

تقویت ستون‌های بتن آرمه تحت اثرات توام نیروی محوری و گشتاور خمشی دومحوره با استفاده از مصالح FRP

سالار منیعی

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

احسان جامی*

دپارتمان سازه و زلزله، مهندسان مشاور فرایشگام، سنندج، ایران

سجاد رستمی

دپارتمان سازه و زلزله، مهندسان مشاور فرایشگام، سنندج، ایران

چکیده

امروزه کامپوزیت‌های پلیمری الیافی (FRP) با مقاومت بالا به‌طور گسترده در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کامپوزیت‌ها برای تقویت اجزای مختلف سازه از جمله تیرها، ستون‌ها و اجزای صفحه‌ای مانند دال‌های سقف و دیوارهای پرشی قابل کاربرد است. با وجود استفاده گسترده، دستورالعمل‌های موجود فاقد روش جامعی برای تقویت اجزای ستون‌های بتن آرمه تحت شرایط عمومی بارگذاری هستند. از آنجایی که ستون‌ها در سازه‌های بتنی درجا عموماً تحت اثرات توام نیروی محوری و خمشی دومحوره قرار می‌گیرند، ارزیابی و تقویت آن‌ها تحت اثر تلاش‌های توام مذکور در کارهای عملی مقاوم‌سازی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این مقاله به مطالعه تقویت و بهسازی اجزای ستون‌های بتن آرمه تحت اثرات ترکیبی نیروی محوری-گشتاور خمشی با استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌پردازد. برای این منظور، ضمن توسعه روابط موجود تقویت ستون‌های تحت اثر نیروی محوری و گشتاور خمشی تک‌محوره با الیاف FRP با جهت‌گیری عرضی، طولی و نیز ترکیبی دو جهته، روشی محاسباتی برای تقویت ستون‌های بتنی مستطیلی تحت اثرات توام نیروی محوری و خمشی دومحوره پیشنهاد می‌شود. در ادامه، با استفاده از یک مطالعه موردی، روش پیشنهادی این مقاله تشریح شده و مزایا و معایب استفاده از الیاف عرضی، طولی و یا ترکیب آن‌ها از طریق مقایسه منحنی‌های اندرکش ستون تقویت شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای کارهای عملی مقاوم‌سازی مناسب بوده و همچنین الیاف عرضی تنها و یا الیاف ترکیبی عرضی و طولی برای تقویت ستون‌های با هر دو رفتار فشار-کنترل و کشش-کنترل موثر است. با این وصف، نشان داده خواهد شد که الیاف طولی تنها، صرفاً برای تقویت ستون‌های با رفتار کشش-کنترل موثر است. به علاوه، روش تحلیلی پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی واری و صحت‌سنجی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تقویت ستون بتنی، خمشی دومحوره، مصالح FRP، مقاوم‌سازی، منحنی اندرکش.

۱- مقدمه

* نویسنده مسئول: jami.rudan@gmail.com

که الیاف‌های طولی هنگامی که خمش کنترل کننده رفتار مقطع است، تأثیر بیشتری بر افزایش ظرفیت باربری ستون دارد. روکا و همکاران (۲۰۰۹) [۷] در یک مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی به موضوع توسعه منحنی اندرکنش ساده شده ستون‌های بتنی مسلح تقویت شده در ناحیه فشار-کنترل با الیاف FRP عرضی با خمش تک محوره پرداخته است. روش توسعه داده شده در مطالعه مذکور تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مقاله حاضر نیز روابط سازگاری براساس مطالعه فوق لحاظ گردیده است.

فیتزویلیام و همکاران (۲۰۱۰) [۸] تأثیر مقاوم‌سازی ستون‌های کوتاه و لاغر بتنی را با لایه‌های CFRP و با آرایش‌های دو و چهار لایه در هر دو جهت عرضی و طولی روی نمونه‌های کوچک مقیاس بررسی کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که پوشش CFRP به صورت عرضی نسبت به محور طولی ستون باعث افزایش ظرفیت ستون‌های کوتاه می‌شود؛ در حالی که پوشش با الیاف طولی می‌تواند باعث بهبود رفتار ستون‌های لاغر شده و مقاومت نهایی آنها را همانند ستون‌های کوتاه افزایش دهد.

گادوسوا و همکاران (۲۰۱۱) [۹] هشت نمونه ستون بتنی با مقیاس واقعی را تحت بار برون محور مورد آزمایش قرار دادند. نمونه‌ها شامل ستون‌های لاغر بوده‌اند. در بین کل نمونه‌ها، دو نمونه تقویت نشده (نمونه‌های کنترل)، دو نمونه تقویت شده با لایه‌های CFRP به صورت عرضی، دو نمونه تقویت شده به روش نصب نوارها در شیارهای سطح بتن (Near Surface Mounted - NSM) و دو نمونه تقویت شده با روش ترکیبی لایه‌های CFRP و روش NSM بودند. آنها دریافتند که تقویت به روش NSM تأثیر بیشتری بر افزایش ظرفیت باربری ستون‌هایی که گشتاور خمشی نیز در آنها قابل ملاحظه است و بارگذاری آنها برون محور است، دارد.

تنگ و جیانگ (۲۰۱۲) [۱۰] نیز یک مدل نظری را برای پیش بینی رفتار ستون‌های بتن آرمه تقویت شده با FRP ارائه نمودند. این مدل در مطالعات اخیر ارزیابی میزان تاثیر تقویت ستون‌های بتن آرمه با مصالح FRP به کار برده شده است.

نتایج نظری و آزمایشگاهی موجود برای ارزیابی تاثیر تقویت ستون‌های دایره‌ای لاغر از طریق محصورسازی با مصالح FRP از دیدگاه مقاومتی دارای دقت قابل قبولی است [۱۱ و ۱۲]. با این

کاربرد پلیمرهای تقویت شده الیافی (FRP) برای تقویت اجزای سازه‌های بتن آرمه به‌طور روزافزون در حال افزایش است. علت آن به سهولت نسبی اجرا، هزینه اجرای قابل قبول، عدم ایجاد اختلال زیاد در عملکرد روزانه ساختمان و ... در مقایسه با سایر روش‌های تقویت بر می‌گردد [۱]. مصالح FRP بسته به نحوه قرارگیری الیاف (عرضی و یا طولی نسبت به محور ستون)، از طریق افزایش محصورشدگی بتن هسته و یا مقاومت کششی الیاف و در نتیجه افزایش گشتاور قابل تحمل مقطع، می‌تواند منجر به بهبود رفتار ستون‌های بتن آرمه از هر دو جنبه مقاومت و شکل‌پذیری گردد.

