Numerical Study of RC Columns Strengthened by the Combination of Steel Strips and CFRP Sheets

Arash Asefi
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

Ramin K. Badri*
MSc Student, Department of Civil Engineering, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran.

Abstract
The carbon-fiber-reinforced polymer sheets (CFRP) and steel jackets are typically used for strengthening of the concrete columns. In the current study, a new approach is considered for the columns retrofitted applying those materials simultaneously. The effect of hybrid methods on the performance of columns under lateral loading is investigated numerically. For this purpose, the numerical models are verified using valid laboratory tests on the columns confined with FRP or steel jackets. Strengthening methods of concrete columns in the present study include the combination of a CFRP layer of different thicknesses and a steel cage, which is made as a complete steel jacket or the combination of L-shaped sections with steel bands. The results show that the concurrent use of steel jacketing and CFRP wrapping techniques increase the bearing capacity of the column, up to 4 times the bearing capacity of the unreinforced column. The alternative steel jackets composed of the connection strips lead to better performance in terms of the increasing strength, as well as the ease of execution. Ultimately, it should be noted that the presence of carbon fibers reduces the ductility of the columns.
Keywords: *Retrofitting, Steel Strips, CFRP sheets, Reinforced Concrete Column*

بررسی عددی مقاوم‌سازی ستونهای بتن‌آرمه با استفاده از ترکیب تسمه‌های فولادی و ورق‌های CFRP

دریافت مقاله: ۱۱-۰۷-۱۳۹۹
پذیرش مقاله: ۲۴-۰۹-۱۳۹۹

رامین کتابفروش بدری*
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران. (نویسنده مسئول)
ramin.badri@gmail.com

آرش آصفی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران.

چکیده

کاربرد ورق‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) و روکش فولادی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌آرمه رایج است. در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای مقاوم‌سازی ستون‌ها، با استفاده همزمان از این مصالح پیشنهاد می‌شود. اثر روش ترکیبی بر روی عملکرد ستونها در بارگذاری جانبی، به صورت عددی بررسی می‌گردد. بدین منظور، مدل‌های عددی با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی معتبر در زمینه ستون‌های محصور با پوششی از الیاف کربن یا روکش فولادی صحت‌سنجی می‌شوند. روش مقاوم‌سازی ستونهای بتنی در مطالعه حاضر، شامل ترکیب لایه‌ای از CFRP در ضخامت‌های مختلف با قفسی فولادی است که به صورت روکش کامل یا ترکیبی از مقاطع L شکل با تسمه‌های فولادی ساخته می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده همزمان از روکش فولادی و CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری ستون، حداکثر تا ۴ برابر ظرفیت باربری ستون تقویت نشده می‌گردد. همچنین، روکش جایگزین که متشکل از تسمه اتصال است موجب عملکرد بهتر از نظر افزایش مقاومت و نیز سهولت اجرا می‌شود. در نهایت باید دقت داشت که وجود الیاف کربنی باعث کاهش شکل‌پذیری ستونهای مورد مطالعه می‌گردد.

کلمات کلیدی: مقاوم‌سازی، تسمه‌های فولادی، ورقهای پلیمری مسلح با الیاف کربن، ستون بتن‌آرمه

۱-مقدمه

ستون‌ها از اعضای مهم سازه‌ای هستند که باید توانایی مقاومت در برابر بارها و نیروهای مختلف را دارا باشند. از این‌رو برای جلوگیری از وقوع خرابی‌های شدید در سازه، باید همواره اهتمام ویژه‌ای به ایمن سازی ستون‌های مستعد خرابی داشت. از جمله شرایطی که ستون‌ها در آن مستعد خرابی هستند، طبقات نرم می‌باشد. معمولاً در سازه‌هایی که طبقه اول آن‌ها به عنوان پارکینگ استفاده می‌شود یا در تالارها یا فروشگاه‌هایی که به دلیل ایجاد فضای بیشتر برخی از دیوارها حذف می‌شوند، سختی طبقه دچار کاهش و طبقه نرم ایجاد می‌گردد و ستون‌های این طبقه مستعد خرابی می‌شوند. در مقابل ستون طبقات بالاتر چون تغییر شکل چندانی نداشته‌اند، کاملا سالم باقی می‌مانند [۱۳،۱۴].

در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف مسلح پلیمری (FRP[1]) برای تعمیر و مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای به طور پیوسته افزایش یافته است. این امر بدلیل برتری‌های متعدد این کامپوزیت در مقایسه با مصالح سنتی حادث شده است. این مزایا عبارتند از وزن کم، سهولت اجرا، دوام و مقاومت کششی بالا، خنثی بودن الکترومغناطیسی و دسترسی نامحدود در اندازه و شکل [۱۱]. هنگامی‌که ستون تحت بارهای لرزه‌ای قرار می‌گیرد، مسئله ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری ستون اهمیت می‌یابد. با افزایش میزان بار محوری وارده بر ستون، بتن تمایل دارد در جهت عمود بر جهت اعمال بار از هم باز شود. محصور کردن عرضی بتن (دور پیچ کردن) با پوشش FRP، مقاومت نهایی ستون را تا ۲ برابر افزایش می‌دهد [۶،۱۰]. زیرا محصور کردن ستون باعث ایجاد فشار جانبی بر بتن می‌شود و وجود فشار محیطی بر ستون بتنی سبب افزایش مقاومت فشاری آن می‌شود. این امر همچنین باعث افزایش شکل‌پذیری اعضا تحت ترکیب نیروهای محوری و خمشی می‌شود. بدین سبب، اجرا و نصب استاندارد و اطمینان از چسبندگی کامل بین بتن و FRP در این روش مقاوم سازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

اولین بار در سال ۱۹۸۷ موضوع استفاده از ورق‌های FRP جهت مقاوم‌سازی ارائه شد. محققان بسیاری سعی نموده‌اند رفتار ستون‌های تقویت شده را بررسی کنند. کاتسوماتا [۹] در سال ۱۹۹۶ اثر ورق‌های FRP را بر رفتار ۵ ستون دایره‌ای و ۱۰ ستون مستطیلی تحت بار چرخه‌ای بررسی کرد. کاستره [۳] در سال ۲۰۱۰ تاثیر تقویت ستون بتنی دایره‌ای با استفاده از ورق‌های CFRP[2] را بر روی مقاومت و شکل پذیری محوری آنها مورد آزمایش قرار داد که نتایج نشان از بهبود این دو ویژگی در نمونه‌های تقویت شده داشت. مطالعات موجود در زمینه مقاوم سازی ستونها با ورقهای پلیمری مذکور بسیار گسترده است. در ادامه تنها به نتایج برخی از مهمترین مطالعات در یک دهه گذشته پرداخته می‌شود.

