

بررسی عوامل موثر در مقاومت فشاری ستون‌های بتنی محصور شده با FRP

علی خیرالدین¹، حمیدرضا صالحیان²

1- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

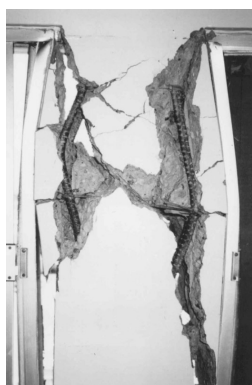
2- عضو هیات علمی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

خلاصه

دورپیچ نمودن ستونهای بتنی با صفحات کامپوزیتی از جنس پلیمرهای مسلح شده با الیاف موسوم به ورقه‌های FRP از جمله شیوه‌های نوین در مقاوم‌سازی سازه‌ها محسوب می‌گردد. بخش وسیعی از تحقیقات در مورد رفتار ستونهای دورپیچ شده با FRP، به ستونهایی با مقطع مدور اختصاص دارد و اثر محصورکنندگی روپوش FRP در مقاطع مربعی و یا مستطیلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق شش مدل ارائه شده توسط محققان برای محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده با مقطع چهارضلعی انتخاب شده و عوامل موثر بر محصورشدگی ستونهای بتنی توسط FRP مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مدلها با مجموعه‌ای از نتایج آزمایشگاهی معتبر مقایسه گردیده است. این مقایسه نشان می‌دهد که هر یک از مدل‌های تحلیلی، به شرایط آزمایشگاهی مربوط به خود وابستگی دارند و با تغییر این شرایط احتمال پیش‌بینی مقادیر فاقد اطمینان و بالاتر از مقدار واقعی توسط این مدل‌ها وجود دارد. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد عواملی همچون شعاع گردی گوشه‌های مقطع، نسبت ابعاد مقطع (نسبت طول به عرض) و ضخامت و کرنش گسیختگی FRP تاثیر بسزایی بر روی مقاومت فشاری ستونهای محصور شده بتنی دارند.

کلمات کلیدی: ستون بتنی محصور شده، مقطع چهار ضلعی، ورقه‌های FRP، مقاومت فشاری

1. مقدمه



شکل 1- انهدام فشاری ستون بتنی آرمه بعلت کماتش آرماتورهای طولی

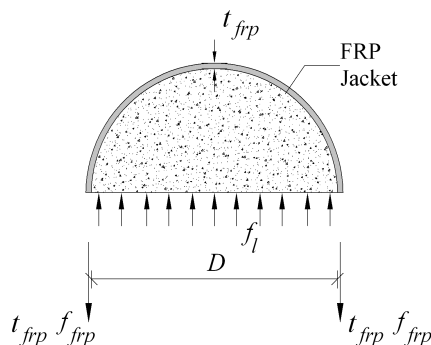
زلزله‌هایی که در سالهای اخیر در سراسر جهان به وقوع پیوسته است، نشان داد که بسیاری از سازه‌های زیربنایی بخصوص در کشورهای در حال توسعه به دلیل قدمت ساخت و عدم انطباق با آیین‌نامه‌های جدید طراحی، نیازمند مقاوم‌سازی می‌باشند. در سازه‌های بتنی، فقدان آرماتورگذاری عرضی فشرده، به منظور محدود نمودن کماتش جانبی آرماتورهای طولی ستون، از جمله ضعف‌های شایع در این اجزا به شمار می‌رود (شکل 1)). برای رفع این مشکل باید به نحوی از انبساط عرضی ستون و کماتش آرماتورهای طولی آن جلوگیری نمود. دورپیچ نمودن عضو فشاری بتنی یکی از شیوه‌های مقاوم‌سازی ستونهای بتنی است و نخستین مطالعات پیرامون آن در ابتدای قرن بیستم صورت پذیرفت. این مطالعات نشان داد که اعمال فشار جانبی به بتن، سبب افزایش مشخصه‌های باربری آن می‌گردد [1 و 2]. ایجاد روکش فولادی به دور ستونهای بتنی اولین راهکار جهت محصور نمودن این اجزا بود و تاکنون مطالعات گسترده‌ای پیرامون رفتار ستونهای مقاوم‌سازی شده با این روش به انجام رسیده است. اما 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 به عنوان جایگزین روکشهای فولادی مورد استفاده قرار گیرند.

