

یادداشت پژوهشی

چکیده

امروزه تولیدات مختلفی از کامپوزیت‌های پلیمری در صنعت مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی موجود است. از جمله این محصولات می‌توان به الیاف^۱ و تسمه‌های^۲ FRP که به روش نصب نزدیک سطح^۳ شناخته می‌شوند اشاره کرد. الیاف و تسمه‌های FRP برای تقویت اجزای مختلف سازه از جمله تیرها، ستون‌ها و اجزای صفحه‌ای مانند دال‌ها و دیوارهای برشی قابل کاربرد است. از آنجایی که ستون‌ها در سازه‌های بتنی عموماً تحت اثرات توأم نیروی محوری و خمش دو محوره قرار می‌گیرند، ارزیابی و تقویت آنها تحت اثر تلاش‌های توأم مذکور در کارهای عملی مقاوم‌سازی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این مقاله به مطالعه‌ی مقاوم‌سازی اجزای ستون‌های بتن آرمه تحت اثرات ترکیبی نیروی محوری-گشتاور خمشی با استفاده از الیاف و تسمه‌های FRP می‌پردازد. برای این منظور، ضمن توسعه‌ی روابط موجود تقویت ستون‌های تحت اثر نیروی محوری و گشتاور خمشی تک‌محوره با الیاف FRP جهت محصورکنندگی ستون و تسمه‌های FRP جهت تقویت خمشی، روشی محاسباتی برای تقویت ستون‌های بتنی مستطیلی تحت اثرات توأم نیروی محوری و خمش دو محوره پیشنهاد می‌شود. در ادامه، با استفاده از یک مطالعه‌ی موردی، روش پیشنهادی این مقاله تشریح می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای کارهای عملی مقاوم‌سازی مناسب بوده و همچنین ترکیب الیاف و تسمه برای تقویت ستون‌های با هر دو رفتار فشار-کنترل و کشش-کنترل مؤثر است. به‌علاوه، روش تحلیلی پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی واری و صحت‌سنجی خواهد شد.

واژگان کلیدی: تقویت ستون بتنی، خمش دو محوره، مصالح FRP، مقاوم‌سازی، منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی.

طراحی لایه‌های الیاف و تسمه‌های FRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی تحت نیروی محوری و گشتاور خمشی

سالار منیعی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

salarmanie@srbiau.ac.ir

احسان جامی

دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مریوان، ایران

۱- مقدمه

روزانه‌ی ساختمان و ... در مقایسه با سایر روش‌های تقویت اشاره کرد [۱]. تولیدات مختلفی از کامپوزیت‌های پلیمری در صنعت مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی موجود است. از جمله‌ی این محصولات می‌توان به الیاف و تسمه‌های FRP که به روش نصب نزدیک سطح شناخته می‌شوند اشاره کرد [۲-۴]. از الیاف پس از آماده‌سازی سطوح به‌صورت سطحی با استفاده از چسب‌های اپوکسی مخصوصی بر روی مقاطع استفاده می‌شود.

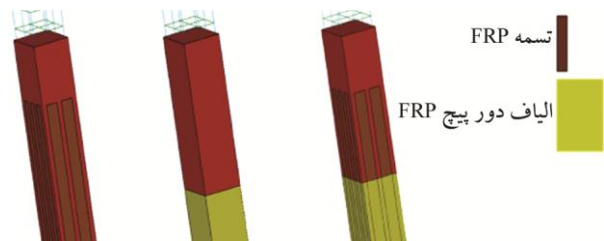
تکنیک محصورسازی با استفاده از FRP قابلیت این را دارد که محصورشدگی را به‌صورت پیوسته برای تمام مقطع ستون تأمین کنند. همچنین این مواد دارای خواص ذاتی مطلوبی (وزن کم، مقاومت بالا و...) هستند به‌گونه‌ای که می‌توان در مقاوم‌سازی اعضای بتنی به‌طور موفقیت‌آمیزی از آنها بهره گرفت. از دیگر مزایای FRP می‌توان به سهولت نسبی اجرا، هزینه‌ی اجرای قابل قبول، عدم ایجاد اختلال زیاد در عملکرد

بررسی تأثیر تقویت ستون‌های بتنی با استفاده از تسمه‌های FRP تحت بارهای انفجاری پرداختند.

رهایی و اکبرپور [۲] به بررسی آزمایشگاهی ستون‌های بتن آرمه با مقطع مستطیل شکل مقاوم‌سازی شده با الیاف FRP تحت بارگذاری خارج از محور پرداخته‌اند. در این مطالعه چندین پارامتر شامل ضخامت FRP، جهت‌گیری الیاف و میزان خروج از مرکزیت نیروی محوری در نظر گرفته شده‌اند. نشان داده شده است که با افزایش ضخامت FRP به مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها افزوده می‌شود و نتایج جهت‌گیری الیاف نیز با هم مقایسه شده‌اند. از طرفی دیگر نشان داده شده است که افزودن یک لایه الیاف طولی به‌جای الیاف عرضی، باعث افزایش شکل‌پذیری شده است.

ستون‌ها به علت بارهای ثقیلی و جانبی و یا ترکیب آنها تحت اثر خمش دو محوره قرار گرفته و تقویت چنین ستون‌هایی در پروژه‌های مقاوم‌سازی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در حال حاضر نشریه‌ی شماره ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی [۹] به عنوان مرجعی کاربردی برای تقویت اجزای بتنی مسلح با مصالح FRP در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وصف، نشریه‌ی مذکور اساساً به موضوع ستون‌های تحت اثر بار محوری بدون برون‌محوری پرداخته و عملاً ترکیب نیروی محوری و گشتاور خمشی را در روابط ارائه شده مورد توجه قرار نداده است. هدف از این مقاله ارزیابی تأثیر تقویت ستون‌های بتن آرمه تحت اثرات توأم نیروی محوری و لنگر خمشی دو محوره با استفاده از الیاف FRP به‌صورت دور پیچ و با راستای الیاف عمود بر راستای ستون و همچنین با استفاده از تسمه‌های FRP تعبیه شده در شیارهای نزدیک سطح با جهت‌گیری الیاف اصلی تسمه‌ها در راستای محور ستون می‌باشد. برای این منظور، ضمن توسعه‌ی روش‌های موجود [۵] برای شرایط تقویت با الیاف عرضی، روابط جدیدی برای ترکیب الیاف عرضی و تسمه‌های FRP ارائه می‌شود تا با این روابط بتوان منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی ستون‌های بتنی تقویت شده را ترسیم کرده و به کمک آن بتوان در مورد طرح مقاوم‌سازی

مقاوم‌سازی به روش تسمه‌های FRP به این صورت است که با ایجاد شیارهایی در سطح بتن تسمه‌ها را در شیارها کار گذاشته و داخل شیارها را با مواد مناسب، معمولاً رزین‌های اپوکسی و یا ملات سیمان پر می‌شود. برای مقاوم‌سازی ستون‌ها می‌توان از هر دو روش به‌صورت مجزا و یا ترکیبی استفاده کرد (شکل ۱).



