



مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی پرشده با ملات دارای نقص توسط CFRP

ایمان بدیع‌دامغانی، کامبیز نرماشیری*

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

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۱۴
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۴-۱۶
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۷-۰۳

کلمات کلیدی:
نقص
ستون فولادی
پرشده با ملات CFRP
CFST

خلاصه: اخیراً، استفاده از ستون‌های فولادی پرشده با بتن (CFST) به دلیل مزایای متعددی که دارند، رواج فراوانی پیدا کرده‌است. برخی از ستون‌های CFST ممکن است که متحمل آسیب‌های ناشی از عوامل مختلف بوده و از این‌رو، نیازمند تقویت باشند. یکی از روش‌هایی که می‌توان برای بهبود عملکرد ستون‌های آسیب‌دیده استفاده نمود، مقاوم‌سازی با پلیمرهای مسلح شده به الیاف (FRP) می‌باشد. مطالعه حاضر به صورت عددی و آزمایشگاهی، اثر مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی دارای نقص پرشده با ملات گروت را مورد بررسی قرار می‌دهد. مدل‌سازی عددی به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) و مطالعه آزمایشگاهی توسط دستگاه فشار یکنواخت انجام گرفت. نقص‌های ایجاد شده به صورت افقی و عمودی در مرکز ستون به وجود آمد. نمونه‌ها شامل یک نمونه ستون کنترل و چهار نمونه دارای نقص‌های افقی و عمودی بود که دو عدد از آن‌ها با چهار لایه پلیمر مسلح شده به الیاف کربن (CFRP) مقاوم‌سازی شده بودند. نتایج مشخص نمود، نقص افقی ایجاد شده در ستون باعث بیشترین کاهش ظرفیت باربری نسبت به نمونه کنترل (۴۶٪-) شد. مقاوم‌سازی نمونه‌ها با چهار لایه الیاف کربنی (دو لایه عرضی و دو لایه طولی) به صورت مناسب باعث افزایش ظرفیت تحمل بار، در حدود ۲۷٪ افزایش نسبت به نمونه دارای نقص، شد. استفاده از الیاف کربنی به صورت دورپیچ کامل، کمک شایانی به افزایش مقاومت محصورشدگی و کنترل گسیختگی‌های موضعی اعضا نمود.

۱- مقدمه

مناسب با بتن و فولاد اشاره کرد.

در سال‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ایی در زمینه مقاوم‌سازی اعضای بتنی در تیرها، ستون‌ها و دال‌ها و دیگر موارد ارائه شده‌است، اما بررسی مقاوم‌سازی اعضای محوری CFST دارای نقص، کمتر مورد توجه محققان بوده‌است.

تنگ و همکارانش به مروری بر سازه‌های فولادی تقویت‌شده به وسیله پلیمرهای مسلح شده به الیاف کربن (CFRP) پرداختند. آن‌ها به بحث قطعی درباره CFRP و مزایای استفاده از آن پرداختند. این بررسی، تفسیر کلی از سازه‌های فولادی تقویت‌شده توسط CFRP را فراهم می‌کند که شامل آماده‌سازی سطوح فولاد برای اتصال چسبیده، انتخاب یک چسب مناسب، رفتار چسب بین فولاد و CFRP، مدل‌سازی مناسب تقویت خمشی تیرهای فولادی، تقویت

مقاطع فولادی جدار نازک پرشده با بتن (CFST) یک نوع خاص از مقاطع مرکب می‌باشد که از آن‌ها به‌طور گسترده در اعضای فشاری استفاده می‌گردد. در دهه‌های اخیر این مقاطع به دلیل شکل‌پذیری و مقاومت محوری بالا مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌است. دلایل مختلفی نظیر خوردگی، فرسودگی و آتش‌سوزی باعث بروز مشکلاتی در ستون‌های CFST شده که عملکرد اولیه آن‌ها را تحت‌تاثیر قرار داده‌است. مقاوم‌سازی با استفاده از پلیمرهای مسلح شده به الیاف (FRP) یکی از روش‌های نوین در جهت تقویت این مقاطع محسوب می‌شود. از جمله مزایای کامپوزیت‌های FRP می‌توان به مقاومت کششی بالا، دوام و پایداری مناسب، انعطاف‌پذیری بالا، چسبندگی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: narmashiri@iauzah.ac.ir



خستگی سازه‌های فلزی، تقویت سازه‌های فولادی جدار نازک، تقویت لوله‌های توخالی یا پرشده از بتن از طریق سلول‌های CFRP می‌باشد [۱].

باتی‌خا و همکارانش در سال ۲۰۰۸، مطالعه تحلیلی رفتار کمانشی پوسته استوانه‌ای جداره نازک مقاوم‌سازی شده با FRP به‌همراه ناکاملی متقارن محور را ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت کمانشی پوسته تحت نیروی محوری، به‌واسطه استفاده مقادیر اندکی از FRP در نواحی دارای ناکاملی، افزایش قابل توجهی را تجربه نمودند. هم‌چنین این نویسندگان در سال ۲۰۰۹، مقاوم‌سازی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری فشار محوری و داخلی یکنواخت در مقابل مکانیزم خرابی پافیلی را با استفاده از FRP در محل بحرانی به روش تئوری خمشی الاستیک، طی مقاله‌ای ارائه دادند و با توجه به افزایش مقاومت کمانش این روش را راهکاری موثر جهت رفع مشکل فوق تشخیص دادند [۲].

تنگ و هو به بررسی رفتار CFRP حول لوله‌های دایره‌ای و تحت فشار محوری پرداخت. در این مقاله یک تحقیق جدید از فایده CFRP بر روی لوله‌های توخالی کاوش شده‌است. تست‌های فشرده‌سازی محوری در لوله‌های فولادی تقویت‌شده با CFRP نشان داد، پوشش CFRP روش مناسبی برای مقاوم‌سازی و تقویت لوله‌های توخالی فولادی دایره‌ای می‌باشد علاوه‌براین نتایج المان محدود برای پوسته نازک استوانه‌ای پوشش‌شده توسط CFRP تحت فشار محوری و ترکیب فشار داخلی ارائه‌شده تا نشان دهد تقویت CFRP روش موثری برای این قبیل پوسته‌های گسیخته (ناقص) می‌باشد [۳].

هابدر و ژائو در سال ۲۰۱۱ تأثیر مقاوم‌سازی با CFRP به‌صورت عرضی و طولی در ده ستون کوتاه را در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ترکیب استفاده CFRP به‌صورت طولی و عرضی باعث افزایش ظرفیت تسلیم می‌شود و هم‌چنین میزان بیشتر CFRP تأثیر بیشتری در به تأخیر انداختن کمانش دارد [۴]. کالواگونتا و همکارانش به مطالعه ستون کانال شکل لوله‌دار مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت بار محوری پرداختند. آن‌ها ستون کانال شکل را به دو صورت چسباندن الیاف به کل ستون و چسباندن به جان به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند و دریافتند که ظرفیت باربری در مقطع کاملاً مقاوم‌سازی شده تا ۱۶/۷۵ درصد و در نمونه مقاوم‌سازی شده در جان تا ۱۰/۲۶ درصد افزایش یافته‌است. به‌دلیل

لایه‌لایه شدن و جدا شدن CFRP، کاهش ظرفیت و شکست ناگهانی ملاحظه گردید و استفاده از CFRP ظرفیت باربری را افزایش داد. آن‌ها دریافتند که آماده‌سازی سطح و دما دو عامل مهم برای دست یافتن به چسبندگی مناسب بین فولاد و الیاف می‌باشد [۵].