حبیب پور و فرهنگ [۸] در سال ۲۰۱۵ مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح دایروی با الیاف CFRP چند جهته را مورد بررسی عددی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد این روش راهکار خوبی برای افزایش شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح است. دائمی و خالو [۴] در سال ۲۰۱۶ عملکرد لرزه‌ای ستون با بتن مقاومت بالا را به هنگام تقویت با ورق‌های FRP مورد ارزیابی قرار دادند. همان سال، در مطالعه پالتره و همکاران [۱۲] مشاهده شد که مقاوم سازی ستون با الیاف CFRP در نمونه‌هایی با مسلح شدگی عرضی نسبتا بالا و با نسبت بار محوری کم، موجب افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. در سال ۲۰۱۷، وانگ و همکاران [۱۶] نتیجه گرفتند که نسبت بار محوری و مقدار الیاف کربنی در سختی موثر ستون‌ها اثر زیادی نمی‌گذارد. دلزوپو و همکاران [۵] در یک مطالعه جداگانه، نشان دادند که در نمونه‌هایی با بتن کم کیفیت، الیاف CFRP موجب افزایش مقاومت برشی می‌شوند. ولی نمونه‌ها

[1] *Fiber Reinforced Polymer*
[2] *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

با شکست ترد مواجه می‌گردند. در حالی که در نمونه‌های با بتن با کیفیت متوسط، مقاوم سازی باعث شکل پذیرتر شدن ستون‌ها می‌شود.

در سال ۲۰۱۸، ژنگ و همکاران [۲۰] به بررسی تاثیر مقاوم‌سازی ستون بتنی با الیاف CFRP تحت بارگذاری فشاری پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف پلیمری در مقاوم‌سازی ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود. وانگ و همکاران [۱۷] در همان سال نشان دادند که با افزایش زاویه بارگذاری جانبی از محور قوی، استهلاک انرژی و ظرفیت جابجایی نسبی ستون مقاوم سازی شده کاهش می‌یابد. یانگ و وانگ [۱۹] در سال ۲۰۱۸ عملکرد لرزه‌ای ستون‌های کنترل شونده با برش را به وسیله الیاف کربنی مورد بهسازی و ارزیابی قرار دادند. طبق مشاهدات، این الیاف موجب افزایش ظرفیت برشی و شکل‌پذیری ستون‌ها گردید. افشین و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۹ یک روش جدید ترکیبی پیشنهاد دادند که در آن الیاف CFRP در پیرامون ستون و به صورت حلقوی دورپیچ قرار داده می‌شود. نتایج این مطالعه تجربی نشان داد که روش بهسازی پیشنهادی جذب انرژی و نیز مقاومت را بهبود می‌بخشد. وانگ و همکاران [۱۸] در همان سال با بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه با مقاومت بالا که با الیاف CFRP مقاوم‌سازی شده، نشان دادند که شکل‌پذیری و رفتار لرزه‌ای ستون‌های مسلح شده با این الیاف تحت بارگذاری چرخه‌ای به طور واضح بهبود پیدا می‌کند. بررسی اجمالی این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف پلیمری در مقاوم‌سازی ستون‌ها در مجموع باعث افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود.

محصور نمودن ستون‌های بتنی با پوشش فولادی یکی دیگر از روش‌های بهسازی لرزه‌ای ستون‌های بتنی است. در این روش، افزایش ناچیزی در ابعاد و وزن ستون بوجود می‌آید. موثر بودن این روش منوط به سختی مناسب روکش فولادی در برابر تغییرشکل‌های جانبی بتن است. روکش فولادی در تمامی طول خود به هم جوش می‌شوند و فضای اندک بین روکش فولادی و ستون توسط ملات منبسط شونده پر می‌گردد. برای بهبود عملکرد مجموعه می‌توان از کاشت میلگرد برای انتقال برش بین ورق و بتن استفاده نمود.

روکا و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۷] ۱۶ مدل ستون بتنی، در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی کردند. ستون‌ها با روکش فولادی مقاوم‌سازی شدند و تحت بارگذاری خمشی و محوری قرار گرفتند. نتایج آنها اثر مطلوب روکش فولادی را در ظرفیت‌های باربری نشان می‌داد. عزالدین [۶] در سال ۲۰۱۶ به بررسی تاثیر تسمه‌های فولادی در مقاوم سازی ستون با بارگذاری فشاری دارای خروج از مرکزیت پرداخت. نتایج مطالعه نشان داد که استفاده از تسمه فولادی در مقاوم‌سازی ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها می‌شود. تارابیا و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ به بررسی مشابهی را با بارگذاری چرخه‌ای انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نیز نشان از افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها بود. بلال و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۵ به بررسی تاثیر فاصله تسمه‌های فولادی در مقاوم‌سازی ستون با بارگذاری فشاری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از تسمه فولادی در مقاوم‌سازی ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها و کاهش شکل‌پذیری آن می‌شود.

ورقه‌های FRP عموما بر روی سطح المان‌هایی که لازم است مقاوم‌سازی شوند، چسبانده می‌شوند. این روش با عنوان تسلیح خارجی[1] شناخته می‌شود. تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته‌اند، نشان می‌دهند که در این روش به علت جداشدگی پیش از موقع، استفاده از کل مقاومت کششی مصالح FRP امکان پذیر نمی‌باشد [۴،۲۰]. از آنجایی که در روش مذکور مصالح FRP در سطوح خارجی نمایان هستند، عملکرد مسلح کنندگی می‌تواند تحت تاثیر اثرات منفی چرخه‌های ذوب و یخبندان و نیز حرارت ناشی از آتش‌سوزی قرار گیرد [۴]. یکی از روش‌های مورد استفاده جهت غلبه بر این ضعف‌ها، استفاده از روش‌های ترکیبی مقاوم‌سازی می‌باشد. در این روش ابتدا ستون توسط

[1] *Externally Bonded Reinforcement (EBR)*

دورپیچ FRP مقاوم‌سازی شده و سپس توسط روکش فولادی مورد محصورشدگی قرار می‌گیرد. استفاده از روکش فولادی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری ستون، امکان ایجاد جداشدگی بین سطح بتن و FRP را به حداقل می‌رساند. به علاوه، به عنوان لایه پوششی جهت کاهش صدمات وارده به لایه FRP عمل می‌کند.

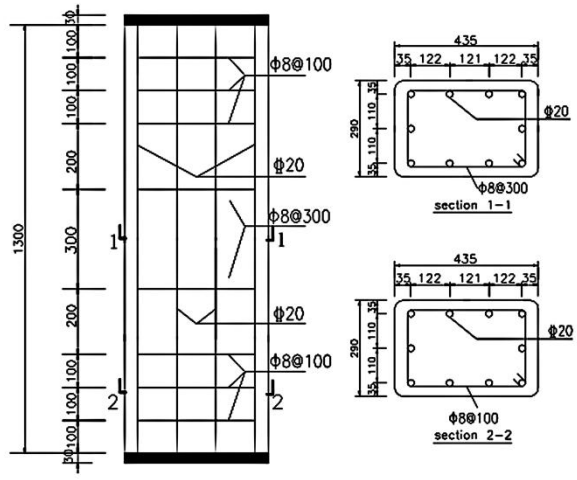
لی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۹ طی آزمایش‌های، به اثر ترکیب همزمان الیاف پلیمری و روکش فولادی در مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی پرداختند که آرماتورهای آنها دچار خوردگی شده بودند. آنها برای این منظور از روش الکتروشیمیایی برای ایجاد خوردگی در آرماتورها استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از پلیمر تقویت شده با الیاف کربن و روکش فولادی در مقاوم‌سازی ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود. همچنین استفاده همزمان از این روش‌ها نیز تاثیر زیادتری در افزایش ظرفیت و شکل پذیری ستون‌ها نسبت به حالت استفاده غیرهمزمان می‌شود. مطالعه حاضر برای بررسی دقیقتر روش مقاوم سازی ترکیبی، با رویکردی تحلیلی مسئله را مورد کنکاش دقیقتر قرار می‌دهد. البته نمونه‌های تحلیلی مورد استفاده برای این منظور فاقد هرگونه آسیب اولیه هستند که به نظر نویسندگان نتایج حاصل برای نشان دادن قابلیت‌های روش مفروض در مقام مقایسه کافی است.