شکل (۱): مقاوم‌سازی ستون با استفاده از روش ترکیبی الیاف و تسمه‌های FRP

مطالعات آزمایشگاهی و تئوری متعددی در خصوص رفتار ستون‌های تقویت شده با مصالح FRP انجام شده است. عمده‌ی این مطالعات به نحوه‌ی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله تعداد لایه‌ها، جنس الیاف مورد استفاده، محل و نحوه‌ی قرارگیری الیاف نسبت به محور ستون‌ها و ... بر بهبود مشخصه‌های مقاومتی و شکل‌پذیری پرداخته‌اند [۲-۴].

روکا و همکاران [۵] در یک مطالعه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی به موضوع توسعه‌ی منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی ساده شده‌ی ستون‌های بتنی مسلح تقویت شده در ناحیه‌ی فشار-کنترل با الیاف FRP عرضی با خمش تک محوره پرداخته است. روش توسعه‌ی داده شده در مطالعه‌ی مذکور تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مقاله‌ی حاضر نیز روابط سازگاری بر اساس مطالعه‌ی فوق لحاظ گردیده است. تینگ و جیانگ [۶] نیز یک مدل نظری را برای پیش‌بینی رفتار ستون‌های بتن آرمه‌ی تقویت شده با FRP ارائه نمودند. بورناس و تریناتفیلو [۷] به مطالعه‌ی آزمایشگاهی بررسی مقاومت خمشی ستون‌های مقاوم‌سازی شده با تسمه‌های FRP پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از این روش مقاوم‌سازی باعث افزایش مقاومت خمشی ستون می‌گردد. هونگ و همکاران [۸] به

نقاط کلیدی در منحنی اندرکنش ساده شده با استفاده از فرضیات متعارف در تحلیل اجزای بتن آرمه [۵] مطابق شکل (۱) عبارتند از:

نقطه A: کرنش فشاری محوری یکنواخت در بتن محصور.

نقطه B: این نقطه متناظر حالتی از توزیع کرنش است که در آن حداکثر کرنش فشاری در بتن ε_{ccu} و کرنش در آخرین لایه‌ی آرماتور در ناحیه‌ی کششی صفر است. ε_{ccu} کرنش نهایی فشاری بتن محصور شده است. در شرایط غیر محصور، از ε_{cu} کرنش نهایی فشاری بتن محصور نشده، استفاده می‌شود.

نقطه C: این نقطه متناظر حالتی از توزیع کرنش است که در آن هم‌زمان حداکثر کرنش فشاری بتن ε_{ccu} و حداکثر کرنش در آخرین لایه‌ی آرماتور کششی معادل تنش جاری شدن آن باشد. این نقطه همان نقطه‌ی توازن (بالانس) رفتار ستون است.

نقطه D: این نقطه متناظر حالتی از توزیع کرنش است که در آن حداکثر کرنش فشاری معادل ε_{ccu} (یا ε_{cu} در شرایط غیر محصور) و کرنش آخرین لایه‌ی آرماتور طولی مقطع برابر محصور) $0/005$ است.

نقطه E: این نقطه مربوط است به شرایط متناظر خمش خالص

تصمیم‌گیری نمود. نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش برای تقویت ستون‌ها در شرایط مذکور مناسب است. با این وصف تقویت با استفاده از روش ترکیبی به دلیل افزایش هم‌زمان ظرفیت محوری و خمشی از تقویت با استفاده از روش استفاده‌ی صرف از الیاف ارجحیت دارد و در کارهای عملی مقاوم‌سازی توصیه می‌شود. در انتها پس از صحت‌سنجی روابط ارائه شده با یک مطالعه‌ی موردی جنبه‌های کاربردی نتایج این مقاله ارائه می‌شود.

۲- روابط منحنی اندرکنش ساده شده برای ستون‌های تقویت شده با الیاف FRP

در این بخش روش ایجاد منحنی‌های اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی ساده شده‌ی ستون‌های تقویت نشده و تقویت شده در شرایط خمش تک‌محوره و با استفاده از الیاف FRP مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول (۱) عمده پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

تحلیل ستون‌های بتن آرمه‌ی محصور شده با لایه‌های عرضی FRP مشابه ستون‌های بتن مسلح عادی (بدون لایه‌های مذکور) است؛ با این تفاوت که مدل تنش - کرنش بتن در ناحیه‌ی فشاری متفاوت است [۱۰-۱۱].

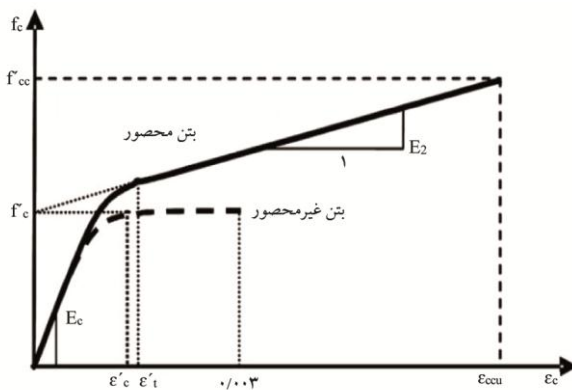
جدول (۱): مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق.

$A_c = A_g (1 - \rho_g)$	سطح مقطع بتن	f'_{cc}	حداکثر مقاومت فشاری بتن محصور
$A_e = A_g - ((h - 2r)^2) + (b - 2r)^2 / 3 - A_g \rho_g$	مساحت محصور مؤثر	f^*_{fu}	حداکثر مقاومت کششی FRP
A_g	سطح مقطع کل	$f_{fu} = c E f^*_{fu}$	مقاومت کششی نهایی طراحی FRP
$A_s = A_g \rho_g$	سطح مقطع آرماتورها	f_y	تنش تسلیم آرماتورهای طولی
h	ارتفاع مقطع	ε_{ccu}	حداکثر کرنش محوری بتن محصور
b	عرض مقطع	$\varepsilon_{cu} = 0.003$	حداکثر کرنش محوری بتن غیر محصور
C_E	ضریب کاهش محیطی	$\varepsilon'_t = 2 f'_c (E_c - E_2)$	کرنش انتقالی
$E_2 = (f'_{cc} - f'_c) / \varepsilon_{ccu}$	شیب قسمت خطی منحنی تنش-کرنش محصور	ε^*_{fu}	حداکثر کرنش FRP
E_c	مدول الاستیسیته بتن	$\varepsilon_{fu} = (C_E \varepsilon^*_{fu})$	حداکثر کرنش نهایی طراحی FRP
E_f	مدول الاستیسیته FRP	ε_{sy}	کرنش نظیر جاری شدن آرماتورها
ϕ	ضریب کاهش مقاومت	ψ_f	ضریب کاهش مقاومت FRP

$$P_{n(B,C,D,E)} = \int_0^c (b) f_c(y) dy + \sum f_{si} A_{si} \quad (2)$$

$$M_{n(B,C,D,E)} = \int_0^c (b) \left(\frac{h}{2} - c + y \right) f_c(y) dy + \sum f_{si} A_{si} d_{si} \quad (3)$$

