

بررسی اثرات لایه میانی در محصورشدگی ستون‌های بتن آرمه تقویت‌شده با ورقه‌های CFRP*

حمید کریمی‌زاده^(۱)محمد رضا افتخار^(۲)

چکیده امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی پلیمری (FRP) به‌عنوان یک ماده تقویتی برای تعمیر و تقویت اجزای مهم سازه‌های بتن‌آرمه به‌خصوص ستون‌ها، رواج گسترده‌ای پیدا کرده است. در این تحقیق با انجام آزمایش بارگذاری محوری، تأثیر لایه میانی بر بهبود رفتار محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه بررسی شده است. برای این هدف، ۱۴ عدد ستون بتن‌آرمه به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و به روش‌های مختلف توسط یک یا دو لایه ورق FRP تقویت‌شده و تحت بار فشاری محوری قرار گرفته است. در این رابطه تأثیر محصورشدگی با نوارهای منقطع CFRP در حالت سنتی (بدون استفاده از لایه میانی) و با استفاده از شیوه نوین بررسی شده در تحقیق حاضر، با یکدیگر و با نتایج بارگذاری ستون‌های با تسلیح داخلی و بدون تقویت خارجی (به‌عنوان نمونه شاهد) مقایسه شده است. روش جدید شامل استفاده از یک لایه ورق نازک گالوانیزه به ضخامت ۰/۱۳ میلی‌متر می‌باشد که با نصب این ورق در زیر نوار FRP از انتقال تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی بتن به ورق FRP ممانعت می‌شود. وجود لایه میانی ضمن کاهش انتقال تنش‌های دومحوره به ورق FRP باعث افزایش قابل توجه مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت‌شده با لایه میانی نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده در حالت سنتی می‌شود.

واژه‌های کلیدی ستون بتن‌آرمه، لایه میانی، محصورشدگی، کامپوزیت CFRP، مقاومت فشاری، شکل‌پذیری.

Intermediate Layer Effects in Performance of FRP-Confined RC Columns

H. Karimizadeh

M. R. Eftekhari

Abstract The use of polymer composite (FRP) as a reinforcement material for the repair and strengthening of important components of reinforced concrete structures, particularly columns, has found wide spread. In this study, the effect of intermediate layer on improving the confinement behavior of reinforced concrete columns has been investigated. To achieve the objectives of the study, 14 cylindrical reinforced concrete specimens with 150 mm diameter and 500 mm height were tested under pure axial load. The columns have been classified into four groups and were reinforced by one or two layers of carbon fibers and then to investigate the research topic, confinement with intermittent CFRP strips was performed in both traditional (Without intermediate layer) and modern method examined in the present study and the results were compared together and with the results of loading columns with internal reinforcement and without external reinforcement (the control sample). The new method involves using a thin layer of galvanized sheet (thickness 0.13 mm) which is mounted under the FRP sheet to prevent the transmission of stress concentration induced cracking concrete to FRP Sheets. The middle layer reduces the transfer of biaxial stress to FRP sheet too. The results suggest that specimens reinforced with FRP and galvanized sheets have higher strength and ductility than specimens reinforced with FRP and without Galvanized.

Key Words RC column, Intermediate layer, Confinement, CFRP Composite, Compressive Strength, Ductility.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۲/۳۰ می‌باشد.

(۱) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان. a.karimizadeh@cv.iut.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مقدمه

وقوع زمین‌لرزه‌های پی‌درپی در چند دهه‌ی اخیر باعث پیشرفت‌های زیادی در علوم مهندسی به‌خصوص مهندسی عمران شده است. از جمله این پیشرفت‌ها می‌توان به تدوین آیین‌نامه‌های قابل اعتمادتر برای طراحی ساختمان‌های بتنی، فولادی و ساختمان‌های با مصالح بنایی اشاره کرد. اما با گذشت زمان و سپری شدن عمر مصالح، تغییر در آیین‌نامه‌ها، وقوع حوادث غیرمترقبه، بروز عوامل مخرب طبیعی و هم‌چنین تغییر کاربری ساختمان، سازه‌ها دچار تخریب و نقص می‌شوند. بروز این نقایص، زمینه را برای انجام تحقیقات در مورد تقویت سازه‌ها فراهم می‌کند. از مهم‌ترین راه‌کارهایی که پژوهشگران در چند دهه‌ی اخیر برای تقویت ساختمان‌های بتنی پیشنهاد کرده‌اند محصورسازی اعضای ساختمان است. ستون‌ها از مهم‌ترین اجزای ساختمان می‌باشند که تاکنون مطالعات گسترده‌ای در مورد محصورشدگی آنها انجام شده است. پژوهشگران برای دورگیری ستون‌ها از ژاکت‌های فولادی، بتنی و کامپوزیتی استفاده کرده‌اند. امروزه ژاکت‌های فولادی به دلیل امکان‌خوردگی و صعوبت در اتصال کامل به وجوه ستون مورد تقویت و ژاکت‌های بتنی نیز به دلیل زمان زیاد اجرا، افزایش ابعاد ستون، افزایش بار مرده وارد بر ساختمان و تغییر در معماری سازه کمتر مورد توجه قرار گرفته و عمدتاً جای خود را به ژاکت‌های کامپوزیتی داده‌اند [1,2].

از مهم‌ترین مزایای ژاکت‌های کامپوزیتی می‌توان به دوام بسیار زیاد در مقابل عوامل مخرب محیطی، مقاومت کششی زیاد، وزن کم، اجرای ساده و تجهیزات ارزان نصب اشاره کرد [2]. هم‌چنین کامپوزیت‌های FRP ضخامت بسیار کمی دارند و استفاده از آن به منظور تقویت سازه‌ها هیچ تغییری در ابعاد و شکل ظاهری سازه ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این، با توجه به ابعاد عضو مورد تقویت، FRP در هر اندازه، شکل و ابعاد قابل اجرا است [3].

مروری بر مطالعات گذشته بر روی ستون‌های

محصور شده با کامپوزیت‌ها

مطالعات زیادی پیرامون رفتار ستون‌های بتن‌آرمه محصور شده با ژاکت‌های FRP انجام گرفته است. پارتی و نانی در سال ۲۰۰۲ با بررسی اثر زاویه‌ی الیاف در ستون‌های محصور شده با FRP به این نتیجه رسیدند که شکست ستون در همه‌ی آرایش‌ها با پارگی FRP از ناحیه‌ی یک سوم میانی همراه بوده است درحالی که ناحیه‌ی پارگی FRP در ستون‌های با نوارهای ۴۵ درجه در ناحیه‌ی وسیع‌تری نسبت به نوارهای ۹۰ درجه، نسبت به محور ستون، حادث می‌شود. این تحقیق نشان داد که الیاف با جهت عمود بر محور ستون بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت دارد اما الیاف با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به محور ستون، به دلیل پخش یکنواخت‌تر انرژی، با افزایش شکل‌پذیری بیشتری همراه است [4]. شلال و همکاران در سال ۲۰۰۳ با بررسی ستون‌های کوتاه مربعی و مستطیلی که تحت بار محوری قرار گرفته بودند به بررسی اثر مقاومت مشخصه بتن، نسبت طول به عرض مقطع ستون و تعداد لایه‌های CFRP در محصورشدگی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که محصورشدگی در هر دو مقطع باعث افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری می‌شود، ولی میزان افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در این مقاطع کمتر از ستون‌های دایروی است. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش کارایی (مقاومت فشاری و شکل‌پذیری) می‌شود و میزان کارایی در بتن‌های با مقاومت کمتر، بیشتر از بتن‌های با مقاومت معمولی و یا بتن‌های با مقاومت زیاد است؛ به طوری که در مقاومت‌های کمتر، محصورشدگی باعث افزایش تقریباً ۹۰ درصدی ظرفیت باربری می‌شود، درحالی که در مقاومت‌های بالاتر این میزان تقریباً ۳۰ درصد است [5]. تریالت و همکاران در سال ۲۰۰۴ به منظور بررسی اثر اندازه و نسبت طول به قطر بر میزان تأثیر محصورشدگی، ستون‌های بتنی با قطرهای و نسبت‌های

مانند پراکنندگی نتایج به دست آمده برای کرنش گسیختگی ژاکت، متفاوت بودن روش آزمایش برای نمونه‌های تخت و کامپوزیت استفاده شده در ستون، تغییرات ناهمگن در بتن در حین بارگذاری، وجود گوشه‌های تیز در ستون‌های چهارگوش، وجود خلل و فرج در ستون و نقص در کامپوزیت و همین‌طور عبور ژاکت از روی ترک و نهایتاً معکوس بودن کرنش گسیختگی ژاکت با ضخامت آن اشاره کردند [19-22].

