

رفتار محوری ستون‌های بتن آرمه مربعی محصور شده با استفاده از نوارهای FRP در گوشه‌ها و بست‌های FRP در وجوه

داود مستوفی نژاد

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

الهه ایلیا*

کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

یکی از روش‌های رایج برای تقویت اعضای بتن آرمه از جمله ستون‌ها، محصورسازی آن‌ها توسط کامپوزیت‌های FRP می‌باشد. براساس تحقیقات انجام گرفته، هنگامی که کامپوزیت FRP به صورت دورپیچ چسبیده به بتن، برای محصورسازی ستون‌ها به کار رود، از تمامی ظرفیت کششی آن استفاده نمی‌شود؛ به طوری که FRP در کرنشی بسیار کمتر از مقدار ظرفیت کششی گزارش شده طبق آزمایش نمونه‌های تخت گسیخته می‌شود. به علاوه، پارگی زود هنگام FRP در ستون‌های با مقطع چهارگوش به علت توزیع غیریکنواخت فشار محصورکننده روی محیط مقطع و تمرکز تنش در گوشه‌های آن مورد توجه بیش تری می‌باشد. در تحقیق حاضر تکنیک جدیدی تحت عنوان استفاده از نوارهای گوشه به همراه بست‌های FRP، جهت محصورسازی ستون‌های بتنی چهارگوش، مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش سعی شده که با کاهش انحنای ورقه‌های FRP در حین محصورسازی نمونه و نزدیک نمودن عملکرد آن به نمونه‌های تخت، از کارایی کامپوزیت در حد مطلوبی استفاده گردد. برای مقایسه روش جدید ذکر شده با سایر روش‌های محصورسازی، ۱۱ نمونه ستون بتن آرمه مربعی به ابعاد $133 \times 133 \times 500$ میلی‌متر، تحت آزمایش فشار تک محوری قرار گرفتند. پارامترهای مورد مطالعه در این نمونه‌ها شامل تأثیر روش تقویتی، پیوستگی یا غیر پیوستگی نوارهای گوشه در ارتفاع و حجم الیاف مصرفی می‌باشد. نتایج حاصل نشان دادند که استفاده از تکنیک جدید نوار گوشه-بست، شرایطی را فراهم می‌سازد که نوارهای بست محصورکننده به صورت کاملاً یکنواخت تحت کشش ناشی از محصورشدگی قرار گیرند؛ بنابراین با ایجاد محصورشدگی یکنواخت در مقطع و همچنین حذف اثرات منفی ناشی از تمرکز تنش در گوشه‌ها، میزان مقاومت و شکل‌پذیری نمونه را به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه دورپیچ شده به صورت معمول افزایش می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: محصور شدگی، کامپوزیت CFRP، ستون بتن آرمه مربعی، نوار گوشه، بست، فشار تک‌محوری.

* نویسنده مسؤول: e.ilia@cv.iut.ac.ir

۱- مقدمه

ستون نسبت به نمونه‌های تخت، اتصال غیریکنواخت FRP به نمونه و هندسه غیرپیوسته FRP در نواحی انتهایی به علت وجود هم‌پوشانی را برای تفاوت کرنش موجود بین دورپیچ محصور کننده FRP و نمونه‌های تخت بیان نموده‌اند.

بر این اساس در آیین‌نامه ACI 440.2R-08 نیز ضریبی به نام K ، تحت عنوان ضریب کارایی کرنش^۱ تعریف می‌شود که رابطه بین کرنش پارگی حلقوی و کرنش پارگی نمونه‌های تخت را بیان می‌کند. محدوده تغییرات این ضریب در بازه ۰/۵۷ تا ۰/۶۱ پیشنهاد شده است [۱۰].

بر اساس مطالعات انجام گرفته روی مقاطع محصور در FRP، در ستون‌های چهارگوش محصور شده تحت بار محوری، به دلیل هندسه غیر یکنواخت، با توزیع غیریکنواخت فشار محصورکننده روی محیط مقطع ستون، اثر محصورشدگی کمتری را نسبت به ستون‌های دایره‌ای شاهد هستیم. همچنین تمرکز تنش در گوشه‌های تیز مقاطع چهارگوش باعث شکست زودرس FRP در کرنشی بسیار کوچک‌تر از ظرفیت کششی آن خواهد شد [۱۱] و [۱۲]؛ در این صورت نیز از ظرفیت کششی کامپوزیت محصورکننده در حد مطلوب استفاده نمی‌گردد. این امر پژوهشگران را بر آن داشته است تا روش‌های متفاوتی را جهت بهبود کارایی محصورشدگی در ستون‌های چهارگوش تقویت شده با FRP ارائه نمایند. در هر یک از این روش‌ها سعی شده است با ایجاد توزیع یکنواختی از تنش‌های محصورکننده روی محیط، به نحوی اثر تمرکز تنش در گوشه‌ها تعدیل گردد.

یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های موجود، گرد کردن گوشه‌های مقطع ستون است؛ که علاوه بر افزایش سطح مقطع محصور شده، روشی مؤثر در کاهش اثر برندگی گوشه‌ها بر صفحات FRP است. آزمایش‌های راش و لایزیر [۱۳]، کول و بلاری [۱۴]، ینگ و همکاران [۱۵ و ۱۶]، ال-سلوم [۱۷]، ونگ و وو [۱۸]، عباس‌نیا و همکاران [۱۹] و مستوفی‌نژاد و همکاران [۲۰ و ۲۱] نشان دادند که میزان تأثیر محصورشدگی به تدریج با افزایش شعاع گوشه افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش گردی گوشه و تغییر شکل مقطع از چهارگوش به دایره، توزیع تنش‌های

استفاده از کامپوزیت‌های FRP به‌عنوان تکنیک مؤثری در تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه شناخته شده است. یکی از موارد استفاده از این کامپوزیت‌ها، افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های بتن آرمه در محصورسازی با استفاده از پوشش خارجی چسبیده به بتن می‌باشد. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند که عوامل مختلفی می‌تواند کارایی کامپوزیت محصورکننده را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین یکی از مسائل اساسی موجود در محصورسازی با استفاده از این کامپوزیت‌ها، کاربرد روش‌هایی است که بتوان با استفاده از آن‌ها، از بیش‌ترین ظرفیت و کارایی کامپوزیت به صورت مؤثر بهره گرفت.

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، شکست ستون بتنی محصور در کامپوزیت FRP به شرط تأمین طول هم‌پوشانی کافی، با پارگی حلقوی کامپوزیت کنترل می‌شود [۱-۴]. بنابراین با توجه به این که شکست نمونه‌ها با پارگی پوشش FRP اتفاق می‌افتد، کرنش نهایی و مقاومت کششی نهایی FRP در آزمایش، در تعیین وضعیت نهایی بتن محصور شده تأثیر گذار است.

۲- پیشینه مطالعات انجام شده

در بیش‌تر آزمایشات انجام شده روی ستون‌های محصور در کامپوزیت چسبیده به بتن، کرنش پارگی FRP بسیار کوچک‌تر از کرنش به دست آمده از آزمایش نمونه‌های تخت گزارش شده است. این امر نشان می‌دهد که در لحظه شکست، تنش در FRP به مقاومت نهایی نرسیده و از تمام ظرفیت کششی کامپوزیت در محصورسازی استفاده نشده است. محققان در توضیح این مطلب دلایل مختلفی ارائه نموده‌اند؛ زیانو و وو [۳]، پسکی و همکاران [۵]، لام و تنگ [۶ و ۷]، زینو و همکاران [۸] و چن و همکاران [۹]، دلایلی از قبیل کاهش کیفیت پوشش‌های منحنی شکل پیچیده شده به دور ستون در مقایسه با نمونه‌های تخت، قرار گرفتن کامپوزیت دورپیچ تحت اثر تنش‌های چند محوره برخلاف نمونه‌های تخت، تغییر شکل غیریکنواخت بتن ترک خورده و تمرکز تنش موضعی ناشی از ترک خوردگی و خردشدگی بتن زیر لایه FRP در حالت دورپیچ، ضعف‌های احتمالی موجود در پوشش کامپوزیتی محصورکننده چسبیده به

شکست زودرس کامپوزیت در گوشه‌ها جلوگیری کرده و میزان کارایی لایه‌های محصورکننده افقی را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش عرض نوارهای گوشه، حداکثر مقاومت و شکل‌پذیری نمونه با افزایش بیش‌تری همراه است [۲۳].

