



هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران

۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۸

دانشگاه شیراز

شیراز



CODE: S4347

بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصورشده با CFRP تحت اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی و مقایسه با مدل‌های تئوری

حمید رضا صالحیان^۱، محمد رضا اصفهانی^۲

۱- عضو هیات علمی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

۲- استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

h.r.salehian@semnaniau.ac.ir

ارزیابی غیر خطی

لیلا سادات

۱ و ۳- دانشجوی

خلاصه

امروزه در غیرخطی آنها امرت در برابر زلزله سازد سازه‌ها معمولاً با مدلسازی می‌کنند. Perform 3D تطابق مناسب رفتار

واژه های کلیدی:

خلاصه

دورپیچ نمودن ستونهای بتنی با صفحات کامپوزیتی از جنس پلیمرهای مسلح شده با الیاف، موسوم به ورقه‌های FRP از جمله روشهای نوین مقاوم‌سازی سازه‌ها محسوب می‌گردد. بخش اعظم رابطه‌هایی که برای توصیف رفتار ستون‌های بتنی محصورشده با FRP ارائه شده است، از طریق اعمال بار فشاری تنها، به این ستون‌ها به دست آمده است. حال آنکه بسیاری از ستون‌های بتن آرمه به عنوان عضوی از یک قاب خمشی تحت اثر توام بار محوری و لنگر خمشی واقع می‌شوند. در این مقاله نتایج حاصل از پژوهشی آزمایشگاهی در مورد مقاومت فشاری ستون‌های بتنی محصور شده با FRP با برخی از مدل‌های تئوری مقایسه شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل شش ستون بتن آرمه مربعی شکل به ابعاد ۷۰۰x۲۰۰x۲۰۰ میلیمتر می‌باشد. هر یک از ستونها با ورقه‌های FRP مسلح شده با الیاف یکسویه دورپیچ شده و تحت اثر بار...

واژه های کلیدی: ستون بتنی محصور شده، ورقه‌های FRP، مقاومت فشاری، اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی



بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده با CFRP تحت اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی و مقایسه با مدل‌های تئوری

حمید رضا صالحیان^۱، محمد رضا اصفهانی^۲

۱- عضو هیات علمی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

۲- استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

¹ h.r.salehian@semnaniau.ac.ir

خلاصه

دورپیچ نمودن ستونهای بتنی با صفحات کامپوزیتی از جنس پلیمرهای مسلح شده با الیاف، موسوم به ورقه‌های FRP از جمله روشهای نوین مقاوم‌سازی سازه‌ها محسوب می‌گردد. بخش اعظم رابطه‌هایی که برای توصیف رفتار ستونهای بتنی محصور شده با FRP ارائه شده است، از طریق اعمال بار فشاری تنها، به این ستون‌ها به دست آمده است. حال آنکه بسیاری از ستون‌های بتن آرمه به عنوان عضوی از یک قاب خمشی تحت اثر توام بار محوری و لنگر خمشی واقع می‌شوند. در این مقاله نتایج حاصل از پژوهشی آزمایشگاهی در مورد مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده با FRP با برخی از مدل‌های تئوری مقایسه شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل شش ستون بتن آرمه مربعی شکل به ابعاد ۷۰×۷۰×۲۰۰ میلیمتر می‌باشد. هر یک از ستونها با ورقه‌های FRP مسلح شده با الیاف یکسویه دورپیچ شده و تحت اثر بار برون محور فشاری قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که همزمان با افزایش برون محور فشاری و افزایش لنگر خمشی موجود در مقطع، میزان تاثیر فزاینده دورپیچ FRP کاهش می‌یابد. اما این کاهش در مدل‌های ارائه شده مرسوم برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصور شده لحاظ نمی‌شود. مقدار مقاومت فشاری تخمین زده شده برای ستونهای محصور شده بیش از مقادیر آزمایشگاهی و فاقد اطمینان لازم است.

کلمات کلیدی: ستون بتنی محصور شده، ورقه‌های FRP، مقاومت فشاری، اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی

