان داد که جداسازی دو ناودانی از پایین تکیه‌گاه در بالا تا محل



شکل ۲۴. حالت‌های کمانش موضعی و کلی در آزمایشگاه و مدل‌سازی برای ستون فولادی 2UW3 بدون استفاده از الیاف CFRP

Fig 24. Local and general buckling modes in experimental and modelling for 2UW3 steel column without using CFRP fibers



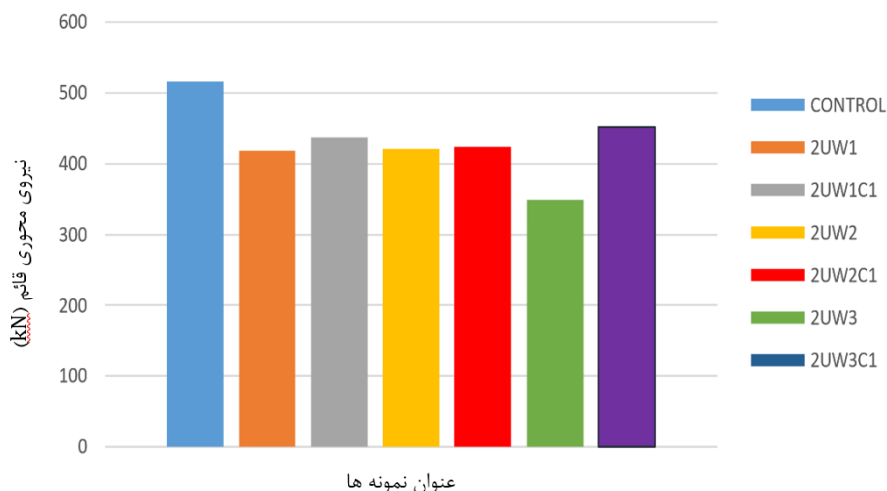
شکل ۲۵. حالت‌های کمانش موضعی و کلی در آزمایشگاه و مدل‌سازی برای ستون فولادی 2UW3C1 مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP

Fig. 25. Local and general buckling modes in experimental and modelling for 2UW3C1 steel column reinforced with CFRP fibers

۶-۵- مقایسه نتایج کلیه نمونه‌ها

پس از بررسی و تحلیل تمامی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش که شامل هفت نمونه بود، به مطالعه عددی و مقایسه کلیه ستون‌ها با یکدیگر در نرم‌افزار آباکوس از طریق یک نمودار میله‌ای پرداخته می‌شود. در این بررسی نمونه CONTROL با تحمل نیروی محوری ۵۱۶/۲۰ کیلونیوتن دارای حداکثر نیروی قابل تحمل در بین تمامی ستون‌های مدل‌سازی می‌باشد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که کمترین نیروی قابل تحمل نیز برای ستون 2UW3 با تحمل نیروی محوری ۳۴۹/۵۴ کیلونیوتن است که دلیل این امر، نقص جوش طولانی‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.

کنترل با جوش سرتاسری داشته باشند. استفاده از الیاف نقش به‌سزایی در مقاوم‌سازی بزرگترین طول نقص نسبت به تمامی نمونه‌ها دارد. همچنین استفاده از الیاف باعث کاهش تنش در محل تقویت می‌گردد. مدهای شکست در این ستون‌ها تقریباً مشابه ستون‌های گروه ۲ می‌باشد، به طوری که اکثر مطالب بیان شده برای آن ستون‌ها، در اینجا نیز قابل قبول می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت رفتار شکست در دو ستون با نقص‌های مشابه به‌گونه‌ای بود که در ستون مقاوم‌سازی‌نشده، تا مرحله شکست کامل و جداسازی دو نودانی پیش رفت.



شکل ۲۶. حداکثر ظرفیت باربری کلیه ستون‌ها در نمونه‌های مدل‌سازی بدون الیاف CFRP و مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP

Fig. 26. Maximum bearing capacity of all columns in modelling specimens without CFRP fibers and reinforced with CFRP fibers

المان محدود آباکوس مدل‌سازی گردید. یک ستون شاهد به عنوان اولین نمونه که هیچ نقصی بر روی آن قرار ندارد و سرتاسر جوشکاری شده است، مدل‌سازی گردید. سایر نمونه‌های دارای نقص با استفاده از الیاف CFRP مقاوم‌سازی شدند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که کمترین و بیشترین ظرفیت باربری مربوط به ستون 2UW3 می‌باشد که ۳۲/۳ درصد نسبت به ستون شاهد کاهش یافته است. همچنین مشاهده شد که حداکثر ظرفیت باربری نیز مربوط به نمونه 2UW3 بوده و به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی به میزان ۲۹/۹ و ۲۱/۷ درصد نسبت به نمونه 2UW3C1 افزایش یافته است. علاوه بر این نمونه‌های 2UW1C1 و 2UW3C1 به ترتیب در بین نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی بیشترین سختی را دارند.