دیوی و امانت مطالعه عددی روی رفتار ستون‌های HSS (steel square hollow structural section) مقاوم‌سازی شده با CFRP انجام دادند. بررسی آن‌ها روی ستون‌های غیر فشرده و اثرات تعداد لایه‌های CFRP، نسبت لاغری (slenderness ratios)، سطح مقطع هندسی در افزایش مقاومت بود. آن‌ها دریافتند که مقاوم‌سازی برای اعضای با نسبت لاغری بیشتر موثرتر است. برای مقاطع کوچک‌تر، مقاوم‌سازی در نسبت لاغری کمتر موثر است. برای ستون‌های بزرگ، افزایش تعداد لایه‌های CFRP از ۱ تا ۵ لایه باعث افزایش مقاومت تا ۲۰ درصد، برای ستون‌های متوسط افزایش باربری از ۱۰ تا ۹۰ درصد است [۶].

سانداراجا و سیواسنکر با مقاوم‌سازی ۱۲ ستون قوطی‌شکل فولادی کوتاه توسط الیاف کربن با در نظر گرفتن عوامل اصلی نظیر تعداد لایه‌ها و فاصله نوارهای CFRP در آزمایشگاه نتیجه گرفتند که این الیاف باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود و کمانش جانبی را به تأخیر می‌اندازد. استفاده از الیاف به‌صورت عرضی باعث افزایش بیشتری در سختی، ظرفیت باربری و تغییرشکل محوری در مقایسه با استفاده از الیاف به‌صورت طولی دارد [۷].

شت و فام دریافتند که لایه‌های CFRP عرضی در محدود کردن کمانش موضعی بیرونی ستون‌های کوتاه موثر هستند و ظرفیت باربری برای ستون‌های کوتاه را تا ۱۸٪ و ستون‌های بلند را بین ۱۳٪ تا ۲۳٪ افزایش می‌دهد [۸].

بمیچ و همکارانش مقاطع قوطی‌شکل فولادی کوتاه با لبه‌های دارای جوش مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت ضربه استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تعدادی مقطع فولادی به‌صورت تئوری آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان در آزمایشگاه ستون‌ها را تحت بار ضربه‌ای قرار دادند و مدهای شکست آن‌ها را با هم و با رفتار استاتیکی و دینامیکی آن‌ها مقایسه کردند و دریافتند که استفاده از CFRP باعث بالا رفتن جذب انرژی می‌شود [۹].

هی و همکاران به بررسی رفتار ستون دایره‌ای فولادی پرشده با بتن معمولی و بتن بازیافتی و مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت فشار

نوارهای CFRP از تغییر شکل‌های جانبی جلوگیری می‌کند و کماتش موضعی را به تأخیر می‌اندازد. تعداد لایه‌ها و رعایت فاصله مناسب تغییر شکل‌های جانبی را کنترل می‌کند و موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود. در فاصله میان نوارهای CFRP تا ۳۰ میلی‌متر مد شکست پاره شدن CFRP بود و بیش از ۳۰ میلی‌متر ستون توسط کماتش موضعی دچار شکست شد [۱۴].

اخیرا مقاومت‌سازی سازه‌های فولادی دارای نقص توسط CFRP بوسیله محققانی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج مطالعات نشان‌دهنده قابلیت خوب این نوع مصالح برای جبران ضعف به وجود آمده در سازه‌های فولادی در اثر وجود نقص می‌باشد [۱۹-۱۵].

همان‌گونه که ملاحظه شد، روش‌های مختلفی برای تقویت سازه‌های فولادی با استفاده از کامپوزیت‌های FRP مورد بررسی قرار گرفته‌است. با این حال، عمده این تحقیقات بر روی تقویت ستون‌های بدون نقص متمرکز بوده و مطالعات کمتری بروی مقاومت‌سازی ستون‌هاستون‌های دارای نقص صورت گرفته‌است. در اثر عوامل متعدد نظیر خوردگی، آتش‌سوزی، جوشکاری نامناسب، و اجرای نادرست، ممکن است که نقص اولیه در ستون‌های فولادی به وجود آید. این مقاله به بررسی اثرات ایجاد نقص اولیه در ستون‌های پر شده با ملات گروت که توسط کامپوزیت‌های FRP احاطه شده‌اند، در خصوصیات سازه‌ای آن‌ها می‌پردازد. نقص‌ها به دو صورت شیارهای افقی و عمودی در مرکز عضو ایجاد شده و همه ستون‌ها تا خرابی کامل مورد آزمایش قرار گرفتند. مطالعه به دو روش توأم مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی بود.

۲- خصوصیات مصالح

۲-۱- ستون فولادی

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۵ عدد ستون فولادی جداره نازک پر شده با ملات، با ابعاد مقطع $90 \times 90 \times 2$ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد ستون‌ها به صورتی انتخاب شده‌اند که الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان- طرح و اجرای سازه‌های فولادی [۲۰] برای این گونه از سازه‌ها (ستون‌های پر شده با بتن) مطابق بندهای ۲-۸-۱۰ و ۲-۸-۱۰-۲-۲-۱۰ شامل حداکثر نسبت عرض به ضخامت را برآورده نمایند. نسبت عرض به ضخامت در این تحقیق برابر با ۴۳ می‌باشد که از حداکثر مجاز که برابر ۱۲۳

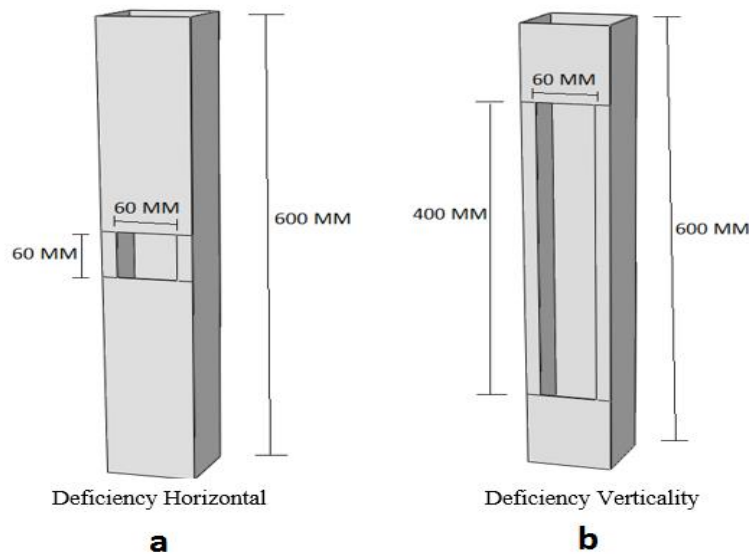
پرداختند. تعداد ۱۰ ستون دایروی مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. استفاده از CFRP باعث افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری می‌شود و افزایش تعداد لایه‌ها باعث بالا رفتن ظرفیت باربری می‌شود و سختی با دورپیچ کردن به صورت کامل افزایش می‌یابد. مطالعه نشان داد که استفاده از مصالح CFRP برای مقاوم‌سازی باعث بالا رفتن ظرفیت فشاری و بار کماتش می‌شود و استفاده از این مصالح به صورت نیمه دورپیچ دارای کرنش فشاری محوری کمتر نسبت به دورپیچ کامل می‌باشد [۱۰].