۳- بیان موضوع تحقیق

با توجه به توضیحات ارائه شده، برای جلوگیری از پارگی زود هنگام FRP و بهبود کارایی آن در محصورسازی ستون‌های چهارگوش، نیاز به رویکرد جدیدی در استفاده از کامپوزیت محصورکننده داریم؛ به طوری که تا حد امکان کرنش پارگی FRP به کرنش نهایی حاصل از آزمایش کشش مستقیم نزدیک‌تر شود. به همین منظور، در تحقیق حاضر، تکنیک جدیدی با عنوان استفاده از نوارهای گوشه به همراه بست‌های FRP برای محصورسازی ستون‌های بتنی مربعی، ارائه گردیده است. بست‌های مورد استفاده در این روش، به صورت نوارهای کاملاً تخت و بدون انحنا در هر یک از ۴ وجه ستون بتنی به کار رفته و با اتصال به نوارهای گوشه در دو انتها بتن را پوشش داده و محصور می‌کنند. در این صورت کامپوزیت محصورکننده به صورت بست، در عمل نیز رفتاری نزدیک به نمونه‌های موجود در آزمایش‌های تخت از خود نشان می‌دهد. بنابراین تنش‌های محصورکننده به صورت یکنواخت‌تر روی محیط مقطع ستون توزیع شده و تأثیرات منفی ناشی از تمرکز تنش در گوشه نیز کنترل می‌گردد. برنامه آزمایشگاهی انجام گرفته در این تحقیق شامل مقایسه تکنیک جدید ارائه شده با سایر روش‌های محصورسازی موجود در افزایش مشخصات باربری ستون‌های مربعی محصور در FRP و همچنین بررسی پارامترهایی از جمله پیوستگی یا غیرپیوستگی نوارهای گوشه در ارتفاع و حجم الیاف مصرفی می‌باشد.

۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱- مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل تعداد ۱۱ عدد ستون بتن آرمه مربعی به ابعاد مقطع 133×133 میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشند که در ۳ گروه طبقه‌بندی می‌شوند. در هر گروه یک نمونه به عنوان نمونه شاهد (بدون تقویت خارجی) در نظر

محصورکننده روی محیط مقطع یکنواخت‌تر شده که در نتیجه افزایش مقاومت و کرنش نهایی نمونه را در پی دارد.

رویکرد مؤثر دیگری در جهت افزایش کارایی کامپوزیت محصورکننده در مقاطع چهارگوش، که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از نوارهای عمودی FRP (با الیاف در جهت افقی) به منظور تقویت موضعی گوشه‌های ستون چهارگوش، پیش از دورپیچی با نوارهای محصورکننده افقی می‌باشد. در این زمینه برای نخستین بار کمپیون و همکاران در سال ۲۰۰۳ رفتار ستون‌های چهارگوش محصور در کامپوزیت CFRP را مورد ارزیابی قرار داده و اثر تقویت موضعی با استفاده از نوارهای قائم در گوشه‌های مقطع را بررسی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که تقویت موضعی در گوشه‌های مقطع روشی مناسب جهت تعدیل اثر تمرکز تنش در گوشه و جلوگیری از پارگی FRP در گوشه‌ها می‌باشد [۲۱]. همچنین کمپیون در سال ۲۰۰۶، با آزمایش بر روی مقاطع مربعی محصور در FRP، اثر پارامترهایی نظیر تقویت موضعی در گوشه‌های مقطع ستون، تعداد لایه‌های محصورکننده و ارتفاع نمونه را مورد بررسی قرار داد. یک مدل عددی برای پیش‌بینی مقاومت حداکثر مقاطع مربعی محصور در FRP نیز توسط این محقق ارائه گردید. نتایج به دست آمده از این تحقیقات نشان داد که تقویت موضعی در گوشه‌ها پیش از دورپیچی با لایه‌های محصورکننده CFRP، تمرکز تنش در گوشه‌ها را کاهش داده و مانع از پارگی زود هنگام کامپوزیت در نواحی گوشه و در کرنشی کم‌تر از ظرفیت کششی آن می‌شود. این امر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی کامپوزیت محصورکننده در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون چهارگوش دارد [۲۲].

مستوفی نژاد و کیانی در سال ۲۰۱۰، به مدل‌سازی رفتار محوری ستون‌های مربعی محصور در FRP به روش اجزاء محدود و بررسی تأثیر مقاومت‌سازی گوشه‌های مقطع با نوارهای عمودی FRP پرداختند. ایشان همچنین به بررسی پارامترهایی از جمله تعداد لایه‌های کامپوزیت محصورکننده، نسبت عرض نوار گوشه به عرض ستون و محصورسازی با نوارهای ناپیوسته افقی در میزان کارایی محصورشدگی پرداختند. براساس نتایج به‌دست آمده، مقاوم‌سازی موضعی در گوشه‌های ستون چهارگوش، قبل از محصورسازی آن با لایه‌های افقی کامپوزیت FRP، از

صورتی که نوارهای گوشه به صورت غیرپیوسته در ارتفاع به کار رود نماد ² IVS مورد استفاده قرار گرفته است. نمادهای ³ IW و ⁴ B نیز به ترتیب بیانگر استفاده از دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع و بست برای تقویت می‌باشد. همچنین ⁵ R معرف نمونه شاهد بدون تقویت است. اعداد ۱ یا ۲ پس از نماد مربوط به روش تقویت، بیانگر تعداد لایه‌های محصورکننده می‌باشد. ضخامت الیاف مورد استفاده برای تقویت نمونه‌های هر گروه نیز با اعداد ۰/۱۱۰ یا ۰/۱۳۱ مشخص شده است.

قابل ذکر است که در تکنیک‌های مورد استفاده برای تقویت ستون‌های تحقیق حاضر، تمامی ستون‌ها با استفاده از نوارهای محصورکننده به صورت غیرپیوسته در ارتفاع و هر نوار به عرض ۵۰ میلی‌متر، تقویت شده است. آرایش این نوارها در ارتفاع به صورت یکی در میان و با فاصله آزاد ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. لازم به توضیح است که تقویت به صورت غیرپیوسته در ارتفاع، بیشتر به منظور صرفه‌جویی در مصرف FRP می‌باشد. همچنین با توجه به این که آرماتورهای طولی در تمامی نمونه‌ها ۲۰ میلی‌متر مانده به دو انتهای ستون قطع می‌شوند، بنابراین نواحی ۲۰ میلی‌متری انتهایی ستون ضعیف‌تر از سایر نواحی می‌باشد و ممکن است ستون دچار شکست زود هنگام در این نواحی شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل، در تقویت هر نمونه از دو نوار محصورکننده CFRP به عرض ۵۰ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر، علاوه بر تقویت مورد نظر برای آن نمونه، در دو انتهای ستون استفاده شده است.

در مقاوم سازی با استفاده از دو تکنیکی که در آن‌ها از نوار گوشه استفاده می‌شود، براساس نتایج به دست آمده از مطالعات اولیه انجام شده برای پژوهش حاضر، که در آن از نوار گوشه به طول‌های یک چهارم و یک سوم بعد مقطع استفاده شده، استفاده از طول بیشتر برای نوار گوشه دارای کارایی بالاتری در افزایش مشخصه‌های باربری ستون می‌باشد. همچنین با توجه به تحقیقات محققان قبلی [۲۲ و ۲۳]، طول نوار گوشه معادل یک سوم بعد مقطع، طول بهینه دست آمده برای این نوارها در تکنیک نوار گوشه-دورپیچ می‌باشد. بنا براین اندازه نوارهای گوشه مورد

گرفته شده و سایر نمونه‌های آن گروه به روش‌های مختلف توسط کامپوزیت CFRP محصور شده‌اند.

میزان آرماتورهای طولی مورد استفاده در همه ستون‌ها برابر ۱/۸ درصد سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد که این مقدار با استفاده از ۴ عدد آرماتور به قطر ۱۰ میلی‌متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش روی آرماتورهای طولی، این آرماتورها در فاصله ۲۰ میلی‌متری مانده به دو انتهای ستون قطع شده‌اند؛ بنابراین طول در نظر گرفته شده برای آرماتورهای طولی ۴۶۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین در هر شبکه آرماتور از ۶ عدد خاموت به قطر ۸ میلی‌متر و فاصله مرکز تا مرکز ۸۵ میلی‌متر به‌عنوان آرماتور عرضی استفاده شده است؛ این فاصله به صورتی انتخاب شد که محصورشدگی داخلی زیادی توسط خاموت‌ها ایجاد نشود. ابعاد خاموت‌ها نیز طوری در نظر گرفته شد که به اندازه ۲۰ میلی‌متر پوشش بتن فراهم شود. از طرفی جهت تأمین پوشش مورد نظر برای آرماتورهای طولی و عرضی، دو خاموت انتهایی در هر شبکه میلگرد به صورت پایه‌دار ساخته شد. تنش تسلیم آرماتورها با استفاده از آزمایش کشش میلگرد تعیین شده و برای آرماتور با قطر ۱۰ میلی‌متر برابر ۴۰۶ مگا پاسکال و برای آرماتور با قطر ۸ میلی‌متر برابر ۵۵۰ مگا پاسکال می‌باشد.

۴-۲- دسته‌بندی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق، با تکنیک‌های مختلفی محصورسازی شده است. تکنیک‌های مورد نظر شامل استفاده از نوارهای CFRP به صورت دورپیچ، نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست می‌باشد. به منظور مقایسه روش‌های مختلف محصورسازی، نمونه‌ها در ۳ گروه طبقه‌بندی شده و تأثیر پارامترهایی نظیر پیوستگی یا غیرپیوستگی نوارهای گوشه در ارتفاع و حجم الیاف مصرفی مورد مطالعه قرار گرفت. جزئیات مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. کدهای مورد استفاده در نام‌گذاری نمونه‌ها به این صورت است که پارامتر اول به کار رفته بیانگر شماره گروه مربوط به نمونه می‌باشد. پس از آن در صورت استفاده از نوار گوشه برای تقویت نمونه، از نماد ¹ VS استفاده شده است؛ در

² Intermittent Vertical Strip

³ Intermittent Wrap

⁴ Batten

⁵ Reference Column

¹ Vertical Strip

صورت می‌توان مقایسه منطقی تری بین روش‌های تقویتی مورد بررسی انجام داد.