این نقص با طول ۷۵۰ میلی‌متر و بدون مقاوم‌سازی دارای کمترین تحمل در میان تمامی ستون‌های مدل‌سازی می‌باشد. نتایج حاصل از شکل ۲۶ نشان داد که کمترین و بحرانی‌ترین ظرفیت باربری به ستون 2UW3 تعلق می‌گیرد، که این نمونه ظرفیت باربری ستون را ۳۲/۳ درصد نسبت به ستون CONTROL کاهش داده است. همچنین مشاهده گردید که در بین تمامی نمونه‌ها، حداکثر ظرفیت باربری مربوط به نمونه 2UW3 بوده و به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی به میزان ۲۹/۹ و ۲۱/۷ درصد نسبت به نمونه 2UW3C1 افزایش یافته است. علاوه بر این نمونه‌های 2UW1C1 و 2UW3C1 به ترتیب در بین نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی بیشترین سختی را دارند.

۷- نتیجه‌گیری

احتمال ذوب شدن محل جوش، ایجاد تنش پسماند، عدم اجرای جوش در ستون‌های موجود در سازه در ضمن بهره‌برداری از جمله مشکلات جوش مجدد محل نقص می‌باشد. از مزایای استفاده از الیاف CFRP می‌توان به سهولت استفاده از الیاف CFRP، افزایش حداکثری نیروی قابل تحمل محوری و همچنین بهبود مقاومت و به تأخیر انداختن کماتش موضعی و کلی، اشاره کرد. در این مطالعه به بررسی تأثیر پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربن برای مقاوم‌سازی ستون‌های دوبل ناودانی فولادی دارای نقص ناشی از جوشکاری پرداخته شد. برای این منظور هفت ستون فولادی در نرم‌افزار

منابع

- [1] M. Shahraki, Improving the Structural Performance of Defective BOX-Section Steel Columns Using CFRP, PhD thesis, University of Sistan and Baluchistan.(2019), (in Persian).
- [2] P.N. Technical Specifications of General Building Works, Deputy Planning and Strategic Supervision of the President, 9300. (in Persian).

- via FEM and ANN, *Engineering Structures*, 245 (2021) 112853.
- [9] P. Rezaadoost, Nasirai, H. and Neshai, S.A., Investigating the performance of CFRP and GFRP coatings on improving the nonlinear static behavior of X-shaped pipe joints, *Tabriz University Civil and Environmental Engineering Journal*, (2021). (in Persian).
- [10] H. Nassiraei, P. Rezaadoost, Static capacity of tubular X-joints reinforced with fiber reinforced polymer subjected to compressive load, *Engineering Structures*, 236 (2021) 112041.
- [11] Sikawrap-230C, Product Data Sheet. Edition, Adliya Kingdom of Bahrain, 2006.
- [12] Sikadur-330, Product Data Sheet. Edition, West mead, South Africa, 2012.
- [13] M. Shahraki, M. Sohrabi, G. Azizian, K. Narmashiri, Reliability Assessment of CFRP-Strengthened Deficient Steel SHS Columns, *AUT Journal of Civil Engineering*, 3(1) (2019) 23-36.
- [14] J.W. Park, H. J. Yeom, J.-H. Yoo, Axial loading tests and FEM analysis of slender square hollow section (SHS) stub columns strengthened with carbon fiber reinforced polymers, *International Journal of Steel Structures*, 13 (2013) 731-743.
- [3] N. Geier, J.P. Davim, T. Szalay, Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125 (2019) 105552.
- [4] X. Zhang, H. Hao, Y. Shi, J. Cui, X. Zhang, Static and dynamic material properties of CFRP/epoxy laminates, *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 638-649.
- [5] M.R. Ghaemdoust, K. Narmashiri, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 1002-1011.
- [6] Y. Yang, Z. Chen, Z. Zhao, X. Liu, Axial compression performance of steel box columns with different strengthening schemes, *International journal of steel structures*, 17 (2017) 367-378.
- [7] L. Tong, Q. Yu, X.-L. Zhao, Experimental study on fatigue behavior of butt-welded thin-walled steel plates strengthened using CFRP sheets, *Thin-Walled Structures*, 147 (2020) 106471.
- [8] L. Hu, P. Feng, Y. Meng, J. Yang, Buckling behavior analysis of prestressed CFRP-reinforced steel columns

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Vazifehdan, M. Shahraki, *Evaluating the Behavior of Welding-Defected CFRP Fiber-Reinforced Double-Channel Steel Columns*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(7) (2023) 1467-1486.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21567.7760