ساندراجا و پربهو به بررسی آزمایشگاهی رفتار تنش-کرنش، ظرفیت باربری نهایی و مدهای شکست مقطع فولادی پر شده با بتن و مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP به صورت عرضی پرداختند. آن‌ها الیاف کربن را به صورت نوارهایی به دور ستون با در نظر گرفتن عواملی نظیر ضخامت و فاصله نوارها پیچیدند. هنگامی که فاصله نوارهای CFRP زیاد می‌شود، کماتش در قسمت بدون الیاف رخ می‌دهد و تعداد لایه‌های بیشتر تأثیر بهتر در کنترل تغییر شکل محوری دارد. رعایت فاصله مناسب میان نوارهای CFRP برای چه تأخیر انداختن کماتش، افزایش ظرفیت باربری نهایی و رفتار تنش-کرنش محوری ضروری است [۱۱].

دانگ و همکارانش نیز بر روی مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی پر شده با بتن بوسیله CFRP تحقیق کرده‌اند و در میان ۲۲ نمونه به بررسی عملکرد پارامترهایی نظیر نحوه مقاوم‌سازی، نوع بتن و شکل مقطع پرداختند و به این نتیجه رسیدند که دور پیچ CFRP بر روی ستون‌های دایره‌ای توپر و توخالی تأثیر بهتری نسبت به مقاطع مربعی شکل دارد [۱۲].

فنگ و همکارانش تعدادی مقطع فولادی پر شده با ملات و مقاوم‌سازی شده با FRP را آزمایش کردند. بعد از مقاوم‌سازی شکست میانه عضو به خرابی موضعی تبدیل شد و مقاومت در برابر کماتش افزایش یافت. برای نمونه‌های با لاغری کمتر خرابی موضعی در انتهای عضو و برای نمونه‌های با لاغری بیشتر کماتش مشاهده گردید. هم‌چنین ظرفیت باربری و شکل‌پذیری افزایش یافت [۱۳].

پربهو ساندراجا دو فاصله متفاوت نوارهای CFRP در مقاوم‌سازی ستون پر شده با بتن را مطالعه کردند. آن‌ها از میان ۲۱ نمونه، تعداد ۱۸ نمونه را با الیاف کربن با در نظر گرفتن عواملی نظیر ضخامت، عرض و فاصله نوارهای CFRP مقاوم‌سازی کردند و دریافتند



شکل ۱. الگوی نقص‌های ایجادشده در ستون فولادی (الف) نقص افقی (ب) نقص قائم
Fig. 1. Deficiencies in steel columns: a)Horizontal, b)Vertical

جدول ۱. خصوصیات مصالح فولاد
Table 1. Material property of steel

مدول الاستیسیته (GPa)	تنش جاری شدن (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۲۰۰	۳۳۰	۳۳۶	۲۲

کردن ستون فولادی توسط بتن، مقاومت فشاری آن مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات مکانیکی ملات گروت مورد استفاده در جدول ۲ ذکر شده است. این خصوصیات توسط کارخانه تولیدکننده فراهم شده است. یکی از خواص بتن، کاهش حجم در هنگام گیرش است. در صورتی که از بتن معمولی برای پر کردن ستون‌های فولادی استفاده شود، جدایی سطح تماس بتن و فولاد به وجود خواهد آمد. ملات گروت دارای کاهش حجم بسیار کم و حتی منبسط شونده در زمان گیرش می‌باشد، به همین علت در این تحقیق از ملات گروت دارای مقاومت فشاری مناسب برای پر نمودن ستون‌ها استفاده شده است.

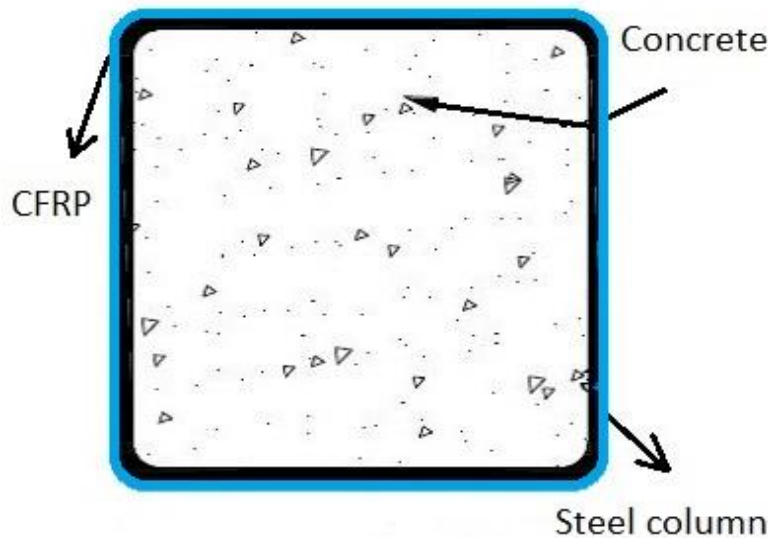
۳-۲- چسب و CFRP

برای دورپیچ نمودن هر نمونه با استفاده از الیاف کربنی، ابتدا سطوح خارجی ستون توسط سندبلاست تمیز شد. سپس این سطوح را به چسب آغشته و الیاف کربنی CFRP را طوری روی ستون قرار داده که جهت‌گیری الیاف در راستای افقی به صورت لایه عرضی و با

است (طبق بند ۱۰-۲-۸-۱ مبحث دهم)، کمتر است و با توجه به جدول ۱۰-۲-۸-۱ مبحث دهم، مشخص می‌گردد که مقطع از نوع مقاطع فشرده است. در ضمن ارتفاع ستون به صورتی در نظر گرفته شده که لاغری ستون (میزان لاغری ۲۳) در محدوده ستون‌های کوتاه باشد. ستون‌های فولادی شامل یک نمونه کنترل، دو نمونه دارای نقص و دو نمونه مقاوم‌سازی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ پیدا است، جزئیات نقص‌های انجام‌شده در مرکز ستون فولادی به دو صورت افقی و عمودی نشان داده شده است. خصوصیات مکانیکی فولاد در جدول ۱ ارائه شده است. این خصوصیات توسط آزمایش کشش یکنواخت تعیین گردیده است.

۲-۲- ملات گروت

برای اضافه کردن ملات به درون ستون فولادی، ابتدا مقدار ۵۰ کیلوگرم گروت ۳۱۸ را با ۵/۵ لیتر آب توسط دستگاه میکسر مخلوط نموده و سپس ستون فولادی را با بتن پر گردید. بعد از پر



شکل ۲. نحوی دور پیچ کردن الیاف CFRP
Fig. 2. CFRP wrapping configuration

جدول ۲. خصوصیات مصالح ملات گروت
Table 2. Material property of Grout Mortar

میزان مصرف	ضریب انبساط حرارتی (1/C)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (مگاپاسکال)	جرم حجمی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (کیلوگرم بر لیتر)	دانه بندی (میلی متر)
۲/۲ کیلوگرم پودر برای هر لیتر ملات	12×10^{-6}	۳۷۰۰۰	کششی فشاری	۲/۳	۸
			۹	۶۵	

افقی، بعد ستون، می باشد. بعد طولی نقص افقی و عمودی به ترتیب برابر با ۶۰ و ۴۰۰ می باشد. عرض نقص به صورت ثابت به میزان ۶۰ میلی متر در نظر گرفته شد.

برای نامگذاری مشخصات نمونه های آزمایشگاهی از مخفف کلمات استفاده شد، پارامترهای افقی با (H)، عمودی با (V)، نقص با (D) و مرکز عضو با (M) در نمونه های آزمایشگاهی می باشد.