مطالعات متعددی در خصوص رفتار ستون‌های تقویت شده با مصالح FRP در ادبیات فنی موجود است. عمده این مطالعات به نحوه تاثیر پارامترهای مختلف از جمله تعداد لایه‌ها، جنس الیاف مورد استفاده، محل و نحوه قرارگیری الیاف نسبت به محور ستون‌ها و ... بر بهبود مشخصه‌های مقاومتی و شکل‌پذیری پرداخته‌اند [۲-۳]. مطالعات قبلی در خصوص تقویت ستون‌های بتن آرمه با مصالح FRP به طور کلی بر روی ستون‌های کوتاه و در شرایط مختلف انجام گرفته است [۴]. در مقایسه با حجم گسترده مطالعات نظری و تجربی موجود در زمینه ستون‌های کوتاه تقویت شده با FRP، مطالعات مرتبط با ستون‌های لاغر تحت بارهای برون محور - و به‌ویژه با برون‌محوری دو جهته - کاملاً محدود است.

مستوفی‌نژاد و سعادت‌مند (۱۳۸۷) [۵] نتایج تحلیل غیرخطی ستون‌های بتن مسلح را در شرایط گوناگون ترکیب بار جانبی و بارمحوری، با در نظر گرفتن اثر محصورشدگی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه انجام شده بین ستون‌های بدون محصور شونده و با محصور شونده ناشی از استفاده از الیاف کامپوزیت کربنی CFRP به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر حاکی از افزایش ۶۴/۴ درصدی ظرفیت محوری متناظر کمانش در نمونه محصور شده است.

تأثیر تقویت ستون‌های مربعی با الیاف CFRP یک جهته و دو جهته موضوع مطالعه تجربی‌ای است که توسط تاوو و همکاران (۲۰۰۸) [۶] انجام گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که مقاومت نهایی ستون‌های تقویت شده با الیاف عرضی CFRP تفاوت چندانی با ستون‌های تقویت نشده ندارد. با این حال، آنها نشان داده‌اند که افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری ستون با تقویت همزمان با الیاف طولی و عرضی حاصل می‌شود. به علاوه آنها نشان داده‌اند

برون محوری پرداخته و عملاً ترکیب نیروی محوری و گشتاور خمشی را در روابط ارائه شده مورد توجه قرار نداده است. به نظر می رسد روابط فعلی موجود در نشریه صرفاً افزایش مقاومت فشاری بتن را به علت اثرات محصورکنندگی ناشی از لایه های FRP در نظر می گیرد. با این وصف مطالعات قبلی (مراجع فوق الذکر) حاکی از تاثیراتی به مراتب بهتر در صورت استفاده از لایه های FRP (در شرایط قرارگیری طولی یا عرضی) بر روی مقاومت و شکل پذیری ستون های بتن آرمه است.

تحقیق حاضر توسعه روش ایجاد منحنی اندرکنش در مطالعه روکا (۲۰۰۹) [۷] است که در آن نحوه ایجاد منحنی های اندرکنش برای ستون های بتن آرمه تقویت شده با مصالح FRP بر اساس اصول تعادل و سازگاری کرنش ها در ناحیه کشش-کنترل نیز مورد توجه قرار می گیرد. به علاوه، ضمن توسعه روش های موجود برای شرایط تقویت با الیاف عرضی (نسبت به محور طولی ستون) روابط جدیدی برای الیاف طولی تنها و نیز ترکیب آن ها ارائه می شود. نشان داده خواهد شد که استفاده از الیاف طولی به بهبود عملکرد ستون از نقطه نظر باربری در ناحیه کنترل کشش منجر می شود. همچنین روشی برای ارزیابی تأثیر تقویت ستون های بتنی مسلح تقویت شده با مصالح FRP تحت اثر نیروی محوری و خمش دو محوره (برون محوری دو جهته بار) به عنوان یک حالت بسیار با اهمیت در کارهای عملی مقاوم سازی از نقطه نظر باربری پیشنهاد شده و روش کار ضمن صحت سنجی با مطالعات آزمایشگاهی، طی یک مطالعه موردی نشان داده خواهد شد.

۲- ایجاد منحنی های اندرکنش ساده شده نیروی محوری و گشتاور خمشی یک محوره با استفاده از

سازگاری برای ستون های تقویت شده با الیاف عرضی

در این بخش روش ایجاد منحنی های اندرکنش ساده شده ستون های تقویت نشده و تقویت شده در شرایط خمش تک محوره و با استفاده از الیاف عرضی مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش های بعد، حالات با الیاف طولی و نیز ترکیب الیاف طولی و عرضی و نیز خمش دو محوره توسعه داده شده و مورد توجه قرار خواهد گرفت. جدول ۱ عمده پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان داده و به سایر پارامترها در متن مستقیماً اشاره شده است.

وصف، از دیدگاه تغییرات شکل پذیری، اختلاف بیشتری بین مدل های نظری و نتایج آزمایشگاهی دیده می شود. تصور می شود که دلیل این امر تاثیر قابل توجه برون محوری نیرو بر کرنش محوری نهایی ستون محصور است؛ موضوعی که برای پیش بینی ظرفیت تغییر شکلی ستون تقویت شده حائز اهمیت است و در پیش تر محاسبات نظری به دقت لحاظ نشده است.

پونورای و همکاران (۲۰۱۳) [۱۳] پنج نمونه ستون بتن آرمه مربعی محصور با لایه های عرضی CFRP را در مقیاس کوچک تحت بارگذاری محوری و خمش دو محوره قرار دادند و همچنین با انجام یک مطالعه تحلیلی و مقایسه نتایج آن با نتایج تجربی دریافتند که سازگاری خوبی بین نتایج نظری و تجربی وجود دارد. مطالعه آنها حاکی از آن است که تقویت ستون ها به روش فوق باعث افزایش ظرفیت باربری و نیز شکل پذیری ستون های لاغر می شود. رهایی و اکبرپور (۲۰۱۳) [۲] به بررسی آزمایشگاهی ستون های بتن آرمه با مقطع مستطیل شکل مقاوم سازی شده با الیاف FRP تحت بارگذاری خارج از محور پرداخته اند. در این مطالعه چندین پارامتر شامل ضخامت FRP، جهت گیری الیاف و میزان خروج از مرکزیت نیروی محوری در نظر گرفته شده اند. نشان داده شده است که با افزایش ضخامت FRP به مقاومت و شکل پذیری نمونه ها افزوده می شود و نتایج جهت گیری الیاف نیز با هم مقایسه شده اند. از طرفی دیگر نشان داده شده است که افزودن یک لایه الیاف طولی به جای الیاف عرضی، باعث افزایش شکل پذیری شده است.