این شیوه بدلیل ویژگی‌های مطلوب خود، در مدت کوتاه پیدایش، با استقبال زیادی مواجه شده و مطالعات فراوانی پیرامون آن به انجام رسیده است. نتایج این مطالعات نشان از تاثیر چشمگیر دورپیچ FRP در افزایش مقاومت فشاری ستون و بهبود دیگر مشخصه‌های باربری این اجزا دارد [3 و 4].

2. تنش محصورکننده دورپیچ FRP

هنگامی که یک ستون بتنی محصورشده، تحت اثر فشار محوری قرار می گیرد، هسته بتنی منبسط خواهد شد. این انبساط و افزایش حجم جانبی، توسط دورپیچ پیرامونی محدود می شود. از اینرو نوعی فشار جانبی غیر فعال از جانب روپوش به بتن می گردد که به آن تنش فشاری محصورکننده گفته می شود. توزیع تنش فشاری محصورکننده، در مقاطع مدور کاملاً یکنواخت است. شکل (2) تبادل تنش های میان هسته مدور بتنی و دورپیچ پیرامون آنرا نشان می دهد. با توجه به تعادل تنش های وارد بر ماده دورگیرکننده و نیز با صرف نظر از تنش های مماسی راستای طولی نمونه ستون ، می توان نوشت [5]:

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

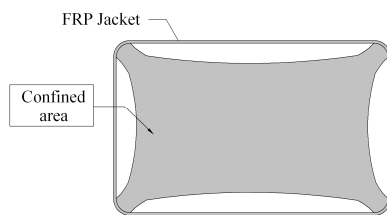


شکل 2- توزیع تنش وارد بر روپوش پیرامونی [5]

در رابطه (1)، f_l ماکزیم تنش فشاری محصورکننده ای است که از سمت دورپیچ FRP به هسته مدور بتنی با قطر D وارد می گردد. همچنین ضخامت دورپیچ FRP t_{frp} و حداکثر تنش کششی FRP f_{frp} است و با رابطه (2) محاسبه می گردد. در این رابطه E_{frp} مدول الاستیسیته دورپیچ FRP در راستای الیاف قرار گرفته به دور ستون و کرنش نهایی FRP در کشش است [6].

$$f_{frp} = E_{frp} \varepsilon_{frp} \quad (2)$$

اثر دورپیچ FRP در بهبود شاخصه های باربری ستونهای بتنی محصور شده با مقطع چهار ضلعی کمتر از مقاطع مدور است [7 و 8]. در مقاطع چهار ضلعی فشار محصورکننده ای که از جانب دورپیچ FRP به بتن می آید، به طور یکنواخت در کل مقطع ستون توزیع نمی شود [9]. شکل (3) نواحی محصور شده مقطع را نشان می دهد.



شکل 3- ناحیه محصورشده در ستون با مقطع چهار ضلعی [9]

3. کرنش نهایی دورپیچ FRP

مقدار ε_{frp} با آزمایش سهمیه کششی مسطح¹ تعیین می گردد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد که در لحظه گسیختگی، کرنش کششی اندازه گیری شده دورپیچ کمتر از مقدار ε_{frp} است. لم و تنگ² [9] از رابطه (3) برای محاسبه کرنش گسیختگی ورقه های FRP دورپیچ شده به دور نمونه ستونهای استوانه ای بهره گرفتند. در این رابطه $\varepsilon_{h,rupt}$ مقدار کرنش گسیختگی حلقوی دورپیچ FRP است. k_ε نیز ضریب کارایی FRP است. مقدار این ضریب به جنس کامپوزیت FRP وابسته است.

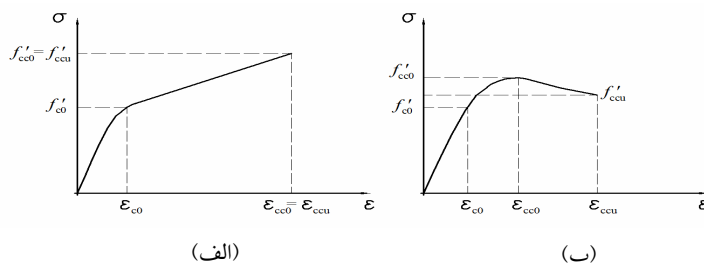
$$\varepsilon_{h,rupt} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \quad (3)$$

¹ Flat coupon tensile test

² Lam and Teng

4. رفتار ستونهای بتنی محصور شده با FRP

مطالعات نشان داده است که نحوه تغییرات نمودار تنش- کرنش بتن محصور شده با FRP به نسبت ماکزیمم تنش محصورکننده دورپیچ FRP (f_l)، به مقاومت فشاری هسته بتنی (f'_{c0}) بستگی دارد. بر این اساس دو گونه تغییرات در نمودار تنش-کرنش فشاری ستونهای بتنی محصور شده با FRP قابل انتظار است [10].