نمونه MVD400-60 که در آن MVD نشان دهنده نقص عمودی در مرکز عضو می باشد، هم چنین پارامتر ۴۰۰ نشان دهنده طول نقص، ۶۰ نشان دهنده عرض نقص می باشد. برای نمونه های مقاوم سازی شده از عبارت 2T2L استفاده شده است. این حالت بیانگر تعداد چهار لایه CFRP به صورت دو لایه عرضی و دو لایه طولی می باشد. مشخصات کلیه نمونه های آزمایشگاهی در جدول ۵ نشان

در نظر گرفتن جهات الیاف در راستای بعد طولی به صورت لایه طولی مقاوم سازی گردید (شکل ۲). خصوصیات مکانیکی چسب و CFRP به ترتیب در جداول ۳ و ۴ بیان شده است. این خصوصیات توسط کارخانه تولیدکننده فراهم شده است.

۳- مشخصات نمونه ها

این مطالعه به بررسی ۵ نمونه ستون پر شده با بتن که شامل یک نمونه بدون نقص و دو نمونه دارای نقص افقی و عمودی و دو نمونه مقاوم سازی شده می پردازد. قوطی های مورد استفاده از نوع نورد گرم، دارای مقطع مربعی و به ابعاد مقطع $90 \times 90 \times 2$ میلی متر و به ارتفاع ۶۰۰ میلی متر می باشد. بعد طولی نقص بر اساس $2L/3$ می باشد که در ستون های با نقص عمودی، L ارتفاع ستون و در ستون های با نقص

جدول ۳. خصوصیات مصالح لایه‌های CFRP
Table 3. Material property of CFRP layers

ضخامت (mm)	دانسیته g/cm ³	مقاومت کششی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)	کرنش نهایی %
۰/۱۳۱	۱/۷۶	۴۳۰۰	۲۳۸۰۰۰	۱/۸

جدول ۴. خصوصیات مصالح چسب
Table 4. Material property of adhesive

مقاومت کششی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)	کرنش نهایی %
۰/۹۰	۴۵۰۰	۳۰

جدول ۵. ظرفیت تحمل بار نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی
Table 5. Load bearing capacity of the experimental and numerical specimens

نام نمونه	نام نمونه	آزمایشگاهی		مدل‌سازی	
		ظرفیت باربری نهایی (kN)	درصد تحمل بار نسبت به نمونه کنترل (%)	ظرفیت باربری نهایی (kN)	درصد تحمل بار نسبت به نمونه کنترل (%)
a	Control	۴۵۶	-	۴۴۵	-
b	MVD400-60	۲۴۲	-۴۵/۶۱	۲۳۵	-۴۸/۰۸
c	MHD60-60	۲۴۰	-۴۶/۰۶	۲۳۳	-۴۶/۷۴
d	MVD400-60-2T2L	۳۶۷	-۱۷/۵۲	۳۵۶	-۲۰
e	MHD60-60-2T2L	۳۵۳	-۲۰/۶۷	۳۶۴	-۱۸/۲۰

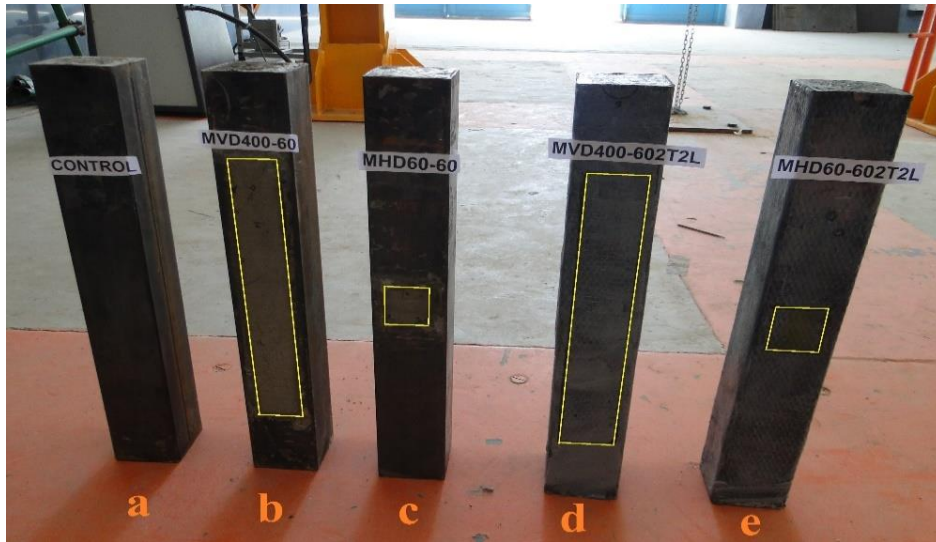
داده شده‌است. شکل ۳ نمونه‌های آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد. باربری نهایی و تغییرشکل‌ها به صورت دقیق ذخیره شد (شکل ۵).

۳-۱- روش انجام آزمایش

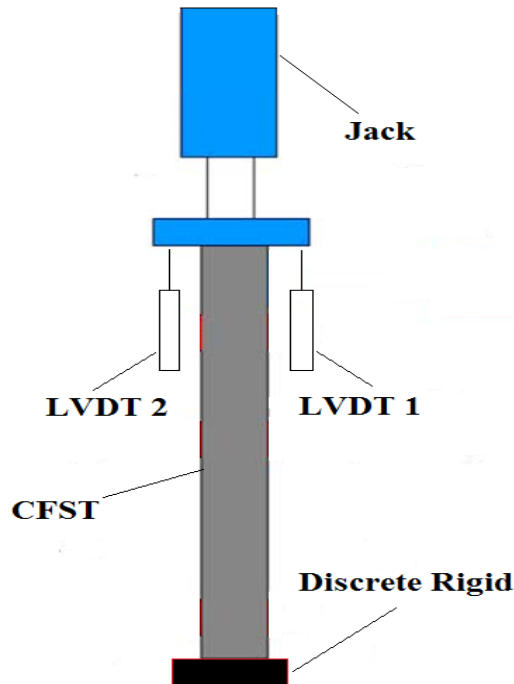
برای انجام این کار آزمایشگاهی از ۵ ستون فولادی با ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر استفاده گردید. به منظور شروع آزمایش تجهیزات بر روی نمونه‌ها نصب گردید و با قرار دادن جک بر روی نمونه‌ها، اعمال بار به صورت استاتیکی بارگذاری شد. برای محاسبه تغییر مکان‌ها از دو عدد LVDT استفاده شده‌است (شکل ۴). در نهایت برای اینکه بار محوری فشاری به‌طور خالص به عضو وارد شود مقدار کمی بار بدون اندازه‌گیری وارد شد تا ستون بر روی پایه ثابت شود. سپس بار به صورت تدریجی و با سرعت کم توسط جک وارد گردید و ظرفیت

۳-۲- مدل‌سازی

قبل از هر تحقیق برای اطمینان از صحت مدل نرم‌افزاری باید یک نمونه از تحقیقات گذشته توسط نرم‌افزار مدل‌سازی گردد، بدین منظور نتایج یک نمونه‌ی آزمایشگاهی که توسط آقای گانش و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۱۴] انجام شده‌است مورد مدل‌سازی قرار گرفته‌است. ایشان ستون‌های قوطی‌شکل پر شده با بتن را مورد تست آزمایشگاهی و عددی قرار دادند. ابعاد ستون‌های فولادی ۳/۵×۹۱/۵×۹۱/۵ میلی‌متر با ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر را انجام دادند. نحوه‌ی مقاوم‌سازی مدل‌های انجام‌شده در دو حالت بررسی شدند. حالت اول: لایه‌های CFRP با