۲-مدل‌سازی عددی

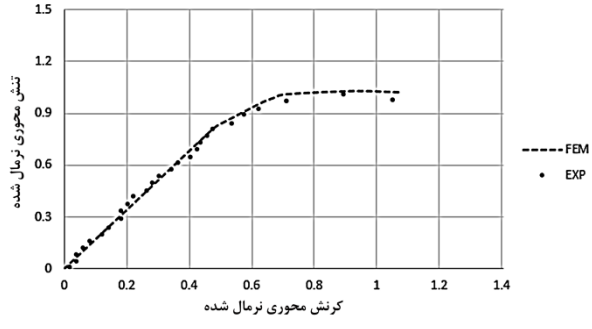
به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی، دو مدل آزمایشگاهی معتبر که به ترتیب با ورق‌های FRPو روکش فولادی تقویت شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مدل آزمایش شده، توسط نرم‌افزار ABAQUS شبیه سازی می‌شود. سپس نتایج حاصل از آزمایش با نتایج تحلیل مقایسه می‌گردد. به منظور مدل‌سازی هریک از نمونه‌ها، ابتدا هندسه هر قسمت از مدل به صورت جداگانه مطابق جزییات آزمایشگاهی در نرم‌افزار مدل می‌شود. سپس خواص فیزیکی و مکانیکی نظیر هر یک از قسمت‌های مدل به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. اجزای مختلف مدل، مطابق مدل آزمایشگاهی بر روی هم سوار و تماس بین این اجزا تعریف می‌شود. در این پژوهش از المان سه بعدی Solid برای مدل‌سازی بتن و فولاد و از المان Shell برای مدل‌سازی ورق CFRP استفاده می‌شود.

۲-۱ مدل تقویت شده با الیاف FRP

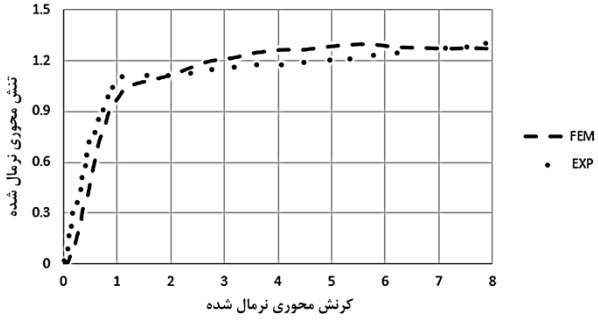
برای صحت‌سنجی از مدل آزمایشگاهی ژنگ [۲۰] استفاده شده است. تحقیق مذکور به بررسی اثر مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی با استفاده از الیاف CFRP تحت بارگذاری فشاری پرداخته است. نمونه‌های ساخته شده، دارای ابعاد ۴۳۵×۲۹۰ میلی‌متر و ارتفاع خالص ۱۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۱). مقاومت فشاری بتن برابر ۳۹/۶ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم آرماتور طولی و عرضی به ترتیب برابر ۴۹۱/۴ و ۳۸۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی CFRP برابر ۳۹۹۳ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود در قیاس با نتایج آزمایشگاهی برای مدلهای مقاوم‌سازی نشده و مقاوم‌سازی شده به ترتیب در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده است که تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده می‌گردد. مقادیر تنش و کرنش محوری در این شکلها به ترتیب به مقاومت فشاری بتن و کرنش نظیر آن نرمال شده است.



شکل (۱): نحوه آرماتورگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر است) [۲۰]



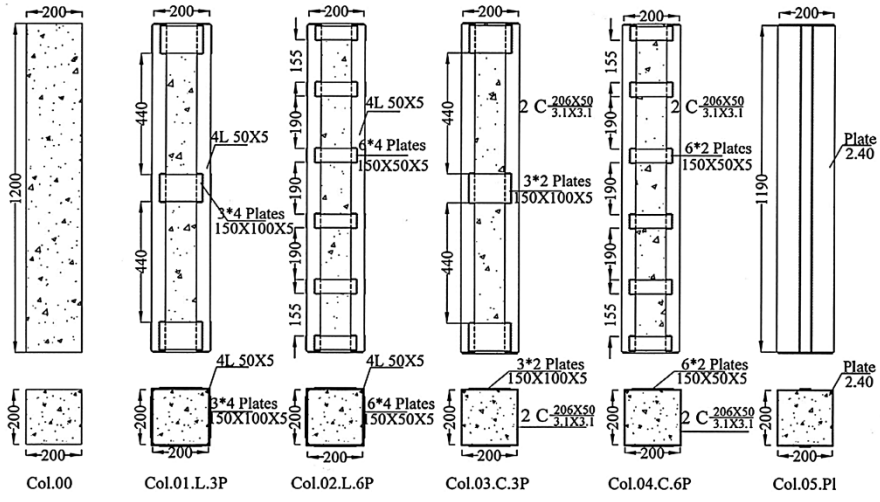
شکل (۲): منحنی‌های تنش- کرنش نرمال‌شده در ستون بتنی تقویت نشده



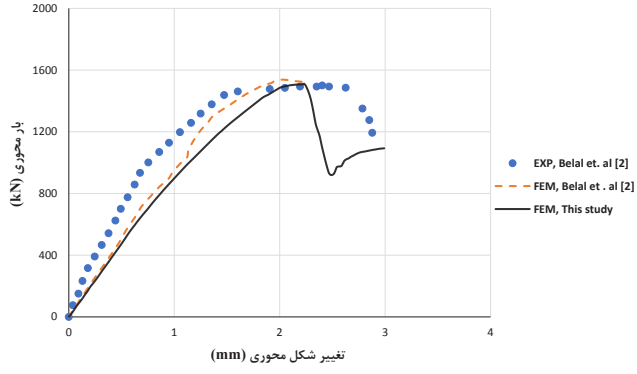
شکل (۳): منحنی‌های تنش- کرنش نرمال‌شده در ستون بتنی تقویت شده با CFRP

۲-۲ مدل تقویت شده با روکش فولادی

در این بخش برای صحت‌سنجی از مدل آزمایشگاهی بلال و همکاران [۲] استفاده شده است. آنها برای بررسی اثر انواع آرایش تسمه‌های فولادی درمقاوم‌سازی ستون‌های بتنی تحت بارگذاری فشاری، تعداد ۶ نمونه ستون بتنی (شامل ۱ نمونه کنترلی و ۵ نمونه مقاوم‌سازی شده) را مورد ارزیابی قرار دادند. نمونه‌های ساخته شده مطابق شکل (۴)، دارای ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع خالص ۱۲۰۰ میلی‌متر می‌باشند. برای این قسمت، نمونه آزمایشگاهی با روکش فولادی کامل انتخاب می‌شود که در شکل (۴) با Col.05.Pl مشخص شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود در قیاس با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۵) نشان داده شده است که تطابق مناسبی بین مقدار بیشینه مقاومت ستون، در دو روش مشاهده می‌شود. به نظر نویسندگان، تفاوت موجود به دلیل نبود اطلاعات لازم برای خواص فیزیکی و مکانیکی ملات پرکننده بین بتن- ورق فولادی می‌باشد.