ینگ و همکاران با افزایش شعاع گوشه در ستون‌های با مقطع مستطیل شکل، میزان تمرکز تنش وارد شده به کامپوزیت را به مقدار زیاد کاهش دادند و از این طریق کارایی FRP را به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر کردند [10,11]. کمپیون در سال ۲۰۰۶ با استفاده از تکنیک تقویت موضعی در گوشه‌های ستون‌های با مقطع مربعی، به این نتیجه رسید که استفاده از تقویت موضعی در گوشه‌ها پیش از دورپیچی با لایه-های محصورکننده FRP، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع را کاهش می‌دهد و مانع از پارگی زود هنگام کامپوزیت می‌شود [23]. مستوفی‌نژاد و ایلپا در سال ۲۰۱۳ با استفاده از دو تکنیک نوارگوشه-بست و نوارگوشه - دورپیچ در ستون‌های چهارگوش، به بررسی اثرات استفاده از این روش‌ها در کاهش تمرکز تنش وارد شده به کامپوزیت و افزایش کارایی آن پرداختند و نتیجه گرفتند استفاده از این روش‌ها باعث کاهش غیریکنواخت پخش تنش‌ها در مقاطع چهارگوش می‌شود و با ایجاد تنش‌های کششی بیشتر در کامپوزیت موجود در وجوه مقطع و استفاده بیشتر از عملکرد کششی کامپوزیت، مقدار ظرفیت استحصالی از FRP به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۲۴].

در بسیاری از تحقیقاتی که در این مورد انجام گرفته است به تأثیر تنش‌های برشی که علاوه بر تنش حلقوی به ژاکت وارد می‌شود و همچنین تأثیر تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی بتن به ورق FRP، به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای کاهنده کرنش در ژاکت اشاره شده

طول به قطر مختلف را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که اندازه نمونه در میزان محصورشدگی تأثیر ندارد و مدل‌های تجربی ارائه شده بر اساس نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 150×300 میلی‌متر قابل اعتماد است؛ ولی در نمونه‌های خیلی کوچک، اثر اندازه قابل توجه است [6]. علاوه بر این تحقیقات دیگری نیز توسط ماتیوس و همکاران [7]، ال-سلوم [8]، هادی [9]، ینگ و همکاران [10,11] انجام گرفته که همگی بیانگر افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در ستون‌های بتنی محصورشده با کامپوزیت‌های FRP است.

علی‌رغم وجود تحقیقات فراوان در مورد میزان افزایش شکل‌پذیری و مقاومت ستون‌های بتنی محصورشده با کامپوزیت‌های FRP، بعضی از مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که کرنش گسیختگی FRP ϵ_{ff} که از آزمایش‌های استاندارد تعیین کرنش در نمونه‌های تخت به دست می‌آید، در عمل دست‌نیافتنی است و کرنش گسیختگی صفحات تقویتی دورپیچ در هنگام زوال ستون کمتر از مقدار فوق می‌باشد. بنابراین بخش اعظمی از ظرفیت کششی کامپوزیت بدون استفاده می‌ماند [12]. زیانو و وو [13] لام و تنگ [14]، کل و لارنزیس [15,16] و پسکی و همکاران [17] در توضیح عدم امکان دسترسی به کرنش نهایی مواد کامپوزیتی به مواردی از قبیل کیفیت بهتر نمونه‌های تخت ورق FRP نسبت به نمونه‌های منحنی شکل، تنش‌های چندمحوره وارد به ژاکت‌های دایروی، تمرکز تنش ناشی از ترک‌های ایجاد شده در بتن، اثر ناحیه هم‌پوشانی، نقایص هنگام نصب و اثرات انقباض، جمع-شدگی و خزش بتن اشاره کردند. همچنین شهاوی و همکاران با اشاره به بعضی از عوامل فوق‌به‌عنوان عوامل کاهنده کرنش نهایی، از امکان تأثیر عدم تعامد دو سطح فوقانی و تحتانی نمونه بر محور طولی ستون که باعث ایجاد خروج از مرکزیت و تمرکز تنش در ژاکت می‌شود به‌عنوان عامل دیگر کاهش کرنش یاد کردند [18]. علاوه بر عوامل فوق، محققان به عواملی

است.

سال ۱۹۹۸ با بررسی ستون‌های بتنی با مقاطع مربعی و دایروی که با دو روش، یکی با اتصال ورقه‌های FRP به سطح بتن و دیگری با استفاده از لوله‌های FRP که به عنوان قالب برای بتن‌ریزی استفاده می‌شوند، به بررسی اثرات پیوستگی در ستون‌های بتنی پرداخته‌اند. در برخی از انواع لوله‌های FRP استفاده شده در تحقیق فوق، از زائده‌های مکانیکی نیز برای درگیری بیشتر بتن و مصالح کامپوزیتی استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هرچند رفتار ستون‌های بدون پیوستگی، ضعیف‌تر از رفتار ستون‌هایی است که اتصال ورق FRP به آن‌ها از طریق زائده‌های مکانیکی فراهم می‌شود، اما رفتار این نمونه‌ها با رفتار ستون‌هایی که در آن‌ها اتصال ورق تقویتی از طریق چسبندگی شیمیایی با سطح بتن صورت می‌گیرد تفاوت قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند [25].

شهاوی و همکاران در سال ۲۰۰۰ با آزمایش روی استوانه‌های بتنی محصورشده با CFRP، و مقایسه نتایج آن‌ها با مدل ارائه شده توسط سامان [1]، که برای بتن محصورشده در لوله‌های GFRP ارائه شده بود، به این نتیجه رسیدند که اولاً پیوستگی بین FRP و بتن تأثیر زیادی در رفتار محصورشدگی ندارد، ثانیاً می‌توان از مدل‌های مشابهی برای بتن محصورشده با الیاف شیشه و الیاف کربن استفاده کرد [18].