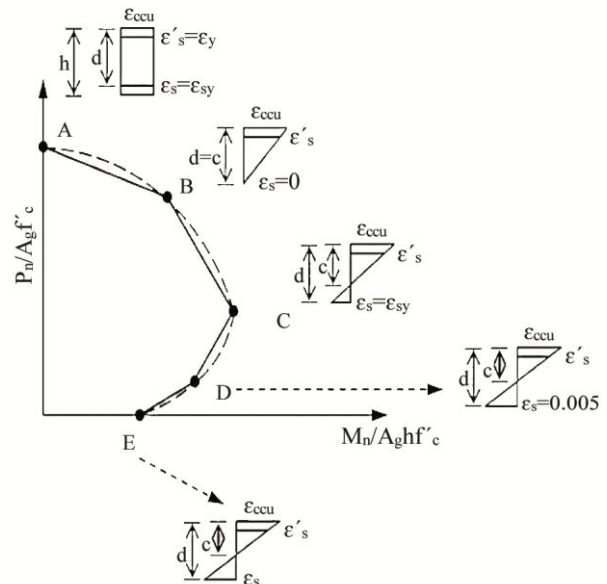
در معادلات بالا c فاصله‌ی تار خنثی تا دورترین تار فشاری مقطع است. A_{si} ، f_{si} و d_{si} مساحت، تنش و فاصله تا مرکز هندسی مقطع در لایه‌ی i -ام آرماتورهای طولی (خمشی) است. γ متغیر انتگرال‌گیری در ناحیه‌ی فشاری مقطع است. مقاومت فشاری f_c از مدل لام و تنگ [۱۲-۱۳] استفاده شده است. این مدل بر اساس ارزیابی مجموعه‌ای از مدل ستون‌های محصور شده با الیاف FRP با حداقل بعد ۳۰۰ میلی‌متر تحت فشار خالص محوری انتخاب شده‌اند [۱۴]. مدل لام و تنگ که در شکل (۳) نشان داده شده است، یکی از مناسب‌ترین مدل‌ها برای تخمین حداکثر مقاومت و کرنش فشاری محصور برای ستون‌های بتن مسلح دایره‌ای و غیردایره‌ای محصور شده با مصالح FRP است [۵]. منحنی تنش-کرنش این مدل از دو قسمت سهمی‌گون و خطی تشکیل شده است (شکل ۳) که در کرنش انتقالی ϵ'_t به هم می‌رسند.



شکل (۳): منحنی تنش-کرنش بتن غیر محصور و محصور در FRP بر اساس مدل لام و تنگ [۱۲-۱۳].

قسمت دوم منحنی (که خطی است) در انتها به نقطه‌ای می‌رسد که متناظر حداکثر مقاومت فشاری f'_{cc} و حداکثر کرنش محوری بتن محصور ϵ_{ccu} است. این مدل در محدوده‌های کرنشی مختلف از روابط زیر تبعیت می‌کند:

نقطه E: این نقطه مربوط است به شرایط متناظر خمش خالص بدون نیروی محوری. در نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی شکل (۲) نقطه A فشار خالص محوری بدون گشتاور خمشی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی ساده شده.

برای نقاط B، C و D موقعیت تار خنثی بر اساس تشابه مثلث‌ها در دیاگرام کرنش بدست می‌آید. نقطه E نیز نشانگر خمش خالص بدون نیروی محوری است که بر اساس نظریه‌های کلاسیک تحلیل اجزای خمشی بتن آرمه (تیرها) قابل محاسبه است. نیروی محوری اسمی P_n متناظر نقطه A با استفاده از معادله (۱) قابل تعیین است (حالت $M_n=0$):

$$P_{n(A)} = [0.85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (1)$$

P_n برای الیاف طولی همان معادله (۱) است؛ زیرا از اثر محصورکنندگی الیاف طولی صرف نظر شده است. نیروی محوری اسمی P_n و گشتاور خمشی اسمی M_n در نقاط B، C و D بر اساس انتگرال‌گیری از تنش محاسبه می‌شوند. این انتگرال‌گیری برای مقاطع غیر دایره‌ای در معادله‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_c' (1.5 + 12k_b \frac{f_1}{f_c'} (\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c'})^{0.45}) \quad (9)$$

کرنش فشاری بتن غیرمحصور (ε_c') در رابطه‌ی فوق برابر $0/002$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار کرنش نهایی فشاری بتن محصور نشده (ε_{cu}) نیز بر اساس آیین‌نامه‌ی [17] ACI 318-08 برابر $0/003$ در نظر گرفته شده است. ضرایب اثر هندسی k_a و k_b بر اساس معادلات (10) و (11) قابل محاسبه‌اند. برای مقاطع دایره‌ای این مقادیر برابر 1 و برای مقاطع غیردایره‌ای به دو پارامتر نسبت مساحت محصورشده مؤثر ($\frac{A_e}{A_c}$) و نسبت وجه ($\frac{h}{b}$) بستگی دارند:

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} (\frac{b}{h})^2 \quad (10)$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} (\frac{h}{b})^{0.5}$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{[(\frac{b}{h})(h-2r)]^2 + (\frac{h}{b})(b-2r)]^2}{3A_g}}{1 - \rho_g} \rho_g \quad (11)$$

در روابط ارائه شده اگر اثر FRP صرف نظر شود روابط برای حالت بدون مقاوم‌سازی نیز معتبر خواهد بود.

3- روابط منحنی اندرکنش ساده شده برای ستون‌های

تقویت شده با تسمه FRP

در این بخش روش ایجاد منحنی‌های اندرکنش ساده شده‌ی ستون‌های تقویت نشده و تقویت شده در شرایط خمش تک‌محوره و فقط با استفاده از تسمه مورد توجه قرار می‌گیرد. برای این کار همان معادلات 1، 2 و 3 بخش قبل قابل کاربرد است؛ با این تفاوت که به علت عدم وجود الیاف عرضی و در نتیجه‌ی عدم وجود اثرات محصورکنندگی، مشخصات مقاومتی مصالح بتن تغییری نخواهد کرد؛ بنابراین معادلات فوق به صورت معادلات (12)، (13) و (14) بازنویسی می‌شوند. شایان ذکر است که به علت عدم تحمل فشار توسط تسمه، انتظار می‌رود که در ناحیه‌ی کنترل- فشار منحنی اندرکنش افزایش مقاومتی رخ ندهد. این موضوع در معادله (12) نیز اثر داده شده است:

$$P_{n(A)} = [0.85f_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (12)$$

$$P_{n(B,C,D,E)} = \int_0^c (b) f_c(y) dy + \sum f_{si} A_{si} + \sum f_{fi} A_{fi} \quad (13)$$