شکل (۴): نحوه مقاوم‌سازی توسط تسمه‌های فولادی در نمونه‌های آزمایشگاهی (ابعاد برحسب میلی‌متر است) [۲]



شکل (۵): منحنی‌های بار محوری- جابجایی ستون بتنی Col.05.Pl برای مدل آزمایشگاهی و تحلیلی

۳-مشخصات مصالح برای مدل تقویت شده به روش ترکیبی

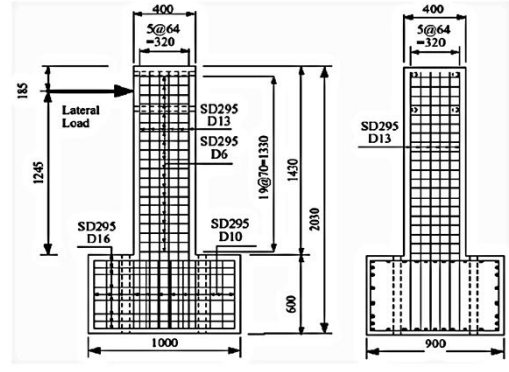
برای بررسی تاثیر مقاوم سازی ستون بتن‌آرمه با ترکیبی از ورقهای پلیمری از جنس کربن (CFRP) و ورقهای فولادی، از مشخصات هندسی و مکانیکی ستونی که توسط سانگ و همکاران [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفته است، استفاده می‌شود. مشخصات هندسی مدل و نحوه آرماتورگذاری این ستون مطابق شکل (۶-الف) است. شکل (۶-ب) ستون بتنی و شبکه آرماتوربندی آن را در نرم افزار نشان می‌دهد. ستون دارای مقطع مربعی به بعد ۴۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۳۰ میلی‌متر است که تحت بار جانبی متمرکزی با فاصله ۱۸۵ میلی‌متر از لبه بالایی ستون قرار دارد. با توجه به ابعاد پی و بر اساس قضاوت مهندسی فرض می‌شود که در مدل عددی، ستون دارای تکیه‌گاه گیردار است و پی مدل نمی‌گردد. بار محوری به صورت یک بار گسترده معادل در مقطع فوقانی به ستون اعمال و به جای بار جانبی متمرکز، از یک بار گسترده سطحی معادل در محل بار جانبی استفاده می شود. مشخصات مکانیکی مصالح بکار رفته در ستون و نیز مقدار بار محوری آن به صورت جدول (۱) است. رفتار فولاد در مدل‌ها به صورت الاستیک-پلاستیک کامل [۱] در نظر گرفته شده است و رفتار بتن با استفاده از مدل خرابی پلاستیک [۲] در نرم افزار شبیه‌سازی شده است.

[1] *Elastic-perfectly plastic*
[2] *Plastic damage model*

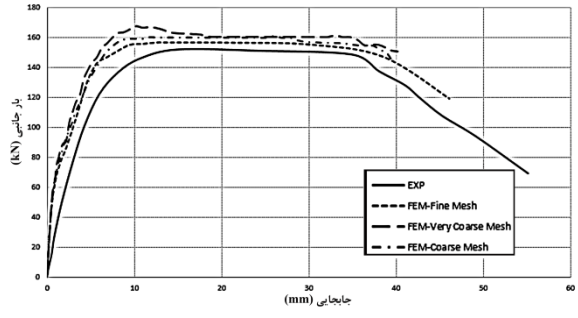
جدول (۱): مشخصات مکانیکی و آرماتورگذاری ستون [۱۴]

مشخصه مورد نظر	مقدار
مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	۳۵/۹
تنش تسلیم فولاد طولی (مگاپاسکال)	۳۶۳
تنش تسلیم فولاد عرضی (مگاپاسکال)	۳۶۸
پوشش بتنی (میلی‌متر)	۲۷/۵
بار محوری (کیلونیوتن)	۱۵۷

با استفاده از مشخصات ذکر شده و به روشی که در قبل گفته شد، این ستون در نرم‌افزار ABAQUS مدل و نمودار پوش‌آور آن در شکل (۷) ارائه می گردد. ابعاد مش مورد استفاده و زمان تحلیل آنها به صورت جدول (۲) می‌باشد. با توجه به تفاوت اندک مابین نتایج (در حدود ۷ درصد) که بدلیل عدم مدل‌سازی پی ستون بوده، از نتایج بدست آمده در تحلیل المان محدودی با مش ریز جهت مقایسه نتایج استفاده شده است.



شکل (۶): ستون نمونه آزمایشگاهی (ابعاد به میلی‌متر است) [۱۴]



شکل (۷): نمودار پوش‌آور ستون مورد مطالعه بر اساس اندازه مش

جدول (۲): اندازه مش و زمان تحلیل آن

زمان (ساعت)	اندازه
۱/۱۵	خیلی درشت (حداکثر ۷۵ mm)
۲/۵۰	درشت (حداکثر ۶۰ mm)
۶	ریز (حداکثر ۴۵ mm)

۳-۱ مشخصات لایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن (CFRP)

در اغلب حالات، خرابی ستون بتنی مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت CFRP به دو صورت مشاهده می‌شود : الف) جدا شدن لایه کامپوزیت CFRP از پوشش بتنی ستون بدلیل گسیختگی چسب اپوکسی و متعاقب آن گسیختگی در خود لایه و ب) گسیختگی بتن در ناحیه کششی و خردشدگی بتن در ناحیه فشاری. برای مقاوم‌سازی ستونها از CFRP با مشخصاتی مطابق با جدول (۳) استفاده شده است.

جدول (۳): مشخصات مکانیکی کامپوزیت CFRP [۱۱]

مشخصه مکانیکی	مقدار (مگاپاسکال)
مدول یانگ در جهت الیاف	۱۷۲۰۰۰
مدول یانگ در جهت عمود بر الیاف	۵۷۲۳۰
ضریب پواسون*	۰/۲۵
مدول برشی	۲۲۹۰۰
مقاومت کششی در جهت طولی الیاف	۲۸۶۲
مقاومت فشاری در جهت طولی الیاف	۲۲۹۰
مقاومت کششی در عرضی الیاف	۵۷/۲۴
مقاومت فشاری در عرضی الیاف	۱۷۲
مقاومت برشی در جهت طولی	۵۷/۲۴
مقاومت برشی در جهت عرضی	۸۶