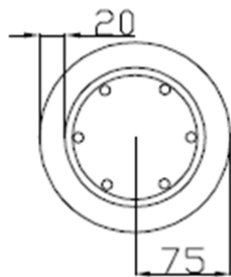
هریس و کاری در سال ۲۰۰۳ نمونه‌های استوانه‌ای که توسط الیاف شیشه و به دو صورت پیوسته و غیرپیوسته تهیه شده بودند را تحت بار محوری فشاری قرار دادند. آن‌ها برای ایجاد ناپیوستگی در نمونه‌ها، از دولایه پلاستیک نازک به ضخامت ۰/۰۸ میلی‌متر در زیر ورق FRP استفاده کردند. این محققان نتیجه گرفتند که ناپیوستگی بین بتن و ژاکت تأثیر زیادی بر محصورشدگی ستون ندارد. نتایج این تحقیق نشان داد که اندک کاهش در مقاومت فشاری نمونه‌های غیرپیوسته نسبت به نمونه‌های پیوسته وجود

بررسی موضوع و هدف تحقیق

در تحقیق حاضر به منظور افزایش ظرفیت باربری و بهبود رفتار شکل پذیری ستون‌های استوانه‌ای و همچنین استفاده بهینه از ظرفیت کششی FRP سعی شده است که با جای‌گذاری یک لایه میانی در حد فاصل سطح بتن و ورق FRP تا حد امکان از انتقال تمرکز تنش ناشی از ترک خوردگی بتن به ورق تقویتی جلوگیری شود. ماده استفاده شده به عنوان لایه میانی، یک لایه ورق گالوانیزه است که در اندازه‌های تقریباً مشابه با ورق تقویتی بریده شده و در زیر ورق تقویتی قرار می‌گیرد. وجود لایه میانی باعث می‌شود که ترک‌های ناشی از شکست بتن به جای انتقال مستقیم به ژاکت FRP، توسط لایه میانی اضافی جذب شود. همچنین لایه میانی مانع چسبندگی ژاکت به بتن شده که این باعث کاهش انتقال نیروی برشی از بتن به ژاکت (که باعث ایجاد تنش دوماحوره در ژاکت و کاهش کارایی آن نسبت به نمونه تخت می‌شود) خواهد شد.

برای اطمینان از عدم نقش محصورسازی ورق گالوانیزه، طول این ورقه اضافی نسبت به محیط ستون در حد یک یا دو میلی‌متر کوتاه‌تر انتخاب شده است تا هیچ‌گونه هم‌پوشانی در ورق گالوانیزه ایجاد نشود. لازم به ذکر است که در روش استفاده شده در تحقیق حاضر، وجود لایه میانی، پیوستگی صفحات تقویتی و سطح بتن را به حداقل می‌رساند درحالی که در روش‌های سنتی اتصال ورقه‌های تقویتی به سطح بتن، نظیر روش لایه‌ای مرطوب (Wet Layup)، پیوستگی فیزیکی کامل بین سطوح درگیر به واسطه رزین‌های اپوکسی صورت می‌گیرد. تحقیقات کمی در خصوص بررسی اثرات پیوستگی بین سطوح درگیر در تقویت ستون‌های محصورشده توسط ورقه‌های تقویتی انجام گرفته است. در این خصوص میرمیران و همکاران در

۵۰۰ میلی متر ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. برای تسلیح داخلی ستون‌ها از ۶ عدد آرماتور طولی آجدار به قطر ۸ میلی متر ($\rho=1\%$) و ۶ عدد خاموت ساده به قطر ۶ میلی متر با فواصل ۸۵ میلی متری در طول ستون استفاده شده است (شکل ۱). نمونه‌ها پس از گذشت یک روز از بتن‌ریزی از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در آب و در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری شده‌اند. پس از دوره‌ی عمل‌آوری، زوائد احتمالی ناشی از نفوذ شیرۀ بتن در درزهای قالب از سطح نمونه توسط سنگ فرز و سمباده برداشته می‌شود و گرد و خاک موجود در خلل و فرج نمونه‌ها توسط دستگاه کمپرسور هوا برداشته می‌شود. سپس محدوده قرارگیری نوارهای CFRP بر روی ارتفاع نمونه‌ها علامت‌گذاری می‌شود و در انتها به منظور جلوگیری از اعمال بارهای خارج از مرکز، سطوح انتهایی نمونه‌ها کلاهک‌گذاری (Capping) می‌شوند.



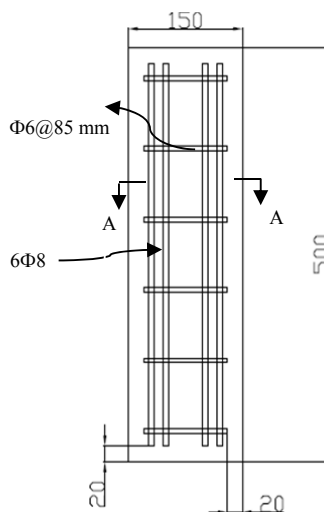
Section A-A (ب)

دارد که دلیل این کاهش مقاومت در فعال شدن دیرهنگام ورق FRP به دلیل وجود فضای خالی بین ژاکت و بتن عنوان شده است. در این تحقیق فعال شدن ورق FRP تقریباً در ۸۵ درصد بار حداکثر گزارش شده است [22].

با توجه به مطالعات هریس و کاری [22] و از آنجا که در روش پیشنهادی حاضر، ممکن است مقدار بسیار کمی فاصله آزاد بین ورق میانی و بتن به وجود آید که در مراحل اولیه اتساع، مانع از فعال شدن ورق تقویتی شود، سعی شده است که از بتونه به عنوان پرکننده این فاصله‌های آزاد استفاده شود. در واقع از بتونه به عنوان یک ماده کمکی که اتساع جانبی را به ورق میانی منتقل می‌کند و مانع اتساع کاذب ستون می‌شود استفاده شده است.

برنامه آزمایشی

آماده سازی نمونه‌ها. در این تحقیق تعداد ۱۴ عدد ستون بتن‌آرمه با مقطع دایره‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع



الف) جزئیات ستون در ارتفاع

شکل ۱ جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها (ابعاد به میلی متر)

به‌دست آمده است، آورده شده است.

جدول ۱ میزان مصالح مصرفی در طرح اختلاط

نوع مصالح	آب	سیمان	ماسه	شن
میزان مصرف (kg/m ³)	۱۹۵	۳۷۵	۱۰۲۷	۷۲۱

جدول ۲ مشخصات میلگردهای مصرفی

نوع میلگرد	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
شماره ۶	۳۵۴	۳۹۸
شماره ۸	۵۵۰	۷۷۴

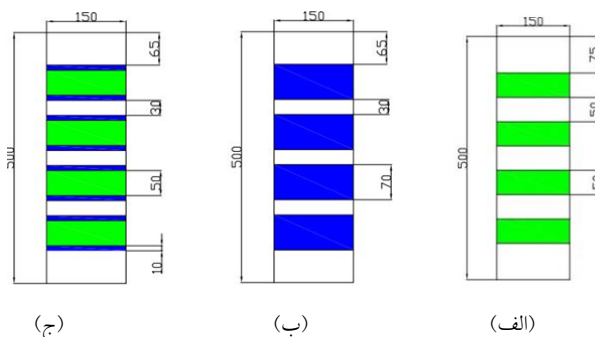
برای تقویت خارجی نمونه‌ها نیز از الیاف کربن با نام تجاری Sika Wrap Hex 230C مطابق جدول (۳) استفاده شده است. هم‌چنین رزین مورد استفاده Sika Dur-330 می‌باشد که مشخصات مکانیکی آن در جدول شماره (۴) آورده شده است.

جدول ۳ مشخصات مکانیکی ورق FRP

نوع ورق	کرنش نهایی ورق (%)	ضخامت ورق (mm)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته کششی (GPa)
Sika Wrap Hex-230C	۱/۷	۰/۱۲	۴۱۰۰	۲۳۱

جدول ۴ مشخصات مکانیکی رزین

نوع رزین	مقاومت کشش (MPa)	مدول کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)	کرنش نهایی (%)
Sika Dur-330	۳۰	۴۵۰۰	۳۸۰۰	۱/۵



شکل ۲ الف) نمونه‌های بدون لایه میانی با عرض ۵۰ میلی‌متر (ابعاد به میلی‌متر)، ب) نمونه با لایه میانی، مرحله نصب ورق گالوانیزه،

ج) نمونه با لایه میانی؛ مرحله نصب FRP

نزدیک صفحه بارگذاری، از دو حلقه فلزی به قطر داخلی ۱۵۰، ارتفاع ۵۰ و ضخامت ۵ میلی متر استفاده شده است. برای پرکردن فضای زیر این حلقه فلزی نیز از گچ دندانپزشکی استفاده شده است.