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_c'} \varepsilon_c^2 & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t' \\ f_c' + E_c \varepsilon_c & \varepsilon_t' \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \end{cases} \quad (4)$$

$$\varepsilon_t' = \frac{2f_c'}{E_c - E_2} \quad (5)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc}' - f_c'}{\varepsilon_{ccu}} \quad (6)$$

که در آن f_c و ε_c تنش و کرنش محوری بتن، E_c مدول الاستیسیته‌ی بتن محصور، E_2 شیب قسمت خطی منحنی و ε_{ccu} حداکثر کرنش محوری بتن محصور در FRP است. مقاومت فشاری بتن محصور شده با مصالح FRP بر اساس معادله (7) بیان می‌شود:

$$f_{cc}' = f_c' + 3.3k_a f_1 \quad (7)$$

در رابطه‌ی فوق، پارامتر k_a ضریب «اثر هندسی» است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. فشار محصورکنندگی FRP (f_1) در مورد مقاطع دایره‌ای و غیر دایره‌ای بر مبنای اصول تعادل و سازگاری کرنش‌ها و از روابط زیر محاسبه می‌شود [5]:

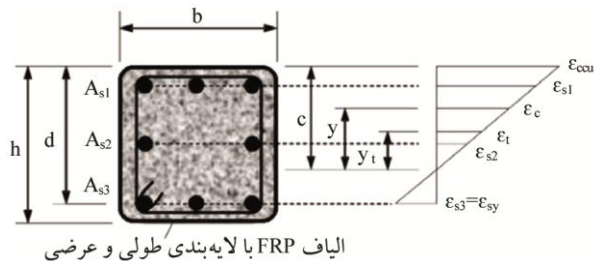
$$f_1 = \begin{cases} \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}} & \text{ستون غیردایره‌ای} \\ \frac{2nt_f E_f \varepsilon_{fe}}{D} & \text{ستون دایره‌ای} \end{cases} \quad (8)$$

در معادله (8) کرنش مؤثر ε_{fe} بر اساس فاکتور اثر k_ε و حداکثر کرنش کششی ε_{fu} محاسبه می‌شود ($\varepsilon_{fe} = k_\varepsilon \varepsilon_{fu}$). سایر پارامترها در جدول (1) آورده شده‌اند. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی لام و تینگ، مقدار $k_\varepsilon = 0.586$ پیشنهاد گردیده است [12]. به طور مشابه کری و هریس [15] مقدار $0/58$ را برای این کمیت پیشنهاد داده‌اند. در مقاله‌ی حاضر، نگارندگان برای مقاصد طراحی و در جهت اطمینان پارامتر k_ε برابر $0/55$ در نظر گرفته‌اند. بر اساس پیشنهادهای کمیته‌ی ACI-440 [16] کرنش مؤثر FRP در حالت گسیختگی (ε_{fe}) در اعضای تحت ترکیب نیروی محوری و گشتاور خمشی به حداقل دو مقدار $0/004$ و $k_\varepsilon \varepsilon_{fu}$ محدود می‌شود.

در مدل لام و تینگ حداکثر کرنش فشاری بتن محصور شده با مصالح FRP با معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

انتقالی است، با استفاده از معادله (۱۸) و با توجه به شکل (۴) محاسبه می‌شود:

$$y_t = c * \frac{\epsilon'_t}{\epsilon_{ccu}} \quad (18)$$



شکل (۴): نمودار توزیع کرنش در مقطع.

پس از انتگرال‌گیری و بازنویسی معادلات (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) با استفاده از ضرایب A, B, C, D, E, F, G, H و I معادلات (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) به صورت زیر به دست می‌آیند. ضرایب فوق‌الذکر به‌طور جداگانه در معادلات (۲۲-۱) الی (۲۲-۹) آورده شده‌اند. معادله (۲۰) و (۲۱) به ترتیب برای حالت با الیاف عرضی و حالت ترکیب الیاف و تسمه نگاشته شده‌اند.

$$P_{n(B,C,D,E)} = [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + Cy_t + D] + \sum f_{si}A_{si} \quad (19)$$

$$M_{n(B,C,D,E)} = [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + Hy_t + I] + \sum f_{si}A_{si}d_{si} \quad (20)$$

$$M_{n(B,C,D,E)} = [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + Hy_t + I] + \sum f_{si}A_{si}d_{si} + \sum f_{fi}A_{fi}d_{fi} \quad (21)$$

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right)^2 \quad (1-22)$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right) \quad (2-22)$$

$$C = -bf'_c \quad (3-22)$$

$$D = bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} \epsilon_{ccu} \quad (4-22)$$

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right)^2 \quad (5-22)$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{3} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right) \quad (6-22)$$

$$G = -\left(\frac{b}{2}f'_c - b \left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right)\right) \quad (7-22)$$

$$M_{n(B,C,D,E)} = \int_0^c (b) \left(\frac{h}{2} - c + y\right) f_c(y) dy + \sum f_{si}A_{si}d_{si} + \sum f_{fi}A_{fi}d_{fi} \quad (14)$$

۴- روابط منحنی اندرکنش ساده شده‌ی ستون‌های

تقویت شده با الیاف و تسمه FRP

در این بخش روش ایجاد منحنی‌های اندرکنش ساده شده‌ی ستون‌های تقویت شده در شرایط خمش تک‌محوره و با استفاده از الیاف و تسمه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش‌های بعد نشان داده خواهد شد که این روش تقویت برای ستون‌های دارای گشتاور خمشی (برون‌محوری بار) به صورت یک و دو جهته بسیار مناسب است.

همان‌طور که در بخش (۲) شرح داده شد، برای ترسیم منحنی اندرکنش ساده شده‌ی ستون‌های محصور شده (تقویت شده با مصالح FRP) و نیز ستون‌های محصور نشده (تقویت نشده)، لازم است پنج نقطه‌ی A, B, C, D, E (که قبلاً در شکل (۱) معرفی شدند) محاسبه شود.

در صورت استفاده از الیاف تسمه، به دلیل عدم محصور کنندگی کافی به وسیله‌ی این مصالح، منطقی است که از افزایش مقاومت محوری صرف نظر شود. در نتیجه معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) بخش قبل برای حالتی که از ترکیب الیاف و تسمه استفاده می‌شود، به صورت روابط (۱۵) الی (۱۷) بازنویسی می‌شوند:

$$P_{n(A)} = [0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_yA_{st}] \quad (15)$$

$$P_{n(B,C,D,E)} = \int_0^{y_t} \left[E_c \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} y\right) - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} y\right)^2 \right] b dy + \int_{y_t}^c \left[f'_c + E_2 \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} y\right) \right] b dy + \sum f_{si}A_{si} + \sum f_{fi}A_{fi} \quad (16)$$

$$M_{n(B,C,D,E)} = \int_0^{y_t} \left[E_c \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} y\right) - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} y\right)^2 \right] \left(\frac{h}{2} - c + y\right) b dy + \int_{y_t}^c \left[f'_c + E_2 \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} y\right) \right] \left(\frac{h}{2} - c + y\right) b dy + \sum f_{si}A_{si}d_{si} + \sum f_{fi}A_{fi}d_{fi} \quad (17)$$