۴-۳- مشخصات بتن و مصالح FRP

طرح اختلاط بتن برای نمونه‌های مورد آزمایش در تحقیق حاضر، با استفاده از آیین‌نامه ACI-211 [۲۴] جهت دستیابی به مقاومت ۲۸ روزه ۲۸ مگا پاسکال تعیین گردید. به منظور دستیابی به مقاومت مورد نظر مقدار 398 kg/m^3 سیمان پرتلند تیپ ۱، 783 kg/m^3 شن، 888 kg/m^3 ماسه و 240 kg/m^3 آب مورد استفاده قرار گرفت. جهت تعیین مقاومت فشاری میانگین نمونه‌های ستون در زمان انجام آزمایش، تعداد ۱۲ نمونه استوانه‌ای استاندارد (۳ نمونه مقاومت فشاری به ازای هر گروه ستون) به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر نیز ساخته شده و تحت آزمایش فشار محوری خالص قرار گرفت. کلیه نمونه‌ها پس از باز شدن قالب تحت مراقبت ۲۸ روزه در محیط مرطوب قرار گرفته و پس از آن با استفاده از ورقه‌های FRP با سیستم شکل‌دهی مرطوب تقویت شد.

ورقه‌های کامپوزیتی مورد استفاده از جنس الیاف کربن، CFRP، و به صورت یک جهته می‌باشد. این ورقه‌ها با ضخامت مختلف از الیاف شامل ۰/۱۱ میلی‌متر و ۰/۱۳۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. رزین اپوکسی مورد استفاده نیز به صورت دو جزئی و با نام تجاری Sikadur-330 می‌باشد. مدت زمان لازم برای گیرش رزین و مراقبت از آن متأثر از دمای محیط بوده و در حالت متعارف و با توجه به توصیه‌های سازنده بین ۵ تا ۷ روز متغیر می‌باشد. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین براساس گزارشات کارخانه‌های سازنده [۲۵] در جدول ۲ قابل مشاهده است.

۴-۴- نحوه آزمایش نمونه‌ها

نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر، تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ kN قرار گرفتند. آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییر مکان و با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. به منظور تعیین نمودار بار- کرنش نمونه‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از

استفاده در این تحقیق طوری در نظر گرفته شد که طول آن روی هر ضلع برابر با یک سوم بعد مقطع باشد. با توجه به این که بعد مقطع نمونه‌ها برابر ۱۳۳ میلی‌متر می‌باشد، طول هر یک از نوارهای گوشه برابر ۹۰ میلی‌متر انتخاب شد؛ به طوری که نوار گوشه روی هر ضلع به اندازه ۴۵ میلی‌متر ($1:3 \cong 133:45$) امتداد می‌یابد. همچنین توجه شود که جهت الیاف مورد استفاده در نوارهای گوشه مشابه نوارهای محصورکننده، به صورت افقی می‌باشد.

دسته بندی نمونه‌ها در ۳ گروه مربوطه، به شرح زیر می‌باشد:

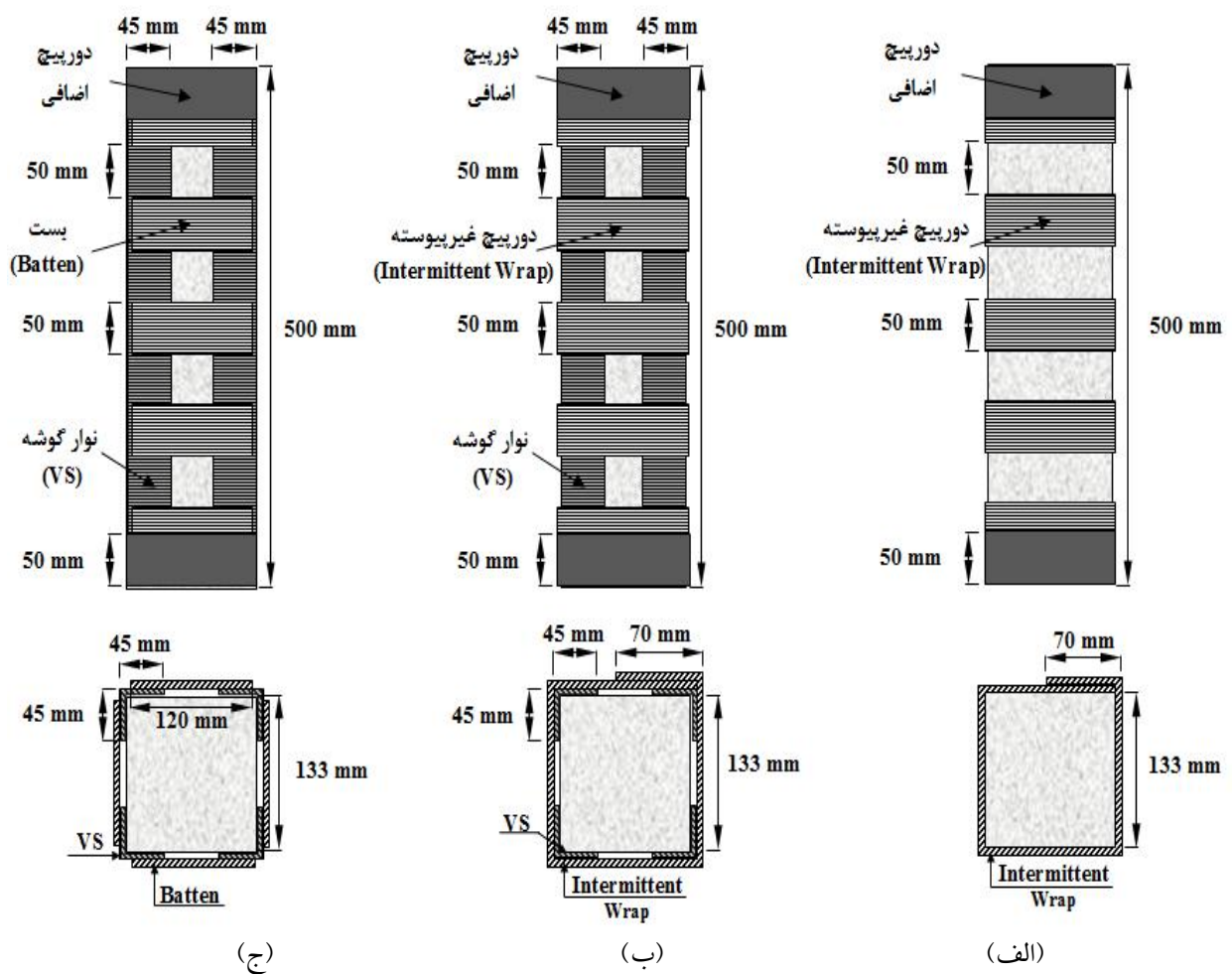
الف) گروه اول، شامل ۴ نمونه ستون بتن آرمه می‌باشد که یکی از آن‌ها به عنوان نمونه شاهد بدون تقویت بوده و ۳ نمونه دیگر با یک لایه کامپوزیت CFRP و با سه تکنیک نوارهای دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع، نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست محصور شده است. نوارهای گوشه مورد استفاده در این گروه به صورت پیوسته در ارتفاع و به ابعاد 90×450 میلی‌متر می‌باشد. تصویر شماتیکی از نمونه‌های تقویت شده این گروه در شکل ۱ قابل مشاهده است.

ب) گروه دوم، که نمونه‌ها با ۳ تکنیک نوارهای دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع، نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست تقویت شده و مورد بررسی قرار گرفت. نوارهای گوشه به کار رفته در این گروه به صورت غیرپیوسته در ارتفاع و به ابعاد 90×50 میلی‌متر می‌باشد؛ به طوری که فقط در نواحی زیر نوارهای محصورکننده از نوار گوشه استفاده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های تقویت شده با دو تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست در این گروه، با یک لایه کامپوزیت محصور شده است؛ در حالی که دو نمونه تقویت شده با تکنیک دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع با یک و دو لایه کامپوزیت محصور شده‌اند. جزئیات مربوط به نمونه‌های تقویت شده در این گروه نیز در شکل ۲ نمایش داده شده است.