نام گذاری نمونه ها. نمونه های مورد مطالعه در این تحقیق مطابق جدول (۵) در چهار گروه طبقه بندی شده اند. در هر گروه نمونه های بدون تقویت خارجی، به عنوان نمونه شاهد، با نام C1 تا C4، نشان داده شده است. در این جدول اعداد ۲۵ و ۵۰ بیانگر عرض نوارهای تقویتی به میلی متر، حرف S در صورت وجود در نام نمونه نشان دهنده وجود لایه میانی از جنس ورق گالوانیزه، حرف P در صورت وجود نشان دهنده استفاده از بتونه به عنوان ماده پرکننده در زیر ورق گالوانیزه و حرف W نیز تقویت نمونه را به صورت دورپیچ کامل در تمام ارتفاع نشان می دهد. همچنین نماد I و II در انتهای نام نمونه ها معرف تعداد لایه های ورق تقویتی است.

روش بارگذاری و ثبت نتایج. نمونه ها توسط دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و به روش کنترل جابه جایی (Displacement Control) با سرعت بارگذاری یک میلی متر بر دقیقه تحت بار محوری فشاری قرار گرفته و بارگذاری نمونه ها پس از حصول حداکثر باربری تا رسیدن به ۵۰ درصد بار حداکثر در شاخه نزولی، ادامه پیدا کرده است. نتایج مربوط به بار و تغییر مکان های طولی و عرضی نمونه در نقاط متناظر بارگذاری، توسط دستگاه دیتالاگر ثبت شده است. برای به دست آوردن تغییر مکان محوری از دو عدد جابه جایی سنج (LVDT) که در ناحیه ۲۴۰ میلی - متری وسط و در طرفین نمونه نصب شده اند، استفاده شده است. برای محاسبه کرنش محوری از میانگین نتایج به دست آمده از این دو LVDT استفاده شده است.

نحوه تقویت با استفاده از ورقه های FRP. همه ورق های تقویتی به صورت نوارهایی به طول ۵۷۰ میلی متر و در دو عرض ۲۵ و ۵۰ میلی متر تهیه شده اند. برای اتصال ورق تقویتی بر بستر کار از روش لایه ای مرطوب (Wet-Layup) استفاده شده است. برای نمونه های بدون لایه میانی، مطابق معمول ابتدا سطح نمونه از زوائد احتمالی بتن زدوده می شود و گرد و غبار از خلل و فرج بتن برداشته می شود. سپس محل ورق تقویتی توسط چسب اپوکسی طوری پوشانده می شود که خلل و فرج آن کاملاً از چسب پر شوند؛ در مرحله بعد ورق FRP روی بتن چسبانده می شود و روی سطح ورق به منظور اشباع سازی کامل، مجدداً با چسب پوشش داده می شود. در نمونه های با لایه میانی، نیازی به آماده سازی سطحی نبوده و بعد از تسطیح زائده های احتمالی بتن در محل درز قالب، ورق گالوانیزه توسط دو سیم نازک در دو لبه بالا و پایین هر نوار (در فاصله ۱۰ میلی متری از لبه و طوری که زاکت FRP بین آن ها قرار گیرد) به بتن محکم بسته می شود. لازم به ذکر است که عرض ورق گالوانیزه در این نمونه ها نسبت به عرض ورق تقویتی از بالا و پایین ۱۰ میلی متر بیشتر انتخاب شده است. سپس با اشباع سطح ورق میانی توسط چسب اپوکسی ورق FRP به روش قبل روی ورق گالوانیزه به گونه ای نصب می شود که ناحیه همپوشانی FRP در محل اتصال لبه های ورق گالوانیزه قرار گیرد. در شکل (۲) جزئیات نمونه های با تسلیح خارجی نشان داده شده است. در نمونه هایی که از بتونه به منظور ماده پرکننده استفاده می شود ابتدا لایه ای از بتونه در محل نوارهای تقویتی بر سطح کار اجرا شده و سپس ورق گالوانیزه توسط سیم های نازک فولادی، قبل از سفت شدن بتونه، در موقعیت مورد نظر تثبیت می گردد. در همه نمونه های تقویت شده، ناحیه همپوشانی برای ورق FRP، تقریباً ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. در همه نمونه ها برای جلوگیری از تمرکز تنش در دو ناحیه انتهایی و

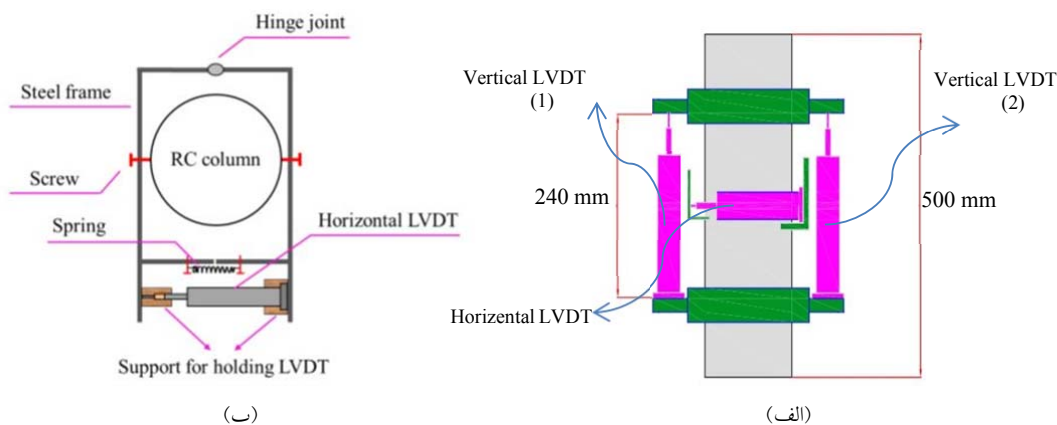
هم‌چنین برای به‌دست آوردن کرنش عرضی نمونه‌ها از یک عدد LVDT افقی در وسط نمونه مطابق شکل (۳-ب) استفاده شده است. نحوه‌ی نصب LVDT ها در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. دقت اندازه‌گیری

تجهیزات ثبت جابه‌جایی ۰/۰۰۵ میلی‌متر و حداکثر تغییرمکان قابل اندازه‌گیری توسط آن‌ها ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۵ ویژگی ستون‌ها

شماره گروه	نام ستون	F'_{co} (MPa)	نوع FRP	تعداد لایه	تعداد ورق FRP	ابعاد ورق FRP	تعداد ورق گالوانیزه	ابعاد ورق گالوانیزه	بتونه
1	C1	38.30	-	0	0	-	0	-	-
	C1-50.I	38.30	CFRP	1	4	50*570 mm	0	-	-
	C1-S-50.I	38.30	CFRP	1	4	50*570 mm	4	70*570 mm	-
2	C2	35.26	-	0	0	-	0	-	-
	C2-50.I	35.26	CFRP	1	4	50*570 mm	0	-	-
	C2-S.P-50.I	35.26	CFRP	1	4	50*570 mm	4	70*570 mm	*
3	C3	36.05	-	0	0	-	0	-	-
	C3-50.II	36.05	CFRP	2	8	50*570 mm	0	-	-
	C3-S.P-50.II	36.05	CFRP	2	8	50*570 mm	4	70*570 mm	*
4	C4	33.62	-	0	0	-	0	-	-
	C4-W.I	33.62	CFRP	1	8	50*570 mm	0	-	-
	C4*-S.P-50.I	33.62	CFRP	1	4	50*570 mm	4	70*570 mm	*
	C4-S.P-25.I	33.62	CFRP	1	8	25*570 mm	8	45*570 mm	
	C4-S.P-25.II	33.62	CFRP	2	16	25*570 mm	8	45*570 mm	