پارامتر مختصاتی y_t بر روی مقطع عرضی، مبدأ آن تار خشی و در ناحیه‌ی بتن فشاری قرار دارد و مربوط به مرز کرنش

مطالعه‌ی حاضر، منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی برای نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه‌ی رهایی و اکبرپور [۲] با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه و ترسیم خواهند شد. نمونه‌های مطالعه‌ی مذکور در مقیاس واقعی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در جدول (۲) مشخصات هندسی و مقاومتی ستون‌ها از مرجع [۲] آورده شده‌اند. از بین نتایج آزمایشگاهی موجود در مطالعه‌ی فوق‌الذکر، دو نمونه ستون تقویت شده فقط با الیاف عرضی (با نام S-225-75-T-1) و تقویت شده با یک لایه طولی و یک لایه عرضی (با نام S-225-75-LT-2) انتخاب شده است. برای همسان‌سازی مطالعه‌ی آزمایشگاهی رهایی و اکبرپور با فرمول‌های ارائه شده در این مقاله می‌توان با تقریب خوبی الیاف طولی را به‌عنوان تسمه‌ای با عرض ۱۰ سانتی‌متر به ضخامت ۰/۷۴۷ میلی‌متر برای ضلع بزرگ‌تر و ۰/۲۴۹ میلی‌متر برای ضلع کوچک‌تر در نظر گرفت.

جدول (۲): مشخصات هندسی و مقاومتی ستون‌های مورد مطالعه در مطالعه‌ی رهایی و اکبرپور [۲].

$f_{cu}=336$ Mpa	$E_c=39944$ Mpa	$\epsilon_{cu}=9.3$ mm/m	$t_f=0.166$ mm/layer
B=150 mm	H=450 mm	Bar:6Ø12	Length=1.5m

اعداد ۲۲۵ و ۷۵ در نام‌گذاری فوق، به ترتیب خروج از مرکزیت نیروی محوری در راستای y و x مقطع عرضی می‌باشد. در نتیجه ستون‌ها تحت نیروی محوری و گشتاور خمشی دو محوره قرار می‌گیرند. در جدول (۳) حداکثر بار و گشتاور وارد بر نمونه‌ها آورده شده است.

جدول (۳): نتایج بارگذاری ستون‌های مورد مطالعه در تحقیق رهایی و اکبرپور [۲].

ستون	P_u (KN)	M_{ux} (KN.m)	M_{uy} (KN.m)
S-225-75-T-1	274.62	20.6	61.8
S-225-75-LT-2	352.78	26.5	79.4

در مرحله‌ی اول، منحنی اندرکنش ستون‌های مورد بررسی با استفاده از روابط ارائه شده در این مقاله و جایگزینی گشتاورهای خمشی دو جهته‌مندرج در جدول (۳) به گشتاور خمشی یک جهته

$$H = bf_c' \left(c - \frac{h}{2} \right) \quad (۸-۲۲)$$

$$I = \frac{bc^2f_c'}{2} - bcf_c' \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bc^2E_2}{3} \epsilon_{ccu} - \frac{bcE_2}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) \epsilon_{ccu} \quad (۹-۲۲)$$

مقادیر f_{fi} و f_{si} به ترتیب تنش در لایه‌های آرماتور و تسمه بوده که از طریق تشابه مثلث‌ها در دیاگرام توزیع کرنش محاسبه می‌شوند. این مقادیر وابسته به موقعیت تار خنثی هستند. تنش در لایه‌های آرماتور برای فشار، مثبت و برای کشش، منفی در نظر گرفته می‌شود. یادآوری می‌شود بر اساس روش طراحی آیین‌نامه‌ی ACI 318-08، ظرفیت نیروی محوری اسمی تحت شرایط فشار محوری خالص (نقطه‌ی A در منحنی اندرکنش) برای ستون دارای آرماتور عرضی به ۸۰٪ مقدار ظرفیت محوری خالص اسمی محدود می‌شود. برای ستون‌های دارای آرماتور عرضی، بر اساس توصیه‌های ACI 318-08 در روش طرح مقاومت، ضریب کاهش مقاومت Φ باید در محاسبات ظرفیت باربری در نظر گرفته شود.

روابط ارائه شده در بالا برای حالت نیروی محوری و گشتاور خمشی یک محوره نوشته شده‌اند. برای توسعه‌ی این روش به حالت کلی‌تر گشتاور خمشی دو محوره، می‌توان گشتاورهای خمشی نهایی دو محوره را از روابط ارائه شده در منابع معتبر مثل مرجع [۱۸] به گشتاورهای تک محوره تبدیل نمود. گشتاورهای معادل یک محوره، بستگی به نسبت گشتاورهای خمشی نهایی دو جهته داشته و از رابطه (۲۳) قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \text{If } \frac{M_{uy}}{M_{ux}} > \frac{b}{h} &\rightarrow M_{ueq} = M_{uy} + 0.55M_{ux} \cdot b/h \\ \text{If } \frac{M_{uy}}{M_{ux}} \leq \frac{b}{h} &\rightarrow M_{ueq} = M_{ux} + 0.55M_{uy} \cdot b/h \end{aligned} \quad (۲۳)$$

در این رابطه، M_{ux} و M_{uy} به ترتیب گشتاور خمشی نهایی ستون تحت اثر بارهای ضریب‌دار وارده حول محورهای x و y مقطع بوده و b و h نیز به ترتیب بعد مقطع در امتداد محورهای x و y است.

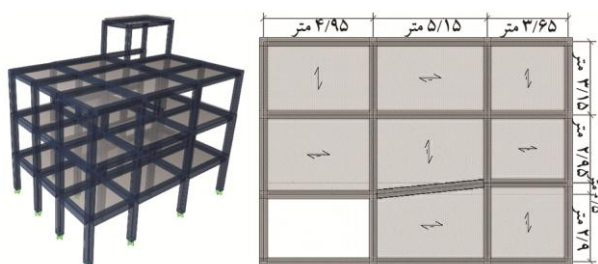
۵- صحت‌سنجی روابط پیشنهادی از طریق مقایسه‌ی نتایج با نتایج آزمایشگاهی موجود

به‌منظور بررسی فرمولاسیون پیشنهادی توسعه یافته در

۶- مطالعه‌ی موردی: تقویت ستون‌های ساختمان مسکونی ۳ طبقه در حالت افزایش تعداد طبقات با استفاده از روابط ارائه شده

۶-۱- بیان مسئله

سازه‌ی مبنای مورد نظر یک ساختمان بتنی ۳ طبقه‌ی منظم در پلان و ارتفاع متشکل از قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط در دو راستای پلان، با کاربری مسکونی، واقع بر روی خاک تیپ ۳ مطابق گروه‌بندی ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و در منطقه با لرزه‌خیزی زیاد است. طرح و محاسبه‌ی ساختمان مبنای بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و مباحث ششم و نهم مقررات ملی ساختمان ایران بارگذاری، تحلیل و طراحی شده و تمامی الزامات لرزه‌ای در آن رعایت شده است. اثر میانقاب‌ها نیز در تحلیل و طراحی از طریق کاهش زمان تناوب طبیعی تجربی به میزان ۲۰٪ مطابق الزامات ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است. شکل (۷) و جدول (۴) مشخصات هندسی سازه و اعضای آن را نشان می‌دهند.