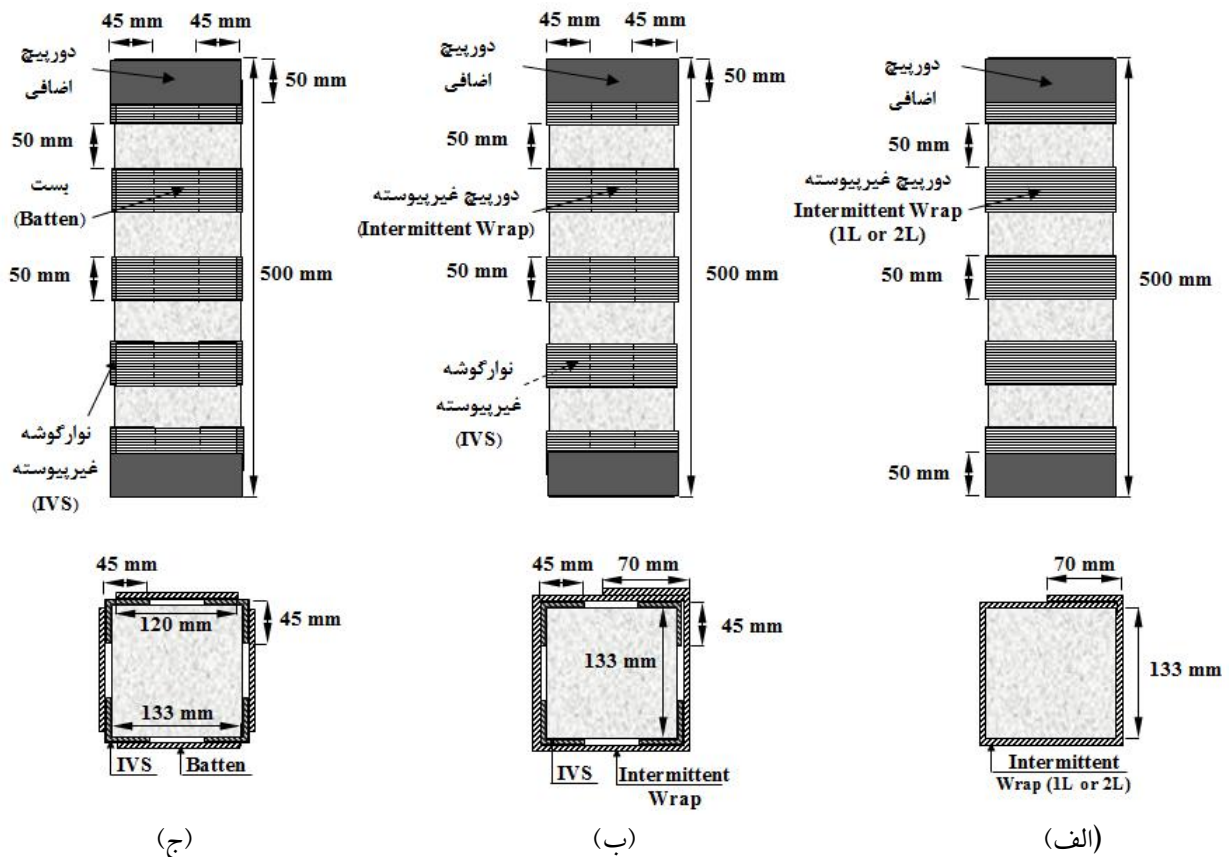
ج) گروه سوم، شامل یک نمونه شاهد بدون تقویت و یک نمونه محصور شده با تکنیک نوار گوشه غیر پیوسته-دورپیچ و با یک لایه از الیاف به ضخامت ۰/۱۱ می‌باشد. به طوری که حجم الیاف به کار رفته در نمونه تقویت شده نزدیک به حجم الیاف تقویتی در تکنیک نوار گوشه-بست در گروه دوم می‌باشد. در این

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

گروه	f'_c (MPa)	کد نمونه	ضخامت الیاف (mm)	تعداد لایه	حجم الیاف (mm ³)
۱	۳۰/۶۶	S1 - R	-	-	-
		S1 - IW.1	۰/۱۳۱	۱	۲۷۵۱۰
		S1 - VS.1-IW.1	۰/۱۳۱	۱	۴۸۷۳۲
		S1 - VS.1-B.1	۰/۱۳۱	۱	۴۴۸۰۲
۲	۳۲/۱۳	S2 - R	-	-	-
		S2 - IW.1	۰/۱۳۱	۱	۲۷۵۱۰
		S2 - IW.2	۰/۱۳۱	۲	۴۷۱۶۰
		S2 - IVS.1-IW.1	۰/۱۳۱	۱	۳۹۳۰۰
		S2 - IVS.1-B.1	۰/۱۳۱	۱	۳۵۳۷۰
۳	۳۲/۹۷	S3 - R	-	-	-
		S3 - IVS.1-IW.1	۰/۱۱	۱	۳۳۰۰۰



شکل ۱- نمونه‌های تقویت شده گروه اول؛ (الف) تکنیک نوارهای دورپیچ غیر پیوسته، (ب) تکنیک نوار گوشه پیوسته-دورپیچ، (ج) تکنیک نوار گوشه پیوسته-بست



شکل ۲- نمونه‌های تقویت شده گروه دوم؛ (الف) تکنیک نوارهای دورپیچ غیرپیوسته، (ب) تکنیک نوار گوشه غیر پیوسته-دورپیچ، (ج) تکنیک نوار گوشه غیر پیوسته-بست

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح FRP [۲۵]

الیاف	نوع	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (N/mm ²)	مدول الاستیسیته	
				کششی (N/mm ²)	کرنش نهایی (%)
	SikaWrap-200C	۰/۱۱۰	۳۹۰۰	۲۳۰۰۰۰	۱/۶۹
	SikaWrap-230C	۰/۱۳۱	۴۳۰۰	۲۳۸۰۰۰	۱/۸۰
رزین	نوع	مقاومت کششی (N/mm ²)	مدول الاستیسیته کششی (N/mm ²)	مدول الاستیسیته خمشی	
				کششی (N/mm ²)	کرنش نهایی (%)
	Sikadur [®] -330	۳۰	۴۵۰۰	۳۸۰۰	۱/۵۰

جابه‌جایی سنج^۱ مورد استفاده قرار گرفتند؛ ۲ عدد از جابه‌جایی سنج‌ها جهت تعیین تغییر شکل محوری متوسط در میانه

یک نیروسنج ۲۰۰۰ کیلونیوتنی و همچنین به طور اتوماتیک با ثبت عدد مربوط به فشار روغن دستگاه تعیین می‌شود. جهت تعیین تغییر شکل‌های محوری و جانبی ستون‌ها، ۳ عدد

¹ Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

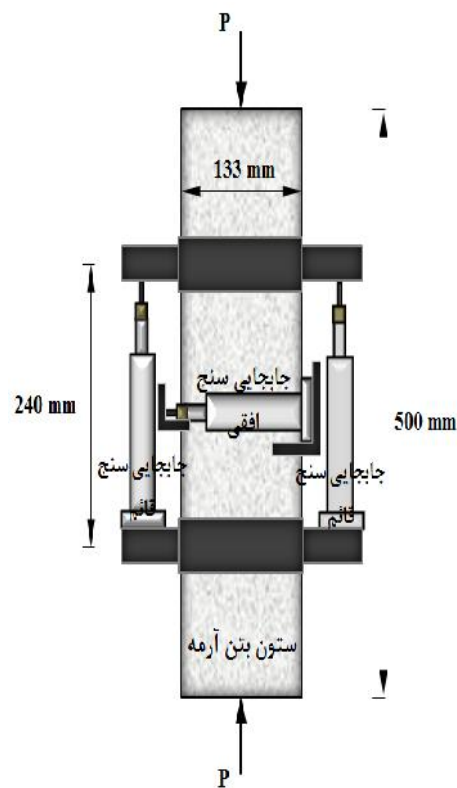
گزارش مشخصات باربری نهایی این نمونه‌ها از نقطه‌ی معادل ۸۵ درصد بار حداکثر، در شاخه‌ی نزولی نمودار بار-کرنش استفاده شده است. همچنین جهت محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری ارائه شده در این جدول از سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان، که بیان‌گر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به عبارتی مقدار کار انجام شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد، استفاده شده است [۲۶]. بر این اساس، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان محوری، E_{II} ، تا نقطه‌ی گسیختگی نهایی برای نمونه‌های تقویت شده محاسبه و ارائه گردیده است.

۵-۱- تأثیر تکنیک تقویتی

۵-۱-۱- افزایش مقاومت

در ستون هفتم جدول ۳، میزان باربری حداکثر نمونه‌های تقویت شده با تکنیک‌های مختلف با نمونه‌های شاهد مربوط به آن در هر گروه مورد مقایسه قرار گرفته است. براساس مقادیر موجود در ستون هفتم جدول ۳ مشاهده می‌گردد که نمونه S1 - IW.1 در گروه اول و S2 - IW.1 در گروه دوم که با استفاده از یک لایه دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع تقویت شده‌اند، به ترتیب افزایش باربری حداکثری برابر ۲۳/۷٪ و ۲۴/۵٪ نسبت به نمونه شاهد دارا می‌باشند. این در صورتی است که دو نمونه S1 - VS.1-IW.1 و S2 - IVS.1-IW.1، تقویت شده با استفاده از نوار گوشه-دورپیچ، به ترتیب افزایش باربری حداکثری برابر ۳۵/۹٪ و ۴۲/۶٪ را نسبت به نمونه شاهد تجربه نموده‌اند. همچنین افزایش باربری حداکثری برای دو نمونه S1 - VS.1-B.1 و S2 - IVS.1-B.1 که با استفاده از نوار گوشه-بست تقویت شده‌اند، به ترتیب معادل ۳۴/۱٪ و ۳۷/۳٪ نسبت به نمونه شاهد بدون تقویت می‌باشد. براساس نتایج موجود، بیشترین ظرفیت باربری مشاهده شده در این نمونه‌ها مربوط به دو نمونه تقویت شده با تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست می‌باشد؛ همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقادیر کرنش نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده با استفاده از این دو تکنیک نیز نسبت به نمونه‌های تقویت شده با یک لایه دورپیچ معمولی در این دو گروه بیشتر است. همچنین با دقت در نتایج به دست آمده برای گروه دوم، ملاحظه می‌گردد که مشخصات باربری نمونه‌های تقویت شده با دو تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست در این