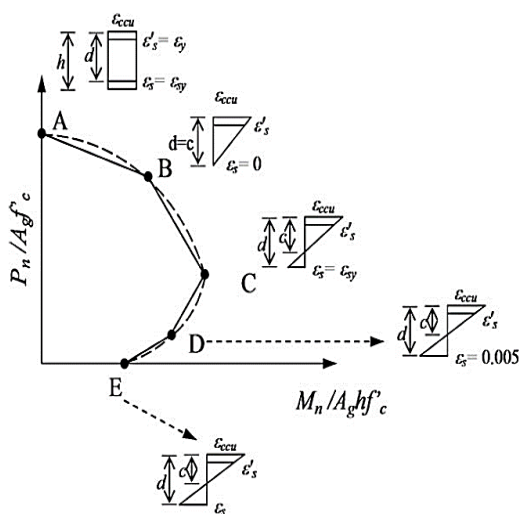
مطالعات متعدد نظری و آزمایشگاهی دیگری نیز بر روی رفتار ستون های محصور شده با الیاف FRP که در معرض نیروی محوری و گشتاور خمشی قرار گرفته اند، انجام شده است [۱۴-۱۹]. نکته قابل توجه عدم پرداختن به موضوع خمش دو محوره در بیشتر آن ها به طور خاص و با جزئیات کامل است. این در حالی است که در کارهای عملی مهندسی و به ویژه در سازه های بتنی درجا، ستون ها به علت بارهای ثقلی و جانبی و یا ترکیب آن ها تحت اثر خمش دو محوره قرار گرفته و تقویت چنین ستون هایی در پروژه های مقاوم سازی از اهمیت به سزایی برخوردار است. در حال حاضر نشریه شماره ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی [۲۰] به عنوان مرجعی کاربردی برای تقویت اجزای بتنی مسلح با مصالح FRP در کشور مورد استفاده قرار می گیرد. با این وصف، نشریه مذکور اساساً به موضوع ستون های تحت اثر بار محوری بدون

تحلیل ستون‌های بتن آرمه محصور شده با لایه‌های عرضی FRP مشابه ستون‌های بتن مسلح عادی (بدون لایه‌های مذکور) است؛ با این تفاوت که مدل تنش- کرنش بتن در ناحیه فشاری متفاوت است [۲۱-۲۲]. اساساً در تحلیل ستون‌های تقویت شده فرض می‌شود که مقطع دچار اعوجاج نمی‌شود، مقاومت کششی بتن ناچیز است و لغزشی بین بتن و فولاد و همچنین بتن و الیاف رخ نمی‌دهد. اغلب برای ساده‌سازی، با دقت مناسبی می‌توان منحنی اندرکنش ستون‌های تقویت شده و نشده را با استفاده از ۵ نقطه کلیدی رفتاری ستون و اتصال خطی آن‌ها به هم ایجاد نمود (شکل ۱) [۷]. ایجاد و استفاده از منحنی ساده شده برای ارزیابی ستون‌های تقویت شده با مصالح FRP ساده و به نسبت سرراست است.

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 موثر	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	$\epsilon_{cu} = 0.003$	حداکثر کرنش محوری بتن غیرمحصور
C_E	ضریب کاهش محیطی	$\epsilon'_t = 2f'_c(E_c - E_2)$	کرنش انتقالی
	شیب قسمت خطی		
$E_2 = (f'_{cc} - f'_c)/\epsilon_{ccu}$	منحنی تنش-کرنش محصور	ϵ_{fu}^*	حداکثر کرنش FRP
E_c	مدول الاستیسیته بتن	$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$	حداکثر کرنش نهایی طراحی FRP
E_f	مدول الاستیسیته FRP	ϵ_{sy}	کرنش نظیر جاری شدن آرماتورها
\emptyset	ضریب کاهش مقاومت	ψ_f	ضریب کاهش مقاومت FRP

با توجه به اهمیت این بخش، روابط موجود در ادبیات فنی برای تقویت با الیاف عرضی با یک تغییر جزئی در این مقاله دوباره آورده شده است. نقاط کلیدی در منحنی اندرکنش ساده شده فوق‌الذکر با استفاده از فرضیات متعارف در تحلیل اجزای بتن آرمه [۷] مطابق شکل ۱ عبارتند از:



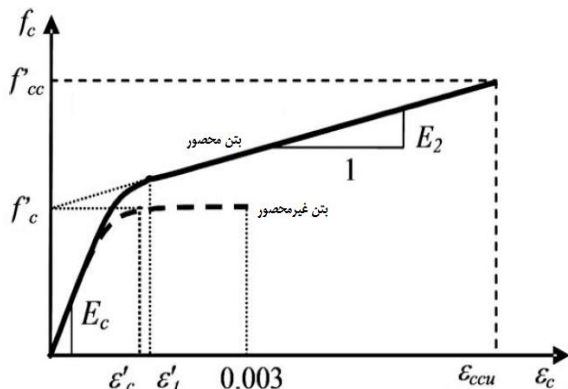
شکل ۱- منحنی اندرکنش ساده شده

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 لایه آرماتور در ناحیه 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

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 لایه آرماتور طولی مقطع برابر 0.005 است.

نقطه E: این نقطه مربوط است به شرایط متناظر خمش خالص بدون نیروی محوری.



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش بتن غیرمحصور و محصور در FRP بر اساس مدل لام و تنگ [۲۳-۲۴]

این مدل در محدوده های کرنشی مختلف از روابط زیر تبعیت می کند:

$$f_c = \begin{cases} E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \epsilon_c^2 & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon'_t \\ f'_c + E_c \epsilon_c & \epsilon'_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{ccu} \end{cases} \quad (4)$$

$$\epsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (5)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\epsilon_{ccu}} \quad (6)$$

که در آن f_c و ϵ_c تنش و کرنش محوری بتن، E_c مدول الاستیسیته 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 ۷ بیان می شود:

$$f'_{cc} = f'_c + 3.3k_a f_1 \quad (7)$$

در رابطه فوق، پارامتر k_a ضریب «اثر هندسی» است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. فشار محصور کنندگی f_1 در مورد مقاطع دایره ای و غیردایره ای بر مبنای اصول تعادل و سازگاری کرنش ها و از روابط زیر محاسبه می شود [۷]:

$$f_1 = \begin{cases} \frac{2nt_f E_f \epsilon_f}{\sqrt{b^2 + h^2}} & \text{ستون غیردایره ای} \\ \frac{2nt_f E_f \epsilon_f}{D} & \text{ستون دایره ای} \end{cases} \quad (8)$$

در معادله ۸ کرنش موثر ϵ_{fe} بر اساس فاکتور اثر k_ϵ و حداکثر کرنش کششی ϵ_{fu} محاسبه می شود ($\epsilon_{fe} = k_\epsilon \epsilon_{fu}$). سایر پارامترها در جدول ۱ آورده شده اند. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی لام و تنگ، مقدار $k_\epsilon = 0.586$ پیشنهاد گردیده است [۲۳]. به طور مشابه کری و هری [۲۶] مقدار 0.58 را برای این کمیت پیشنهاد داده اند. در مقاله