* استفاده از یک لایه پلاستیک به ضخامت ۰/۰۲ میلیمتر بین ورق گالوانیزه و ورق FRP



شکل ۳ الف) تصویر شماتیک نحوه‌ی نصب LVDT ها ب) نحوه‌ی نصب LVDT جانبی

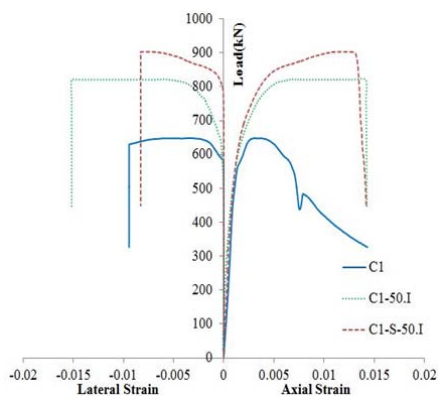
بحث و بررسی نتایج

محور قائم منحنی‌ها ظرفیت باربری و محور افقی میزان کرنش ایجاد شده در ستون را نشان می‌دهد. محور افقی منحنی‌های بار - کرنش در نمونه‌های آزمایشی، نشان دهنده‌ی میزان کرنش محوری و کرنش جانبی ناشی از اتساع ستون‌های تحت بارگذاری است؛ به طوری که طرف مثبت محور افقی، کرنش محوری ستون و طرف منفی محور افقی کرنش جانبی ستون را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴)، رفتار بار-کرنش محوری نمونه‌های آزمایشی را می‌توان به دو گروه متمایز تقسیم کرد. برخی از نمونه‌ها (نظیر نمونه‌های بدون تقویت)، دارای شکست نرم هستند و پس از حصول حداکثر بار محوری، با افت ناگهانی بار مواجه نمی‌شوند. در این نمونه‌ها کاهش ظرفیت باربری در شاخه‌ی نزولی منحنی بار-کرنش به تدریج صورت می‌گیرد. در این نمونه‌ها، برای نقطه‌ی نهایی ظرفیت باربری، از نقطه‌ی معادل ۸۵٪ بار حداکثر استفاده شده است. در نمونه‌های دسته دوم که افت ناگهانی بار در آن‌ها حادث شده است، نقطه‌ی حداکثر باربری به‌عنوان نقطه‌ی نهایی ظرفیت باربری نمونه منظور شده است.

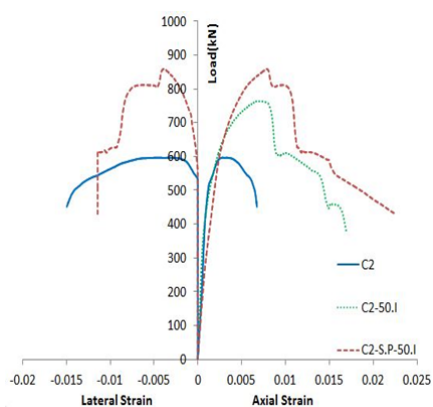
نتایج مربوط به آزمایش فشاری روی نمونه‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است؛ در این جدول نتایج مربوط به بار حداکثر (P_{max})، کرنش متناظر با بار حداکثر (ϵ_{c0})، کرنش محوری نهایی (ϵ_{cc}) و سطح زیر منحنی بار-کرنش تغییر مکان (E_u)، که بیانگر انرژی جذب شده می‌باشد، آورده شده است. لازم به توضیح است که در بسیاری از مقالات [26,27]، از سطح زیر منحنی تنش کرنش که بیانگر میزان جذب انرژی توسط سیستم و یا به عبارتی مقدار کار انجام شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد، به‌عنوان معیاری برای شکل‌پذیری ستون‌ها استفاده شده است؛ در این تحقیق نیز از این موضوع به همراه میزان کرنش نهایی نمونه‌ها به‌عنوان دو معیار برای شکل‌پذیری ستون‌ها استفاده شده است. هم‌چنین برای بیان میزان کارایی روش‌های به‌کار رفته در این تحقیق، از مقادیر $\frac{E_u}{E_{u0}}$ و $\frac{P_{max}}{P_{max0}}$ که به ترتیب بار حداکثر و انرژی جذب شده هر نمونه نسبت به بار حداکثر و انرژی جذب شده نمونه شاهد گروه خود می‌باشد، استفاده شده است. منحنی‌های بار-کرنش گروه‌های ۱ تا ۴ نیز در شکل (۴) آورده شده است. در شکل (۴)

جدول ۶ نتایج به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌ها

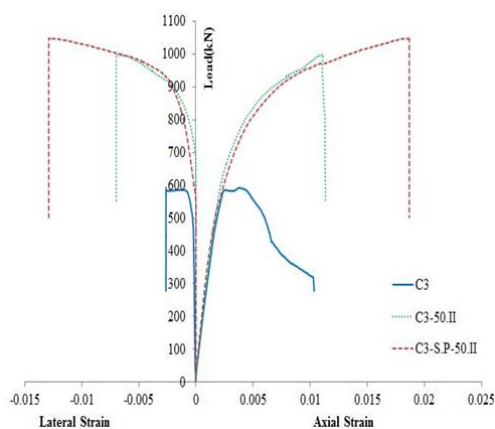
شماره گروه	نام ستون	P_{max} (kN)	ϵ_{c0}	ϵ_{cc}	E_u (N.m)	$\frac{P_{max}}{P_{max0}}$	$\frac{E_u}{E_{u0}}$
1	C1	648.27	0.00319	0.00695	865	1	1
	C1-50.I	821.74	0.00689	0.00775	1222	1.27	1.41
	C1-S-50.I	902.38	0.01084	0.01084	1904	1.39	2.20
2	C2	596.77	0.00315	0.00640	733	1	1
	C2-50.I	763.17	0.00738	0.00828	1203	1.28	1.64
	C2-S.P-50.I	858.18	0.00780	0.01030	1592	1.44	2.17
3	C3	592.22	0.00382	0.00597	644	1	1
	C3-50.II	997.70	0.01107	0.01113	1904	1.68	2.96
	C3-S.P-50.II	1047.20	0.01866	0.01868	3362	1.77	5.22
4	C4	564.02	0.00358	0.00579	622	1	1
	C4-W.I	917.76	0.01513	0.01514	2502	1.63	4.07
	C4*-S.P-50.I	810.44	0.01593	0.01677	2718	1.44	4.37
	C4-S.P-25.I	856.74	0.01179	0.01352	2221	1.52	3.57
	C4-S.P-25.II	998.17	0.01766	0.01813	3403	1.77	5.47



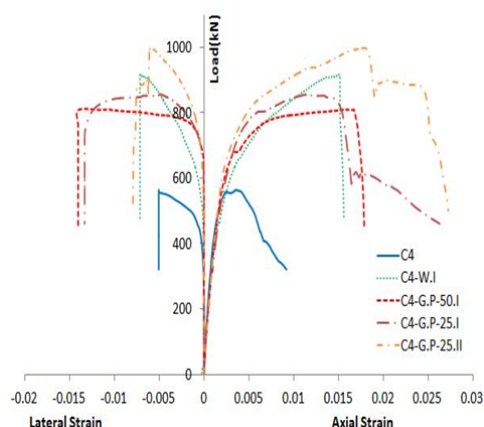
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