شکل 4- نمودار تنش کرنش بتن محصور شده با FRP، (الف) رفتار سخت شونده، (ب) رفتار نرم شونده [10]

اگر مقطع ستون به حد کافی تحت اثر فشار محصورکننده قرار گیرد، ستون رفتاری سخت شونده¹ خواهد داشت. منحنی تغییرات تنش-کرنش بتن محصور شده در این حالت، همانند شکل (4-الف) با تقریب خوبی دوخطی و همراه با دو شاخه صعودی است. در این شکل f'_{c0} مقاومت فشاری بتن محصور شده و برابر با f'_{ccu} ، تنش گسیختگی بتن است. در این نمودار کرنش گسیختگی بتن، ϵ_{ccu} ، برابر با کرنش نظیر مقاومت فشاری محصور شده ϵ_{c0} است. در حالتی که مقدار تنش فشاری محصورکننده دورپیچ کافی نباشد، ستون رفتاری نرم شونده² از خود نشان می دهد و نمودار تنش-کرنش فشاری آن مطابق شکل (4-ب) می گردد. این نمودار تا مقدار تنش بیشینه به طور صعودی تغییر می کند و پس از آن با تغییراتی نزولی به نقطه گسیختگی می رسد. آزمایشهای راجت و لابوسییر³ [11] نشان داد هنگامی که ماکزیمم تنش محصورکننده (f_l) بیش از 20٪ مقاومت فشاری هسته بتنی (f'_{c0}) باشد، رفتار سخت شونده از ستون قابل انتظار است. در غیر اینصورت ستون دورپیچ شده رفتاری نرم شونده از خود نشان می دهد. آزمایشات زیانو و وو⁴ [12] بر روی نمونه ستونهای استوانه‌ای محصور شده با CFRP نیز نشان داد در صورتی که حاصل $(2t_{fpp} E_{fpp}) / (D f'_{c0}{}^2)$ بزرگتر از 0/18 گردد، رفتار ستون محصور شده از نوع سخت شونده می باشد. در این رابطه D قطر مقطع مدور بتنی است.

5. روشهای تعیین مقاومت فشاری ستون بتنی محصور شده با FRP با مقطع چهار ضلعی

مدل‌های متعددی برای محاسبه مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده با مقطع چهارضلعی ارائه شده است. در این مدل‌ها مقاومت فشاری بتن محصور شده در مقاطع چهار ضلعی با روابط تجربی به ابعاد مقطع، شعاع گردی گوشه‌ها، مقاومت فشاری هسته بتنی (f'_{c0}) و سختی دورپیچ FRP وابسته شده است. در این مقاله 6 روش محاسبه مقاومت فشاری ستونهای دورپیچ شده با FRP و با مقطع چهارضلعی، که توسط میرمیران و همکارانش، پانتلیدیس و یان، السلوم، لم و تنگ، ایلکی و همکارانش و وو و ونگ ارائه گردیده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

5-1. مدل میرمیران و همکاران

میرمیران و همکارانش⁵ [13] رابطه (4) را برای محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده پیشنهاد نموده‌اند. در این رابطه f_l تنش محصورکننده FRP است و با رابطه (5) محاسبه می شود.

¹ Hardening behavior

² Softening behavior

³ Rochette and Labossiere

⁴ Xiao and Wu

⁵ Mirmiran et al.

$$f'_{cc0} = \left(1 + 6.0 \frac{f_l^{0.7}}{f'_{c0}} \right) f'_{c0} \quad \text{for } MCR \geq 0.15 \quad (4)$$

$$f_l = k_s k_e E_{frp} \varepsilon_{frp} t_{frp} \quad (5)$$

در رابطه (5)، k_e ضریب کارآیی دورپیچ FRP و k_s نیز ضریب شکل مقطع است. در مدل میرمیران و همکارانش ضریب شکل مقطع با رابطه (6) تعریف می گردد. همچنین مقدار k_e نیز برابر واحد می باشد.

$$k_s = \frac{4r}{a^2} \quad (6)$$

مطالعات میرمیران و همکارانش نشان داد که فقط هنگامی که ضریب اصلاح محصورشدگی (MCR) بیش از 15٪ باشد، تاثیر دورپیچ FRP در افزایش مقاومت فشاری ستون محسوس خواهد بود. این ضریب با رابطه (7) تعریف می گردد و تابعی از شعاع گردی گوشه ها (r)، طول ضلع بزرگتر مقطع (a) و نسبت تنش محصورکننده به مقاومت فشاری هسته بتنی (f_l / f'_{c0}) است.