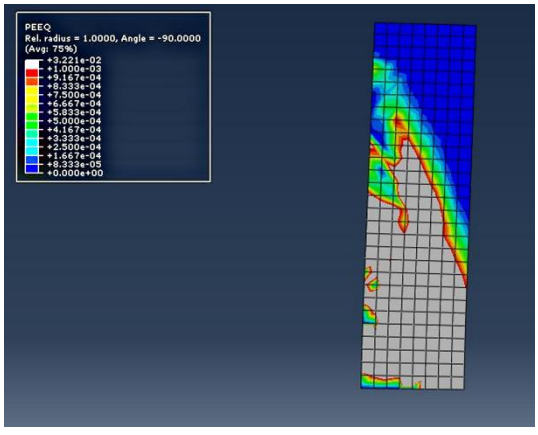
*بدون بعد

ابتدا جهت بررسی نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده، فقط از نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP استفاده می‌شود. در حین بارگذاری، اثر چسبندگی موجود بین لایه الیاف کربنی و بتن پوششی با معرفی یک لایه برای ماده چسبنده در نظر گفته می‌شود. تحلیل‌های نرم‌افزاری برای سه ضخامت مختلف (به مقدار ۰/۲، ۰/۴ و ۱ میلی‌متر) از لایه CFRP همراه با مدل‌سازی چسب اپوکسی با مشخصات مکانیکی مطابق جدول (۴) انجام شده است. نمودار پوش‌آور مربوط به این تحلیل‌ها به همراه نمودار رفتاری ستون تقویت نشده در شکل (۸) ارائه شده است. مطابق شکل (۸) استفاده از الیاف کربنی باعث افزایش توان باربری ستون می‌گردد. به طوری که این ظرفیت از حدود ۱۵۰ کیلونیوتن برای ستون مقاوم سازی نشده به حدود ۲۵۰ کیلونیوتن در ستون مقاوم سازی شده با لایه‌ای از CFRP به ضخامت ۱ میلی‌متر می‌رسد. افزایش نزدیک به ۶۰ درصدی مقاومت ستون با کاهش شکل پذیری آن همراه است.

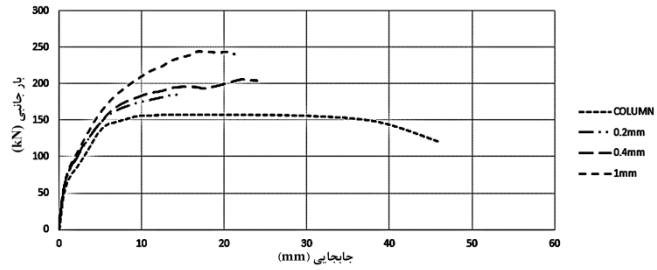
جدول (۴): مشخصات مکانیکی چسب اپوکسی [۱۱]

مشخصه مکانیکی	مقدار مشخصه
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۲/۵
مدول برشی (گیگاپاسکال)	۰/۶۶۵
ضریب پواسون	۰/۳۸

نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده برای لایه ۱ میلی‌متری از CFRP مطابق شکل (۹) است. ناحیه خاکستری در این شکل نشان دهنده ناحیه‌ای با تنش نزدیک به مقدار مقاومت فشاری بتن است. مطابق شکل خرابی ستون در اثر گسیختگی و خردشدگی بتن اتفاق افتاده است. مطابق نتایج بدست آمده، در تمامی حالات تحلیل شده گسیختگی بین بتن و چسب اتفاق نیافتاده و مود خرابی مشابه شکل (۹) است. همچنین در تمامی حالات، لایه CFRP دچار گسیختگی نشده است. از آنجایی که در هنگام استفاده همزمان از الیاف کربن و ورق فولادی برای مقاوم‌سازی ستون بتنی، محصوریت کامل ستون بتنی رخ می‌دهد و با فرض این که مابین لایه کامپوزیتی با ورق فولادی و ستون به ترتیب از گروت و چسب کافی جهت جلوگیری از جدایش بین لایه ها استفاده می‌شود، جهت ادامه تحلیل از گسیختگی بین چسب و بتن صرفنظر شده است.



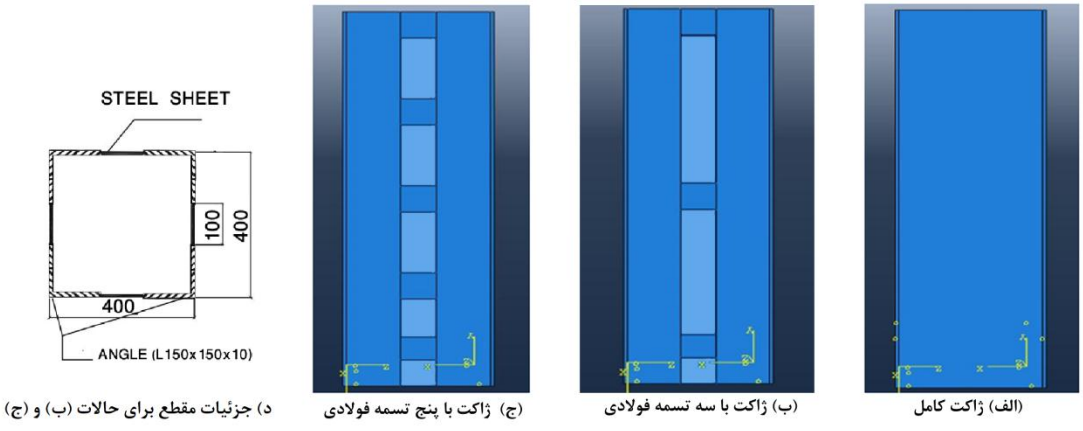
شکل (۹): نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با لایه CFRP به ضخامت ۱ میلی‌متر



شکل (۸): نمودار پوش‌آور ستون مقاوم‌سازی شده با CFRP

۳-۲ مشخصات ورق فولادی و نحوه روکش گذاری

در مقاوم سازی ستونها با ترکیبی از الیاف کربنی و روکش فولادی، رفتار ورق‌های فولادی به صورت ارتجاعی-خمیری کامل با تنش جاری شدگی ۴۰۰ MPa در نظر گرفته می‌شود. جهت مقاوم‌سازی ستون بتنی در مطالعه حاضر، یک لایه از CFRP به ضخامت‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۱ میلی‌متر در سه حالت با (۱) روکش کامل، (۲) ۴ مقطع L شکل (۱۵۰×۱۵۰×۱۰mm) با ۳ تسمه (۱۰۰×۱۰۰×۱۰mm) و (۳) ۴ مقطع L شکل (۱۵۰×۱۵۰×۱۰mm) با ۵ تسمه (۱۰۰×۱۰۰×۱۰ mm) فولادی مسلح می‌شود. شکل (۱۰)، نمایی از حالات روکش‌گذاری فولادی ستونها را در نرم‌افزار نشان می‌دهد. مقطع عرضی روکش فولادی برای دو حالت ۲ و ۳ نیز در این شکل مشخص شده است.