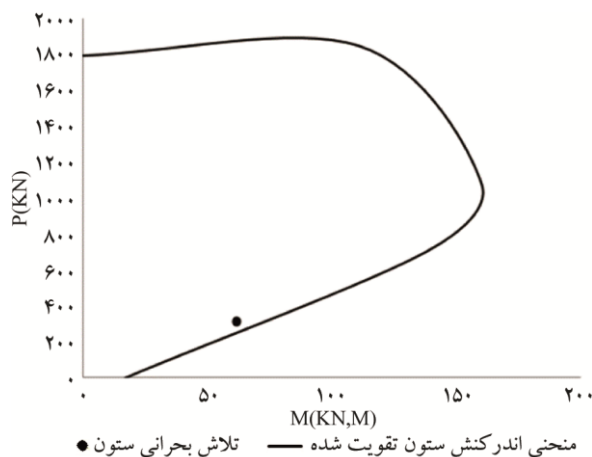


شکل (۷): نمای هندسی سازه‌ی مینا.

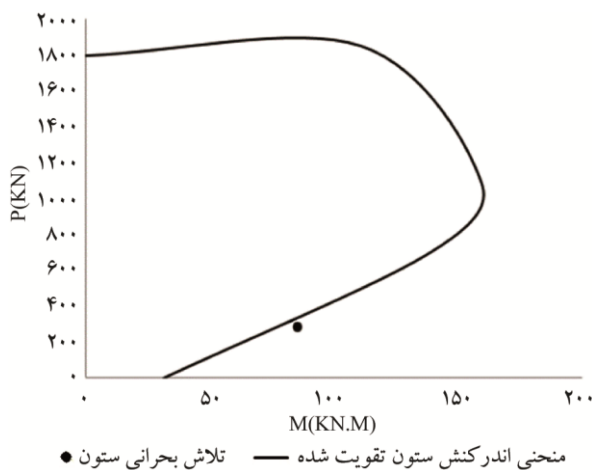
جدول (۴): مشخصات هندسی سازه‌ی مینا.

طبقه	ارتفاع (متر)	ابعاد مقطع ستون (سانتی‌متر)	ابعاد مقطع تیر (سانتی‌متر)	تعداد آرماتور در مقطع ستون
اول	۳/۱	۴۰×۴۰	۴۰×۴۰	۸ عدد آرماتور نمره ۱۸
دوم	۳/۳	۳۵×۳۵	۳۵×۳۵	۸ عدد آرماتور نمره ۱۸
سوم	۳/۳	۳۵×۳۵	۳۵×۳۵	۸ عدد آرماتور نمره ۱۸

معادل از طریق رابطه (۲۳) قابل محاسبه بوده و در شکل‌های (۵) و (۶) برای هر یک به‌طور جداگانه و به صورت نمودار صاف شده نشان داده شده است. همچنین زوج نیروی محوری و گشتاور خمشی یک‌جهته معادل نیز برای هر یک از آنها مطابق اعداد جدول (۳) بر روی منحنی‌های شکل‌های (۴) و (۵) با دایره‌ی سیاه نشان داده شده‌اند. این مقادیر در واقع حداکثر بار وارد بر ستون بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه مختصات شکست (نیروی محوری، گشتاور خمشی) به منحنی اندرکنش نزدیک‌تر باشد حاکی از نزدیک بودن نتایج آزمایشگاهی با نتایج نظری ارائه شده است. لذا، با تقریب مناسبی، نتایج نظری به‌دست آمده در این تحقیق قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است که در محاسبه‌ی منحنی اندرکنش، ضریب کاهش مقاومتی واحد در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۵): منحنی اندرکنش ستون S-225-75-T-1.



شکل (۶): منحنی اندرکنش ستون S-225-75-LT-2.

۶-۲- سناریوی مقاوم‌سازی

به منظور مقاوم‌سازی ستون‌ها از الیاف و تسمه‌های FRP استفاده می‌شود. بدین منظور با استفاده از روابط ارائه شده در این مقاله تعداد لایه‌ها و عرض مورد نیاز تسمه‌ها طراحی می‌شود. نحوه‌ی طراحی بدین صورت است که اندرکنش تنش‌های وارده بر ستون (شامل نیروی محوری و لنگرهای خمشی حول محورهای X و Y) باید در داخل محدوده‌ی نمودار اندرکنش ستون مقاوم‌سازی شده قرار گیرد. از الیاف و تسمه‌های CFRP شرکت سیکا که در جدول (۶) مشخصات آنها آورده شده است.

جدول (۶): مشخصات الیاف و تسمه‌های مورد استفاده در طرح مقاوم‌سازی.

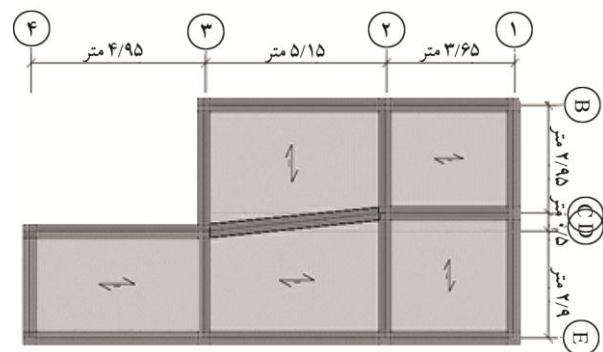
مشخصات	Sheet-SikaWrap®-900 C	Laminate-SikaWrap®-600 C	Sheet-SikaWrap®-900 C	Laminate-SikaWrap®-600 C
ضخامت	۰/۴۷۸	۱/۳	۰/۴۷۸	۰/۳۳۱
مقاومت کششی ^۴ (MPa)	۲۴۰۰	۶۵۴	۳۸۰۰	۳۸۰۰
مدول الاستیسیته ^۵ (MPa)	۲۰۰۰۰۰	۵۳۸۰۰	۲۴۲۰۰۰	۲۴۲۰۰۰
کرنش نهایی ^۶ (%)	۱	۱/۲۱	۱/۴۳	۱/۵۵

در جدول (۷) نتایج طراحی الیاف و تسمه را می‌توان مشاهده کرد. لازم به ذکر است در طرح مقاوم‌سازی تسمه‌ها در جدول (۷) عدد اول معرف تعداد تسمه‌ها در هر وجه ستون و عدد دوم عرض تسمه است. برای نمونه منحنی اندرکنش ستون مقاوم‌سازی شده B4 در طبقات مختلف نشان داده شده است (شکل ۹).

جدول (۷): نتایج طراحی.