$$MCR = \left(\frac{2r}{a} \right) \left(\frac{f_l}{f'_{c0}} \right) \geq 0.15 \quad (7)$$

2-5. مدل پانتلیدیس و یان

پانتلیدیس و یان¹ [14] در مدل پیشنهادی خود، مقدار 0/2 برای نسبت تنش محصورکننده به مقاومت فشاری هسته بتن را مرز میان رفتار سخت-شونده و یا نرم شونده ستون محصور شده فرض نموده و به ترتیب روابط (8) و (9) را برای هر یک از این دو نوع رفتار پیشنهاد نموده اند:

$$f'_{cc0} = \left(-4.322 + 4.271 \sqrt{1 + 4.193 \frac{f_l}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_l}{f'_{c0}}} \right) f'_{c0} \quad \frac{f_l}{f'_{c0}} \geq 0.2 \quad (8)$$

$$f'_{cc0} = \text{MAX} \left[\left(\frac{-4.322 + 4.271 \sqrt{1 + 4.193 \frac{f_l}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_l}{f'_{c0}}}}{0.0768 \ln\left(\frac{f_l}{f'_{c0}}\right) + 1.122} \right) f'_{c0}, f'_{c0} \right] \quad \frac{f_l}{f'_{c0}} < 0.2 \quad (9)$$

در این مدل، فشار محصورکننده با جایگذاری مقدار 0/5 برای ضریب کارآیی دورپیچ FRP (k_e) در رابطه (5) محاسبه می گردد. مقدار ضریب شکل در رابطه مذکور نیز بصورت زیر بدست می آید.

$$k_s = \left(1 - \frac{(a-2r)^2 + (b-2r)^2}{3ab} \right) \left(\frac{a+b}{ab} \right) \quad (10)$$

3-5. مدل السلوم

در مطالعات السلوم² [15] رابطه (11) برای محاسبه مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده پیشنهاد شده است. در این مدل تنش محصورکننده با جایگذاری مقدار k_e برابر با واحد در رابطه (5) محاسبه خواهد شد.

$$f'_{cc0} = \left(1 + 3.14 \frac{f_l}{f'_{c0}} \right) f'_{c0} \quad (11)$$

ضریب شکل مقطع نیز با رابطه (12) محاسبه می شود. در این رابطه R ، وتر مقطع مربعی است و با رابطه (13) محاسبه می شود.

$$k_s = \left(\frac{2a}{R^2} \right) \left(1 - \frac{2}{3} \left[\frac{(1-2(r/a))^2}{1-(4-\pi)(r/a)^2} \right] \right) \quad (12)$$

$$R = \sqrt{2}a - 2r(\sqrt{2} - 1) \quad (13)$$

¹ Pantelides and Yan

² Al-Salloum

4-5. مدل لم و تنگ

رابطه پیشنهادی در مدل لم و تنگ [9] به منظور محاسبه مقاومت فشاری ستون بتنی محصور شده با مقطع چهارضلعی بصورت زیر است:

$$f'_{cc0} = \left(1 + 3.3 \frac{f_l}{f'_{c0}}\right) f'_{c0} \quad (14)$$

در این مدل، تنش فشاری محصور کننده با جایگذاری مقدار 0/568 برای ضریب کارآیی دورپیچ FRP و محاسبه ضریب شکل مقطع به کمک رابطه (15) قابل محاسبه است.

$$k_s = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left(\frac{2}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) \left[1 - \frac{(b/a)(a-2r)^2 + (a/b)(b-2r)^2}{3(ab - (4-\pi)r^2)}\right] \quad (15)$$

5-5. مدل ایلکی و همکاران

ایلکی و همکارانش¹ [16] در مطالعات خود پیرامون رفتار ستونهای بتنی محصور شده با FRP رابطه زیر را برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصور شده پیشنهاد نموده اند:

$$f'_{cc0} = \left(1 + 2.54 \frac{f_l}{f'_{c0}}\right) f'_{c0} \quad (16)$$

در این مطالعه مقدار ضریب کارآیی دورپیچ FRP (k_E) برابر با 0/85 فرض شده است. همچنین ضریب شکل مقطع به کمک رابطه (17) محاسبه می شود.