شکل (۱۰) : انواع روکش فولادی در مطالعه حاضر (ابعاد بر حسب میلی‌متر است)

۳- نتایج و بحث

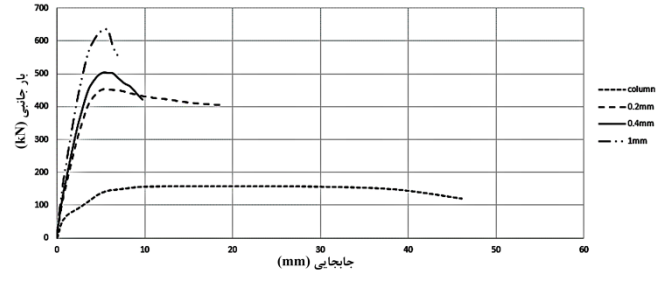
۳-۳ نتایج ستون مقاوم‌سازی شده با CFRP و روکش فولادی کامل

نمودار پوش‌آور و نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با روکش فولادی کامل به صورت اشکال (۱۱) و (۱۲) می‌باشد. برای مشخص شدن میزان تغییر در توان باربری و شکل پذیری ستون در اثر مقاوم سازی، نمودار رفتار ستون مقاوم سازی نشده نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در مقایسه با شکل (۸) مشخص است که با اضافه شدن روکش فولادی به لایه CFRP، مقاومت ستون به مراتب بیشتر می‌شود. به طوریکه ظرفیت باربری در این نحوه مقاوم سازی نسبت به ظرفیت باربری ستون مقاوم سازی نشده در حدود ۳ الی ۴ برابر است. افزودن روکش فولادی کامل به ستون مسلح به الیاف کربنی مقدار توان باربری آن را در حدود ۲/۵ برابر افزایش داده است و این افزایش

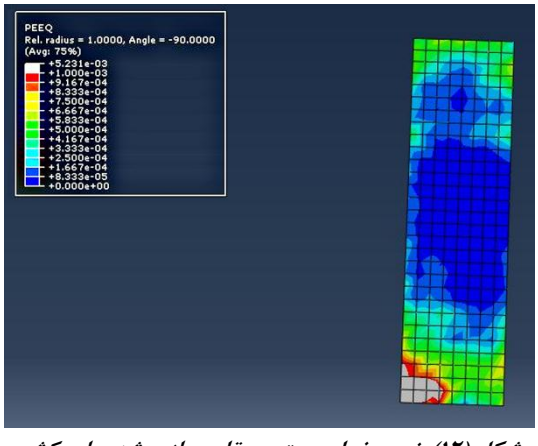
ارتباطی به ضخامت لایه کربنی ندارد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه کامپوزیت، ظرفیت ستون نیز افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت این لایه از ۰/۲ به ۱ میلی‌متر، ظرفیت ستون حدود ۱/۴ برابر می‌گردد.

نحوه خرابی ستون مسلح به الیاف کربنی با توجه به مشخصات مورد استفاده برای چسب و توضیحات بخش ۳-۱ در اثر گسیختگی و خردشدگی بتن است. با افزودن روکش فولادی به ستون، مود خرابی جدیدی که ناشی از تسلیم فولاد است، به مسئله اضافه می‌شود. این وضعیت در حالت استفاده از کامپوزیت کربن با ضخامت ۱ میلی‌متر قابل مشاهده است و در آن روکش فولادی در باری نزدیک به ۵۷۰ kN دچار تسلیم شدگی می‌شوند. البته ناحیه‌ای که در آن تسلیم رخ داده است، گسترده نیست و برای اختصار این وضعیت نشان داده نشده است. در این حالت محصورشدگی بتن قابلیت جذب انرژی بالایی در هسته بتنی فراهم می‌آورد و روکش فولادی فرصت رسیدن به مقاومت تسلیم را دارد. با کاهش ضخامت لایه کربنی، مطابق شکل(۱۲)، مشاهده می‌شود که هسته بتنی در ناحیه کششی دچار گسیختگی می‌گردد و ستون توان باربری خود را از دست می‌دهد. در این حالت امکان بروز تسلیم در روکش فولادی بوجود نمی‌آید که برای اختصار آورده نشده است.

افزایش ضخامت لایه CFRP در این حالت نیز مشابه بخش ۳-۱ از شکل‌پذیری ستون کاسته است که این امر بدلیل انرژی زیاد جذب شده توسط بتن محصور در الیاف توجیه‌پذیر است. البته نکته قابل تامل در کاهش شکل پذیری ستون با افزوده شدن روکش فولادی است. با مقایسه شکل‌های (۸) و (۱۱) می‌توان دریافت که اضافه شدن روکش فولادی کامل برخلاف افزایش توان باربری ستون، موجب بهبود شکل‌پذیری سیستم نشده است. وقوع این حالت ناشی از عدم بروز رفتار غیرارتجاعی در روکش فولادی در حین باربری جانبی است. از این رو، عملکرد روکش فولادی محدود به افزایش محصور شدگی هسته بتنی است که منجر به بالا رفتن ظرفیت باربری ستون می‌گردد.



شکل (۱۱): نمودار پوش‌آور ستون با روکش فولادی کامل برای ضخامت‌های مختلف کامپوزیت CFRP



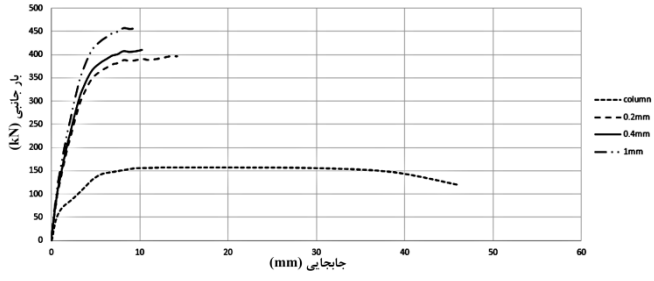
شکل (۱۲): نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با روکش فولادی کامل و کامپوزیت CFRP به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر

۳-۴ نتایج ستون مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی L شکل و تسمه‌ها

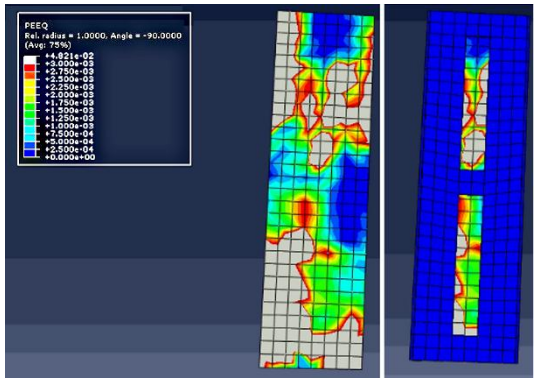
استفاده از روکش فولادی کامل از نظر اقتصادی و اجرایی پر هزینه است. از این رو ارائه جایگزینی با حفظ ویژگی های مورد انتظار از آن گزینه مناسبی به لحاظ مهندسی است. برای این منظور در این بخش به جای روکش کامل از ۴ پروفیل L شکل در گوشه‌های ستون استفاده می‌شود و برای حفظ انسجام و عملکرد مناسب توسط تسمه‌هایی به هم متصل می‌گردد. برای بررسی اثر تعداد تسمه‌ها بر عملکرد این سیستم دو حالت سه و پنج تسمه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد.

نمودار پوش‌آور و نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی L شکل و سه تسمه به صورت اشکال (۱۳) و (۱۴) می‌باشد. با مقایسه نمودارهای رفتاری در شکل (۱۳) با نتایج مربوط به روکش فولادی کامل در شکل (۱۱)

می‌توان دریافت که کم شدن مقطع روکش موجب کاهش توان باربری ستون می‌شود. این کاهش ظرفیت برای ستون‌هایی که ضخامت لایه CFRP در آنها به ۰/۲ و ۰/۴ میلی‌متر می‌رسد، در حدود ۲۰ درصد است. با این حال برای ستون تقویت شده با لایه ۱ میلی‌متری از این الیاف، مقدار کاهش ۴۰ درصدی مشاهده می‌گردد. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، روکش فولادی در چنین ستونی دچار تسلیم می‌شود و کاهش مقطع فولادی موجب بالا رفتن تنش در فولاد و وقوع تسلیم زودرس در آن خواهد شد. دلیل شدیدتر بودن کاهش ظرفیت باربری، برای ستون تقویت شده با لایه ۱ میلی‌متری از الیاف کربنی نسبت به ستون‌هایی با ضخامت پوششی کمتر، با بروز تسلیم زودرس در روکش فولادی قابل توجیه است.