ارتفاع، روی قاب‌های مخصوص در دو وجه مقابل ستون نصب می‌شوند. یک جابه‌جایی سنج نیز برای تعیین تغییر شکل جانبی، با استفاده از قاب مخصوصی که تغییر شکل محور تقارن نمونه را منتقل می‌کند، در وسط ارتفاع ستون نصب می‌شود. لازم به توضیح است که کرنش‌های محوری و جانبی مورد استفاده برای ترسیم منحنی‌های بار-کرنش، از تقسیم تغییر شکل‌های محاسبه شده توسط جابجایی‌سنج‌ها بر طول ناحیه اندازه‌گیری تغییر شکل به دست می‌آید. نحوه بارگذاری ستون‌ها و تجهیزات نصب شده روی آن در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های ستون به همراه تجهیزات اندازه‌گیری تغییر شکل

۵- نتایج آزمایشگاهی

نمونه‌های تحقیق حاضر تحت آزمایش فشار تک محوری قرار گرفتند و نتایج آزمایشگاهی مربوط به آن‌ها شامل مشخصه‌های باربری حداکثر و نهایی و شاخص شکل‌پذیری برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشند. لازم به ذکر است که نمونه‌های شاهد در هر گروه دارای شکست کاملاً نرم بوده و بر خلاف نمونه‌های تقویت شده، از نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی در لحظه‌ی نهایی برخوردار نمی‌باشند. به همین دلیل برای

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های مورد بررسی

کد نمونه	بار حداکثر (kN)	بار نهایی (kN)	کرنش محوری نهایی (%)	کرنش جانبی نهایی (%)	شکل پذیری E_{II} (N.m J)	افزایش باربری حداکثر (%) در مقایسه با:	
						نمونه شاهد	دورپیچ ۱ لایه (IW.1)
S1 - R	۴۴۴/۶۷	۳۷۷/۳۲	۰/۰۱۴۹۶	۰/۰۰۸۱۰	-	-	-
S1 - IW.1	۵۴۹/۹۷	۵۱۹/۱۲	۰/۰۱۷۸۴	۰/۰۰۹۱۲	۲۱۲۴/۴۵	۲۳/۷	-
S1 - VS.1-IW.1	۶۰۴/۴۹	۵۹۱/۵۵	۰/۰۲۰۹۶	۰/۰۰۹۹۸	۲۶۹۱/۵۱	۳۵/۹	۹/۹
S1 - VS.1-B.1	۵۹۶/۳۲	۵۹۶/۳۲	۰/۰۲۰۷۴	۰/۰۱۰۵۲	۲۵۵۰/۱۹	۳۴/۱	۸/۴
S2 - R	۴۵۳/۸۰	۳۸۱/۶۱	۰/۰۰۷۹۸	۰/۰۰۸۷۱	-	-	-
S2 - IW.1	۵۶۴/۸۱	۵۰۸/۲۴	۰/۰۱۴۸۶	۰/۰۱۰۳۵	۱۷۹۵/۱۰	۲۴/۵	-
S2 - IW.2	۶۵۵/۱۳	۶۱۳/۹۵	۰/۰۱۷۲۲	۰/۰۱۴۲۴	۲۲۹۵/۲۲	۴۴/۴	۱۶/۰
S2 - IVS.1-IW.1	۶۴۷/۲۵	۶۰۲/۶۱	۰/۰۱۷۹۷	۰/۰۱۲۶۸	۲۴۵۶/۴۶	۴۲/۶	۱۴/۶
S2 - IVS.1-B.1	۶۲۳/۱۹	۵۷۶/۵۷	۰/۰۱۷۸۵	۰/۰۱۱۶۸	۲۳۷۵/۲۳	۳۷/۳	۱۰/۳
S3 - R	۴۵۰/۲۷	۳۸۱/۹۱	۰/۰۱۱۶۸	۰/۰۱۲۵۷	-	-	-
S3 - IVS.1-IW.1	۶۰۶/۳۸	۵۹۵/۱۱	۰/۰۱۷۰۴	-	۲۲۰۰/۱۰	۳۴/۷	۸/۷

می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب تمامی منحنی‌ها در مراحل اولیه بارگذاری تا رسیدن به بار حداکثر نمونه شاهد مساوی بوده که بیانگر سختی یکسان نمونه‌ها در مراحل اولیه بارگذاری می‌باشد. با نزدیک شدن به نقطه‌ی مربوط به بار حداکثر نمونه‌ی شاهد و فعال شدن محصورشدگی در نمونه‌های تقویت‌شده، با توجه به میزان سختی که هر روش تقویت می‌تواند برای نمونه ایجاد کند، شیب منحنی‌ها نیز تا رسیدن به نقطه‌ی حداکثر خود افزایش می‌یابد. شاخه‌ی دوم هر یک از منحنی‌ها نیز تحت تأثیر کارایی تکنیک مورد استفاده برای تقویت نمونه قرار می‌گیرد؛ به طوری که شاخه‌ی دوم منحنی‌های مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده به روش نوار گوشه-دورپیچ (S1 - VS.1-IW.1 و S2 - IVS.1-IW.1) و نوار گوشه-بست (S1 - VS.1-B.1 و S2 - IVS.1-B.1)، به صورت تقریباً مستقیم و با رفتار پلاستیک کامل قابل مشاهده می‌باشد، که نشان می‌دهد نمونه‌ها به صورت کاملاً مؤثر توسط کامپوزیت محصور شده است. این در حالی است که در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از نوارهای دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع (S1 - IW.1 و S2 - IW.1)، شاخه‌ی دوم منحنی بار-کرنش به صورت نزولی بوده و رفتار نمونه به صورت

گروه، تقریباً معادل مشخصات باربری نمونه‌ی تقویت شده با دو لایه دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع می‌باشد. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که استفاده از نوارهای گوشه به‌عنوان بخشی از کامپوزیت محصورکننده در تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و استفاده از نوارهای محصورکننده به صورت کاملاً تخت و بدون انحنا در تکنیک نوار گوشه-بست، منجر به توزیع یکنواخت فشار محصورکننده بر محیط مقطع ستون و در نتیجه افزایش کارایی FRP محصورکننده در دو روش محصورسازی به کار رفته نسبت به روش دورپیچ معمولی شده است؛ به طوری که در صورت استفاده از دو تکنیک مورد نظر و با به کار بردن یک لایه کامپوزیت محصورکننده برای تقویت، می‌توان به افزایش مقاومتی تقریباً معادل استفاده از دو لایه کامپوزیت در محصورسازی به روش دورپیچ معمولی رسید.

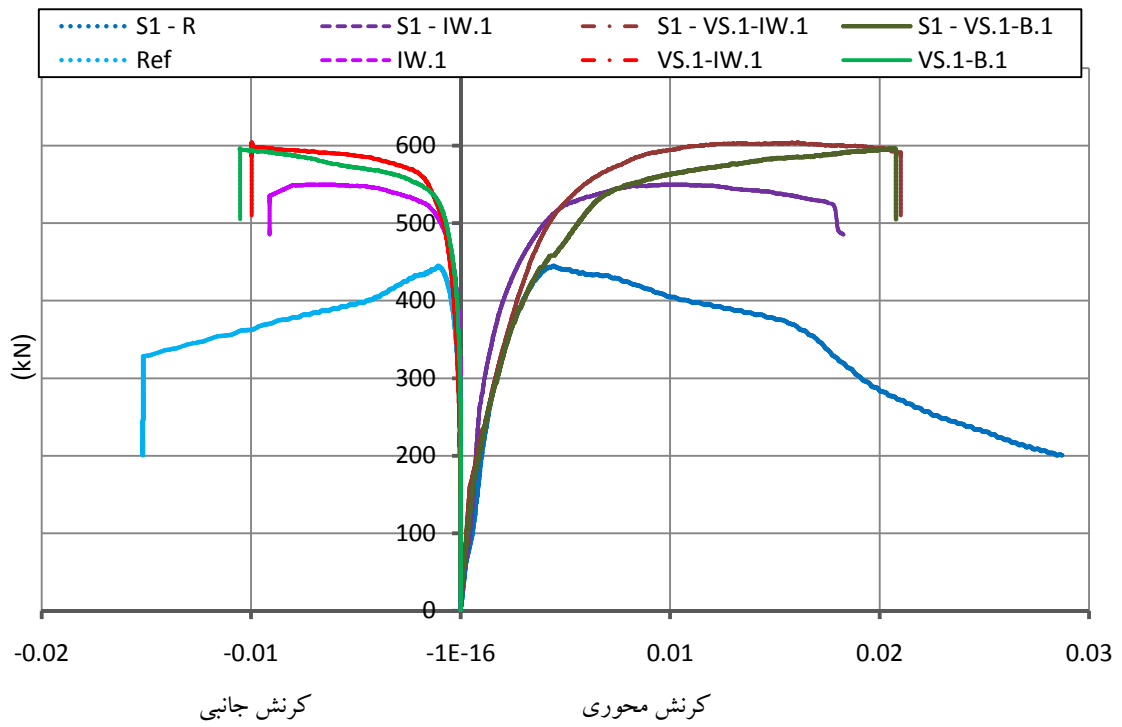
۵-۱-۲- رفتار بار-کرنش

نمودار بار-کرنش نمونه‌های مورد بررسی در گروه ۱ و ۲ در شکل ۴ نمایش داده شده است. براساس نمودارهای شکل ۴، رفتار بار-کرنش نمونه‌ها به صورت یک منحنی دو خطی