در نمودار اندرکرنش شکل ۱ نقطه A فشار خالص محوری بدون گشتاور خمشی را نشان می دهد. برای نقاط B، C و D موقعیت تارخشی بر اساس تشابه مثلث ها در دیاگرام کرنش بدست می آید. نقطه E نیز نشانگر خمش خالص بدون نیروی محوری است که بر اساس نظریه های 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 $M_n=0$):

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

P_n برای الیاف طولی همان معادله ۱ است؛ زیرا از اثر محصور کنندگی 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 انتگرال گیری از تنش محاسبه می شوند. این انتگرال گیری برای مقاطع غیر دایره ای در معادله های ۲ و ۳ نشان داده شده است:

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

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

در معادلات بالا C فاصله تارخشی تا دورترین تار فشاری مقطع است. A_{si} ، f_{si} و d_{si} مساحت، تنش و فاصله تا مرکز هندسی مقطع در لایه I-ام آرماتورهای طولی (خمشی) است. لامتنغیر انتگرال گیری در ناحیه فشاری مقطع است. مقاومت فشاری f_c از مدل لام و تنگ [۲۳-۲۴] استفاده شده است. این مدل بر اساس ارزیابی مجموعه ای از مدل ستون های محصور شده با الیاف FRP با حداقل بعد 300 میلیمتر تحت فشار خالص محوری انتخاب شده اند [۲۵].

مدل لام و تنگ که در شکل ۲ نشان داده شده است، یکی از مناسب ترین مدل ها برای تخمین حداکثر مقاومت و کرنش فشاری محصور برای ستون های بتن مسلح دایره ای و غیردایره ای محصور شده با مصالح FRP است [۷]. منحنی تنش-کرنش این مدل از دو قسمت سهمی گون و خطی تشکیل شده است (شکل ۲) که در کرنش انتقالی

می‌رود که در ناحیه کنترل-فشار منحنی اندرکنش افزایش مقاومتی رخ ندهد. این موضوع در معادله ۱۲ نیز اثر داده شده است:

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

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

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

۴- ایجاد منحنی‌های اندرکنش ساده شده نیروی محوری و گشتاور خمشی یک محوره با استفاده از سازگاری برای

ستون‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی طولی و عرضی

در این بخش روش ایجاد منحنی‌های اندرکنش ساده شده ستون‌های تقویت نشده و تقویت شده در شرایط خمش تک‌محوره و فقط با استفاده از الیاف ترکیبی طولی و عرضی 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 شده ستون‌های محصور شده (تقویت شده با مصالح FRP) و نیز ستون‌های محصور نشده (تقویت نشده)، لازم است ۵ نقطه A، B، C، D و E (که قبلاً در شکل (۱) معرفی شدند) محاسبه شود.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در صورت استفاده از الیاف طولی، به دلیل عدم محصور کنندگی کافی به وسیله این الیاف، منطقی است که از افزایش مقاومت محوری صرف نظر شود. در نتیجه معادلات ۱۲، ۱۳ و ۱۴ بخش قبل برای حالتی که الیاف ترکیبی عرضی و طولی استفاده می‌شود، به صورت روابط ۱۵ الی ۱۷ بازنویسی می‌شوند:

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

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

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

حاضر، نگارندگان برای مقاصد طراحی و در جهت اطمینان پارامتر k_{ε} برابر ۰/۵۵ در نظر گرفته‌اند. بر اساس پیشنهادات کمیته ACI-440 [۲۷] کرنش موثر FRP در حالت گسیختگی (ε_{fe}) در اعضای تحت ترکیب نیروی محوری و گشتاور خمشی به حداقل دو مقدار ۰/۰۴ و $k_{\varepsilon}\varepsilon_{fu}$ محدود می‌شود. در مدل لام و تنگ حداکثر کرنش فشاری بتن محصور شده با مصالح FRP با معادله زیر بیان می‌شود:

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

کرنش فشاری بتن غیر محصور (ε'_c) در رابطه فوق برابر ۰/۰۰۲ در نظر گرفته می‌شود. مقدار کرنش نهایی فشاری بتن محصور نشده (ε_{cu}) نیز بر اساس آیین‌نامه ACI 318-08 [۲۸] برابر ۰/۰۰۳ در نظر گرفته شده است. ضرایب اثر هندسی k_a و k_b بر اساس معادلات ۱۰ و ۱۱ قابل محاسبه‌اند. برای مقاطع دایره‌ای این مقادیر برابر ۱ و برای مقاطع غیردایره‌ای به دو پارامتر نسبت مساحت محصور شده موثر ($\frac{A_e}{A_c}$) و نسبت وجه ($\frac{h}{b}$) بستگی دارند:

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

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.5} \quad (11)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\frac{(\frac{h}{b})(h-2r)^2 + (\frac{h}{b})(b-2r)^2}{3Ag} \right] - \rho_g}{1 - \rho_g}$$

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

۳- ایجاد منحنی‌های اندرکنش ساده شده نیروی محوری و گشتاور خمشی یک محوره با استفاده از سازگاری برای

ستون‌های تقویت شده با الیاف طولی

در این بخش روش ایجاد منحنی‌های اندرکنش ساده شده ستون‌های تقویت نشده و تقویت شده در شرایط خمش تک‌محوره و فقط با استفاده از الیاف طولی مورد توجه قرار می‌گیرد. برای این کار همان معادلات ۱، ۲ و ۳ بخش قبل قابل کاربرد است؛ با این تفاوت که به علت عدم وجود الیاف عرضی و در نتیجه عدم وجود اثرات محصور کنندگی، مشخصات مقاومتی مصالح بتن تغییری نخواهد کرد. بنابراین معادلات فوق‌الذکر به صورت معادلات ۱۲، ۱۳ و ۱۴ بازنویسی می‌شوند. شایان ذکر است که به علت عدم تحمل فشار توسط الیاف FRP، انتظار

$$I = \frac{bc^2 f_c'}{2} - bc f_c' \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bc^2 E_2}{3} \varepsilon_{ccu} - \frac{bc E_2}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) \varepsilon_{ccu} \quad (9-22)$$