$$k_s = \left(\frac{a+b}{ab}\right) \left[1 - \frac{(b/a)(a-2r)^2 + (a/b)(b-2r)^2}{3(ab - (4-\pi)r^2)}\right] \quad (17)$$

5-6. مدل وو و ونگ

در مدل پیشنهاد شده توسط وو و ونگ² [17] مقاومت فشاری ستون از رابطه (18) به دست آمده است. در این رابطه b طول ضلع کوچکتر و r شعاع گردی گوشه های مقطع است.

$$f'_{cc0} = \left(1 + 2.16 \left(\frac{2r}{b}\right)^{0.651} \left(\frac{f_l}{f'_{c0}}\right)^{0.955}\right) f'_{c0} \quad (18)$$

در این مدل مقدار ضریب کارآیی دورپیچ FRP (k_E) برابر با واحد فرض شده است. ضریب شکل نیز به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$k_s = \left(\frac{2}{b}\right) \quad (19)$$

6. نتایج آزمایشگاهی

با توجه به آنکه هریک از مدل های ارائه شده پیشین بر اساس شرایط خاص آزمایشگاهی تدوین گردیده اند، در نظر است تا با مقایسه نتایج حاصل این روابط با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان، امکان تعمیم روابط یاد شده مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور مجموعه ای بیست و شش تایی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیرامون رفتار ستونهای بتنی محصور شده با FRP و با مقطع چهارضلعی، گردآوری شده است. پروین و ونگ³ [18]، روجت و لابسیر [11]، ال سلوم [15]، کوموتا و همکاران⁴ [19] و شهاتا و همکاران⁵ [20] از جمله محققانی هستند که در مطالعات آزمایشگاهی خود مقاومت فشاری ستونهای محصور شده با FRP و با مقطع چهار گوشه را اندازه گیری نموده اند. جزئیات هر یک از آزمایشها در

¹ Ilki et al.

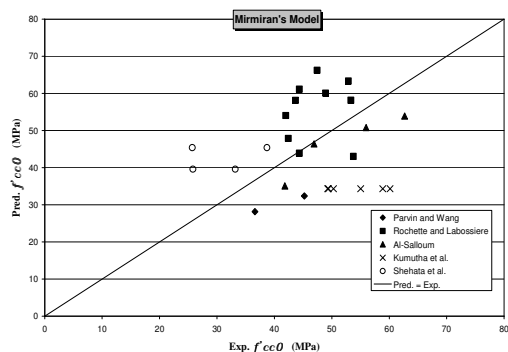
² Wu and Wang

³ Parvin and Wang

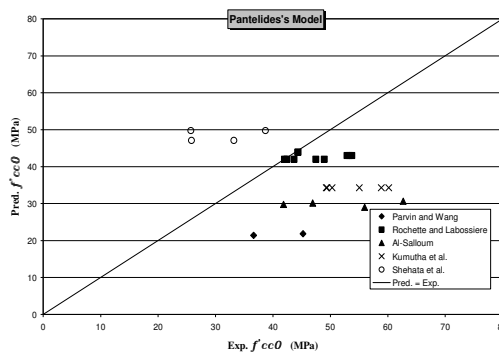
⁴ Kumutha et al.

⁵ Shehata et al.

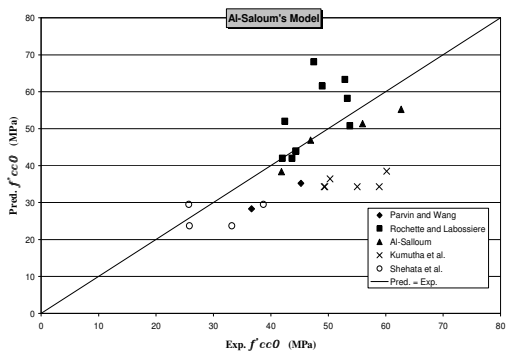
جدول (1) قابل مشاهده است. در این مجموعه نسبت بعد بزرگ مقطع نمونه‌های آزمایشگاهی به بعد کوچک آن از 1 تا 2 تغییر می‌نماید. همچنین نسبت شعاع گردی گوشه‌ها به بعد کوچک مقطع از 0 تا 33٪ متغیر است. دامنه تغییرات مقاومت فشاری هسته بتنی نیز از 21/4 مگاپاسکال تا 49/3 مگاپاسکال است. در مجموعه نتایج آزمایشگاهی گردآوری شده پوشش پیرامون ستون از سه نوع الیاف کربنی (CFRP)، شیشه‌ای (GFRP) و آرامیدی (AFRP) با مدول الاستیسیته متغیر از 10/5 گیگاپاسکال تا 235 گیگاپاسکال می‌باشد. در نمودارهای شکل (5) مجموعه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده با مدل‌های میرمیران، پانتلیدیس، السلعوم، لم و تنگ، ایلکی و وو و ونگ مقایسه شده است.