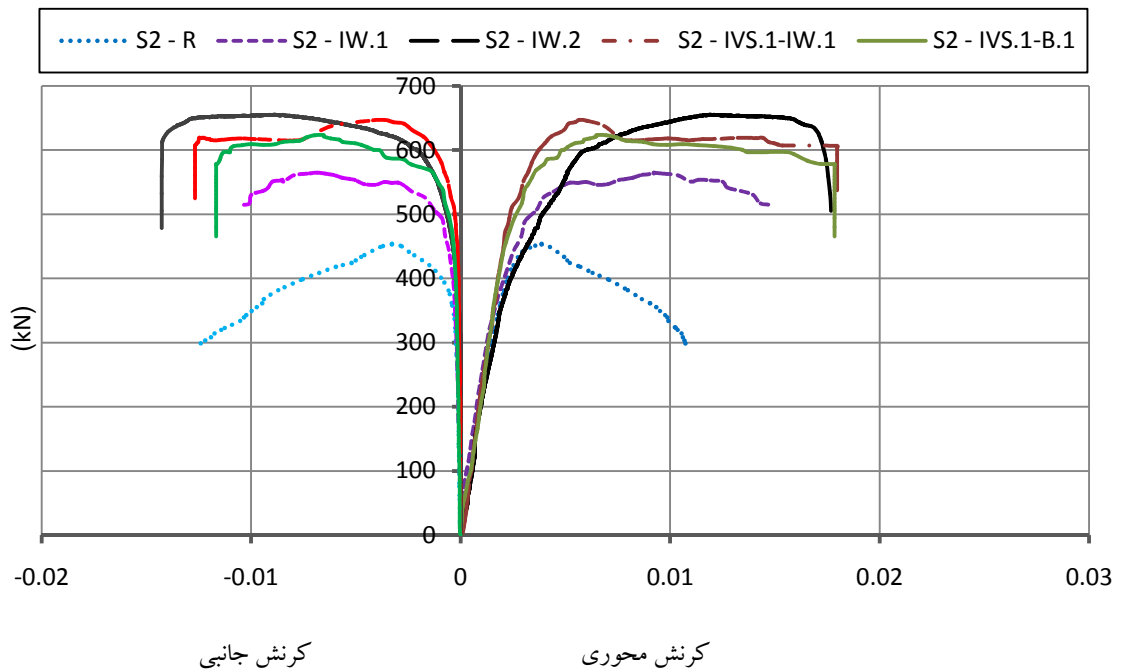
نرم‌شدگی کرنش مشاهده می‌گردد؛ در این نمونه، وجود تمرکز تنش در گوشه‌ها باعث می‌شود فشار محصورشدگی به صورت یکنواخت روی محیط نمونه توزیع نشده و نوارهای محصورکننده نتوانند به صورت مؤثر عمل نموده و از تمام کارایی خود برای محصورسازی استفاده نمایند. مقایسه رفتاری انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از نوارهای گوشه در زیر نوارهای دورپیچ غیر پیوسته توانسته است با کنترل تمرکز تنش موجود در گوشه‌های مقطع امکان توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های محصورکننده بر محیط و در نتیجه بهبود کارایی کامپوزیت در محصورسازی را فراهم سازد. همچنین استفاده از بست‌های منقطع در وجوه که در دو انتها به نوارهای گوشه متصل می‌شود و به صورت کاملاً تخت و یکنواخت تحت اثر تنش‌های کششی ناشی از محصورسازی قرار می‌گیرد، منجر به ایجاد توزیعی یکنواخت از فشار محصورکننده روی محیط شده و باعث می‌شود که به صورت مؤثرتر از کارایی کامپوزیت در محصورسازی استفاده گردد. بنابراین استفاده از نوارهای گوشه در هر دو گروه S1 و S2، در افزایش کارایی کامپوزیت محصورکننده کاملاً مؤثر واقع شده و رفتار نمونه را در مقایسه با حالت تقویت شده با دورپیچ بدون نوار گوشه از نرم‌شدگی کرنش به سمت رفتار پلاستیک تغییر داده است.

۵-۱-۳- نقطه گسیختگی FRP

نحوه گسیختگی نهایی نمونه‌های تقویت‌شده با تکنیک‌های مختلف، در شکل ۵ قابل مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شکست همه نمونه‌ها در نواحی میانی و یک سوم انتهایی ارتفاع ستون رخ داده است. همچنین در تمامی نمونه‌ها، شکست نمونه با پارگی FRP کنترل شده است. براساس شکل ۵، محل پارگی FRP روی محیط نمونه با توجه به تکنیک مورد استفاده برای تقویت متفاوت می‌باشد. پارگی FRP در نمونه‌های با مقطع چهارگوش به طور معمول در گوشه‌ها اتفاق می‌افتد. در این مقاطع با وجود این که حداکثر تنش‌ها و کرنش‌های کششی در کامپوزیت در وسط اضلاع رخ می‌دهد، ولی به علت وجود تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع، پارگی FRP در این نواحی و در کرنشی کمتر از ظرفیت کششی آن رخ می‌دهد. در تحقیق حاضر نیز پارگی FRP در نمونه‌های

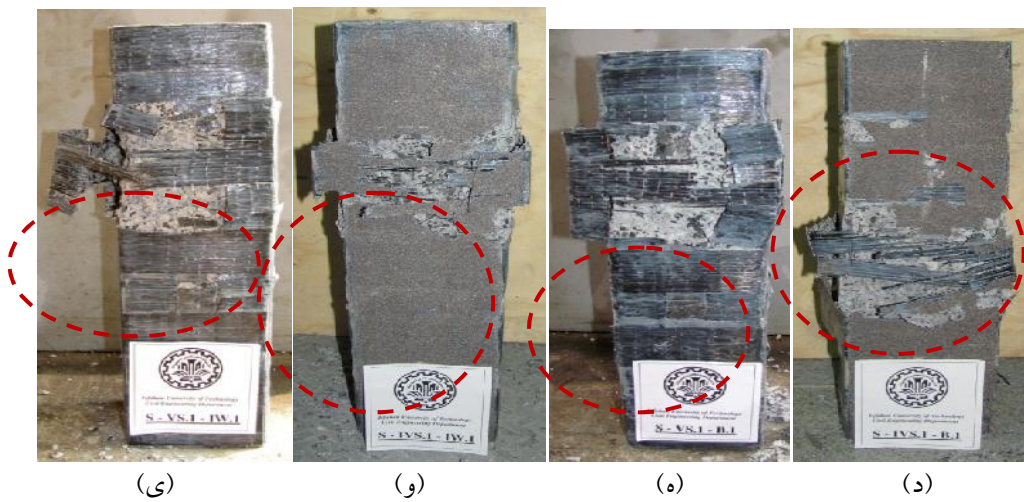
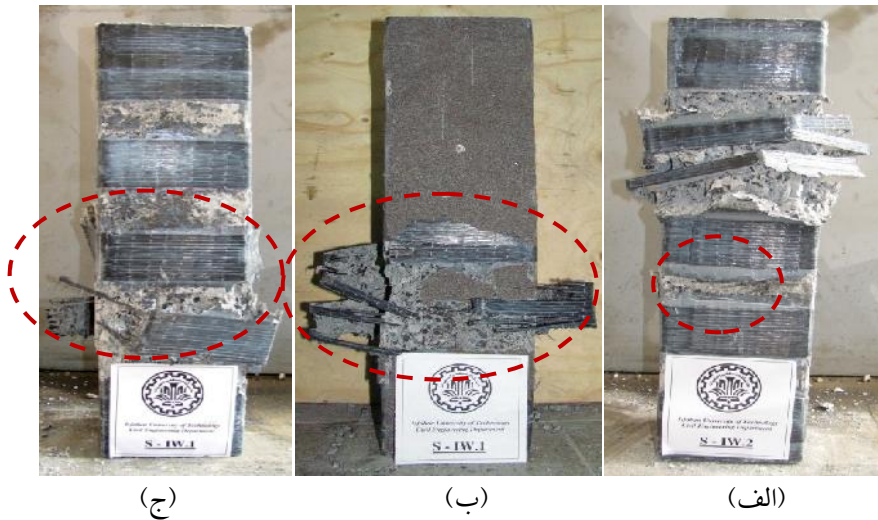


(الف)