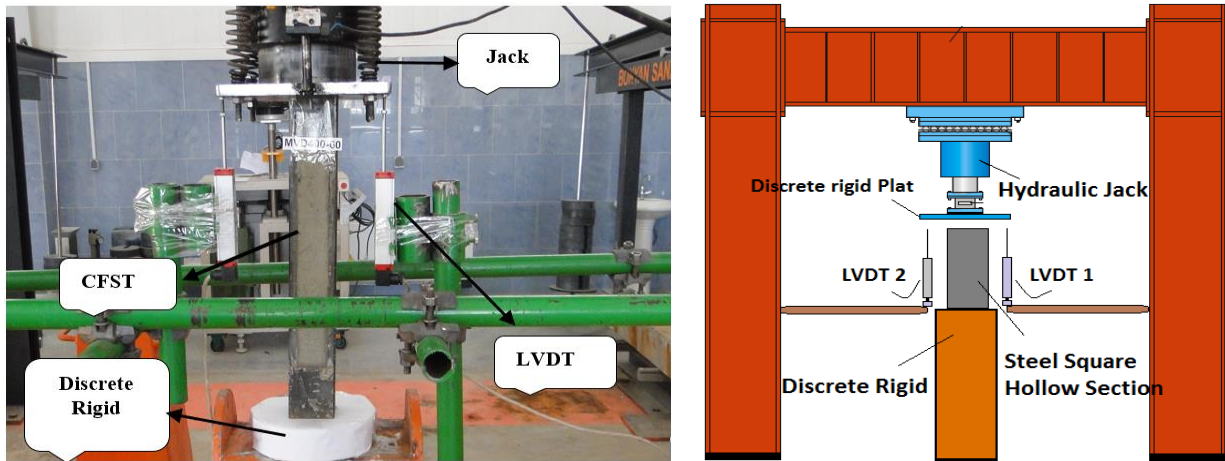
شکل ۳. نمونه‌های آزمایشگاه با و بدون نقص قبل انجام آزمایش
 Fig. 3. Experimental specimens with and without deficiency before test



شکل ۴. نحوه‌ی اعمال بارگذاری
 Fig. 4. Loading configuration

برای مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS V 6.13) استفاده شده‌است که در آن ستون فولادی، بتن و چسب به صورت سه‌بعدی و SOLID و با المان Hex بیست‌گره‌ی مدل‌سازی شده‌اند. برای مدل‌سازی CFRP از المان Shell استفاده شده‌است. برای

عرض ۵۰ میلی‌متر لایه CFRP با فاصله ۳۰ میلی‌متر از یکدیگر اجرا شدند. حالت دوم: لایه‌های CFRP با عرض ۵۰ میلی‌متر با فاصله ۴۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. جدول ۶ نتایج صحت‌سنجی را نمایش می‌دهد که با دقت مناسبی با همدیگر تطابق دارند.



شکل ۵. آماده‌سازی دستگاه برای آزمایش
Fig. 5. Experimental test setup

جدول ۶. مقایسه نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی [۱۴]
Table 6. Comparison of modelling verification with experimental test [14]

شماره	ابعاد مقطع (mm)	ارتفاع (mm)	لایه‌های CFRP	بار بحرانی حاصل از آزمایشگاه (kN)	بار بحرانی حاصل از مدل‌سازی عددی (kN)	درصد اختلاف %
۱	۳/۵×۹۱/۵×۹۱/۵	۶۰۰	۲	۱۰۰۱	۱۰۴۴	۴/۲۹
۲	۳/۵×۹۱/۵×۹۱/۵	۶۰۰	۰	۹۲۸	۹۱۶	-۱/۲۹

۴-۱- ظرفیت باربری اعضای CFST

یکی از پارامترهای بسیار مهم در تجزیه و تحلیل ستون‌ها، بررسی میزان ظرفیت باربری محوری می‌باشد. مقدار آیین نامه ای برای ظرفیت باربری ستون‌های دارای نقص و یا مقاوم‌سازی شده وجود ندارد. تنها برای نمونه کنترل مقدار آیین نامه ای وجود دارد (بند ۱۰-۲-۸-۲-۲ مبحث دهم مقررات ملی) که با دقت مناسبی با نتایج نمونه آزمایشگاهی مطابقت دارد.

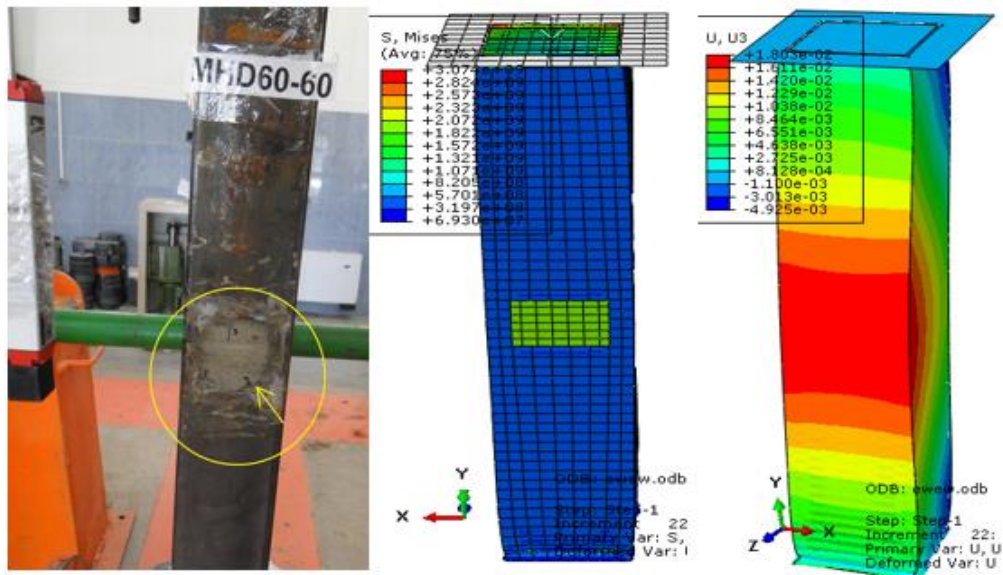
۴-۱-۱- تأثیر نقص ایجادشده در ستون CFST

نقص‌های ایجادشده در ستون فولادی عملکرد اولیه این اعضا را نسبت به نمونه فاقد نقص بسیار کاهش داد. با توجه به جدول ۵ نقص افقی ایجادشده در ستون فولادی با کاهش ظرفیت باربری تا حدود ۴۶/۰۶ درصد نسبت به نمونه کنترل شد. شکل ۶ نمونه تغییر شکل یافته از نقص افقی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده میشود بتن محصور شده در سطح داخلی ستون فولادی کماتش موضعی را

معرفی خصوصیات مکانیکی صفحات CFRP، با توجه به جهت قرارگیری الیاف، این خصوصیات برای لایه‌های طولی و عرضی جداگانه معرفی شده‌است. برای رسیدن به حالت شکست و مشاهده کماتش‌ها از آنالیز Static General استفاده شد. برای اتصال چسب و CFRP و ستون فولادی به همدیگر از روش Tie استفاده گردید.

۴- نتایج و بحث‌ها

در این مطالعه، عملکرد نقص‌های ایجاد شده به صورت افقی و عمودی در مرکز ستون فولادی پرشده با بتن بررسی شد. برای این کار تحلیل مدل‌ها و مقایسه نتایج از مدل CONTROL استفاده گردید. بررسی‌ها مبتنی بر مقایسه نمودار نیرو-جابجایی عضو فشاری بوده و هدف بررسی اثر نقص و همچنین تقویت عملکرد اعضای آسیب‌دیده توسط CFRP می‌باشد. لازم به ذکر است نمونه کنترل فاقد الیاف کربنی می‌باشد. تغییر شکل و گسیختگی نمونه‌ها تحت بارگذاری جک مورد مقایسه قرار گرفته‌است.