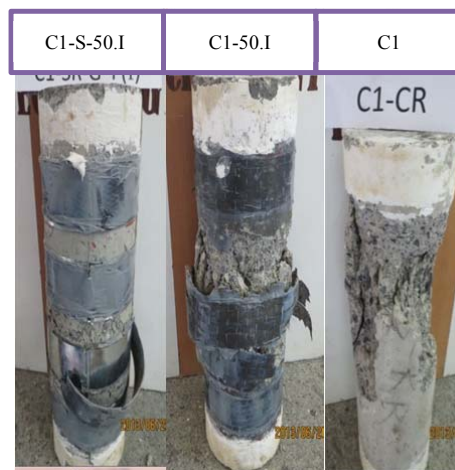
نمودار بار- کرنش جانبی نمونه C2-50.I به دلیل از کار افتادن LVDT جانبی ثبت نشده است
 شکل ۴ منحنی‌های بار کرنش؛ الف) گروه اول؛ ب) گروه دوم؛ ج) گروه سوم؛ د) گروه چهارم

که در نمونه بدون لایه میانی، پوسته بتنی همراه با FRP به فرم یک گوه از نمونه خارج می‌شود (شکل ۵-ب). در نمونه همراه با لایه میانی (شکل ۵-ج) ابتدا ریزترک‌هایی در بتن و در ناحیه میانی ایجاد می‌گردد. با اتساع بیشتر ستون، فشار وارد به ورق گالوانیزه نیز بیشتر می‌شود؛ ورق گالوانیزه ضمن جلوگیری از انتقال این ترک‌ها به ورق FRP قادر است رشد بیشتری از ترک را بدون آسیب به فرم ظاهری خود تحمل کند و در نهایت به دلیل اتساع بیش از حد ستون و بازشدگی

مود شکست و رفتار منحنی‌های بار- کرنش نمونه‌ها. به منظور بررسی و مقایسه مود گسیختگی نمونه‌ها، تصویر شکست نمونه‌های گروه اول در شکل (۵) نشان داده شده است. در نمونه شاهد مطابق شکل (۵-الف) با افزایش بارگذاری، ابتدا ترک‌های موازی با محور نمونه در آن ایجاد می‌شود، سپس با کمانش آرماتورها، پوسته بتنی کنده می‌شود و به بیرون پرتاب می‌شود. برای نمونه‌های تقویت‌شده، عمدتاً شکست ستون با پارگی FRP در ناحیه یک‌سوم میانی حادث شده است؛ طوری

تقویتی به دلیل اتساع کم ستون است. با توجه به شکل (۴-الف) منحنی مربوط به نمونه C1-50.I (نمونه تقویت شده به روش سنتی) بعد از رسیدن به بار حداکثر به صورت کاملاً افقی، که نشانگر حالت پلاستیک می باشد، ادامه پیدا کرده و در نهایت با افت شدید بار که در نقطه نهایی اتفاق افتاده، به زوال رسیده است. در واقع حالت پلاستیک که در ستون و با این میزان کامپوزیت مصرفی به دست آمده است، بیانگر محصورشدگی مؤثر و کافی نمونه می باشد. با توجه به این شکل، منحنی مربوط به ستون C1-S-50.I (تقویت شده با لایه میانی) به صورت یک منحنی دو قسمتی می باشد که هر دو قسمت آن صعودی است. در حقیقت بعد از رسیدن بار به مقدار بار متناظر با کرنش شکست نمونه محصور نشده، منحنی با یک ناحیه انتقال وارد ناحیه صعودی صعودی اما با شیب کمتر شده و در نهایت با افت شدید بار در نقطه حداکثر بار، که معادل با نقطه نهایی نیز می باشد، مواجه می شود. با مقایسه این منحنی با منحنی مربوط به نمونه C1-50.I می توان نتیجه گرفت که ورق گالوانیزه با ممانعت از انتقال تمرکز تنش و تنش های چند محوره به FRP باعث شده است که منحنی بار-کرنش محوری از حالت الاستوپلاستیک به حالت کرنش-سختی که نشانگر محصورشدگی مؤثرتری است، میل پیدا کند. لازم به ذکر است که اگر مقطع ستون به اندازه کافی تحت فشار محصورشدگی قرار گیرد، منحنی تنش-کرنش بتن به صورت دوخطی و همراه با دو شاخه صعودی است؛ به این رفتار کرنش-سختی اطلاق می شود. در این نوع رفتار، مقاومت فشاری حداکثر و کرنش حداکثر در یک نقطه اتفاق می افتد و تنش حداکثر و تنش نهایی برابر است. اگر میزان محصورشدگی به اندازه کافی مؤثر نباشد، منحنی تنش-کرنش بعد از نقطه اوج با شاخه نزولی همراه است که این رفتار به کرنش-نرمی معروف است. برای نمونه های دولایه نیز همان گونه که از شکل (۴-ج) مشخص است منحنی بار-کرنش محوری

بیشتر ترک، شرایط پارگی ورق تقویتی FRP را فراهم نماید. لازم به ذکر است که اندازه بازشدگی ترک ها در نمونه های با لایه میانی در لحظه رسیدن به بار حداکثر نسبت به نمونه شاهد و نمونه بدون لایه میانی بسیار بزرگتر است که می تواند مؤید تحمل بار و تغییر مکان بیشتر این نمونه باشد؛ اما با این وجود به دلیل ممانعت لایه میانی، این ترک ها به ورق FRP منتقل نمی شوند. همان گونه که در شکل (۵-ج) نیز نشان داده شده است، بعد از پارگی ورق FRP، این ورق به طور کامل از ورق گالوانیزه جدا شده است. این مطلب نشانگر آن است که تقریباً هیچ گونه انتقال نیروی برشی از ورق FRP به ورق گالوانیزه که منجر به نقش باربری ورق گالوانیزه شود، صورت نمی گیرد. مود کلی گسیختگی نمونه های سایر گروه ها، صرف نظر از نوع آرایش، تقریباً مشابه نمونه های گروه اول می باشد.



شکل ۵ نحوه زوال و شکست نمونه ها، الف) نمونه شاهد (ب) نمونه بدون لایه میانی (ج) نمونه با لایه میانی

برای تحلیل حالت رفتاری نمونه ها، منحنی بار-کرنش نمونه های گروه های اول تا چهارم در شکل (۴) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل (۴) دیده می شود، قسمت اولیه همه منحنی ها (مربوط به هر گروه) بر هم منطبق است که این بیانگر سختی یکسان ستون ها در مراحل اولیه بارگذاری و غیرفعال بودن ورق

در مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌ها، نمونه C4-W.I از گروه چهارم به صورت کامل توسط نوارهای FRP در یک لایه در تمام ارتفاع ستون دورپیچ شده است. چنانچه در جدول (۶) مشاهده می‌شود میزان افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه شاهد در این نمونه، ۳۰۷ درصد ثبت شده است که نسبت به نمونه C3-50.II (نمونه‌ی تقویت شده با نوارهای منقطع FRP با عرض و فاصله آزاد ۵۰ میلی‌متر) با همان مقدار مصرف FRP افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. در توضیح دلیل این موضوع می‌توان گفت که نمونه‌های با محصورشدگی کامل در ارتفاع، به دلیل پخش یکنواخت‌تر انرژی در کل ارتفاع ستون، ظرفیت بیشتری برای جذب انرژی دارند. با این وجود با توجه به سهولتی که نصب نوارهای منقطع نسبت به نوارهای پیوسته دارد و همچنین سهولت استفاده از لایه میانی در نوارهای منقطع نسبت به نوارهای پیوسته، به نظر می‌رسد در بسیاری از موارد، استفاده از نوارهای منقطع کارایی بیشتری نسبت به نوارهای پیوسته خواهد داشت.