تسمه FRP	الیاف FRP	ستون‌های ضعیف	طبقه
2×10 _{cm} -Sika 900 C	1 layer- Sika600 C	B4	اول
1×5 _{cm} -Sika 600 C	-	A2	دوم
1×10 _{cm} -Sika 600 C	2 layer- Sika900 C	B4	
2×10 _{cm} -Sika 900 C	1 layer- Sika600 C	E2	
1×10 _{cm} -Sika 900 C	1 layer- Sika600 C	C2	
1×10 _{cm} -Sika 600 C	2 layer- Sika900 C	B4	سوم

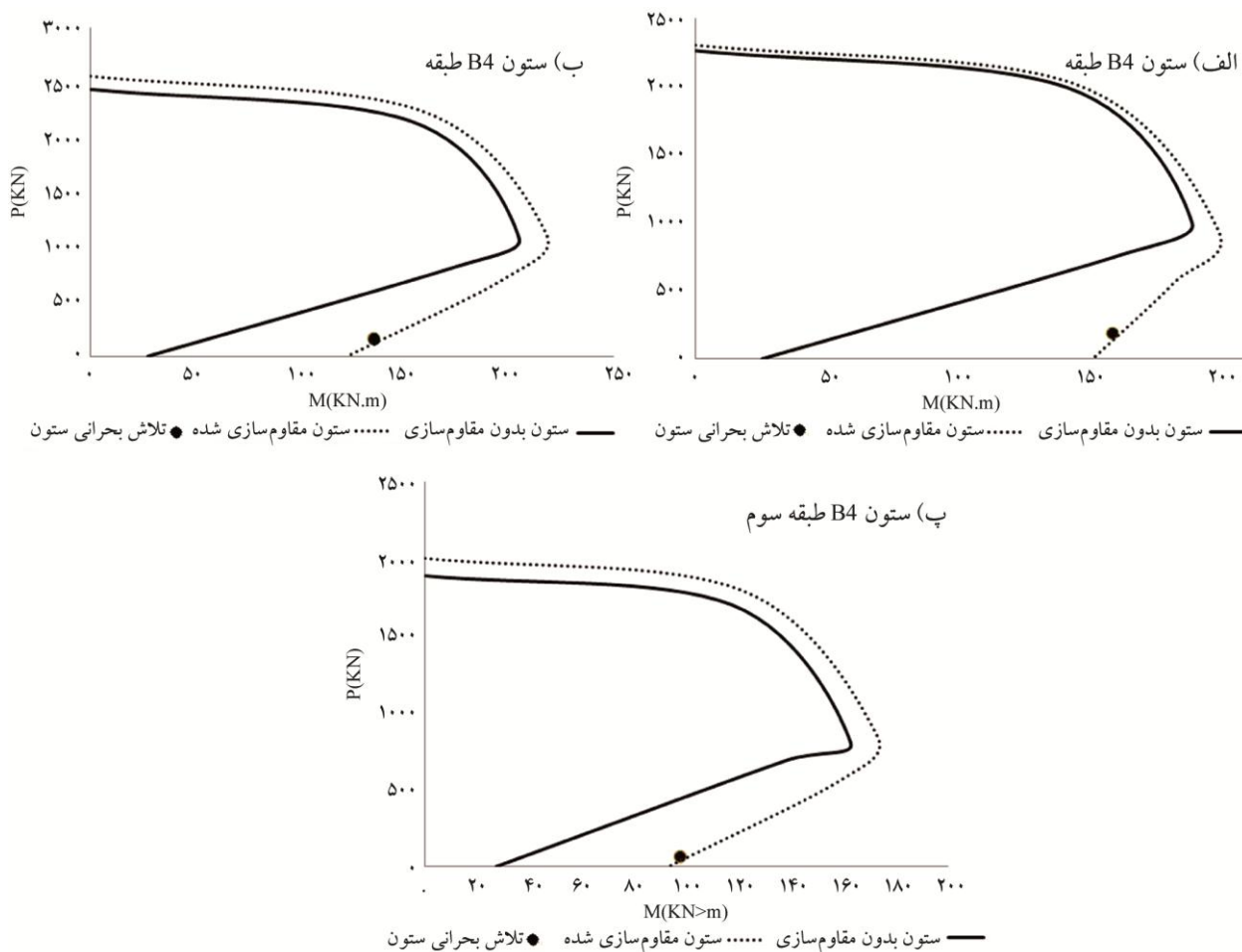
سازه‌ی جدید، ارتقاء یافته‌ی سازه‌ی مینا می‌باشد به طوری که یک طبقه به ارتفاع ۳/۳ متر بر روی تراز بام اضافه می‌شود. از مقطع مربعی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر با هشت عدد آرماتور نمره ۱۸ برای ستون‌ها و از مقطع مستطیلی با عرض ۳۰ سانتی‌متر و با عمق کل ۳۵ سانتی‌متر برای تیرهای طبقه‌ی جدید استفاده شده است. شکل (۸) مشخصات هندسی کلی پلان طبقه‌ی اضافه شده (طبقه چهارم) را نشان می‌دهد. بتن در طبقه‌ی جدید از رده‌ی C25، میلگرد طولی از رده‌ی AIII و میلگرد عرضی از رده‌ی AII در نظر گرفته شده است. سازه‌ی جدید دوباره تحلیل و طراحی شده و تمامی الزامات لرزه‌ای در آن کنترل شده است. نتایج طراحی نشان می‌دهد که تعدادی از ستون‌ها الزامات مقاومت را در سازه‌ی جدید تأمین ننموده است. جدول (۵) آدرس ستون‌های ضعیف و تنش‌های وارده را در سازه‌ی جدید نشان می‌دهد.



شکل (۸): مشخصات هندسی طبقه‌ی جدید.

جدول (۵): ستون‌های ضعیف و تنش‌های بحرانی وارده بر آنها.

طبقه	ستون‌های ضعیف	M _x (KN.m)	M _y (KN.m)	P(KN)
اول	B4	۱۸۵/۹	۳۱/۵	۱۴۶/۷
دوم	A2	۱۱۳/۳	۲۶/۴	۱۳۹/۵
	B4	۱۴۰/۲	۱۱/۲	۱۲۶
	E2	۱۲۳/۷	۲۹/۳	۳۱۴/۷
	C2	۱۱۹/۷	۴۵/۶	۲۱۹/۴
سوم	B4	۹۷/۳	۵/۲	۵۹/۸



شکل (۹): منحنی اندرکنش ستون B4 در طبقات مختلف.

۲- نتیجه گیری

هر دو ناحیه می شود. انتظار می رود در غیاب یک روش استاندارد آیین نامه، روش ارائه شده در این مقاله گام مؤثری در ارائه ی یک روش عمومی برای مقاوم سازی ستون های بتن آرمه تحت اثر توأم نیروی محوری و گشتاور خمشی دو محوره با استفاده از الیاف پلیمری باشد. با این وجود، نتایج این مطالعه نشان می دهد که روش ارائه شده دقت کافی در کارهای مهندسی مقاوم سازی دارد.