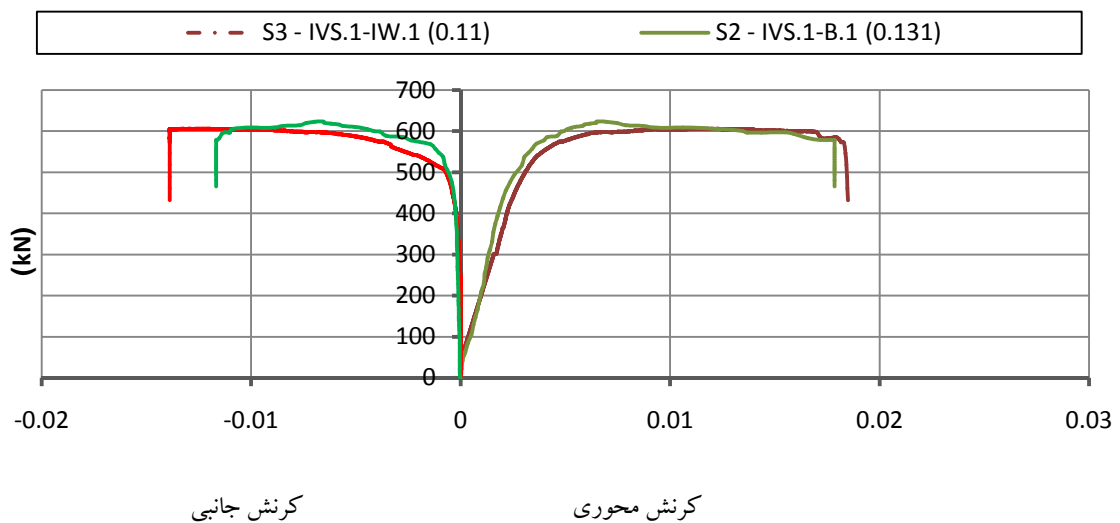


(ب)

شکل ۴- منحنی‌های بار- کرنش نمونه‌های تقویت شده با تکنیک‌های مختلف؛ (الف) گروه ۱، (ب) گروه ۲



شکل ۵- نحوه گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با تکنیک‌های مختلف؛ (الف ، ب) نوارهای دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع-۱ لایه، (ج) نوارهای دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع-۲ لایه، (د ، ه) نوار گوشه-دورپیچ، (و ، ی) نوار گوشه-بست



شکل ۶- منحنی بار- کرنش نمونه‌های تقویت شده با دو تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست و با حجم الیاف تقریباً یکسان

۵-۱-۴- مقایسه دو تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست با توجه به حجم الیاف مورد استفاده

نتایج گزارش شده نشان می‌دهند که رفتار و مشخصه‌های باربری نمونه‌های تقویت شده با استفاده از دو تکنیک نوار گوشه-بست و نوار گوشه-دورپیچ، بسیار نزدیک به هم بوده و افزایش قابل توجهی در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده با استفاده از دورپیچ غیرپیوسته در ارتفاع دارند. این در حالی است که حجم الیاف مصرفی در این دو تکنیک نیز متفاوت بوده به طوری که در روش نوار گوشه-دورپیچ به مراتب از حجم الیاف بیشتری نسبت به تکنیک نوار گوشه-بست استفاده شده است. به همین منظور و برای آن که بتوان مقایسه بهتری بین روش‌های تقویتی ذکر شده انجام داد، یک نمونه در گروه S3 با استفاده از الیاف به ضخامت کمتر ($t_f=0.11 \text{ mm}$) تقویت شد. در این صورت حجم الیاف مورد استفاده برای نمونه تقویت شده به روش نوار گوشه-دورپیچ در گروه S3 و نمونه تقویت شده به روش نوار گوشه-بست در گروه S2 به هم نزدیک‌تر شده و مقایسه باربری بین تکنیک‌های ذکر شده با میزان FRP تقریباً مساوی، بهتر انجام می‌شود.

شکل ۶ نمودار بار-کرنش دو نمونه تقویت شده با تکنیک‌های نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست و با حجم الیاف مشابه را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار و اعداد گزارش شده در ستون هفتم جدول ۳، درصد افزایش باربری حداکثر نسبت به نمونه شاهد، برای دو نمونه S2 - IVS.1-B.1 و S3 - IVS.1-B.1 که دارای میزان FRP مصرفی نزدیک به هم می‌باشند، به ترتیب برابر $37/3\%$ و $34/7\%$ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حالت تکنیک نوار گوشه-بست افزایش بیشتری را در مشخصه‌های باربری ستون ایجاد نموده است. به طور کلی و با مقایسه سایر مقادیر موجود در جدول ۳ و شکل ۶، می‌توان نتیجه گرفت که دو تکنیک تقویتی نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست دارای کارایی نزدیک به هم می‌باشند و هر دو روش امکان افزایش مشخصه‌های باربری ستون را به میزان چشم‌گیری فراهم می‌سازد؛ به طوری که در صورت استفاده از حجم یکسان الیاف می‌توان کارایی آن‌ها را کاملاً مساوی فرض نمود.

با توجه به نتایج به دست آمده، روش جدید نوار گوشه-بست دارای کارایی بالایی در محصورسازی ستون‌ها است. با توجه به این که بست‌های مورد استفاده در این تکنیک می‌توانند در حین محصورسازی نمونه، عملکردی نزدیک به نمونه‌های تخت کامپوزیتی از خود نشان دهند، بنابراین به‌عنوان یکی از مزیت‌های این روش، می‌توان به امکان استفاده از ورقه‌های پیش ساخته‌ی FRP^۱ به صورت بست، در محصورسازی ستون‌ها اشاره نمود؛ در صورتی که در روش‌های معمول محصورسازی، به علت عدم انعطاف‌پذیری این ورقه‌ها، امکان استفاده از آن‌ها به‌عنوان کامپوزیت محصورکننده موجود نمی‌باشد.

۵-۲- بررسی تأثیر پیوستگی یا غیر پیوستگی نوارهای گوشه (گروه ۱ و ۲)

مقایسه مشخصه‌های باربری نمونه‌هایی از گروه ۱ و ۲ که در تقویت آن‌ها از نوار گوشه استفاده شده است، نشان می‌دهد که استفاده از نوار گوشه به صورت غیرپیوسته در ارتفاع (گروه ۲) مؤثرتر از حالت نوار گوشه پیوسته (گروه ۱) بوده؛ به طوری که درصد افزایش بار در نمونه‌های تقویت شده در گروه S2 و با نوار گوشه غیرپیوسته نسبت به نمونه‌های تقویت شده در گروه S1 و با نوار گوشه پیوسته بیشتر است. به طور مثال افزایش باربری حداکثر نسبت به نمونه شاهد برای نمونه S1 - VS.1 - IW.1 برابر $35/9\%$ بوده که این میزان برای نمونه S2 - IVS.1 - IW.1 که با نوار گوشه غیرپیوسته تقویت شده به $42/6\%$ افزایش یافته است. همچنین افزایش باربری حداکثر نسبت به نمونه شاهد برای نمونه S1 - VS.1-B.1 از $34/1\%$ به $37/3\%$ در نمونه S2 - IVS.1-B.1 که با نوار گوشه غیر پیوسته تقویت شده افزایش یافته است. برای توضیح این مطلب، با دقت در تصاویر مربوط به گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با نوار گوشه پیوسته در گروه ۱ (شکل ۵-د، و)، مشاهده می‌گردد که در فاصله آزاد بین نوارهای محصورکننده که از نوار گوشه استفاده شده ولی روی آن دورپیچ یا بست محصورکننده وجود ندارد، نوار گوشه مورد استفاده دچار جداشدگی^۲ از سطح بتن شده است و این امر کارایی نوار گوشه در نواحی زیر نوارهای محصورکننده را نیز

^۱FRP Laminate

^۲ Debonding

میانگین به ترتیب به میزان $11/6$ و $36/8$ درصد نسبت به نمونه محصور شده با یک لایه دورپیچ غیر پیوسته ولی بدون نوار گوشه افزایش می‌یابد.

۳- استفاده از تکنیک جدید معرفی شده در این تحقیق تحت عنوان نوار گوشه-بست به عنوان روشی مؤثر در محصورسازی ستون‌های بتنی مربعی می‌باشد. کاربرد بست‌های منقطع در حالت تخت در وجوه که در دو انتها به نوارهای گوشه متصل می‌شود، شرایطی را فراهم می‌سازد که نوارهای بست محصورکننده به صورت کاملاً یکنواخت تحت کشش ناشی از محصورشدگی قرار گرفته و با ایجاد محصورشدگی یکنواخت در مقطع، میزان مقاومت و شکل‌پذیری نمونه را به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌دهد. برای مثال، در نمونه مربعی تقویت شده با نوارهای گوشه غیر پیوسته به همراه یک لایه بست محصورکننده بر آن، میزان مقاومت حداکثر و شکل‌پذیری نمونه به ترتیب به مقدار $10/3$ و $32/3$ درصد نسبت به نمونه تقویت شده با یک لایه دورپیچ غیر پیوسته در ارتفاع، افزایش داشت.

۴- استفاده از نوارهای گوشه به صورت پیوسته در ارتفاع، در حالتی که نوارهای محصورکننده به صورت غیر پیوسته روی آن قرار گیرد، از کارایی کمتری نسبت به نوارهای گوشه غیر پیوسته برخوردار است. به طور مثال، در محصورسازی مقاطع مربعی با دو تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست، در صورت استفاده از نوار گوشه پیوسته در ارتفاع، میزان باربری حداکثر به ترتیب $35/9$ و $34/1$ درصد نسبت به نمونه شاهد بدون تقویت افزایش دارد؛ این در حالی است که استفاده از نوارهای گوشه غیر پیوسته زیر نوارهای دورپیچ یا بست، افزایش باربری بیشتری به ترتیب برابر $42/6$ و $37/3$ درصد نسبت به نمونه شاهد ایجاد می‌نماید.