مقادیر f_{fi} و f_{si} به ترتیب تنش در لایه های آرماتور و مصالح FRP بوده که از طریق تشابه مثلث ها در دیاگرام توزیع کرنش محاسبه می شوند. این مقادیر وابسته به موقعیت تاریختی هستند. تنش در لایه های آرماتور برای فشار، مثبت و برای کشش، منفی در نظر گرفته می شود. لازم به توجه است که الیاف FRP صرفاً ظرفیت کششی داشته و عملاً قابلیت تحمل فشار برای آن ها تعریف نمی شود. از طرفی دیگر، در فرمولاسیون فوق برای ساده سازی، الیاف FRP به صورت اجزاء هم ردیف لایه های آرماتور مدل شده است. یادآوری می شود براساس روش طراحی آیین نامه ACI 318-08 [28]، ظرفیت نیروی محوری اسمی تحت شرایط فشار محوری خالص (نقطه A در منحنی اندرکنش) برای ستون دارای آرماتور عرضی به $1/80$ مقدار ظرفیت محوری خالص اسمی محدود می شود. برای ستون های دارای آرماتور عرضی، بر اساس توصیه های ACI 318-08 [28] 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 شده اند. برای توسعه این روش به حالت کلی تر گشتاور خمشی دو محوره، می توان گشتاورهای خمشی نهایی دو محوره را از روابط ارائه شده در منابع معتبر [29] به گشتاورهای تک محوره تبدیل نمود. گشتاورهای معادل یک محوره، بستگی به نسبت گشتاورهای خمشی نهایی دو جهت داشته و از رابطه 23 قابل محاسبه است:

$$\text{If } \frac{M_{uy}}{M_{ux}} > \frac{b}{h} \rightarrow M_{ueq} = M_{uy} + 0.55 M_{ux} \cdot b/h \quad (23)$$

$$\text{If } \frac{M_{uy}}{M_{ux}} \leq \frac{b}{h} \rightarrow M_{ueq} = M_{ux} + 0.55 M_{uy} \cdot b/h$$

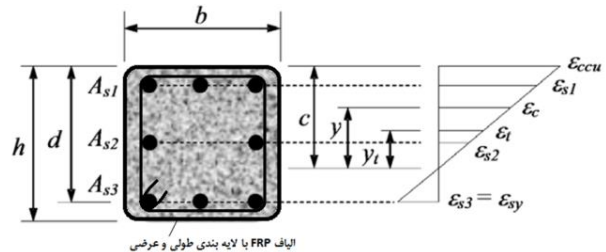
در این رابطه، M_{ux} و M_{uy} به ترتیب گشتاور خمشی نهایی ستون تحت اثر بارهای ضریب دار وارده حول محورهای X و Y مقطع بوده و b و h نیز به ترتیب بعد مقطع در امتداد محورهای X و Y است.

5- صحت سنجی روابط پیشنهادی از طریق مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی موجود

به منظور بررسی فرمولاسیون پیشنهادی توسعه یافته در مطالعه حاضر، منحنی اندرکنش برای نمونه های آزمایشگاهی مورد مطالعه رهایی و اکبرپور [2] با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه و ترسیم خواهند

پارامتر مختصاتی y_t بر روی مقطع عرضی، مبدا آن تار خنثی و در ناحیه بتن فشاری قرار دارد و مربوط به مرز کرنش انتقالی است، با استفاده از معادله 18 و با توجه به شکل 3 محاسبه می شود:

$$y_t = c * \frac{\varepsilon_t'}{\varepsilon_{ccu}} \quad (18)$$



شکل 3- نمودار توزیع کرنش در مقطع

پس از انتگرال گیری و بازنویسی معادلات 15، 16 و 17 با استفاده از ضرایب A, B, C, D, E, F, G, H, I و معادلات 19، 20 و 21 به صورت زیر به دست می آیند. ضرایب فوق الذکر به طور جداگانه در معادلات (1-22) الی (9-22) آورده شده اند. معادله 20 و 21 به ترتیب برای حالت با الیاف عرضی و حالت با الیاف ترکیبی عرضی و طولی نگاشته شده اند.

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

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

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

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

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

$$C = -b f_c' \quad (3-22)$$

$$D = b c f_c' + \frac{b c E_2}{2} \varepsilon_{ccu} \quad (4-22)$$

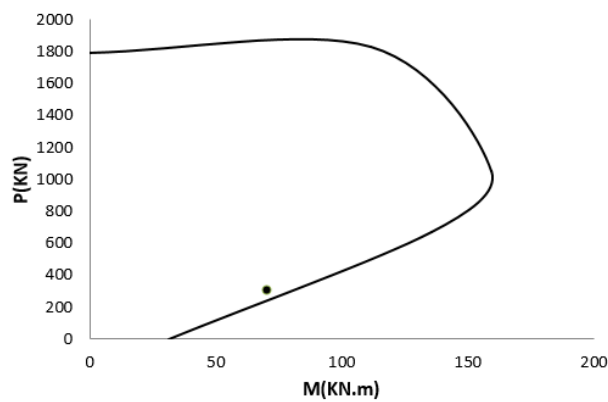
$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16 f_c'} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (5-22)$$

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

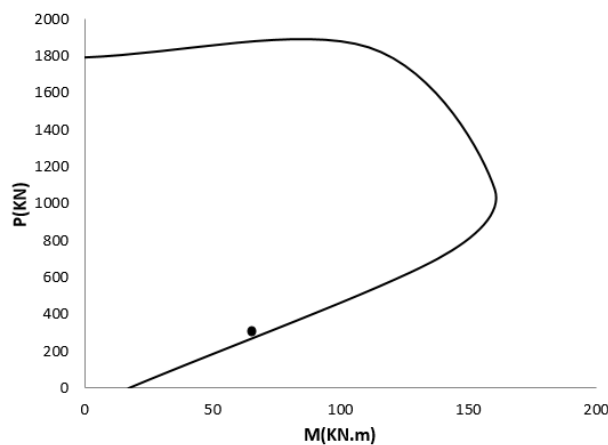
$$G = -\left(\frac{b}{2} f_c' - b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right) \quad (7-22)$$

$$H = b f_c' \left(c - \frac{h}{2} \right) \quad (8-22)$$

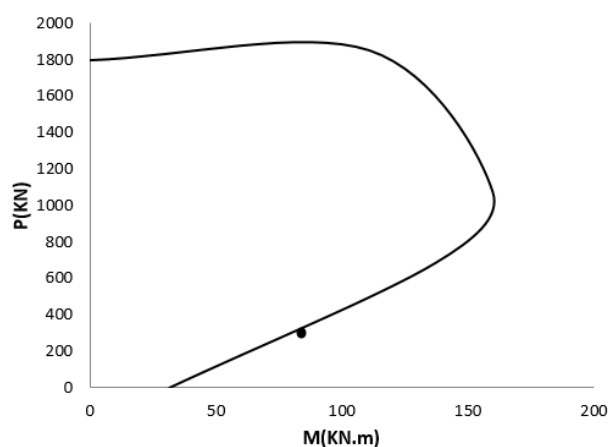
تقریب مناسبی، نتایج نظری بدست آمده در این تحقیق قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است که در محاسبه منحنی اندرکنش، ضریب کاهش مقاومتی واحد در نظر گرفته شده‌اند.



منحنی اندرکنش ستون تقویت شده — تلاش بحرانی ستون
شکل ۴- منحنی اندرکنش ستون S-225-75-L-1



منحنی اندرکنش ستون تقویت شده — تلاش بحرانی ستون
شکل ۵- منحنی اندرکنش ستون S-225-75-T-1



منحنی اندرکنش ستون تقویت شده — تلاش بحرانی ستون
شکل ۶- منحنی اندرکنش ستون S-225-75-LT-2

شد. نمونه‌های مطالعه 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 مطالعه فوق‌الذکر، سه نمونه ستون تقویت شده فقط با الیاف طولی (با نام S-225-75-L-1)، 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.