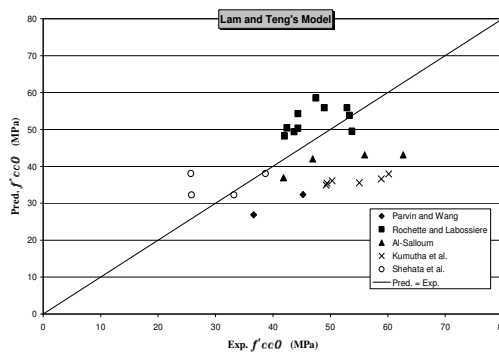
(الف) مدل میرمیران و همکارانش



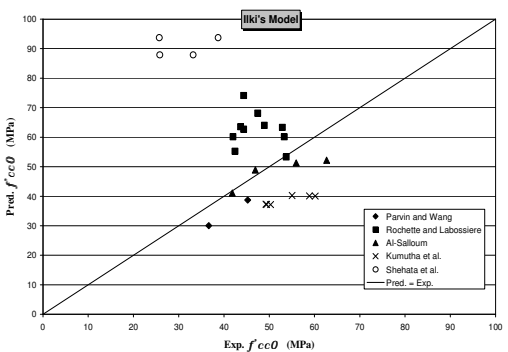
(ب) مدل پانتلیدیس و همکارانش



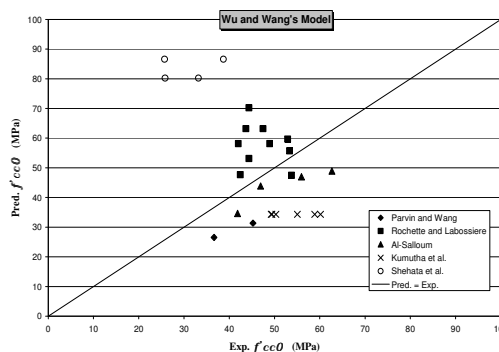
(ج) مدل السلعوم



(د) مدل لم و تنگ



(و) مدل ایلکی و همکارانش



(ه) مدل وو و ونگ

شکل 5- مقایسه مقاومت فشاری نمونه ستونهای محصور شده آزمایشگاهی با نتایج پیش‌بینی مدل‌ها



جدول 1- جزئیات و نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی نمونه ستونهای بتنی محصور شده با FRP

Authors	Specimens	a (mm)	b (mm)	h (mm)	r (mm)	a/b	r/b (%)	f'_{c0} (MPa)	FRP Type	E_{frp} (GPa)	ϵ_{frp}	t_{frp} (mm)	f_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)
Parvin and Wang	C10	108	108	305	8.26	1	7.6	21.4	CFRP	188.9	0.016	0.138	417	36.63
	C20	108	108	305	8.26	1	7.7	21.4	CFRP	188.9	0.016	0.268	834	45.23
Rochette and Labossiere	S5C3	152	152	500	5.0	1	3.3	42	CFRP	82.7	0.015	0.90	1117	42.42
	S25C3	152	152	500	25.0	1	16.4	42	CFRP	82.7	0.015	0.90	1117	48.93
	S38C3	152	152	500	38.0	1	25	42	CFRP	82.7	0.015	0.90	1117	47.46
	S5A9	152	152	500	5.0	1	3.3	43	AFRP	13.6	0.017	3.78	869	53.75
	S25A9	152	152	500	25.0	1	16.4	43	AFRP	13.6	0.017	3.78	869	53.32
	S38A9	152	152	500	38.0	1	25	43	AFRP	13.6	0.017	3.78	869	52.89
	R25C3	203	152	500	25.0	1.34	12.3	42	CFRP	82.7	0.015	0.90	1116	42.00
	R38C3	203	152	500	38.0	1.34	18.7	42	CFRP	82.7	0.015	0.90	1116	43.68
	R5C5	203	152	500	5	1.34	3.3	43.9	CFRP	82.7	0.015	1.50	1860	44.34
R25C4	203	152	500	25	1.34	16.4	43.9	CFRP	82.7	0.015	1.50	1860	44.34	
Al-Salloum	S-r5	150	150	500	5	1	3.3	29.81	CFRP	75.1	0.010	1.2	935	41.84
	S-r25	150	150	500	25	1	16.7	30.16	CFRP	75.1	0.010	1.2	935	46.92
	S-r38	150	150	500	38	1	25.3	29.00	CFRP	75.1	0.010	1.2	935	55.96
	S-r50	150	150	500	50	1	33.3	27.49	CFRP	75.1	0.010	1.2	935	62.68
Kumutha et al.	1S ₁	125	125	750	0	1	0	34.31	GFRP	10.5	0.035	0.68	250	50.30
	2S ₁	125	125	750	0	1	0	34.31	GFRP	10.5	0.035	1.36	500	60.16
	1R _{1.25}	139.8	111.8	750	0	1.25	0	34.31	GFRP	10.5	0.035	0.68	250	49.41
	2R _{1.25}	139.8	111.8	750	0	1.25	0	34.31	GFRP	10.5	0.035	1.36	500	58.88
	1R _{1.66}	161	97	750	0	1.66	0	34.31	GFRP	10.5	0.035	0.68	250	49.28
	2R _{1.66}	161	97	750	0	1.66	0	34.31	GFRP	10.5	0.035	1.36	500	55.04
Shehata et al.	R1	188	94	300	10	2	10.6	23.7	CFRP	235	0.091	0.165	3550	25.81
	R2	188	94	300	10	2	10.6	23.7	CFRP	235	0.046	0.33	3550	33.20
	R3	188	94	300	10	2	10.6	29.5	CFRP	235	0.091	0.165	3550	25.71
	R4	188	94	300	10	2	10.6	29.5	CFRP	235	0.046	0.33	3550	38.7