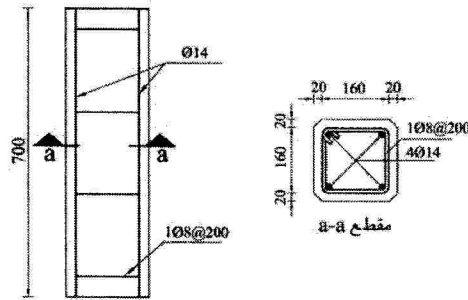
۱. مقدمه

امروزه بسیاری از سازه‌های زیربنایی بخصوص در کشورهای در حال توسعه نیازمند مقاوم‌سازی می‌باشند. قدمت ساخت، عدم انطباق با آیین‌نامه‌های جدید طراحی، تخریب در اثر عوامل خوردنده طبیعی و نیز آسیب دیدگی در زلزله‌ها و حوادث طبیعی دیگر می‌تواند از جمله دلایل مقاوم‌سازی سازه‌ها به شمار آید. یکی از روشهای معمول جهت مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری ستونهای بتن آرمه، ایجاد روپوش پیرامونی، جهت محدود نمودن انبساط عرضی ستون بارگذاری شده است. این شیوه علاوه بر جلوگیری از کماتش آرماتورهای طولی ستون، با به تعویق انداختن جداشدگی پوسته بتنی، انهدام ستون را نیز به تأخیر می‌اندازد. نخستین مطالعات پیرامون این روش مقاوم‌سازی ستونهای بتن آرمه در ابتدای قرن بیستم و در مورد ستونهای مقاوم شده با روپوش فولادی صورت پذیرفت. این مطالعات نشان داد که وجود دورپیچ پیرامون ستون، سبب افزایش مشخصه‌های باربری آن می‌گردد [۱ و ۲]. اثر نامطلوب شرایط محیطی بر روپوش‌های فولادی و مراحل دشوار و زمانبر ایجاد این روپوش‌ها، سبب گردید که صفحات کامپوزیتی از جنس پلیمرهای مسلح شده با الیاف موسوم به ورقه‌های FRP از بدو پیدایش به تدریج به عنوان جایگزین روکشهای فولادی مورد استفاده قرار گیرند. مطالعات فراوانی پیرامون اثر دورپیچ FRP در افزایش مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده به انجام رسیده است. نتایج این مطالعات نشان از تاثیر چشمگیر دورپیچ FRP در افزایش مقاومت فشاری ستون و بهبود شکل‌پذیری این اجزا دارد [۳ و ۴]. در بیشتر تحقیقات آزمایشگاهی در مورد رفتار ستونهای محصور شده با FRP، افزایش مقاومت فشاری ستون، تحت اثر نیروی محوری ارزیابی شده است. حال آنکه بسیاری از ستونهای بتنی به عنوان اعضای از یک قاب خمشی تحت اثر ترکیبی از نیروی فشاری و لنگر خمشی قرار می‌گیرند. در این مقاله نتایج پژوهشی آزمایشگاهی در مورد رفتار ستونهای بتنی محصور شده با CFRP تحت اثر اعمال توام بار محوری و لنگر خمشی با نتایج حاصل از مدل‌های تئوری ارائه شده توسط محققان دیگر مقایسه می‌گردد.



۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۶ ستون بتن آرمه به طول ۷۰۰ میلیمتر و با مقطعی مربعی شکل با طول ضلع ۲۰۰ میلیمتر می‌باشد. جزئیات و ابعاد نمونه‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مطالعات متعدد نشان داده است که وجود زوایای تیز در مقطع، تاثیر دورپیچ FRP را در بهبود افزایش باربری ستون به صفر می‌رساند [۵]. از اینرو به منظور کاهش تمرکز تنش در دورپیچ و افزایش میزان تاثیرگذاری آن، گوشه‌های مقطع به طول ۲۰ میلیمتر در راستای هر ضلع گرد می‌شود.



شکل ۱- جزئیات نمونه ستون‌های آزمایشگاهی

۳. مصالح

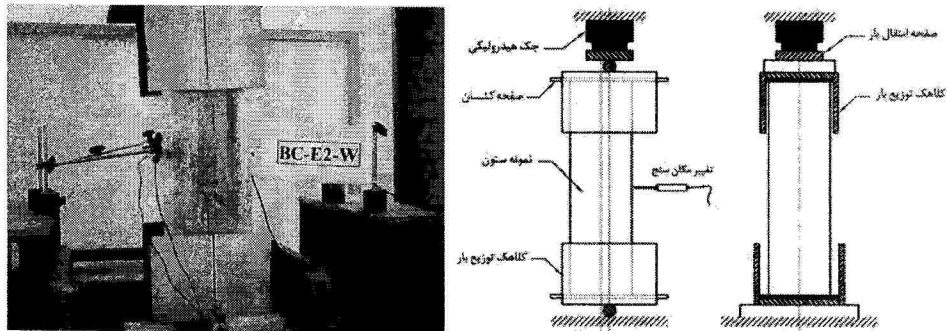
ساخت نمونه‌ها در سه نوبت بتن‌ریزی صورت پذیرفته است. مقاومت فشاری میانگین بتن در بتن‌ریزی نوبت اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۲۳/۲، ۲۰/۱ و ۲۱/۸ مگاپاسکال می‌باشد. مقدار تنش جاری شدن آرماتورهای طولی با آزمایش کششی برابر با ۳۷۰ مگاپاسکال به دست آمده است. آرماتورهای عرضی نیز در فواصل ۲۰۰ میلیمتر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. بر اساس آزمایش‌های محققان دیگر در این فواصل اثر محصورکنندگی آرماتورهای عرضی قابل اغماض است [۵]. نمونه ستون‌ها با یک لایه کامپوزیت پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی یک جهته و به روش "Wet Lay-up" دورپیچ شده‌اند. برای تعیین خصوصیات باربری دورپیچ CFRP، نمونه‌هایی از این کامپوزیت مطابق با استاندارد D3039 از آیین‌نامه ASTM، تحت آزمایش ظرفیت کششی قرار گرفته است. خصوصیات مکانیکی به دست آمده برای CFRP در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصه‌های مکانیکی CFRP