شکل ۶. تغییر شکل نقص افقی در ستون CFST
 Fig. 6. Deformation of horizontal deficiency in CFST column

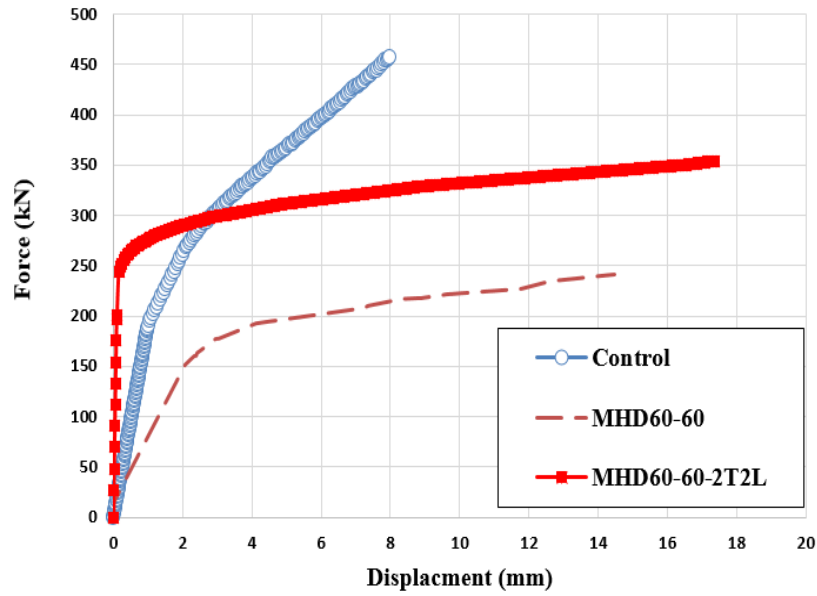


شکل ۷. نمونه مقاوم سازی با چهار لایه CFRP
 Fig. 7. Strengthened specimen using 4 CFRP layers

سطح خارجی ستون فولادی با الیاف کربنی به خوبی آسیب ایجاد شده را کنترل کرده است.

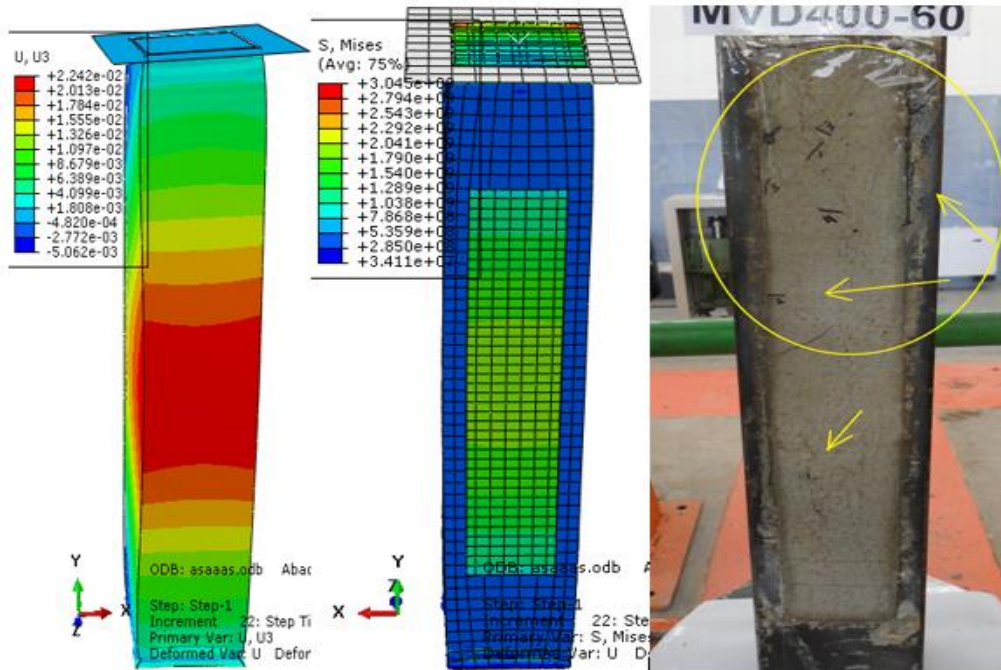
تاثیر استفاده از چهار لایه کربنی در ستون فولادی CFST باعث جبران نقص تا میزان ۱۷/۵۲ درصد نسبت به نمونه کنترلی شده است.

به تاخیر انداخته است. شکل ۷ مقاوم سازی ستون فولادی دارای نقص افقی را با چهار لایه CFRP نشان می دهد. همان گونه که مشخص است ظرفیت باربری به علت حضور الیاف کربنی تا ۲۰/۶ درصد نسبت به نمونه دارای نقص افقی افزایش یافته است. طبق شکل ۸ پوشاندن



شکل ۸. نیرو - جابجایی ستون CFST دارای نقص افقی

Fig. 8. Load-displacement in CFST column having horizontal deficiency



شکل ۹. تغییر شکل نقص عمودی در ستون CFST

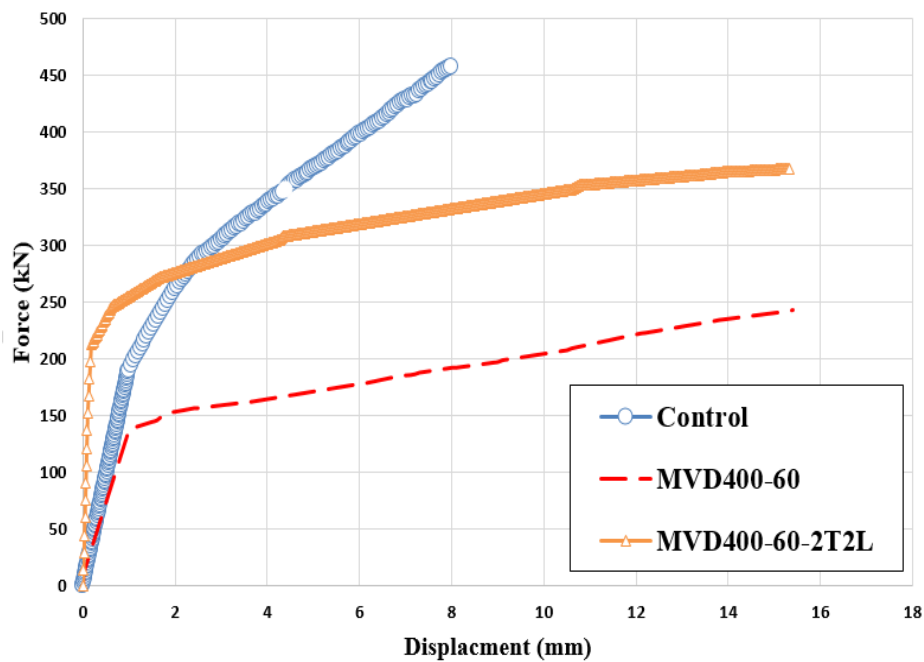
Fig. 9. Deformation of vertical deficiency in CFST column

طبق شکل ۱۱ تاثیر نقص به وجود آمده در ستون فولادی باعث کاهش ظرفیت باربری تا میزان ۴۵/۶۱ درصد نسبت به نمونه کنترلی شده است.

شکل های ۹ و ۱۰ نمونه های تغییر شکل یافته عضو دارای نقص عمودی در وسط ضلع میانی برای دو حالت ساده و مقاوم سازی می باشد که به صورت شبیه سازی و آزمایشگاهی نمایش داده شده است.