7. تحلیل نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی

برای مقایسه میزان خطای هر مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی، از روش پیشنهاد شده توسط کاسون و پاولتر¹⁵ [نقل از 21] و مطابق با رابطه (20) استفاده می شود. در جدول (2) میزان خطای هر مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی آمده است.

$$Error = \sqrt{\sum \left(\frac{Experimental - Predicted}{Experimental} \right)^2} \quad (20)$$

جدول 2- مقدار خطای مدلها نسبت نتایج آزمایشگاهی

E (%)	Parvin and Wang	Rochette and Labossiere	Al-Salloum	Kumutha et al.	Shehata et al.	All Specimens
Mirmiran et al.	37	80	23	89	97	160
Pantelides and Yan	66	38	83	89	135	197
Al-Salloum	32	60	17	84	41	117
Lam and Teng	39	48	42	81	54	122
Ilki et al.	23	120	19	69	418	442
Wu and Wang	41	96	33	89	368	395

نمودارهای شکل (5) و مقادیر مندرج در جدول (2) نشان می دهد که به جز مدل ارائه شده توسط لم و تنگ و السلوم، سایر مدلها مقاومت فشاری بالاتر از نتایج آزمایشگاهی شهااتا، داده اند. در آزمایش شهااتا نمونه ستونها، بیشترین نسبت طول به عرض را در میان سایر نمونه ها دارا می باشد. کمترین خطا مربوط به پیش بینی مدل السلوم در مورد مقاومت فشاری نمونه ستونهای آزمایش شده توسط همین محقق است. این موضوع به دلیل استخراج مدل ارائه شده توسط محقق نامبرده از نتایج آزمایشگاهی اش، قابل انتظار است. اما نکته قابل تامل آن است که دیگر مدلها نیز مقاومت فشاری نمونه ستونهای مربعی در آزمایش السلوم را با دقت بهتری پیش بینی نموده اند. بیشترین خطای پیش بینی نیز مربوط به مدل ایلیکی و همکارانش و مدل وو و ونگ است. نتایج پیش بینی این مدلها در بیشتر موارد بیش از نتایج آزمایشگاهی و فاقد اطمینان است. در این مدلها ضریب کارآیی دورپیچ FRP به ترتیب برابر 0/85 و 1/00 در نظر گرفته شده اند. پاسخهای فاقد اطمینان این دو مدل در نمونه ستونهای آزمایش روچت و لایوسیر مشهودتر است. در این نمونه ستونها مقاومت فشاری هسته بتنی (f'_{c0}) بزرگتر از سایر نمونه هاست. این در حالی است که نتایج مدل پانتلیدیس و یان در مقایسه با سایر آزمایشات، مقاومت فشاری نمونه ستونهای محصور شده در آزمایش روچت و لایوسیر را با خطای کمتری داده اند.