نوع الیاف	ضخامت (mm)	کرنش نهایی (%)	مقاومت کششی (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)
C-Sheet240	0.176	1.23	2876	234

۴. برنامه آزمایش

اعمال بار فشاری به نمونه ستون‌ها، به کمک یک جک فشاری هیدرولیکی صورت پذیرفته است. مقدار نیروی اعمال شده به نمونه‌ها و تغییر مکان ارتفاع میانی آنها به کمک نیروسنج و تغییر مکان‌سنج یا LVDT اندازه‌گیری شده و توسط سیستم ثبت و پردازش اطلاعات ذخیره می‌شود. جزئیات قرارگیری نمونه‌ها در زیر جک و نحوه انتقال بار برون محور فشاری به آنها در شکل ۲ به تصویر درآمده است. با توجه به ابعاد مقطع ستون، مقدار برون محوری بار فشاری به گونه‌ای انتخاب شده است تا فولادهای طولی مقطع تحت تنش کششی قرار نگیرد. در جدول ۲ نحوه نامگذاری نمونه‌ها و مقدار برون محوری بار فشاری وارد بر هر یک از آنها مشخص شده است.



شکل ۲- جزئیات انتقال بار به نمونه ستون‌ها

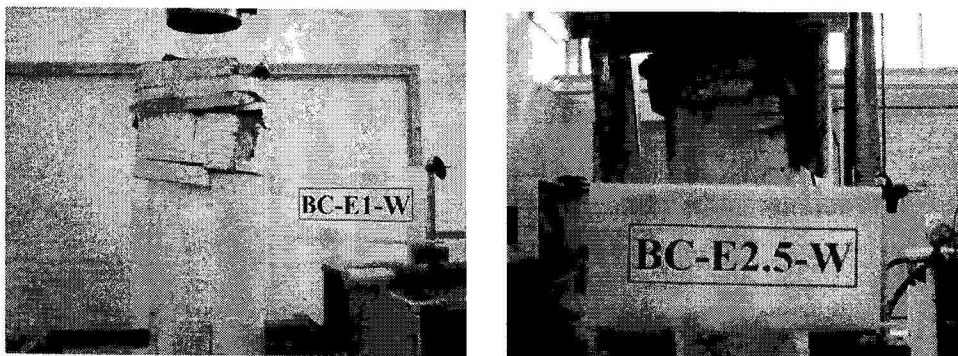
جدول ۲- نامگذاری نمونه‌ها و برون محوری بار فشاری

سری بتن ریزی	مشخصه نمونه‌ها	برون محوری (mm)	مقاومت فشاری بتن (MPa)
I	BC-E3-W	30	23.2
	BC-E3.5-W	35	
II	BC-E1-W	10	20.1
	BC-E1.5-W	15	
III	BC-E2-W	20	21.8
	BC-E2.5-W	25	

* BC-Ea-W: ستون دورپیچ شده و تحت اثر بار فشاری با برون محوری برابر با a

۵. نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی

شکست نهایی نمونه ستون‌های محصور شده با CFRP، کاملاً ترد و ناگهانی است. تنها علامت هشدار دهنده در این نمونه‌ها، شدت روند افزایش تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده و نیز تشدید صداهای ناشی از خرد شدن بتن و کشیدگی الیاف در ناحیه فشاری مقطع است. شکل ۳ تصاویری از نحوه انهدام نمونه ستون‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- انهدام نمونه ستون‌های بارگذاری شده

با افزایش نیروی فشاری وارد بر مقطع ستون، مقدار تنش در ناحیه فشاری مقطع، به تدریج به مقاومت فشاری بتن محصور نشده نزدیک می‌شود. در این هنگام خرد شدن بتن در ناحیه فشاری مقطع آغاز می‌گردد. وجود دورپیچ پیرامونی سبب می‌گردد تا جداسازی بتن خورد شده به تاخیر افتد و باربری ستون ادامه یابد. با ادامه بارگذاری ستون، تخریب ناحیه فشاری مقطع تشدید می‌گردد. در این هنگام صداهای مربوط به کشیده شدن الیاف پیرامون ستون و یا جدا شدن دورپیچ از سطح جانبی ستون شنیده می‌شود. در حالت نهایی، دورپیچ پیرامونی در وجه فشاری ستون به مقاومت کششی