جدول ۲- مشخصات هندسی و مقاومتی ستون‌های مورد مطالعه در

مطالعه رهایی و اکبرپور [۲]

$f_{fu} = 336$ Mpa	$E_f = 39944$ Mpa	$\epsilon_{fu} = 9.3$ mm/m	$t_f = 0.166$ mm/layer
$B = 150$ mm	$H = 450$ mm	Bar: 6 ϕ 12	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 که 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-L-1	296.69	22.5	66.76
S-225-75-T-1	274.62	20.6	61.8
S-225-75-LT-2	352.78	26.5	79.4

در مرحله اول، منحنی اندرکنش ستون‌های مورد بررسی با استفاده از روابط ارائه شده در این مقاله و جایگزینی گشتاورهای خمشی دو جهته مندرج در جدول ۳ به گشتاور خمشی یک جهته معادل (از طریق رابطه ۲۳) قابل محاسبه بوده و در اشکال ۴ الی ۶ برای هر یک به طور جداگانه نشان داده شده است. همچنین زوج‌های نیروی محوری و گشتاور خمشی یک جهته معادل نیز برای هر یک از آن‌ها مطابق اعداد جدول ۳ بر روی منحنی‌های اشکال ۴ الی ۶ با دایره توپر نشان داده شده‌اند. این مقادیر در واقع حداکثر بار وارد بر ستون بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه مشخصات شکست (نیروی-محوری، گشتاور خمشی) به منحنی اندرکنش نزدیکتر باشد حاکی از نزدیک بودن نتایج آزمایشگاهی با نتایج نظری ارائه شده است. لذا، با

بوده و از کاتالوگ های موجود استخراج شده است. برخی از ستون های سازه در طبقات همکف و اول به دلیل تغییرات معماری صورت گرفته دارای ضعف می باشند. ستون مورد نظر دارای نیروی محوری و گشتاور خمشی ضریب دار حول محورهای X و Y به ترتیب ۲۳۴۳ کیلونیوتن، ۴۴۳ و ۵۲۴ کیلونیوتن-متر است. لذا ستون انتخاب شده باید توانایی تحمل حداکثر نیروی محوری ۲۶۲۷ کیلونیوتن (افزایش ۱۲/۱۲٪) و گشتاورهای خمشی ۴۷۱ (افزایش ۶/۳٪) و ۵۴۳ (افزایش ۳/۶٪) کیلونیوتن متر را داشته باشد که بر اساس روش اشاره شده در تحقیق حاضر تقویت شده است. لذا به منظور افزایش ظرفیت باربری ستون بهسازی و تقویت آن به وسیله الیاف FRP مدنظر قرار گرفته است. با استفاده از روابط ارائه شده در بخش های قبل منحنی های اندرکنش قابل ترسیم است (شکل ۹). نمودار خط چین، نقطه چین و خط به ترتیب مربوط به منحنی ستون بدون مقاوم سازی، مقاوم سازی شده با ترکیب الیاف طولی و عرضی و الیاف عرضی تنها است.

جدول ۴- مشخصات مصالح، مقاطع و تلاش های داخلی ستون

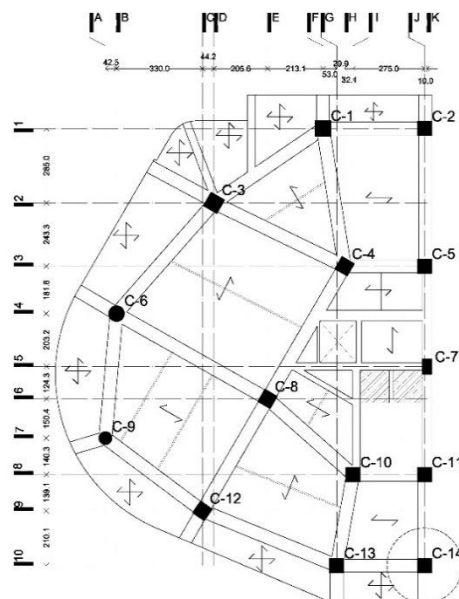
$f_c = 26$ Mpa	Bars: 20Ø25	$B = 600$ mm	$P_u = 2343$ KN
$f_y = 400$ Mpa	$A_g = 3600$ cm ²	$H = 600$ mm	$M_{ux} = 443$ KN.m
$r = 25$ mm	$A_s = 9812$ mm ²	Cover: 70 mm	$M_{uy} = 524$ KN.m

جدول ۵- مشخصات لایه های پوششی FRP مورد استفاده

$f_{fu} = 336$ Mpa	$E_f = 40000$ Mpa	$\epsilon_{fu} = 9.3$ mm/m	$t_f = 0.5$ mm/layer
-----------------------	----------------------	-------------------------------	-------------------------

همان طور که قبلا نیز اشاره شد، اثر محصورکنندگی FRP تأثیر چشم گیری در افزایش ظرفیت باربری ستون ها در ناحیه کنترل-کشش منحنی اندرکنش ایجاد نمی کند. شکل (۹) نیز این موضوع بسیار با اهمیت را نشان می دهد. محدودیت مذکور در استفاده از مصالح FRP با استفاده از روابط توسعه داده شده در این مطالعه برای تقویت با الیاف طولی (و یا ترکیبی طولی و عرضی) قابل رفع است. لازم به ذکر است که مطالعات آزمایشگاهی قبلی [۲ و ۳] نشان داده است که الیاف طولی نیز در افزایش میزان محصور شدگی ستون تاثیراتی دارد که در روابط توسعه داده شده در این مطالعه از آن صرف نظر گردیده است. به همین دلیل، به عنوان یک پیشنهاد اجرایی، در صورت استفاده از روش ترکیبی تقویت با الیاف عرضی و طولی، می توان الیاف طولی را فقط در نواحی بحرانی ستون نیازمند تقویت و افزایش مقاومت

۶- مطالعه موردی: تقویت ستون گوشه طبقه اول یک ساختمان مسکونی ۶ طبقه با الیاف عرضی، طولی و ترکیبی در این بخش با استفاده از روش توسعه داده شده در بخش های قبل، تقویت یک ستون گوشه در سازه یک مجتمع مسکونی نامنظم با لایه های FRP مورد توجه قرار می گیرد. سازه فوق بر اساس ضوابط لرزه ای ویرایش سوم آیین نامه ۲۸۰۰ و ضوابط آیین نامه ACI318-08 [۲۸] برای منطقه با لرزه خیزی زیاد و سطح شکل-پذیری ویژه طراحی شده است. سیستم سقف از نوع تیرچه بلوک و سیستم باربر جانبی قاب خمشی می باشد. مقاومت بتنی درج شده در جدول (۴) مقاومت مشخصه نمونه استوانه ای ۲۸ روزه استاندارد است. شکل (۷) پلان ساختمان و ستون مورد نظر را نشان می دهد. این ستون در طبقه همکف سازه واقع شده است. در جدول ۴ مشخصات مصالح، مقاطع و تلاش های داخلی ستون مورد نظر ستون تقویت نشده آورده شده است.