ج) تأثیر لایه میانی: مطابق نتایج به دست آمده در جدول (۶)، در نمونه‌هایی که در آن‌ها از ورق گالوانیزه به عنوان لایه میانی استفاده شده است، میزان بار و تغییرشکل نهایی و همچنین میزان جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون ورق گالوانیزه افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. نمونه‌های گروه اول که برای ارزیابی میزان کارایی ورق گالوانیزه مورد استفاده قرار گرفت، بیانگر افزایش ۱۲ درصدی بار و ۷۹ درصدی جذب انرژی نسبت به نمونه بدون لایه میانی است. علاوه بر این از نظر کرنش نهایی نیز این نمونه افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی در این تحقیق اثر ورق گالوانیزه به همراه بتونه بر میزان افزایش بار، بین ۹ تا ۱۶ درصد برای روش‌های تقویتی مختلف، به دست آمده است. از لحاظ میزان جذب انرژی نیز نمونه-

نمونه‌های محصورشده به دلیل میزان محصورشدگی بیشتر، دارای شیب و طول بیشتری نسبت به نمونه‌های زیرگروه یک است که بیانگر مقاومت و جذب انرژی بالاتر می‌باشد. برای بررسی اتساع جانبی نیز همان‌گونه که منحنی‌های بار-کرنش جانبی نشان می‌دهند، همه نمونه‌های تقویت شده در میزان اتساع بیشتری نسبت به نمونه شاهد به نقطه شکست خود رسیده‌اند.

تأثیر روش تقویت. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر لایه میانی در کارایی FRP، علاوه بر بررسی تأثیر فضای خالی بین سطح بتن و لایه میانی به بررسی اثر تعداد لایه‌های تقویتی، اثر عرض نوار و همین‌طور اثر تقویت به صورت دورپیچ کامل پرداخته شده است. در ادامه اثر هرکدام از این عوامل به صورت جداگانه بررسی شده است.

الف) تأثیر تعداد لایه‌ها: با مقایسه ظرفیت باربری به دست آمده برای نمونه‌های تقویت شده با یک لایه و دو لایه ورق تقویتی (جدول ۶)، مشاهده می‌شود که با دو برابر کردن لایه‌ها، میزان افزایش کارایی نیز بیش از دو برابر شده است. دلیل این موضوع را شاید بتوان در کارایی کمتر لایه اول (نسبت به سایر لایه‌ها) و مؤثرتر بودن عوامل کاهنده کرنش در لایه اول جست‌وجو کرد. لایه اول به دلیل تماس مستقیم با سطح بتن، در مقایسه با سایر لایه‌ها بیشترین تأثیر را از ترک‌های وارد به سطح بتن می‌پذیرد؛ بنابراین معمولاً کارایی لایه‌های بعدی نسبت به لایه اول بیشتر است و افزایش ظرفیتی که در نمونه‌های دولایه مشاهده می‌شود (با توجه به میزان مصرف FRP) به دلیل کارایی بهتر لایه دوم می‌باشد. این موضوع بیانگر تأثیرات زیاد پیوستگی بتن و کامپوزیت در کاهش کارایی FRP می‌باشد و اهمیت این تحقیق را بیشتر مشخص می‌سازد.

ب) تأثیر تقویت به صورت نوار منقطع و دورپیچ کامل: به منظور بررسی تأثیر پیوستگی نوارهای دورپیچ

میانی و سطح بتن بوده و در صورت نبود این فضای خالی، بتونه تأثیری در بهبود عملکرد رفتاری ستون نخواهد داشت. از طرف دیگر وجود فضای خالی و عدم حذف آن‌ها می‌تواند به عملکرد ضعیف ورق تقویتی منجر شود. از آن‌جا که پیش‌بینی وجود یا عدم وجود فضای خالی بین لایه‌ی میانی و سطح بتن در موارد عملی تقویت ستون‌ها غیرممکن است، لذا به‌نظر می‌رسد که به منظور اطمینان از صحت عملکرد سیستم تقویت و کاهش میزان ریسک، لازم است که در تمامی حالات در زیر لایه‌ی میانی از بتونه به‌عنوان یک ماده‌ی پرکننده استفاده شود.

د) تأثیر عرض نوار تقویتی: برای بررسی اثر عرض نوار می‌توان به گروه‌های ۲ و ۴ از جدول (۶) مراجعه کرد. در گروه ۲ عرض نوارهای تقویتی ۵۰ میلی‌متر است و در گروه ۴ از همان مقدار FRP ولی با عرض ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود میزان افزایش مقاومت در ستون‌های محصورشده با نوارهای یک لایه‌ی ۵۰ میلی‌متری ۴۴ درصد بوده، درحالی‌که این مقدار برای نوارهای محصورشده با یک لایه نوارهای ۲۵ میلی‌متری ۵۲ درصد می‌باشد. از لحاظ میزان جذب انرژی نیز نوارهای ۲۵ میلی‌متری افزایش بیشتری را نسبت به نوارهای ۵۰ میلی‌متری نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان کارایی ورق گالوانیزه را در نمونه‌های با عرض ورق کمتر به این صورت توجیه کرد که نوارهای با تعداد بیشتر و عرض کمتر با گستردگی بهتر خود در تمام ارتفاع ستون، باعث پخش یکنواخت‌تر انرژی در کل ارتفاع ستون می‌شوند و شرایط محصورکنندگی بهتری را ایجاد می‌کنند. هم‌چنین عرض کمتر ورق شرایط محصورشدگی را برای نواحی مرکزی ستون (محل پارگی نوارها)، بهتر فراهم می‌کند و بنابراین محصوریت بیشتر ستون

های با ورق گالوانیزه افزایش ۵۳ تا ۲۲۶ درصدی را نشان می‌دهند. برای اطمینان از عدم پیوستگی بین ورق FRP و ورق گالوانیزه و هم‌چنین اطمینان از عدم محصورسازی ستون توسط لایه‌ی میانی، در نمونه C4*-S.P-50.I از یک لایه پلاستیک نازک به ضخامت ۰/۰۲ میلی‌متر در حد فاصل بین ورق FRP و ورق گالوانیزه استفاده شده است. این لایه نازک باعث می‌شود که هیچ‌گونه چسبندگی بین ورق FRP و ورق گالوانیزه وجود نداشته باشد. همان‌گونه که از مقایسه‌ی ظرفیت باربری ستون‌های C2-S.P-50.I و C4*-S.P-50.I در جدول (۶) مشاهده می‌شود، از لحاظ کسب مقاومت، این دو نمونه مشابه هم می‌باشند، اما جذب انرژی در نمونه C4*-S.P-50.I به دلیل کاهش بیشتر تنش‌های برشی انتقالی به ورق تقویتی، بیشتر از نمونه C2-S.P-50.I می‌باشد. به عبارت دیگر به نظر می‌رسد روش‌هایی که تنش‌های انتقالی از بتن به ورق‌های دورگیرکننده تقویتی را به حداقل می‌رسانند، در افزایش شکل‌پذیری تأثیر بیشتری دارند.

لازم به ذکر است که محصورشدگی مناسب، مستلزم عدم وجود هرگونه فاصله آزاد بین سطح بتن و عامل دورگیرکننده است. از آن‌جا که در نمونه‌های فشاری اتساع معمولاً در حدود ۸۰ درصد بار نهایی آغاز می‌شود، لذا به‌نظر می‌رسد کارایی بتونه نیز به‌عنوان یک ماده‌ی پرکننده به این ناحیه محدود می‌شود. وجود یک ماده‌ی پرکننده در فاصله آزاد بین سطح ستون و ورق لایه‌ی میانی می‌تواند تنش‌های شعاعی اندک ایجاد شده در نمونه تحت بارگذاری را قبل از شروع اتساع، به‌صورت تنش حلقوی به ورق تقویتی منتقل نماید. با توجه به عدم وجود هرگونه نقش سازه‌ای بتونه در افزایش ظرفیت باربری می‌توان گفت تأثیر بتونه فقط منحصر به وجود فاصله‌های آزاد بین لایه‌ی

و تأثیر فضای خالی بین سطح بتن و لایه میانی، به بررسی اثر تعداد لایه‌های تقویتی و اثر عرض نوار پرداخته شده است.