خود می‌رسد و همراه با صدای بلند و به طور ناگهانی منهدم می‌شود. با انهدام کامپوزیت پیرامونی، ستون به نقطه گسیختگی می‌رسد. این نوع رفتار کم و بیش در تمامی نمونه‌ها مشاهده شده است. گسیختگی دورپیچ در یکی از دو انتهای ستون و به فاصله‌ای در حدود یک سوم ارتفاع ستون، از محل اعمال بار اتفاق افتاده است.



شکل ۴- محل گسیختگی دورپیچ CFRP

محل گسیختگی دورپیچ CFRP در مقطع تمامی نمونه‌ها، در وجه فشاری ستون و همانند تصویر شکل ۴، نزدیک به یکی از گوشه‌ها رخ می‌دهد. در این نواحی تمرکز تنش کششی بیشتری در دورپیچ ایجاد شده و گسیختگی آن را موجب می‌شود. نکته قابل توجه آن است که با افزایش برون محوری بار و افزایش سهم لنگر خمشی در مقطع ستون، شدت گسیختگی نهایی CFRP محدودتر شده است. علت آن است که با افزایش برون محوری بار و کاهش ناحیه فشاری در مقطع، انبساط عرضی بتن فشاری محدود می‌گردد و ناحیه کمتری از دورپیچ به مرز گسیختگی می‌رسد. در جدول ۳ مقادیر نیروی محوری نهایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها آمده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش نمونه ستون‌ها

مشخصه نمونه‌ها	BC-E1-W	BC-E1.5-W	BC-E2-W	BC-E2.5-W	BC-E3-W	BC-E3.5-W
نیروی محوری نهایی (kN)	841.521	783.150	759.287	693.824	674.581	585.807

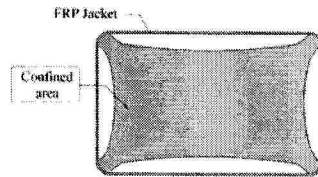
۶. اثر محصورکننده دورپیچ FRP

محصورشدن بتن با مواد FRP، نه تنها مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد، بلکه بر میزان جذب انرژی در این ستون‌ها تاثیر فراینده‌ای دارد و نوعی بهبود شکل‌پذیری را در آنها ایجاد می‌نماید. نکته بسیار مهم آن است که ویژگی‌های مکانیکی بتن محصورشده را نمی‌توان جزو خصوصیات ذاتی بتن محسوب نمود. هنگامی که یک ستون بتنی محصورشده، تحت اثر فشار محوری قرار می‌گیرد، هسته بتنی منبسط خواهد شد. این انبساط و افزایش حجم جانبی، توسط دورپیچ پیرامونی محدود می‌شود. از اینرو نوعی فشار جانبی غیر فعال از جانب روپوش به بتن میانی اعمال می‌گردد که به آن تنش فشاری محصورکننده گفته می‌شود. با توجه به تعادل تنش‌های وارد بر ماده دورگیرکننده و نیز با صرف‌نظر از تنش‌های محاسباتی راستای طولی نمونه ستون، می‌توان نوشت [۶]:

$$f_l = \left(\frac{2}{D}\right) l_{frp} \varepsilon_{frp} f_{frp} \quad (1)$$

در رابطه بالا f_l ماکزیم تنش فشاری محصورکننده‌ای است که از سمت دورپیچ به هسته مدور بتنی با قطر D وارد می‌گردد. همچنین l_{frp} و ε_{frp} ضخامت و مدول الاستیسیته دورپیچ FRP در راستای الیاف قرار گرفته به دور ستون و ε_{frp} کرنش کششی نهایی FRP است. در بسیاری از مطالعات گذشته مقدار ε_{frp} با اعمال کششی مستقیم بر تسمه‌های ساخته شده از FRP تعیین گردیده است. در حالی که برخی مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که مقدار کرنش نهایی کامپوزیت پیرامونی در نمونه‌های استوانه‌ای کمتر از ε_{frp} است. از اینرو در برخی مدل‌های ارائه شده، مقدار کرنش نهایی FRP به کمک ضریب کوچکتر از واحد k_e با نام ضریب کارایی FRP بهره گرفته شده است [۵].