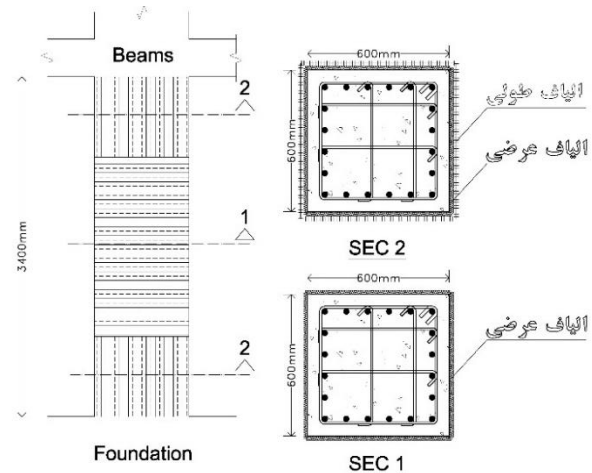
شکل ۷- پلان ساختمان مورد بررسی (ستون مورد نظر واقع روی آکس K10 با خط چین نشان داده شده است)

تحلیل سازه، با فرض ترک خوردگی اعضا و با در نظر گرفتن $I_{cracked} = 0.35I_g$ برای تیرها (I_g ممان اینرسی کاهش نیافته مقطع تیر حول محور قوی آن است) و $I_{cracked} = 0.70I_g$ برای ستون ها (I_g ممان اینرسی کاهش نیافته مقطع ستون حول هر دو محور آن است) انجام شده است. در تحلیل سازه اثرات وزن ($P-\Delta$) نیز لحاظ گردیده است. در جدول ۵ مشخصات لایه های پوششی FRP مورد استفاده، آورده شده است. این مشخصات مربوط به لایه های از جنس کربن

۷- بررسی نتایج

در این مطالعه به بررسی منحنی اندرکنش ستون‌های بتن مسلح با مقطع مستطیلی با استفاده از الیاف FRP پرداخته شد. با توسعه روش‌های نظری موجود اقدام به رسم منحنی اندرکنش برای حالت مقاوم‌سازی ستون با جهت‌گیری الیاف عرضی، طولی و ترکیب الیاف طولی و عرضی شد. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که: الیاف با جهت‌گیری عرضی باعث بالا رفتن مقاومت (مخصوصاً در ناحیه کنترل فشار)، الیاف طولی موجب بالا رفتن شکل‌پذیری و افزایش مقاومت (مخصوصاً در ناحیه کنترل کشش) می‌گردد. لذا، تطبیق نتایج نظری این مقاله با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نمودار مربوط به مقاوم‌سازی ستون برای الیاف عرضی در ناحیه کنترل فشار نسبت به ناحیه کنترل کشش، و برای الیاف طولی در ناحیه کنترل کشش نسبت به ناحیه کنترل فشار بازتر می‌گردد و واضح است که انتظار می‌رود ترکیب الیاف طولی و عرضی باعث افزایش مقاومت (بازتر شدن منحنی اندرکنش) در هر دو ناحیه شود. بدین معنی که نصب الیاف عرضی بر روی ستون، به دلیل ایجاد محصوریت، باعث افزایش ظرفیت فشاری مقطع می‌گردد، لذا هرچه تعداد لایه‌های عرضی بالاتر رود منحنی اندرکنش در ناحیه کنترل فشار مختصات-های بیشتری را پوشش می‌دهد. از طرف دیگر، استفاده از الیاف طولی به دلیل عدم ایجاد محصوریت در بتن، تغییری در ظرفیت فشاری مقطع ایجاد نخواهد کرد و عمده تاثیر این الیاف در افزایش ظرفیت خمشی ستون است. لذا انتظار می‌رود با افزایش تعداد لایه‌های طولی الیاف در ناحیه کنترل کشش منحنی اندرکنش بهبود بیشتری ایجاد گردد. بنا بر نتایج ارائه شده برای افزایش ظرفیت فشاری و خمشی ترکیب هر دو الیاف طولی و عرضی بیشترین اثربخشی را داشته باشد. انتظار می‌رود در غیاب یک روش استاندارد آیین نامه، روش ارائه شده در این مقاله گام مؤثری در ارائه یک روش عمومی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه تحت اثر توام نیروی محوری و گشتاور خمشی دو محوره با استفاده از الیاف پلیمری باشد. از طرف دیگر می‌توان به منظور نزدیک کردن نتایج آزمایشگاهی با نتایج نظری، پارامترهای دیگری از جمله اثر محصور کننده الیاف پلیمری در جلوگیری از کمانش آرماتورها و اثر محصور کننده الیاف طولی (که نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی تاثیر این پارامترها را نشان می‌دهد) در روابط ارائه شده وارد نمود. در این صورت، تخمین افزایش ظرفیت باربری ستون واقع

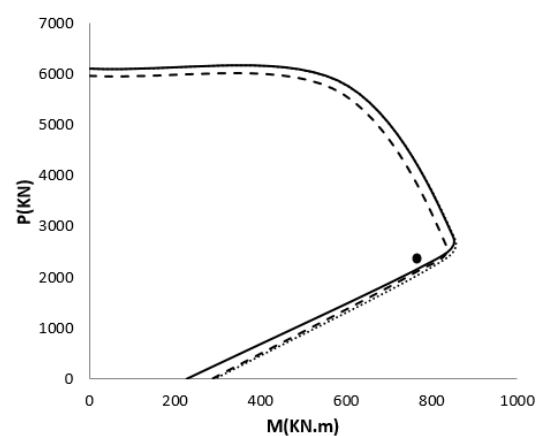
(عموماً نواحی فوقانی و تحتانی ستون در قاب‌های خمشی متعارف) مورد استفاده قرار داد و در عین حال الیاف عرضی در سراسر ارتفاع ستون اجرا شود. نگارندگان بر این باورند که چنین روش اجرایی به اقتصاد طرح کمک شایانی می‌کند. ستون تقویت شده در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- نما و مقطع ستون تقویت شده با الیاف‌های طولی و

عرضی FRP

نمودار نقطه‌چین که معرف مقاوم‌سازی با ترکیب الیاف طولی و عرضی است در ناحیه کنترل کشش منطبق بر منحنی خط‌چین (صرفاً الیاف طولی) و در ناحیه کنترل فشار منطبق بر منحنی اندرکنش ترکیب الیاف طولی و عرضی است. بنابراین، همانطور که مشاهده می‌شود با هر کدام از سه روش فوق انجام مقاوم‌سازی ستون امکان‌پذیر می‌باشد. لذا ترجیحاً استفاده از ترکیب الیاف عرضی با طولی (در نواحی بحرانی) مناسب‌تر خواهد بود.