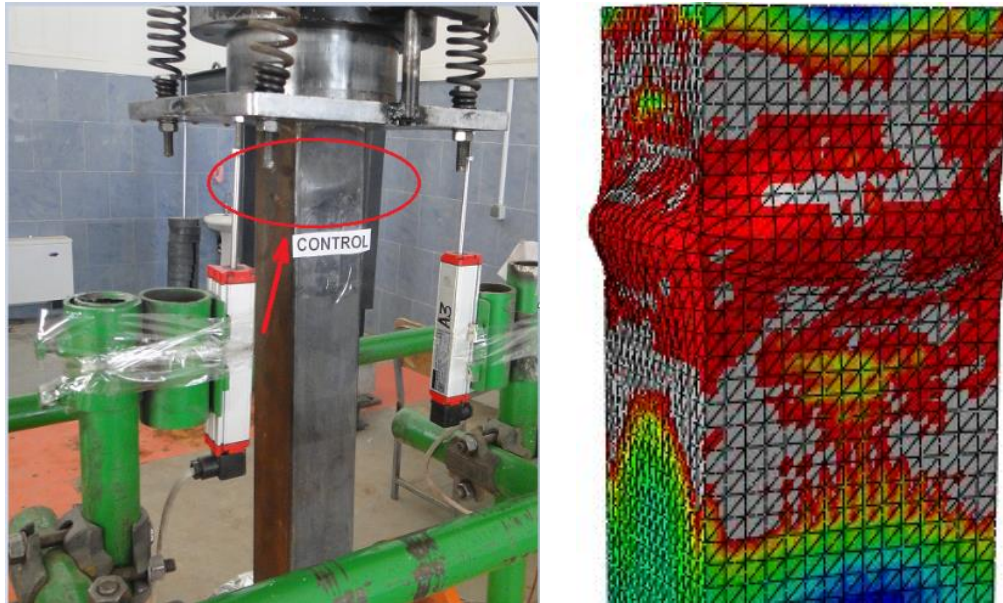
شکل ۱۰. نمونه مقاوم‌سازی با چهار لایه CFRP
Fig. 10. Strengthened specimen using 4 CFRP layers



شکل ۱۱. نیرو - جابجایی ستون CFST دارای نقص عمودی
Fig. 11. Load-displacement in CFST column having vertical deficiency

مقاومت، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری در عضو تحت بارگذاری شده‌است، به نحوی که این نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری فشاری کمترین تغییرشکل و گسیختگی را به دنبال داشته‌اند. از مقایسه جدول ۵ در

۲-۱-۴- بررسی لایه‌های CFRP در ظرفیت باربری
اثر استفاده هم‌زمان بتن محصورشده در جداره‌های داخلی و لایه‌های CFRP در سطح خارجی ستون فولادی موجب بالا بردن



شکل ۱۲. کمانش موضعی در ناحیه بالای ستون بدون نقص CFST
 Fig. 12. Local buckling at the top of the CFST column without deficiency

اطراف جداره‌های ستون فولادی رخ نداده‌است، لذا این‌گونه می‌توان استنباط کرد که ستون‌هاستون‌های پر شده با بتن مقاومت بالایی در برابر نیروهای محوری دارند.

باتوجه به خروجی‌های حاصل از آزمایشگاه، تغییرشکل‌های اولیه در نمونه کنترل از بار ۲۴۰ کیلونیوتن شروع به آغاز شدن کرد و هرچه زمان بارگذاری افزایش یافت، ظرفیت باربری تا حدنهایی ادامه پیدا کرد، هم‌چنین کمانش پافیلی در ناحیه بالایی ستون فولادی اتفاق افتاد. همان‌گونه که از شکل ۱۲ مشخص است، گسیختگی و تغییرشکل محوری در بالای ستون فولادی ایجاد شد. باید متذکر شد، بتن استفاده‌شده به دلیل مقاومت بالای فشاری در سطح داخلی ستون فولادی باعث شکل‌پذیری و کنترل کمانش موضعی در اطراف طول مقطع شد.

تغییرشکل اولیه برای ستون‌های دارای نقص، از بار ۱۴۸ کیلونیوتن شروع به آغاز شدن کرد و هر چه از زمان بارگذاری ادامه پیدا کرد، طول ترک‌های برشی در ناحیه نقص بیشتر شد (شکل ۱۳). شماره و ترتیب به وجود آمدن و گسترش ترکها در شکل نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است، ترکها به صورت مورب از گوشه نقص شروع شده و تا گوشه دیگر نقص گسترش پیدا می‌کنند. نقص افقی ایجاد شده در وسط ستون فولادی باعث بیشترین افت

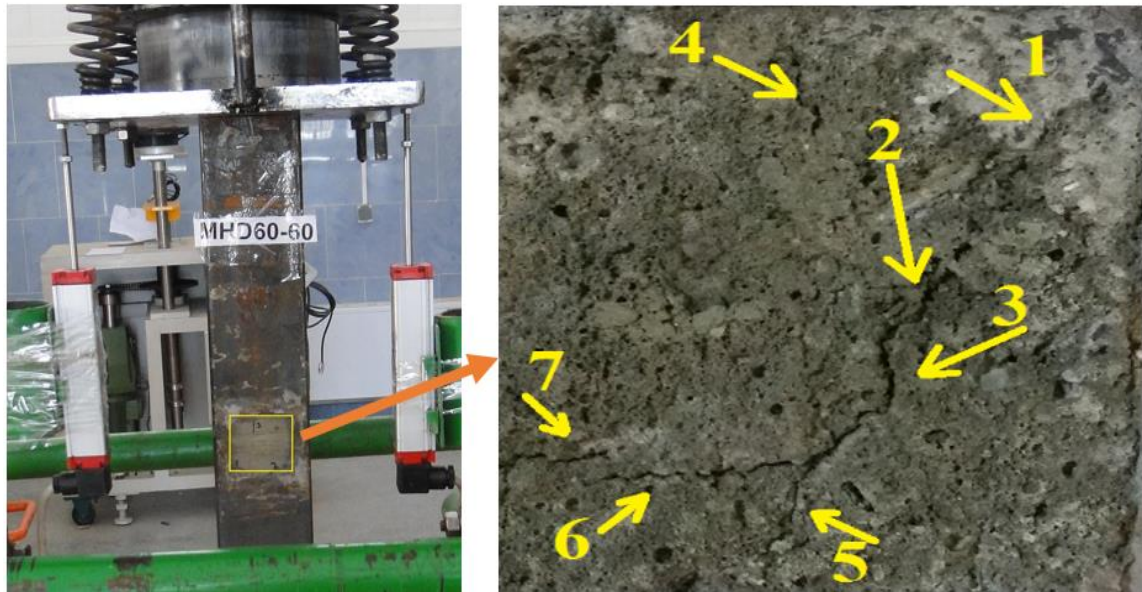
می‌یابیم که استفاده از لایه‌های CFRP روند افزایشی در ظرفیت باربری مقطع فشاری داشته‌است.

استفاده از چهار لایه الیاف کربنی در نمونه دارای نقص عمودی باعث بیشترین میزان تحمل بار تا میزان ۳۶۷ کیلونیوتن شد (شکل ۱۱).

ورق‌های CFRP با پوشاندن کامل محل نقص افقی، نقش قابل‌ملاحظه‌ایی در شکل‌پذیری و کنترل گسیختگی فولاد در ناحیه نقص شد. هم‌چنین مقاوم‌سازی نمونه‌ها تاثیر به‌سزایی در کنترل جابجایی در محدوده الاستیک نسبت به نمونه دارای نقص داشت. باتوجه به نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با چهار لایه الیاف کربنی مشخص کرد، این الیاف با احاطه کردن کامل محل آسیب دیده، باعث به تاخیر انداختن گسیختگی در اطراف نقص خواهند شد.