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اثر دورپیچ FRP در بهبود شاخصه‌های باربری ستونهای بتنی محصور شده با مقاطع مدور بسیار محسوس است. علت این امر توزیع یکنواخت تنش محصورکننده در سطح پیرامونی هسته بتنی این گونه ستون‌ها است. در مقاطع چهارگوشه، مطابق شکل ۵، فشار محصورکننده‌ای FRP در مقاطع چهارضلعی به طور یکنواخت در کل مقطع ستون توزیع نمی‌شود [۷]. در این گونه ستون‌ها، ضریبی کاهشنده به نام ضریب شکل مقطع (k_s) تعریف می‌گردد.



شکل ۵- ناحیه محصورشده در ستون با مقطع چهار ضلعی [۳]

با جایگذاری مقدار ضریب کارآیی FRP و ضریب شکل مقطع در رابطه (1)، رابطه (2) بدست می آید که برای محاسبه تنش فشاری محصورکننده در ستونهایی با مقطع مدور و چهار ضلعی قابل به کارگیری است. در رابطه زیر مقدار k_s در مقاطع مدور برابر با $2/D$ است.

$$f_l = k_s k_e E_{frp} \epsilon_{frp} t_{frp} \quad (2)$$

۷. روشهای تعیین مقاومت فشاری ستون بتنی محصورشده با FRP با مقطع چهار ضلعی

مدلهای متعددی برای محاسبه مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصورشده با مقطع چهارضلعی ارائه شده است. در این مدلها مقاومت فشاری بتن محصور شده در مقاطع چهار ضلعی (f'_{cc0}) به گونه ای خاص به ابعاد مقطع، شعاع گردی گوشه ها، مقاومت فشاری هسته بتنی (f'_{c0}) و سختی دورپیچ FRP وابسته شده است. در این مقاله شش نمونه از این مدلها مورد ارزیابی قرار می گیرد. این روابط مختص ستونهای محصور شده با FRP و با مقطع چهار گوشه پیشنهاد شده اند که توسط میرمیران و همکارانش [۸]، پانتلیدیس و یان [۹]، السلعوم [۱۰]، لم و تنگ [۵]، وو و تنگ [۱۱] و ایلکی و همکارانش [۱۲] ارائه گردیده اند. نکته مهم آن است که هر یک از این مدلها برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن محصور شده با FRP تحت اثر بار محوری تدوین گردیده اند. در جدول ۴ مقادیر ضریب کارآیی دورپیچ FRP و روابط ارائه شده برای محاسبه ضریب شکل مقطع در هر یک از مدل های مورد مطالعه آمده است. در این مدلها مقدار ضریب کارآیی FRP از ۰/۵ تا ۱/۰ متغیر است. مطابق روابط آمده در این جدول، اندازه ضلع بزرگتر (a) و ضلع کوچکتر مقطع (b) و شعاع گردی گوشه ها (r) از جمله پارامترهای هندسی ستون است که در محاسبه مقدار ضریب شکل تاثیرگذار می باشند. در جدول ۵ نیز روابط مربوط به محاسبه مقاومت فشاری ستون بتنی محصور شده (f'_{cc0}) در هر یک از مدلها آمده است. در این روابط f'_{c0} مقاومت فشاری هسته بتنی است.

جدول ۴- ضریب شکل مقطع و کارآیی دورپیچ FRP در مدلها

نام مدل	ضریب کارآیی FRP (k_e)	ضریب شکل مقطع (k_s)
میرمیران و همکارانش	1.0	$k_s = \frac{4r}{a^2}$
پانتلیدیس و یان	0.5	$k_s = \left(1 - \frac{(a-2r)^2 + (b-2r)^2}{3ab}\right) \left(\frac{a+b}{ab}\right)$
السلعوم	1.0	$R = \sqrt{2a-2r(\sqrt{2}-1)}$, $k_s = \left(\frac{2a}{R^2}\right) \left[1 - \frac{2}{3} \left[\frac{(1-2(r/a))^2}{1-(4-\pi)(r/a)^2}\right]\right]$
لم و تنگ	0.57	$k_s = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[\frac{2}{\sqrt{a^2+b^2}}\right] \left[1 - \frac{(b/a)(a-2r)^2 + (a/b)(b-2r)^2}{3(ab-(4-\pi)r^2)}\right]$
وو و تنگ	1.0	$k_s = \left(\frac{2}{b}\right)$
ایلکی و همکارانش	0.85	$k_s = \left(\frac{a+b}{ab}\right) \left[1 - \frac{(b/a)(a-2r)^2 + (a/b)(b-2r)^2}{3(ab-(4-\pi)r^2)}\right]$