نشریه ی ۳۴۵ برای مقاوم سازی ستون های بتنی صرفاً برای الیاف عرضی و در حالت فشار خالص روابطی را ارائه داده و در وضعیت ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی هنوز مبسوط مانده است. از طرف دیگر تسمه ها عموماً در طرح مقاوم سازی تیرها و دال ها مورد استفاده قرار می گیرد. لذا در این مطالعه به ارائه ی روابطی برای رسم منحنی اندرکنش ستون های بتن مسلح با مقطع مستطیلی با استفاده از ترکیب الیاف عرضی و تسمه ی FRP پرداخته شد. تطبیق نتایج نظری این مقاله با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که نمودار مربوط به مقاوم سازی ستون برای الیاف عرضی در ناحیه ی کنترل فشار نسبت به ناحیه ی کنترل کشش، و برای تسمه در ناحیه ی کنترل کشش نسبت به ناحیه ی کنترل فشار بازتر می شود؛ بنابراین ترکیب الیاف و تسمه باعث افزایش مقاومت (بازتر شدن منحنی اندرکنش) در

مراجع

1. Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., Li, M.W. (1994) Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. *ACI Structural Journal*, **91**(4), 434-47.
2. Rahai, A. and Akbarpour H. (2014) Experimental investigation on rectangular RC columns

- strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*. **17**(6-7), 471-489.
13. Lam, L. and Teng, J. (2003) Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. *J. Reinf. Plast. Composites*. **22**(13), 1149-1186.
 14. Rocca, S. (2007) *Experimental and Analytical Evaluation of FRP-Confined Large Size Reinforced Concrete Columns*. Ph.D. Dissertation. Rolla, MO, USA: University of Missouri-Rolla, 171.
 15. Carey, S. and Harries, K. (2003) *The Effects of Shape, 'Gap', and Scale on the Behavior and Modeling of Variably Confined Concrete*. Report No. ST03-05. Columbia, SC, USA: University of South Carolina.
 16. American Concrete Institute (2008) *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structures*. ACI 440.2R. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 80.
 17. American Concrete Institute (2008) *Building Code Requirements for Structural Concrete*. ACI 318-08. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 443.
 18. Ray, S.S. (1995) *Reinforced Concrete Analysis and Design*. Blackwell Science.
 - strengthened with CFRP composites under axial load and biaxial bending. *Composite Structures*, **108**, 538-546.
 3. Pham, T.M., Youssed, J., Hadi, M.N.S., Tran, T.M. (2016) Effect of Different FRP Wrapping Arrangements on the Confinement Mechanism. *Procedia Engineering*, **142**, 307-313.
 4. Ranolia, K.V., Thakkar, B.K., Rathod, J.D. (2013) Effect of Different Patterns and Cracking in FRP Wrapping on Compressive Strength of Confined Concrete. *Procedia Engineering*, **51**, 169-175.
 5. Rocca, S., Galati, N., Nanni, A. (2009) Interaction diagram methodology for design of FRP-confined reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, **23**, 1508-1520.
 6. Teng, J.G., Jiang, T. (2012) Theoretical model for slender FRP-confined circular RC columns. *Construction and Building Materials*, **32**, 66-76.
 7. Bournas, D.A. and Triantafillou, T.C. (2008) Flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP or stainless steel reinforcement. Experimental investigation. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China.
 8. Hong, H., Zhong-X.L., Yanchao, S. (2015) Reliability Analysis of RC Columns and Frame with FRP Strengthening Subjected to Explosive Loads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **30**(2), 04015017.
 9. Department of Planning and Strategic Supervision (2006) *Criteria Guide the Design and Implementation of Concrete Improvements to Existing Buildings Using Reinforced Materials FRP*. Issue 345 (in Persian).
 10. MacGregor, J. (2012) *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. 6th ed. Upper Saddle River, NJ, USA, Pierson Inc, 1157.
 11. Bank, LC. (2006) *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. Hoboken, N.J. NJ, USA: John Wiley and Sons.
 12. Lam, L. and Teng, J. (2003) Design-oriented stress-

واژه‌نامه

Wrap	۱- الیاف
Laminate	۲- تسمه
Near-Surface Mounting	۳- نصب نزدیک سطح
Tensile Strength	۴- مقاومت کششی
Tensile Modulus	۵- مدول الاستیسیته
Elongation	۶- کرنش نهایی

Design of Interaction Curves for RC Columns with FRP Materials under the Effect of Axial Force and Biaxial Bending Moment

Salar Manie^{1*}, Ehsan Jami²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran.

*Corresponding Author, email: salarmanie@srbiau.ac.ir

2- M.Sc. Graduate of Earthquake Engineering, Kurdistan Organization for Engineering Order of Building, Mariwan, Iran

Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites are widely used in retrofitting and strengthening of Reinforced Concrete (RC) structures. FRP composites are applicable for strengthening various structural elements including beams, columns and plane elements such as floor slabs and shear walls. Despite their broad usage, available guidelines typically do not contain a comprehensive procedure for retrofitting design of RC elements under general loading conditions. As RC columns are essentially subjected to simultaneous axial force and bending moment in monolithic construction, their evaluation and retrofit under such combined effects are of major importance in the retrofit design process. It appears that available expressions in most design guidelines merely accounts for the possible increase in the compressive strength of concrete due to the enhanced confinement on the concrete core provided by the FRP jackets. Theoretical and experimental studies on the behavior of columns confined by FRP composites subjected to axial force and bending moment are available in the literature. Those studies have demonstrated that FRP jacketing enhances the elements behavior in term of both strength and ductility. Most of studies are primarily devoted to the strengthening of RC elements under pure axial force. In recent years, however, studies have been conducted on response of RC elements under combined effects of axial load and uniaxial bending. Rocca (2009), among others, conducted a very precise and valuable practical study on the effects of bending moments on retrofitting of RC columns using FRP composite. He introduced the interaction curves of retrofitted RC columns with FRP jackets based on the principles of equilibrium and strain compatibility. Moreover, results of various experimental tests are found in the literature emphasizing the behavior of RC elements under eccentric loading conditions. Such tests have investigated the effects of various parameters including the strength of FRP composites, number of FRP layers, orientation of FRP layers, etc. on both strength and ductility of the retrofitted members.

The present paper deals with the retrofitting and strengthening of RC columns under combined effects of axial force and biaxial bending moment using FRP composites. The study is essentially the extension of the work conducted by Rocca (2009) to the more general biaxial case. Longitudinal, transverse and combined fiber-sheets are considered as alternatives of retrofitting RC columns using FRP composites. The proposed design procedure is then explained via a case study by which advantages and disadvantages of longitudinal, transverse and combined fiber composite sheets are investigated and discussed according to the interaction curve of the retrofitted column. Results demonstrate that the proposed procedure is appropriate for practical retrofitting applications, and different fiber-sheet layouts are effective in enhancing the load bearing capacity of both the compression- and tension-controlled columns.

Keywords: RC Columns Strengthening, Biaxial Bending, FRP, Retrofitting, Concrete Columns, Interaction Curve.