شکل ۹- منحنی اندرکنش برای حالت‌های مختلف تقویت

- [8] Fitzwilliam J, and Bisby L. A. Slenderness effects on circular CFRP confined reinforced concrete columns. *J. Compos. Constr.* 2010; 14(3):280–288.
- [9] Gajdosova K, Bilcik J. Slender reinforced concrete columns strengthened with fibre reinforced polymers. *Slovak J. Civil Eng.* 2011; 19(2):27–31.
- [10] Teng J.G, Jiang T. Theoretical model for slender FRP-confined circular RC columns. *Construction and Building Materials* 2012; 32: 66–76.
- [11] Hadi MNS. Behaviour of FRP wrapped HSC columns under different eccentric loads. *Compos Struct* 2007; 62(2):145–153.
- [12] El Maaddawy M. Strengthening of eccentrically loaded reinforced concrete columns with fiber-reinforced polymer wrapping system: experimental investigation and analytical modeling. *ASCE J Compos Constr* 2009; 13(1):13–24.
- [13] Punurai W, Chen J, Hsu CTT. Biaxially loaded RC slender columns strengthened by CFRP composite fabrics. *Engineering Structures*, 2013; (46): 311–321.
- [14] Fardis MN, Khalili H. Concrete encased in fiberglass-reinforced plastic. *ACI J.* 1981; 78(6):440–446.
- [15] Saadatmanesh H, Ehsani MR, Li MW. Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. *ACI Struct J* 1994; 91(4):434–447.
- [16] Nanni A, Norris M. FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure compression. *Construction and Building Materials* 1995; 9(5): 273–281.
- [17] Chaallal O, Shahawy M. Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading. *ACI Structural J* 2000; 97(4):659–68.
- [18] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. FRP strengthened RC structures. West Sussex, UK: John Wiley and Sons. 2002; 266.
- [19] Di Nardo A, Faella C, Realfonzo R. A design procedure of FRP confining systems for upgrade R/C columns. In: Mirmiran A, Nanni A, editors, Third international conference on FRP composites in civil engineering (CICE), Miami, USA, CDROM; 2006; 219.
- [۲۰] سازمان و مدیریت برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله. راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، ۱۳۸۵.

بینانه تر خواهد بود. با این وجود، نتایج این مطالعه نشان می دهد که روش ارائه شده دقت کافی در کارهای مهندسی مقاوم سازی دارد.

۸- قدردانی

این مطالعه بخشی از نتایج یک طرح پژوهشی با عنوان "انتخاب روش بهینه تقویت ستون های بتن مسلح تحت اثر خمش تک محوره و دو محوره" است که تحت حمایت مالی سازمان نظام مهندسی استان کردستان به انجام رسیده است. نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی را از سازمان نظام مهندسی ساختمان استان کردستان به جهت حمایت از این طرح مطالعاتی دارند. مسؤلیت کلیه مطالب ارائه شده در این مقاله بر عهده نگارندگان بوده و مسؤلیتی متوجه سازمان نظام مهندسی ساختمان استان کردستان نمی باشد.

همچنین نگارندگان از دو داور محترم که با نظرات خود مقاله را از نظر کیفیت محتوایی بهبود بخشیدند، کمال تشکر را دارند.

۹- مراجع

- [1] Saadatmanesh H, Ehsani MR, Li MW. Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. *ACI Struct J* 1994; 91(4):434–47.
- [2] Rahai A, Akbarpour H. Experimental investigation on rectangular RC columns strengthened with CFRP composites under axial load and biaxial bending. *Composite Structures*, 2014; 108: 538-546.
- [3] Lin H, Elisa D and Chen W,. Sensitivity Study and Design Procedure for FRP Wrapped Reinforced Concrete Circular Columns. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2004, 148-162.
- [4] Galal K, Arafa A, Ghobarah A. Retrofit of RC square short columns. *Engineering Structures* .2005; 27(5):801–813.
- [۵] مستوفی نژاد، د و سعادت مند، د. تاثیر حالت های محصورشدگی حاصل از کامپوزیت CFRP بر مقاومت و شکل پذیری ستون بتن مسلح لاغر دایروی بر اساس نتایج تحلیل غیر خطی. مجله فنی و مهندسی مدرس. پاییز ۱۳۸۷ شماره ۳۳.
- [6] Tao Z, and Yu Q. Behaviour of CFRP-strengthened slender square RC columns. *Mag. Concrete Res.* 2008; 60(7): 523–533.
- [7] Rocca S, Galati N, Nanni A, Interaction diagram methodology for design of FRP-confined reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 2009; 23:1508-1520.

- [21] MacGregor J. Reinforced concrete mechanics and design. 6nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pierson Inc, 2012, 1157.
- [22] Bank LC. Composites for construction: structural design with FRP materials. Hoboken, N.J. NJ, USA: John Wiley and Sons, 2006, 560.
- [23] Lam L, Teng J. Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. Construction and Building Materials 2003; 17 (6&7): 471–489.
- [24] Lam L, Teng J. Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. J Reinf. Plast. Composites 2003; 22(13):1149–1186.
- [25] Rocca S. Experimental and analytical evaluation of FRP-confined large size reinforced concrete columns. Ph.D. Dissertation. Rolla, MO, USA: University of Missouri-Rolla, 2007, 171.
- [26] Carey S, Harries K. 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, 2003.
- [27] American Concrete Institute, ACI 440.2R, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2008, 80.
- [28] American Concrete Institute, ACI 318-08. Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2008, 443.
- [29] Ray S.S. Reinforced Concrete analysis and design. Blackwell Science, 1995, 543.
- [30] Hadi, M. N. S. & Widiarsa, I.. Axial and flexural performance of square RC columns wrapped with CFRP under eccentric loading. Journal of Composites for Construction, 2012; 16 (6): 640-649.

Retrofitting of RC Columns under Combined Effects of Axial Force and Biaxial Bending Moments Using FRP Materials

S. Manie

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran

E. Jami *

Department of Structural and Earthquake Engineering, Farapishgam Consulting Engineers, Sanandaj, Iran

S.Rostami

Department of Structural and Earthquake Engineering, Farapishgam Consulting Engineers, Sanandaj, Iran

Abstract

Fiber reinforced polymer (FRP) composites are widely used in retrofit 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 the strength and ductility of the retrofitted members.

Keywords: RC columns strengthening, biaxial bending, FRP, retrofitting, interaction curve.

*Corresponding author: jami.rudan@gmail.com