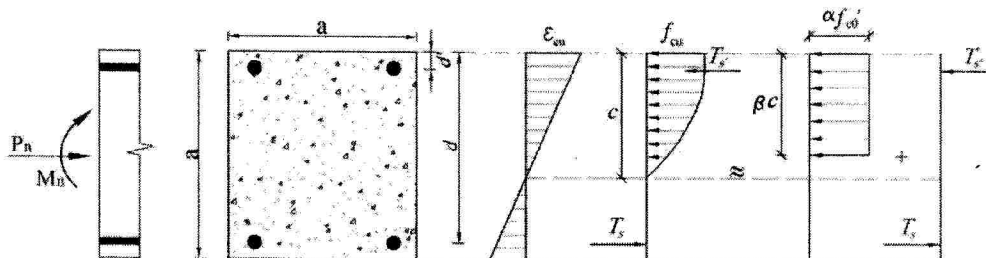


جدول ۵- روابط محاسبه مقاومت فشاری ستون بتنی محصور شده (FRP) در مدل‌ها

نام مدل	ضریب شکل مقطع (k_s)
میرمان و همکارانش	for: $\left(\frac{2r}{a}\right)\left(\frac{f_l}{f'_{c0}}\right) \geq 0.15$ $f'_{cc0} = \left(1 + 6.0 \frac{f_l^{0.7}}{f'_{c0}}\right) f'_{c0}$
پاتلیدیس و یان	$f'_{cc0} = \left(-4.322 + 4.271 \sqrt{1 + 4.193 \frac{f_l}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_l}{f'_{c0}}}\right) f'_{c0}$ $\frac{f_l}{f'_{c0}} \geq 0.2$ $f'_{cc0} = \text{MAX} \left[\frac{-4.322 + 4.271 \sqrt{1 + 4.193 \frac{f_l}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_l}{f'_{c0}}}}{0.0768 \ln\left(\frac{f_l}{f'_{c0}}\right) + 1.122} \right] f'_{c0}, f'_{c0}$ $\frac{f_l}{f'_{c0}} < 0.2$
السلوم	$f'_{cc0} = \left(1 + 3.14 \frac{f_l}{f'_{c0}}\right) f'_{c0}$
لم و تنگ	$f'_{cc0} = \left(1 + 3.3 \frac{f_l}{f'_{c0}}\right) f'_{c0}$
وو و ونگ	$f'_{cc0} = \left(1 + 2.16 \left(\frac{2r}{b}\right)^{0.651} \left(\frac{f_l}{f'_{c0}}\right)^{0.955}\right) f'_{c0}$
ایلکی و همکارانش	$f'_{cc0} = \left(1 + 2.54 \frac{f_l}{f'_{c0}}\right) f'_{c0}$

۸. محاسبه بار محوری نهایی در حضور لنگر خمشی

در شکل ۶ نیروهای موجود در مقطعی از یک ستون بتن آرمه تحت اثر توام بار محوری و لنگر خمشی به تصویر درآمده است. در این شکل، ϵ_{cu} کرنش نهایی بتن فشاری است که مقدار آن مطابق با آیین‌نامه ACI برابر با ۰/۰۰۳ در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. بر اساس مبانی آیین‌نامه ACI توزیع تنش در قسمت فشاری مقطع با بلوک تنش فشاری معادل، قابل جایگزینی است. ابعاد بلوک تنش فشاری در شکل ۶، با βc مشخص گردیده است. f'_{c0} مقاومت فشاری بتن محصور نشده و c عمق ناحیه فشاری مقطع ستون است. هدف اصلی در این مطالعه بررسی امکان بهره‌جویی از روابط پیشنهادی برای مقاومت فشاری بتن محصور شده در شرایط اعمال توام بار فشاری و لنگر خمشی است. از اینرو ابتدا با کمک روابط ارائه شده در جداول ۴ و ۵، مقدار مقاومت فشاری بتن محصور شده محاسبه می‌گردد. سپس مقاومت فشاری بتن محصور شده (f'_{cc0}) در تعادل نیروهای نشان داده شده در شکل ۷ جایگزین مقدار مقاومت فشاری بتن محصور نشده می‌شود. به کمک یک نرم افزار ساده می‌توان تعادل نیرو و تنش‌های وارد بر مقطع ستون را در مقدارهای متفاوتی از c بررسی نمود که حاصل آن تعیین مقدار نهایی نیروی فشاری (P_n) و لنگر خمشی (M_n) است که همزمان موجب انهدام نمونه ستون‌های محصور شده می‌شوند.