۲-۴- مدهای گسیختگی

تمامی نمونه‌ها تا خرابی کامل آزمایش شدند. نمونه کنترل مطابق شکل ۱۲ دچار کمانش پافیلی در بالای عضو و در نمونه‌های دارای نقص بتن محصورشده در داخل ستون فولادی دچار ترک‌های در محل نقص شد. در خصوص نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، الیاف CFRP به دلیل سختی بالای نمونه‌های (CFST) کمانش موضعی در



شکل ۱۳. ترک‌های ایجادشده در ستون دارای نقص افقی CFST

Fig. 13. Concrete cracking in CFST column having horizontal deficiency



شکل ۱۴. ستون دارای نقص عمودی CFST

Fig. 14. CFST column having vertical deficiency

داخلی ستون فولادی، بیشترین آسیب و گسیختگی بتن در ناحیه
نقص اتفاق افتاد.

نقص عمودی ایجادشده در وسط ستون فولادی موجب کاهش

مقاومت در بین نمونه‌ها شد. اثر نقص به‌وجودآمده موجب کم‌اندام
موضعی در اطراف ستون فولادی و ترک‌های برشی در محدوده نقص
شد. طبق شکل ۱۴ مشخص شد، با جداکردن هسته بتنی از سطح

مراجع

- [1] J.G. Teng, T. Yu, D. Fernando, Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites, *Journal of Constructional Steel Research*, 78 (2012) 131-143.
- [2] M. Batikha, J.F. Chen, J.M. Rotter, J.G. Teng, Strengthening metallic cylindrical shells against elephant's foot buckling with FRP, *Thin-Walled Structures*, 47(10) (2009) 1078-1091.
- [3] J.G. Teng, Y.M. Hu, Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression, *Construction and Building Materials*, 21(4) (2007) 827-838.
- [4] J. Haedir, X.-L. Zhao, Design of CFRP-strengthened steel CHS tubular beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 72 (2012) 203-218.
- [5] S. Kalavagunta, S. Naganathan, K.N. Bin Mustapha, Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections, *Thin-Walled Structures*, 72 (2013) 14-19.
- [6] U. Devi, K.M. Amanat, Non-linear finite element investigation on the behavior of CFRP strengthened steel square HSS columns under compression, *International Journal of Steel Structures*, 15(3) (2015) 671-680.
- [7] M. Sundarraja, S.J.J.o.S.E. Sivasankar, Behaviour of CFRP jacketed HSS tubular members under compression an experimental investigation, 39(5) 574-582.
- [8] A. Shaat, A. Fam, Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fibre reinforced polymers, 33(4) (2006) 458-470.
- [9] M.R. Bambach, H.H. Jama, M. Elchalakani, Static and dynamic axial crushing of spot-welded thin-walled composite steel-CFRP square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 36(9) (2009) 1083-1094.
- [10] H. Dong, D. Jiangfeng, W. Qingyuan, C. Xuelian, Mechanical behaviour of recycled concrete filled

مقاومت شد. در اثر بار محوری، بتن در ناحیهٔ نقص دچار گسیختگی و ترک‌های برشی شد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود بار فشاری موجب بیشترین ترک و آسیب در ناحیهٔ نقص شد. شایان ذکر است که در ستون دارای نقص عمودی به دلیل طول نقص بیشتر، ترک‌ها بیشتر امتداد پیدا کرد. مقاوم‌سازی ستون‌های (CFST) با چهار لایه CFRP در اثر بارگذاری فشاری به دلیل مقاومت و سختی بالا، منجر به تغییر شکل‌های ناچیز در جداره‌های بیرونی ستون فولادی گردید.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مطالعهٔ عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و آزمایشگاهی توسط دستگاه فشار مستقیم به روی مقاوم‌سازی ستون‌های CFST دارای نقص انجام شد. نقص‌ها در ستون به دو صورت افقی و عمودی در مرکز عضو به وجود آمد. روش مقاوم‌سازی به صورت دورپیچ کامل با چهار لایه انجام گرفت. نحوهٔ قرارگیری الیاف کربنی CFRP در ستون‌های CFST به دو صورت عرضی و طولی بود. نتایج بیانگر آن بود که نقص افقی ایجاد شده در مرکز ستون با کاهش ظرفیت باربری بیشتری نسبت به نمونهٔ کنترل شد، که این میزان کاهش ظرفیت باربری برای ستون دارای نقص عمودی به میزان کمتری بود. استفاده از چهار لایه الیاف کربنی باعث افزایش ظرفیت باربری به صورت مناسبی شد. پوشاندن کامل ستون فولادی توسط الیاف کربنی باعث به تاخیر انداختن کماتش موضعی و کنترل گسیختگی در ناحیهٔ نقص شد. مدهای شکست مشخص کرد، کماتش پافیلی برای ستون بدون نقص در بالای عضو رخ داده‌است. از طرفی برای حالت‌های دارای نقص، کماتش موضعی و گسیختگی در مقطع فولادی و ترک برای مقطع بتنی در اطراف نقص اتفاق افتاد. با حضور ملات در سطح داخلی ستون فولادی مقاومت فشاری ستون‌ها به صورت مناسبی افزایش یافته و کماتش موضعی در جداره‌های داخلی ستون فولادی به شدت کاهش یافت. این مقاومت بالا را می‌توان متأثر از ویژگی‌های مقاومت تسلیم فولاد، مصالح تشکیل‌دهنده و مقاومت فشاری ملات دانست. هم‌چنین به علت این که فشار محصورکننده به طور یکنواخت در تمام جهات طولی عضو فشاری اعمال گردیده‌است، سطوح داخلی فولاد و هستهٔ بتنی کاملاً به هم چسبیده و کماتش موضعی را به حداقل رسانده‌است.

- columns strengthened using CFRP, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 1002-1011.
- [16] 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.
- [17] O. Yousefi, K. Narmashiri, M.R.J.S. Ghaemdoust, C. Structures, Structural behaviors of notched steel beams strengthened using CFRP strips, 25(1) (2017) 35-43.
- [18] M. Shahraki, M.R. sohrabi, G. Azizian, K. Narmashiri, Reliability Assessment of CFRP-Strengthened Deficient Steel SHS Columns, *AUT Journal of Civil Engineering*, 3(1) (2019) 23-36.
- [19] R. Shahabi, K.J.S. Narmashiri, C. Structures, Effects of deficiency location on CFRP strengthening of steel CHS short columns, 28(3) (2018) 267-278.
- [20] Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code Part 10: Design and Construction of Steel Structures, Tehran, Iran (2013) (in Persian).
- steel tube columns strengthened by CFRP, in: 2011 International Conference on Multimedia Technology, 2011, pp. 1110-1113.
- [11] M.C. Sundarraja, G.G. Prabhu, Experimental study on CFST members strengthened by CFRP composites under compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 72 (2012) 75-83.
- [12] J.F. Dong, Q.Y. Wang, Z.W. Guan, Structural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP, *Engineering Structures*, 48 (2013) 532-542.
- [13] P. Feng, Y. Zhang, Y. Bai, L. Ye, Strengthening of steel members in compression by mortar-filled FRP tubes, *Thin-Walled Structures*, 64 (2013) 1-12.
- [14] G. Ganesh Prabhu, M.C. Sundarraja, Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) short columns externally reinforced using CFRP strips composite, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1362-1371.
- [15] M.R. Ghaemdoust, K. Narmashiri, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel SHS short

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

I. Badih Damghani, K. Narmashiri, *Strengthening of Deficient Mortar Filled Steel Columns using CFRP*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(2) (2020) 513-528.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14560.5684](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14560.5684)