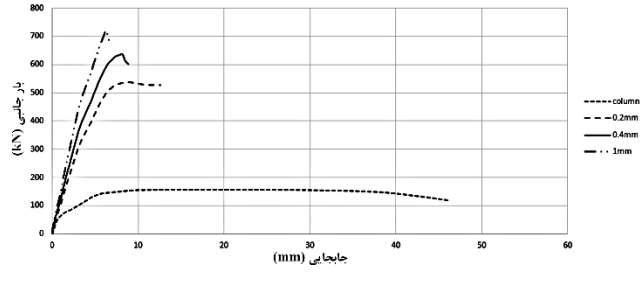


شکل (۱۳): نمودار پوش‌آور ستون با ورق فولادی L شکل و سه تسمه برای ضخامت‌های مختلف کامپوزیت CFRP

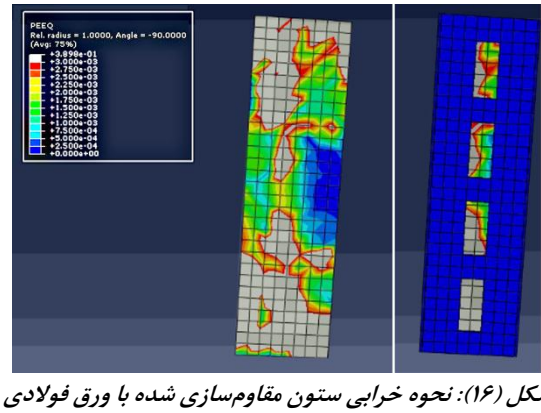


شکل (۱۴): نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی L شکل و سه تسمه و کامپوزیت CFRP به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر

اشکال (۱۵) و (۱۶)، نمودار پوش‌آور و نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی L شکل و پنج تسمه را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارهای رفتاری این ستون در شکل (۱۵) با نتایج مربوط به ستون مقاوم‌سازی شده با سه تسمه، مطابق شکل (۱۱)، می‌توان دریافت که کم شدن فاصله تسمه‌ها موجب افزایش توان باربری ستون می‌شود. این مسئله بدلیل افزایش محصورشدگی هسته بتنی با افزایش تعداد تسمه‌ها است. نکته قابل توجه در این است که ظرفیت باربری ستون مقاوم‌سازی شده با پنج تسمه در مقایسه با ستونی با روکش فولادی کامل نیز بیشتر است؛ به طوری که به طور متوسط، ظرفیت باربری ستون‌های مقاوم‌سازی شده با پنج تسمه، ۱/۲ برابر توان باربری ستونهایی با روکش فولادی کامل است. این در حالی است که مقطع روکش فولادی در حدود ۴۰۰ میلی‌متر مربع کاهش یافته است. این موضوع با توجه به میزان گسترش خرابی در ستون بتنی توجیه‌پذیر است که در ادامه بدان اشاره می‌شود.



شکل (۱۵): نمودار پوش‌آور ستون با ورق فولادی L شکل و پنج تسمه برای ضخامت‌های مختلف کامپوزیت CFRP



شکل (۱۶): نحوه خرابی ستون مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی L شکل و پنج تسمه و کامپوزیت CFRP به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر

در هر حال، ضخیم‌تر شدن لایه کامپوزیتی موجب افزایش ظرفیت ستون می‌گردد. با افزایش ضخامت این لایه از ۰/۲ به ۱ میلی‌متر ظرفیت ستون با روکش کامل فولادی ۱/۴ برابر گردید. همانطور که در شکل‌های (۱۳) و (۱۵) مشاهده می‌شود، برای ستونی با مقطع کاهش یافته (۴ پروفیل L شکل) این افزایش تابع تعداد تسمه‌های متصل کننده است. برای ستون با سه تسمه اتصال، افزایش ظرفیت باربری در حدود ۱۵ درصد است. به ازای پنج تسمه این افزایش به حدود ۳۵ درصد می‌رسد که تفاوت اندکی با حالت روکش فولادی کامل دارد. این تفاوت اندک نشان می‌دهد که با استفاده از تعداد مناسبی از تسمه های فولادی می‌توان میزان مصرف فولاد را در فرآیند مقاوم‌سازی کاهش داد.

همچنین، افزایش ضخامت لایه کامپوزیت موجب کاهش شکل‌پذیری ستون می‌گردد و این مسئله مستقل از تعداد تسمه‌های مورد استفاده است. با این حال مقایسه نمودارهای رفتاری در دو حالت از روکش‌گذاری با پروفیل L شکل (شکلهای ۱۳ و ۱۵) نشان می‌دهد که هر چه فاصله تسمه‌ها کمتر گردد، میزان شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. به طوری که وضعیت شکل پذیری به حالت روکش فولادی کامل، مطابق شکل (۱۱)، سوق می‌یابد. مطابق شکلهای (۱۴) و (۱۶) روکش فولادی در حین بارگذاری دچار رفتار غیرارتجاعی نشده است و مود خرابی ستون ناشی از خردشدگی هسته بتنی است. از این رو، استدلال حاکم بر کاهش شکل‌پذیری برای ستونی با روکش فولادی کامل برای این دسته از ستونهای مورد مطالعه نیز برقرار است.

نحوه خرابی ستونهای مقاوم سازی شده در شکل‌های (۱۲)، (۱۴) و (۱۶) نشان داده شده است. مقادیر تنش ون‌میزس بر روی کانتور تنش بر حسب کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع است. ناحیه خاکستری بر روی ستونها نشان دهنده بخشهایی است که در آن بتن بدلیل کشش دچار ترک خوردگی یا بعلت فشار دچار خردشدگی شده است. در برخی از بخش‌ها، نظیر پای ستون، ناحیه خاکستری برای نواحی تحت کشش و فشار به هم می‌رسد که به معنی گسیختگی کامل ستون بتنی در آن بخش است. برای ستون‌هایی که با مجموعه ای مقاطع L شکل و تسمه‌های فولادی مسلح شده است، افزایش تعداد تسمه‌ها، موجب کاهش ناحیه خاکستری برای ناحیه تحت فشار ستون در محدوده تسمه‌های میانی می‌گردد. این محصورشدگی اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی جذب انرژی توسط ستون دارد؛ به طوری که با افزایش تعداد تسمه‌ها ظرفیت باربری ستون بالاتر می‌رود. با استفاده از روکش فولادی کامل، میزان محصور شدگی بتن به نهایت می‌رسد؛ به طوری که تنها بخش کوچکی از ناحیه کششی در پای ستون دچار آسیب شده است. مشارکت حداکثری فولاد در تحمل بارهای وارده عامل دیگری است که آسیب پذیری بتن را به حداقل رسانده است. با این حال حداکثر جذب انرژی ورودی توسط بتن و فولاد تنها زمانی مقدور شده است که هر دو ماده امکان رفتارهای فرا ارتجاعی را دارند. این حالت برای ستون‌های مورد مطالعه، در حالت روکش فولادی کامل رخ نمی‌دهد، بلکه ستون مقاوم سازی شده با ۴ مقطع L شکل ظرفیت باربری بالاتری را با پنج تسمه فولادی فراهم می‌آورد. لذا با استفاده از تعداد مناسب از تسمه ها، می‌توان با حفظ ظرفیت باربری بالا فولاد کمتری مصرف نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، مقاوم‌سازی ستون بتن‌آرمه در برابر بار جانبی با استفاده از ترکیب همزمان الیاف CFRP و ورق‌های فولادی بررسی شده و اثر برخی پارامترها مورد بحث و کنکاش قرار گرفته است. باید توجه داشت که این مطالعه دارای محدودیت هایی است که نتایج حاصل در چارچوب آن معتبر است. یکی از این محدودیت ها مربوط به چسبندگی بین لایه کربنی و ستون است. برای مطالعات بیشتر مودهای خرابی مربوط به گسیختگی لایه CFRP از ستون نیز باید مورد توجه قرار گیرد. محدودیت بعدی در مورد ابعاد ستون است. ارتفاع کم ستون در این مطالعه عاملی است که موجب کم رنگ شدن مودهای خرابی ناشی از خمش ستون می‌شود که از آن جمله می‌توان به تسلیم زود هنگام روکش‌ها اشاره نمود. یکی دیگر از محدودیت های این مطالعه مربوط به پیوستگی بین روکش