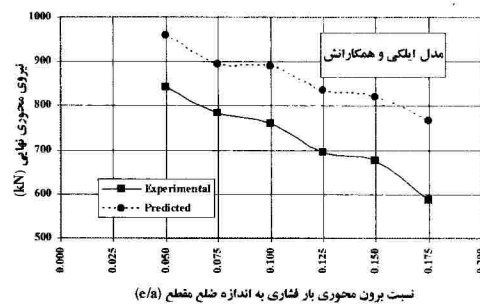
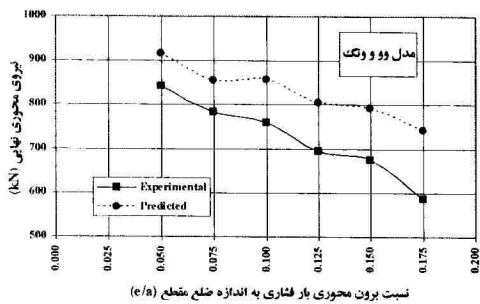
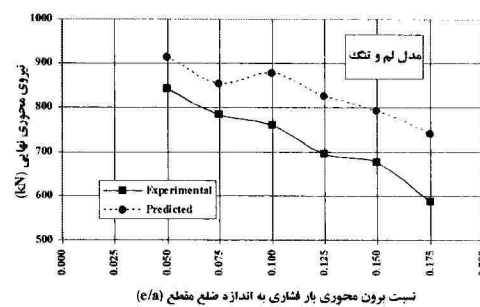
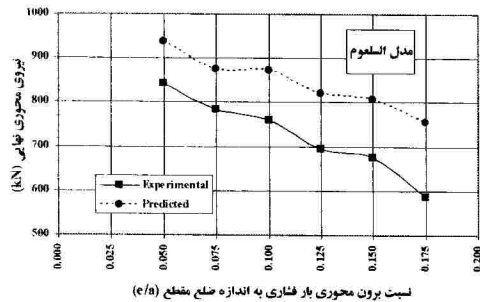
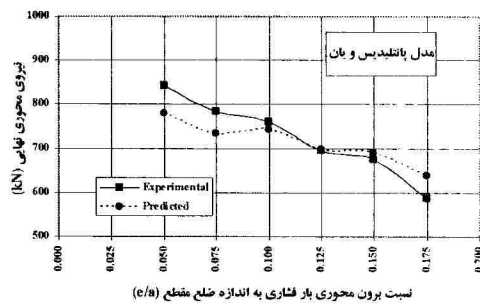
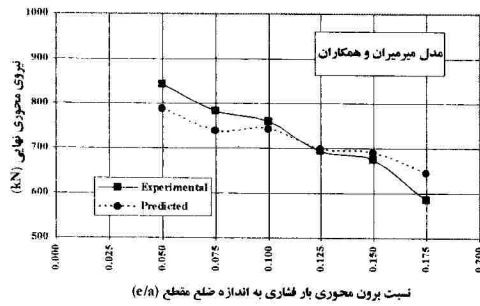


شکل ۶- توزیع تنش و کرنش در مقطع ستون و بلوک تنش معادل در حضور لنگر خمشی



۹. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش‌بینی شده توسط روش‌های مورد بررسی

در نمودارهای شکل ۷ نیروی فشاری نهایی به دست آمده در آزمایش بر روی هر یک از نمونه ستونهای محصور شده با CFRP، با مقادیر به دست آمده از هر یک از مدلها، در برون محوری‌های مختلف مقایسه شده است. مطابق با این نمودارها، به طور کلی افزایش برون محوری بار فشاری و تقویت نقش لنگر خمشی در ستونها سبب افزایش مقادیر نیروی فشاری نهایی بدست آمده از هر یک مدلها نسبت به مقادیر آزمایشگاهی شده است.



شکل ۸- مقایسه نیروی برون محور نهایی آزمایشگاهی با مقادیر حاصل روش‌های مورد بررسی

در مدل‌های میرمیران و همکاران و پانتلیدیس و یان در برون محوری‌های کم فاصله اطمینان قابل قبولی میان مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. اما با افزایش برون محوری، به تدریج اطمینان موجود در نتایج حاصل از مدل رو به کاهش می‌نهد. به طوری که در برون محوری‌های بیش از ۲۵ میلیمتر نتایج پیش‌بینی بیش از مقادیر آزمایشگاهی است. این امر در مورد دیگر مدل‌ها به وضوح قابل مشاهده است. در این مدل‌ها حتی در برون محوری‌های کم نیز فاصله میان مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی کم و بیش به چشم می‌خورد. این امر نشان از حساسیت بسیار زیاد این مدل‌ها بر برون محوری بار فشاری و اتکای مطلق آن به فشار یکنواخت کل مقطع ستون دارد. بیشترین اختلاف میان پیش‌بینی تمامی مدل‌های بررسی شده با نتایج تجربی در نمونه ستون BC-E3.5-W با بیشینه برون محوری بار فشاری است. پاسخ‌های فاقد اطمینان و کمتر از مقادیر واقعی مدل‌های مورد بررسی را می‌توان ناشی از تأثیر مضاعف برون محوری بار فشاری در نمونه ستون‌های محصور شده دانست. اعمال لنگر خمشی بر



نمونه ستون‌های محصورشده، علاوه بر کاهش ظرفیت باربری فشاری ستون به دلیل اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی، سبب کاهش مقدار تنش فشاری محصورکننده و به تبع آن مقاومت فشاری محصورشده این نمونه ستون‌ها گردیده است. به بیان دقیق‌تر در نمونه‌هایی که با برون محوری بیشتر تحت بار فشاری قرار می‌گیرند، تنش محصورکننده واقعی ناشی از دورپیچ CFRP کمتر از مقداری است که از مدلهای اشاره شده پیشین محاسبه می‌شود.