۷- مراجع

- [1]. Toutanji, H. A. "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets". *ACI Material Journal*. Vol. 96, No. 3, pp. 397-404, 1999.
- [2]. Purba, Burt K., and Mufti, Aftab A. "Investigation of the Behavior of Circular Concrete Columns Reinforced with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Jackets". *Canadian*

تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به صورتی که چون نوار گوشه به صورت پیوسته در ارتفاع قرار گرفته، در حین جداشدگی یک قسمت، سایر قسمت‌های نوار گوشه از جمله نواحی زیر نوارهای محصورکننده نیز تحت تأثیر نیروی جداشدگی قرار می‌گیرد و انتقال این نیروی اضافی به نوارهای محصورکننده منجر به گسیختگی سریع تر آن‌ها خواهد شد. به همین دلیل در حالت استفاده از نوارهای گوشه پیوسته میزان افزایش باربری کمتری مشاهده شده است.

۶- خلاصه و نتیجه گیری

هدف از تحقیق حاضر بررسی تکنیک جدیدی با عنوان استفاده از نوارهای گوشه به همراه بست‌های FRP، برای محصورسازی ستون‌های بتنی چهارگوش، است. به منظور مقایسه کارایی روش نوین نوار گوشه-بست، با سایر روش‌های محصورسازی موجود در افزایش مشخصات باربری ستون، تعداد ۱۱ نمونه ستون بتن آرمه با مقطع مربعی شکل به ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و ابعاد مقطع 133×133 میلی‌متر، تحت آزمایش فشار تک محوری قرار گرفتند. همچنین تأثیر پارامترهایی نظیر پیوستگی یا غیرپیوستگی نوارهای گوشه در ارتفاع و حجم الیاف مصرفی در تکنیک‌های تقویتی مورد استفاده، مطالعه شدند. نتایج به دست آمده از آزمایشات به شرح زیر می‌باشند:

۱- استفاده از دو تکنیک نوار گوشه-دورپیچ و نوار گوشه-بست در این تحقیق، با ایجاد توزیع یکنواختی از فشار محصورکننده بر محیط و حذف اثرات منفی ناشی از تمرکز تنش در گوشه‌ها، محل پارگی کامپوزیت در مقاطع مربعی را از نواحی گوشه به وسط ضلع که بیشترین تنش‌ها و کرنش‌های کششی در آن اتفاق می‌افتد، منتقل کرد. در این صورت کامپوزیت از بیشترین کارایی خود برای محصورسازی استفاده می‌نماید.

۲- به کار بردن نوارهای گوشه به منظور مقاوم سازی موضعی گوشه‌های مقطع، پیش از دورپیچی با نوارهای محصورکننده در تکنیک نوار گوشه-دورپیچ، موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه به مقدار قابل توجهی شد. به عنوان مثال، نمونه مربعی محصور شده با یک لایه دورپیچ غیر پیوسته در ارتفاع، در صورتی که با یک لایه نوارهای گوشه غیر پیوسته نیز به صورت موضعی تقویت شود، حداکثر باربری و شکل‌پذیری آن به طور

- with Composites”. *Journal of Composites for Construction*. ASCE, Vol. 4, No. 3, pp. 129–136, 2000.
- [14]. Cole, C., Belarbi, A. “Confinement Characteristics of Rectangular FRP-Jacketed RC Columns”. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5)*. Cambridge, UK, pp. 823-832, July 16-18, 2001.
- [15]. Yang, X., Nanni, A., Chen, G. “Effect of Corner Radius on Performance of Externally Bonded FRP Reinforcement”. *Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures-FRPRCS-5*. Cambridge, pp. 197-204, July 16-18, 2001.
- [16]. Yang, X., Wei, J., Nanni, A., Dharani, L. R. “Shape effect on Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer Wraps”. *Journal of Composites for Construction*. ASCE, Vol. 8, No. 5, pp. 444-451, 2004.
- [17]. Al-Salloum, Y. A. “Influence of Edge Sharpness on the Strength of Square Concrete Columns Confined with FRP Composite Lamimates”. *Composites*. Vol. 38, No. 5-6, pp. 640-650, 2007.
- [18]. Wang, L. M. and Wu, Y. F. “Effect of Corner Radius on the Performance of CFRP -Confined Square Concrete Column: Test”. *Engineering Structures*. Vol. 30, No. 2, pp. 493-505, 2008.
- [19]. Abbasnia, R., Hosseinpour, M., Rostamian, H., Ziaadiny, H. “Effect of corner radius on stress-strain behavior of FRP confined prisms under axial cyclic compression”. *Engineering Structures*. Vol. 40: pp. 529-535, 2012.
- [20]. Mostofinejad, D., Moshiri, N., Mortazavi, N. “Effect of corner radius and aspect ratio on compressive behavior of rectangular concrete columns confined with CFRP”. *Materials and Structures*. 2013; doi: 10.1617/s11527-013-0171-9.
- [21]. Campione, G., Miraglia, N. and Papia, M. “Influence of section shape and wrapping technique on the compressive behavior of concrete columns confined with CFRP sheets”. *Proc. Int. Conf. Composites in Constructions*. In: Bruno et al. (eds.), pp. 216-221, 2003.
- [22]. Campione, G. “Influence of FRP wrapping techniques on the compressive behavior of concrete prisms”. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 28, No. 5, pp. 497-505, 2006.
- Journal of Civil Engineering*. Vol. 26, No. 5, pp. 590-596, 1999.
- [3]. Xiao, Y. and Wu, H. “Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets”. *Journal of Material in Civil Engineering*. ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 139–146, 2000.
- [4]. Mendis, P., Pendyala, R., Setunge, S. “Strain Model to Predict the Full Range Moment Curvature Behavior of High-strength Concrete Section”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 52, No. 4, pp. 227-234, 2000.
- [5]. 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*. ASCE, Vol. 5, No. 4, pp. 237-245, 2001.
- [6]. Lam, L., Teng, J. G. “Ultimate Condition of FRP-Confined Concrete”. *Journal of Composite for Construction*. ASCE, Vol. 8, No. 6, pp. 539-548, 2004.
- [7]. Teng, T. G. and Lam, L. “Behavior and Modeling of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete”. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, Vol. 130, No. 11, pp. 1713-1723, 2004.
- [8]. Zinno, A., Lignola, G.P., Prota, A., Manfredi, G. and Cosenza, E. “Influence of free edge stress concentration on effectiveness of FRP confinement”. *Composites: Part B*. Vol. 41, No. 7, pp. 523-532, 2010.
- [9]. Chen, J. F., Ai, J., and Stratford, T. “Effect of geometric discontinuities on strains in FRP wrapped columns”. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 14, No. 2, pp. 136-145, 2010.
- [10]. ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI 440.2R-08. Farmington hills, MI, USA, 2008.
- [11]. Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M. and El-Echary, H. “Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete”. *Journal of Composites for Construction*. ASCE, Vol. 2, No. 4, pp. 175–185, 1998.
- [12]. Silva MAG. “Behavior of square and circular columns strengthened with aramidic or carbon fibers”. *Construction and Building Materials*. Vol. 25, No. 8, pp. 3222–3228, 2011.
- [13]. Rochette, P. and Labossiere, P. “Axial Testing of Rectangular Column Models Confined

[۲۳]. کیانی، م. ج. "رفتار محوری ستون‌های بتنی چهار گوش با تقویت قائم نوار FRP در گوشه‌ها و دورپیچ افقی FRP". پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده عمران، دانشگاه یزد، ۱۳۸۹ (۲۰۱۰).

[24]. ACI Committee 211. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved 2009). ACI 211.1-91. Farmington hills, MI, USA, 1991.

[25]. Sika group. Product data sheet; SikaWrap-230 C, Woven Carbon Fiber Fabric for Structural Strengthening; 2006.

[26]. 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.

Axial behavior of square RC columns confined with FRP strips at corners and FRP battens at sides

D. Mostofinejad

Professor, Isfahan University of Technology (IUT)

E. ilia*

Graduate Student, Isfahan University of Technology (IUT)

(Received: 2014/2/23 - Accepted: 2015/3/3)

Abstract

The application of fiber reinforced polymer (FRP) composites has been successfully promoted for external strengthening of reinforced concrete (RC) columns. Recent studies showed that when these jackets are formed in a wet lay-up process for confinement of columns, an average rupture strain of FRP in specimens substantially fall below those of flat coupon tensile tests. The problem is more important in square columns because of premature rupture of FRP at corners due to stress concentration.

In this paper, a new method is introduced for confinement of square concrete columns as using FRP strips at corners and FRP battens at sides. In this method, FRP battens does not experience any curvature in confining of section and its behavior is very close to flat coupons. To compare the new proposed method with other FRP-confining techniques, 11 square RC columns with 133 x 133 mm cross section and 500 mm height were experimentally tested under uniaxial compression. The test parameters included influence of confining method, continuity or discontinuity of corner strips along height of column and the volume of fibers used. The experimental results clearly demonstrated that confining battens in the new method of corner strip-batten uniformly stretched under the tension stresses of confinement; therefore, uniform distribution of confining pressure on section occurred and the stress concentration at corners was eliminated. Thus, in the proposed method, better performance of FRP in confinement was observed and the compressive behavior of the strengthened column was significantly improved compared to those confined using conventional FRP wraps.

Keywords: Confinement, CFRP composite, square RC column, corner strip, batten, uniaxial compression.

*Corresponding author: e.ilia@cv.iut.ac.ir