فولادی و الیاف کربنی است. البته اهمیت این موضوع ناشی از خطاهای حین اجرا است که پیوستگی را زیر سوال می‌برد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

*استفاده از ترکیب همزمان CFRP و روکش فولادی در مقاوم‌سازی ستون بتن‌آرمه باعث افزایش ظرفیت باربری ستون (به طور میانگین تا ۳ برابر) شده است. به طوریکه در هنگام استفاده از مقاطع L شکل با ۵ تسمه متصل کننده و یک لایه کامپوزیت CFRP به ضخامت ۱ میلی‌متر، ظرفیت ستون تا ۴ برابر نیز افزایش یافته است.

*در حالت کلی استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی ترکیبی باعث کاهش شکل‌پذیری عضو شده و در بیشترین حالت باعث کاهش ۹۰ درصدی برای حداکثر جابجایی ستون بتنی شده است. از جمله دلایل آن می‌توان به جذب انرژی بسیار زیاد توسط سیستم ترکیبی اشاره کرد که در نهایت باعث خردشدگی هسته بتنی و فروپاشی ناگهانی ستون می‌شود.

*استفاده از تسمه متصل کننده بجای روکش کامل، منجر به بروز عملکرد بهتر در ستون می‌گردد. از جمله می‌توان به افزایش ظرفیت باربری و حفظ شکل‌پذیری مناسب در ستون مقاوم‌سازی شده اشاره کرد. همچنین از نقطه نظر اجرایی نیز استفاده از تسمه بجای روکش کامل می‌تواند دارای مزایای اقتصادی باشد و امکان نگهداری طولانی مدت را فراهم آورد.

*در حالت کلی استفاده از ترکیب همزمان الیاف CFRP و ورق‌های فولادی در مقاوم‌سازی ستون بتن‌آرمه می‌تواند باعث محصورشدگی بیشتر هسته بتنی گردد و از جدایش بتن از الیاف کربنی و ورق‌های فولادی جلوگیری کند که این خود از مزایای این روش بحساب می‌آید.

مراجع

[1]. Afshin H, Shirazi MRN, Abedi K. (2019). Experimental and numerical study about seismic retrofitting of corrosion-damaged reinforced concrete columns of bridge using combination of FRP wrapping and steel profiles. Steel and Composite Structures, 30:231-251.

[2]. Belal MF, Mohamed HM, Morad SA. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket. HBRC Journal, 11:201-212.

[3]. Chastre C, Silva MA. (2010). Monotonic axial behavior and modelling of RC circular columns confined with CFRP. Engineering Structures, 32:2268-2277.

[4]. Daemi A, Khaloo A. (2016). A Finite Element Study on Seismic Behavior of Various Concrete Column Retrofitting Methods. Journal of Concrete Structures and Materials, 1:5-22. doi:10.30478/jcsm.2016.47141.

[5]. Del Zoppo M, Di Ludovico M, Balsamo A, Prota A, Manfredi G. (2017). FRP for seismic strengthening of shear controlled RC columns: Experience from earthquakes and experimental analysis. Composites Part B: Engineering, 129:47-57.

[6]. Ezz-Eldeen H. (2016). Steel jacketing technique used in strengthening reinforced concrete rectangular columns under eccentricity for practical design applications. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 35

[7]. Garzón-Roca J, Adam JM, Calderón PA, Valente IB. (2012). Finite element modelling of steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment. Engineering Structures, 40:168-186.

[8]. Habibpour M, Farhang F. (2015). Strengthening Of RC Columns Using Multi Directional FRP Composites. Journal of concrete research, 8:101-115.

[9]. Katsumata H, Kobatake Y. (1996). Seismic Retrofit with carbon fibers for reinforced concrete columns. Strain, 12:4.

[10]. Li J, Gong J, Wang L. (2009). Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket. Construction and Building Materials, 23:2653-2663.

[11]. Obaidat YT. (2011). Structural Retrofitting of Concrete Beams Using FRP. Doctoral thesis, Lund University, Lund, Sweden

[12]. Paultre P, Boucher-Trudeau M, Eid R, Roy N. (2016). Behavior of Circular Reinforced-Concrete Columns Confined with Carbon Fiber–Reinforced Polymers under Cyclic Flexure and Constant Axial Load. Journal of Composites for Construction, 20:04015065.
[13]. Salman HM, Al-Sherrawi MH. (2018). Finite Element Modeling of a Reinforced Concrete Column Strengthened with Steel Jacket. Civil Engineering Journal, 4:916-925.
[14]. Sung YC, Liu KY, Su CK, Tsai IC, Chang KC. (2005). A study on pushover analyses of reinforced concrete columns. Structural Engineering and Mechanics, 21:35-52.
[15]. Tarabia A, Albakry H. (2014). Strengthening of RC columns by steel angles and strips. Alexandria Engineering Journal, 53:615-626.
[16]. Wang D, Huang L, Yu T, Wang Z. (2017). Seismic performance of CFRP-retrofitted large-scale square RC columns with high axial compression ratios. Journal of Composites for Construction, 21:04017031.
[17]. Wang D, Wang Z, Yu T, Li H. (2018). Seismic performance of CFRP-retrofitted large-scale rectangular RC columns under lateral loading in different directions. Composite Structures, 192:475-488.
[18]. Wang J, Yang J, Cheng L. (2019). Experimental study of seismic behavior of high-strength RC columns strengthened with CFRP subjected to cyclic loading. Journal of Structural Engineering, 145:04018240.
[19]. Yang J, Wang J. (2018). Seismic performance of shear-controlled CFRP-strengthened high-strength concrete square columns under simulated seismic load. Journal of Composites for Construction, 22:04018061.
[20]. Zeng J, Lin G, Teng J, Li L. (2018). Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under axial compression. Engineering structures, 174:629-645.