۱۱. نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج حاصل از پژوهشی آزمایشگاهی در مورد اثر ترکیب لنگر خمشی و بار محوری در ستون‌های بتن‌آرمه تقویت شده با کامپوزیت CFRP، ارائه شده است. نمونه‌های آزمایش شده شامل ۶ ستون مربعی شکل و دورپیچ شده با CFRP است که تحت اثر نیروهای فشاری برون محوری آزمایش شده‌اند. همچنین جریات شش مدل پیشنهاد شده توسط محققان دیگر، برای محاسبه مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده با FRP معرفی شده است. این مدل‌ها با فرض اعمال نیروی فشاری محوری بر ستونهای دورپیچ شده تدوین شده‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که اعمال لنگر خمشی بر نمونه ستون‌های محصورشده با FRP علاوه بر اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی، اثر کاهنده‌ای بر مقاومت فشاری بتن محصورشده می‌گذارد. اعمال لنگر خمشی بر مقطع ستون، سبب توزیع غیر یکنواخت تنش فشاری وارد بر مقطع و انبساط عرضی آن می‌گردد. به همین دلیل استفاده از روابط تخمین مقاومت فشاری بتن محصور شده، با افزایش لنگر خمشی، به پاسخ‌های غیر واقعی و فاقد اطمینان می‌انجامد.

۱۲. مراجع

- اصفحانی، م. ر.، صالحیان، ح. ر.، (۱۳۸۴)، "بررسی رفتار ستونهای بتن‌آرمه تقویت شده با دورپیچ CFRP تحت اثر نیروی برون محور"، نشریه دانشکده فنی، ۳۹ (۵)، صفحه ۵۶۹-۵۵۹.
- Esfahani M.R. and Kianoush M.R., (2004), "Axial compressive strength of reinforced concrete columns wrapped with FRP", 1st conference on Application of FRP composites in construction and rehabilitation of structures, May 4, Tehran, Iran.
- صالحیان، ح. ر.، اصفحانی، م. ر.، (۱۳۸۲)، "بررسی رفتار ستونهای بتن‌آرمه دورپیچ شده با کامپوزیت CFRP تحت اثر بار برون محور"، دومین همایش بین المللی بتن و توسعه، تهران، ایران.
- خیرالدین، ع.، صالحیان، ح. ر.، (۱۳۸۷)، "بررسی عوامل موثر در مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده با FRP"، اولین همایش بین المللی مقاوم سازی لرزه ای ساختمانها، تبریز، ایران، ۲۹ مهر - ۱ آبان.
- Lam, L. and Teng, J.G., (2003), "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 22 (13), pp 1149-1186.
- Kheyroddin, A., Naderpour, H., Hoseynie vaez, S. R., (2008), "Numerical evaluation of nonlinear response of reinforced concrete structures strengthened with CFRP wrap", 6th International Structural Specialty Conference, 2008 CSCE Annual Conference, Québec City, Québec, Canada.
- Rochette, P. and Labossiere, P., (2000), "Axial testing of rectangular column models confined with composites", Journal of Composites for Construction, 4 (3), pp 129-136.
- Mirmiran, A., Shahawy, M., Samman, M., Echary, H., Mastrapa, J. C. and Pico, O., (1998), "Effect of column parameters on FRP-confined concrete", Journal of Composites for Construction, 2 (4), pp 175-185.
- Pantelides, C. P., Yan, Z., (2007), "Confinement model of concrete with externally bonded FRP jackets or post tensioned FRP shells", Journal of Structural Engineering, Vol. 133 (9), pp 1288-1296.
- Al-Salloum, Y. A., (2007), "Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates", Elsevier: Composites, Part B: engineering, 38, pp 640-650, (www.elsevier.com/locate/compositesb).
- Wu, Y. F. and Wang, L. M., (2008), "A unified model for the compressive strength of FRP-confined square and circular concrete columns", Forth International conference on FRP composites in civil Engineering (CICE2008), Zurich, Switzerland.
- Iki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C. and Kumbasar, N., (2008), "FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular concrete columns", Journal of Materials in Civil Engineering, 20(2), pp 169-188.
- ACI., (2002), "Building code requirements for structural concrete", Standard 318M-02, American Concrete Institute.