8. نتیجه گیری

در این مقاله شش مدل پیشنهاد شده توسط محققان مختلف برای تعیین مقاومت فشاری بتن محصور شده با FRP در ستونهایی با مقطع چهارضلعی انتخاب شده است. هدف اصلی بررسی دقت نتایج حاصل از این مدلها با تغییر شرایط آزمایشگاهی است. از اینرو مجموعه ای از مطالعات آزمایشگاهی انتخاب گردید. نمونه ستونها در این آزمایشها از نظر شکل و نسبت ابعاد، مقاومت فشاری هسته بتنی و سختی دورپیچ پیرامونی متنوع می باشند. در این تحقیق مشخص گردید که مدلهای انتخاب شده، مقاومت فشاری ستونهای محصور شده با مقطع مربعی را با دقت خوبی پیش بینی می نمایند. همچنین کاهش پنجاه درصدی ضریب کارآیی دورپیچ FRP در مدل لم و تنگ سبب تقارب مناسب پاسخهای این مدل با نتایج آزمایشگاهی شده است. کاهش ضریب کارآیی FRP بخصوص با افزایش نسبت ابعاد مقطع ضروری به نظر می رسد. میانگین خطای کلی مدلها در تخمین مقاومت فشاری بتن محصور شده با FRP و با مقطع چهار ضلعی نشان دهنده وابستگی مدلها به شرایطی است که تحت آن بررسی گردیده اند. از اینرو ضرورت مطالعه بیشتر جهت استخراج روابط کلی تر در خصوص تاثیر پارامترهای ابعادی ستون و ویژگی های مکانیکی دورپیچ پیرامون آن در مقاومت فشاری ستونهای بتنی محصور شده با FRP همچنان احساس می گردد.



9. مراجع

1. اصفهانی، م. ر.، صالحیان، ح. ر.، (1384)، "بررسی رفتار ستونهای بتن آرمه تقویت شده با دورپیچ CFRP تحت اثر نیروی برون محور"، نشریه دانشکده فنی، 39 (5)، صفحه 559-569.
2. Kheyroddin, A. and Naderpour, H., (2008), "Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls", Iranian Journal of Science & Technology, 32(B2), pp 79-89.
3. صالحیان، ح. ر.، اصفهانی، م. ر.، (1382)، "بررسی رفتار ستونهای بتن آرمه دورپیچ شده با کامپوزیت CFRP تحت اثر بار برون محور"، دومین همایش بین المللی بتن و توسعه، تهران، ایران.
4. Kheyroddin, A., Hoseynie vaez, S. R., Naderpour, H., (2007), "Numerical analysis of slab-column connections strengthened with carbon fiber reinforced polymers", Journal of Applied Sciences, 8(3), pp 420-431.
5. Purba, B.K. and Mufti, A.A., (1999), "Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets", NRC Canada (<http://cjce.nrc.ca>).
6. خیرالدین، ع.، نادرپور، ح.، حسینی واعظ، س.ر. (1387)، "مدلی برای پیش بینی نحوه تاثیر صفحات FRP بر محصور شدگی ستونهای پل بتن آرمه"، سومین کنفرانس بین المللی پل، تهران، ایران.
7. خیرالدین، ع.، نادرپور، ح.، حسینی واعظ، س.ر. (1387)، "بررسی تاثیر محصور کنندگی صفحات FRP در شکل پذیری اعضای بتن آرمه"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران.
8. 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.
9. 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.
10. L. Lam and J-G Teng (2003), "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", Elsevier: Construction and Building Materials, 17, pp 471-489, (www.elsevier.com/locate/combuildmat).
11. 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.
12. Xiao, Y. And Wu, H. (2000), "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets", Journal of Materials in Civil Engineering, 12 (2), pp 139-146.
13. 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.
14. 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.
15. 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).
16. Ilki, 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.
17. 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.
18. Parvin, A. and Wang, W., (2001) "Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading" Journal of Composites for Construction, 5(3), pp 146-152.



19. Kumutha, R., Vaidyanathan, R. And Palanichamy, M. S., (2007), “*Behavior of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP*”, Elsevier: Cement & Concrete Composites 29, pp 609-615, (www.elsevier.com/locate/cemconcomp).
20. Shehata, I.A.E.M., Carneiro, L.A.V. and Shehata, L.C.D. (2002), “*Strength of short columns confined with CFRP sheets*”, Journal of Material and Structures, 35(1), pp 50-58.
21. Debaiky, A. S., Mark, F. G. and Hope, B. B., (2007), “*Modeling of corroded FRP-wrapped reinforced concrete columns in axial compression*”, Journal of Composites for Construction, 11 (6), pp 556-564.