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از آزمایش نمونه‌های موجود در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱. استفاده از ورق گالوانیزه به عنوان لایه میانی، مانع از انتقال تمرکز تنش و هم‌چنین تنش‌های چندمحوره به ورق تقویت‌شده و باعث افزایش ۱۶ درصدی بار حداکثر و ۵۳ درصدی میزان جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده با یک لایه الیاف کربن نسبت به نمونه بدون لایه میانی می‌شود.

۲. استفاده از لایه میانی رفتار ستون را از حالت کرنش-نرمی به حالت کرنش-سختی تغییر می‌دهد. در واقع با استفاده از تکنیک جدید می‌توان حالت محصورشدگی ضعیف ستون را به حالت محصورشدگی مؤثر تبدیل نمود. استفاده از لایه میانی باعث می‌شود که بخش دوم منحنی بار-کرنش محوری ستون‌های محصور شده کشیده‌تر شود، که به معنای جذب انرژی بیشتر نمونه است.

۳. وجود فاصله آزاد بین سطح بتن و لایه میانی به شدت بر کارایی لایه میانی تأثیرگذار است. استفاده از یک لایه بتونه در زیر لایه میانی از فعال شدن دیر هنگام ورق تقویتی ممانعت می‌کند.

۴. کاهش عرض نوارهای تقویتی از ۵۰ میلی‌متر به ۲۵ میلی‌متر، به دلیل پخش یکنواخت‌تر انرژی در ارتفاع ستون، باعث افزایش ۸ درصدی بار حداکثر و ۱۴۰ درصدی جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده با نوارهای یک‌لایه می‌شود.

موجب ظرفیت باربری بیشتر ستون می‌شود. برای نمونه‌های دولایه، با مقایسه ستون‌های C3-S.P-50.II و C4-S.P-25.II، مشاهده می‌شود که عرض نوار تأثیر خاصی در میزان مقاومت و جذب انرژی ندارد. بنابراین می‌توان گفت ستون‌های با محصورشدگی بالاتر (دولایه) به دلیل سختی محوری بیشتر، برای رسیدن به پخش یکنواخت‌تر انرژی در ارتفاع خود، نیاز به عرض‌های بسیار کمتر از ۲۵ میلی‌متر دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی با استفاده از یک لایه میانی در حد فاصل سطح ستون و عامل محصورکننده، ضمن استفاده بهتر از ظرفیت ورق تقویتی، شکل‌پذیری و میزان باربری ستون افزایش داده شده است. به منظور بررسی اهداف تحقیق، ۱۴ عدد ستون بتن‌آرمه به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر پس از تقویت و محصورسازی با نوارهای منقطع CFRP، به روش‌های مختلف، تحت بار محوری فشاری مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور جلوگیری از انتقال تمرکز تنش ناشی از ترک‌خوردگی ستون و هم‌چنین کاهش تنش‌های برشی وارده به ورق تقویتی، در بعضی از نمونه‌ها از ورق گالوانیزه به عنوان لایه میانی استفاده شده است. هم‌چنین از آنجا که ممکن است به دلیل اعوجاج سطح ستون یا ورق لایه میانی، مقداری فضای خالی و فاصله آزاد بین سطح ستون و لایه میانی وجود داشته باشد که باعث تأخیر در فعال شدن ورق تقویتی شود، از یک لایه بتونه، به عنوان ماده‌ی پرکننده این فضاها استفاده شده است. در این تحقیق علاوه بر بررسی اثرات لایه میانی

مراجع

1. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined By Fiber Composites", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, pp. 1025-1031, (1998).
2. Structures, C., "ACI Committee 440", American Concrete Institute, ACI, Vol., (2008).
3. No, D.M., "ISIS CANADA RESEARCH NETWORK", (2007).

4. Parretti, R., and Nanni, A., "Axial Testing of Concrete Columns Confined with Carbon FRP: Effect of Fiber Orientation", *Proceedings. CD Proc. of the third international conference on composites in infrastructure*, (2002).
5. Chaallal, O., Shahawy, M., and Hassan, M., "Performance of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Wrapping", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, pp. 200-208, (2003).
6. Theriault, M., Neale, K.W., and Claude, S., "Fiber-Reinforced Polymer-Confined Circular Concrete Columns: Investigation of Size and Slenderness Effects", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, pp. 323-331, (2004).
7. Matthys, S., Toutanji, H., and Taerwe, L., "Stress-Strain Behavior of Large-Scale Circular Columns Confined with FRP Composites", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, pp. 123-133, (2006).
8. Al-Salloum, Y.A., "Influence of Edge Sharpness on the Strength of Square Concrete Columns Confined with FRP Composite Laminates", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 38, pp. 640-650, (2007).
9. Hadi, M., "Behaviour of FRP Wrapped Normal Strength Concrete Columns Under Eccentric Loading", *Composite structures*, Vol. 72, pp. 503-511, (2006).
10. Yang, X., Nanni, A., and Chen, G., "Effect of Corner Radius on the Performance of Externally Bonded FRP Reinforcement", *Proceedings. 5th international. conference. on Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures*, (2001).
11. Yang, X., Wei, J., Nanni, A., and Dharani, L.R., "Shape Effect on the Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer Wraps", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, pp. 444-451, (2004).
12. Toutanji, H., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", *ACI Materials Journal*, Vol. 96, (1999).
13. Xiao, Y., and Wu, H., "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 12, pp. 139-146, (2000).
14. Lam, L., and Teng, J., "Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, pp. 539-548, (2004).
15. Cole, C.B., "Performance of FRP-Jacketed Reinforced Concrete Columns Subjected to Uniaxial Compression", *Master of Science in Civil Engineering*, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, (2001).
16. De Lorenzis, L., and Tepfers, R., "Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, pp. 219-237, (2003).
17. Pessiki, S., Harries, K.A., Kestner, J.T., Sause, R., and Ricles, J.M., "Axial Behavior of Reinforced

- Concrete Columns Confined with FRP Jackets", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, pp. 237-245, (2001).
18. Shahawy, M., Mirmiran, A., and Beitelman, T., "Tests and Modeling of Carbon-Wrapped Concrete Columns", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, pp. 471-480, (2000).
19. Matthys, S., Taerwe, L., and Audenaert, K., "Tests on Axially Loaded Concrete Columns Confined by Fiber Reinforced Polymer Sheet Wrapping", *ACI Special Publication*, Vol. 188, (1999).
20. Fraldi, M., Nunziante, L., Carannante, F., Prota, A., Manfredi, G., and Cosenza, E., "On the Prediction of the Collapse Load of Circular Concrete Columns Confined by FRP", *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 3247-3264, (2008).
21. Fam, A.Z., and Rizkalla, S.H., "Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes", *ACI structural journal*, Vol. 98, (2001).
22. Harries, K.A., and Carey, S.A., "Shape and "Gap" Effects on the Behavior of Variably Confined Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 881-890, (2003).
23. Campione, G., "Influence of FRP Wrapping Techniques on the Compressive Behavior of Concrete Prisms", *Cement and concrete composites*, Vol. 28, pp. 497-505, (2006).
۲۴. ایلیا، الهه، « بررسی رفتار محوری ستون‌های محوری چهارگوش تقویت‌شده با نوارهای FRP در گوشه‌ها و بست‌های FRP در وجوه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان. (۱۳۹۱)
25. Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., Echary, H.E., Mastrapa, J.C., and Pico, O., "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, pp. 175-185, (1998).
26. Rousakis, T. C., Karabinis, A. I., Kiousis, P. D., "FRP-Confined Concrete Members: Axial Compression Experiments and Plasticity Modeling". *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 7, pp. 1343–1353, (2007).
27. Piekarczyk, J., Piekarczyk, W., Blazewicz, S., "Compression Strength of Concrete Cylinders Reinforced with Carbon fiber Laminate", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 2365-2369, (2011).